

Man muss die Welt nicht verstehen,
man muss sich nur darin zurechtfinden.

A. Einstein

Liebe Leserin, lieber Leser,

warum es des Nachts dunkel ist, davon war schon die Rede. Das ist abgearbeitet. Warum des Tags der klare Himmel blau ist, darüber wurde noch nicht gesprochen.

Bis vor kurzem glaubte ich zu wissen, warum das so ist. Inzwischen wurde ich eines besseren belehrt. Ich wusste nur, was seit den Tagen Lord Rayleighs alle wissen: dass kurzwelliges Licht stärker gestreut wird als langwelliges. Aber wie bereits Einstein fand, ist dies zu kurz gedacht. Und da haben wir auch bereits den Anlass: Vor einhundert Jahren, im Oktober 1910, erschien in den *Annalen der Physik* Einsteins Beitrag zur Theorie der Opaleszenz von Flüssigkeiten. Nichts verrät, dass es u. a. auch um das Blau des Himmels geht.

Himmelsblau war übrigens teuer. Giotto di Bondone (1266–1337), der Porträtist des Halleyschen Kometen von 1301 soll der erste Maler gewesen sein, der sich einen blauen Himmel leistete. Der Grundstoff Lapislazuli war, wie es hieß, „ultramarin“ – „überseeisch“.

Und einen runden Geburtstag gibt es auch. Vor einhundert Jahren, am 19. Oktober 1910, wurde in Lahore (Indien) Subrahmanyan Chandrasekhar geboren. 1930, auf der Überfahrt von Madras nach Southampton, vertrieb sich der 20-jährige die Zeit damit, die Einsteinsche Spezielle Relativitätstheorie flugs mit der damals noch jungen Quantenmechanik zusammenzubringen. Er fand, es müsse eine Masseobergrenze für entartete Sterne (weiße Zwerge) geben. Der Empfang in England war frostig. Der führende Astronom Englands, Sir Arthur Eddington (1882–1944), glaubte ihm kein Wort. Über ein halbes Jahrhundert später, 1983, sollte Chandrasekhar für die „Chandrasekharsche Grenzmasse“ mit dem Nobelpreis für Physik bedacht werden. Eine

späte Ehrung! Chandrasekhar war ein begnadeter Mathematiker und bereicherte viele Gebiete der Astronomie und Astrophysik. Er hatte die Angewohnheit, die Quintessenz seiner Untersuchungen auf dem jeweiligen Gebiet immer in einem dicken Buch darzulegen. Eine Periode seines Schaffens war der Mathematik des Strahlungstransports gewidmet. In diesem Zusammenhang wandte er sich auch durchaus irdischen Dingen zu: der Polarisation des sonnenbeschienenen Himmels und der Mehrfachstreuung in der Erdatmosphäre. (Beides ist so kompliziert, dass wir lieber nicht davon sprechen.) Er verstarb vor 15 Jahren in Chicago.

Chandrasekhar, nach dem die NASA ihr Röntgen-Observatorium im Weltraum benannt hat, hatte einen nicht minder berühmten Onkel, Sir Chandrasekhara Venkata Raman (1888–1970), Physiknobelpreisträger von 1930. Die Intelligenz lag da offenbar in der Familie. Warum ich das erwähne? Nun, Raman hatte den Preis für die Entdeckung der *inelastischen* Lichtstreuung (Raman-Effekt) erhalten. Das Himmelsblau verdankt sein Entstehen der *elastischen* Streuung.

Ich hoffe, Sie geben mir am Ende recht: Ich habe Ihnen nicht das Blaue vom Himmel versprochen.

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Oktober

Die Planeten machen sich rar am Nachthimmel. Venus wechselt Ende des Monats die Seite: Sie marschiert unbemerkt zwischen uns und der Sonne an dieser (unterhalb) vorüber. Der Astronom spricht von der *unteren* Konjunktion. Hesperus (Abendstern) ist Phosphorus (Morgenstern), wie schon die Astronomen des Altertums wussten. Saturn geht am ersten des Monats ebenfalls in Konjunktion. Für ihn ist es immer die „obere“. Er befindet sich ja hinter der Sonne. Auch er wird, mit etwas Geduld, zu einem Morgenplaneten.

Wer zu sehen ist, und das in fast voller Größe und ganz bequem am Abendhimmel, ist der Jupiter. Immer wieder reizvoll: der Lauf der vier Galileischen Monde. Über Durchgänge der Monde vor dem Jupiter, Sonnenfinsternisse auf dem Jupiter, Mondfinsternisse hinter dem Jupiter und nahe (scheinbare) Begegnungen der Monde unterrichten die astronomischen Kalender.

Die Sommerzeit endet mit dem Oktober. Martin Luther freut's. Sein Reformationstag dauert diesmal eine Stunde länger.

Himmelsblau

Das Himmelsblau ist eine Urerfahrung. Die biblische Vorstellung, von der Scheidung der Wasser unter der Feste – dem Firmament – von dem Wasser über ihr, war so abwegig nicht. Die mediterranen Völker wussten, dass Wasser blau erscheint – und das nicht nur wegen des Azur über ihren Köpfen! Reines Wasser, auch Eis, *absorbiert* tatsächlich langwelliges Licht und erscheint beim Hindurchschauen, ab Schichtdicken von einigen Metern, wie der Taucher weiß, bläulich! (Das ist bei schwerem Wasser, D_2O , nicht so!)

Noch Isaak Newton machte Wassertröpfchen für das Himmelsblau verantwortlich. Er irrte. Auf das atmosphärische Wasser aber kommen wir zurück. Des Rätsels Lösung heißt nicht selektive (farbabhängige) Absorption, sondern selektive *Streuung*. Und gestreut wird das Sonnenlicht in der Atmosphäre an den Allerweltsmolekülen der Luft: Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2), wie man seit 111 Jahren weiß.

Beschrieben und vermessen wurde die Lichtstreuung durch John Tyndall (1820–1893). Das physikalische Gesetz fand 1871 Lord Rayleigh, mit bürgerlichem Namen Sir John William Strutt (1842–1919). Ihm zu Ehren spricht man, handelt es sich um Streuung an kleinen Partikeln, solchen, die kleiner als die Lichtwellenlänge sind, von Rayleigh-Streuung. Ihr Markenzeichen: je kürzerwellig das Licht, desto stärker der Effekt. Das ganze geht mit der vierten (!) Potenz der Wellenlänge. Blaues Licht wird demnach fünfmal stärker gestreut als rotes! Das erklärt sowohl die Bläue des Taghimmels vor dem schwarzen Hintergrund des Weltalls als auch Morgen- und Abendrot – sollte man meinen. Bei tiefstehender Sonne legt ihr Licht einen langen Weg durch die Atmosphäre zurück. Dabei kommt ihm durch Streuung an Luftmolekülen vorwiegend das Blau abhanden, so dass die Sonnenstrahlen rötlich erscheinen.

Doch schon Einstein befand, dies sei nur ein Teil der Wahrheit. Am einfachsten, wir folgen dem Licht von seiner Quelle, unserem Stern, über die Moleküle der Luft bis hin zum Empfänger. Eine *tour de force*, zugegebenermaßen. Befassen wir uns also mit Elektrizität. Das klingt vertrauter als *Elektrodynamik* und verschreckt nicht so.

Eine *ruhende* elektrische Ladung übt auf eine andere Ladung eine Kraft aus, die mit dem Quadrat der Entfernung abfällt. (Bei Gravitationsladungen, Massen, ist es nicht anders, nur dass diese stets einander anziehen.)

Nun kommts! Bei einer Ladung, die sich *beschleunigt bewegt*, sei es, dass

sie hin- und herschwingt oder im Kreis herumläuft, beispielsweise in einem Teilchenbeschleuniger, kommt ein neuer Term ins Spiel. Dieser wächst mit der Beschleunigung, fällt aber nur mit $1/r$ ab! In einiger Entfernung von der schwingenden Ladung ist nur noch er von Belang. Was soll's, werden Sie sagen, ob mit $1/r^2$ oder $1/r$, was macht das schon?

Der Unterschied könnte gravierender nicht sein! Ohne den $1/r$ -Term gingen die Lichter aus im Universum. Kein Stern, kein blauer Himmel, kein Funk und Fernsehen, nichts! Es gäbe keine elektromagnetischen Wellen! (Zwischenfrage: Was geschehe, klänge die elektrische Wirkung noch allmählicher ab, z. B. mit $1/\sqrt{r}$? Das wiederum mündete in Reizüberflutung! Schon das $1/r$ -Gesetz für die Feldstärke einer beschleunigten Ladung sollte ja, in einem unendlich großen Raum, der gleichmäßig mit Lichtquellen bestückt ist, einen gleißelhellen Hintergrund zeitigen, wie der Bremer Arzt und Astronom Heinrich Olbers 1823 schrieb und vor ihm wohl schon andere wussten. Davor bewahrt uns, Kosmos-Boten-Leser wissen das, des Kosmos Jugendlichkeit, gepaart mit seinem Expansionsdrang.)

Vielleicht hat Sie das $1/r$ -Gesetz stützen gemacht. Sie sind sich ziemlich sicher, dass die Licht*intensität* mit $1/r^2$ abfällt. Richtig! Man muss unterscheiden zwischen elektrischer Feldstärke und Intensität. Diese ist das Quadrat von jener, was wichtig ist, geht's um Überlagerung (Interferenz)!

Für den Physiker Richard Feynman (1918–1988) ist es schlicht ein Wunder, dass – dank des „ $1/r$ “! – ein schwingendes Elektron auf einem Stern in der Netzhaut des Auges eine elektrische Wirkung¹ hervorrufen *kann*!

¹Wann und wo es in der Netzhaut zu einer Reizung kommt? – unvorhersehbar! Das moderne Denken kreist um Wahrscheinlichkeiten. Das Teilchen hat die Welle verdrängt. Wie ich las, seien Netzhautstäbchen in der Lage, *einzelne* Photonen zu registrieren, natürlich nicht jedes! Röntgenastronomen zählen schon lange Quanten. Die optischen tun es ihnen inzwischen nach. Nicht, dass die klassische Elektrodynamik nun falsch wäre – die Änderungen durch die Quantenphysik sind marginal –, was sich geändert hat, und zwar dramatisch, ist die Sicht auf die Wirklichkeit: *Das Quadrat der Feldstärke mutiert zu einem Maß der Wahrscheinlichkeit, ein Photon anzutreffen*. Die Berechnung sei genial einfach, so der Experte. (An der Durchführung beißen sich allerdings selbst geniale Experten die Zähne aus.) Da Sie als Beobachter nie wissen, ja noch nicht einmal wissen wollen dürfen – Sie griffen ansonsten in das Geschehen ein –, welchen Weg ein Photon nimmt, um von A nach B zu gelangen, ziehen Sie *alle* Routen ins Kalkül, lassen keinen Umweg aus, beachten jedes Hindernis, etwa eine störende Wimper vor der Augenlinse, und addieren die unendlich vielen Möglichkeiten phasengerecht auf. Und bitte am Schluss quadrieren! Ein Photon verhält sich in der Tat so, als spielte es gleichsam *alle* denkbaren Lebensläufe durch und brächte diese alle zur Überlagerung (Interferenz). Warum das so ist? „Überwältigend unbe-

Der Trick der Natur, der Kommunikation zwischen Atomen und zwischen Menschen ermöglicht, ist die beschleunigte Bewegung. Nur Veränderung teilt sich mit! Wir sprechen deshalb von *Elektrodynamik*!

Doch was haben beschleunigt-bewegte elektrische Ladungen mit dem blauen Himmel zu tun? Der blaue Himmel ist Sonnenlicht, das uns auf Umwegen erreicht. Die schwingenden Elektronen auf der Sonne veranlassen die Luftmoleküle zum Mitschwingen. Das nun ist sonderbar. So ein Luftmolekül, also N_2 oder O_2 , ist eigentlich elektrisch neutral, zumindest nach außen hin. Aber nur, solange der Schwerpunkt der negativen Ladungswolke (Hüllenelektronen) mit dem Schwerpunkt der positiven Kernladungen zusammenfällt, d. h. solange kein äußeres elektrisches Feld stört. Das Wechselfeld, das schwingende Sonnenelektronen in der Erdatmosphäre erzeugen, bewirkt eine periodische Verschiebung der Ladungsschwerpunkte. In der Sprache der Physik: Es wird ein Dipolmoment induziert. Die schweren Atomkerne sind kaum aus der Ruhe zu bringen, aber die ans Molekül gebundenen leichten Elektronen schwingen, und zwar mit der Frequenz des Sonnenelektrons. Die Schwingung ist eine aufgezwungene!

Um unser Vorstellungsvermögen nicht unnötig zu strapazieren, bemüht man gerne, was mathematisch korrekt ist, den sog. harmonischen Oszillator. Stellen Sie sich einfach vor, das Elektron hänge an einer Feder. Angeschubst vollführt so ein Ding eine gedämpfte Sinusschwingung mit einer Frequenz, die lediglich von der Eigenschaft der Feder und der Masse der Ladung diktiert wird. Gedämpft ist die Schwingung, weil die Ladung ja durch Abstrahlung einer elektromagnetischen Welle Energie verliert. (Der Rundfunktechniker spricht vom Antennenwiderstand, um den Leistungsverlust eines HF-Oszillators zu beziffern.)

Der vom Sonnenlicht stimulierte Oszillator schwingt in derselben Ebene wie das Sonnenelektron und auch im gleichen Takt! Man muss nur die Zeitverzögerung von acht Minuten einkalkulieren. (Die Sonne ist acht Lichtminuten entfernt.) Und was macht der fremderregte Oszillator? Er wird zu einer molekularen Antenne und erzeugt seinerseits ein elektrisches Fernfeld, das mit $1/r$ abfällt. (Das magnetische Feld, welches vom Strom herrührt – die Ladung bewegt sich ja – ist nebensächlich.) Es ist dieses sekundäre elektrische

antwortbar!“ Die QED jedenfalls, die Quantenelektrodynamik, ist die beste physikalische Theorie, die die Physiker haben – auch die genaueste. Um die Vorhersagen der QED, die bis auf die Schwerkraft und die Kernkraft faktisch alles beschreibt, zu überprüfen, müssen Experimentatoren inzwischen bis auf elf Nachkommastellen genau messen!

Feld, das letztendlich über eine Entfernung von vielen Kilometern bevorzugt die blauempfindlichen Zäpfchen in der Netzhaut reizt. Gut die Hälfte der Sekundärstrahlung verschwindet allerdings in den Weltenraum. Die Erde erscheint von außen bläulich.

Nur für den Fall, es interessiert Sie brennend: Auf der Schwinggeraden selbst, der Richtung, in der der Oszillator schwingt, gibt's kein Fernfeld. Ein Elektron, das längs der Sichtlinie pendelt, bleibt für den fernen Betrachter unsichtbar. Nur eine Ladung, die man lateral schwingen „sähe“, teilt sich mit! Bisher war von einem einzelnen harmonischen Oszillator die Rede, der sympathisch, wenn auch zeitverzögert, mit einem Sonnenelektron mitschwingt. Ein Oszillator macht aber noch keinen blauen Himmel. Nun, an Oszillatoren, Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen, herrscht kein Mangel. In jedem Kubikzentimeter Luft gibt's Trillionen solcher Elektronen an Federn. Zum Glück gilt das Überlagerungsprinzip: Die einzelnen Kräfte (Feldstärken) addieren sich vektoriell ohne sich in die Quere zu kommen. Und was kommt dabei heraus?

Das hängt, wie Einstein ahnte, davon ab, *wie die Oszillatoren im Raum verteilt sind*.

Der Unterschied zwischen Feldstärke und Lichtintensität (Quadrat der Feldstärke) ist wirklich wesentlich. Nach dem Überlagerungsprinzip addieren sich vektoriell nur die Feldstärken. Das Quadrat einer Summe ist aber im allgemeinen nicht die Summe der einzelnen Quadrate. Sie entsinnen sich jetzt dankbar der binomischen Formel $(A + B)^2 = A^2 + 2AB + B^2$ im Mathematikunterricht?! Die Konsequenz: Intensitäten müssen sich nicht addieren. Im Extremfall ergibt $1 + 1$ gleich 4, oder, um das andere Extrem zu nennen, wird aus $1 + 1$ eine 0. Zwei Lichtbündel der Intensität eins können sich durch *konstruktive* Interferenz zu einem mit der Intensität vier aufaddieren oder sich – bei *destruktiver* Interferenz – gänzlich auslöschen.

Machen wir's kurz. Sind die Oszillatoren rein *zufällig* im Raum verteilt, wie im Falle der Luftmoleküle, annullieren sich die Interferenzterme (das „ $2AB$ “ in obiger Formel) im Mittel und das Quadrat der Summe der Feldstärken ist statistisch gleich der Summe der Quadrate. Die Intensitäten addieren sich. Wir hätten nichts anderes erwartet. Drei Streuzentren, drei harmonische Oszillatoren, bringen die dreifache Intensität des Streulichts von einem. Man nennt das *inkohärente* Streuung.

Das andere Extrem: Bei *regulärer* Anordnung der Oszillatoren werden seitlich abgehende Wellen weginterferiert. In einem Kristall bleibt dem Licht nichts

anderes übrig, als sich geradlinig auszubreiten! (Wir reden hier nicht von Röntgenstrahlen!) Das Kollektiv von Streuern, falls hinreichend groß und ohne Fehl, sprich ohne Störstellen im Gitter, unterbindet jegliche Abirrung²! Mit einer Kristallsphäre als Firmament wäre ein blauer Himmel also gar nicht machbar. Es sei denn, diese wäre nicht makellos und opalisierte. Finden wir uns damit ab: Der blaue Himmel ist molekularer Liederlichkeit geschuldet. Genau das hat Einstein 1910 herausgearbeitet³. Ohne zufällige Schwankungen der Luftdichte (also des Brechungsindex) auf kleinstem Raum, hervorgerufen durch die regellose Bewegung der Luftmoleküle, würde auch ein Lord Rayleigh kein Blau vom Himmel zaubern können.

Das Stichwort „Firmament“ gemahnt uns, noch einmal auf das Wasser zurückzukommen. Für das Himmelsblau ist es zwar ohne Belang – die Wassersäule misst Zentimeter, nicht Meter, wie erforderlich wäre, um über Absorption den Himmel blau zu färben –, aber wir benötigen unbedingt noch ein Beispiel für *kohärente* Streuung in der Atmosphäre. Da ist uns das Wasser gerade recht. Die Luft enthält Wasserdampf. Der macht sich im sichtbaren Licht⁴ allerdings nicht bemerkbar. Was sonderbar ist: die gleiche Wassermenge, bloß in Tröpfchen verpackt, macht sich optisch sehr wohl bemerkbar – als Wolke.

Man denke sich N Oszillatoren. Jeder erzeuge in der Netzhaut eine Feldstärke von der Größe eins. Da die Gesamtintensität bei zufälliger Anordnung der Oszillatoren einfach die Summe der Quadrate der Feldstärken ist, ergibt sich die Gesamtintensität N . Bilden hingegen diese N Oszillatoren ein Klümpchen,

²An dieser Stelle eine völlig überflüssige Abschweifung: Sollten Sie jetzt vermuten, die Geradlinigkeit der Lichtausbreitung im *Vakuum* habe etwas mit Interferenz zu tun, liegen Sie goldrichtig. Laut QED sind beliebig krumme Wege erlaubt, aber nur die „geradlinigen“ Photonen überdauern auf *langen* Strecken! Wenn Sie nun denken, die krummen Wege seien überflüssig, liegen Sie allerdings schief. Verbieten Sie die, durch Blenden beispielsweise, weichen Ihnen die Photonen bei erster Gelegenheit zur Seite aus. Das ist der eigentliche Grund, warum unsere Fernrohre große Öffnungen haben. Dadurch wird den Photonen, die die Bildschärfe vermasseln, erlaubt, sich wegzuintersperieren. Die Energie geht nicht verloren. Sie kommt den „guten“ Photonen zugute. Das Bild wird schärfer, und Sie können schwächere Lichtpunkte wahrnehmen. Das wichtigste an einer Linse oder einem Spiegel ist die Fassung, die Größe der sog. Eintrittspupille! Auf alles andere kann man verzichten. Radioastronomen wissen das.

³Einsteins Überlegungen fußen auf der Theorie molekularer Schwankungserscheinungen seines kongenialen Physikerkollegen Marian von Smoluchowski (1872–1917). Smoluchowski war es, der die Bedeutung von Schwankungen erkannte.

⁴Ganz anders im Infraroten: Dort blockiert er das Auskühlen der Erde. Wasserdampf ist Treibhausgas Numero eins! Ohne den Wasserdampfmantel um die Erde wäre es empfindlich kalt.

das kleiner als die Lichtwellenlänge ist, so schwingen alle N Oszillatoren im Sonnenlicht im Gleichtakt, kohärent (= zusammenhängend) eben. Auf der Netzhaut addieren sich die Feldstärken zu N Einheiten, die Intensität erreicht N^2 .

Sie merken, worauf das hinausläuft! Lagern sich jeweils zehn Wassermoleküle zusammen, erhöht sich die Streustrahlung um das Zehnfache, lagern sich 1000 Moleküle zusammen, um das Tausendfache. In Gemeinschaft kann so ein Wassermolekül bis zu einer Milliarde Mal stärker streuen als es das als Einzelteilchen täte! Große Tröpfchen streuen nicht mehr selektiv. Hinzu kommt die Vielfachstreuung. Bevor uns das Licht erreicht, wechselt es mehrfach die Richtung. Wolken erscheinen deshalb weißlich.

Sie haben durchgehalten bis hierher und das unguete Gefühl, von der zugrunde liegenden Physik eigentlich nichts verstanden zu haben. Trösten Sie sich, Sie sind in guter Gesellschaft. Ich habe das Einstein-Zitat nicht ohne Grund an den Anfang gestellt. Zwar weiß man inzwischen genau, wie sich Licht in dieser oder jener Situation verhält – man kann mit ihm rechnen –, was es *ist*, entzieht sich der Vorstellung. Das Photon bleibt unsäglich.

Ist damit alles gesagt und unser Thema erschöpft? Keineswegs! Aber Sie sind es vielleicht von so viel Physik, und ich bin es sowieso. Entgegenen wir dem Einwand, der Himmel müsste nach dem Gesagten violett erscheinen, ein ander Mal. Das hat sowieso mehr mit dem Auge und dem Farbsehen zu tun als mit Physik. Ach ja, auch die „blaue Stunde“, die „Zeit zwischen Tag und Traum“, sie spricht nicht nur den Dichter an. Für den „atmosphärischen Optiker“ ist sie die sprichwörtliche Ausnahme von der Regel: Hier spielt tatsächlich Absorption eine Rolle, die vom Ozon (O_3). Auch darauf kommen wir zurück.