

# Warum ist Glas durchsichtig?— Eine Analyse im Rahmen des Lichtwegkonzeptes

Johannes Werner, Lutz Schön

(aus: DPG (Hrsg.). *Didaktik der Physik – Vortrag auf der Tagung in Berlin 1997.*)

---

## Vorbemerkung

Es gibt Stoffe, von denen wir die farbige Oberfläche sehen, manchmal beobachten wir außerdem, dass diese Oberfläche spiegelt, besonders wenn sie glänzend poliert ist. Bei Metallen ist die Eigenschaft des Spiegels noch stärker zu beobachten, dagegen fällt es schwer zu sagen, welche Farbe Metalle besitzen. Bei durchsichtigen Stoffen stellen wir fest, dass wir sie eigentlich überhaupt nicht sehen können. Wir sehen nur den Dreck auf einem Glas, die Dinge, die sich dahinter befinden, und wenn der Hintergrund nicht zu hell ist, sehen wir auch ein deutliches Spiegelbild. Was könnte dafür entscheidend sein, dass das Licht durch manche Stoffe hindurchtritt, manchmal reflektiert wird und zum Teil aber auch von dem Stoff verschluckt wird? Ist das Verhalten des Lichtes nur durch die Oberfläche des Materials bestimmt? Das wäre für die Reflexion plausibel, die Eigenschaft, Licht zu verschlucken (absorbieren) hängt aber von der Stärke des Materials ab. Auch das Hindurchtreten des Lichtes durch einen Körper kann nicht nur von seiner Oberfläche bestimmt werden, wenn man davon ausgeht, dass die Oberfläche aus den gleichen Bausteinen wie das Innere des Körpers zusammengesetzt ist. Wenn es überhaupt eine einzige verantwortliche Größe gibt, die das Verhalten des Lichtes bestimmt, so muss sie mit den Bausteinen des Stoffes, also seinen Atomen oder Molekülen, zusammenhängen.

Im Gegensatz zu der vereinfachten Beschreibung, bei der die optischen Prozesse (partielle Reflexion und Brechung) an den Grenzschichten zwischen den verschiedenen Medien stattfinden, gehen wir davon aus, dass das Licht, wenn es in einen Stoff eindringt, auf Wegen zwischen den Atomen hindurchgeht, dabei aber durchaus auch mit den Atomen zusammenstoßen kann. Wie oft dies passiert und ob das Licht trotzdem weiterlaufen kann, bestimmt das nach außen hin sichtbare Verhalten des Lichtes in diesem Stoff. Die Werte des Brechungsindex, der Lichtausbreitungsgeschwindigkeit und der Intensitäten des partiell reflektierten Lichtes sollen bei dieser Vorgehensweise als Ergebnis bestimmt werden können. Dabei werden die engen Zusammenhänge zwischen den Größen besonders deutlich.

Der Vortrag soll den fachlichen Hintergrund der Lichtausbreitung im Medium erläutern, wobei anstelle der hochschulüblichen Darstellung im Wellenmodell [Hec89] eine Beschreibung mit Hilfe des Zeigerformalismus gewählt wird. Das Problem wird dabei auf die elementaren Vorgänge reduziert: Licht wird am Atom gestreut bzw. Licht passiert ein Atom ungehindert.

## 1 Zeigerformalismus im Lichtwegkonzept

Ich möchte kurz auf den Zeigerformalismus eingehen, der in dem von Schön und Erb [Erb94, ES97] entwickelten Lichtwegkonzept ein wesentlicher Bestandteil ist und, wie auch die Behandlung der Lichtausbreitung im Medium, auf eine Idee Feynmans [Fey88] zurückgeht.

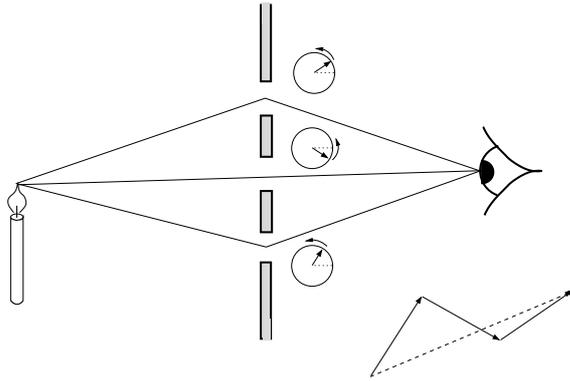


Abbildung 1: Zum Zeigerformalismus

Wir gehen davon aus, dass sich Licht auf Lichtwegen von einer Quelle zu einem Empfänger ausbreitet. Den Lichtwegen werden Zeiger zugeordnet, die sich beim Fortschreiten des Lichts auf den Wegen entgegen dem Uhrzeigersinn drehen, und zwar derart, dass sie sich einmal um  $360^\circ$  gedreht haben, wenn das Licht eine für seine Farbe charakteristische Basislänge zurückgelegt hat (Abbildung 1). Entsprechend der unterschiedlichen Längen der verschiedenen Lichtwege, stehen die Zeiger bei der Ankunft des Lichtes im Empfänger auf unterschiedlichen Positionen.

Addiert man die Zeiger wie Vektoren und quadriert die Resultierende, so erhält man die relative Intensität des Lichtes am Ort des Empfängers. So lassen sich beispielsweise die Intensitätsverteilungen hinter Beugungsgittern und Spalten berechnen.

Der Formalismus besagt, dass alle möglichen Lichtwege von der Quelle zum Empfänger zu berücksichtigen sind, aber es zeigt sich, dass diejenigen, welche der geometrischen Optik gehorchen, in der Hauptsache zum Ergebnis beitragen. Davon abweichende Lichtwege variieren so stark in ihrer Länge, dass ihre Zeiger in vollkommen unterschiedliche Richtungen zeigen und somit effektiv nichts zur Länge der Resultierenden beitragen.

## 2 Konzept zur Beschreibung der Lichtausbreitung im Medium

Beim Durchgang des Lichtes durch ein Medium können wir uns nach dem oben Gesagten auf die Betrachtung geradliniger Lichtwege von der Quelle zum Empfänger beschränken. Was könnte mit dem Licht passieren, wenn ein Lichtweg an einem Atom vorbeiführt?

1. Das Licht könnte einfach ungehindert vorbeigehen, ohne dass eine Wechselwirkung (eine Streuung) stattfindet.
2. Es könnte eine Streuung auftreten, nach der das Licht entweder weiter nach vor oder in Richtung Lichtquelle zurück geht.

Eine Streuung zur Seite schließen wir bei unseren Berechnungen aus, da sie im Experiment nicht beobachtet wird. Der ursprüngliche Lichtweg wird also in drei Wege aufgespalten, und

wir untersuchen nun, was mit den sich drehenden Zeigern während dieser Aufspaltung passiert. Es gibt prinzipiell nur zwei Möglichkeiten, nämlich die Veränderung der Zeigerlängen und zusätzliche Zeigerdrehungen.

Die Veränderung der Zeigerlängen kann nur so erfolgen, dass die Intensität vorher und nachher übereinstimmt, bzw. sich im Falle eines absorbierenden Mediums durch die Umwandlung von Licht in andere Energieformen verringert. Wie wir die Intensitäten des Lichtes auf den drei Wegen ermitteln, sagt uns der Zeigerformalismus: Die Intensität des Lichtes ist vor dem Prozess durch das Quadrat der Zeigerlänge gegeben. Hinterher setzt sie sich durch das Quadrat des Zeigers für den Weg des zurückgestreuten Lichtes ( $R$ ) und das Quadrat der vektoriell addierten Zeiger der Wege des nach vorn gestreuten ( $S$ ) und des ungehindert passierenden Lichtes ( $P$ ) zusammen (Abbildung 2).

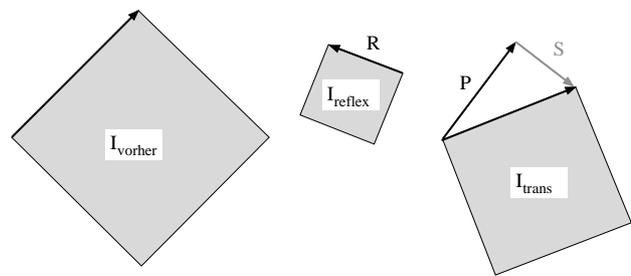


Abbildung 2: Bildung der Intensität

Eine zusätzliche Drehung der Zeiger findet tatsächlich bei der Streuung statt. Wir wollen die Größe der Drehung nicht einfach angeben, sondern, um sie plausibel zu machen, etwas weiter ausholen und die Eigenschaft der Atome bei dem Streuvorgang untersuchen.

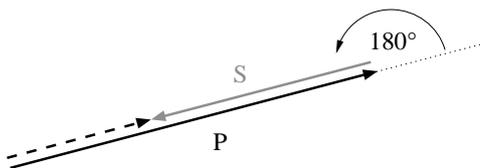


Abbildung 3: Absorption von Licht

Wir wissen, dass bei der Ausbreitung von Licht Energie übertragen werden kann und zwar portionsweise, wobei die Größe der Portionen (Quanten) von der Basislänge des Lichtes und damit auch der Farbe abhängig ist. Die Atome sind in der Lage, die Energiequanten des Lichtes bei einer Streuung zu übernehmen. Dieser Vorgang, bei dem das

Licht an Intensität verliert, findet aber nicht bei jeder Streuung statt, sondern dann, wenn das Licht eine bestimmte zu dem Atom passende Basislänge besitzt. Diese passende Basislänge kann eine einzelne Farbe sein, es kann sich aber auch um einen breiteren Bereich aus mehreren Farben handeln, im Übrigen muss der Wert nicht im Sichtbaren liegen. Liegt die Basislänge des Lichtes außerhalb des zum Atom passenden Bereichs, dann ist die Übertragung der Energie um so unwahrscheinlicher, je größer die Abweichung ist.

Das Atom gibt die aufgenommene Energie in der Regel nicht wieder in Form von Licht ab, sondern kann sie entweder speichern oder in Form von Wärme wieder ausstrahlen. Dies geschieht bei Stoffen, die Licht absorbieren.

Wie können wir nun diesen Vorgang mit Hilfe der Zeiger beschreiben? Die Intensität des fortschreitenden Lichtes ergibt sich durch die vektorielle Addition der beiden Zeiger für das nach vorn gestreute ( $S$ ) und das passierende Licht ( $P$ ). Würden diese Zeiger in verschiedenen Winkeln zueinander stehen, so ergäben sich unterschiedliche Intensitäten. Ein Minimum der Intensität würde erreicht, wenn sie im Winkel von  $180^\circ$  zueinander stünden (Abbildung 3 auf der vorherigen Seite).

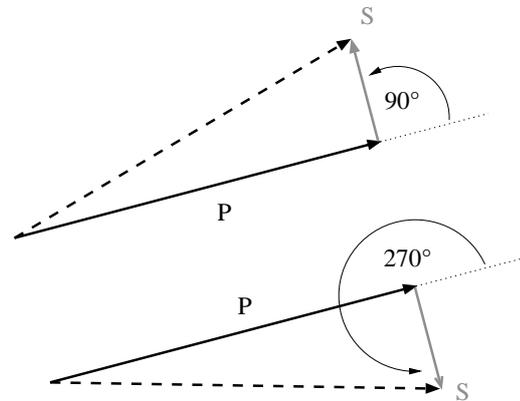
Wir wollen annehmen, dass in der Tat ein Zeiger durch eine Streuung eine Drehung um  $180^\circ$  erfährt, wenn die Basislänge des Lichtes diesen zum Atom passenden Wert hat. Andernfalls soll die Größe der Drehung von  $180^\circ$  abweichen, was dann die niedrigere Wahrscheinlichkeit für die Energieübertragung ausdrückt. Sie soll für wesentlich niedrigere Basislängen  $90^\circ$  und wesentlich größere  $270^\circ$  betragen (Abbildung 4).

Damit haben wir im Prinzip den ganzen Formalismus beschrieben. Die Lichtwege verzweigen sich bei jedem Atom in drei neue Wege. Die Zeiger drehen sich wie üblich während der Lichtausbreitung längs des Weges und werden jedesmal, wenn sie an einem Atom vorbeiführen, verkürzt. Auf den Wegen, auf denen das Licht nach vorn oder zurück gestreut wird, findet die zusätzlich Drehung statt, deren Größe wir aufgrund der Basislänge des Lichtes und der Eigenschaft der Atome, Lichtenergie aufzunehmen, abschätzen können. Die Lichtwege unterscheiden sich also darin, wie oft das Licht gestreut wird, und ihre Längen können dabei stark variieren.

### 3 Lichtausbreitung im Glas

Der beschriebene Formalismus zur Ausbreitung des Lichtes im Medium basiert auf einigen hypothetischen Annahmen. Seine Funktion soll daher anhand der Ausbreitung des Lichtes durch eine Glasplatte untersucht werden. Zur Anwendung unseres Formalismus benötigen wir drei Größen:

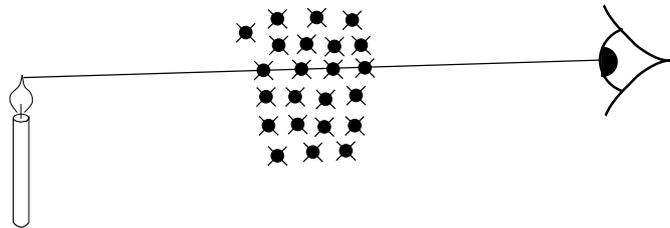
1. Wir wollen annehmen, dass die Absorption von Licht bei dem Streuprozess vernachlässigbar klein ist.
2. Wir benötigen den Drehwinkel, bei der die Streuung auftritt. Glas absorbiert UV-Licht. Die Atome des Glases nehmen also Energie des Lichtes auf, wenn die Basislänge im UV-Bereich liegt. Benutzen wir für unsere Untersuchung Licht aus dem sichtbaren Bereich,



**Abbildung 4:** Absorption von Licht für niedrigere und größere Basislängen

so ist dessen Basislänge erheblich niedriger, so dass wir von einem Drehwinkel des Zeigers bei der Streuung von  $90^\circ$  ausgehen.

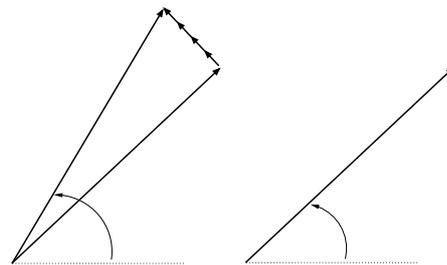
3. Offen bleibt zunächst die Länge des Zeigers für die Wege, auf denen eine Streuung stattfindet. Es ist eine Größe, mit der der Formalismus dem an das jeweilige Medium angepasst wird. Sie wird sicherlich sehr klein sein, so dass wir zunächst kleine Werte ausprobieren, bevor wir die richtige Größe verstehen werden. Daraus ergibt sich die Länge des Zeigers für das Passieren der Atome.



**Abbildung 5:** Lichtweg ohne Streuung

Zeichnen wir uns einfach einmal die Zeiger für die Lichtwege auf. Es gibt zunächst einen Weg, auf dem das Licht an allen Atomen (in der Abbildung 5 sind es vier) vorbeigeht, ohne ein einziges Mal gestreut zu werden. Die Länge des Zeigers ist fast die Ausgangsgröße des Zeigers bei der Lichtaussendung; die Richtung hängt von der gesamten Weglänge ab. An den ersten Zeiger hängen wir nun die Zeiger für die Lichtwege, auf denen das Licht einmal an einem Atom nach vorn gestreut wurde. Diese Lichtwege haben alle die gleiche Länge wie der erste, die Zeiger werden aber zusätzlich um  $90^\circ$  gedreht und sind aufgrund der Streuung viel kürzer.

Was kann man daraus ablesen? Der resultierende Zeiger des transmittierten Lichtes (Abbildung 6, links) ist gegenüber einem Lichtzeiger, der zu einem gleichlangen Weg im Vakuum gehört (Abbildung 6, rechts) stärker gedreht. Da eine volle Zeigerdrehung einer Wegstrecke der Basislänge entspricht, diese durch die zusätzliche Drehung aber bereits früher erreicht wird, muss die Basislänge des Lichtes im Medium kleiner als im Vakuum sein. Es erscheint, als müsse das Licht bei jedem Passieren eines Atoms eine extra Hürde überklettern, währenddessen sich einerseits der Zeiger weiter dreht, andererseits eine zeitliche Verzögerung auftritt, die einer geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Glas entspricht. Das Verhältnis der Basislänge des Lichtes im Vakuum zu der verkürzten



**Abbildung 6:** Erklärung für die kleinere Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in beliebigen Medien

Basislänge im Medium Glas ist gleich dem Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Glas (Brechungsindex).

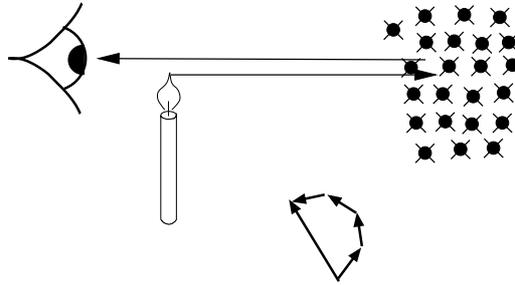


Abbildung 7: Reflexion von Licht

Die Lichtwege, auf denen das Licht das Medium nach einer Streuung in Richtung der Lichtquelle verlässt, sind, je nachdem wie weit im Inneren die Streuung stattgefunden hat, in ihrer Länge unterschiedlich. Die Zeiger weisen daher in unterschiedliche Richtungen, haben aber die gleiche Länge. Zusammengesetzt bilden die Zeiger ein Kreissegment (Abbildung 7). In Abhängigkeit der Plattenstärke wird ein mehr oder weniger vollständiger Kreis gebildet, wodurch die Länge der Resultierenden und damit die Intensität schwankt. Das entspricht unserer Beobachtung an dünnen Schichten, wo sich Intensitätsschwankungen von 0 bis 16% messen lassen. Dadurch lässt sich nun auch nachträglich die Größe der Zeiger bei der Streuung bestimmen.

Berücksichtigt man bei den Berechnungen mögliche Mehrfachreflexionen, so zeigen sich auch im transmittierten Licht Intensitätsschwankungen. Der dabei enorme Rechenaufwand, für die vielen Lichtwege sollte dann von einem Computer geleistet werden. Es zeigt sich dabei, dass sich die im Experiment messbaren Größen, wie der Brechungsindex und die Intensitäten von reflektiertem und transmittiertem Licht, recht gut reproduzieren lassen. Abbildung 8 auf der nächsten Seite zeigt die berechneten Intensitäten des reflektierten (unterer Graph) und transmittierten Lichtes (oberer Graph) in Abhängigkeit der Stärke der Glasplatte. Zur Berechnung wurden alle möglichen Lichtwege mit bis zu vier Reflexionen innerhalb der Glasplatte berücksichtigt.

## 4 Ein Thema für Schule?

Wir sind uns noch nicht im Klaren darüber, ob dieses interessante aber auch schwere Thema im Rahmen des Lichtwegkonzeptes in den Optikunterricht eingegliedert werden könnte. Wir gehen aber davon aus, dass die elegante Beschreibung der Prozesse mit Zeigern für Schüler leichter verständlich ist.

Mit dem Konzept könnte weiter untersucht werden, wie die gewählten Parameter (Zeigerlängen und Drehungen für den einzelnen Streuprozess und die Größe der atomaren Absorption)

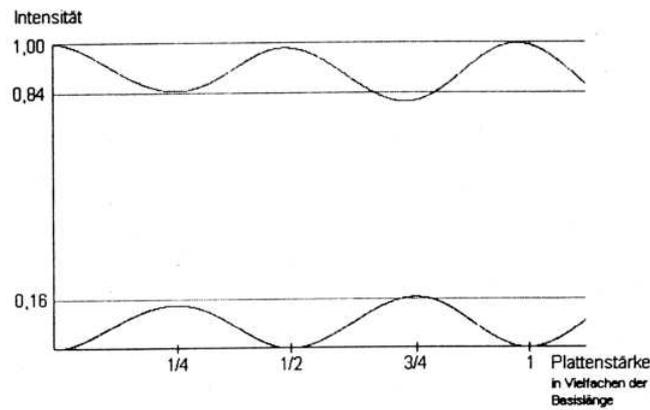


Abbildung 8: Intensitäten des reflektierten und des transmittierten Lichtes

die Eigenschaften eines Mediums bestimmen. So könnte nachvollzogen werden, wie die Dispersionskurve eines Mediums aussehen muss, wieso Metalle glänzen und undurchsichtig sind, wieso Farbfilter nur Licht bestimmter Farben hindurchlassen oder ganz allgemein, wieso uns Gegenstände in einer bestimmten Farbe erscheinen.

## Literatur

- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [ES97] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik. In: FISCHER, H.E. (Hrsg.): *Handlungs- und kommunikationsorientierter Unterricht in der Sek. II*. Bonn : F. Dümmers Verlag, 1997
- [Fey88] FEYNMAN, R. P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München : Piper, 1988
- [Hec89] HECHT, E.: *Optik*. Bonn : Addison-Wesley, 1989