

## Das Blaue vom Himmel

Eine rabenschwarze, weil mondlose Nacht liegt hinter Ihnen. Die stimmungsneutralen Grauabstufungen der Morgendämmerung und das schon etwas wirksamer antörnende Gefolge zarter Pastelltöne in der Stunde der early birds haben Sie womöglich noch verschlafen, so dass Sie jetzt von den schon kräftigen Sonnenstrahlen geweckt werden. Der nunmehr fällige Blick aus dem Fenster ist Verheißung pur: Ein makellos blauer Himmel spannt sich von Horizont zu Horizont und stellt einen perfekten Tag in Aussicht.

Aber wieso eigentlich blau? Diese vermeintlich banal bis naiv wirkende Frage hat schon die Naturphilosophen der Antike verzweifeln lassen. Generationen späterer Naturgelehrter haben sich an der Erklärung dieses geradezu alltäglichen Phänomens versucht. Unter anderem formulierte auch Goethe in seiner Farbenlehre eine Deutung, die die von Isaac Newton entdeckte spektrale Zerlegung von Sonnenlicht am Prisma ersetzen sollte. Außer neuen Mutmaßungen und eher vernebelnden Umschreibungen brachte jedoch auch sein Ansatz keinen wirklichen Erkenntnisfortschritt. Durch bloßes Nachdenken und Spekulieren ist das Problem eben nicht zu lösen. In einer solchen Ausgangslage sind gewöhnlich Experimente gefragt.

### Atmosphärenphysik im Pferdestall

Um 1850 führten der Wiener Physiologe Ernst Wilhelm Ritter von Brücke (1819–1892), der unter anderem die Querstreifung der Skelettmuskulatur entdeckte, und wenig später auch der irische Physiker John Tyndall (1820–1893) Versuche mit Rauch und trüben Flüssigkeiten durch. Im Rahmen der normalen geometrischen Optik waren die Farbeigenheiten der irdischen Luft-hülle aber nicht vollständig zu erklären. Erst John William Strutt (1842–1919), nach dem Tod seines Vaters im Jahre 1873 zu Lord Rayleigh geadelt, gelang ein entscheidender Durchbruch. Strutt hatte sich in einem ehemaligen Pferdestall des elterlichen Hof-

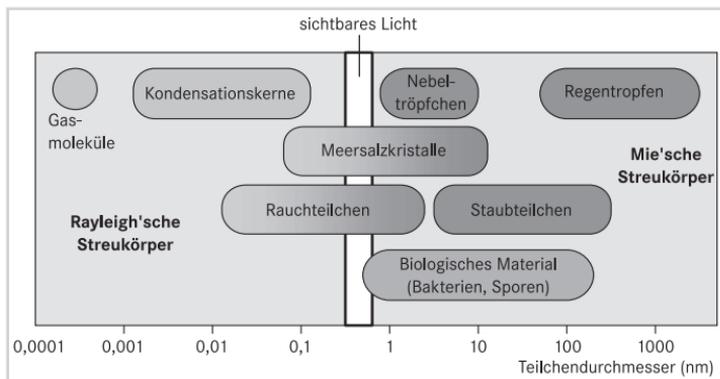
guts ein Versuchslabor eingerichtet und widmete sich außer der Gutsverwaltung, die er eher nebenbei erledigte, fortan als Privatgelehrter vor allem seinen physikalischen Experimenten. Lord Rayleigh erklärte das Blau des Himmels mit der Lichtstreuung an den molekularen bzw. atomaren Bestandteilen in der Luft, obwohl die Atomistik zu seiner Zeit noch kaum entwickelt war. In der Tat ist das Blaue vom Himmel ein Summeneffekt der Wechselwirkungen des Sonnenlichtes mit den Gasmolekülen der Atmosphäre. Diese ablenkende Streuung von Lichtstrahlen durch Moleküle nennt man nach dem Urheber der ersten zutreffenden Erklärung Rayleigh-Streuung oder Rayleigh-Effekt.

### **Das Licht zeigt sich zerstreut**

Beim Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre finden ständig Wechselwirkungen mit der Materie statt, genauer mit den Elektronen der in der Luft enthaltenen Moleküle. Das elektrische Feld der Lichtwelle regt die gebundenen Elektronen der Luftmoleküle zu erzwungenen Schwingungen an. Sie werden dabei zu Hertz'schen Dipolen und strahlen ihrerseits elektromagnetische Wellen ab – eben das Streulicht. Die Rayleigh-Streuung ist nur möglich, wenn die anzuregenden Gasmoleküle wesentlich kleiner sind als die elektromagnetischen Wellen des sichtbaren Spektrums (vgl. Abbildung 6). Nach dem Rayleigh'schen Gesetz ist die Streuung umgekehrt proportional zur vierten Potenz der beteiligten Wellenlängen. Formelmäßig kann man daher die Intensität  $I$  des Streulichtes für eine bestimmte Wellenlänge  $\lambda$  mit der Beziehung  $I_\lambda = 1/\lambda^4$  wiedergeben. Der Streueffekt ist demnach wellenlängenabhängig. Nimmt man für Rotlicht ( $\lambda = \text{ca. } 700 \text{ nm}$ ) einen relativen Streufaktor von 1 an, beträgt er für violettes Licht ( $\lambda = \text{ca. } 400 \text{ nm}$ ) nach dem Rayleigh'schen Gesetz bereits 16. Das vom Himmel auf die Erde gelangende Streulicht ist demnach zwar immer eine Mischung aus allen an den Luftmolekülen gestreuten Spektralfarben des Sonnenlichtes, aber vorherrschend aus solchen der kurzwelligen Anteile.

Weil violettes Licht wegen seiner kurzen Wellenlänge am stärksten gestreut wird, müsste der Himmel eigentlich violett erscheinen. Nun ist jedoch der Violettbereich im Sonnenlicht anteilig nicht allzu prominent vertreten (daher auch im Regenbogen nur relativ schwer erkennbar), und außerdem sind unsere Augen für diesen Spektralbereich nicht besonders gut sensibilisiert. Das violette Streulicht geht also in unserer Farbwahrnehmung des Himmels fast völlig unter. Somit bleibt im Wesentlichen der stark gestreute Blauanteil, und der bestimmt in der Hauptsache die Himmelsfarbe. Ein besonders strahlendes Blau ergibt sich immer dann, wenn die Atmosphäre nur relativ wenige kondensierte Wassertröpfchen und/oder Staubpartikeln enthält und fast nur aus den üblicherweise vorhandenen Luftgasen Stickstoff ( $N_2$ ), Sauerstoff ( $O_2$ ), Argon (Ar) und Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) besteht. Rekordhalter unter den schönsten Blautönen ist übrigens nach einer vom britischen National Physical Laboratory veröffentlichten Hitliste die Luft über Rio de Janeiro.

Die direkte Abhängigkeit der Rayleigh'schen Lichtstreuung vom Gasgehalt der Atmosphäre erklärt ferner leicht einsehbar, warum der Himmel bereits im erdnahen Weltraum samt schwarz



**Abb. 6:** Größenordnungen lichtstreuender Teilchen in der Atmosphäre. Sind ihre Durchmesser kleiner als die Wellenlänge des auftreffenden Lichtes, wirken sie als Rayleigh'sche Streukörper. Die Lichtstreuung an größeren Teilchen erfolgt entsprechend der Mie-Theorie.

(um in der Wortwahl des Astronauten Neil Armstrong anlässlich der Mission Apollo 11 zu bleiben) erscheint. Von hohen Bergen aus betrachtet zeigt er sich beim Blick senkrecht nach oben ebenfalls deutlich dunkler blau als vom Meeresniveau. Dieser Effekt ist außerdem sehr eindrucksvoll erkennbar, wenn Sie aus dem Kabinenfenster Ihres Ferienjets bei einer Flughöhe im Bereich um 39 000 ft (= ca. 13 000 m) einmal senkrecht nach oben blicken.

### **Warum sind die Wolken weiß?**

Der Greifswalder Physiker Gustav Adolf Mie (1869–1957) beschrieb um 1908, dass ab einer gewissen Partikelgröße in der Atmosphäre die Lichtstreuung nicht mehr (nur) dem Rayleigh'schen  $\lambda^{-4}$ -Gesetz folgt. Er formulierte ein allgemeineres Prinzip der Lichtstreuung, das die Rayleigh-Streuung als Spezialfall enthält. Die Luft besteht nämlich nicht nur aus Gasen, sondern auch aus einer Ansammlung von Wassertropfchen und Eiskristallen zwischen 0,01 und 1 mm Durchmesser mit einem Häufigkeitsmaximum zwischen 10 und 20  $\mu\text{m}$ . Fachleute bezeichnen diese wässrigen Partikeln als Hydrometeoren. Die optisch gleichartig wirkenden Aerosole sind dagegen verdriftete Meersalzpartikeln, Sulfate, Nitrate sowie Rauch- und Ascheteilchen von Bränden, Vulkanausbrüchen oder Industrie-Emissionen. Alle diese Teilchen sind größer als Wellenlängen des sichtbaren Lichtes. Der Grenzwert für den Durchmesser eines Mie'schen Streukörpers beträgt etwa ein Zehntel der Wellenlänge des roten Lichtes (vgl. Abbildung 6). Damit können sie von einer Lichtwelle nicht mehr gleichmäßig elektrisch polarisiert werden, sondern reflektieren das Licht diffus.

Sofern Mie'sche Streukörper vorhanden sind, machen sie sich bei einem relativ längeren Lichtweg stärker bemerkbar. Bei geringer Luftfeuchtigkeit zeigt sich der Himmel eigentlich nur in Horizontnähe etwas weniger blau und gelegentlich sogar dunstig-weißlich. Bei hoher Luftfeuchtigkeit verblasst er dagegen vollends und wirkt durch eine dünne Wolkendecke wie verschleiert.

Schließlich kann die Schichtdicke der Wassertröpfchen bzw. Eiskristalle so sehr zunehmen, dass das Licht die Wolke nur noch nach komplexer Mehrfachstreuung verlassen kann. Ob die Wolke dann grellweiß erscheint oder mit gewittrigen Grautönen droht, hängt lediglich davon ab, aus welcher Richtung wie viel Licht zum Beobachter vordringt.

### **Polarisierter Himmel**

Die atmosphärische Optik erweist sich auch in anderer Hinsicht als ein ungewöhnlich komplexes physikalisches Problemfeld. Außer den himmlischen Farbeffekten spielt auch die unterschiedliche Polarisation der Himmelsstrahlung eine große Rolle. Fotografen kennen die dramatisierende Bildwirkung beim Einsatz eines Polarisationsfilters. Auch so manche Sonnenbrille lenkt polarisiertes Licht anteilig aus und lässt Wolken sowie Wellen dadurch in etwas anderem Licht erscheinen. Eine detailliertere Betrachtung der Polarisationsvorgänge filtern wir hier aus mancherlei Gründen aus und fügen nur noch einen kleinen Nachtrag zum Eingangsstichwort rabenschwarze Nacht an: Je nach Phase schießt der Mond eine Menge reflektiertes Sonnenlicht durch die nächtliche Atmosphäre – und diese erscheint wegen der selbstverständlich auftretenden Rayleigh-Strahlung in einem ziemlich dunklen Blau. Astrofreunde mögen diesen natürlichen Photosmog nicht, weil er den optischen Genuss eines klaren Sternenhimmels empfindlich stört.