

Wenn man bloß nach dem sinnlichen Schein urtheilen sollte, so sollte man denken, es wäre über uns ein großes blau gemaltes Gewölbe; so wie uns die Maler den Himmel an einer Decke vorstellen. Von dem Vorurtheile habe ich nicht erst nöthig, Ew. H. zu befreien. Ein wenig Nachdenken ist schon hinlänglich, uns zu überführen, daß der Himmel kein blaues Gewölbe, und daß die Sterne keine glänzende Nägel sind, die an demselben angeheftet wären. [...] Man hat also wohl Ursache zu fragen, woher das Blau des Himmels entsteht? [...] Die Luft ist mit einer Menge kleiner Theilchen angefüllt, die nicht völlig durchsichtig sind, die aber, wenn sie von der Sonne erleuchtet werden, dadurch eine schwingende Bewegung bekommen, die neue diesen Theilchen eigne Stralen hervor bringt; [...] Die Wälder des Harzgebirges, die man zu Magdeburg sieht, scheinen sehr blau, ob sie gleich, wenn man sie zu Halberstadt ansieht, grün aussehen; der große Raum voll Luft zwischen Magdeburg und diesen Gebirgen ist davon die Ursache.

Leonhard Euler (1707–1783)

aus: „Briefe an eine deutsche Prinzessinn über verschiedene Gegenstände aus der Physik und Philosophie“, Brief XXXII (27. Juli 1760)

Liebe Leserin, lieber Leser,

das „Himmelsblau“ war schon einmal Thema gewesen. Dass wir noch einmal darauf zurückkommen, hat einen Anlass: Vor 150 Jahren, im Februar 1871, veröffentlichte John William Strutt (1842–1919), besser bekannt unter dem Namen Lord Rayleigh, den ersten Aufsatz einer Serie über das Blau des Taghimmels. Der letzte Teil erschien 1899. 1910 löste Albert Einstein (1879–1955) das Problem auf seine Art. Darüber wird zu reden sein.

Dass das Himmelsblau keine Eigenfarbe der Luft sein kann und erst vor dunklem Hintergrund zur Geltung kommt, war bereits Leonardo da Vinci (1452–1519) klar gewesen, dem Renaissance-Allrounder.

Rayleigh-Streuung macht unseren Planeten einzigartig im Sonnensystem. Wer sich auf die Suche nach einer zweiten Erde begibt, sollte nach Exoplaneten mit diesem Merkmal Ausschau halten!

Der Februar 1871 war wissenschaftlich ein fruchtbarer Monat. So verkündete Charles Darwin (1809–1882) in einem voluminösen Werk seine Überzeugung, dass sich (A) der Mensch zwanglos in die Stammesgeschichte der Tiere einordne, was bis heute vielerorts als Degradierung empfunden wird, und dass (B) die „geschlechtliche Zuchtwahl“, Partnerwahl, neben der „natürlichen“ eine

nicht minder wichtige Triebkraft bei der Herausbildung körperlicher Merkmale und Verhaltensweisen spiele.

Darwin dachte nicht nur über den Mechanismus der Evolution nach, die „Zuchtwahl“ (Selektion). Er dachte weiter: Wie begann das Leben? Seine diesbezüglichen Spekulationen waren nicht für die Öffentlichkeit gedacht. Am 1. Februar 1871 äußerte Darwin in einer Notiz an seinen Freund, den Botaniker Joseph Dalton Hooker (1817–1911), etwas Bemerkenswertes: Angenommen in einem „kleinen warmen Tümpel“ wären alle Voraussetzungen zur Entstehung von Leben gegeben, so käme es doch nicht dazu. Unter heutigen Bedingungen würde neugebildetes Eiweiß sofort von irgendjemanden verschlungen werden. An Darwins „kleinem warmen Tümpel“ als Wiege des Lebens könnte etwas dran sein. Lange ging man von der Lebensentstehung im Ozean aus. Doch wie findet in einer derart monströsen „Ursuppe“ ein abiogen entstandenes Molekül jenen Partner, der für die gegenseitige Vervielfältigung unerlässlich ist? Und die vieldiskutierte Lebensentstehung nahe heißer Quellen in mittelozeanischen Rücken? Hinweise, dass dort Aminosäuren synthetisiert werden, gibt es nicht. Darwins flacher „Tümpel“ ist vermutlich ein geeigneteres Plätzchen, die chemische Evolution anzukurbeln, als die offene See oder der unterseeische „Smoker“: Sonnenenergie (UV) ist reichlich vorhanden, neugebildete Moleküle können sich nicht mehr „verdünnisieren“, im Gegenteil, ihre Konzentration steigt, verdunstet Wasser, und es gibt mineralische Oberflächen mit katalytischen Eigenschaften. Begrenztheit dürfte die Bildung Oparin’scher¹ Koazervattröpfchen – von einer halb-durchlässigen Membran² eingeschlossene chemische Reaktoren – befördern. Eigentlich schade, dass Darwin so zurückhaltend war. Schon mit der Abfassung von „Entstehung der Arten“ (1859) hatte er sich ungebührlich viel Zeit gelassen – weil er die Veröffentlichung scheute.

Nach so viel Blick zurück sei etwas Gegenwart gewagt. Für den 18. Februar ist eine heikle Landung auf dem Mars geplant. Wieder kommt ein „Himmelskran“ zum Einsatz. Der NASA neuester Marsrover, „Perseverance“, der „Ausharrer“, begibt sich u. a. auch auf die Suche nach Relikten niederen Lebens in der Vergangenheit des Mars. Mit von der Partie: eine 2,8-kg-Drohne, die eine Kamera trägt und in der dünnen Atmosphäre aus der

¹Aleksandr Iwanowitsch Oparin (1894–1980), sowjetischer Biochemiker

²Kompartimentierung, die Bildung halb-durchlässiger Reaktionsräume, z. B. innerhalb einer Zelle, ist eine der segensreichen Erfindungen gewesen, um die Chemikalien beieinander zu halten.

Höhe die günstigste Route über den Boden eines längst ausgetrockneten 49-km-„Tümpels“ ermitteln helfen soll. Die Gesteinssammlung soll später von einem anderen Raumfahrzeug übernommen und zur Erde gebracht werden.

Wir drücken der NASA die Daumen und wenden uns dem zeitlosen „Himmelsblau“ zu,

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Februar

Von den Planeten zeigt sich einzig und allein der Mars am nächtlichen Himmel. Am 24. wechselt er in das Sternbild Stier und nähert sich dem Siebengestirn. Die Äquatorebene des roten Planeten ist ähnlich wie die der Erde gegen die Bahnebene geneigt, was zu Jahreszeiten Anlass gibt. Wenn Perseverance im Krater Jezero aufsetzt, hat dort der Frühling gerade Einzug gehalten.

Himmelsblau

Wie der spätere Lord Rayleigh vor 150 Jahren herausfand, handelt es sich um elastische Streuung des Sonnenlichts in der Atmosphäre, wobei das streuende Agens von seiner Ausdehnung viel kleiner als die Wellenlänge des gestreuten Lichts ist. Elastisch bedeutet monochromatisch. An der Energie eines Photons, d. h. seiner Frequenz, ändert sich nichts. Die Atmosphäre wird nicht erwärmt. Der Planet wird sogar gekühlt: Die Hälfte des Streulichts, etwa 6 % der einfallenden Sonnenergie, entschwindet in den Weltenraum, was die Erde für einen Alien zu einem „pale blue dot“ macht. Das Markenzeichen der Rayleigh-Streuung: Der Effekt geht mit der vierten Potenz der Frequenz, je kürzerwellig, desto stärker! Bei auf- bzw. untergehender Sonne sieht man das. Vom Blau keine Spur mehr im direkten Sonnenlicht. Es wurde auf seinem Weg durch die Atmosphäre binnen weniger Kilometern aus dem Sonnenstrahl vertrieben. Nur „warme“ Farben schaffen den langen Weg. Die Hälfte des gestreuten Blaus erreicht uns indirekt über den blauen Taghimmel. Um sich zu bräunen muss man nicht in der prallen Sonne schmoren. Ein Schattenplatz tut's auch! Und warum strahlt der Himmel blau und nicht violett, wo doch dieses noch stärker gestreut wird als jenes? Erstens ist Violett im Sonnenspektrum kaum vertreten, zweitens wird es in der Erdatmosphäre durch die Ozonschicht absorbiert, und drittens wird Violett nur

in Verbindung mit Blau vom menschlichen Auge wahrgenommen³: Es unterscheidet nicht zwischen dem Himmelsblau und einem monochromatischen Blau von 475 nm, verdünnt mit weißem Licht. Rayleighs Trumfplatte aber war die Erklärung der 1809 von dem französischen Astronomen Dominique François Arago (1786–1853) entdeckten Polarisation des Himmelsblaus. Bei einer Lichtablenkung von 90° erreicht der Polarisationsgrad fast 100 % (woran Reflexionstheorien gescheitert waren). Man schaue einmal durch ein Polarisationsfilter (z. B. Polaroid-Brille) nach oben, wenn der Himmel blau und die Sonne gerade im Auf- bzw. Untergehen begriffen! Je nach Drehung ist das Zenitblau hell oder dunkel. Man kann mit ein wenig Übung sogar die Lage der Sonne ermitteln, befindet sie sich unterm Horizont.

Licht ist eine elektromagnetische Welle. Die Ebene, in welcher der elektrische Feldvektor einer Elementarwelle schwingt, sei die Polarisationsebene. Im natürlichen Licht, einer Mischung, gibt es keine Vorzugsrichtung. Es ist unpolarisiert. Anders als wir Menschen, sind gewisse Insekten, u. a. Honigbienen und Heuschrecken, in der Lage, sich bei klarem Himmel anhand der Polarisation zu orientieren.

Einsteins Beitrag zum Himmelsblau

Um Einstein (1879–1955) noch etwas übrig zu lassen, hatte Rayleigh nur Einfachstreuung an vereinzelt Streuzentren im Blick gehabt. (Dabei hatte er zunächst an Fremdkörper, Salzkornchen, in der Luft gedacht, nicht an Luft selbst.) Der Gesamtstreuungseffekt ergibt sich als Summe der einzelnen Streuprozesse. Doch darf man das, Lichtwellen einfach addieren? Sie können u. U. einander auslöschen: Licht + Licht = Dunkelheit! Doch Rayleigh lag intuitiv richtig – weil die streuenden Luftmoleküle zufällig verteilt sind. Wären sie perfekt angeordnet, in Reihe und Glied, wie in einem Kristall, es gäbe gar keine Streuung! Unordnung erst macht den Himmel blau!

Was Lord Rayleigh unter den Teppich gekehrt, gab Einstein, der von Opa-

³Das Auge ist für das Überleben nützlich und kein physikalischer Detektor: Sein Träger ist an der Eigenfarbe eines Objekts interessiert, seinem wellenlängenabhängigen Reflexionsvermögen, nicht an der Beleuchtung! Die spektrale Information, welche von der Beleuchtung abhängt, wird mittels Farbpigmenten in sog. Zapfen eindeutig (nicht ein-eindeutig) auf nur drei Kanäle verdichtet. Farbe (eigentlich Farbbeempfindung) ist ein Produkt des Gehirns (was nicht wundert, ist doch das Auge eine Art „Ausstülpung“ desselben). Purpurfarben haben keine Entsprechung im physikalischen Spektrum. Sie erlauben, das sichtbare Spektrum zu einem Farbkreis zu schließen, auf dass jede Farbe zum Zwecke des Weiabgleichs eine Komplementarf Farbe habe.

leszenz angetan war, Gelegenheit, der Sache auf den Grund zu gehen. Er betrachtete mikroskopische Dichte- und damit Brechungsindexschwankungen in einem homogenen Medium. Den ewig wabernden Schwankungen um das Gleichgewicht, den Zustand maximaler Entropie, rückte Einstein thermodynamisch zu Leibe. Es sei vorweg genommen: Das Ergebnis ist das gleiche wie bei Rayleigh. Aber nun weiß man, warum: $\overline{N} = (N - \overline{N})^2$. Bei Rayleigh ist die Menge des gestreuten Lichtes aus einem kleinen Volumen Luft proportional der mittleren Anzahl \overline{N} , der darin befindlichen Moleküle, bei Einstein aber proportional dem mittleren Schwankungsquadrat. Beides läuft bei idealen Gasen, wo der reine Zufall herrscht, auf das Gleiche⁴ hinaus. Auf Flüssigkeiten, wo der Zufall limitiert ist, trifft dies nicht mehr zu.

Dichteschwankungen sind die Folge der „körnigen“ (molekularen) Struktur der Luft. Je kleiner das betrachtete Luftvolumen, desto stärker die Schwankung. Enthält ein Volumenelement im Mittel \overline{N} Teilchen, schwankt die Anzahl um $\pm\sqrt{\overline{N}}$. In einem Luftwürfelchen von einer, sagen wir, zehntel Lichtwellenlänge (blaues Licht) Kantenlänge halten sich 1000 ± 32 Moleküle auf. Die mittlere Schwankung beträgt also 3,2%. Das hat Konsequenzen. Von der Sonne komme eine (wegen ihres großen Abstands) ebene Welle einfarbigen Lichts. Wir betrachten der Einfachheit halber zwei Volumenelemente, die eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt sind und gleichzeitig von der ankommenden Sonnenlichtwelle erregt werden. (Das heißt, die Verbindungslinie zwischen den beiden Volumina stehe senkrecht zur Einfallrichtung der Welle.) Wegen der Verschiebung von einer halben Wellenlänge sollten sich die beiden Sekundärwellen, die von den Molekülen in den jeweiligen Volumina ausgehen, entlang der Verbindungslinie zwischen den beiden Volumina auslöschen. In 90° Winkelabstand zur Sonne sollte es kein Streulicht geben – wenn sich in beiden Volumchen gleich viele Moleküle aufhalten. Zufallsbedingt findet nicht jede Sekundärwelle, die von einem Molekül des einen Volumenelements ausgeht, eine um eine halbe Wellenlänge versetzte Partnerwelle von einem Molekül des anderen Volumenelements. Die Auslöschung ist unvollständig. Die (elektrischen) Amplituden der beiden Sekundärwellen sind proportional der Teilchenanzahl, N_1 bzw. N_2 , in den Volumenelementen. Die Differenz, $N_2 - N_1$, schwankt um Null mit $\pm\sqrt{2\overline{N}}$. Die Amplitude des Restlichts ist proportional $N_2 - N_1$, die Intensität, das Quadrat der Amplitude, geht, wie zu erwarten, mit \overline{N} . Was hier für eine Ablenkung von 90° beschrieben wurde, lässt sich unschwer auf alle Streuwinkel und alle Frequenzen übertragen, mit einer Ausnahme: In Ausbreitungsrichtung der Originalwelle ist die Interferenz stets konstruktiv⁵. In einem Kristall, wo Ordnung herrscht, wird Streulicht durch destruktive Interferenz unterbunden. Bei „kristalliner“ Luft könnten wir, wie Herr Gerst, tagsüber die Sterne sehen! Tritt dennoch Streulicht aus einem Kristall aus, deutet dies auf Störungen im Gefüge hin, Gitterfehler oder Unreinheiten!

Der Beitrag eines Volumenelements zum Streulicht entlang der Sichtlinie ist

⁴Bei einer poissonverteilten Zufallsgröße sind Erwartungswert und Streuung identisch.

⁵Deshalb breitet sich Licht bei Abwesenheit eines Hindernisses geradlinig aus! Nur Wellen, welche jeglichen Umweg scheuen, werden nicht durch Interferenz ausgelöscht.

proportional der Teilchendichte \bar{N} , welche mit zunehmender Höhe abnimmt. Die ferne blaue Himmelskuppel täuscht! Das Himmelsblau entsteht, Schattensfreiheit vorausgesetzt, längs der gesamten Sichtlinie und nicht in Himmelhöhe! Bergsteiger wie Alexander von Humboldt (1769–1859) wissen das: „Die Himmelsbläue wird tiefer und dunkler, je mehr man sich erhebt.“ Oberhalb der Lufthülle ist der Himmel stets schwarz und sternenübersät.

„Es gibt mehr zwischen Himmel und Erde . . .“

Zum Beispiel Wassermoleküle. Die streuen auch. Rayleighs Vorgänger, darunter Leonardo da Vinci, hatten das Himmelsblau mit feuchtem Dunst erklärt. Allerdings ist der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre gering⁶. Und er schwankt, was das Himmelsblau nicht tut. Es erfreut auch bei trockener Luft. Bilden sich Tröpfchen, reduziert das drastisch die Teilchenanzahl in einem Volumenelement. Das aber verstärkt den Streueffekt und macht Wassertröpfchen im Unterschied zu Wasserdampf sichtbar, zumal da die Moleküle in einem Tröpfchen oder einem Teil davon jetzt einträchtig im Gleichtakt⁷ schwingen⁸. Da größere Tröpfchen nicht mehr klein verglichen mit der Wellenlänge sind, entfällt die starke Wellenlängenabhängigkeit: Wolken sind weiß oder grau. Technisch gesehen, handelt es sich um Mie-Streuung, benannt nach Gustav Adolf Ludwig Mie (1868–1957). Charakteristisch ist die Vorwärtsstreuung. Sie macht dem Mond den Hof! Erschwerend kommt hinzu, dass es sich um Mehrfachstreuung handelt. Ein Wassertropfen streut nicht nur das Licht der Sonne, sondern auch das anderer Tropfen. (Er streut sogar Licht, das vom Erdboden bzw. einer Wasserfläche reflektiert wird.)

⁶1 m³ Luft wiegt etwa 1 kg, kann aber (bei 30°C) höchstens 30 g Wasser halten.

⁷Ein Wassertröpfchen bestehe aus N Wassermolekülen. Angeregt vom Sonnenlicht, schwingen diese unisono, d. h., die elektrischen Feldamplituden addieren sich, die Streuleistung geht mit N^2 . Die gleiche Anzahl von Molekülen als Wasserdampf, also unabhängig voneinander, erbringen eine Streuleistung proportional der Anzahl der Einzelmoleküle, N . Das macht den Unterschied! Die Streuleistung pro Wassermolekül wächst mit N , dem Volumen der Wassertröpfchen, also mit der dritten Potenz der Tröpfchengröße. Diese Überlegung setzt voraus, dass die Tröpfchen immer noch klein sind verglichen mit der Wellenlänge des gestreuten Lichts. Bei großen Tropfen verringert sich das Streuvermögen sogar mit der Tropfengröße: Wolken sind undurchsichtiger als Regenschauer.

⁸Das elektrische Wechselfeld einer Lichtwelle macht aus einem Molekül einen schwingenden Dipol, d. h., die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen fallen auseinander. Ein angeregter Dipol sendet seinerseits eine Welle aus – in alle Richtungen.

Bilden sich sechszählige Eiskriställchen und richten die sich auch noch aus, kommt es zu all den wundervollen Erscheinungen, die der Himmel zuweilen austeilt: von diversen Haloerscheinungen bis zur Glorie.

Auch bei wolkenlosem Himmel ist nicht alles Rayleigh. Zwei Dinge kommen hinzu. Um Sonnenauf- und -untergänge farblich quantitativ richtig wiederzugeben, müssen Schwebeteilchen von der Größe der Lichtwellenlänge berücksichtigt werden, sog. Aerosole, also diverse Dünste und Stäube. Allein mit Rayleigh-Streuung ist kein roter Sonnenuntergang zu zaubern. Und ohne Ozon (O_3) gäbe es die „Blaue Stunde“ nicht, die „Zeit zwischen Tag und Traum“, wie man 1953 herausfand.

Von außen betrachtet, ist es der hohe UV- und Blau-Anteil im Spektrum, der unseren Heimatplaneten einzigartig macht. Die letzte Aufnahmeserie, die Voyager-1 vor dem endgültigen Abschalten der Kameras geschossen hatte, offenbarte einen „pale blue dot“. Das war vor 31 Jahren. Das ikonische Foto von der Erde ist dem Planetenerforscher und Astrobiologen Carl Sagan (1934–1996) zu danken, der um den emotionalen Wert eines solchen Abschiedsfotos wusste. Es ist Rayleigh-Streuung in einer d ü n n e n Stickstoff-Sauerstoff-Atmosphäre⁹, deretwegen die Erde den Beinamen „blauer Planet“ trägt. Die Ozeane steuern nur wenig Blau bei. Dass die Erdbläue blass ist, ist der Bewölkung geschuldet (also der Mie-Streuung). Die Einzigartigkeit der Erdatmosphäre beruht auf dem Sauerstoff, dem „Müll“, den die Pflanzenwelt sorglos hinterlässt. Der aggressive Sauerstoff, vom UV des Sonnenlichts in Ozon (O_3) verwandelt, sorgt im Verein mit Wasser dafür, dass Schwefelverbindungen aus vulkanischen Ausdünstungen oxidiert und die entstehenden Aerosole aus der Luft durch Regen ausgewaschen werden können. Das hält die Luft klar und sauber.

Da gerade von vulkanischen Emissionen die Rede ist, Naturkatastrophen, wie die Ausbrüche der indonesischen Vulkane Tambora (April 1815) und Krakatau (August 1883), aber auch großflächige Waldbrände (September 1950) entladen gewaltige Mengen fester (u. U. öliger) Partikeln in die Atmosphäre, die dort lange verweilen. Das gibt Anlass zu ungewöhnlichen Farbspielen. Maler wie William Turner (1775–1851) oder Edvard Munch (1863–1944) haben diese meteorologischen Farbenräusche in stimmungsvollen und expressiven Gemälden festgehalten. Selbst eine b l a u e Sonne ist möglich! Dazu

⁹Neben Stickstoff (78 Vol.-%) und Sauerstoff (21 Vol.-%) enthält Luft noch 1 Vol.-% Argon. Für Entdeckung und Darstellung des Edelgases Argon erhielten Lord Rayleigh 1904 den Physiknobelpreis und Sir William Ramsay (1852–1916) den Chemienobelpreis.

müssen die Aerosole allerdings genau die richtige Größe haben, was selten der Fall – *once in a blue Moon*.

Für Polarisation fehlt uns der Sinn. Und doch verrät sie einiges über die Herkunft von Strahlung. Die thermische Strahlung der Sonne z. B. ist unpolarisiert. Zwar ist jedes Photon für sich 100 % polarisiert, der Photonen-Mix aber kennt keine Vorzugsrichtung. Zur Polarisierung kommt es durch Streuung und Reflexion. Reflexion findet aber auch in unseren Spiegelteleskopen und angehängten Apparaten statt. Man nennt das dann instrumentelle Polarisation. Sie macht dem messenden Astronomen das Leben schwer.

Der Kosmologe hat, hinter dem blauen, seinen eigenen Himmel. Gemeint ist jene undurchsichtige, 3000° heiße „Wand“, die mit 99,9998 % der Lichtgeschwindigkeit vor uns zu fliehen scheint, weshalb ihre „gefühlte“ Temperatur nur noch 2,7°K misst. Diese 3-K-Strahlung ist ein Musterbeispiel an Planck'scher Wärmestrahlung und vermutlich dennoch schwach polarisiert. Jedenfalls sucht man im kosmologischen Mikrowellenhintergrund nach Spuren von Polarisationsmustern, verursacht von sog. primordialen Gravitationswellen, Relikten aus der Inflationsphase. Fände man diese, stützte dies die Inflationstheorie. Bisher scheiterte der Nachweis an der leidigen Vordergrundpolarisation durch interstellaren Staub und galaktischer Synchrotronstrahlung. Die erste Erfolgsmeldung über den Nachweis sog. B-Moden vom Frühling 2014 war deshalb im Herbst bereits vom Tisch.