

## Technische Optik 03

1 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Einige Substanzen lassen Licht nicht ungeschwächt passieren. In ihnen findet eine Abschwächung statt.

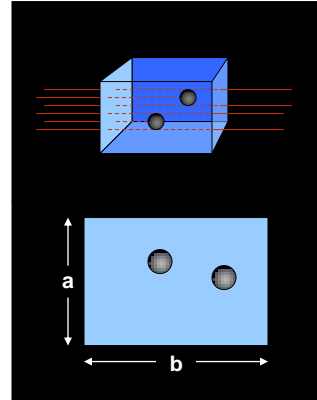
Diese Abschwächung geschieht an Zentren (Atomen, Molekülen oder Pigment-Teilchen), die statistisch im Volumen verteilt sind.

Wenn wir das Volumen aus der Richtung der einfallenden Lichtstrahlen betrachten, dann wird ein Teil der Querschnittsfläche  $A (= a * b)$  durch viele kleine Flächen abgedeckt. Jedes Zentrum hat einen kleinen Wirkungsquerschnitt:  $\sigma$ .

Die Wahrscheinlichkeit  $P$  der Absorption durch  $N$  Zentren lässt sich dann einfach durch das Verhältnis der Flächen ausdrücken:

$$P = \frac{N * \sigma}{A} \quad (1)$$

Damit dies richtig ist, dürfen die Wirkungsquerschnitte der Zentren nicht überlappen, d. h. statistisch betrachtet muss  $P$  sehr viel kleiner als 1 sein. Das lässt sich immer erreichen, indem man die Schicht mathematisch dünn genug macht, also ihre Dicke  $dx$  rechnerisch gegen Null gehen lässt.



## Technische Optik 03

2 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Wir denken uns also nun ein Volumen  $dV$  mit der Querschnittsfläche  $A$  und der Dicke  $dx$ :

$$dV = A * dx \quad (2)$$

Darin findet die Absorption als statistischer Prozess mit der Wahrscheinlichkeit  $P$  statt. Die einfallenden  $n$  Photonen werden durch Absorption um  $dn$  verändert:

$$dn = -n * P \quad (3)$$

Diese Anzahl ist proportional zur Zahl  $n$  der einfallenden Photonen, wie bei statistischen Betrachtungen üblich. (Die Wahrscheinlichkeit, 6 richtige im Lotto zu haben, ist proportional zur Zahl der Wertscheine, die ausgefüllt werden!)

Wir fassen die Gleichungen (1) bis (3) zusammen:

$$dn = n * \frac{N * \sigma}{A} = n * \sigma * \frac{N}{dV} * dx$$

Die Anzahl  $N$  der Zentren geteilt durch das betrachtete Volumen  $dV$  ist gleich der Konzentration  $c$  (gemessen in  $m^{-3}$ ). Damit erhalten wir endlich:

$$\frac{dn}{dx} = -n * c * \sigma$$

Das ist eine homogene Differentialgleichung erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten.

## Technische Optik 03

3 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

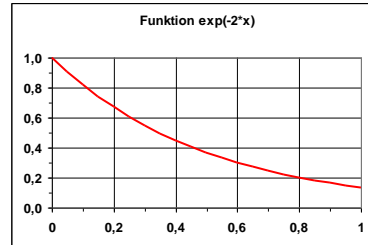
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Die allgemeine Lösung lautet:

$$n(x) = n_0 * e^{-\alpha * x}$$

mit  $\alpha = c * \sigma$ 

Dieses Gesetz heißt Lambert-Beersches Absorptionsgesetz. Die materialabhängige Konstante  $\alpha$  nennt man Absorptionskoeffizient. Sie ist gleich dem Produkt aus Konzentration und Wirkungsquerschnitt. Ihre Einheit ist  $m^{-1}$ .



Nun kehren wir zur Optik zurück.-

Ohne Absorption von Licht kann es keine Wirkung entfalten; daher ist dieser Vorgang zwar mit Verlust von Photonen verbunden, aber er führt zu nützlichen Anwendungen.

Lichtstrahlen, die eine Glasfilterplatte durchdrungen haben, sind außer durch Absorption auch noch durch Reflexion an den beiden Oberflächen abgeschwächt. Wenn wir uns nur für die Absorption interessieren, spricht man von „Reinabsorption“  $\alpha_i$  (englisch: „internal absorption“). Als „Reintransmission“  $\tau_i$  bezeichnet man die Durchlässigkeit unter Vernachlässigung von Reflexion:

$$\tau_i = 1 - \alpha_i$$

## Technische Optik 03

4 von 22

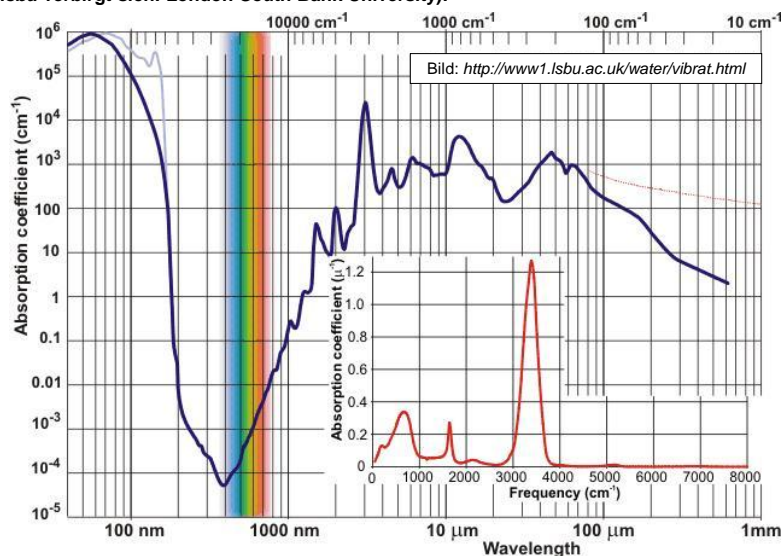
Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Das Spektrum des Absorptionskoeffizienten von flüssigem Wasser ist über viele Größenordnungen bekannt (hinter *Isbu* verbirgt sich: London South Bank University).

Diese Messungen machen verständlich, warum ein Taucher in 100 m Tiefe ( $10^4$  cm) nach oben nur noch blaue Wellenlängen erkennt.

Ein U-Boot oder Pottwal in 1000 m Tiefe ( $10^5$  cm) kann nichts mehr vom Tageslicht „sehen“.



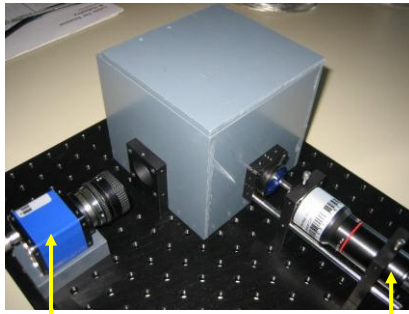
## Technische Optik 03

5 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

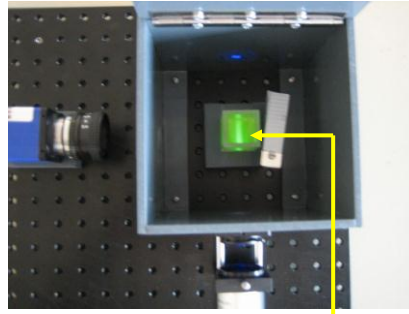
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Das Absorptionsgesetz macht sich auch bei Vorgängen bemerkbar, die neben der Umwandlung in Wärme nach Lichtabsorption auch noch andere Vorgänge zeigen. Diese Fotos zeigen einen Versuchsaufbau.



Kamera mit Objektiv;  
Beobachtung unter  
90° zur Einstrahlung

LED (eingeschaltet)  
mit blauer Strahlung



Küvette mit  
Fluoreszein in Wasser

## Technische Optik 03

6 von 22

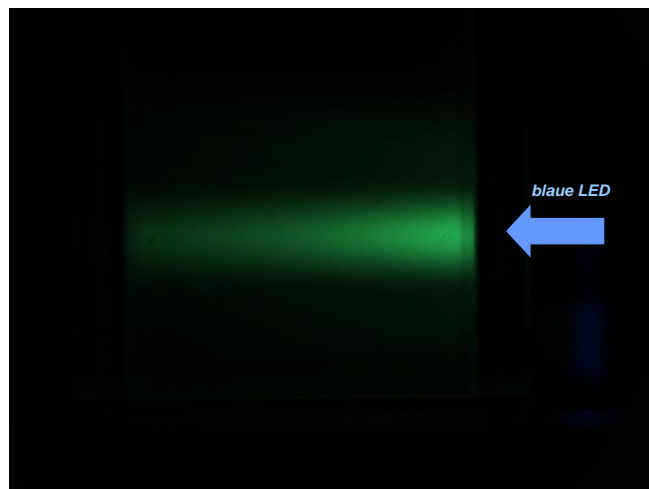
Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Wenn man mit blauem Licht in eine verdünnte Lösung von Fluoreszein in Wasser strahlt, kann man von der Seite grünes Leuchten erkennen. Die Helligkeit des Leuchtens nimmt nach links ab.

Dieses Bild wurde mit der digitalen Farb-Kamera (RGB) aufgenommen.

Das Bild wurde im PC gespeichert; anschließend wird es in einem Programm geladen und die Helligkeit des grünen Farbanteils entlang einer horizontalen Linie ausgelesen.



## Technische Optik 03

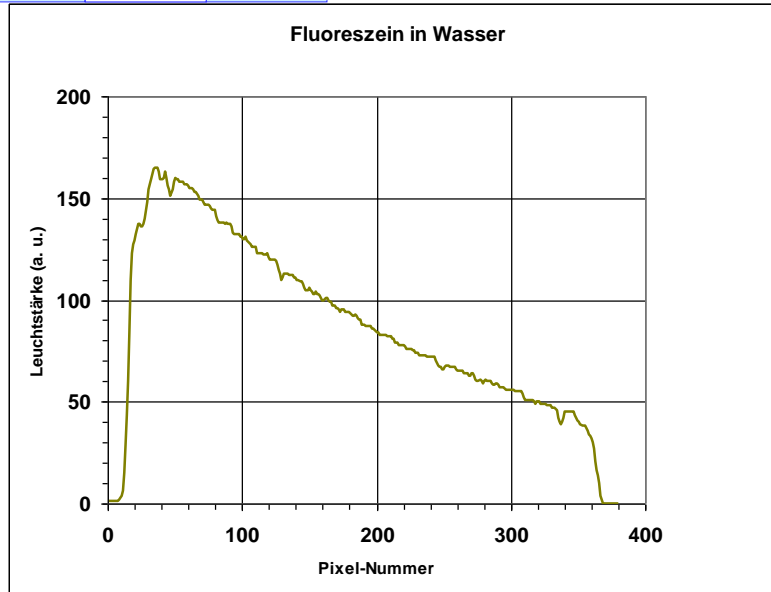
7 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Es ist zu erkennen, dass die Werte der Helligkeit vom Punkt der Einstrahlung an mit einer nichtlinearen Kurve abnehmen.

Der Wert der Leuchtstärke wird hier vom Bildschirm (dunkel = 0, hell = 255; für jeden der drei Farbanteile rot, grün, blau) bestimmt.



## Technische Optik 03

8 von 22

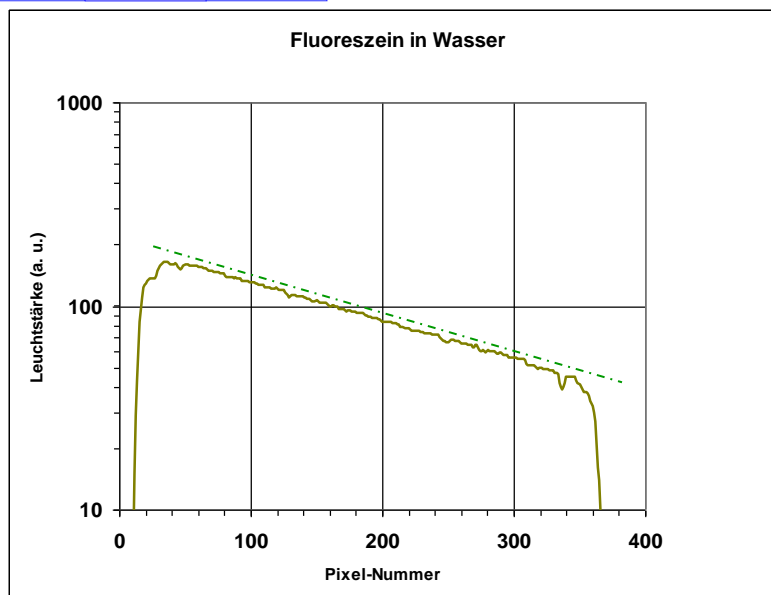
Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Trägt man die Werte der Helligkeit logarithmisch auf, erkennt man einen linearen Abfall.

Das ist die Konsequenz der Form des Lambert-Beerschen Gesetzes für die Absorption:

Beginnend an der Eintrittsstelle fällt die verbliebene Lichtleistung exponentiell ab.



## Technische Optik 03

9 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Es gibt viele verschiedene Filter, die sich in Wirkung und Anwendung unterscheiden. Als leicht zugängliche Informationsquelle empfehle ich die Website des Glasherstellers Schott in Mainz ([www.schott.com](http://www.schott.com)).



## Technische Optik 03

10 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Man unterscheidet als Filtertypen:

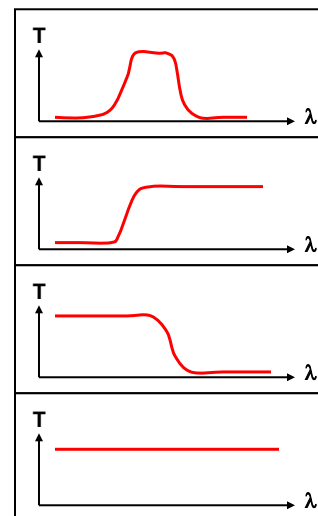
**Bandpassfilter**, die einen gewünschten Bereich selektiv durchlassen und außerhalb liegende Wellenlängen unterdrücken;

**Langpassfilter**, die ungewünschte kurzwellige Bereiche sperren und längerwelliges Licht gut durchlassen;

**Kurzpassfilter**, die unerwünschte langwellige Bereiche sperren; das braucht man z. B. bei Glühlampen, um Wärmestrahlung zurückzuhalten, und bei Laserschutzbrillen, wenn langwellige Laserstrahlung vorliegt;

**Neutralfilter** mit im sichtbaren Bereich nahezu konstanter, verringerter Durchlässigkeit.

Oft wird die vertikale Skala logarithmisch geteilt.



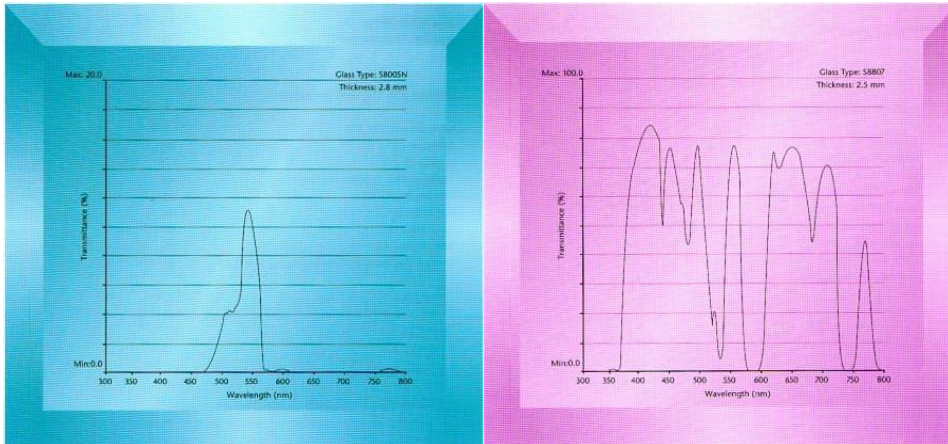
## Technische Optik 03

11 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Aus der graphischen Darstellung der Durchlässigkeit (= Transmission) eines Filters als Funktion der Wellenlänge des Lichts kann man die Wirkung beurteilen.



Gezeigt sind zwei Kurven zu den Kontrast verstärkenden Filtergläsern, die für selbst-leuchtende Anzeigen in Flugzeugen entwickelt wurden.

## Technische Optik 03

12 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Als Schutz vor Laserstrahlung werden Schutzbrillen empfohlen, die mit Filtergläsern ausgerüstet sind. Die Schutzwirkung wird durch den Parameter optische Dichte OD in Zahlen gefasst:

$$OD = -\lg(\tau_i) \longleftrightarrow \tau_i = 10^{-OD}$$

Eine optische Dichte von  $OD = 1$  bedeutet, dass der Strahl beim Durchgang um den Faktor 10 (denn  $\lg(10) = 1$ ) abgeschwächt wurde. Die Reintransmission beträgt  $\tau_i = 0,1$ .

Der Parameter der optischen Dichte ist sehr nützlich, wenn die Wirkung zweier Filter zu bestimmen ist: Es müssen nur die Werte für OD addiert werden.

**Beispiel:**

Zwei Filter mit  $OD = 1$  werden hintereinander gestellt. Dadurch entsteht die Wirkung eines Filters mit  $OD = 2$ . Die Reintransmission ist dann  $\tau_i = 10^{-2}$ .

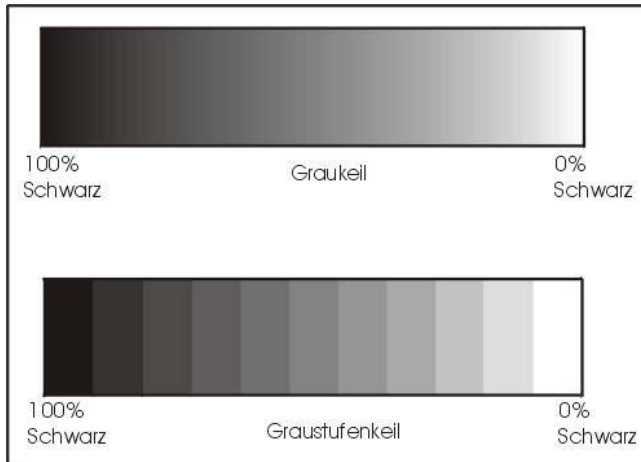
## Technische Optik 03

13 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Für Kalibrierzwecke werden Graukeile eingesetzt. Sie zeigen eine Variation der optischen Dichte als Funktion einer Koordinatenrichtung. Die Abbildung zeigt einen kontinuierlichen Graukeil und einen Stufenkeil.



Dieses Bild aus dem Internet sollte im Zusammenhang mit der Disziplin „Technische Optik“ nicht verwendet werden, denn der Begriff „100% Schwarz“ ist ohne Wert, weil für ein Filter die Transmission oder die Optische Dichte anzugeben sind. 100% Schwarz suggeriert: Kein Licht kommt durch, und das geht mit einem Filter gar nicht.

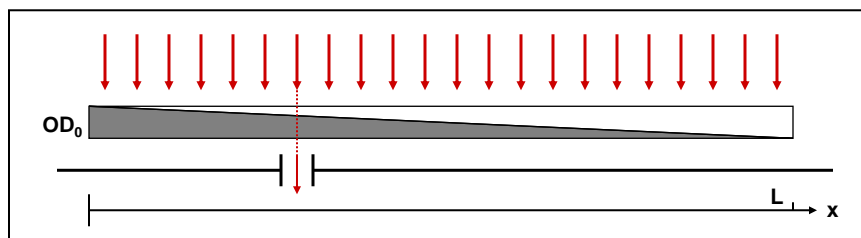
## Technische Optik 03

14 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Eine teure, aber gute Methode zur Herstellung eines Graukeils besteht darin, aus einem Stück eingefärbtem Glas einen Keil zu schleifen. Mit keilförmigen optischen Komponenten ist nicht leicht umzugehen; daher wird ein Klarglaskeil mit derselben Länge  $L$  angesetzt.



Wie wirkt dieser Filter? Die optische Dichte  $OD$  variiert linear mit der Verschiebung; sie ist maximal ( $= OD_0$ ) für  $x = 0$  und gleich Null für  $x = L$ :

$$OD(x) = OD_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right)$$

## Technische Optik 03

15 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

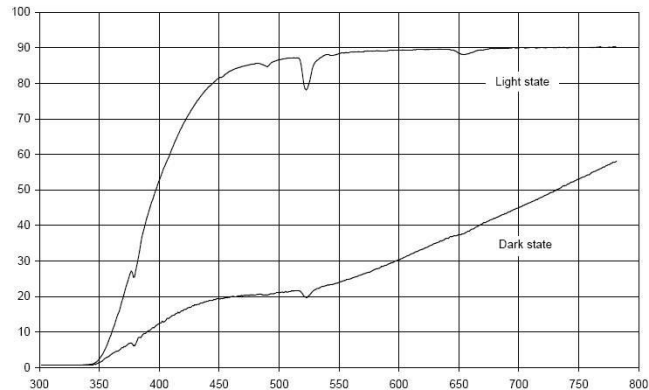
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Die Fähigkeit zur Absorption von Licht hängt von der chemischen Natur des Glases ab. So kann durch die Wirkung von Licht der Lambert-Beersche Absorptionskoeffizient durch Belichtung gesteigert werden, wenn die verwendeten Photonen mit ihren Wellenlängen für ablaufende photochemische Prozesse energiereich genug sind. Dann spricht man von photochromem Glas.

Die Abbildung zeigt das Transmissionsspektrum ( $T = 100$  heißt vollständig durchsichtig) für unbeleuchtetes und für beleuchtetes Glas.

Dieses Material wird für selbst-tönende Sonnenbrillen verwendet.

Die Abhängigkeit von der Wellenlänge ist deutlich, dass wir uns mit Lichtwellen befassen müssen.



## Technische Optik 03

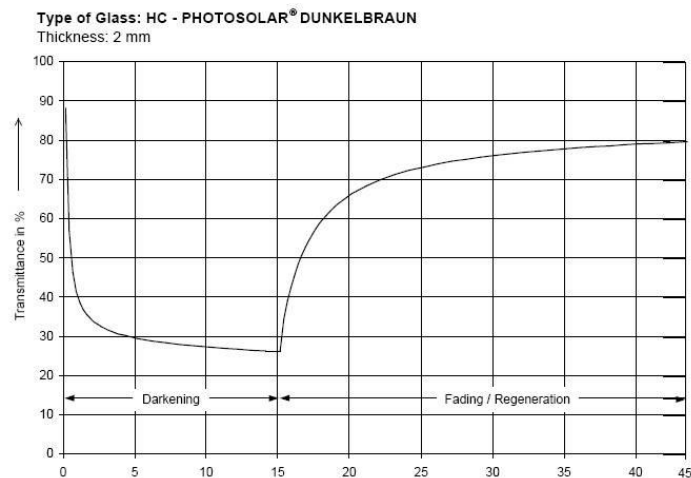
16 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Die Transmissionsänderung verläuft recht langsam. Horizontal ist die Zeit in Minuten aufgetragen, vertikal die Durchsichtigkeit. Setzt die Belichtung ein, dauert es ca. 2 Minuten, bis eine geringe Durchsichtigkeit erreicht ist.

Der Vorgang ist reversibel, d. h. nach Ende der Belichtung bildet sich mit einer Zeitkonstanten von etwa 5 Minuten wieder die originale Helligkeit heraus. Diese Vorgänge sind von der Temperatur abhängig.





## Technische Optik 03

17 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

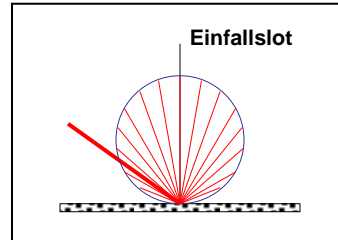
Bei der **Absorption** eines Lichtstrahls wird Lichtenergie in Wärmeenergie umgewandelt. Das ähnelt einer inelastischen Streuung, bei der die inneren Zustände der beteiligten Partner vorher und nachher verschieden sind.

Bei dem Vorgang der **Streuung** ändert das Licht seine Richtung, behält aber seine Wellenlänge bei. Das bekannteste Beispiel ist die Streuung an einer rauen Oberfläche (z. B. weißes Papier).

Gezeigt ist die Streuung nach dem Lambertschen Gesetz:

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \cos(\alpha)$$

Dabei ist  $\alpha$  der Winkel, gemessen gegen das Einfallslot, und  $I_0$  die abgestrahlte Intensität senkrecht zur beleuchteten Oberfläche.



Es gibt eine sehr interessante Anwendung, den **Rheumascanner**: Wenn rotes Licht einer Laserdiode auf Gewebe trifft, wird es zum Teil absorbiert und zum Teil gestreut. Bei rheumatischen Entzündungen in der Nähe von Gelenken ist der Streuanteil erhöht. Die Messung des Streuanteils kann daher zur Früherkennung von rheumatischen Veränderungen eingesetzt werden.

## Technische Optik 03

18 von 22

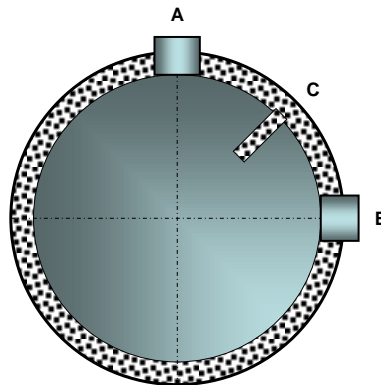
Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Es gibt Stoffe, die für alle Lichtfarben (Wellenlängen) diese mathematisch gut zu beschreibende Richtungsverteilung haben. Aus ihnen lässt sich ein in der Technischen Optik sehr nützliches Bauteil fertigen, die Ulbricht-Kugel (sie ist benannt nach Richard Ulbricht, 1849 – 1923, einem Ingenieur aus Sachsen).

Eine hohle Kugel hat zwei Öffnungen A und B, die unter rechtem Winkel zur Kugelmittlinie ausgerichtet sind.

Wenn durch die eine Öffnung (A) Licht mit einer bestimmten Richtungsverteilung eintritt, sieht ein Beobachter, der in die andere Öffnung (B) hineinsieht, eine gleichmäßig helle Fläche, die Licht in alle Richtungen mit gleicher Verteilung abgibt. Das ist unabhängig davon, mit welcher Richtungsverteilung das Licht bei A eintrat. Also kann ungleichmäßig abgestrahltes Licht so vergleichmäßig werden, dass ein Sensor bei B ein zur eintretenden Lichtleistung proportionales Signal abgibt. Eine Platte C (engl.: baffle) verhindert, dass Licht direkt nach B gelangt.



## Technische Optik 03

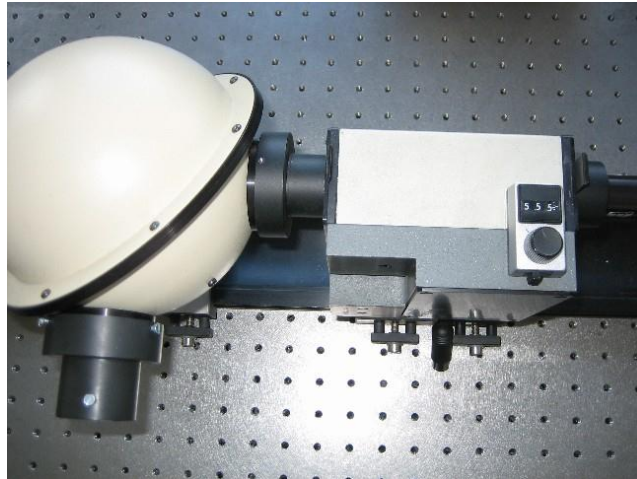
19 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Das Foto zeigt den Einsatz einer Ulbricht-Kugel bei der Messung der optischen Eigenschaft (Lichtstrom) einer Weißlicht-LED.

Das Licht wird in der Ulbricht-Kugel nach Richtung und Beleuchtungsstärke vergleichmäßig und beleuchtet den Eintrittsspalt eines Gitter-Monochromators. Am Ausgang ist eine Photodiode befestigt. Durch Vergleich der für jede Wellenlänge bei Verwendung einer kalibrierten Lampe auftretenden Photoströme lässt sich die „Helligkeit“ der LED messen.



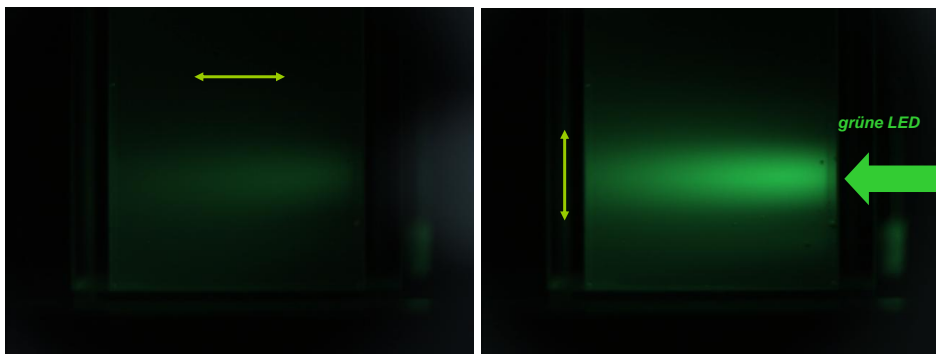
## Technische Optik 03

20 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Gleichgültig ob in der Luft, in Flüssigkeiten oder Festkörpern geschieht die Streuung an kleinen Teilchen so, dass die unter  $90^\circ$  senkrecht zur Ausbreitungsrichtung beobachtete Streustrahlung linear polarisiert ist.



Die Strahlung einer grün leuchtenden LED tritt von rechts in ein Glasgefäß mit Wasser ein, in dem ein Tropfen Milch verrührt wurde. Eine Kamera nimmt das unter rechtem Winkel abgestrahlte Licht auf. Links ist vor der Kamera ein Polarisationsfilter mit horizontaler, rechts mit vertikaler Durchlassrichtung gesetzt. Diese Beobachtungen brauchen zur Erklärung das Wellenmodell.

## Technische Optik 03

21 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Wenn weißes Licht durch eine Wolke mit Teilchen geleitet wird, die kleiner als die Lichtwellenlänge sind, wird das kurzwellige (blaue) Licht stärker gestreut als die anderen Wellenlängen.

Daher sieht die Umgebung des Siebengestirns (Plejaden) blau aus.

Die blaue Farbe des Himmels hat dieselbe Ursache.



## Technische Optik 03

22 von 22

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
1.1 Reflexion	1.2 Brechung	1.3 Absorption	1.4 Streuung	

Die Wirkung von Lichtstrahlen ist damit in ihren Grundlagen besprochen. Die Vielfalt an möglichen optischen Geräten, die sich auf derartig wenigen Vorgängen aufbauen lassen, ist schwer überschaubar.

Damit die Ausbildung in endlichem Zeitrahmen abgeschlossen werden kann, wollen wir hier einen Schlusspunkt setzen.

Ein Gedankenstrich wäre auch nicht schlecht ...



(Es geht weiter mit „Lichtwellen“.)