

Wie Farben in Thermalquellen entstehen

Heiße Physik im Yellowstone-Park

MICHAEL VOLLMER | JOSEPH A. SHAW | PAUL W. NUGENT

Die heißen Quellen im Yellowstone-Nationalpark faszinieren Besucher seit Generationen. Ihre schimmernden Farben lassen sich erstaunlich einfach erklären. Sie entstehen als Zusammenspiel des einfallenden Lichts mit seiner Streuung und Absorption im heißen Wasser – und mit dessen Reflexion an thermophilen Bakterien- und Algenmatten auf den Felswänden der Quellen.

Mehr als drei Millionen Menschen besuchen pro Jahr den Yellowstone-Park. Neben seiner spektakulären Tierwelt, darunter Grizzlys, Bisons und Wölfe, ist der älteste Nationalpark der Welt vor allem für seine geothermalen Quellen und Geysire berühmt. Sie lassen auch die Herzen von Naturfreunden, Physikerinnen und Physikern höher schlagen. Besonders eindrucksvoll ist das intensive Farbspiel vieler heißer Quellen (Abbildung 1). Es wirft die

Frage auf, wie diese faszinierende Farbenpracht zustande kommt.

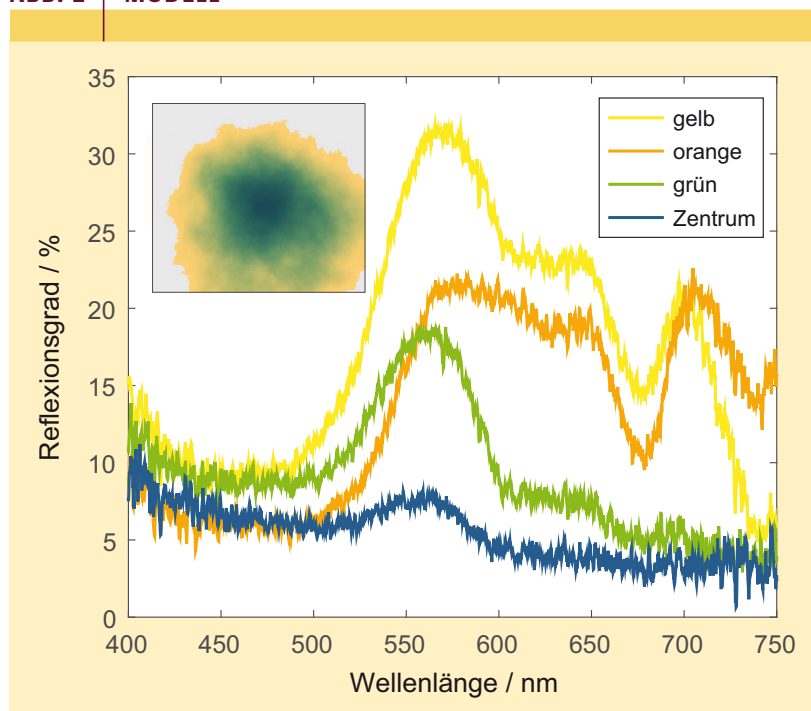
Seit Jahrzehnten untersuchen Biologen die Lebensformen in diesen heißen Quellen, thermophile Bakterien und Algen [1, 2]. Sie bilden auf den Felswänden der Quelltöpfe Biofilme und sollen so deren Farbenpracht verursachen. Die Art der jeweils siedelnden Bakterien und Algen hängt stark von der Wassertemperatur ab. Tabelle 1 zeigt – ähnlich den Informationstafeln im Park – eine grobe Gegenüberstellung der in einer Quelle beobachtbaren Farbe dieser Biofilme und der Wassertemperatur. Oberhalb von 75 °C gibt es üblicherweise keine farbgebenden Filme mehr.

Tabelle 1 suggeriert einen Zusammenhang zwischen Farbe und Temperatur. Allerdings ist dieser erstens nicht eindeutig, zweitens versagt diese Modellvorstellung deutlich bei tiefen Quellen. Die Biofilme alleine reichen demnach nicht aus, um die Farben insbesondere etwas tieferer Quellen zu verstehen. Hierfür müssen wir zusätzlich die Lichtabsorption und Streuung am Wasser berücksichtigen [3, 4], die das Spektrum des beobachteten Lichts deutlich verändern können.



Abb. 1 Das rechte Bild zeigt den Sapphire Pool im Yellowstone National Park, das linke den 7 m tiefen Morning Glory Pool. Die Buchstaben kennzeichnen das Zentrum (c) und die Positionen für orange (o), gelb (y) und grün (g) wahrgenommene Gebiete, an denen jeweils Spektren aufgezeichnet wurden (Fotos: J. Shaw).

ABB. 2 | MODELL



Simulierte Farben für den im Zentrum bis 7 m tiefen Morning Glory pool (links oben) und Spektren, die an den in Abbildung 1 links gekennzeichneten Stellen gemessen wurden. Die Simulation nahm nur eine einzige Spezies von gelben Cyanobakterien an, deren Spektrum (y) in der Nähe des Rands gemessen wurde.

Simulation der Farben

Wenn man ein farbiges Objekt, zum Beispiel in intensivem Gelb, in flaches Wasser eintaucht, so wird sich seine Farbe nur unwesentlich ändern, wenn man es von oberhalb des Wasserspiegels betrachtet. Lässt man es immer tiefer in das Wasser sinken, so passieren zwei Dinge. Erstens verschiebt sich der Farbeindruck durch die Lichtstreuung an den Wassermolekülen zwischen Oberfläche und Objekt zunehmend ins Blaue. Das Gelb wird zunächst grünlich und letztlich, in großer Tiefe, bläulich. Zweitens sinkt die Objekthelligkeit und damit der Kontrast zur Umgebung durch Lichtabschwächung im Wasser immer weiter, bis das Objekt in großer Tiefe vollständig in blauer Umgebung verschwindet. Farbverschiebung und maximale Beobachtungstiefe hängen von der Reinheit des Wassers ab: je reiner, desto weniger Abschwächung erleidet das Licht, und desto tiefer kann man das Objekt noch bläulich erkennen.

Dieses Gedankenexperiment, das man zum Beispiel in einem Schwimmbad mit Sprungbecken realisieren kann, erklärt auch das Zustandekommen der Farben heißer Quellen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass wir kein Objekt versenken, sondern die mit farbigen Mikroorganismen bedeckte Felswand in unterschiedlichen Tiefen beobachten. Dies führt zu einer Farbänderung, wie sie zum Beispiel der berühmte Morning Glory Pool (Abbildung 1 links) zeigt. Ohne Berücksichtigung der Lichtstreuung im Wasser könnte man geneigt sein, die Farbe allein den Mikroorganismen

zuzuschreiben. Damit könnte man vermuten, dass die Quelle in verschiedenen Bereichen und Tiefen unterschiedliche Temperaturen aufweisen könnte. Dies trifft jedoch nur auf die flachen Abflüsse der Quellen zu, wie wir mit Modellrechnungen zeigen konnten [3].

Abbildung 2 zeigt links oben die Ergebnisse unserer Simulationsrechnungen für den Morning Glory Pool. Für das Modell nahmen wir einen konisch geformten Pool an, der im Zentrum wie das Vorbild eine maximale Tiefe von 7 m erreichte. Bis auf Randbereiche mit extrem seichtem Wasser setzten wir eine konstante Wassertemperatur an. Als Folge war die gesamte innere Felswand unserer simulierten Quelle nur mit einer einzigen Spezies aus Cyanobakterien bedeckt. Für diese gelbfarbige Schicht verwendeten wir ein Reflexionsspektrum, das wir aus Messungen in den seichten Außenbereichen der echten Quelle bestimmten.

Die Ergebnisse unseres Modells stimmen farblich recht gut mit der Beobachtung überein, wie der Vergleich von Abbildung 1 mit Abbildung 2 zeigt – abgesehen vom breiten orangenen Bereich, der weit außen liegt. Im echten Morning Glory Pool entspricht er sehr seichtem Wasser, das durch Abkühlen eine etwas geringere Temperatur als der Rest der Quelle aufweist und daher mit einem anderen Mikroorganismus besiedelt ist. Die Reflexionsspektren (Abbildung 2) des Quellenzentrums sowie des grünen, gelben und orangenen Bereichs spiegeln den wahrgenommen Farbeindruck gut wieder.

Absorption und Streuung

Offensichtlich hat Absorption und Streuung im Wasser großen Einfluss auf die wahrgenommenen Farben. Wasser erscheint uns im täglichen Leben auf den ersten Blick als klare, also transparente Substanz. Andererseits ist die Tiefsee extrem dunkel, das heißt, das auf das Meer einfallende Tageslicht wird fast komplett absorbiert oder zurückgestreut. Selbst reines Wasser zeigt diese Reststreuung und Absorption. Wasser im Meer und in vielen Seen enthält zudem viele Fremdpartikel, zumeist Schwebstoffe organischen Ursprungs, die das Licht zusätzlich streuen und absorbieren können. Wasser ist also nicht gleich Wasser!

In den heißen Quellen des Yellowstone-Parks ist das Wasser wegen der extremen Bedingungen vergleichsweise rein. Es entspricht zwar nicht destilliertem Wasser, zählt

TAB. 1 | TYPISCHE FARBEN UND Wassertemperaturen

Sichtbare Farbe	Wassertemperatur
braun, rot, grün	43 °C
orange	57 °C
gelb, grün oder grün-gelb	70 °C
gelb	75 °C
Grenze für Photosynthese: 75 °C	
pink	83 °C
weiß	85 °C

aber im Hinblick auf Schwebstoffe sicher zu den reinsten natürlich vorkommenden Gewässern. Deshalb haben wir zu seiner Charakterisierung Messdaten von sehr reinen Wasserproben verwendet [5]. Mit den entsprechenden Absorptionskoeffizienten $a(\lambda)$ und Gesamtstreuoeffizienten $b(\lambda)$ erhalten wir für die gesamte Lichttransmission in Vorwärtsrichtung für eine Wellenlänge λ :

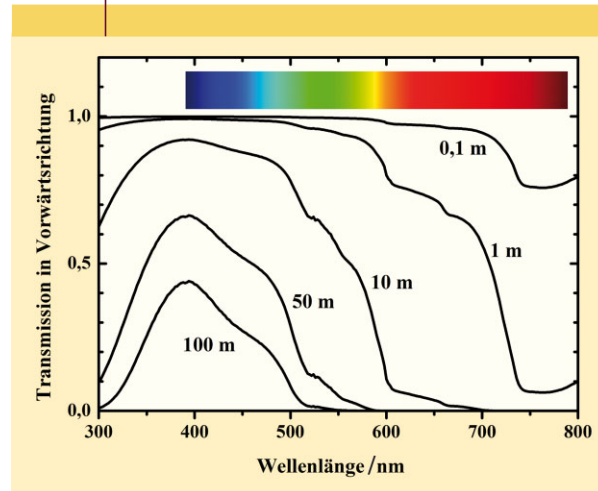
$$T_W(x, \lambda) = e^{-\left[a(\lambda) + \frac{1}{2}b(\lambda)\right]x} \quad (1)$$

T_W ist die sogenannte Reintransmission ohne Reflexionsverluste beim Eintritt des Lichts in das Wasser, und $b/2$ nimmt eine in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung symmetrische Streuung an. Abbildung 3 zeigt die Reintransmission für verschiedene Wasserdicken. Offensichtlich wird ab Wassertiefen von einigen Metern das rote, gelbe und grüne Licht deutlich stärker geschwächt als das blaue Licht.

Simulation

Für die komplette Simulation der Farben in den heißen Quellen verwendeten wir ein vereinfachtes, eindimensionales Strahlungstransfermodell. Abbildung 4 zeigt, welche Effekte es berücksichtigt. Wir positionierten den virtuellen Betrachter dabei so, dass kein direkt von der Wasseroberfläche reflektiertes Sonnenlicht in dessen Auge fallen konnte. Dies entspricht der echten Besuchersituation, in der man sich an der Quelle auch solange bewegt, bis man möglichst keine störenden Reflexe mehr auf der Wasseroberfläche

ABB. 3 REINES WASSER



In den vorderen Halbraum transmittiertes Licht nach dem Durchdringen verschiedener Dicken reinen Wassers. Im blauen Bereich dominiert Schwächung durch Rayleigh-Streuung, im roten durch Absorption. In der Natur zeigt Wasser fast immer eine deutlich größere Abschwächung durch erhöhte Streuung an Schwebstoffen.

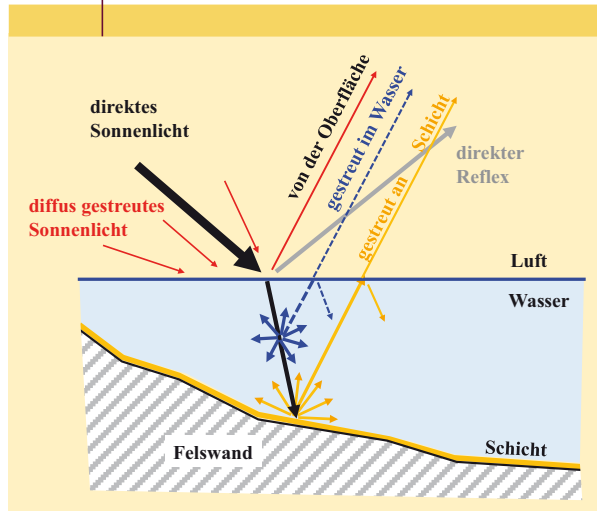
sieht. Die vom Auge wahrgenommene Bestrahlungsstärke besteht dann im Wesentlichen aus drei Anteilen:

$$E(\lambda) = E_{\text{Him}}(\lambda)R_W + E_{\text{dir}}(\lambda)(1 - R_W)^2 R_{\text{Sch}} T_W(\lambda)^2 + E_{\text{streu}}(\lambda). \quad (2)$$



Jede heiße Quelle im Yellowstone-Park besitzt ihr eigenes, charakteristisches Farbspiel.

ABB. 4 | MODELL



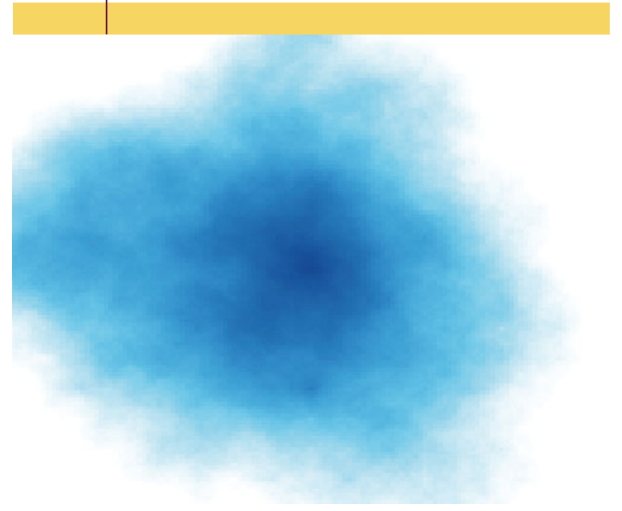
Folgende Prozesse bestimmen die Farben heißer Quellen: Einfallendes Licht wird an der Oberfläche reflektiert, im Wasser absorbiert und gestreut, zudem wird es an der Biofilm-Schicht auf der Felswand gestreut. In unserem Modell ist der Beobachter so positioniert, dass das direkt von der Oberfläche reflektierte Licht (grauer Pfeil) nicht in dessen Auge fällt. Der Übersichtlichkeit wegen sind im Wesentlichen nur die Pfade des nach oben gestreuten Lichts gezeigt.

E_{Him} ist die von der Wasseroberfläche reflektierte, diffuse Himmelsstrahlung, ihre Bestrahlungsstärke ist etwa eine Größenordnung kleiner als diejenige der direkt reflektierten Strahlung. Die Richtungsabhängigkeit der Reflexion R_W an der Wasseroberfläche wird über die Fresnelschen Gleichungen modelliert. Der zweite Term repräsentiert die ins Wasser eintretende und dann von der Biofilmschicht auf den Felswänden zurückgestreute direkte Strahlung. Sie ist mit einem polarisationsunabhängigen Reflexionsfaktor der Schicht R_{Sch} verknüpft, wobei wir einen Lambertschen Streuer angenommen haben, bei dem die Strahldichte nicht vom Winkel abhängt. Zudem findet durch das zweimalige Durchqueren des Wassers mit der Reintransmission $T_W(\lambda)$ eine weitere Schwächung statt. Gemäß Gleichung (1) haben wir dabei die Streuung wieder als symmetrisch in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung angenommen: Vorwärtsstreuung trägt zum Signal bei, Rückwärtsstreuung schwächt es.

Der letzte Term in Gleichung (2) ist die im Wasser gestreute Strahlung $E_{\text{streu}}(\lambda)$, in Abbildung 4 als gestrichelter blauer Pfeil dargestellt. Dieser Anteil ist etwas schwieriger zu modellieren als die beiden anderen Beiträge. Um die Veränderung mit der Tiefe zu berücksichtigen, haben wir in unserem Modell ein Mehrschichtsystem verwendet, das die gesamte Dicke z des durchlaufenen Wasser in eine Vielzahl von Einzelschichten der Dicke Δz unterteilt:

$$E_{\text{streu}}(\lambda) = E_{\text{dir}}(\lambda)(1 - R_W)^2 \sum_{n=0}^{z/\Delta z} e^{-2\left(a + \frac{b}{2}\right)n\Delta z} \left(1 - e^{-\frac{b}{2}\Delta z}\right). \quad (3)$$

ABB. 5 | HISTORISCHE FARBGEBUNG



Simulation des historischen Morning Glory Pools, der keine farbigen Matten auf seiner Felswand besaß, sondern nur eine grauweiße Gesteinsoberfläche zeigte. Das Resultat ist eine klare blaue Farbe.

Die beiden ersten Faktoren beschreiben wieder die durch Reflexion an der Grenzfläche geschwächte direkte Einstrahlung. Der erste Term $\exp[-2(a + b/2)n\Delta z]$ in der Summe erfasst die Abschwächung von der Wasseroberfläche bis zur n -ten Schicht und wieder zurück zur Oberfläche durch eine gleich dicke Wasserschicht. Der zweite Term $(1 - \exp[-(b/2)\Delta z])$ beschreibt die Rückstreuung in jeder Schicht. Das Summieren über alle Schichten bis zur Tiefe der mit dem Biofilm bedeckten Felswand ergibt den Streubeitrag des Wassers, der im Wesentlichen blau ist. Gemeinsam mit den beiden anderen Lichtbeiträgen der Gleichung (2) entsteht der beobachtete Farbeindruck.

Wesentliche Eingangsparameter des Modells sind die direkte und die diffuse Bestrahlungsstärke. Wir berechneten sie nach einem bestimmten Verfahren für eine Standardatmosphäre (Details siehe [6, 7]). Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit passten wir an die lokalen meteorologischen Messungen an. Es ergab sich, dass Details der Farbgebung der Quellen nur schwach von atmosphärischen Parametern abhingen. Nur der Einfluss von Rauchpartikeln aus Waldbränden, die in der Nähe des Yellowstone-Parks gelegentlich vorkommen, kann zu kleineren spektralen Verschiebungen führen.

Letztlich ergab das in Gleichung (2) beschriebene Modell ein Spektrum $E(\lambda)$, aus dem wir mit Hilfe eines RGB-CMOS-Kameramodells die vom Auge wahrgenommene Farbe erzeugten [3].

Farbvariationen

Wie schon erwähnt, stimmen unsere Simulationsergebnisse (Abbildung 2) sehr gut mit den beobachteten, prächtigen Farben des Morning Glory Pools (Abbildung 1) überein. Doch vor mehr als fünfzig Jahren wurde sein Aussehen noch ganz anders beschrieben. Damals war seine Wassertempe-

ratur mit etwa 78 °C deutlich höher, zur Zeit liegt sie bei nur knapp 70 °C. Das war zu heiß für die Algen, und wegen der fehlenden Photosynthese gab es keine Biofilme auf den Felswänden der Quelle.

Wir haben diese historische Situation in unserem Modell simuliert, indem wir eine grauweiße Reflexion der Felsoberflächen eingesetzt haben, wie sie in sehr heißen Quellen beobachtbar ist. Da es keine historischen Messungen der Reflexionsspektren der Wände des Morning Glory Pools gibt, nutzen wir solche anderer heißer Quellen, zum Beispiel vom Sapphire Pool (Abbildung 1 rechts), der mit über 90 °C zu den derzeit heißesten Quellen des Yellowstone gehört. Auf einer Höhe von 2250 m über dem Meer erreicht er damit fast Siedetemperatur. Diese Daten haben wir für unsere Simulation des historischen Morning Glory Pools benutzt.

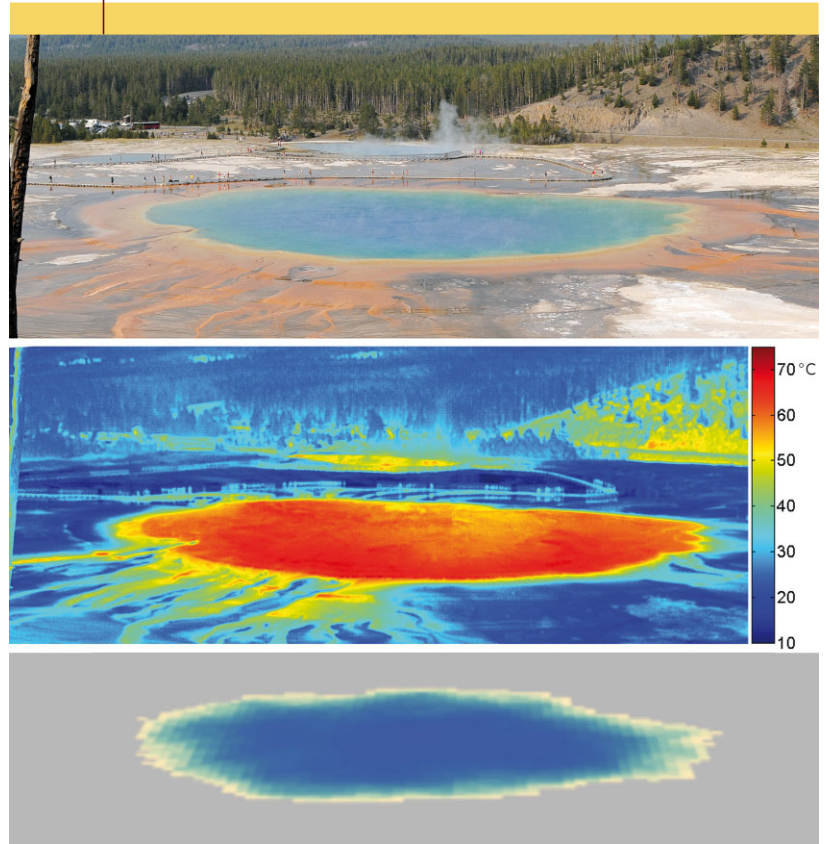
Abbildung 5 zeigt das Ergebnis. Vor fünfzig Jahren hätte der Morning Glory Pool demnach eine blaue Farbe gehabt, wie es zeitgenössische Augenzeugenberichte schildern. Er sah also völlig anders aus als in seiner jetzigen bunten Erscheinung. Dies erklärt auch, warum die Quelle nach einer blauweißen Blume benannt wurde. Fazit: Sehr heiße Quellen ohne Algenmatten zeigen bei größerer Tiefe immer die von uns simulierten blauen Farben, so auch der Sapphire Pool.

Es stellt sich die Frage, wieso der Morning Glory Pool abkühlte. Die Antwort ist einfach: Die jetzige Farbenpracht ist – leider – durch Menschen verursacht. Touristen warfen immer wieder Münzen, wohl als Glücksbringer, in die Quelle. Ihr Zufluss verstopfte dadurch teilweise, sodass weniger heißes Wasser nachströmen kann.

Als letztes Beispiel betrachten wir Grand Prismatic Spring, die größte heiße Quelle des Yellowstone-Parks (Abbildung 6 oben). Weltweit ist sie die drittgrößte Thermalquelle mit einer Tiefe von bis zu 50 m und einem Durchmesser von grob 100 m. Die Temperaturen liegen zwischen 63 und 74 °C – neben dem Einfluss der Wassertiefe und damit verbundenen der variierenden Wärmeabfuhr kennt diese Quelle auch starke saisonale Schwankungen. Abbildung 6 zeigt in der Mitte in Falschfarbendarstellung die mit einer Infrarotkamera gemessene Verteilung der Oberflächentemperaturen [3]. Wegen des flachen Beobachtungswinkels von etwa 80° soll das Bild mehr qualitativ visualisieren als quantitativ beschreiben. So zeigen sich in der Umgebung der Quelle deutliche Reflexionen des kalten Himmels, und die atmosphärische IR-Transmission von der Wasseroberfläche zur Kamera haben wir nur für eine feste konstante Entfernung berücksichtigt.

Die Grand Prismatic Spring zeigt ebenfalls ein breites Farbspektrum. Die sehr flachen Abflüsse mit teils weniger als 10 cm Tiefe sind deutlich kühler als das Innere der Quelle und besitzen – je nach Temperatur – verschiedene Biofilme und daher unterschiedliche Farben. Abgesehen von den sehr flachen Gebieten mit oranger Farbgebung ist die Quelle in tieferen Bereichen mit einer gelben Schicht ausgestattet. Abbildung 6 unten zeigt eine Simulation der Farbgebung dieser Quelle mit einem gelben Spektrum für die

ABB. 6 | GRAND PRISMATIC SPRING



Das Foto zeigt die Grand Prismatic Spring von einem nahen Hügel unter einem Beobachtungswinkel von etwa 80°. Mitte: aus acht Einzelbildern zusammengesetztes Thermobild. Unten: simulierte Farbe für eine gelbe Schicht auf den Felswänden.

Schicht auf der gesamten inneren Oberfläche bis in die Maximaltiefe von 50 m.

Wegen der deutlich größeren Tiefe im Vergleich zum Morning Glory Pool ist die Grand Prismatic Spring im Zentrum wirklich blau. Hier dominiert also die Rayleigh-Streuung, und die Beläge der Felswände spielen keine Rolle mehr.

Blaue Berge

Die brillanten und vielfältigen Farben heißer Quellen entstehen also durch das Wechselspiel von Absorption und vor allem Streuung im heißen Wasser mit selektiver Reflexion an den temperaturabhängigen Biofilmen auf den Felswänden. Im seichten Wasser der Abflüsse sind die Farben im Wesentlichen auf die Bakterien- und Algenmatten zurückzuführen, während durch Absorption und Streuung im Wasser mit wachsender Tiefe eine zusätzliche Blaufärbung entsteht.

Diese Blauverfärbung ähnelt übrigens sehr dem Farbstich weit entfernter Objekte in klarer Atmosphäre, dem Phänomen der sogenannten blauen Berge, in der Malerei Farbperspektive genannt. Dazu betrachten wir eine gleichbleibend grüne Vegetation, entsprechend unseren farbigen Schichten in den Quellen, aus großer Entfernung. Zwischen uns und der fernen Vegetation befindet sich Luft, die zum

Zum Thema



Lichtspiele in Luft – Atmosphärische Optik für Einsteiger.
Michael Vollmer.
Springer Spektrum, Heidelberg
2012, 384 S.,
280 s/w- &
60 Farb-Abb.,
broch. 24,95 €. ISBN-10:
3-82743-092-5

einen das Licht durch Absorption und Streuung abschwächt. Zusätzlich gibt es jedoch auch hier entlang der Sehrichtung einen Anteil der Rayleigh-Streuung an den Luftmolekülen [8]. Dies führt dazu, dass nahe Berge noch grün aussehen, aber immer bläulicher werden, je weiter sie entfernt sind. Weiter in der Ferne verschwinden sie irgendwann wegen des zu geringen Kontrasts ganz. Der wesentliche Unterschied zur Erklärung des Effekts in heißen Quellen ist die unterschiedliche Dichte des lichtstreuenden Materials, wodurch sich der Längenmaßstab von Metern Wassertiefe auf Kilometer Luft in horizontaler Entfernung ausdehnt.

Zusammenfassung

Die heißen Quellen im Yellowstone-Nationalpark begeistern mit ihren schimmernden Farben. Dieser Effekt lässt sich erklären als Zusammenspiel aus einfallendem Licht, der Lichtstreuung und -absorption im heißen Wasser sowie der Reflexion an thermophilen Bakterien- und Algenmatten auf den Felswänden der Quellen. Physikalische Simulationen auf dieser Basis ergeben Bilder, die der Realität sehr nahe kommen. Geläufig ist der Effekt von der Atmosphäre: Ferne Berge erscheinen blau, auch wenn sie mit grüner Vegetation bewachsen sind.

Stichwörter

Yellowstone-Park, Thermalquelle, Farben, thermophile Bakterien, thermophile Algen, Lichtreflexion, Lichtstreuung, Raleigh-Streuung, blaue Berge.

Literatur

- [1] D. M. Ward et al., Microbiol. Mol. Biol. Rev. **1998**, 62(4), 1353.
- [2] K. B. De León et al., Front. Microbiol. **2013**, 4(330), 1.
- [3] P. W. Nugent, J. A. Shaw, M. Vollmer, Appl. Opt. **2015**, 54(4), B128.
- [4] J. A. Shaw, P. W. Nugent, M. Vollmer, Proc. of SPIE **2015**, Vol. 9793, 97931S.
- [5] H. Buiteveld, J. H. M. Hakvoort, M. Donze, Proc. SPIE **1994**, 2258, 174.

- [6] A. Berk et al., Proc. SPIE **2005**, 5806, 662.
- [7] G. P. Anderson et al., AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km), AFGL-TR-86-0110, Environmental Research Papers **1986**, 954, <http://t1p.de/02e4>
- [8] M. Vollmer, Lichtspiele in der Luft, Springer Spektrum, Heidelberg 2012.

Die Autoren



Michael Vollmer ist Professor für Experimentalphysik an der FH Brandenburg. Neben optischen Phänomenen in der Atmosphäre beschäftigt er sich mit Infrarottechnik, Spektroskopie sowie Didaktik der Physik.



Joseph A. Shaw ist Professor für Elektrotechnik und Optik an der Montana State University, Bozeman, Montana, USA. Er interessiert sich für optische Phänomene in der Natur, Polarimetrie und Radiometrie sowie Fernerkundung mit LIDAR.



Paul W. Nugent promovierte in Elektrotechnik und arbeitet derzeit an der Montana State University in Bozeman. Neben seiner Tätigkeit als Geschäftsführer der Firma NWB Sensors Inc. liegen seine Interessen im Bereich Radiometrie, Optik in der Natur, Wahrnehmung von Farbe sowie optischer Fernerkundung.

Anschriften

Prof. Dr. Michael Vollmer, Mikrosystemtechnik und Optische Technologien, TH Brandenburg, Magdeburgerstr. 50, 14770 Brandenburg. vollmer@th-brandenburg.de