

Das Licht – Treibstoff der Visualität

Das elektromagnetische Spektrum

Ted Orland's „Compendium of Photographic Truth – eine Sammlung moralischer Prinzipien, Axiome und Grundsätze denen sich jeder Photograph stellen sollte“, sagt: „Entfernte Objekte können nicht mit kurzen Belichtungszeiten aufgenommen werden – das Licht legt nur gute 300 km in 1/1000 Sekunde zurück.“ Verrückt, was? Aber ein Körnchen Wahrheit liegt schon drin, denn das Licht transportiert die optischen Informationen unserer Umwelt und ohne Lichtreize gäbe es keine visuelle Wahrnehmung und auch keine Photographie. Grund genug, sich näher mit dieser Voraussetzung aller visuellen Vorgänge zu befassen. Tun wir dies, haben wir zunächst einmal zur Kenntnis zu nehmen, dass es eine eigenständig greifbare Substanz, wie sie der Begriff Licht impliziert, gar nicht gibt. Das, was wir traditionell so nennen, ist nur der Ausschnitt der uns umgebenden elektromagnetischen Strahlung, für den wir aufgrund unserer Physiologie eine gewisse Empfindlichkeit entwickelt haben. Die Gesamtheit dieser Strahlung nennen wir das **elektromagnetische Spektrum** und wir unterteilen es wie folgt:

Gammastrahlung

1 Femtometer (10^{-15}) –
1 Picometer (10^{-12} m)

Röntgenstrahlung

1 Ångström (10^{-11}) –
1 Nanometer (10^{-9} m)

Ultraviolettstrahlung

< 1 Mikrometer (10^{-8} – 10^{-7} m)

Sichtbares Licht

380 Nanometer – 780 Nanometer

Infrarotstrahlung

> 1 Mikrometer (10^{-6} – 10^{-5} m)

Terahertzstrahlung

< 1 Millimeter (10^{-4} m)

Mikrowellen

1 Millimeter (10^{-3}) –
1 Zentimeter (10^{-1} m)

Rundfunk- und Fernsehstrahlung

< 10 Meter (10^0) –
< 10 Kilometer (10^4 m)

Hoch-, Mittel- und Niederfrequente Wechselströme

> 10 Kilometer (10^5 – 10^7 m)



Abb. 1: Elektromagnetische Wellen

Die verschiedenen Arten elektromagnetischer Wellen und ihre unterschiedlichen Wellenlängen.

Angesichts dieser großen Bandbreite nimmt sich die Empfindlichkeit unseres visuellen Wahrnehmungsapparates eher gering aus. Mit dem Bereich zwischen 380 nm (0,00000038 Meter Wellenlänge) und 780 nm (0,00000078 Meter Wellenlänge) liegt sie zwischen der ultravioletten Strahlung auf der kurzen und der Infrarotstrahlung auf der langen Seite und umfasst damit weniger als 1 % des Gesamtspektrums. Die Disziplin der **Optik** ist jene Sparte der Wissenschaften, die den für uns sichtbaren Teil der elektromagnetischen Strahlung erkundet.

Warum wir gerade für diesen schmalen Bereich des Spektrums sensibel sind? Nun, Strahlung im Wellenlängenbereich unterhalb von 380 nm (**Ultraviolett**) ist so energiereich, daß sie die Photopigmente in unseren Augen schnell zerstören und, innerhalb eines etwas längeren Zeitraums, die Augenlinse gelb trüben würde. Manche Vogelarten und Insekten haben eine Empfindlichkeit für UV-Licht entwickelt, sterben aber bevor diese messbaren Schaden anrichten kann. Größere Säuger, wie wir, besitzen eine

längere Lebensspanne und müssen ihr visuelles System deswegen diesen schädigen Einflüssen anpassen. Auf der anderen Seite des Spektrums sind Wellenlängen oberhalb von 780

Wellenlänge: Der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Wellenbergen

Amplitude: Der vertikale Abstand zwischen Wellenberg und Wellental

Frequenz: Die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit

nm primär Wärmestrahlung (**Infrarot**) und diese gibt wenig Auskunft über die Beschaffenheit der Objekte. Auf Infrarotfilm sieht ein Gesicht aus wie ein heißes Eisenskelett und deswegen gibt es unter Tageslicht anhand der langwelligeren Strahlung wenig über die Welt zu lernen. Unser Sehen schenkt also den Enden des Spektrums wenig Beachtung und ist statt dessen auf jenen mittleren Bereich konzentriert, der am stärksten und unterschiedlichsten mit der Materie interagiert und uns am meisten über die Welt verrät.

Das Licht – Treibstoff der Visualität

Beschreibung des Unfassbaren – Welle oder Teilchen?

Die elektromagnetische Strahlung breitet sich in Form von elektromagnetischen Wellen in den Raum aus. Sie bestehen aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld, die senkrecht zueinander stehen und in einer räumlich beliebigen, aber immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehenden, Ebene pulsieren. Am Besten stellt man sich dies in Form einer stehenden und einer liegenden Sinuswelle vor. Diese Art Welle bezeichnet man als transversal, weil der schwingende Teil seitlich (senkrecht) zur Ausbreitungsrichtung steht. Elektromagnetische Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit (299792458 km pro Sekunde) aus und brauchen im Gegensatz zu den Schallwellen keinen Träger, können sich demzufolge auch

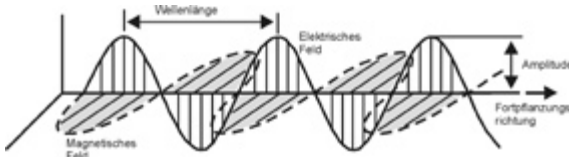


Abb. 2: Die elektromagnetische Welle und ihre Ausbreitungsrichtungen

im luftleeren Raum fortpflanzen. Ihre Kenndaten sind die **Wellenlänge**, der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Wellenbergen, die **Amplitude**, der vertikale Abstand zwischen Wellenberg und -tal und die **Frequenz**, welche die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit angibt. Da wir von vielen verschiedenen strahlenden Körpern umgeben sind, umgibt uns permanent eine große Spannweite elektromagnetischer Strahlung in den unterschiedlichsten Wellenlängen und Frequenzen.

Um zu verstehen wie langwellige elektromagnetische Strahlung, sagen wir Radiowellen, entsteht, vollziehen wir gemeinsam ein Experiment nach. Heinrich Hertz, nach dem die Einheit der Frequenz benannt ist, hat es schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts durchgeführt. Hertz versetzte einen rund 30 cm langen und wenige Millimeter starken Metallstab (**Dipol**) in elektrische Schwingungen, indem er an dessen einem Ende für kurze Zeit eine elektrische Ladung durch Funkenentladung aufbrachte. Dadurch entsteht eine Spannung zwischen beiden Enden des Stabes, die ein elektrisches Feld hervorruft, in dem die Energie gespeichert ist. Diese Spannung gleicht sich zwischen den beiden Enden des Stabes durch Stromfluss aus und ruft ein elektrisches Feld hervor,

das wiederum die Energie speichert. Ist der Stromfluss maximal, erreicht auch das Magnetfeld seinen maximalen Wert. Fällt der Stromfluss ab, tut dies auch das Magnetfeld und sorgt durch Induktion dafür, daß der Strom im Stab in umgekehrter Richtung weiterfließt. Dieser Vorgang der periodischen Umwandlung der Energie zwischen elektrischem und magnetischem Feld wiederholt sich in jeweils umgekehrter Richtung und der Dipol führt jene elektrische Schwingung aus, die wir graphisch aufbereitet als elektromagnetische Welle verstehen.

Da die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung doppelt so groß ist wie der Dipol selbst, ist ein solcher gut geeignet, um Wellen im Bereich von Zentimetern oder Metern zu erzeugen. Wellenlängen unterhalb von einem Zentimeter sind dagegen in Dipolen nur schwer zu erzeugen. In diesem Bereich setzt man meist leitende Hohlräume als Oszillatoren ein. Noch kürzere Wellenlängen sind dann den Molekülen oder Atomen vorbehalten. Und obwohl ein Atom mit einem Durchmesser in der Größenordnung von 0,1 nm viel kleiner ist als die durchschnittliche Wellenlänge des sichtbaren Lichts mit 500 nm, finden wir den zuvor geschilderten Prozess des schwingenden Dipols auch hier wieder.

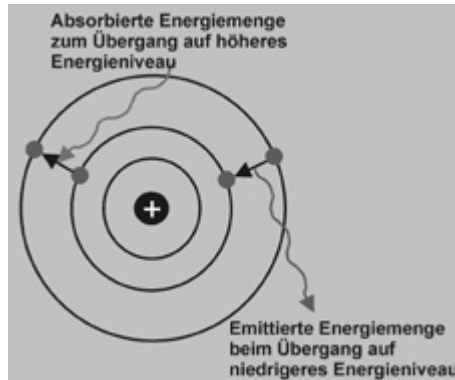


Abb. 3: Atomaufbau
Das Atommodell und die Energieniveaus der Elektronen

Um die Entstehung von elektromagnetischer Strahlung auf Atomebene zu verstehen, müssen wir einen kurzen Blick ins Innere eines beliebigen Atoms werfen. Dort bewegen

Licht ist nur unsere Auffassung oder Interpretation des Energiepotentials der elektromagnetischen Strahlung.

sich die Elektronen (die negativ geladenen Teilchen) strahlungsfrei (ohne Energieverlust) auf festgelegten Bahnen um die Protonen (die positiv geladenen Teilchen) im Kern. Je größer der Abstand der Bahnen vom Kern, um so größer ist das Energieniveau des Elektrons. Jedesmal wenn ein Elektron

Das Licht – Treibstoff der Visualität

von einem höheren Energieniveau auf ein niedrigeres springt wird Energie in Form eines **Photons** frei. Dagegen braucht es Energie von außen, die das Atom absorbiert, damit das Elektron den entgegengesetzten Weg machen kann. Beide Bewegungen werden als **Elektronensprung** bezeichnet und er erfolgt immer unter Abgabe oder Aufnahme der entsprechenden Energiedifferenz, damit das Energieniveau des Gesamtsystems gleich bleibt.

Und genau diese Emissions- und Absorptionsvorgänge im Innern der Atome sind es, die den Physikern bis heute zu schaffen machen, denn zu ihrem Verständnis reicht die auch von uns bisher benutzte Vorstellung der elektromagnetischen Strahlung als kontinuierliche Welle nicht aus. Max Plancks **Quantenhypothese** aus dem Jahr 1900 erklärt sie uns vielmehr damit, daß ein elektrisch schwingendes System seine Energie eben nicht kontinuierlich an ein elektromagnetisches Feld abgibt oder von ihm aufnimmt, sondern dies in ganz kleinen Beträgen, den so genannten **Quanten**, tut. Albert Einstein führte diese Energiequanten dann 1905 bei der Erklärung des Photoeffekts als die schon von Isaak Newton in den 1670er Jahren in seiner Emissionstheorie propagierten **Lichtteilchen** oder **Photonen** in die Physik ein.

Mit diesem theoretischen Rüstzeug können wir das Licht als elektromagnetische Welle einerseits und als Teilchenstrom (Photonen) andererseits beschreiben, und nur die Anordnung des jeweiligen Experiments entscheidet darüber, ob es in der einen oder anderen Form in Erscheinung tritt.

Mit dem Strich oder dagegen – Die Polarisierung elektromagnetischer Wellen

Die Richtung (Ebene), in der das elektrische Feld schwingt, ist gleichzeitig die so genannte **Polarisationsrichtung** der elektromagnetischen Welle. **Unpolarisierte Strahlung**, wie sie die Sonne oder eine Glühlampe abgeben, weist elektromagnetische Wellen mit jeder beliebigen Orientierung der elektrischen Felder auf. **Linear polarisierte Strahlung** besitzt dagegen ausschließlich elektromagnetische Wellen mit elektrischen Feldern nur einer einzigen Ausrichtung, beispielsweise im 30° oder 90° Winkel zur Ausbreitungsrichtung. Hierbei

Mit dem Strich oder dagegen – Die Polarisation elektromagnetischer Wellen

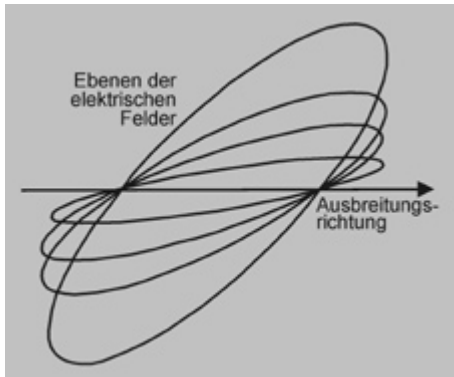


Abb. 4: Elektrische Feldebene
Schwingungsebenen der elektrischen Felder einer elektromagnetischen Welle. Die Schwingungsebene kann jede beliebige Orientierung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung annehmen.

schwingen elektrisches- und magnetisches Feld gleichphasig, das heißt ihre Stärke ist an denselben Orten entlang der Ausbreitungsrichtung zu denselben Zeiten null. Im Fall von **zirkular polarisierter Strahlung** weisen das elektrische und das magnetische Feld dagegen zwar dieselbe Amplitude auf, sind aber in der Phase um 90° versetzt. Wenn die eine Komponente ihr Maximum erreicht, steht die andere an ihrem Minimalwert und umgekehrt. So beschreibt der Vektor aus der Summe beider Komponenten folglich eine kreisförmige Rotation nach links oder rechts um die Achse der Ausbreitungsrichtung.

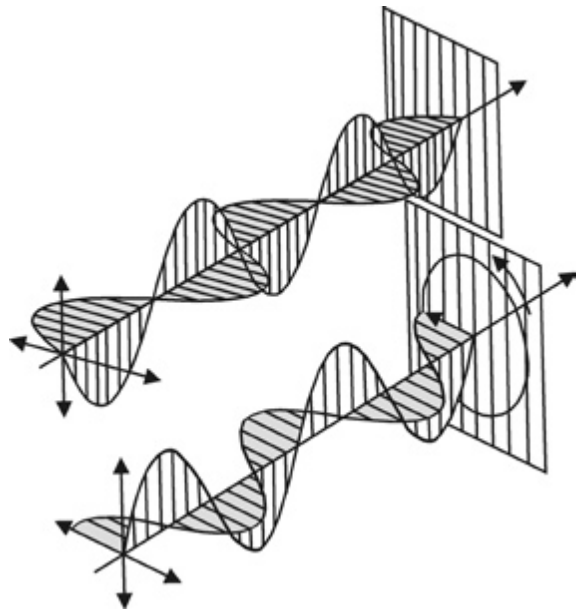


Abb. 5: Elektromagnetische Wellen linear und zirkular
Die elektrischen und magnetischen Felder weisen im Fall der im 90° linear polarisierten Welle (oben) zur gleichen Zeit und am selben Ort das Potential null auf und pflanzen sich aufgrund dessen linear fort. Im Gegensatz dazu sind die Felder bei der zirkular polarisierten Welle (unten) gegeneinander versetzt, was zu einer Rotation des elektrischen Feldes um die Achse der Ausbreitungsrichtung führt.

Das Licht – Treibstoff der Visualität

Elektromagnetische Strahlung kann durch die **Reflexion an nicht metallischen Oberflächen** polarisiert werden. Dies beobachten wir besonders häufig an Glas-, Kunststoff- oder Wasserflächen, Schneefeldern oder auch dem Asphaltbelag von Straßen. Der Grad der Polarisierung hängt zwar grundsätzlich vom

Polarisation ist die Herstellung einer einheitlichen Schwingungsrichtung aus ansonsten unregelmäßigen Schwingungen der einfallenden Strahlung.

Beleuchtungswinkel und der Art des Oberflächenmaterials ab, aber die genannten Materialien reflektieren oft so, daß ein großer Anteil der Schwingungsrichtungen parallel zu ihrer Oberfläche ausgerichtet ist. Daher erscheinen uns Gegenstände, die wir in auf solche Art reflektiertem und polarisiertem Licht betrachten, oft ein wenig verschwommen oder überstrahlt.

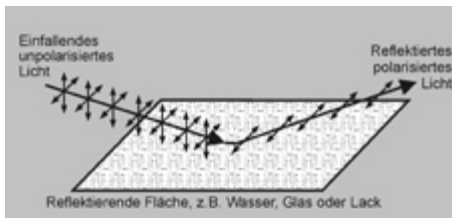


Abb. 6: Polarisation durch Reflexion

Auch das Phänomen der **Streuung** sorgt für eine Polarisierung der elektromagnetischen Strahlung, wie wir regelmäßig am Beispiel des blauen Himmels (siehe „Die Rayleigh-Streuung und das Himmelsblau“) feststellen können. Streuung bedeutet, daß eine elektromagnetische Welle von den Atomen eines Mediums absorbiert wird, diese dabei in Schwingungen versetzt und zur Emission einer neuen elektromagnetischen Welle anregt. Diese strahlt in alle Richtungen und zwingt wiederum die Elektronen benachbarter Atome mit derselben Frequenz zu schwingen. Der Vorgang setzt sich von Atom zu Atom fort und produziert eine zumindest teilweise polarisierte Strahlung, die die eventuell vorhandenen scharfen Konturen am Motiv verschwimmen lässt.

Und natürlich können wir elektromagnetische Strahlung beziehungsweise den Teil, den wir als Licht auffassen, auch durch einen **Filter** schicken, um sie auf eine einheitliche Schwingungsebene zu trimmen. Solche **Polarisationsfilter** bestehen aus einer durchsichtigen Kunststoffolie, die aus einer Gitterstruktur langgestreckter und zueinander paralleler Molekülketten aus beispielsweise Polyvinylalkohol (PVA) aufgebaut ist. Aufgrund ihrer

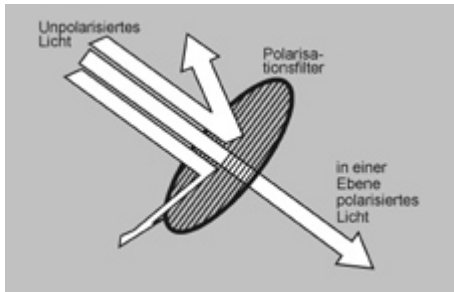


Abb. 7: Funktionsprinzip des Polfilters

chemischen Beschaffenheit sind diese Stoffe in der Lage den nicht parallel zu ihrer Ausrichtung einfallenden Teil der Strahlung zu absorbieren. Fällt unpolarisiertes Licht, das elektromagnetische Wellen mit vielen verschiedenen Orientierungen der elektrischen Felder enthält, ein und steht das Filtergitter senkrecht, können auch nur die senkrecht schwingenden Anteile der Wellen passieren. Die waagrecht Schwingenden werden wegen ihrer in dieser Richtung zu großen Ausdehnung zurückgehalten. Elektromagnetische Wellen, die in einem von der Vertikalen abweichenden Winkel schwingen, verlieren beim Durchgang durch einen solchen Filter in dem Maß an Intensität, in dem ihr Polarisationswinkel von der Senkrechten abweicht.