

Lichtphänomene in der Atmosphäre

Streuungsphänomene

Ein Prozeß ist für die Entstehung der Himmelsfarben besonders wichtig: die **Streuung des Lichts** an den verschiedenen Partikeln in der Atmosphäre. Durch diesen mal über alle Wellenlängen gleichmäßig wirkenden, mal einzelne Bereiche des Spektrums bevorzugenden Vorgang wird ein mehr oder weniger großer Teil der in einem Lichtstrahl enthaltenen Wellenlängen in eine andere Richtung geleitet als der ursprüngliche Strahl. Die Verteilung des Lichts hängt dabei im Wesentlichen von dem Verhältnis zwischen der Partikelgröße und der Wellenlänge des einfallenden Lichts ab. Daran gemessen können wir in der Hauptsache die folgenden zwei Streuungsarten unterscheiden.

Gleichmäßige Streuung des Lichts zu nahezu weiß – Die Mie-Streuung und der Dunst

Dunst ist für uns Photographen ein fieser Gegner, denn er beraubt Himmel und Landschaft beinahe aller Farben, er dunkelt die niedrig stehende Sonne spürbar ab – in extremen Fällen meint man, unser Lichtspender sei schon eine Stunde vor seiner Zeit untergegangen – er läßt die Konturen ver-

schwimmen, so daß sich Vorder- und Hintergrund nicht mehr recht trennen und es sowohl unserer Wahrnehmung als auch unseren Aufnahmen an Tiefenwirkung mangelt und nicht zuletzt dämpft der Dunst oft auch ganz allgemein unsere Stimmung.

Aber haben Sie schon einmal die Prospekte der namenhaften Photozubehör-Hersteller durchgeblättert und darin einen Filter entdeckt, der versprach Ihre Aufnahmen von dem häufig vorkommenden milchig-weißen Nachmittagsdunst zu befreien? Nein? Geht auch mit technischen Feinissen nicht. Ein Blick auf die hinter dem alles erstickenden Dunst stehenden physikalischen Vorgänge macht schnell deutlich, warum nicht.

Ganz allgemein ist **Dunst** eine Trübung der Erdatmosphäre, die zur Minderung der Sicht auf fünf bis acht Kilometer oder weniger, jedoch nicht unter einen Kilometer führt und man differenziert ihn in „**feucht**“ (hervorgerufen durch Wasserdampf in der Luft, englisch *mist*) und „**trocken**“ (hervorgerufen durch feste Teilchen in der Luft wie Rußpartikel oder Rauch, Pollen, Wassertröpfchen, Salzkristalle, Stäube von der Erdoberfläche, Kohlenstoff, Pflanzenteilchen und vor allem Aerosole, englisch *haze*). Bei Sichtweiten von weniger als einem Kilometer sprechen wir von Nebel.

Aerosole sind Mischungen aus mindestens zwei Stoffen, die sich nicht oder kaum ineinander lösen oder miteinander verbinden. Meist handelt es sich um Gemenge aus einer Flüssigkeit und einem darin fein verteilten Feststoff in einem Gas, oft in Luft. Ihr Größenspektrum reicht von einigen Nanometern bis in den Bereich weniger Millimeter Durchmesser. Aerosole finden sich in der Atmosphäre als Mischungen von beispielsweise Pollen, Bakterien, Sporen, Staub, Rauch, Seesalz oder Asche und Wassertröpfchen. Vulkanausbrüche können natürliche Aerosolmengen in Größenordnungen freisetzen, die das Wetter im globalen Maßstab beeinflussen.

80 % relative Luftfeuchtigkeit sind die Grenze in der Unterscheidung der beiden Dunstarten. Wird dieser Wert überschritten, so weist die Luft genug eigentlich unsichtbaren **Wasserdampf** (der gasförmige Zustand des Wassers, in der sich die Moleküle schnell genug bewegen, um voneinander getrennt zu bleiben) auf, um die Sicht zu mindern und wir sprechen vom **feuchten Dunst**. In unseren mitteleuropäischen Breiten ist das aber vergleichsweise selten der Fall und deswegen haben wir es auch viel häufiger mit **trockenem Dunst** zu tun, der vor allem über den Landmassen durch luftaustauscharme Hochdruckwetterlagen begünstigt

wird. Bei solchen Inversionswetterlagen können sich im Verlauf mehrerer Tage so viele Schwebeteilchen und Aerosole in der Atmosphäre sammeln, daß der Extremfall Smog entsteht.

Die häufigsten Wetterlagen zeichnen sich dadurch aus, daß die warme Luft von der Erdoberfläche aufsteigt und sich dabei abkühlt. Bei einer In-

Das Licht der Sonne, das wir auf der Erde wahrnehmen, nennen wir Sonnenlicht. Tageslicht aber ist die Mischung aus Sonnenlicht, dem in der Atmosphäre gestreuten Himmelslicht und dem von der Oberfläche reflektierten Licht.

versionswetterlage ist dieses Verhältnis umgekehrt, kalte Luft unten und warme oben also. Kalt ist aber schwerer als warm, hat nicht das Bestreben aufzusteigen, und so fehlt der für die Durchmischung der Luftschichten nötige Wind. Die Folge: In der kalten Schicht stauen sich die den Dunst verursachenden Schadstoffe und Partikel. Inversionswetterlagen entstehen bevorzugt im Herbst und Winter, wenn die Sonne es nicht mehr schafft, die bodennahe Schicht zu erwärmen.

Vor allem über den heftig industrialisierten Gegenden Nordamerikas, Europas und Asiens spielt während

Lichtphänomene in der Atmosphäre

der heißen Sommermonate aber auch das von Kohlekraftwerken freigesetzte Schwefelsulfat eine wichtige Rolle bei der Bildung von Dunst. In der Atmosphäre mischen sich die Sulfatpartikel mit kondensiertem Wasserdampf zu dunstverursachenden Aerosolmenngen.

Aus dieser Liste ziehen wir die Erkenntnis, daß der Dunst sowohl auf natürlichen als auch seit dem letzten Jahrhundert verstärkt vom Menschen heraufbeschworenen Ursachen beruht.

Nun haben wir geklärt, welche Teilchen zum Entstehen von Dunst vorhanden sein müssen, fehlt also noch ihr Beitrag zur Lichtstreuung. Den liefern die Berechnungen des deutschen Physikers **Gustav Mie** aus dem Jahr 1908. Der nach ihm benannten Theorie zufolge streuen regelmäßig geformte Teilchen, deren Durchmesser größer ist als der Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts (400 bis 700 nm), die einfallende Strahlung mit zunehmender Größe immer mehr nur nach vorn und immer gleichmäßiger über das Gesamtspektrum. „Nach vorn“ bedeutet in diesem Fall entgegen der Richtung, aus der das Licht einfällt und „gleichmäßig“, daß kein Wellenlängenbereich bevorzugt wird und sich alle Farben zu einem mehr oder weniger deutlichen Weiß ergänzen.

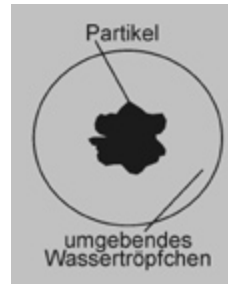


Abb. 14: Ein Aerosol besteht aus einem festen Partikel im Kern und einem diesen umgebenden feinen Wassertröpfchen.

Deswegen erscheint uns der Himmel, wenn wir ihn als dunstig bezeichnen, als eher hell und milchig weiß.

Weil die Streuung so gleichmäßig erfolgt, besitzen wir nicht viele Mittel, um den Dunst in einer Aufnahme zu unterdrücken. Ein **UV-Filter** hilft, die eine leichte Unschärfe verursachende UV-Strahlung auszuschalten, weil die Dunstpartikel die kürzeren Wellenlängen am stärksten streuen und der ultraviolette Bereich deswegen am stärksten betroffen ist. Der **Polarisationsfilter** kann die Bildqualität bei leichtem Dunst verbessern, indem er das einigermaßen gleichmäßig polarisierte gestreute Licht beseitigt. Und zu guter Letzt können wir den **Aufnahmestandort** so wählen, daß der Blick von der Sonne und damit der Hauptstreuerrichtung weg gerichtet ist.

Glücklicherweise hält die Atmosphäre einige Mechanismen bereit, um sich nach einer Weile selbst von den Dunstpartikeln zu befreien. Zunächst

ist da die Schwerkraft, die die größeren und schwereren Störfriede dazu zwingt, sich nach unten abzusetzen. Die kleineren und leichteren Stoffe werden dann entweder durch Turbulenzen verursachende aufsteigende Luftmassen in höhere Luftschichten befördert oder in einem alles reinigenden Gewitter ausgewaschen. Letzteres setzt aber erstmal eine gehörige Menge aufsteigenden und kondensierenden Wasserdampf voraus.

Mit der **Bewölkung** und dem **Nebel** finden wir am Himmel und auf der Erde noch weitere weiße Flecken, die der Mie-Streuung Vorschub leisten. Vom Dunst unterscheiden sich beide physikalisch dadurch, daß sie aus Wassertröpfchen, also kondensiertem Wasserdampf, oder Eisteilchen bestehen. Mit einem mittleren Durchmesser von rund 20 µm genügen beide Mies' theoretischen Vorgaben und streuen das einfallende sichtbare Licht zu einem stärkeren und gleichmäßigeren Weiß als die kleineren Wasserdampfmoleküle. Aber Physik ist nicht immer was für die Praxis und in der sind Dunst und Nebel aber auch Dunst und tiefliegende Bewölkung nicht unbedingt immer gut voneinander zu unterscheiden. Eine Hilfestellung dazu mögen die bereits angegebenen Sichtweiten sein. Dunst gestattet uns immer, zumindest noch ein Stück weit zu sehen, während

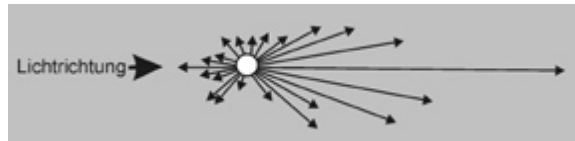


Abb. 15: Mie-Streuung

Große Partikel, wie Wassertröpfchen oder Rußteilchen, streuen das Licht nicht symmetrisch. Ihr Maximum liegt in der nach vorn gewandten Streuung.

wir vom Nebel oft eingeschlossen sind und sich die niedrige Bewölkung irgendwo am Horizont tummelt. Die Farben sind eine zweite Richtschnur. Bei Wolken und Nebel reichen sie, je nach Intensität der Sonneneinstrahlung, von einem reinen Weiß bis zu einem verwaschenen Grau. Dunst ist dagegen eher milchig weiß oder trüb.

Aber „gleichmäßig“ und „weiß“ sind langweilige Begriffe und nicht die Zutaten, die wir für ein spannendes Bild brauchen. Dafür sind Gegensätze und Farben angesagt. Mit dem Himmelsblau liefert uns die schillernde Schwester der Mie-Streuung zumindest einen wichtigen Baustein.

Lichtphänomene in der Atmosphäre

Ungleichmäßige Streuung des Lichts zu (nahezu) einer einzelnen Farbe – Die Rayleigh-Streuung und das Himmelsblau

Ohne diese zweite Form der Lichtstreuung würde der Himmel über uns bleich und fahl sein, egal wie strahlend der Tag auch wäre. Woher das Blau kommt, stellte der Brite *John William Strutt* (später der 3. **Lord Rayleigh** und Nobelpreisträger für seine Studien der atmosphärischen Gase) bei seinen Forschungen zur Lichtstreuung an Partikeln gegen Ende des 19. Jahrhunderts fest. Seine grundlegenden Arbeiten zur Mathematik dieser Vorgänge brachten den Beweis unserer vorangestellten These, daß es Partikel braucht deren Durchmesser kleiner ist als die Wellenlänge des Lichts, um diese symmetrisch zu streuen. Auf der Suche nach solchen Teilchen wurde er bei den **Luftmolekülen** fündig, von deren Größe er eine direkte Beziehung zum Spektrum ableiten konnte.

Aus seinen Berechnungen ergibt sich, daß die Möglichkeit der Streuung eines Photons an einem Luftmolekül umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge ist. Aber so was verstehen nur Mathematiker. Für normale Menschen übersetzt bedeutet es, daß Licht kürzerer Wellenlänge stärker gestreut wird als solches von längerer,

der blaue Teil des Spektrums mit einer Wellenlänge von 450 nm circa 3,2 mal stärker als der rote mit 600 nm. Das nennen wir kurz **Rayleigh-Streuung**. Mit dem Blick in den Himmel sehen wir also mehr gestreute Anteile des kurzen blauen Spektrums als des langwelligen roten und deshalb erscheint uns die Sphäre über dem Kopf blau.

Der zweite, genauere Blick läßt aber eine in **Farbton, Sättigung und Helligkeit** beileibe nicht gleichmäßige Himmelsfarbe erkennen. Ganz im Gegenteil ist die Anzahl der Schattierungen beinahe unendlich groß und verändert sich über den Tag beständig. Die Erklärung dafür hört sich gewöhnungsbedürftig an, denn die Farbe des Himmels hängt nicht etwa von der Entfernung ab, sondern von der Anzahl der Luftmoleküle in der Sichtlinie: Je mehr Moleküle dort vorhanden sind, desto heller der Himmel, weil an mehr Molekülen mehr Licht gestreut wird.

Mit der **Luftmasse (LM)**, siehe Abb. 18) bietet uns die Wissenschaft auch ein Maß für die Molekülanzahl. 1 LM beschreibt die Luftmenge in senkrechter Blickrichtung über einem in Meereshöhe befindlichen Beobachter. Praktisch ausgedrückt 1 kg Luft pro cm^2 . Mit größeren Winkeln nimmt die Luftmasse zu, auf Meereshöhe passiert das Licht bis zum Horizont beispielsweise rund 38 Luftmassen. An der

Streuungsphänomene Ungleichmäßige (Rayleigh-) Streuung zu einer Farbe

in dieser dicken Schicht enthaltenen großen Menge Luftmoleküle werden nun nicht nur die kurzen Wellenlängen des einfallenden Lichts ein- oder zweimal gestreut, sondern nach und nach alle Bereiche des Spektrums mehrfach. Und da nur sehr wenig durch Absorption verloren geht, ist der Horizont von derselben Farbe, wie die Mittagssonne – weiß. Abb. 19 zeigt diesen typischen Verlauf von Weiß über verschiedene Blaustufen bis zu dem dunklen Bereich rund um den Zenit. Jedoch nehmen wir das Weiß nicht immer wahr, denn die Reflexionen der darunter liegenden Landschaft können es überlagern. Der Wasserspiegel des Ozeans dunkelt es beispielsweise ab und das pastorale Grün weiter landwirtschaftlicher Flächen verleiht ihm eine ebensolche Tönung.

Aber auch umgekehrt wird ein Schuh daraus, denn in 3000, 4000 oder 5000 m Höhe ist der Himmel von einem sehr viel dunkleren Blau als in der Ebene, weil die Luftschicht immer dünner und die zur Streuung geeignete Zahl der Moleküle immer geringer wird. Und Aufnahmen aus dem Weltraum zeigen sogar einen beinahe schwarzen Himmel, weil keine zur Streuung geeigneten Luftmoleküle mehr vorhanden sind. Diesem dunkelblauen Hochgebirgshimmel ist photographisch nicht beizukommen, denn

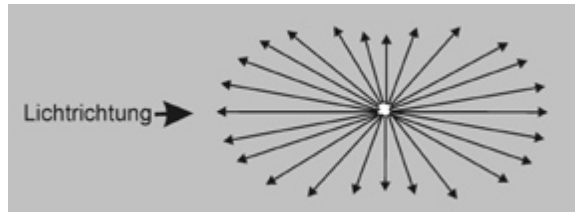


Abb. 16: Rayleigh-Streuung

Die viel kleineren Luftmoleküle weisen ein in der Richtung annähernd symmetrisches Streuverhalten auf.

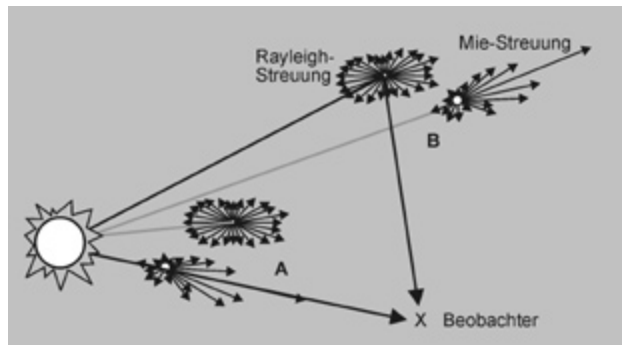


Abb. 17: Mie- und Rayleigh-Streuung

Fall A - Wenn die aufsteigenden Luftmassen einiger heißer Tage große Partikelmengen in die Atmosphäre befördert haben, überwiegt die nach vorn gerichtete Mie-Streuung und produziert einen weißen Schleier über dem Horizont. Deswegen erscheint der Himmel dann auf der jeweils sonnenzugewandten Seite wesentlich heller als in der entgegengesetzten Richtung.
Fall B - Da die Mie-Streuung das Licht bevorzugt nach vorn streut, überwiegt über unseren Köpfen die Rayleigh-Streuung und lässt uns einen blauen Himmel sehen.

Lichtphänomene in der Atmosphäre

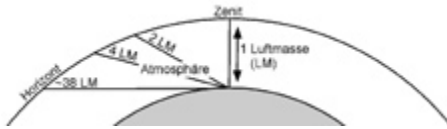


Abb. 18: Die verschiedenen Entfernungen zwischen Erdoberfläche und Horizont bzw. Zenit und die daraus resultierende Menge der Luftmassen

er beruht auf einem per Filter nicht korrigierbarem Mangel an Streuung. In extremen Höhenlagen kann sich aus dem Verhältnis zwischen dem recht dunklen Himmel und der ausgiebig von der Sonne beschienenen Umgebung darüber hinaus sogar ein Problem mit dem Belichtungsumfang ergeben. Schließlich ist die die Belichtung bestimmende Menge des Sonnenlichts dieselbe wie im Flachland.



Abb. 19: Der Farbverlauf von weiß am Horizont hin zum immer dunkleren Blau weiter oben am Himmel über dem Monument Valley

In solchen Fällen ist aufnahmeseitig der Einsatz eines Grauverlauffilters angesagt, um den Vordergrund etwas „zurückzuhalten“. Aber auch das Nachbelichten und Abwedeln, beziehungsweise deren digitale Äquivalente, können den Kontrast bei der Bildbearbeitung zu Hause mildern helfen. Von all dem unbenommen gilt es im Hochgebirge natürlich immer den hohen UV-Anteil auszuschalten.

Die mit der Luftmassendicke zunehmende Streuung erklärt also, daß der Taghimmel am Horizont sehr viel heller ist, als in der senkrechten Linie über unserem Kopf. Für uns Photographen ist das **Himmelsblau** jedoch noch auf andere Art von Bedeutung. Als sogenanntes **Luftlicht** (siehe Abb. 20) erschwert es uns vor allem bei hohem Sonnenstand die Arbeit. Denn da sich die für die Streuung des Sonnenlichts verantwortlichen Luftmoleküle nicht nur über unserem Kopf, sondern auch zwischen uns und diagonal oder horizontal entfernten Objekten befinden, tun sie natürlich auch dort ihre Arbeit. Wie gut sie dabei sind, hängt wieder von der in Relation zur Objektentfernung stehenden Mächtigkeit der Luftschicht ab. Und ganz so, wie der Himmel blau ist, ist auch echtes Luftlicht bläulich, ja beinahe ätherisch blau.

Bezogen auf einen in mittlerer Entfernung gelegenen Bergzug erklärt sich so dessen vor allem in der Mittagszeit ausgeprägte Blaufärbung und überdurchschnittliche Helligkeit – je weiter entfernt, umso mehr Licht wird gestreut und umso heller das Objekt. Liegt der Berg in sehr großer Entfernung, kann die Atmosphäre durch die mehrfache Streuung des Lichts so trüb und undurchsichtig werden, daß das von ihm reflektierte Licht ausgestreut und durch Luftlicht ersetzt wird – der Berg wird aufgrund des damit einhergehenden sehr geringen Kontrasts unsichtbar. Damit sind der Fernsicht physikalische Grenzen gesetzt. Mit den zum Beispiel in einem Waldstück blau zulaufenden Schattenbereichen macht sich das Luftlicht aber auch im Nahbereich störend bemerkbar.

Besonders gut sichtbar ist das **Luftlicht** zwischen einer Anzahl hintereinanderstehender Höhenzüge. Während der Dämmerung tritt es in deren nicht überlappenden Bereichen als dünner heller Schleier zutage. Den Farbwechsel von Blau zu beinahe Weiß gaukelt uns unser visuelles System vor, denn das Luftlicht besitzt im beschriebenen Fall die größte Helligkeit, weswegen ihm der Wert weiß zugewiesen wird.

Unsere in Maßen wirksamen photographischen Gegenmittel sind



Abb. 20: Das Luftlicht zwischen den Höhenzügen der Blue Ridge Mountains / North Carolina

ein wirksamer **UV-Filter** sowie ein Warmtonfilter wie der **KR-6**, um den Blauüberschuß auszugleichen. Viel besser aber ist es, den niedrigeren Sonnenstand am Morgen oder Nachmittag abzapfen. Er mindert das Luftlicht nachhaltig, weil die Sonne dann, wie der folgende Abschnitt erklärt, einen geringeren Teil des zur Streuung geeigneten kurzwelligen blauen Spektrums anlandet. Daß wir in diesen Momenten schärfer zu sehen meinen, liegt also an dem durch die geringere Streuung verursachten höheren Kontrast.