

11. Strahlenoptik und die geometrische Seite des Lichts

Rainer Hauser

April 2012

1 Einleitung

1.1 Modelle des Lichts

Zur Beschreibung des Lichts gibt es mehrere Modelle. Um die zur Zeit Galileis aufgekommenen Fernrohre und deren Wirkung auf die beobachteten Gegenstände zu analysieren, genügt das *Strahlenmodell*. Damit kann man die geometrischen Aspekte wie Vergrößerung eines Linsensystems bestimmen. Damit weiss man aber nicht, was Licht ist. Im siebzehnten Jahrhundert entwickelte Christian Huygens ein *Wellenmodell* des Lichts basierend auf einem unsichtbaren Äther, während Isaac Newton ein *Teilchenmodell* des Lichts entwarf. Die beiden Modelle konkurrierten sich gegenseitig.

Am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts hatte sich das Wellenmodell durchgesetzt, weil das Teilchenmodell die Beugung nicht erklären konnte. Albert Einstein zeigte jedoch, dass sich der Fotoeffekt mit dem Teilchenmodell erklären liess, was zur Entwicklung der *Quantenmechanik* beitrug, und dass man ohne den von Huygens propagierten Äther auskam, was über die *spezielle* zur *allgemeinen Relativitätstheorie* führte. Licht besteht aus heutiger Sicht aus *Photonen*. Das ist eines unter vielen Elementarteilchen, das im Gegensatz zu anderen Elementarteilchen wie Protonen und Elektronen jedoch keine Masse hat.

1.2 Geschwindigkeit des Lichts

Licht hat eine endliche Geschwindigkeit, wie Armand-Hippolyte-Louis Fizeau im neunzehnten Jahrhundert nachgewiesen hat. Im Vakuum beträgt sie $c_{\text{Vakuum}} = 2.9979246 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und ist in Wasser, Glas oder anderen durchsichtigen Materialien kleiner.

Das Universum ist so gross, dass man Distanzen in Lichtjahren messen kann. Das Licht braucht von der einen Seite der Milchstrasse auf die andere etwa 100 000 Jahre, sodass unsere Galaxie also einen Durchmesser von etwa 100 000 Lichtjahren hat.

1.3 Lichtquellen und Schatten

Die Lichtausbreitung einer *punktförmigen Lichtquelle* kann man durch Lichtstrahlen darstellen. Die Helligkeit der Lichtquelle nimmt im Quadrat des Abstandes ab. Stellt man einen undurchsichtigen Gegenstand auf, verhindert er die Ausbreitung des Lichts in dieser Richtung. Dahinter entsteht ein *Schattenraum*.

Eine *ausgedehnte Lichtquelle* kann man sich als Summe vieler Punktquellen vorstellen. Verhindert ein undurchsichtiger Gegenstand die Ausbreitung des Lichts, so entsteht ein *Halbschattenraum* und ein *Kernschattenraum*, was man bei einer Mondfinsternis deutlich sehen kann.

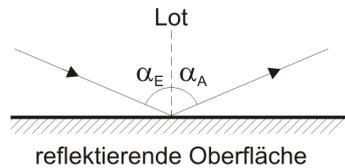
1.4 Weit entfernte Lichtquellen

Fallen Lichtstrahlen von einer weit entfernten, näherungsweise punktförmigen Lichtquelle auf einen vergleichsweise kleinen Gegenstand, so sind sie fast parallel. Es entstehen somit keine Halbschattenräume und keine Halbschatten.

2 Lichteinfall auf einen Körper

2.1 Reflexion

Trifft Licht auf einen Körper mit glatter Oberfläche, so wird ein Teil davon reflektiert. Es gibt einen Einfallswinkel α_E und einen Ausfallswinkel α_A für die eintreffenden beziehungsweise reflektierten Lichtstrahlen.



Diese Winkel sind beide zwischen 0° und 90° , und es gilt

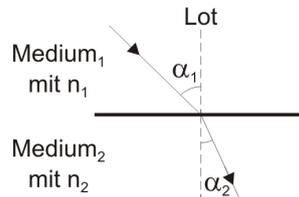
$$\alpha_E = \alpha_A \quad (1)$$

für die Beziehung zwischen ihnen.

Man spricht hier von *regelmässiger Reflexion*. Auch Körper mit einer rauen Oberfläche reflektieren jedoch Licht. Weil aber die verschiedenen Lichtstrahlen jeweils anders abgelenkt und somit in unterschiedliche Richtungen reflektiert werden, nennt man dies *unregelmässige* oder *diffuse Reflexion*.

2.2 Brechung

Verschiedene durchsichtige Materialien haben verschiedene *Brechzahlen*. Trifft beispielsweise Licht aus der Luft mit der Brechzahl $n_1 = 1.0003$ auf Wasser mit der Brechzahl $n_2 = 1.33$, so wird das Licht zum Lot gebrochen.



Ein- und Ausfallwinkel sind beide zwischen 0° und 90° , und es gilt

$$n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2) \quad (2)$$

für die Beziehung zwischen ihnen.

Befindet sich eine Lichtquelle in einem durchsichtigen Material mit Brechzahl n_1 , so kommt es an der Grenze zu einem durchsichtigen Material mit der kleineren Brechzahl n_2 zur *Totalreflexion*, weil beim kritischen Winkel α_k mit $n_1 \cdot \sin(\alpha_k) = n_2 \cdot \sin(90^\circ)$ gemäss (2) Lichtstrahlen so gebrochen werden, dass sie sich parallel zur Grenzfläche zwischen den zwei Materialien bewegen. Für Winkel grösser als α_k werden die Lichtstrahlen gemäss (1) an der Grenzfläche reflektiert, was beispielsweise zur Herstellung von Glasfaserkabel ausgenutzt wird.

2.3 Dispersion

Weisses Licht besteht aus verschiedenen Farben. Violette Licht wird jedoch leicht stärker gebrochen als rotes Licht, sodass man mit einem Prisma weisses Licht in die verschiedenen Farben aufteilen kann. Das passiert auch bei einem Regenbogen in den einzelnen Wassertröpfchen.

2.4 Absorption

Licht wird an der Grenze verschiedener Materialien nicht nur reflektiert und gebrochen, Materialien absorbieren auch Licht. Die Absorption von Licht führt zur Erwärmung. Je mehr Licht ein Körper absorbiert, und je weniger Licht er somit reflektiert, desto stärker erwärmt er sich. Schwarze Gegenstände absorbieren mehr Sonnenlicht, und helle Sonnenhüte schützen den Kopf somit besser vor Überhitzung.

3 Sammellinsen

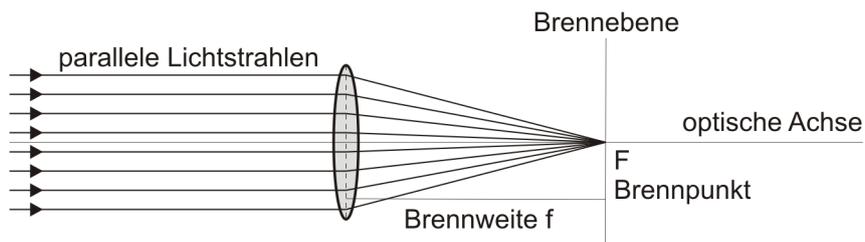
3.1 Brillen, Mikroskope und Fernrohre

Linsen sind Gläser, die so geschliffen sind, dass sie die Brechung für den beabsichtigten Effekt ausnutzen. Sammellinsen bündeln parallele Lichtstrahlen und Streulinsen streuen sie. Mit Sammellinsen als Brillengläser lässt sich Weitsichtigkeit und mit Streulinsen als Brillengläser lässt sich Kurzsichtigkeit

kompensieren. Geeignete Systeme von Linsen können als Mikroskope winzige Gegenstände vergrößern oder als Fernrohre weit entfernte Gegenstände näher bringen. Im Folgenden werden dünne Sammellinsen genauer betrachtet, wobei man die doppelte Brechung an der Grenze zwischen Luft und Glas zur Vereinfachung auf eine einfache Brechung in der Hauptebene der Linse reduziert.

3.2 Brennpunkt, Brennebene und Brennweite einer Sammellinse

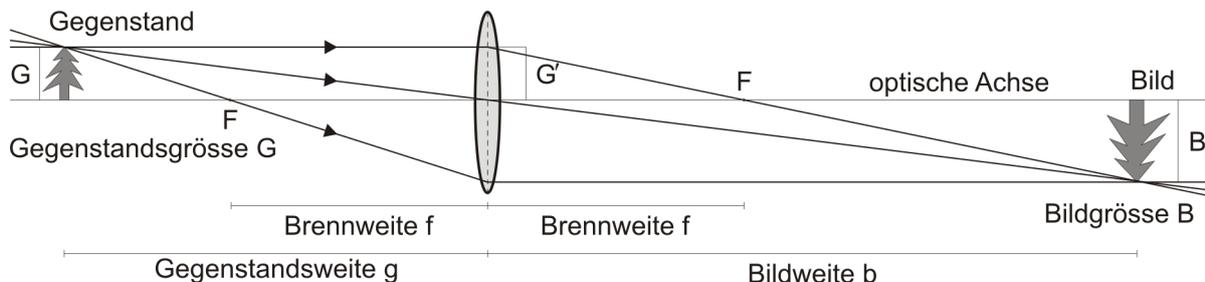
Sammellinsen sind so geschliffen, dass sich parallele Lichtstrahlen wie in der folgenden Abbildung gezeigt in einem Punkt, der *Brennpunkt* genannt wird, treffen. Der Abstand zwischen der Hauptebene der Linse und der *Brennebene*, in der je nach Richtung der einfallenden Lichtstrahlen die verschiedenen Brennpunkte liegen, nennt man *Brennweite*. Sie ist die charakteristische Grösse der Sammellinse.



Mit einer Sammellinse kann man ein Feuer entfachen, indem man das gebündelte Licht der Sonne auf ein brennbares Material fokussiert. Eine Sammellinse kann man aber auch als Lupe zur Vergrößerung oder als Linse in einer Fotokamera zur Abbildung auf einen Film oder Sensor brauchen. Allgemein gilt

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \qquad v = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \qquad (3)$$

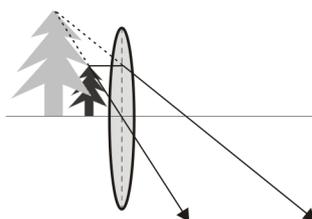
für die Beziehung zwischen der Brennweite f , der Gegenstandsweite g , der Gegenstandsgrösse G , der Bildweite b , der Bildgrösse B und dem Abbildungsverhältnis v gemäss folgender Abbildung.



3.3 Abbildungseigenschaften

Bei einer Linse kann ein *reelles* oder *virtuelles Bild* entstehen. Den Unterschied kann man sich am besten mit der Funktionsweise einer digitalen Fotokamera veranschaulichen. Platziert man den Sensor an den Ort, an dem das reelle Bild entsteht, so kann dort das Bild gespeichert werden. Hat der Sensor nicht den richtigen Abstand b , so wird das Bild unscharf. Platziert man hingegen den Sensor an den Ort, an dem ein virtuelles Bild entsteht, ist dort kein Bild, das mit dem Sensor gemessen werden könnte.

Während die obige Abbildung die Geometrie eines reellen Bildes zeigt, sieht man in der nebenstehenden Abbildung die Geometrie eines virtuellen Bildes. Jemand betrachtet einen Spielzeugtannenbaum durch eine Lupe.



Der Lichtstrahl von der Spitze des kleinen, wirklichen Baumes wird in der Linse gebrochen. Unser Sehapparat nimmt aber an, dass die Lichtstrahlen gerade gehen, sodass die Augen den grossen, unwirklichen Baum sehen.

Beispiel:

Ein Gegenstand befindet sich im Abstand $g = 30 \text{ cm}$ von einer Linse mit $f = 5 \text{ cm}$. Die Bildweite ist

$$b = \frac{f \cdot g}{g - f} = \frac{5 \text{ cm} \cdot 30 \text{ cm}}{30 \text{ cm} - 5 \text{ cm}} = 6 \text{ cm}$$

nach (3). Das entstehende Bild ist reell. Schiebt man den Gegenstand näher zur Linse, sodass er den Abstand $g = 3 \text{ cm}$ hat, wird die Bildweite

$$b = \frac{f \cdot g}{g - f} = \frac{5 \text{ cm} \cdot 3 \text{ cm}}{3 \text{ cm} - 5 \text{ cm}} = -7.5 \text{ cm}$$

und damit negativ. Generell sind B und b negativ bei virtuellen Bildern, während sie positiv sind bei reellen Bildern.

Die Brennweite f und die Gegenstandsweite g bestimmen gemäss folgender Tabelle, ob durch eine Sammellinse ein verkleinertes oder vergrössertes Bild entsteht, und ob das Bild reell oder virtuell ist:

Abstand	Grösse	Orientierung	Bildtyp
$g > 2 \cdot f$	verkleinert	um 180° gedreht	reell
$g = 2 \cdot f$	gleich gross	um 180° gedreht	reell
$f < g < 2 \cdot f$	vergrössert	um 180° gedreht	reell
$g = f$	-	-	kein Bild
$g < f$	vergrössert	aufrecht	virtuell

Verkleinert man g ausgehend von $g > 2 \cdot f$ immer mehr, sieht man den Gegenstand auf dem Kopf immer grösser werden, bis er bei $g = f$ verschwindet und anschliessend aufrecht und nicht mehr auf dem Kopf, aber immer noch vergrössert wieder zu sehen ist.

4 Stärken und Schwächen der verschiedenen Lichtmodelle

4.1 Grenzen des Lichtstrahlmodells

Das Lichtstrahlmodell beschreibt nur die geometrische Seite des Lichts. So hat ein Lichtstrahl zwar eine Richtung, aber alle aus dem Lichtstrahlmodell abgeleiteten Gesetze gelten auch, wenn man die Richtung umkehrt. Zur Berechnung der geometrischen Aspekte von Linsen leistet es gute Dienste, kann aber über andere Aspekte wie die Erwärmung von Gegenständen durch Sonnenlicht keine Aussagen machen.

4.2 Grenzen des Teilchenmodells

Fällt ultraviolettes Licht auf eine Kupferplatte kann man mit geeigneten Detektoren Elektronen messen, die aus der Kupferplatte herausgeschlagen werden. Dieses *Fotoeffekt* genannte Phänomen lässt sich mit dem Teilchenmodell erklären. Ultraviolette Photonen haben genügend Energie, um die Anziehungskraft zwischen Atomkern und Elektron zu überwinden, während gewöhnliches Licht zu schwach ist.

Leuchtet man mit einem Laserpointer durch ein sehr kleines Loch, sieht man einen unscharfen Lichtfleck, der von Ringen umgeben ist. Mit dem Teilchenmodell lässt sich dieses Phänomen, das *Beugung* genannt wird, nicht erklären.

4.3 Grenzen des Wellenmodells

Während sich die Beugung nicht nur sehr gut mit dem Wellenmodell erklären lässt, sondern auch mit dem Teilchenmodell unvereinbar ist, bleibt der Fotoeffekt im Wellenmodell ein Rätsel. Die Quantenmechanik beschreibt deshalb Licht sowohl als Teilchen wie auch als Wellen und spricht vom *Teilchen-Welle-Dualismus* des Lichts. Gewisse Aspekte des Lichts lassen sich mit dem Teilchenmodell, andere hingegen mit dem Wellenmodell beschreiben.