



OPTIK

Mehr als Blau

Die Farben des Wassers, physikalisch betrachtet.

Michael Vollmer



Alexander Mustard, www.alexmustard.com

Abb. 1 Das klare Süßwasser im Silfra Canyon in Island sorgt nicht nur für eine große Sichtweite, sondern auch für ein subtiles Farbenspiel, bei dem viele optische Phänomene zusammenwirken.

Wasser ist wahrlich ein besonderer Stoff, nicht zuletzt wegen seiner teils einzigartigen physikalischen Eigenschaften, wie der Dichteanomalie, der sehr hohen Oberflächenspannung, der höchsten spezifischen Wärmekapazität oder der größten Verdampfungswärme aller Flüssigkeiten [1]. Nicht zufällig inspiriert es immer wieder Forscherinnen und Forscher dazu, sich neuen Fragestellungen zu seinen Eigenschaften zu widmen [2, 3]. Auch seine Farbe, die augenscheinlich am besten beobachtbare Eigenschaft, lohnt einen genaueren physikalischen Blick.

Fast jeder Schwimmbadbesucher, der mit Schwimmbrille unter Wasser umherschaut, kennt das Phänomen: Die Wände haben im Allgemeinen einen leicht bläulichen Farbton. Oft bestehen sie entweder aus weißen Kacheln oder Edelstahl, zeigen also eine wellenlängenunabhängige Reflexion. Wenn dann auch die Lichtquelle wie die Sonne weiß ist, sollte die wahrgenommene Farbe anhand der sie erzeugenden Spektren nur vom Wasser herrühren. Hat Wasser also eine intrinsisch blaue Farbe? Bei der Beantwortung dieser Frage soll es nicht um die scheinbaren Farben des Wassers durch Reflexion farbiger Gegenstände an seiner Oberfläche gehen, sondern um ausgedehnte Wasservolumina, wie sie in natürlichen Gewässern – Flüssen, Seen und Meeren – vorkommen, mit Dimensionen und Tiefen von Dezimetern bis hin zu vielen Kilometern.

Im Idealfall besteht Wasser nur aus H_2O -Molekülen, gekoppelt über Wasserstoffbrückenbindungen. Dem am nächsten kommt das „Reinstwasser“, die höchste technische Reinheitsstufe, bei der Wasser so gut wie keine Fremdstoffe enthält. In der Natur und im Alltag enthält alles Wasser neben gelösten Gasen wie CO_2 oder O_2 auch gelöste Ionen wie die von Natrium, Calcium oder Magnesium sowie Karbonate, Chloride und Sulfate. Der Massenanteil an gelösten Salzen liegt in natürlichem Süßwasser unter 0,1 Prozent. Im Meerwasser erreicht er im Schnitt 3,5 Prozent, beim Extremfall Totes Meer bis zu 28 Prozent. Oberflächensüßwasser und auch Meerwasser kann je nach Eintrag durch Landwirtschaft, Industrie oder Lebewesen weitere Inhaltsstoffe enthalten. Dazu zählen viele suspendierte Teilchen, insbesondere Erde und Sand, sowie mehr oder weniger große Mengen an organischen Substanzen, die sich im Wesentlichen aus Stoffwechsel- und Abbauprodukten von Pflanzen und Tieren zusammensetzen.

Das Spektrum der Inhaltsstoffe ist somit sehr groß. Im Folgenden ist reinstes Wasser möglichst reines auf der Erde verfügbares Süßwasser, d. h. Wasser ohne organische Inhaltsstoffe mit einem geringen Anteil gelöster Salze. Darauf aufbauend lässt sich diskutieren, wie Inhaltsstoffe die optischen Eigenschaften des Wassers verändern. Eine einfache direkt korrelierte Messgröße ist hierbei sowohl qualitativ wie quantitativ die Sichtweite, die von wenigen Zentimetern bei einigen Oberflächengewässern bis hin zu vielen Metern im Meer reichen kann. Unter Sichtweite versteht man generell die Entfernung, in welcher der Kontrast zwischen einem Objekt und dem Hintergrund unter einem bestimmten Schwellenwert sinkt. Dieser wird in der Atmosphäre meist auf zwei Prozent angesetzt.

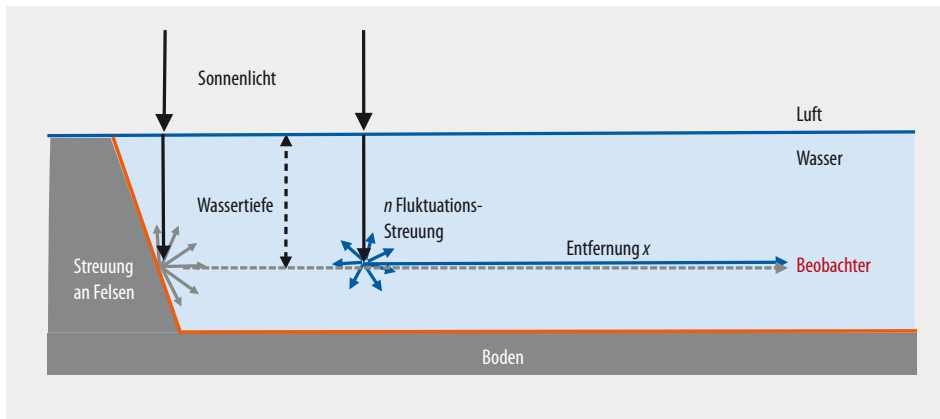


Abb. 2 Die Farbverläufe unter Wasser ergeben sich aus einer Kombination optischer Effekte (vgl. Text).

Licht auf und unter Wasser

Eine ganze Reihe physikalischer Begriffe charakterisiert die Wechselwirkung von Licht mit Materie [4]: Reflexion, Brechung, Absorption, Beugung und Streuung. Der wesentliche materialabhängige Parameter für die Wechselwirkung ist der Brechungsindex $n(\lambda)$, dessen Realteil die Dispersion und dessen Imaginärteil die Absorption beschreibt. Der Brechungsindex lässt sich aus mikroskopischen Modellen der Materie berechnen und hängt damit wesentlich von der Zusammensetzung der Materie ab: Der Brechungsindex von Süßwasser wird sich von dem des Salzwassers unterscheiden – und letzterer wiederum von Wasser, das weitere Inhaltsstoffe enthält. Wegen der großen Vielfalt an Inhaltsstoffen findet man meist nur tabellierte Messwerte für reines Wasser oder definierte Meerwasserproben. Neben der Erforschung der allgemeinen optischen Eigenschaften des Wassers [5 – 7] wurden auch in der Natur beobachtbare Konsequenzen diskutiert [8 – 10]. Genaue quantitative Beschreibungen verwenden bisweilen recht komplexe Strahlungstransportmodelle [5].

Im Folgenden möchte ich zunächst einen vereinfachten Überblick der Prozesse und daraus resultierender Farben des Wassers geben. Wir beginnen mit dem einfachsten Beispiel, sehr reinem Wasser, bevor wir auf die größere Farbvielfalt durch weitere Inhaltsstoffe eingehen. Auf eine quantitative Beschreibung mit Farbmetriken [11, 12] verzichten wir hier.

Die intrinsische Farbe reinen Wassers

Wer im Silfra Canyon in Island taucht (**Abb. 1**), kann extrem klares Süßwasser erleben [13]. Der Canyon befindet sich zwischen der eurasischen und nordamerikanischen tektonischen Platte im Thingvellir Nationalpark in der Nähe von Reykjavik. Das nur zwei bis vier Grad Celsius kalte Gletscherwasser wurde vor dem Einströmen jahrzehntelang durch Lavaschichten gefiltert. Deshalb findet sich hier eines der klarsten und reinsten Wasser auf der Erde – mit Sichtweiten bis zu 100 Meter. Deutlich zu erkennen ist der Farbübergang von den natürlichen Felsfarben in der Nähe der Kamera über Cyantöne der etwas weiter entfernten Wände bis hin zu einem tiefen Blau in großer Entfernung ohne Felshintergrund. Dieses tiefe Blau ist auch Namensgeber des „blue water diving“ in sehr reinem Wasser.

Ein stark vereinfachtes Diagramm kann dabei helfen zu verstehen (**Abb. 2**), wie die Farben auf dem Foto zustande kommen [13]. Die ruhige Wasseroberfläche lässt sich anhand der Spiegelbilder der Felsen und Luftblasen des Tauchers erahnen, der Taucher befindet sich in etwa 15 Meter Entfernung von der Kamera. Das einfallende Licht, hier im Wesentlichen diffuse weißliche Sonnenstrahlung bei bedecktem Himmel, beleuchtet sowohl die Felswände als auch das Wasser zwischen dem Beobachter und den Wänden. Bevor das Licht die Wand oder das Wasser im Sehstrahl erreicht, wird es durch Absorption und Streu-

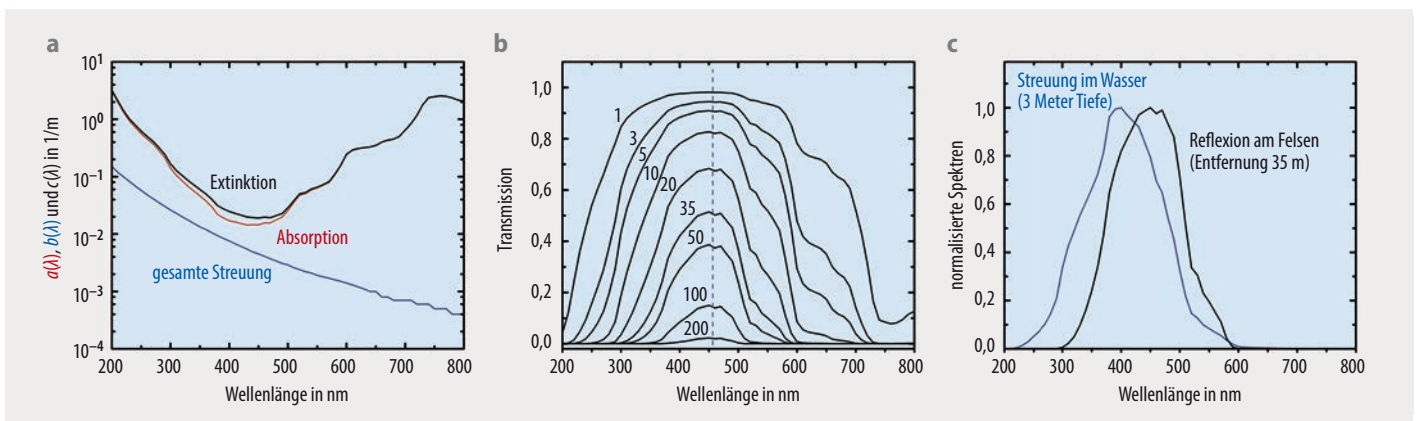


Abb. 3 Aus den Absorptions- und Streukoeffizienten reinen Wassers (a) resultieren die Transmissionsspektren für unterschiedliche Tiefen (b). Der Vergleich der normierten Spektren bei Felsreflexion zu reiner Streuung in Wasser zeigt, dass sich (neben der geringeren Helligkeit) insbesondere der Farbton ins Blaue verschiebt (c).

ung geschwächt. Bei der anschließenden diffusen Streuung (Reflexion) am Fels gelangt ein kleiner Teil des Lichts in Richtung des Beobachters. Ähnliches gilt für die Streuung im Wasser. Dann schwächen Absorption und Streuung wieder das Licht auf dem Weg zum Beobachter. Im Modell startet man vom Weißlichtspektrum des transmittierten Tageslichts und modifiziert es durch wellenlängenabhängige Absorption und Streuung sowie durch die als unabhängig von der Wellenlänge angenommenen Reflexionsspektren der Felswände und des Sandbodens.

Für sehr reines Wasser sind Absorption und Streuung bekannt [7]. Das Bouguer-Lambert-Beersche Gesetz beschreibt die Extinktion nach Durchlaufen der Strecke x : $I(x) = I_0 \exp[-c(\lambda)x]$, wobei $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ der Extinktionskoeffizient der Materie aufgrund von Absorption (a) und Streuung (b) ist (Abb. 3a). Absorption, die mit dem Imaginärteil des Brechungsindex verknüpft ist, entsteht durch elektronische Übergänge reinen Wassers im Ultravioletten und Vibrations-Rotationsbanden im Infraroten. Diese führen zum bekannten Minimum der Absorption im sichtbaren Spektralbereich. Hochgereinigtes destilliertes Wasser hat den niedrigsten möglichen Wert der Absorption, die gelösten Salze in Meerwasser erhöhen dies nur geringfügig durch einen im Wesentlichen wellenlängenunabhängigen Offset.

Die Erklärung für den Streumechanismus in reinem Wasser geht auf Einstein und Smoluchowski zurück. Zufällige Molekülbewegungen im Wasser führen zu entsprechenden Fluktuationen der Molekülzahlen in Volumina ΔV , deren Dimension klein gegenüber der Wellenlänge des Lichts, aber groß gegenüber Atomdurchmessern ist. Beschreibt man die Flüssigkeit in ΔV mithilfe der statistischen Thermodynamik, führen die Dichtefluktuationen zu Brechungsindexfluktuationen. Da an Grenzflächen zwischen Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex immer Reflexion auftritt, führen die Dichtefluktuationen letztlich zu einem Streuprozess. Für den Streukoeffizienten ergibt sich $b(\lambda) \sim 1/\lambda^N$. Der Exponent liegt nahe dem der Rayleigh-Streuung ($N = 4$), da Streuung an kleinen Objekten gegenüber der Wellenlänge λ stattfindet. Allerdings führt die Dispersion des Wassers zu einem leicht höheren Wert ($N = 4,32$).

Verwendet man Werte für $a(\lambda)$ und $b(\lambda)$ nach [7], gestatten es diese, die Abschwächung des Lichts nach dem Durchqueren definierter Entfernungen im Wasser zu berechnen (Abb. 3b). Die so erhaltenen Transmissionsspektren erklären einerseits, wieviel Licht bei senkrechtem Einfall in gewissen Wassertiefen noch ankommt. Bei weniger als einem Meter Tiefe ist Wasser farblos, d. h. sein sichtbares Spektrum ist nahezu unverändert mit sehr hoher Transmission. Dagegen kommt, neben einer Einengung des Spektrums auf blaue Wellenlängen, ab großen Tiefen von einigen Hundert Metern praktisch kein Tageslicht mehr an: Die Tiefsee ist dunkel.

Nicht zuletzt lassen sich mit diesem Modell die Farbänderungen im Silfra Canyon berechnen. Nimmt man beispielsweise Licht in drei Metern Wassertiefe an, das sich – vom Felsen in die Horizontale gestreut – weitere 32 Meter ausbreitet, dann sollte dieses Licht allein durch



2020 NanoScientific Forum Europe Scanning Probe Microscopy (SPM)

September 23 - 25, 2020
Dublin, Ireland

REGISTER FOR NSFE 2020 TODAY

Keynote Speakers

- **Prof. Dr. Franz J. GieBibl**
University of Regensburg, Germany
- **Prof. Dr. Lukas Eng**
Technical University Dresden, Germany
- **Ass. Prof. Kim McKelvey**
Trinity College Dublin, Ireland
- **Prof. Brian Rodriguez**
University College Dublin, Ireland
- **Prof. Silke Christiansen**
Innovation Institute for Technology and correlative Microscopy, Forchheim, Germany
- **Prof. Thorsten Hugel**
University of Freiburg, Germany
- **Prof. Tom Hauffman**
Vrije Universiteit Brussel, Belgium
- **Prof. Ken Nakajima**
Tokyo Institute of Technology, Japan
- **Dr. Fatima Linares Ordenez**
Universtiy of Granada, Spain
- **Prof. Pat Unwin**
University of Warwick, United Kingdom

Conference Topics

Application

- Energy Storage
- Nanophotonics and Nanoelectronics
- Organic, Inorganic and Hybrid Semiconductors
- Nanomaterials and Biotechnology
- *Special Session:* Electrochemical & Electromechanical Properties in Functional Materials

Method

- Nanomechanical and Electrical Characterization
- Characterization of Soft Materials in Liquid Environment
- Advanced Imaging

Submit your Abstract at NSFE 2020

...and win up to **EUR 500 AFM Scholarship**.
Deadline: June 1, 2020



live.parksystems.com/nsfe2020
NSFE@parksystems.com

ATOMIC FORCE MICROSCOPY AT DPG SPRING MEETING 2020

Your Solution for
Research
at the Nanoscale



DRESDEN, 15-20 MARCH 2020

2020 DPG
SPRING MEETING

BOOTH
#29-30

Join us to talk about AFMs that impact science!



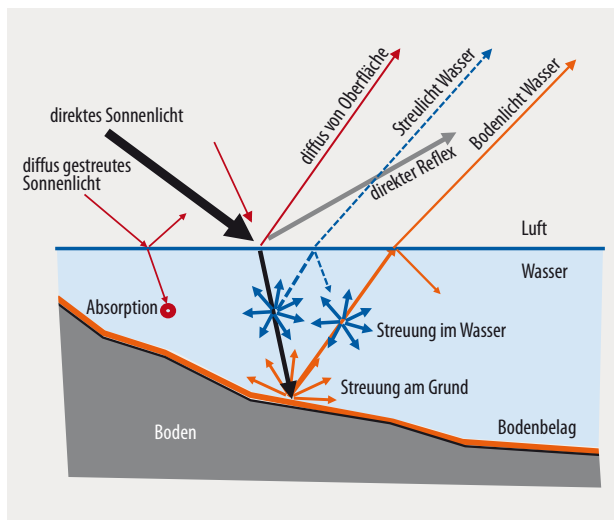


Abb. 4 Der Beobachter nimmt drei Streulichtanteile von der Wasseroberfläche (rot), aus dem Wasser (blau) sowie vom Boden (orange) wahr.

die Extinktion im Wasser ein Transmissionsspektrum für 35 Meter haben (**Abb. 3b**). Eine zusätzliche wellenlängen-unabhängige Reflexion am Felsen ändert dabei im Wesentlichen nur die Helligkeit, nicht aber das Spektrum, d. h. den wahrgenommenen Farbton. Das zeigt sich beim Vergleich des für diese Bedingungen berechneten Spektrums mit demjenigen, das einzig durch die Streuung im Wasser entsteht (**Abb. 3c**, Entfernung gegen unendlich). Als Ergebnis finden sich wie erwartet blau-grüne Spektren in der Nähe im Vergleich zu intensiverem Blau geringerer Helligkeit bei unendlicher Ausbreitung im horizontalen Wasser (für eine quantitative Farbanalyse siehe [13]). Dieses Blau des Wassers entspricht übrigens dem des Phänomens der „blauen Berge“, bei denen die Lichtstreuung in der Atmosphäre bis hin zu weit entfernten Bergen einen sich überlagernden bläulichen Schimmer erzeugt.



Michael Vollmer

Abb. 5 Der heiße „Morning Glory Pool“ im Yellowstone-Nationalpark zeigt ein intensives Farbenspiel von gelb-orange bis zu tiefen Grüntönen.

Der Farbe auf den Grund gehen

Auch in heißen geothermischen Quellen findet sich besonders reines Wasser, das zwar noch gelöste Ionen enthält, aber keine größeren lichtstreuenden Schwebeteilchen aus Sedimenten oder organischem Material. Insofern ist der Streuanteil klein, und einfallendes Licht sollte tiefer ins Wasser eindringen und am Grund reflektiert und diffus gestreut werden, sofern dieser nicht zu tief ist.

Der Blick von schräg oben auf das Wasser, allerdings nicht in Richtung des direkt reflektierten Sonnenlichts, zeigt (**Abb. 4**): Diffus gestreutes Tageslicht – vom Himmel sowie eventuell vorhandenen Objekten in der Umgebung – fällt aus allen möglichen Richtungen auf die Wasseroberfläche, sodass diese nach Reflexion auch aus allen Beobachtungsrichtungen als solche erkennbar ist. Ein Teil des direkten und diffusen Lichts tritt gemäß Brechungsgesetz in das Wasser ein. Dort kann es von den Inhaltsstoffen oder Inhomogenitäten entweder absorbiert oder auch einfach bzw. mehrfach gestreut werden. Die Winkelabhängigkeit der Lichtstreuung hängt dabei vom Streuer ab. Teilchen, die klein gegenüber der Wellenlänge des Lichts sind, streuen meist isotrop, größere Teilchen bevorzugt in Vorwärtsrichtung. Als Resultat dringt ein Teil der Strahlung tiefer ins Wasser ein, während ein anderer wieder zurück in Richtung Wasseroberfläche abgelenkt wird. Dort findet teilweise Reflexion statt; die restliche von unten auftreffende Strahlung verlässt das Wasser, und ein kleiner Teil davon gelangt in Richtung des Beobachters. Die wahrgenommene Farbe ergibt sich aus diffus reflektiertem Licht, Streulicht und Bodenlicht des Wassers. Sie hängt daher insbesondere vom Verhältnis der Anteile aus direkter Reflexion und vom Wasser zurückgestreutem Licht ab. Als Konsequenz sollte oben wieder austretendes Licht auch Informationen über die Reflexionsspektren des Bodens enthalten.

Ergibt sich aus diesen Überlegungen auch der Farbverlauf, den man etwa beim Morning Glory Pool im Yellowstone-Nationalpark wahrnehmen kann (**Abb. 5**)? Die Felswände der Quelle sind mit thermophilen Bakterien besetzt. Da die Art der Bakterien von der Wassertemperatur abhängt und diese in der maximal sieben Meter tiefen Quelle überall nahezu konstant bei knapp 70 °C liegt, ist der Belag im Innern überall gleich und somit auch das Reflexionsspektrum der Felswände. Dennoch sind Farbveränderungen von gelb-orange an den flachen Rändern bis hin zu Grüntönen in der Tiefe der Quelle erkennbar [14]. Auf dem Weg durch das Wasser bis zum Grund und zurück zum Beobachter unterliegt das Licht entlang dieses Sehstrahls neben der Absorption auch der Streuung. Die Wellenlängenabhängigkeit der Streuung ähnelt natürlich wieder derjenigen der Rayleigh-Streuung in der Atmosphäre, d. h. es wird mehr Blau gestreut als grüne und rote Farbtöne. Die blau gestreuten Lichtanteile entlang des Sehstrahls summieren sich bei größeren Wassertiefen auf und überlagern sich dem mehr gelblichen Licht aufgrund der Reflexion am Boden. Als Resultat entsteht ein grünlicher Farbton, der umso intensiver ausfällt, je tiefer die Quelle ist.



Abb. 6 An der Mündung des „Gelben Flusses“ (Aufnahme von 1999) entsteht die gelb-braune Farbe durch Streuung an mitgeführten Erdpartikeln. Die alte Mündung (blauer Pfeil) wurde 1996 durch Umlenkung nach Nordosten verschoben (roter Pfeil).

Wasserfarben im Unklaren

Was passiert, wenn sich mehr Schwebstoffe im Wasser befinden? Dominiert die Streuung daran, erreicht das Licht den Boden gar nicht mehr. Dann sollten die Streuprozesse im Wasser wesentlich die wahrgenommene Farbe bestimmen. Dies lässt sich sehr schön am Beispiel der Mündung des „Gelben Flusses“ Huang He im Norden Chinas überprüfen. Im Satellitenbild wird kein direkt reflektiertes Sonnenlicht detektiert. Man erkennt das eher türkisfarbene nördliche ostchinesische Meer („Gelbes Meer“) sowie das braun-gelbe Streulicht des sich damit mischenden Flusswassers (**Abb. 6**). Der Huang He ist der Fluss, der weltweit die meisten Sedimente transportiert. Er durchquert auf seinem Weg zum Meer ein Lössplateau und erodiert jedes Jahr Millionen von Tonnen gelblicher Erde, die er als kleine Partikel mit bis 50 Mikrometer Korngröße ins Meer transportiert. Diese Teilchen streuen einfallendes Licht sehr effizient zurück. Im roten und grünen Spektralbereich zeigen sie eine deutlich höhere Reflexion als im blauen, was zur beobachteten gelblichen Farbe führt. Durch die vielen Sedimente verändert sich das Flussdelta permanent. 1996 wurde der frühere Hauptkanal am Delta blockiert, um den Fluss nach Nordosten abzulenken. Das Bild von 1999 zeigt die Folgen dieser Maßnahme. Eine ähnlich schöne Durchmischung von klarem mit trübem Wasser auf kleinerer Skala kann man gelegentlich beim Zusammentreffen von klarem mit sedimentreichen Flüssen sehen.

Auf physikalisch ähnliche Weise kommt die intensive Türkisfarbe von Gletscherseen zustande [15]. Solche Seen beziehen Schmelzwasser von Gletschern, das durch Abrieb neben Sand auch viel Steinmehl transportiert, d. h. kleine mineralische Teilchen mit typischen Größen im Bereich von einem bis 60 Mikrometer. Im Zufluss dominieren die größeren Sandteilchen, die zu einer wellenlängenunabhängigen Lichtstreuung führen und so eine grau-weißliche Farbe der Bäche und Flüsse bewirken, teilweise durch Streuung an Luftblasen verursacht. Die größeren Sandteilchen sedimentieren im Gletschersee schnell, während die kleineren Steinmehlteilchen noch lange als Suspension im Wasser schweben können. Einige Teilchen sind farblos, andere grün oder



Abb. 7 Dieses Satellitenbild des westlichen Erie-Sees vom September 2017 zeigt das Farbenspiel der Algenblüte, das durch Rückstreuung an blau-grünen Algen zustande kommt.

braun. Die im Allgemeinen auftretende Mehrfachstreuung ist wellenlängenunabhängig. Das ins Wasser eintretende Licht wird im roten Spektralbereich stark absorbiert, sodass schon in wenigen Meter Tiefe im Wesentlichen blaues und grünes Licht vorliegt. Dieses wird von den suspendierten Teilchen stark zurückgestreut und zudem im blauen etwas stärker absorbiert. Ein Beobachter an Land sieht dann die Überlagerung des reflektierten, häufig mehr oder weniger weißen Tageslichts mit dem blau-grünen Streulicht, was zur bekannten Türkisfarbe führt. Dies erklärt auch, wieso solche Seen ihre Farbe ändern können. Bei wenig neuem Sedimenteintrag sinken die Teilchen irgendwann zum Grund. Ebenso kann sich bei Zufluss von sedimentarmem Frischwasser der Anteil des Streulichts verringern.

Organisch gefärbt

Das Wasser in Ozeanen und Seen enthält zusätzlich eine große Menge an organischem Material. Ein Großteil davon wird unter dem Begriff „Gelbstoff“ zusammengefasst. Darunter versteht man den im Blauen absorbierenden Anteil des Pools gelöster organischer Materie, der im

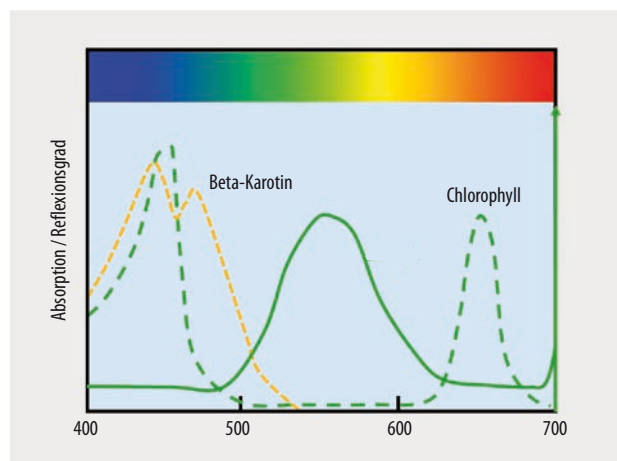
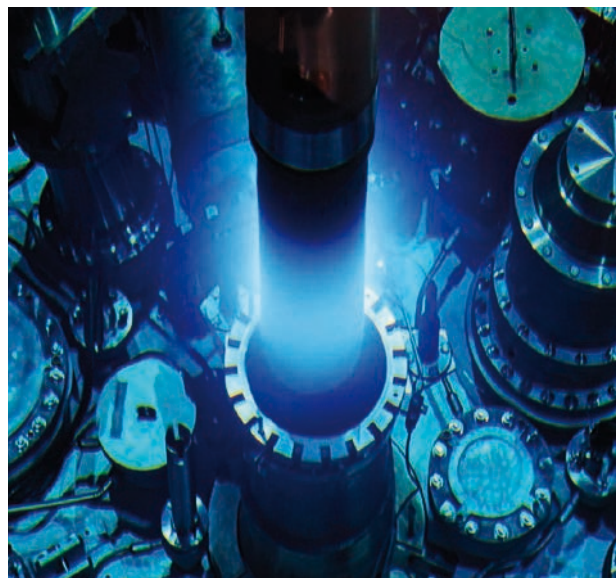


Abb. 8 Die in Algen enthaltenen Pigmente unterscheiden sich in ihrem Absorptions- (gestrichelt) und Reflexionsgrad (durchgezogen).



Abb. 9 Die Dinoflagellaten gehören zum Phytoplankton. Sie erzeugen in den Wellen am Strand blaues Licht, hier an der Küste von Manasquan, New Jersey.

catalano82, CC BY 2.0



Bernhard Ludewig

Abb. 10 Tscherenkow-Strahlung lässt sich im Forschungsreaktor FRM2 in Garching beim Wechseln des Brennelements beobachten.

Wesentlichen aus Stoffwechsel- und Abbauprodukten von Pflanzen und Tieren besteht.

In deutschen Badeseen kennen wir zum Beispiel die alljährlichen Warnungen vor den schädlichen Blaualgen. Gerade Algen zeichnen sich durch eine große Farbvielfalt in ihren Reflexionsspektren aus. Ein Beispiel dafür bietet der Lake Erie an der Grenze zwischen den USA und Kanada (**Abb. 7**). Die großen Zuflüsse an städtischen Abwässern oder Dünger aus der Landwirtschaft liefern Nährstoffe, die für einen großen Fischreichtum sorgen, aber gelegentlich auch für das Wachstum unerwünschter Algensorten. Algenblüten bestehen hier aus *Microcystis*, blaugrünen Aggregaten aus Süßwasser-Cyanobakterien, die oberflächennah schwimmen bzw. schweben. Sie produzieren Gifte, die einerseits das Trinkwasser kontaminieren und andererseits bei Hautkontakt Irritationen verursachen. Schließlich können sie in bestimmten Bereichen von Seen den Anteil des gelösten Sauerstoffs so weit reduzieren, dass dort keine Fische mehr leben können.

Im Satellitenbild, das in etwa eine natürliche Farbwiedergabe aufweist, zeigt sich das Seewasser ohne Algen – also mit wenig rückstreuenden Teilchen – deutlich dunkler und blau, während das von den Algen zurückgestreute Licht Grüntöne besitzt. Die primäre Ursache für die Farbgebung durch Algen sind die in ihnen enthaltenen Pigmente, die unterschiedliche Absorptionsspektren besitzen (**Abb. 8**). Dabei handelt es sich hauptsächlich um Chlorophylle, Carotinoide und Phycobiline. Da Chlorophyll stark im roten und blauen Spektralbereich absorbiert, aber im Grünen stark reflektiert, dominiert im Rückstreuenspektrum das Grün chlorophyllhaltiger Algen.

Die übliche grünliche Farbe von Algen kann sich durch andere Pigmente verschieben. So liegt das Absorptionsspektrum von Carotinoiden (**Abb. 8**) oder Phycobilinen deutlich mehr im grünen Bereich. Die Reflexion ist daher mehr ins Rote verschoben, sodass je nach Grünanteil Orange- oder Rottöne auftreten können. Daher verwundert es

nicht, dass sich gelegentlich auch intensive rote oder sogar pinkfarbene Gewässer beobachten lassen. Die Streuung an Teilchen im Wasser hat demnach großen Einfluss auf die wahrgenommene Wasserfarbe. Die zusätzliche Reflexion an der Wasseroberfläche führt im Allgemeinen nur zu einer etwas ungesättigteren Farbe. Das Wasser farbiger Bereiche ist nur wenig transparent, weil die dortigen Sichtweiten aufgrund der Konzentration der teils undurchsichtigen Streuer und deren Streueffizienz sehr klein sind.

Der Farbwechsel des Meeres an vielen Küsten vom tiefblauen zu flachem, mehr grünlichen Wasser, insbesondere wenn der Boden mit stark streuendem Sand oder Felsen bedeckt ist, lässt sich übrigens mit der Farbentstehung in reinem Wasser verstehen: Im tiefen Meer dominiert einzig die Streuung und Absorption, je nach Reinheit blau oder bei Gelbstoffanteilen auch grünlich. Dem überlagert sich im flachen Wasser der am Boden reflektierte und dann wieder durch Absorption und Streuung geschwächte Lichtanteil. Dieser wird – wie im obigen Beispiel – häufig mehr grünlich sein. Als Folge sind manche Küsten von blau-grünlichen Wasserrändern umgeben, bevor es in größeren Tiefen bläulicher wird.

Leuchtend statt gestreut

Bislang ließen sich die beobachtbaren Wasserfarben immer auf Streuprozesse durch ein einfallendes Lichtspektrum zurückführen. Es gibt aber auch Beispiele für die Emission von Licht in unbeleuchtetem Wasser. Ein natürliches Beispiel ist das Meeresleuchten (**Abb. 9**), in der Wissenschaft als Biolumineszenz bekannt [16]. In vielen Gewässern ist das Phänomen mehr oder weniger regelmäßig beobachtbar, so auch fast jedes Jahr im Sommer an der Kieler Förde.

Das faszinierendste Beispiel aus der Technik stellt zweifellos die 1934 entdeckte Tscherenkow-Strahlung dar. Die bläuliche Strahlung entsteht immer dann, wenn geladene Teilchen hoher Energie sich in einem Medium schneller als

mit der dortigen Phasengeschwindigkeit c/n bewegen, also mit Überlichtgeschwindigkeit. Dies liegt etwa vor, wenn man radioaktive Präparate unter Wasser im abgedunkelten Labor beobachtet. Emittierte geladene Teilchen polarisieren die gebundenen Elektronen im Medium, die nach dem Teilchendurchgang unter Aussendung von Licht in ihre Ruhelage zurückkehren. Die Zahl der emittierten Photonen ist proportional zu $1/\lambda^2$. Insofern dominiert kurzwellige Strahlung, was sich im Spektrum sehr schön als blaues Leuchten manifestiert, etwa in Reaktorbecken (**Abb. 10**).

Nun sollte auch die Erfahrung aus dem Schwimmbad klar sein: Natürlich ist dort das Wasser nie perfekt rein, es gibt immer eine im Laufe des Betriebs zunehmende Menge an Schwebstoffen. Das führt unweigerlich zu mehr Streuung und somit zu geringerer Sichtweite und blasseren Farben. Wer also besonders reines Blau genießen möchte, sollte sich im Schwimmbad eher früh morgens ins Wasser wagen.

Literatur

- [1] M. W. Denny, Air and Water, Princeton Univ. Press, Princeton (1993)
- [2] U. Kaatz, Physik Journal, Oktober 2017, S. 41
- [3] C. Goy und R. E. Grisenti, Physik Journal, Januar 2019, S. 35
- [4] K. Nassau, The Physics and Chemistry of Color, Wiley (1983)
- [5] C. D. Mobley in: Optical Properties of Water, Bd. 1, 2. Aufl., hrsg. von M. Bass, McGraw-Hill, New York (1995), Kap. 43
- [6] F. M. Caimi, Selected Papers on Underwater Optics, SPIE Milestone Series, MS 118, SPIE Optical Engineering Press (1996)
- [7] A. Morel et al., Limnol. Oceanogr. **52**, 217 (2007)
- [8] M. Minnaert, Licht und Farbe in der Natur, Birkhäuser/Springer (1992, Erstauf.: 1937)
- [9] C. F. Bohren, Clouds in a Glass of Beer, Kapitel 20, John Wiley & Sons, New York (1987), Kap. 20: Colors of the Sea
- [10] D. K. Lynch und W. Livingston, Color and Light in Nature, 2. Aufl., Cambridge University Press, Cambridge (2001)
- [11] A. Stockman, Colorimetry, The Optics Encyclopedia, Bd. 1, hrsg. von T. G. Brown et al., Wiley, Hoboken (2004)
- [12] D. H. Brainard, Colorimetry, in: Handbook of Optics, Bd. 1, 2. Aufl., hrsg. von M. Bass, McGraw-Hill, New York (1995), Kap. 26
- [13] M. Vollmer und A. Mustard, Phys. Educ. **54**, 45001 (2019)
- [14] P. W. Nugent, J. A. Shaw und M. Vollmer, Applied Optics **54**, B128 (2015)
- [15] E. Aas und J. Bogen, Water Resources Research **24**, 561 (1988)
- [16] K. H. Hoffmann, Biologie in unserer Zeit **11**, S. 97 (1981)

Der Autor



Michael Vollmer (FV Didaktik der Physik) studierte Physik in Heidelberg. Zwischen dortiger Promotion und Habilitation verbrachte er ein Postdoc-Jahr in Berkeley, USA. Seine damaligen Forschungsinteressen lagen im Bereich hochauflösender Laserspektroskopie sowie der Cluster-

und Oberflächenphysik. Nach einer Zwischenstation in Kassel kam er 1994 an die Technische Hochschule in Brandenburg, wo er seitdem wissenschaftliche Themen im Bereich Grundlagen und Anwendungen der Infrarottechnik, atmosphärischer Optik sowie der Didaktik der Physik bearbeitet. Dabei vermittelt er auch der Öffentlichkeit moderne wissenschaftliche Inhalte und organisiert Fortbildungen für Physiklehrer. Er erhielt 2013 den Robert-Wichard-Pohl-Preis der DPG.

Prof. Dr. Michael Vollmer, Fachbereich Technik, Technische Hochschule Brandenburg, Magdeburger Str. 50, 14770 Brandenburg an der Havel

Neues aus Kryotechnik und Magnetometrie

Quantum Design Europe ist ab sofort Vertriebspartner von **Lake Shore Cryotronics**. Diese Partnerschaft kombiniert das Wissen und die Anwendungsexpertise zweier Branchenführer im Bereich wissenschaftliche Messtechnik.

Bei uns finden Sie die komplette Lake-Shore-Produktpalette:

- Tieftemperatur-Monitore, -Kontroller und -Sensoren
- Tieftemperatur-Spitzenmessplätze
- VSM-Systeme mit 15 nemo Empfindlichkeit
- Hall-Effekt & FastHall-Messsysteme
- Hochpräzise AC/DC Strom- und Spannungsquellen



Besuchen Sie uns auf den DPG-Tagungen in Dresden im Zelt A (A5, A6, A13) und in Hannover am Stand 34.

