

OP Einführung in die Optik

Als Optik im engeren Sinne wird die Lehre vom Licht bezeichnet, wobei hier insbesondere derjenige Teil, der mit dem menschlichen Auge wahrgenommen werden kann, betrachtet werden soll.

Die Optik wird nach Entstehung des Lichtes und nach Beschreibung seiner Ausbreitung sowie nach den verschiedenen Nachweismethoden in verschiedene Gebiete gegliedert:

Geometrische Optik - Klassische Optik I

Sie beschreibt die Lichtausbreitung durch geradlinige Strahlen. Grundlegende Erscheinungen, die hiermit erläutert werden können, sind Reflexion und Brechung. Die zugehörigen Gesetze sind die Grundlage zur Berechnung und Entwicklung der meisten optischen Geräte (z.B. Mikroskop, Fernrohr, ...).

Wellenoptik - Klassische Optik II

Sie beschreibt die Lichtausbreitung durch (elektromagnetische) Wellen, siehe Abbildung OP.1, mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit), der Wellenlänge λ und der Frequenz f . Diese hängen über die folgende Beziehung zusammen:

$$c = \lambda f \quad (\text{OP.1})$$

Die Lichtgeschwindigkeit ist im Vakuum maximal und beträgt $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Vorgänge wie Beugung, Interferenz und Polarisation des Lichtes sowie das Auflösungsvermögen optischer Geräte können durch die Wellenoptik erklärt werden.

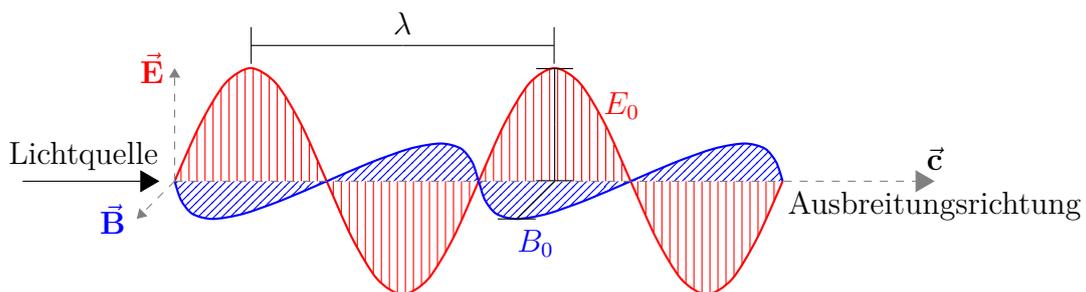


Abbildung OP.1: Eine elektromagnetische Welle mit Wellenlänge λ . Elektrisches Feld mit Amplitude (max. Auslenkung) E_0 und magnetisches Feld mit Amplitude B_0 schwingen orthogonal zueinander.

Zusammenfassung wichtiger Begriffe aus der Optik

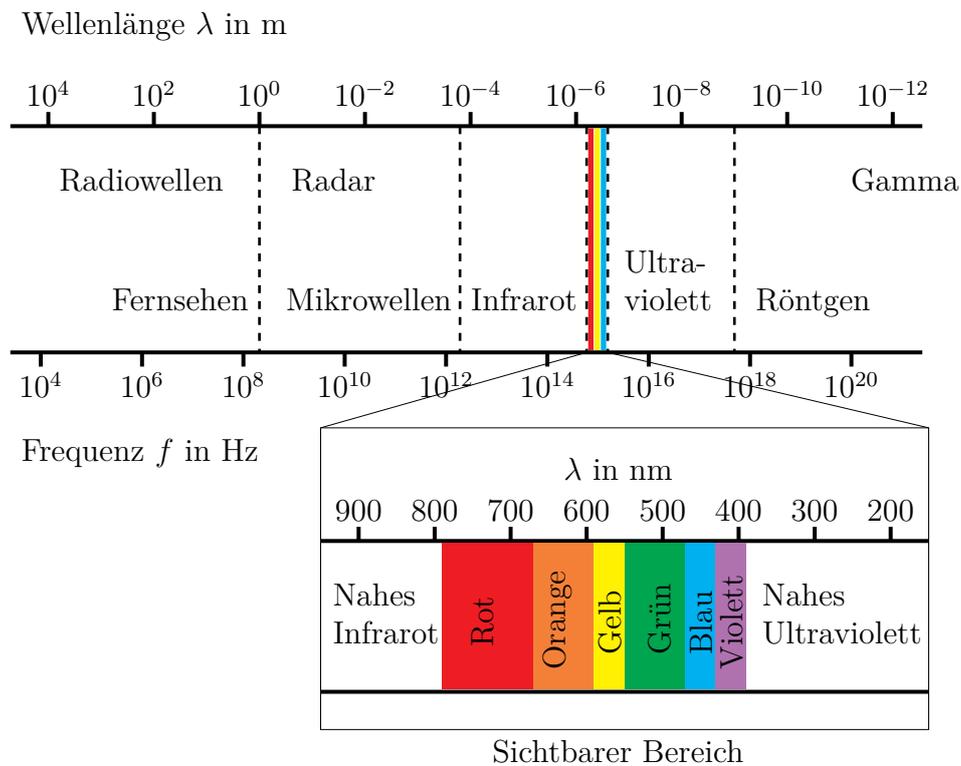


Abbildung OP.2: Elektromagnetisches Spektrum

Licht

Als Licht bezeichnet man den sichtbaren Bereich des Spektrums elektromagnetischer Wellen mit Wellenlängen zwischen etwa 700 nm (rot) und 400 nm (violett), wie in Abbildung OP.2 dargestellt. Licht entsteht beim Übergang angeregter Zustände der Elektronenhülle von Atomen, Molekülen oder Festkörpern in energetisch tiefer liegende Zustände oder den Grundzustand.

Spektrum

Als Spektrum bezeichnet man die Zusammensetzung des Lichts nach Intensität und Wellenlänge bzw. Frequenz. Freie Atome (z.B. in Gasen) emittieren eine relativ geringe Anzahl ganz bestimmter Frequenzen (Linien, Linienspektrum). Bei Molekülen ist die Zahl der Linien wesentlich größer. Bei Festkörpern können die Linien so dicht liegen, dass sich ein quasi-kontinuierliches Spektrum ergibt.

Spektroskopie Für die emittierenden oder absorbierenden Systeme (z.B. Moleküle) sind die Spektren charakteristisch (wie ein „Fingerabdruck“). Die Untersuchung ihrer Spektren liefert Informationen über deren Aufbau und Struktur und wird als Spektroskopie bezeichnet. Die optische Spektroskopie ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Identifizierung von Substanzen (Spektralanalyse).

Das Huygens'sche Prinzip Das Huygens'sche Prinzip besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer Elementarwelle betrachtet werden kann. Das heißt, dass jede Wellenfront aus einer Überlagerung von Elementarwellen entsteht (siehe Abbildung OP.3).

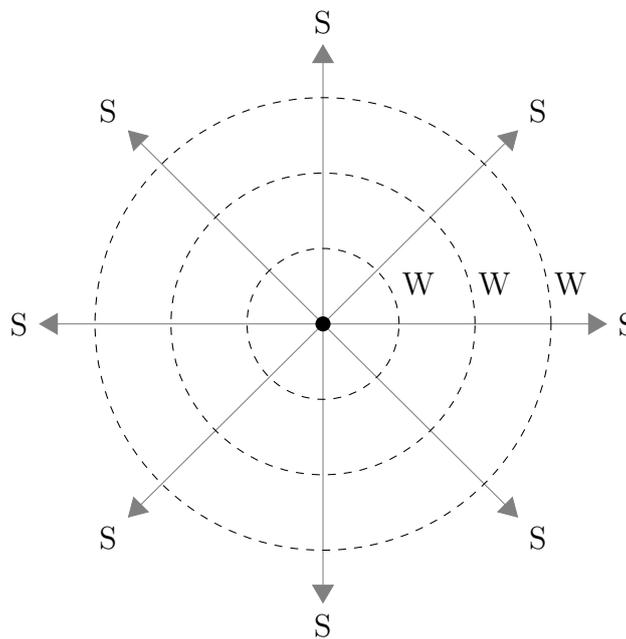


Abbildung OP.3: **Elementarwelle**: Eine punktförmige Lichtquelle emittiert Licht in alle Richtungen (entlang der Strahlen S). Die Wellenfronten W kennzeichnen die Linien entlang derer die Amplitude konstant ist. Die Wellenfronten stehen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

Reflexion Trifft ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche, so wird ein Teil der Intensität an der Grenzfläche reflektiert. Eine genauere Beschreibung findet sich in Abbildung OP.4. Nach dem Reflexionsgesetz ist

$$\text{Einfallswinkel} = \text{Ausfallswinkel.}$$

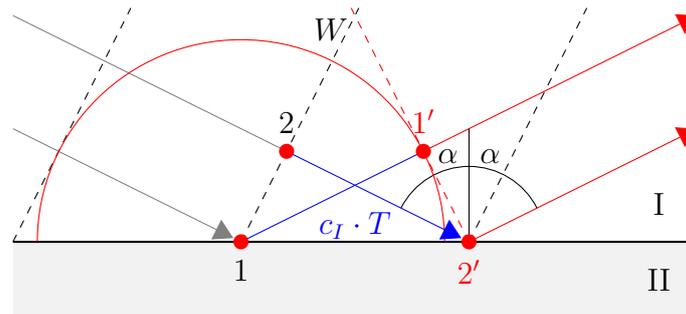


Abbildung OP.4: **Reflexion:** Ebene Wellenfronten (schwarze gestrichelte Linien) treffen im Winkel α auf die Grenzschicht zwischen den Medien I und II. Zum Zeitpunkt $t = 0$ erreicht die Wellenfront W den Punkt 1 auf der Grenzschicht. In diesem Punkt entstehen Elementarwellen, die sich im Medium I mit der Geschwindigkeit c_I ausbreiten. Eine Periode $t = T$ später ist die gleiche Wellenfront W vom Punkt 2 im Punkt 2' angekommen. Zu diesem Zeitpunkt entspricht der Radius der Elementarwelle in Punkt 1 genau der Wellenlänge des Lichts im ersten Medium $\lambda_I = c_I \cdot T$. Es gilt für die Strecken $\overline{11'} = \overline{22'} = c_I \cdot T$. Die sich hieraus ergebende reflektierte Wellenfront (rote gestrichelte Linie) bildet mit der einfallenden Wellenfront ein gleichschenkliges Dreieck und es folgt das Reflexionsgesetz.

Brechung

Die Lichtgeschwindigkeit c ist abhängig vom Medium. Beim Übergang des Lichtstrahls von einem Medium in ein anderes führt dies zur Richtungsänderung eines schräg einfallenden Strahls. Sie wird als Brechung bezeichnet. In Abbildung OP.5 ist dies genauer erläutert. Die Frequenz $f = 1/T$ ist unabhängig vom Medium. Aus Gleichung OP.1 folgt damit, dass die Wellenlänge $\lambda = c \cdot T$ vom Medium abhängt.

Brechungsindex n

Der Brechungsindex (Brechzahl) n eines Mediums ist (bei konstanter Frequenz f) gegeben durch das Verhältnis

$$n_{\text{Medium}} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_{\text{Medium}}} = \frac{\text{Lichtgeschw. im Vakuum}}{\text{Lichtgeschw. im Medium}} = \frac{\lambda_{\text{Vakuum}}}{\lambda_{\text{Medium}}}. \quad (\text{OP.2})$$

Folglich ist er eine dimensionslose Größe und ermöglicht eine Aussage darüber, wie sich die Lichtgeschwindigkeit beim Übergang vom Vakuum in ein anderes Medium verändert oder wie stark das Licht gebrochen wird. Da die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum am größten ist, gilt stets: $n_{\text{Medium}} \geq 1$.

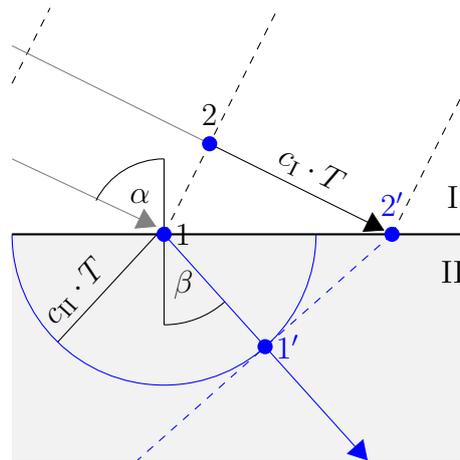


Abbildung OP.5: **Brechung:** Ebene Wellenfronten (schwarze gestrichelte Linien) treffen im Winkel α auf die Grenzschicht zwischen den Medien I und II. Zum Zeitpunkt $t = 0$ erreicht eine Wellenfront den Punkt 1 auf der Grenzschicht. In diesem Punkt entstehen Elementarwellen, die sich im Medium II mit der Geschwindigkeit c_{II} ausbreiten. Eine Periode $t = T$ später ist die gleiche Wellenfront im Punkt 2' angekommen. Zu diesem Zeitpunkt entspricht der Radius der Elementarwelle in Punkt 1 genau der Wellenlänge des Lichts im zweiten Medium $\lambda_{II} = c_{II} \cdot T$. Die hieraus entstehende Wellenfront (blaue gestrichelte Linie) dringt im Winkel β in das Medium ein.

Das Brechungsgesetz

Aus Abbildung OP.5 lässt sich durch geometrische Überlegungen das Brechungsgesetz ableiten

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_{II}}{n_I}. \quad (\text{OP.3})$$

Hier bezeichnet n_{II} den Brechungsindex vom Medium II und n_I den vom Medium I (vgl. Abbildung OP.5).

Dispersion

Man kann beobachten, dass Licht unterschiedlicher Wellenlänge beim Übergang in ein anderes Medium unterschiedlich stark gebrochen wird. Diese Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex wird als Dispersion bezeichnet. Zum Beispiel besitzt Wasser für die Wellenlänge $\lambda = 700 \text{ nm}$ (rot) den Brechungsindex $n \approx 1,33$ und für die Wellenlänge 400 nm (violett) den Brechungsindex $n \approx 1,34$. Violette Licht wird also stärker als rotes Licht gebrochen.

Beugung Als Beugung wird die Ablenkung von Licht (i.A. von Wellen) an einem Hindernis bezeichnet. Beugung ist der Grund dafür, dass Lichtintensität auch in geometrischen Schattenbereichen, d.h. an Orten, die auf geradem Wege für das Licht nicht zu erreichen wären, beobachtet werden kann.

Interferenz Treffen mindestens zwei Wellen aufeinander, so überlagern sich ihre Amplituden.

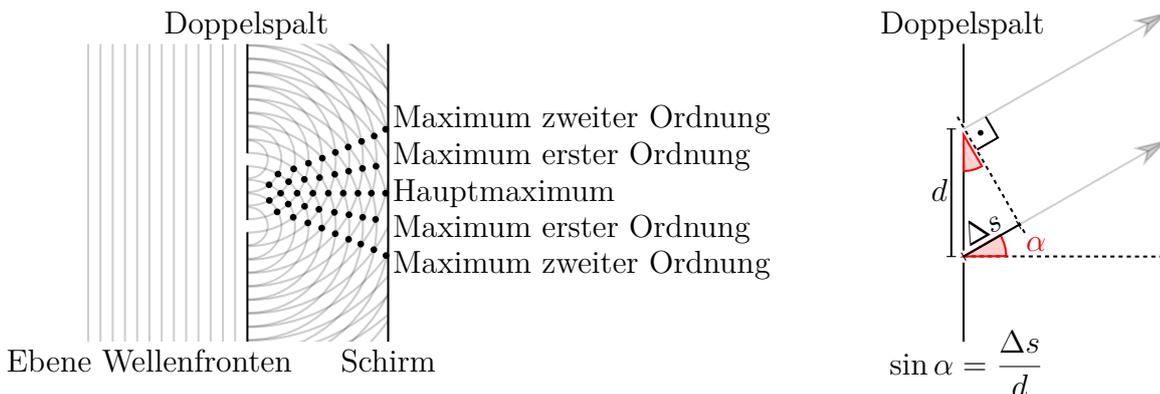


Abbildung OP.6: **Interferenz am Doppelspalt:** LINKS: Ebene Wellenfronten treffen auf einen Doppelspalt. Hinter dem Doppelspalt überlagern sich die von den Spalten ausgehenden Elementarwellen. Die schwarzen Punkte stellen die Orte konstruktiver Interferenz dar. Am Schirm ist das Interferenzbild beobachtbar. RECHTS: Von einem Doppelspalt mit dem Spaltabstand d gehen zwei Lichtstrahlen der gleichen Wellenlänge aus.

Zur Veranschaulichung betrachte man die Interferenz an einem Doppelspalt (Abbildung OP.6): Der Doppelspalt werde von monochromatischem Licht fester Phase der Wellenlänge λ beleuchtet. Hinter dem Doppelspalt breitet sich das Licht von jedem der Spalte in alle Raumrichtungen aus, wobei sich die Intensitätsverteilung auf einem Schirm durch die Interferenz der einzelnen Strahlen ergibt. Für eine Beobachtungsebene im Unendlichen ist die resultierende Helligkeit an einem betrachteten Punkt von der Phasenlage der einzelnen Wellenzüge zueinander abhängig. Sind die Wellenzüge von den Spalten um ein ganzzahliges Vielfaches ($N = 0, 1, 2, \dots$) der Wellenlänge gegeneinander verschoben, so kommt es zur **konstruktiven Interferenz**. Sind die Wellenzüge um ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge verschoben, so löschen sie sich gegenseitig aus (**destruktive Interferenz**). Die Wegdifferenz benachbarter Wellenzüge wird als Gangunterschied Δs bezeichnet. Ist d der Abstand zwischen den Spalten, so ergeben sich Interferenzmaxima, wenn der Gangunterschied der Helligkeitsbedingung $\Delta s = N \cdot \lambda$ genügt:

$$\Delta s = d \cdot \sin \alpha \quad \Rightarrow \quad d \cdot \sin \alpha = N \lambda. \quad (\text{OP.4})$$

**longitudinale
und
transversale
Wellen**

Bei longitudinalen Wellen haben Auslenkung und Ausbreitung der Welle die gleiche Richtung (Abbildung OP.7). Das Standardbeispiel dafür ist Schall in Gasen. Die Gasmoleküle geraten in Schwingung und erzeugen so Bereiche hoher und kleiner Dichte, die sich in Schwingungsrichtung durch den Raum ausbreiten.

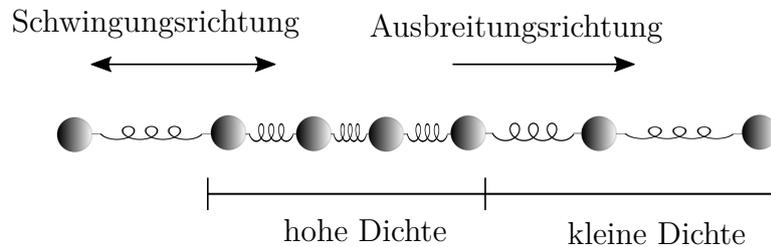


Abbildung OP.7: Das Beispiel zeigt eine Kette von Teilchen, die entlang der Ausbreitungsrichtung schwingt. Ein Bereich hoher Dichte breitet sich in Schwingungsrichtung durch den Raum aus.

Durch longitudinale Wellen wird nur eine Raumrichtung, nämlich die Ausbreitungsrichtung, ausgezeichnet.

Bei transversalen Wellen stehen Auslenkung und Ausbreitungsrichtung senkrecht aufeinander. Durch beide Richtungen wird eine Ebene ausgezeichnet, die als Schwingungsebene der Welle bezeichnet wird (Abbildung OP.8). Elektromagnetische Wellen sind transversale Wellen.

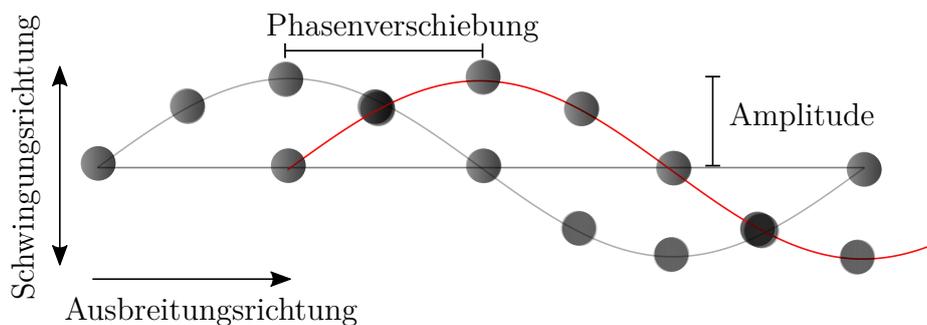


Abbildung OP.8: Die Abbildung zeigt Teilchen, die in vertikale Richtung schwingen. Ein Bereich gleicher Amplitude breitet sich in horizontaler Richtung durch den Raum aus. Ausbreitungsrichtung und die dazu senkrechte Schwingungsrichtung spannen zusammen die Schwingungsebene auf. Es sind zwei Transversalwellen gezeigt (grau und rot). Die Schwingung entlang der roten Linie kann entweder als die grau gezeichnete Welle zu einer späteren Zeit oder als eine Welle zur gleichen Zeit, die zur grauen Welle phasenverschoben ist, gesehen werden.

Polarisation Polarisation tritt nur bei Transversalwellen auf, z.B. bei Licht. Bei Licht bezeichnet man Richtung und Größe des E-Feldes als Schwingungsrichtung (siehe Abbildung OP.1). Im Allgemeinen setzt sich Licht aus einer Vielzahl von elementaren Wellenzügen zusammen, deren einzelne Schwingungsebenen zufällige Richtungen besitzen. Gibt es jedoch eine bevorzugte Richtung, so spricht man von einer polarisierten Welle. Die bevorzugte Ebene heißt Polarisationsebene, die bevorzugte Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung Polarisationsrichtung. In Abbildung OP.8 sind

Papierebene \rightarrow Polarisationsebene
Schwingungsrichtung \rightarrow Polarisationsrichtung

für eine Transversalwelle dargestellt.

Polarisationsgrad Den Grad der Ausrichtung einer Welle bezeichnet man als Polarisationsgrad. Haben anschaulich gesprochen z.B. von 100 Wellenzügen 60 die gleiche Schwingungsebene, und sind die anderen 40 zufällig verteilt, so spricht man von einem Polarisationsgrad von 60 %.

elliptische Polarisation Überlagern sich zwei (oder mehrere) elementare Wellenzüge mit verschiedenen Schwingungsebenen, so überlagern sich ihre Auslenkungen, bei Licht also ihre E-Felder, die vektoriell zu addieren sind. Im Allgemeinen können sowohl Phasenlagen, als auch die Amplituden verschieden sein, wodurch sich sowohl die Raumrichtung als auch die Größe des resultierenden E-Feldvektors \vec{E}_{res} periodisch ändern. Das Resultat sind elliptisch polarisierte Wellen Abbildung OP.9.

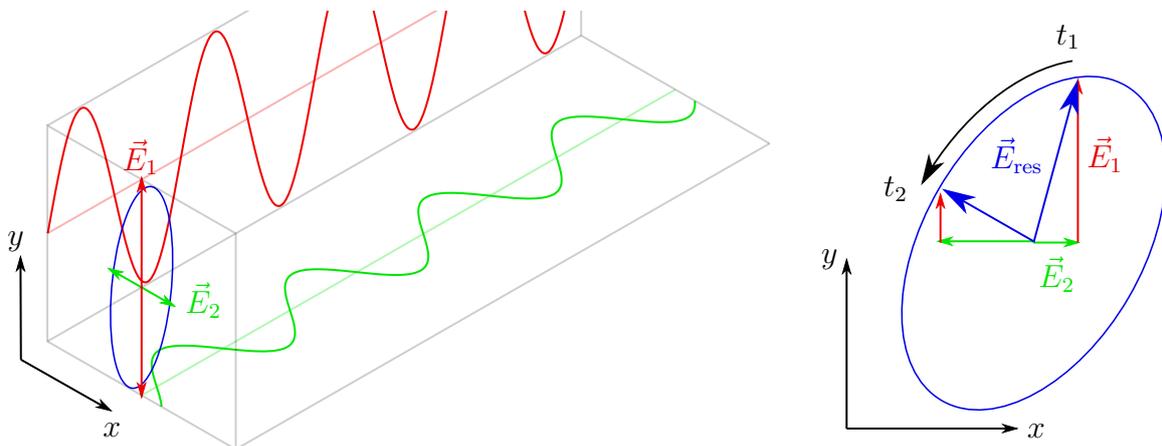


Abbildung OP.9: In der Abbildung ist die Überlagerung zweier Transversalwellen \vec{E}_1 und \vec{E}_2 dargestellt. Da die Wellen unterschiedliche Amplituden besitzen, wandert der Feldvektor des resultierenden E-Feldes $\vec{E}_{\text{res}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ entlang einer elliptischen Bahn (blaue Kurve). Dies ist rechts in der Abbildung für zwei verschiedene Zeiten t_1 und t_2 veranschaulicht.

**zirkulare
und
lineare
Polarisation**

Besitzen die sich überlagernden Wellen gleiche Amplituden und schwingen sie senkrecht zueinander, so kann es je nach Phasenlage zu speziellen Formen der Polarisation kommen.

Wenn sie gerade um ein Viertel einer Wellenlänge gegeneinander verschoben sind (Phasenverschiebung $\pi/2$), so bleibt die Größe des resultierenden E-Feldes zwar immer gleich, aber die Richtung kreist gleichförmig um die Ausbreitungsrichtung (Abbildung OP.10). Man erhält eine zirkular polarisierte Welle. Je nach Drehsinn der Kreisbewegung spricht man von positiver oder negativer Helizität.

Sind beide Wellenzüge gleichphasig (Phasendifferenz 0) oder genau gegenphasig (Phasendifferenz $\pi = 180^\circ$), so ist der resultierende E-Feldvektor räumlich fest in der Mittellage zwischen \vec{E}_1 und \vec{E}_2 ausgerichtet. Eine Welle mit einer feststehenden Polarisationsebene bezeichnet man als linear polarisiert. Das Ergebnis ist also eine linear polarisierte Welle (Abbildung OP.10).

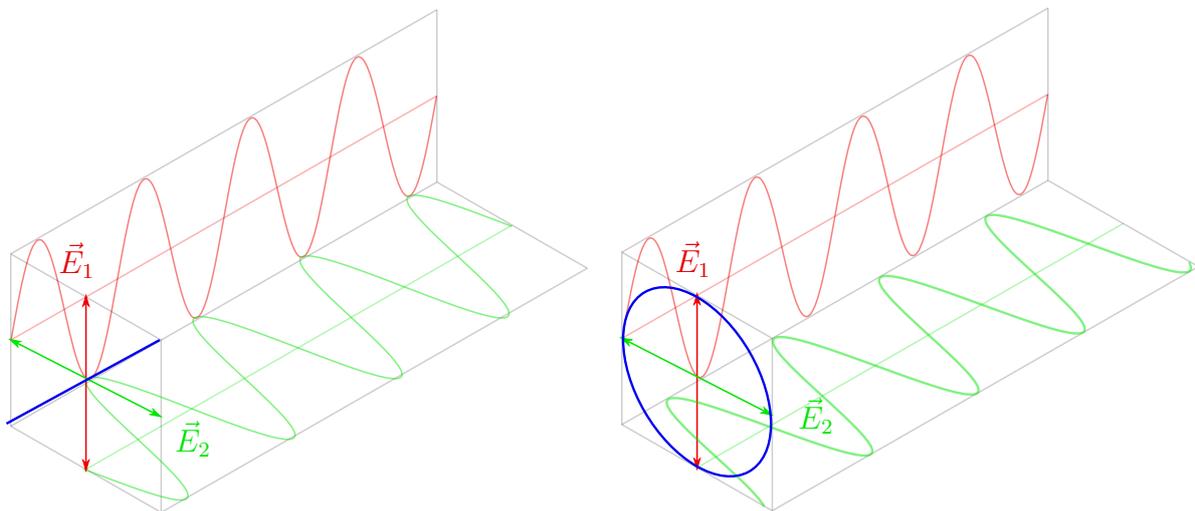


Abbildung OP.10: Gezeigt sind die Schwingungen der E-Felder \vec{E}_1 und \vec{E}_2 zweier Lichtwellen gleicher Amplitude, die senkrecht zueinander schwingen. Links schwingen die Wellen gleichphasig. Daher ist die resultierende Welle linear polarisiert und schwingt fest entlang der blauen Linie. Rechts sind die Wellen um 90° phasenverschoben. Die resultierende Welle ist zirkular polarisiert, d.h. die Schwingungsrichtung des resultierenden E-Feldes wandert entlang des blauen Kreises.

**Isotropie,
Anisotropie**

Ein Medium heißt isotrop, wenn in ihm keine Raumrichtung in besonderer Weise ausgezeichnet ist. Anisotrope Stoffe dagegen besitzen, bedingt durch ihre Struktur, in verschiedenen Raumrichtungen unterschiedliche Eigenschaften, was bei optischen Erscheinungen z.B. zu Doppelbrechung und Dichroismus führt.

Doppelbrechung und Spannungsoptik

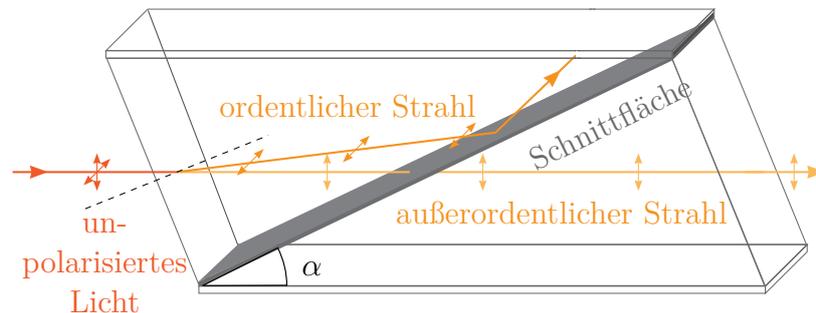


Abbildung OP.11: **Strahlengang durch ein Nicolsches Prisma:** Ein Lichtbündel, das zu gleichen Anteilen aus zueinander senkrecht linear polarisiertem Licht besteht, tritt durch ein Nicolsches Prisma. Dabei werden die zwei unterschiedlich polarisierten Komponenten durch das Nicolsche Prisma unterschiedlich stark gebrochen (ordentlicher und außerordentlicher Strahl). Der Winkel α an der Schnittfläche ist so gewählt, dass der ordentliche Strahl total reflektiert wird, während der außerordentliche Strahl die gegenüberliegende Stirnfläche erreicht.

Bei anisotropen Kristallen kann die Lichtgeschwindigkeit, d.h. der Brechungsindex, von der Ausbreitungsrichtung und der Polarisationsrichtung des Lichtes abhängig sein. In diesem Fall spricht man von doppelbrechenden Kristallen oder natürlicher Doppelbrechung (Beispiel Kalkspat). Das führt dazu, dass einfallende Lichtstrahlen an der Stirnfläche des Kristalls je nach Schwingungsrichtung unterschiedlich stark gebrochen und so in zwei Teilbündel aufgespalten werden, die senkrecht zueinander linear polarisiert sind. Diesen Effekt nutzt man zur Erzeugung polarisierten Lichtes beim Nicolschen Prisma aus. Die beiden Teilbündel werden an einer geeignet geneigten Grenzfläche im Prisma dadurch getrennt, dass das eine Bündel gerade noch (unter Brechung) die Fläche durchsetzt, während das andere auf Grund des flacheren Einfallswinkels durch Totalreflexion in eine andere Richtung abgelenkt wird (Abbildung OP.11).

In Substanzen mit langen Molekülketten, wie z.B. Plastikmaterial, kann eine Anisotropie, und damit eine Doppelbrechung, durch mechanische Spannungen verursacht werden (Spannungsdoppelbrechung). Die dadurch hervorgerufenen Polarisationserscheinungen können zur Untersuchung von mechanischen Spannungszuständen herangezogen werden (Spannungsoptik).

Dichroismus

Ein optisch durchsichtiges Medium, das aber Licht eines bestimmten Wellenlängenbereichs absorbiert, erscheint aus diesem Grund bei Betrachtung in weißem Licht farbig. Bei farbigen, optisch doppelbrechenden Kristallen ist die Lage des Absorptionsbereiches (Absorptionswellenlängen) von der Ausbreitungsrichtung im Kristall und der Schwingungsebene des Lichtes abhängig. Man bezeichnet dieses Verhalten als Dichroismus.

Dichroitische Kristalle sind zur Erzeugung polarisierten Lichtes im Sichtbaren geeignet, wenn ihre Absorptionswellenlängen für die eine Polarisations ebene bevorzugt im sichtbaren und für die dazu senkrechte Polarisations ebene bevorzugt in den nicht sichtbaren Bereichen des optischen Spektrums liegen (ultraviolett, infrarot). Auf diesem Prinzip beruht die Wirkung von Polarisationsfolien (Polaroidfilter). Kleine, dichroitische Kristalle werden in eine Kunststoffolie eingebettet und durch mechanisches Recken in eine Vorzugsrichtung gebracht. Durch die Vorzugsrichtung erhält man eine gemeinsame Polarisations ebene für das von den einzelnen Kristalliten erzeugte polarisierte Licht.

Optische Aktivität

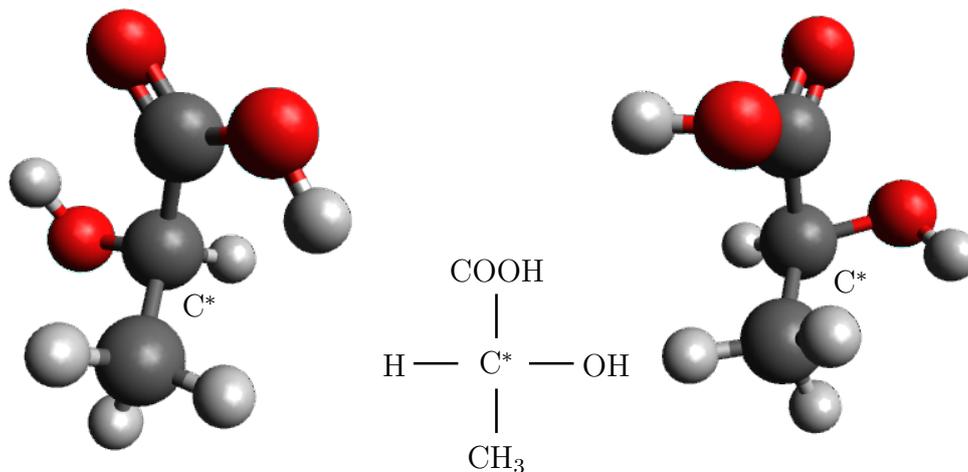


Abbildung OP.12: **Das Milchsäuremolekül $C_3H_6O_3$** : Die schwarzen Kugeln stellen Kohlenstoff dar, die roten Sauerstoff und die weißen Kugeln Wasserstoff. Es sind die zwei Spiegelbildisomere der Milchsäure gezeigt. Das asymmetrische Kohlenstoffatom ist mit C^* gekennzeichnet.

Bestimmte Substanzen sind in der Lage, die Schwingungsebene linear polarisierten Lichtes zu drehen. Man bezeichnet dieses Verhalten als optische Aktivität. Bei der Kennzeichnung von Substanzen unterscheidet man zwischen dem Drehsinn und der Konfiguration des Moleküls. Der Drehsinn wird positiv (+) genannt, wenn er bei Beobachtung gegen die Richtung des Lichtes im Uhrzeigersinn (rechtsherum) erfolgt. Mit dem Vorsatz D und L werden die spiegelsymmetrischen, räumlichen Anordnungen der Moleküle bezeichnet. Die Drehung der Polarisations ebene kann durch zirkulare Doppelbrechung erklärt werden. Das linear polarisierte Licht wird in eine rechts- und eine linkslaufende zirkulare Komponente zerlegt, wobei sich aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten beider Komponenten eine Phasenverschiebung ergibt, die bei der (Rück-) Überlagerung der Komponenten zu einer Drehung der Polarisations ebene führt. Optische Aktivität wird bei bestimmten Kristallen (z.B. Quarz) und Lösungen bestimmter Ver-

bindungen beobachtet. Insbesondere sind alle Lösungen organischer Verbindungen optisch aktiv, die ein sogenanntes asymmetrisches C-Atom (mit * in Abbildung OP.12 markiert) besitzen, d.h. an dessen vier Bindungsarmen vier unterschiedliche Liganden gebunden sind. In diesem Fall sind zwei verschiedene räumliche Anordnungen des Moleküls möglich, die spiegelsymmetrisch zueinander sind und sich nicht durch räumliche Transformationen zur Deckung bringen lassen. Man spricht von Spiegelbildisomerie und nennt die beiden Isomere Antipoden. Eine optisch aktive Verbindung ist die Milchsäure, welche als Endprodukt bei der anaeroben Verbrennung des Adenosintriphosphates (ATP) im Muskel entsteht und in erhöhter Konzentration Muskelkater hervorruft. Abbildung OP.12 zeigt die zwei Antipoden der Milchsäure.

Weitere Beispiele optisch aktiver Verbindungen sind die Zucker, einige Verbindungen des Zitronensäurezyklus und viele Enzyme. Ein Gemisch beider Antipoden, das nach außen keine optische Aktivität zeigt, wird als Razemat bezeichnet.

Polarisationsmikroskopie

In der Kristallografie, Biologie und Medizin sind häufig Objekte zu untersuchen, deren Strukturen sich nur durch Unterschiede im Brechungsindex auszeichnen, nicht aber durch unterschiedliches Absorptionsverhalten (Farbe, Helligkeit). Bei Betrachtung in normalem Licht sind diese Objekte gleichmäßig durchlässig und Strukturen damit nicht erkennbar. Oft haben die Proben jedoch anisotropen Charakter, so dass viele Kristalle, Muskelzellen und kleine, vielzellige Organismen doppelbrechend sind. Beleuchtet man derartige Objekte mit linear polarisiertem Licht und bringt vor das Okular einen Analysator, so ergeben sich aufgrund der Anisotropien deutliche Intensitäts- und Farbkontraste ähnlich wie bei der Spannungsoptik.