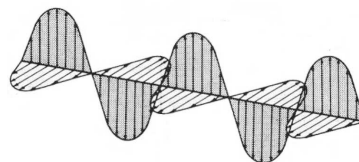


<b>O43 Polarisation durch ein optisch aktives Medium</b>	
Name:	Matrikelnummer:
Fachrichtung:	Versuchsdatum:
Mitarbeiter/in:	Gruppennummer:
Assistent/in:	Endtestat:

Dieser Fragebogen muss von jedem Teilnehmer **eigenständig** (keine Gruppenlösung!) handschriftlich beantwortet und vor Beginn des Versuchs abgegeben werden. Die Vorbereitung wird zusätzlich durch einen Test bzw. eine mündliche Prüfung über die physikalischen Grundlagen des Versuchs kontrolliert.  
(Version: 16. Oktober 2021)

### Versuchsziel und Versuchsmethode:

1.) Zeichnen Sie das physikalische Koordinatensystem in die abgebildete Lichtwelle, benennen Sie die Achsen und charakteristischen Größen.



- 2.) Was versteht man unter
- a) linear polarisiertem Licht?
  - b) elliptisch- und zirkular polarisiertem Licht?
  - c) teilweise polarisiertem Licht?
  - d) Dichroismus?

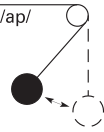
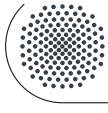
3.) Wann heißt ein Glimmerplättchen  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen und was bewirkt es?

4.) Zwei linear polarisierte Wellen, deren Polarisationsrichtungen senkrecht aufeinander stehen, werden überlagert. Welche Polarisierungen resultieren hieraus abhängig von der Phasenbeziehung ( $0, \frac{\pi}{2}$ , beliebig) und dem Amplitudenverhältnis der beiden Wellen?

5.) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Lichtintensität und dem Betrag des elektrischen Feldstärkevektors?

6.) Zwei zirkular polarisierte Wellen, von denen eine rechts- und eine linksdrehend ist, werden überlagert. Welche Polarisierungen resultieren hieraus abhängig von der Phasenbeziehung und dem Amplitudenverhältnis der beiden Wellen?

7.) *Nur Physiker:* Was versteht man unter Kohärenzlänge?



## O Optik

### O43 Polarisation durch ein optisch aktives Medium

Diese Anleitung kann und soll kein Lehrbuch ersetzen. Die beschriebenen Grundlagen stellen einen kurzen Überblick dar und sind daher zum Erlernen der physikalischen Grundlagen nicht ausreichend. Genauere Beschreibungen finden sich in:

- [1] *Kapitel 11.2 Polarisation des Lichts.* In: MESCHÉDE, D.: *Gerthsen Physik*. Springer, 2010. – E-Book
- [2] *Kapitel 8.6 Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht.* In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer, 2013. – E-Book
- [3] *Kapitel 28 Eigenschaften des Lichts.* In: TIPLER, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, 2015. – E-Book

#### Stichworte

Erzeugung von polarisiertem Licht [1, 2], Polarisator [1, 2], Analysator [1, 2], Linear [1, 2], zirkular [1, 2] und elliptisch polarisiertes Licht [1, 2]  
Snelliussches Brechungsgesetz [3]; Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in Medien [3], Doppelbrechung [1], ordentlicher und außerordentlicher Strahl [1], optisch aktive Stoffe [2], chirale Moleküle [2]

#### Theoretische Grundlagen

Licht besteht aus transversalen elektromagnetischen Wellen. Der elektrische Feldstärkevektor  $\mathbf{E}$  und der magnetische Feldstärkevektor  $\mathbf{B}$  stehen (im Vakuum und in isotropen Medien) senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und senkrecht zueinander. Sie bilden ein orthogonales Dreibein. Als Polarisationsrichtung wird die Richtung des elektrischen Feldstärkevektors bezeichnet, weil dieser in den meisten Materialien deutlich stärker als der magnetische Feldstärkevektor von dem Medium beeinflusst wird. Die Polarisationsebene ist die aus  $\mathbf{E}$  und der Ausbreitungsrichtung aufgespannte Ebene.

Bezüglich Reflexion und/oder Brechung an einem Medium spricht man von  $p$ -,  $\pi$ -,  $TM$ - oder *parallel* polarisiertem Licht, wenn  $\mathbf{E}$  in der durch Einfallsvektor und Ausfallsvektor des Strahls aufgespannten Ebene liegt. Steht  $\mathbf{E}$  entsprechend senkrecht zu dieser Ebene, so wird dies als  $s$ -,  $\sigma$ -,  $TE$ - oder *senkrecht* polarisiertes Licht bezeichnet.  $\pi$ -polarisiertes Licht kann einfach identifiziert werden, da nur für diese Polarisationsrichtung ein Brewster-Winkel auftritt (s.u.).

Trifft Licht auf Materie, werden die Elektronen der Atome bzw. Moleküle durch die elektrische Feldkomponente zu (gedämpften) Schwingungen angeregt. Dabei wird Energie aus dem Lichtfeld absorbiert und vom schwingenden Dipol (Elektronen - Kern) phasenverschoben emittiert - es kommt zu einer Verzögerung der Ausbreitung.

In Materie ist die Lichtgeschwindigkeit deshalb kleiner als im Vakuum und im Allgemeinen frequenzabhängig (Dispersion, siehe Prisma).

In optisch isotropen Materialien ist die Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen gleich. Kristalle oder Polymerfolien mit ausgerichteten Molekülketten besitzen jedoch häufig unterschiedliche dielektrische Polarisierbarkeiten in verschiedenen Raumrichtungen und zeigen deshalb so komplexe Phänomene wie Doppelbrechung, Dichroismus und optische Aktivität. Um die Ausbreitung einer Lichtwelle in solchen Materialien zu verstehen und zu berechnen, wird der elektrische Feldvektor des einfallenden Lichts in geeignete Komponenten zerlegt, z.B. in Richtung unterschiedlicher Achsen eines Kristalls, und nach Austritt aus dem Material zum Gesamtvektor addiert.

**Polarisationsarten:** Strahlen die Atome einer Lichtquelle ungeordnet und unabhängig voneinander, so überlagern sich die von ihnen ausgesandten einzelnen Wellenzüge völlig regellos, die Energie des abgestrahlten Lichtes ist gleichmäßig auf alle Polarisierungsebenen verteilt. Schwingt  $\mathbf{E}$  nur in einer Ebene, so ist das Lichtbündel linear polarisiert. Läuft die Spitze des resultierenden Vektors  $\mathbf{E}$  auf einem elliptischen (bzw. kreisförmigen) Zylinder mit der Ausbreitungsrichtung als Achse, so ist das Bündel elliptisch (bzw. zirkular) polarisiert. Elliptisch polarisiertes Licht kann als Überlagerung von zwei linear polarisierten Wellen, deren Polarisierungsebenen aufeinander senkrecht stehen und die gegeneinander phasenverschoben sind beschrieben werden (siehe Vorbereitungsfragen). Umgekehrt kann linear polarisiertes Licht auch als Überlagerung einer rechts- und einer linkszirkular polarisierten Welle beschrieben werden. Ist eine Schwingungsrichtung in einem Lichtbündel bevorzugt, so nennt man es teilweise polarisiert. Teilweise polarisiertes Licht ist ein Gemisch aus polarisiertem und unpolarisiertem Licht. Das Verhältnis aus polarisiertem Intensitätsanteil zur Gesamtintensität des Lichtes heißt Polarisationsgrad  $P$ .

**Analyse von polarisiertem Licht:** Polarisiertes Licht kann z.B. unter Verwendung eines Polarisators erzeugt werden. Beim Durchgang durch einen Polarisator wird vom Feldstärkevektor des einfallenden Lichts nur die Komponente transmittiert, die parallel zu der durch den Polarisator vorgegebenen Richtung liegt. Eine dazu senkrechte Komponente wird absorbiert oder reflektiert. Ein weiterer, hinter dem ersten Polarisator platzierter Polarisator kann als Analysator dienen. Hier wird der einfallende Lichtvektor wiederum auf die durch den Analysator vorgegebene Richtung projiziert, so dass gilt:

$$E_{\text{trans}} = E_{\text{ein}} \cos(\delta) \quad (\text{O43-1})$$

$$I_{\text{trans}} = I_{\text{ein}} \cos^2(\delta) \propto (E_{\text{ein}} \cos(\delta))^2 \quad (\text{O43-2})$$

Dabei sind  $E_{\text{ein}}$  und  $I_{\text{ein}}$  jeweils Amplitude und Intensität der einfallenden Welle;  $E_{\text{trans}}$  und  $I_{\text{trans}}$  beziehen sich entsprechend auf die transmittierte Welle und  $\delta$  ist der Winkel zwischen den Polarisationsrichtungen von Polarisator und Analysator.

Zur Analyse des polarisierten Licht misst man die vom Analysator durchgelassene Intensität in Abhängigkeit von seinem Drehwinkel  $\delta$ . Aus den so gewonnenen Intensitätskurven lässt sich bei linear polarisiertem Licht die Polarisationsrichtung, bei elliptisch polarisiertem Licht die dem Feldstärkevektor zugeordnete Ellipse und bei teilweise polarisiertem Licht der Polarisationsgrad bestimmen.

Unter „gekreuzten Polarisatoren“ ( $\delta = 90^\circ$ ) versteht man die Stellung zwischen Polarisator und Analysator, bei der die durchgelassene Intensität (ohne Zwischenmedium) Null ist. So lassen sich besonders gut kleine Änderungen des Polarisationszustands beobachten, wenn ein Medium zwischen die Polarisatoren eingebracht wird. Warum?

### Herstellung von polarisiertem Licht

1. **Polarisation durch Doppelbrechung:** In nicht regulären Kristallen wie z.B. Quarz oder Glimmer ist die Lichtgeschwindigkeit und damit die Brechzahl für verschiedene Polarisationsrichtungen verschieden. Das bedeutet, dass sie an den Grenzflächen des Kristalls verschieden stark gebrochen werden. Man unterscheidet einen „ordentlichen“ und einen „außerordentlichen“ Strahl. Lässt man linear polarisiertes Licht **senkrecht** auf eine Kristallebene einfallen, so laufen die zu den Kristallachsen dieser Ebene parallelen Lichtkomponenten mit verschiedener Ausbreitungsgeschwindigkeit durch den Kristall - daher die Bezeichnung „Verzögerungsplatte“. Beim Wiederaustritt aus dem Kristall haben die Lichtkomponenten (der unterschiedlichen Polarisationsrichtungen) eine von der Kristalldicke abhängige Phasendifferenz und überlagern sich zu elliptisch polarisiertem Licht. Ein Spezialfall ist gegeben, wenn die Phasendifferenz gerade  $\frac{\lambda}{4}$  beträgt: Dann addieren sich die austretenden Vektorkomponenten zu zirkular polarisiertem Licht. Lässt man umgekehrt zirkular polarisiertes Licht auf ein solches sog.  $\lambda/4$ -Plättchen fallen, wird daraus linear polarisiertes. Verständnisfrage: Wie liegen die Polarisations Ebenen relativ zueinander, nachdem links- bzw. rechtszirkular polarisiertes Licht ein  $\lambda/4$ -Plättchen durchlaufen hat?
2. **Polarisation durch Dichroismus:** In manchen Kristallen ist die Absorption von der Polarisationsrichtung abhängig. Schickt man natürliches Licht durch einen solchen Kristall genügender Dicke, so wird es in einer Polarisationsrichtung völlig absorbiert (z.B. der ordentliche Strahl). Der austretende (in dem Fall außerordentliche) Strahl ist linear polarisiert.
3. **Polarisation durch Reflexion:** Fällt **natürliches** Licht unter einem bestimmten Winkel  $\alpha_{\text{Br}}$  (Brewster- oder Polarisationswinkel) auf eine Glasplatte mit dem Brechungsindex  $n$ , so ist der reflektierte Strahl vollständig linear polarisiert ( $\mathbf{E}$ -Vektor senkrecht zur Einfallsebene); er steht senkrecht auf dem gebrochenen Strahl. Für  $\alpha_{\text{Br}}$  gilt das Brewster-Gesetz

$$\tan \alpha_{\text{Br}} = n \quad (\text{O43-3})$$

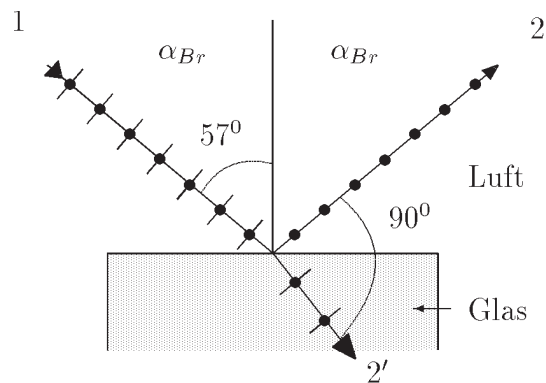


Abb. O43-1: Polarisation einer elektromagnetischen Welle bei der Reflexion an einer Glasplatte. Striche und Punkte: Richtungen der Komponenten, in die der  $\mathbf{E}$ -Vektor zerlegt wird.

Der gebrochene Strahl ist ebenfalls (teilweise) polarisiert, und zwar senkrecht zum reflektierten Strahl.

Fällt in der Einfallsebene **polarisiertes** Licht ( $\mathbf{E}$ -Vektor parallel zur Einfallsebene) unter dem Polarisationswinkel auf eine Glasplatte, so kann praktisch nichts reflektiert werden. Das Intensitätsverhältnis von reflektiertem zu einfallendem Licht hängt jetzt vom Einfallswinkel und von der Polarisationsrichtung ab.

### Optisch aktive Stoffe

In bestimmten Medien (optisch aktive Substanzen) ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von zirkular polarisiertem Licht je nach Umlaufsinn von  $\mathbf{E}$  verschieden groß. Solche Medien drehen die Schwingungsebene linear polarisierten Lichts, da man sich dieses stets als Überlagerung von zwei gegenläufig zirkular polarisierten Lichtbündeln gleicher Intensität vorstellen kann. Man spricht von rechtsdrehenden (+) bzw. linksdrehenden (-) Substanzen, wenn beim Blick gegen die Lichtrichtung die Polarisationsebene nach rechts bzw. nach links gedreht wurde.

Ursache für die optische Aktivität ist die spezielle Symmetrie von Kristallen oder Molekülen, die in zwei spiegelbildlichen Strukturen vorkommen können (sog. stereoisomere Formen oder Enantiomere). Solche Moleküle werden chiral genannt und die beiden Enantiomere können - trotz gleicher chemischer Eigenschaften - mit anderen chiralen Molekülen sehr unterschiedlich reagieren! Dies erklärt z.B. die unterschiedliche Abbaubarkeit von links- bzw. rechtsdrehender Milchsäure in unserem Körper.

Mittels eines Polarimeters (s. Versuchsaufbau, Abb.O43-2) kann man die Größe und Richtung der Drehung von Licht beim Durchgang durch optisch aktive Substanzen bestimmen. Dazu verwendet man am besten monochromatisches Licht, welches man durch einen Polarisationsfilter (Polarisator) und anschließend durch die zu untersuchende Substanz fallen lässt. Mit einem zweiten Filter (Analysator) kann nun die Polarisationsebene des austretenden Lichts ermittelt werden.

Die Drehung der Polarisationssebene  $\Delta\varphi$  ist dabei proportional zur durchlaufenen Länge  $l$  und, falls es sich um eine Lösung handelt, zur Konzentration  $c$  der optisch aktiven Substanz:

$$\Delta\varphi = \alpha \cdot l \cdot c \quad (\text{O43-4})$$

Wie die Brechzahl  $n$  ist auch der als optische Drehung bezeichnete Faktor  $\alpha$  frequenz- bzw. wellenlängenabhängig. Literaturwerte des spezifischen Drehwinkels einer optisch aktiven Substanz werden häufig für eine Wellenlänge von 589 nm (gelbe Natrium-D-Linie) angegeben, für andere Wellenlängen außerhalb des optischen Absorptionsbereichs gilt in guter Näherung:

$$\alpha(\lambda) = \alpha(589 \text{ nm}) \cdot \left( \frac{589 \text{ nm}}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{O43-5})$$

### 3D-Brille

Ein Verfahren zur Erzeugung eines 3D-Effekts bei der Wiedergabe von Stereo-Filmen besteht in der abwechselnden Projektion eines linken Bildes mit linkszirkular polarisiertem Licht und eines rechten Bildes mit rechtszirkular polarisiertem Licht. Die Leinwand muss polarisationserhaltend beschichtet sein, z. B. mit Silber.

Damit der Betrachter das linke Bild nur mit dem linken Auge und das rechte Bild nur mit dem rechten Auge sieht, verwendet man Brillen, die aus einer Kombination von einem  $\lambda/4$ -Plättchen und einem linearen Polarisationsfilter bestehen. Beide werden durch geeignete Kunststoffschichten realisiert.

Verständnisfrage: Was geschieht mit Licht einer für das  $\lambda/4$ -Plättchen „falschen“ Wellenlänge? Welche Konsequenz hat dies für das Betrachten von Stereo-Filmen?

### Versuchsaufbau

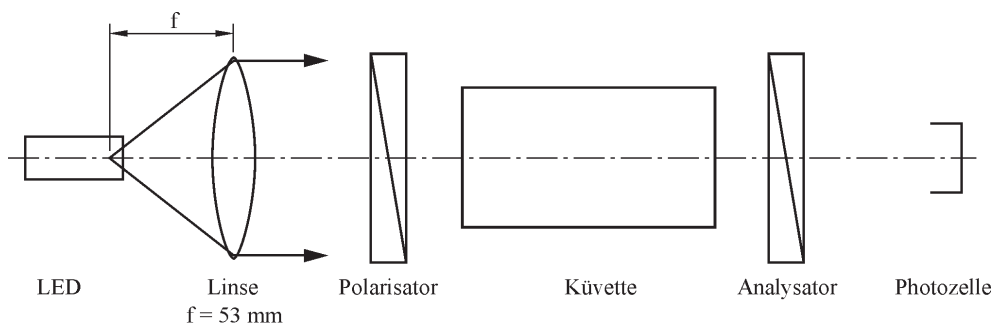


Abb. O43-2: Optische Anordnung zur Messung des Drehwinkels der Polarisationssebene.

## Messprogramm

### Drehwinkel einer optisch aktiven Substanz (Milchzucker / Lactose)

**Achtung:** Das Raumlicht muss ausgeschaltet sein! Die Tischlampen dürfen nicht auf den Detektor leuchten!

1. Bestimmen Sie das „spezifische Drehvermögen“ von Milchzucker für rotes und grünes Licht. Messen Sie hierfür die Intensitätskurve für linear polarisiertes Licht der beiden LEDs von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  in  $10^\circ$ -Schritten. Fertigen Sie für jede LED ein Diagramm auf Polarkoordinatenpapier an, das jeweils eine Intensitätskurve ohne Milchzuckerlösung und eine mit dieser enthält. Fertigen Sie zudem ein lineares Diagramm  $I(\varphi)$  aller Messdaten an und entnehmen Sie diesem die Drehwinkel  $\Delta\varphi$  mit Vorzeichen für rotes und grünes Licht.  
**Nur Physiker:** Passen Sie an die Messdaten eine Funktion an und entnehmen Sie dieser den Drehwinkel. Alle anderen Studiengänge dürfen den Drehwinkel auch mithilfe einer anderen Methode aus dem Diagramm extrahieren.
2. Entnehmen Sie der Abb.O43-3 die Wellenlänge des Emissionsmaximums der LEDs und überprüfen Sie, ob Ihre Messergebnisse der theoretischen Erwartung nach Gleichung O43-5 entsprechen. Fehlerabschätzung!

### Untersuchung einer 3D-Brille

1. Überlegen Sie sich eine Methode, mit der Sie den Aufbau einer 3D-Brille bestimmen können und führen Sie diese aus. Welche Polarisation erzeugt das enthaltene Polarisationsfilter? Erklären Sie Ihre Beobachtungen und erläutern Sie Ihre Schlussfolgerungen!
2. Erzeugen Sie mithilfe der Brille in der Schiebvorrichtung abwechselnd ein links- und rechtszirkular polarisiertes Lichtbündel, das auf einen metallischen Schirm fällt. Demonstrieren Sie mit der zweiten Brille, dass dieses nur „auf einem Auge“ sichtbar ist. Verwenden Sie bei der Beschreibung Ihrer Beobachtungen die Zuordnung „linkes“ und „rechtes“ Glas so wie Sie es als Brillenträger tun würden.
3. Drehen Sie in dieser Anordnung die Beobachterbrille von horizontal zu vertikal und achten Sie auf Unterschiede bei Verwendung der roten und grünen LED - wie können diese erklärt werden?
4. Wiederholen Sie Punkt 2) unter Verwendung der weißen Schirmfläche.
5. Messen Sie mithilfe des Analysators die Intensitätskurve des links- oder des rechtszirkular polarisierten Lichtbündels für rotes und grünes Licht jeweils von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  in  $10^\circ$ -Schritten. Stellen Sie die Messwerte auf Polarkoordinatenpapier dar und diskutieren Sie das Ergebnis, besonders in Bezug auf die in Schritt 3) gewonnene Erkenntnis.



Beschreiben Sie im Protokoll die Ergebnisse Ihrer Untersuchungen und die Funktionsweise der verwendeten 3D-Brille.

### Hinweise

- Um die Intensitätskurve zu messen, bauen Sie den Aufbau gemäß Abb. O43-2 auf. Justieren Sie zuerst den Strahlengang für die grüne LED so, dass zwischen den Polarisatoren ausreichend Platz für die Küvette mit Milchzucker bleibt und bei parallel ausgerichteten Polarisatoren ein Maximum des Fotostroms erreicht wird. Stellen Sie nun durch Aufweiten des Lichtbündels einen Fotostrom von max.  $100 \mu\text{A}$  ein. Die Anordnung der optischen Elemente darf nun nicht mehr verändert werden! Nach der Messung und Einbau der Küvette muss die Ausleuchtung wiederum auf einen Maximalwert von  $100 \mu\text{A}$  Fotostrom justiert werden.

- Das „spezifische Drehvermögen“ erhält man mithilfe von

$$\alpha = \frac{\Delta\varphi}{l \cdot c} \text{ in } \frac{\circ \cdot \text{mL}}{\text{dm} \cdot \text{g}}. \quad (\text{O43-6})$$

Die Länge der Küvette beträgt  $l = 14,7 \text{ cm}$ , die Konzentration der Milchzuckerlösung  $c = 200 \text{ g/L}$ . Tabellenwerte des spezifischen Drehvermögens werden meist auf  $1 \text{ dm} = 10 \text{ cm}$  bezogen.

- Zur Messung der Lichtintensität wird der Kurzschlussstrom der Photozelle mit einem Multimeter gemessen. Dieser ist proportional zur einfallenden Lichtintensität  $I$  gemäß Gleichung O43-2, sofern die Stromstärke  $100 \mu\text{A}$  nicht überschreitet. Ggf. Justage anpassen! Stellen Sie das Multimeter hierzu auf **DCA**.
- Achten Sie darauf, die Reiter auf der optischen Bank so zu platzieren, dass die Ablesemarken sich jeweils auf der gleichen Seite befinden.

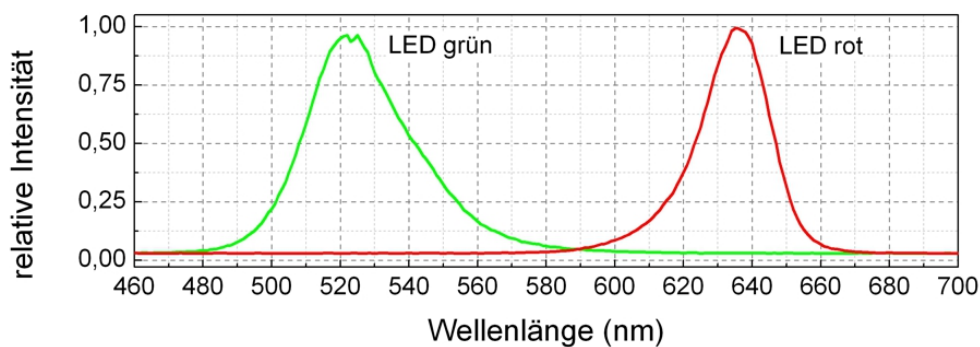


Abb. O43-3: Emissionspektren der LEDs