

### III. Physikalische Grundlagen: Optik

#### Einleitende Worte

Auch dieses Kapitel ist, ähnlich wie das vorangegangene nicht dazu gedacht, sämtliche Grundlagen in erschöpfender Weise zu erläutern. Es soll vielmehr nur ein kurzer Überblick über die relevanten Größen und Gesetze aus der Physik gegeben werden.

Diese Kenntnisse aus der Optik sind auch nicht zwingend erforderlich um mit einem Raytracingprogramm arbeiten zu können, aber sie helfen an diversen Stellen Fehler zu vermeiden oder so manchen Effekt besser zu verstehen. Vor allem wenn das Ziel angestrebt wird eine, der Realität möglichst nahe, virtuelle Welt zu erschaffen, so müssen gewisse Sachverhalte aus der Physik bekannt sein.

Dieses Kapitel kann also durchaus ebenso übersprungen werden wie die Grundlagen aus der Mathematik, aber man sollte dies nicht ganz so leichtfertig tun, denn die hier enthaltenen Informationen sind der Praxis naturgemäß um ein ganzes Stück näher als die reine Vektorgeometrie.

Im Gegensatz zum Kapitel II baut das Wissen in diesem Abschnitt nur bedingt aufeinander auf, so dass man nach Interesse und Notwendigkeit auch nur einzelne Themen herausgreifen und nachlesen kann.

#### Was ist Licht

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

Da eine präzise und vor allem allgemein gültige Bestimmung der Empfindlichkeit des menschlichen Auges nicht möglich ist, sind auch die Angaben, welchen Wellenlängenbereich das menschliche Auge wahrnehmen kann teilweise leicht unterschiedlich. So wird bei der Einteilung der Wellenlängen in Spektralbereiche der Abschnitt von 380 bis 780 Nanometer als „Licht“ bezeichnet, aber eine nennenswerte Empfindlichkeit besitzt das menschliche Auge nur im Bereich von etwa 400 bis 700 Nanometer<sup>1</sup>.

#### Beschreibung von Helligkeit

Bei der Festlegung der lichttechnischen Größen spielt die Physiologie des menschlichen Auges eine entscheidende Rolle, da ja schließlich für die optische Wahrnehmung der Mensch das Maß der Dinge ist. Obwohl die entsprechende Basiseinheit, die Candela eine exakt beschriebene Größe ist, lassen die Größen aus der so genannten Photometrie die sonst übliche Genauigkeit anderer physikalischer Größen vermissen.

Dies stellt allerdings für die hier gemachten Überlegungen zur Umsetzung der lichttechnischen Größen für die Bildberechnung keine Rolle.

Ein Maß, für das gesamte, von einer bestimmten Quelle abgegebene Licht, ist der so genannte *Lichtstrom*  $\phi$  mit der Einheit l<sub>m</sub> (l Lumen). Betrachtet man eine Lichtquelle unter dem Aspekt von Energie, so entspräche dem Lichtstrom die gesamte, von der Lichtquelle abgegebene Strahlungsleistung.

Für die wahrgenommene Helligkeit eines Körpers ist aber weniger der gesamte Lichtstrom entscheidend, als der Anteil davon, der auf eine Oberfläche, bzw. auf das Auge trifft. Um zu entscheiden, wie hell ein Bildpunkt erscheint, ist das Verhältnis von Lichtstrom zur Fläche, auf die er sich verteilt, entscheidend:

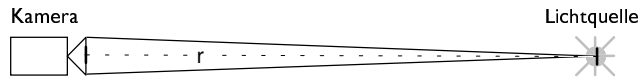
$$\text{Beleuchtungsstärke: } M = \frac{\phi}{A} \text{ Einheit } 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 1 \text{ lx (l Lux)}$$

---

<sup>1</sup> Quelle: Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3: Optik (9. Auflage) Kapitel 5

### Helligkeit eines Bildpunktes

Ist der Lichtstrom einer Lichtquelle bekannt, so kann die Beleuchtungsstärke für verschiedene Abstände berechnet werden. Auf diese Weise kann bestimmt werden, wie hell die Lichtquelle selbst im Bild erscheint.



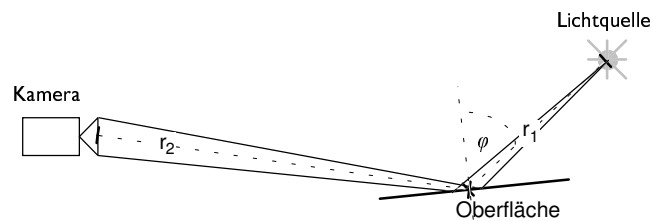
Da sich der gesamte abgestrahlte Lichtstrom kugelförmig ausbreitet, beträgt die Beleuchtungsstärke im Abstand  $r$ :

$$M = \frac{\phi}{A_{\text{Kugel}}} = \frac{\phi}{4\pi r^2}$$

Multipliziert man dieses Ergebnis mit der Fläche des Objektivs, so kennt man den auftreffenden Lichtstrom und damit die scheinbare Helligkeit der Lichtquelle, von dieser Position aus betrachtet.

### Helligkeit von Oberflächen

Trifft das Licht zunächst auf eine Oberfläche, von der zumindest ein Teil wieder zurückgestrahlt wird, so kommen zu den obigen Überlegungen noch einige Aspekte hinzu:



Durch das auftreffende Licht wird jeder Teil der Oberfläche selbst wieder zur so genannten *sekundären Lichtquelle*. Die Beleuchtungsstärke an der entsprechenden Stelle kann in gleicher Weise berechnet werden wie oben. Multipliziert man den so erhaltenen Wert mit der Fläche des betrachteten Oberflächenelementes<sup>2</sup>, so erhält man zunächst den Lichtstrom eines Flächenelements, das senkrecht vom Licht getroffen wird und das Licht vollständig wieder zurückwirft:

$$\phi_{\text{Ob, ideal}} = \frac{\phi_{\text{Lichtq.}}}{4\pi r_1^2} \cdot A_{\text{Element}}$$

Mit wachsendem Winkel zwischen der senkrechten zur Oberfläche (der so genannten Oberflächennormalen) verteilt sich das auftreffende Licht auf eine größere Fläche, wodurch die Beleuchtungsstärke und damit auch der, vom Flächenelement ausgehende Lichtstrom erniedrigen.

Außerdem wird von der Oberfläche nur ein Teil des auftreffenden Lichtes wieder zurückgestrahlt. Dies wird durch den *Emissionskoeffizienten*  $\varepsilon$  beschrieben, der im einfachsten Fall eine Zahl zwischen Null (kein Licht wird wieder diffus emittiert) und Eins (das Licht wird vollständig wieder diffus emittiert) ist. Für eine realistischere Simulation der Realität ist es notwendig das Emissionsverhalten in Abhängigkeit von der Farbe zu betrachten.

<sup>2</sup> Die Größe dieser Elemente entspricht dem Teil der Fläche, der durch einen Bildpunkt des zu berechnenden Bildes sichtbar ist, gleichsam als würde man durch die Kamera durch ein kleines Fenster in die Szene blicken.

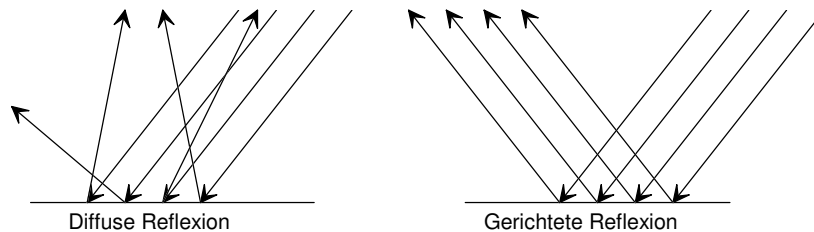
So erscheint eine Oberfläche zum Beispiel als Rot, weil sie nur rotes Licht wieder emittiert und die anderen Farben größtenteils absorbiert. Der Emissionskoeffizient ist also eine, von der Wellenlänge des Lichtes abhängige Größe.

Und will man den Realismus einer computerberechneten Szene weiter steigern, so kann bei manchen Materialien wie zum Beispiel gebürstetem Metall der Grad der Emission des Lichtes auch noch von der Richtung abhängig sein, aus der das Licht auf die Oberfläche trifft.

### Gerichtete Reflexion

Es ist von entscheidender Wichtigkeit, dass man sich klar macht, dass sich die eben gemachten Überlegungen nur auf reine diffuse Reflexion des Lichtes beziehen, wie sie bei rauen Oberflächen wie Papier oder unpolierten, trockenen Steinen vorkommt. Dabei wird das auftreffende Licht in nahezu alle Raumbereiche gleichmäßig wieder abgestrahlt.

Das so *diffus reflektierte* Licht ist, wie bereits angemerkt, in der Farbe des Materials eingefärbt.



Anders ist dies, wenn das Licht entsprechend dem Reflexionsgesetz im gleichen Winkel reflektiert wird, in dem es auftrifft. Dieses *direkt reflektierte Licht* besitzt auch nach der Reflexion die gleiche Farbe. So entstehen an den Stellen der Oberfläche, an denen sich die Lichtquelle direkt spiegelt, helle Glanzpunkte und andere Objekte spiegeln sich in ihrer eigenen Farbe wieder.

### Diffus und gerichtet, die Mischung macht's

An kaum einer Oberfläche findet nur eine der beiden Reflexionsarten in reiner Form statt. Vielmehr ist die Reflexion je nach Beschaffenheit des Materials mehr oder weniger gerichtet.

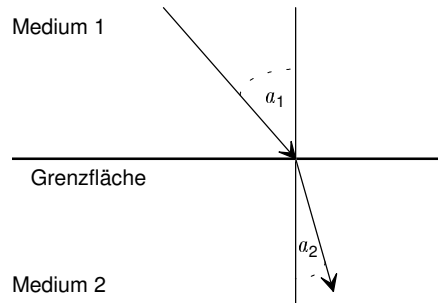
Beim Raytracingverfahren trägt man dieser Tatsache Rechnung, indem man die Helligkeit eines Oberflächenpunktes aus mehreren Werten zusammensetzt. Im Allgemeinen sind dies mindestens drei Werte: einer für diffuse Reflexion, einer für gerichtete Reflexion und speziell ein zusätzlicher Wert für die gerichtete Reflexion des Lichtes, das direkt aus einer Lichtquelle stammt und die damit für die Glanzlichter sorgt.

Die Summe dieser Werte kann natürlich bei realistischen Oberflächen den Wert Eins nicht überschreiten. Rechnerisch ist dies jedoch natürlich problemlos machbar, was dem 3D-Künstler einen größeren Spielraum bei der Gestaltung eröffnet und surreale Oberflächen ermöglicht.

### Und dann auch noch Transparenz

Zum reflektierten Licht kommt bei transparenten Gegenständen noch Strahlung, die ihren Weg durch das Objekt hindurch nahm. Um dieses korrekt zu simulieren muss bestimmt werden, welcher Anteil des Lichtes beim Durchgang durch das Material absorbiert wurde. Hierfür ist entscheidend, welche Strecke das Licht im Objekt zurückgelegt hat.

Und natürlich muss berechnet werden, woher das Licht ursprünglich kam, dass den Betrachter durch das durchsichtige Material hindurch erreicht. Um diesen Verlauf korrekt zu simulieren wird das Brechungsgesetz angewandt:



Der Strahl wird im *optisch dichteren Medium* zum Lot hin gebrochen. Dies liegt im Endeffekt daran, dass sich die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Materialien unterscheidet. Sind  $c_1$  und  $c_2$  die Lichtgeschwindigkeiten in den beiden Medien, so lässt sich das Brechungsgesetz in der folgenden Formel beschreiben:

$$\frac{\sin a_1}{\sin a_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Dabei sind  $n_1$  und  $n_2$  die so genannten *Brechzahlen* der beiden Materialien. Diese verwendet man aus Gründen der Praktikabilität, um die unhandlichen und langen Werte der Lichtgeschwindigkeiten zu vermeiden.

Die folgende Tabelle enthält Brechzahlen einiger Materialien, die für virtuelle Szenen interessant sein könnten<sup>3</sup>.

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

### Reale und irrealer Materialien

Auch hier können in der virtuell erstellten Welt natürlich auch unrealistisch hohe Brechzahlen simuliert werden. Ebenso sind völlig unrealistische Materialien denkbar, die das Licht sowohl zu 100% reflektieren, als auch zu 100% durchsichtig sind. Gerade bei der Erstellung von abstrakter Computergrafik kann dies für eventuell reizvolle Effekte sorgen, selbst wenn solche Materialien physikalisch unmöglich sind.

Möchte man reale Welten simulieren sollte man jedoch darauf achten, dass die Summe aus diffuser Reflexion, gerichteter Reflexion und Transparenz den Wert Eins nicht überschreitet.

### Was ist Farbe

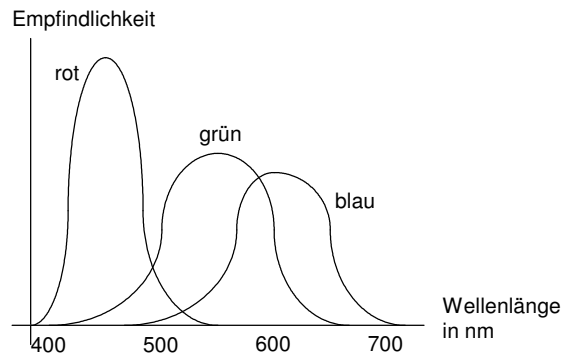
Entgegen aller Erfahrungswerte existieren Farben nicht wirklich. Sie sind ein Sinneseindruck, der durch die Art und Weise entsteht, wie im menschlichen Auge Licht registriert wird und von der nachfolgenden Bearbeitung im Gehirn. Um die Farbwahrnehmung zu verstehen ist es zunächst einmal notwendig, die Funktionsweise der Sehzellen im menschlichen Auge zu verstehen.

Es gibt in der Netzhaut zwei Arten von Sehzellen, Zäpfchen und Stäbchen genannt, von denen die letzteren nur für reine, farblose Helligkeitswahrnehmung zuständig sind. An dieser Stelle entscheidend sind die Zäpfchen, die sich wiederum in drei verschiedene

<sup>3</sup> Quelle: Kuchling, Taschenbuch der Physik

Arten unterteilen, die sich dadurch unterscheiden, dass sie auf verschiedene Bereiche des sichtbaren Spektrums unterschiedlich stark mit Nervenimpulsen reagieren.

Diese drei Arten bezeichnet man entsprechend ihrer Empfindlichkeitsbereiche als rote, grüne oder blaue Zäpfchen. Im Folgenden Diagramm ist vereinfacht dargestellt, auf welche Wellenlängenbereiche die drei Zellenarten wie stark reagieren:

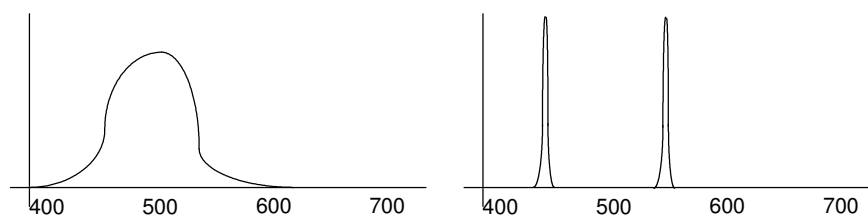


### Verschiedenes Licht, aber gleiche Farbe

Nach der Young-Helmholtz Dreikomponententheorie ist der entstehende Seindruck nur davon abhängig, wie stark die verschiedenen Zäpfchen angeregt werden. Mit diesem Ansatz lassen sich diverse Phänomene recht schlüssig erklären, wie zum Beispiel die additive Farbmischung.

Werden zum Beispiel die grünen und die roten Zäpfchen etwa gleich stark angeregt, so entsteht daraus im Gehirn der Seindruck „Gelb“. Welche spektrale Zusammensetzung das eintreffende Licht dabei tatsächlich hatte ist dabei nicht entscheidend.

Im Folgenden sind zwei Spektralverteilungen von zwei sehr unterschiedlichen Lichtquellen dargestellt. Links ist das Spektrum eines glühenden Körpers skizziert, dessen Strahlungsmaximum sich im Bereich des „gelben“<sup>4</sup> Lichtes befindet. rechts daneben ist das Licht eines angeregten Gases skizziert, das nur Licht aus zwei sehr schmalen Frequenzbereichen ausstrahlt, die im roten bzw. im grünen Bereich liegen.



Vergleicht man mit den oben dargestellten Empfindlichkeitsverteilungen, so erkennt man, dass in beiden Fällen die roten und grünen Zäpfchen angeregt werden. In beiden Fällen entsteht also der selbe Seindruck trotz gänzlich verschiedener Intensitätsverteilungen des eintreffenden Lichtes.

So wird auch klar, warum Gelb wahrgenommen wird, wenn auf einen Punkt sowohl grünes, als auch rotes Licht fällt.

<sup>4</sup> Wie schon angemerkt: Licht hat keine Farbe, die Verarbeitung im Gehirn macht diesen Sinneseindruck daraus. Dennoch ist es üblich, dem Licht Farben zuzuordnen, um die notwendige Ausdrucksweise nicht unnötig zu verkomplizieren.

**Was hiermit erklärbar ist ...**

Verschiedene weitere Beobachtungen lassen sich damit zumindest im Ansatz verständlich machen:

Am wichtigsten dürfte die Tatsache sein, dass durch die Kombination von nur drei verschiedenen Farben in variierender Helligkeit jeder beliebige Seheindruck erzeugt werden kann. Ein Umstand, der zum Beispiel bei jeder Art von Farbdarstellung bei Computermonitoren genutzt wird.

Jeder Bildpunkt besteht immer aus drei Einzelpunkten, die in den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau zum Leuchten gebracht werden können. Dadurch, dass diese Punkte sehr klein sind und somit dicht beieinander liegen werden die Zäpfchen im gleichen Bereich der Netzhaut angeregt und es entsteht der gewünschte Seheindruck.

Diese Farbpunkte kann man unter einer Lupe dann auch wieder als getrennte Farbpunkte erkennen. Betrachtet man in dieser Weise unterschiedlich gefärbte Bereiche des Bildschirms, so ist auch die unterschiedliche Helligkeit der drei Punkte klar erkennbar.

Diese Tatsache führt auch dazu, dass sich Farben im Computer als Kombination von drei Zahlen darstellen lassen, die man als Maß für die gewünschte, unterschiedlich starke Anregung der drei Zäpfchenarten betrachten kann.

**... und was eher nicht**

Auch das Auftreten von Komplementärfarben und in gewisser Weiser ihre bloße Existenz können mit diesem Modell plausibel gemacht werden. Jedoch hat es natürlich seine Grenzen, was darin begründet ist, dass es sich hauptsächlich den Abläufen auf Ebene der Sehzellen widmet. Die Betrachtung der Prozesse die sich wahrscheinlich bei der Verarbeitung der Nervensignale abspielen führen zu ergänzenden Farbtheorien wie der Gegenfarbtheorie von Hering oder der Zonentheorie des Farbensehens.

Da diese hier jedoch nicht von so entscheidender Bedeutung sind und deren Besprechung auch den Rahmen dieses Kapitels sprengen würde, sei an dieser Stelle auf andere Stellen verwiesen<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Ein möglicher Einstieg ist z.B. Kapitel 6.10 in der 9.Auflage von Bergmann Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3 - Optik. Einen Interaktiven Zugang zum Thema bieten diverse kleine Freewareprogramme von Dr. Dittmann unter <http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/download/windown.htm>