

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Autor: Uwe Gleiß, Franz-Ludwig-Gymnasium Bamberg, Computergrafikgruppe (CoGra-FLG) • Kontakt: cogra-flg@web.de
Dieses Werk steht unter einer Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland (CC BY-NC-SA 3.0 DE).

Zum Inhalt

Dieses Skript kann und will kein vollständiger Überblick über die Grundlagen der Optik sein. Die hier angesprochenen Aspekte sollen ein wenig verstehen helfen, wie Licht sich laut geometrischer Optik verhält. Die Tatsache, dass Licht eine Welle ist, wird nur am Rande mit angesprochen, obwohl Interferenzerscheinungen sehr wohl sichtbare Auswirkungen auf das Aussehen eines Materials haben können.¹

Die Inhalte in diesem Kapitel sind ebenso wie die mathematischen Grundlagen keine Pflichtlektüre. Ein wenig Einblick in das Verhalten von Licht ist aber eine der Grundlagen, um das Erscheinungsbild von Oberflächen besser zu verstehen. Und das wiederum macht es leichter, diese Oberflächen mit passenden Parametern in einem Programm wie Blender möglichst realitätsnah umzusetzen. Die Lektüre sei also jedem, der mit Raytracing Bilder berechnen lässt wärmstens ans Herz gelegt. Bei Aversion gegen Formeln kann man diese meist auch überspringen.

LICHT UND HELLIGKEIT

Was ist Licht?

In der Physik bezeichnet man nur den Teil der elektromagnetischen Strahlung als Licht, den das menschliche Auge registrieren kann. Dies ist nur ein kleiner Ausschnitt aus dem Spektrum, das auch Radiowellen, Infrarotstrahlung, UV-Strahlung, sowie Röntgen- und Gammastrahlung beinhaltet.

Die Angaben über den Wellenlängenbereich, der für uns sichtbar ist, schwankt je nach Quelle, in der man nachschlägt. Bei der Einteilung der Wellenlängen in Spektralbereiche wird der Abschnitt von 380 nm bis 780 nm als „Licht“ bezeichnet, eine nennenswerte Empfindlichkeit besitzt das menschliche Auge aber nur im Bereich zwischen etwa 400 nm und 700 nm.²

Photometrische Größen

Die Stärke von Licht kann rein physikalisch mit lichttechnischen Größen beschrieben werden. Beispielsweise ist die Strahlungsleistung eine präzise Beschreibung der Energie, die eine Lichtquelle pro Zeit abgibt. Sie berücksichtigt aber nicht, dass das menschliche Auge nicht alle Arten von Licht gleich stark wahrnimmt. Besser geeignet ist dazu die analoge photometrische Größe des Lichtstroms. Da Computergrafik sich mit wahrgenommenem Licht beschäftigt stehen die photometrischen Größen in diesem Kapitel im Vordergrund.

¹ Genau betrachtet könnte man weite Teile der Optik inklusive Reflexion und Brechung durch Interferenz erklären, aber das führt hier definitiv zu weit.

² Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik band3: Optik (9.Auflage) Kapitel 5

- **Lichtstrom Φ_v**

Ein Maß für das gesamte, von einer Quelle abgegebene Licht, gemessen in Lumen (lm).³ Die entsprechende strahlungsphysikalische Größe ist die Strahlungsleistung Φ_e , gemessen in Watt (W). Für die Vorstellung kann es helfen, wenn man im Hinterkopf behält, dass der Lichtstrom zumindest grob betrachtet der Strahlungsleistung entspricht.

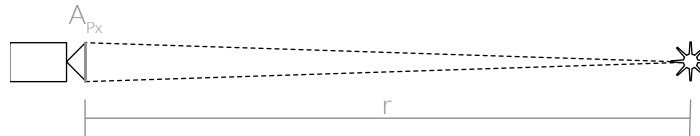
- **Beleuchtungsstärke E_v**

Für die wahrgenommene Helligkeit einer Oberfläche ist weniger der Lichtstrom ausschlaggebend als der Anteil davon, der auf eine Oberfläche oder das Auge trifft. Entscheidend ist dabei das Verhältnis des Lichtstroms zur Fläche, auf die er sich verteilt:

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad \text{Einheit: } [E_v] = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lx} \quad (\text{Lux})$$

Helligkeit einer Lichtquelle

Ist der Lichtstrom einer Lichtquelle bekannt, so kann die Beleuchtungsstärke für verschiedene Abstände berechnet werden. Daraus ergibt sich die Helligkeit eines Bildpunktes.



Gehen wir von einem gleichmäßig in alle Richtungen abgestrahlten Lichtstrom aus,⁴ dann verteilt sich dieser im Abstand r auf die Oberfläche einer Kugel. Die Beleuchtungsstärke in diesem Abstand ist damit

$$E_v = \frac{\Phi_{\text{Licht}}}{A} = \frac{\Phi_{\text{Licht}}}{4\pi r^2}$$

Multipliziert man dieses Ergebnis mit dem Flächeninhalt eines einzelnen Pixels, so erhält man den Lichtstrom, der auf diesen trifft.⁵

$$\Phi_{Px} = \Phi_{\text{Licht}} \cdot \frac{A_{Px}}{4\pi r^2}$$

Helligkeit beleuchteter Flächen

Ein beleuchtetes Objekt wirft einen Teil des Lichts zurück von dem es getroffen wird und wird dadurch zur **sekundären Lichtquelle**. Für die Helligkeit einer solchen Fläche sind zwei zusätzliche Größen entscheidend: Die Entfernung des Objekts von der Lichtquelle und der Winkel, in dem die Lichtstrahlen auftreffen.

Analog zur Berechnung oben ergibt sich zunächst für die Beleuchtungsstärke am Ort des Objekts:

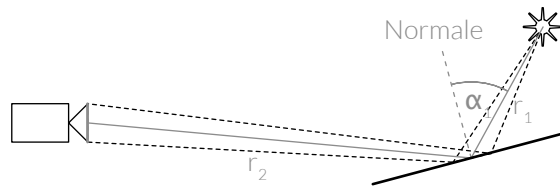
$$E_v = \frac{\Phi_{\text{Licht}}}{4\pi r_1^2}$$

Dabei ist r_1 der Abstand des Objekts zur Lichtquelle.

³ Die Bezeichnung ANSI-Lumen ist eigentlich veraltet. ANSI bezieht sich auf ein normiertes Messverfahren (vergleichbar mit einer DIN-Norm).

⁴ Genau diese Gleichmäßigkeit ist bei realen Lichtquellen nicht der Fall. Wir wollen es in diesem Skript aber noch nicht übertreiben.

⁵ In der Skizze oben ist die gesamte Objektivfläche der Kamera Stellvertreter für diesen einzelnen Pixel, um die Verhältnisse besser klar zu machen.



Diese Beleuchtungsstärke wird nur dann erreicht, wenn das Licht senkrecht auftrifft. Bei einem einfachen Modell einer perfekt diffus reflektierenden Oberfläche nimmt die Helligkeit mit steigendem Winkel α_1 zwischen Oberflächennormale und Richtung des Lichts ab in folgender Form ab:

$$E_v = \frac{\Phi_{\text{Licht}}}{4\pi r_1^2} \cdot \cos \alpha_1$$

Bei senkrecht einfallendem Licht ($\alpha_1 = 0^\circ$) ergibt der Kosinus 1 und damit kommt es zu maximaler Beleuchtungsstärke, bei Lichteinfall parallel zur Oberfläche ($\alpha_1 = 90^\circ$) ist die Beleuchtungsstärke auf Null abgefallen. Dieser Wert muss noch mit dem Reflexionsgrad ρ der Oberfläche multipliziert werden, einem Wert zwischen Null und Eins, der angibt, welcher Anteil des Lichtes nach der Reflexion übrig bleibt.

$$E_v = \rho \cdot \frac{\Phi_{\text{Licht}}}{4\pi r_1^2} \cdot \cos \alpha_1$$

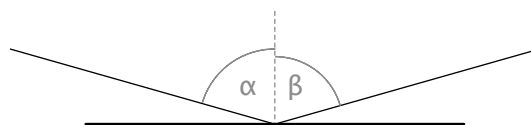
Das Ergebnis multipliziert mit dem Flächeninhalt des Flächenelements, ergibt dessen Lichtstrom, mit dem dann so weiter gerechnet werden kann, wie mit dem Lichtstrom einer primären Lichtquelle.⁶

Bisher haben wir nur die reine Helligkeit berechnet, was einem Schwarzweißbild entspräche. Wie weiter unten angesprochen wird, kann ein farbiges Bild aber simuliert werden, indem man den Reflexionsgrad für drei Farben (meist Rot, Grün und Blau) unterschiedlich ansetzt.

REFLEXION

Gerichtete Reflexion

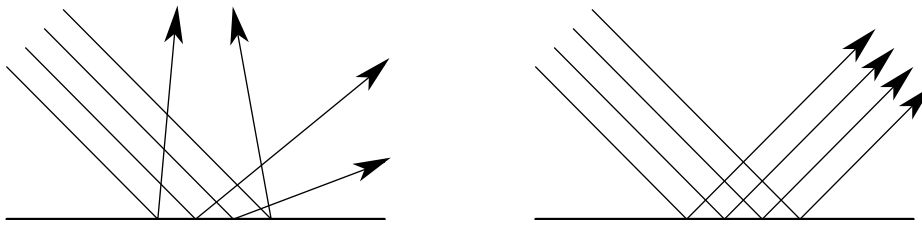
Streng betrachtet gibt es nur gerichtete Reflexion. Ein (unendlich dünner) Lichtstrahl, der auf eine Oberfläche trifft wird immer nach dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen.



Einfallswinkel α und Reflexionswinkel β sind immer gleich groß. Es müssten also alle Oberflächen aussehen wie eine polierte Chromkugel. Das stimmt natürlich so nicht. Denn erstens sind viele Materialien auch noch leicht transparent (dazu später) und zweitens ist kaum eines so perfekt glatt poliert, dass parallel auftreffende Strahlen in die gleiche Richtung reflektiert werden.

⁶ Hier vereinfachen wir in mehrfacher Hinsicht. Beispielsweise haben nicht alle Teile der Fläche den gleichen Abstand zur Lichtquelle. Dies stellt kein so großes Problem dar, da die Mitte eines kleinen Flächenelements einen gut passenden Mittelwert liefert. Wer sich bereits mit Differentialrechnung auskennt wird ahnen, dass das Problem auch exakt sauber lösbar ist, indem man die gedachten Flächenelemente frech unendlich klein macht. Problematischer ist die Tatsache, dass hier ignoriert wird, dass eigentlich noch zu berechnen ist, welcher Teil der Fläche für die Beleuchtung eines Pixels entscheidend ist. Aber dieses Skript soll Grundlagen erklären, nicht alle Details.

Durch mikroskopische Unregelmäßigkeiten wird praktisch jede Oberfläche ein wenig Unordnung in parallel auftreffende Strahlen bringen. Ist diese Unordnung so gestaltet, dass das Licht in sämtliche Raumrichtungen gleich stark reflektiert wird, dann entspräche dies vollständig diffuser Reflexion. Eine perfekt polierte Oberfläche würde vollständig gerichtete Reflexion zur Folge haben.



Reale Materialien

Reale Materialien zeigen weder das eine noch das andere Extrem, sondern befinden sich immer irgendwo dazwischen. Viele modernere Bildberechnungsverfahren simulieren durch einen entsprechenden Parameter die mehr oder minder starke Streuung.⁷ Es gibt aber auch Oberflächen, bei denen mehr notwendig ist. Ein Metalllack beispielsweise reflektiert an seiner äußersten Lackschicht gerichtet und zusätzlich an tiefer liegenden Schichten mehr oder minder diffus.

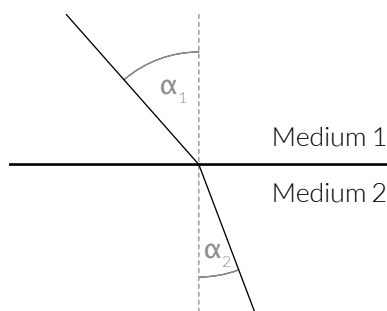
Reflexionsfarbe

Einen entscheidenden Einfluss auf das Erscheinungsbild eines Materials hat auch die Reflexionsfarbe. Polierte nichtmetallische Materialien zeigen Reflexionen in der Farbe der gespiegelten Objekte. Metalle dagegen siegeln ihre Umgebung getönt in ihrer eigenen Farbe.

TRANSPARENZ

Brechungsgesetz

An der Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen transparenten Medien wird Licht gebrochen. D.h. es kommt zu einem Knick im Strahlenverlauf. Das Medium, in dem der Winkel zwischen Lot und Strahl kleiner ist, bezeichnet man als optisch dichter, das mit dem größeren Winkel als optisch dünner. Letztendlich schuld an diesem Phänomen ist die Tatsache, dass sich das Licht in zwei Medien mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten c_1 und c_2 ausbreitet. Aber wie es im Detail dazu kommt soll hier nicht Thema sein.



⁷ In Cycles ist das der Wert Roughness in einem Glossy Shader.

Für die beiden Winkel α_1 und α_2 gilt das Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

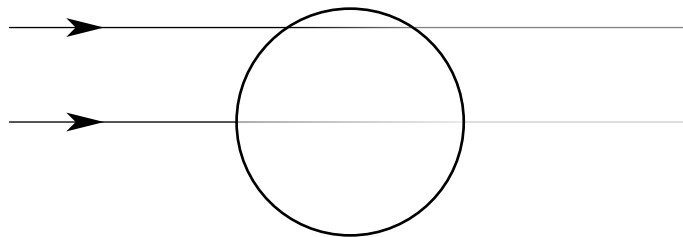
Dabei sind n_1 und n_2 die Brechzahlen⁸ der beiden Medien. Im Gegensatz zu den Lichtgeschwindigkeiten findet man diese Werte problemlos zu allen gängigen durchsichtigen Materialien. Hier einige Beispiele:⁹

Luft oder Vakuum	1,0	Plexiglas	1,49
Wasser	1,33	Polyethylen	1,51
optische Gläser	1,46 - 1,92	Quarz	1,55
Quarzglas (Fenster)	1,46	Diamant	2,42

Verwendet man realistische Werte, so überrascht bei einer Bildberechnung im Computer das Aussehen oft. Das liegt teils daran, dass man massive durchsichtige Objekte wie eine Glaskugel im Alltag selten vor sich hat und damit das Brechungsverhalten falsch einschätzt.

Absorption

Für ein realistisches Aussehen transparenter Materialien ist die Brechung nur ein Teil der Wahrheit. Speziell bei farbigen Substanzen kommt hinzu, dass das Licht um so stärker eingefärbt wird, je länger es durch das Material unterwegs war. Dabei wird pro Strecke immer der gleiche Anteil des einfallenden Lichts absorbiert. Wenn ein dunkles Glas also das einfallende Licht nach 3 cm bereits auf 50 % seiner ursprünglichen Stärke reduziert hat, dann sind nach weiteren 3 cm nur noch 25 % übrig.



In einem vereinfachten Modell kann verwirklicht werden, indem die Länge des Lichtwegs innerhalb des transparenten Körpers berechnet und dann nach obiger Regel bestimmt wird, wie viel auf der anderen Seite ankommt. Moderne Modelle simulieren diese Absorption aber noch etwas genauer.¹⁰

F A R B E

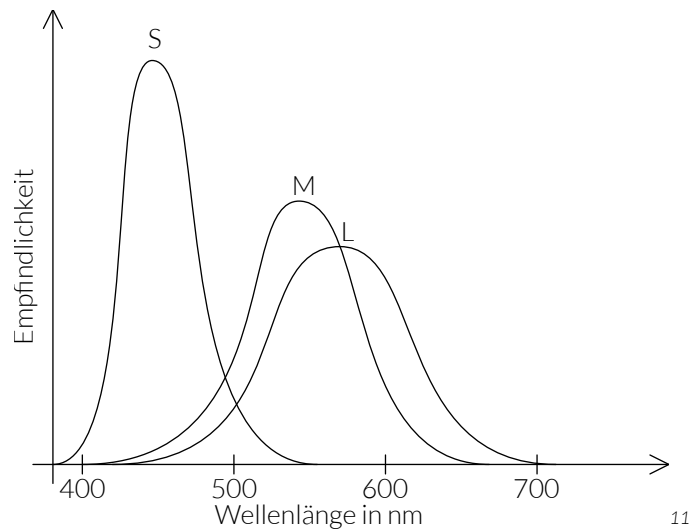
Entgegen aller Erfahrungswerte besitzen Licht und damit auch all die Objekte um uns herum keine Farbe. Streng betrachtet gibt es Farbe nicht. Licht besteht aus Wellen unterschiedlicher Wellenlänge und unterschiedlicher Intensität, aber Farbe ist keine physikalische Eigenschaft, sondern beruht auf der Physiologie des Sehens und der Verarbeitung im Gehirn.

⁸ Im Englischen index of refraction, in Blender und anderswo oft abgekürzt als IOR

⁹ Kuchling, Horst: Taschenbuch der Physik - 12. Aufl, Frankfurt/Main, 1989

¹⁰ Um in Cycles ein realistisches Glas zu erzeugen sollte ein Glas Shader für die Oberfläche mit einem Absorption Shader für das Volumen kombiniert werden.

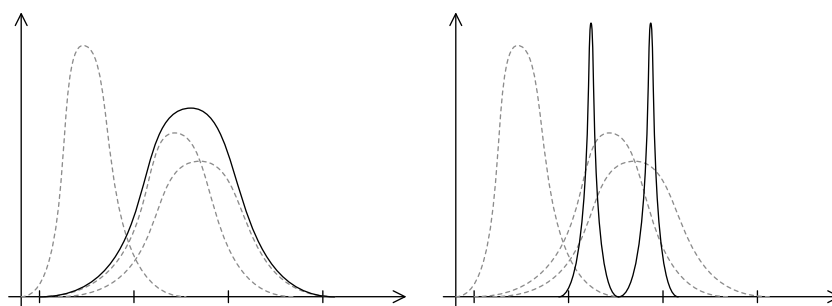
Entscheidend für unsere Farbwahrnehmung sind die drei verschiedenen Arten von Zapfen in der Netzhaut. Diese besitzen für unterschiedliche Bereiche des sichtbaren Spektrums unterschiedliche Empfindlichkeiten, wie im nachfolgenden Diagramm dargestellt.



Wissenschaftlich unterscheidet man die drei Arten von Zapfen in S für short, M für medium und L für long im Bezug auf die Wellenlänge. Je nachdem, in welcher Stärke Licht der verschiedenen Wellenlängen auf das Auge trifft, reagieren die drei Zapfenarten unterschiedlich stark. Nur diese Reaktion und nicht die Intensitätsverteilung des Lichts kommt im Gehirn an.

Unterschiedliches Licht – gleiche Farbe

Erst das Gehirn interpretiert unterschiedliche Sendeleistungen der drei Zapfen als verschiedene Farbeindrücke. Empfängt es von einer Stelle der Netzhaut beispielsweise intensive Signale der M- und der L-Zapfen, so wird dies als Gelb interpretiert. Wie es zu der Sendeleistung der Zapfen kommt, kann das Gehirn aber nicht feststellen.



Die obigen beiden Intensitätsverteilungen (durchgezogen) sorgen beide für eine starke Reaktion der beiden angesprochenen Zapfen und damit für eventuell den exakt gleichen Farbeindruck, obwohl das Licht sich in Wirklichkeit stark voneinander entscheidet.

Die Tatsache, dass man unsere Farbwahrnehmung in dieser Weise narren kann nutzen wir in vielfältiger Weise. Ein Computermonitor beispielsweise erzeugt Gelb eher so wie im rechten der beiden obigen Spektren, obwohl die reale Farbe dessen, was gefilmt wurde eher dem linken Spektrum entspricht.

¹¹ Diagramm in Anlehnung an: Herausg. Heinz Niedrig: Bergmann Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3 Optik; Berlin New York 1993; S. 727

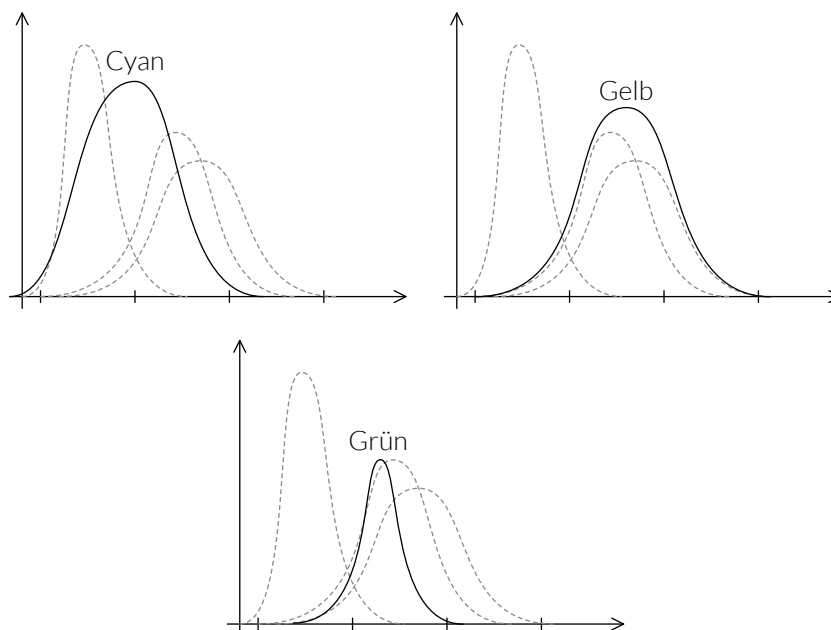
Nur weil wir eben auf drei Arten von Zapfen beschränkt sind ist es überhaupt möglich, den Farbeindruck von realen Objekten halbwegs zuverlässig auf Fernsehern, im Kino oder im Druck zu reproduzieren. Und selbst das ist teils schon schwer genug. Die verschiedenen Medien und auch schon verschiedene Geräte mischen ihre Farben nämlich höchst unterschiedlich. Und auch der Farbraum dessen, was an Farben wiedergegeben werden kann, sieht sehr unterschiedlich aus.¹²

Wenn Sie das nächste Mal am Computer mit R, G und B Farben mischen, dann denken Sie an das oben Genannte und machen Sie sich immer wieder klar: Eigentlich wären diese drei Regler besser mit L, M und S beschriftet und noch viel wichtiger: Sie werden so niemals reale Spektralverteilungen damit nachempfinden können, sondern nur den zugehörigen Farbeindruck.¹³

Additiv oder subtraktiv

Monitore erzeugen einen Farbeindruck, indem sie ihre drei Arten von leuchtfähigen Punkten dicht nebeneinander unterschiedlich hell strahlen lassen. Die drei Intensitäten addieren sich, weswegen man von **additiver Farbmischung** spricht.

Gedruckte Farben oder solche aus dem Farbkasten arbeiten umgekehrt: Übermalt man ein weißes Papier mit Wasserfarbe in einem türkisnen Ton (der Experte spricht lieber von Cyan), so regt das zugehörige Licht nur die S- und die M-Zapfen an. Gelbe Farbe lässt nur Licht durch, dass wie oben beschrieben die M- und die L-Zapfen zum Senden anregt. Mischt man die beiden Wasserfarben bzw. druckt ein Drucker entsprechende Farbpunkte aufeinander, so kommt nur noch Licht durch, dass die M-Zapfen anregt, denn langwelliges und kurzwelliges Licht wird jeweils von einem der beiden Farbpigmente geschluckt. Das Resultat ist eine Fläche, die wir als Grün wahrnehmen. Weil hier Schritt für Schritt etwas vom Licht weggenommen wird, spricht man von **subtraktiver Farbmischung**.



Cyan und Gelb (Yellow) bilden mit Magenta und Schwarz (Key) das CMYK-System beim Farbdruck.

¹² Professionelles Farbmanagement zumindest grob zu verstehen würde mindestens ein eigenes Skript füllen. Wir wollen es in diesen Ausführungen bei der obigen Darstellung belassen.

¹³ Darin liegt auch der Grund dafür, dass ein hübsches Farbfoto einer fernen Galaxie für einen Astrophysiker nur geringe Information enthält. Er benötigt die spektrale Intensitätsverteilung.