

<http://maren.desy.de/hex/holm>

Experimentalphysik I/II für Studierende der Biochemie/Molekularbiologie, Biologie und Zahnmedizin

Transparente zur Vorlesung

WS 2005/06, U. Holm

Einleitung	Elektrizität und Magnetismus
Physikalische Größen und Einheiten	Optik
Mechanik	Atom- und Kernphysik
Wärmelehre	Steuerung und Regelung
Schwingungen und Wellen	

OPTIK

- Ist die Lehre vom **sichtbaren Licht** und den angrenzenden Wellenbereichen.
- Licht ist **elektromagnetische Strahlung**; Frequenz f , Wellenlänge λ ; $c = f \cdot \lambda$.
- Sichtbarer Wellenlängenbereich **400–800 nm** (im Vakuum oder Luft), Infrarot Bereich bis 10^{-4} m, Ultraviolett bis hin zu 10^{-8} m.
- Lichtgeschwindigkeit in Materie

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}},$$

im Vakuum ($\epsilon=\mu=1$): $c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

- Brechzahl ist definiert als Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu der im Medium: $n = c_0/c$ ($n \geq 1$).
- **Dispersion:**
 c und n sind abhängig von Wellenlänge:
 $c = c(\lambda), n = n(\lambda)$.
Im allgemeinen wird n mit wachsender Wellenlänge kleiner, d.h. $n_{\text{blau}} > n_{\text{rot}}$.
(Subjektiver) **Farbeindruck ist frequenzbedingt:**
Beim Übergang von Licht von einem Medium in ein anderes ändert sich die Wellenlänge, nicht aber die Frequenz des Lichts. Der Farbeindruck bleibt ebenso erhalten.

Dualismus der Lichtvorstellung:

Je nach Experiment zeigt Licht **Wellencharakter** (Interferenz, Beugung) oder **Teilchencharakter** (Photo-, Comptoneffekt).

Photonen haben Masse hf/c^2 , Energie hf und Impuls h/λ .

Umgekehrt haben **Korpuskeln** auch **Welleneigenschaften** (Elektroneninterferenzen, Elektronenmikroskop). Die de Broglie-Wellenlänge ist $\lambda = h/p$.

h ist das Plancksche Wirkungsquantum ($h = 6,62 \cdot 10^{-34} J s$).

Geometrische Optik (G.O.)

G.O.: Beschreibt das Verhalten von (näherungsweise) **Lichtstrahlen** (Lichtbündel kleiner Breite).

Herstellung von Lichtstrahlen (LS): mit Blenden, deren Durchmesser nicht zu klein sein dürfen (wg. Beugung).

In **G.O.** gibt es zwei Grundsätze:

1. Satz von der **Umkehrbarkeit des Lichtweges**.
2. Lichtstrahlen beliebiger Herkunft können einander **ohne Störung kreuzen**.

Schattenbildung:

Punktförmige Lichtquellen liefern **scharfe Schatten**bilder von Objekten.
Ausgedehnte LQ: Kernschatten, Halbschatten.
Anwendung: Röntgenbilder.

Reflexion:

Reflexion eines LS an ebener Trennfläche zweier Medien:
Teilweise Reflexion, **Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel** (gemessen vom Lot).
Anwendung: Zentralspiegel (“Katzenauge”), Messinstrumente mit Zeiger.
An unebener Oberfläche hat man **diffuse** Reflexion.

Brechung

LS fällt auf Grenzfläche zweier optisch verschieden dichter Medien. Ein Teil wird reflektiert (s.o.), ein Teil wird ins andere Medium hineingebrochen.
Einfallender Strahl, Lot, reflektierter Strahl und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.

Es gilt **Snelliussches Brechungsgesetz**

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

Beim Übergang vom optisch dünneren (n_1) ins dichtere Medium ($n_2 > n_1$) wird Strahl zum Lot hin gebrochen.

Totalreflexion:

Beim Übergang vom optisch dichteren (2) ins dünnere (1) Medium ($n_2 > n_1$) gibt es einen Grenzwinkel $\alpha_{2,tot}$ der Totalreflexion mit

$$\sin \alpha_{2,tot} = \frac{n_1}{n_2}.$$

(Ausfallswinkel α_1 ist dafür gerade 90°).

Für Winkel $\alpha_2 > \alpha_{2,tot}$ wird kein Licht mehr ins Medium 2 gebrochen, man hat Totalreflexion.

Wasser ($n = 1,33$)/Luft: $\alpha_{2,tot} = 48,6^\circ$,
Glas ($n = 1,55$)/Luft: $\alpha_{2,tot} = 40,5^\circ$.

Anwendungen:

1. Rechtwinklig gleichseitiges Prisma zur Bildumkehr,
2. Lichtleiter und Bildleiter aus flexiblen Kunststoff- oder Glasfasern für z.B. Endoskopie, Datenübermittlung.

Abbildung durch Reflexion:

Parabolspiegel (gekrümmter Spiegel mit Paraboloidform) bildet Gegenstand G mit Gegenstandsweite g (Abstand Gegenstand-Scheitelpunkt) ab auf Bild B mit Bildweite b (Abstand Bild-Scheitelpunkt).

Abbildungsgleichung:
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Brennweite f : Abstand Brennpunkt-Scheitelpunkt.

Die Abbildungsgleichung ist näherungsweise richtig für (meist gebräuchliche) **sphärische Spiegel** bei Beschränkung auf **achsennahe Strahlen**

Die Brennweite ist gleich dem halben Radius: $f = R/2$.

Zur (geometrischen) Bildkonstruktion gibt es **drei ausgezeichnete Strahlen**:

1. Strahl durch den Mittelpunkt der Kugel wird in sich reflektiert.
2. Strahl durch den Brennpunkt wird parallel zur Achse reflektiert.
3. Strahl parallel zur optischen Achse wird durch den Brennpunkt reflektiert.

Das **Größenverhältnis** von Bild und Gegenstand ist:

$$V = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}.$$

Je nach Lage des Gegenstandes kann das Bild
reell oder virtuell,
vergrößert oder verkleinert,
aufrecht oder umgekehrt sein.

Abbildung durch Brechung:

Planparallele Platte:

Bricht schräg einfallenden Strahl zweimal. Der ausfallende Strahl ist **parallelversetzt** zum einfallenden.

Prisma:

Bricht einfallenden Strahl ebenfalls zweimal. Gesamte **Ablenkung** ist für Blau größer als für Rot (Dispersion).

Dünne Linsen:

- Sphärische Linsen: von zwei Kugelflächen begrenzte Glaskörper.
- Sammellinsen in Mitte dicker als am Rand, bei Zerstreuungslinsen umgekehrt.
- Je nach Krümmung der Oberflächen in Bezug auf ein- oder ausfallenden Strahl: **konvexe** (zum einfallenden Strahl hin) bzw. **konkave** Oberflächen.
- Brennpunkte sind Punkte, durch die alle einfallenden achsenparallelen, achsen-nahen Strahlen gebrochen werden.
Brennweite f ist Abstand des Brennpunktes von Linsenmitte.
- Linke und rechte Brennweite einer (dünnen) Linse sind immer **identisch**, wenn vor und hinter der Linse dasselbe Medium (i.a. Luft).

- **Abbildungsgleichung** wie beim Hohlspiegel

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Gegenstandsweite g , Bildweite b , Brennweite f , alle vom Linsenmittelpunkt gemessen.

$D = 1/f$ ist sog. **Brechkraft** mit der Einheit 1 Dioptrie (dpt) = 1 m⁻¹.

- Abbildungsmaßstab β ist Verhältnis von Bildgröße B und Gegenstandsgröße G :

$$\beta = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}.$$

Es gibt wieder **drei ausgezeichnete Strahlen** zur **Bildkonstruktion**:

1. Vom Gegenstand ausgehende **achsenparallele Strahlen** werden von (dünner) Sammellinse **durch Brennpunkt** auf der anderen Seite gebrochen
2. Strahl **durch Mittelpunkt** der Linse geht **ungebrochen** hindurch.
3. Strahl **durch Brennpunkt** auf der Seite des Gegenstandes wird von Linse so gebrochen, dass er **achsenparallel** weiterläuft. Der Schnittpunkt der drei Strahlen (zwei genügen auch) ist Bildpunkt.

Zerstreuungslinsen:

Es gilt dieselbe Abbildungsgleichung wie für Sammellinsen, nur ist die **Brennweite f negativ**.

Die Bildweiten sind auch immer negativ, d.h. das **Bild ist auf der selben Seite wie der Gegenstand** $\Rightarrow$

Das Bild ist **virtuell**: es kann nicht auf einem Schirm sichtbar gemacht werden.

Die geometrische Konstruktion des Bildes erfolgt wieder über drei ausgezeichnete Strahlen: die zugehörigen **Brennpunkte sind hier seitenvertauscht**.

Dünne Linsen:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

$$r_1 = r_2 = r \text{ und } n = 1,5 \Rightarrow f = r.$$

Systeme aus dünnen Linsen mit geringen Abständen:

Brechkräfte werden addiert: $D = D_1 + D_2$.

Dicke Linsen:

Brenn-, Gegenstands- und Bildweiten werden von **Hauptebenen** aus gemessen.

(Einzelne) Kugelfläche:

Es gilt die **fundamentale Abbildungsgleichung**

$$\frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b} = (n_2 - n_1) \frac{1}{r}.$$

„Linke“ und „rechte“ Brennweite sind verschieden!

Einige Linsenfehler:

1. **Sphärische Aberration** zeigen sphärische (kugelförmige) Linsen: **Randstrahlen** werden **stärker gebrochen** als paraxiale Strahlen.
2. **Chromatische Aberration** wegen Dispersion: **Blau** wird **stärker gebrochen** als Rot.
3. **Astigmatismus**: in zwei senkrecht zueinander stehenden Ebenen **verschiedene Krümmungen** (z.B. beim Auge). Punkt wird dann als Stab abgebildet. Korrektur mit Zylinderlinsen.

Durch Linsensysteme können obige Fehler (teilweise) korrigiert werden.

Optische Instrumente

Auge

Vier brechende Medienübergänge:

- 1) Luft ($n=1$) / Hornhaut ($n=1,38$),
- 2) Hornhaut/Kammerwasser ($n=1,34$),
- 3) Kammerwasser/Linse ($n=1,36$),
- 4) Linse/Glaskörper ($n=1,34$).

Wesentliche Brechkraft nur durch den Übergang **Luft/Hornhaut** ($r=7,8\text{ mm}$)!

Die Bildweite des Auges ist konstant, der Gegenstand wird auf die **Retina** (Netzhaut) scharf abgebildet.

Akkommodation:

Abbildung **verschieden weit entfernt**er Gegenstände durch Variation der Brennweite. Ringmuskel zieht bei entspanntem (normalen) Auge Linse „flach“.

„Unendlich“ entfernte Gegenstände (parallel einfallende Lichtstrahlen) werden dann scharf abgebildet.

Brennweite auf Bildseite dann etwa gleich Glaskörperdurchmesser: $f_2 = 23 \text{ mm}$.

(Jugendliches) Auge kann noch Gegenstände im Abstand von $g = 8 \text{ cm}$ scharf abbilden. Brennweite ist dann $f_2 = 19 \text{ mm}$.

Retina („Bildschirm“):

Besteht aus lichtempfindlichen **Stäbchen** und **Zäpfchen**. **Stäbchen** sind **lichtempfindlicher**, **Zäpfchen** sind **farbempfindlich**.

Zäpfchen nur in Fovea (Netzhautgrube, einige mm^2 groß).

Durch **Abtasten** und **Nachleuchten** erscheint das gesamte Bild farbig.

Augenfehler

Kurzsichtigkeit: **Glaskörper** zu **lang**, bildseitiger Brennpunkt bei entspanntem Auge innerhalb des Glaskörpers.

Minimale Brechkraft zu groß, um (weit) entfernte Gegenstände scharf auf der Retina abbilden zu können.

Korrektur: **Zerstreuungslinse** als **Brille**.

Weitsichtigkeit: Bei Weitsichtigkeit ist der **Glaskörper zu kurz**, der Brennpunkt liegt hinter der Retina.

Brechkraft des entspannten Auges ist dann zu klein, um entfernte Gegenstände scharf abbilden zu können.

Auge verkleinert dann Radius der Linse, ist nicht mehr im entspannten Zustand.

Nachteilig bemerkbar macht sich der Fehler bei kleinen Gegenstandsweiten: die fehlende Brechkraft kann nicht mehr ausgeglichen werden, man braucht eine **Sammel-linse als Brille**.

Tauchen: Statt Luft/Hornhaut-Übergang **Wasser ($n=1,33$) / Hornhaut ($n=1,38$)-Übergang**; Brechkraft ist so klein, dass nicht mehr scharf gesehen werden kann. Taucherbrille mit Luft vor dem Auge schafft Abhilfe.

Spektrale Empfindlichkeit des Auges ist bei **555 nm** am größten.

Abbildungsmaßstab und Vergrößerung:

Abbildungsmaßstab eines abbildenden Systems $\beta=B/G$.

Etwas anderes ist die **Größe, unter der** einem Betrachter ein **Gegenstand erscheint**. Gleich große Bilder auf Netzhaut können von verschiedenen großen, verschieden weit entfernten Gegenständen erzeugt werden.

Alle Gegenstände, die unter dem **Schwinkel ε** (der Randstrahlen) gesehen werden, haben dieselbe scheinbare Größe.

Auflösungsvermögen oder Sehschärfe:

Fähigkeit, zwei **getrennte Punkte noch getrennt wahrzunehmen**. Das Auflösungsvermögen des Auges ist begrenzt durch die Struktur der Netzhaut:

Wenn zwei Gegenstandspunkte einander so nahe sind, dass ihre Bilder auf ein Zäpfchen fallen, kann das Auge sie nicht mehr getrennt wahrnehmen.

Minimaler Sehwinkel des Auges ist 1 Bogenminute (0,07 mm Abstand in **deutlicher Sehweite $s_0 = 25 \text{ cm}$**).

Optische Instrumente können **Sehwinkel vergrößern**.

Vergrößerung (für Gegenstände, die man vor das Auge halten könnte):

$$v = \frac{\text{Sehwinkel mit Instrument}}{\text{Sehwinkel ohne Instrument in } 25 \text{ cm Abstand}}.$$

Lupe:

Sammellinse kurzer Brennweite. Gegenstand im Brennpunkt (bzw. etwas innerhalb der Brennweite) $\Rightarrow b = \infty$, keine Abbildung.

Ein dicht vor die Lupe gehaltenes Auge sieht parallele Strahlen, es erzeugt im entspannten Zustand ein Bild auf der Netzhaut. Die Randstrahlen des Gegenstandes bilden (durch Lupe) den Sehwinkel ε mit $\tan \varepsilon \approx \varepsilon = G/f \Rightarrow$

$$v_{\text{Lupe}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{G}{f} : \frac{G}{s_0} = \frac{s_0}{f}.$$

Mikroskop:

Besteht aus **Objektiv** (Sammellinse kurzer Brennweite) und **Okular** (Lupe).

Der Gegenstand (Objekt) liegt etwas außerhalb der Brennweite des Objektivs $\Rightarrow$ vergrößertes reelles Zwischenbild.

Abbildungsmaßstab des Objektivs:

$$\beta = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \simeq \frac{t}{f_{\text{obj}}}$$

t : Tubuslänge

Bild im Brennpunkt des Okulars (Lupe) oder etwas innerhalb der Brennweite, so dass virtuelles Bild entsteht.

Vergrößerung des Okulars $v_{\text{oku}} = s_0 / f_{\text{oku}} \Rightarrow$

Gesamtvergrößerung

$$V_{\text{Mikroskop}} = \frac{t}{f_{\text{obj}}} \cdot \frac{s_0}{f_{\text{oku}}}$$

Zusätzliches „Huygens-Okular“ vor Okular:

größeres Gesichtsfeld sowie Korrekturen von sphärischer und chromatischer Aberration.

Immersionsobjektiv (optisches Öl zwischen Deckglas und Objektiv mit Brechungsindex ähnlich dem des Glases) vergrößert **numerische Apertur** $n \cdot \sin \alpha$ und erhöht Auflösungsvermögen.

Wellenoptik

Wenn Blendendurchmesser oder andere Hindernisse klein sind ($\simeq$ Lichtwellenlänge), dann hat nicht mehr nur geradlinige Lichtausbreitung („**Geometrische**“ **Optik**) sondern es dominieren **Beugungseffekte**.

Huygenssche Elementarwellen breiten sich in alle Richtungen aus und erzeugen damit Licht im geometrischen Schattenraum des Hindernisses, d.h. das Licht wird „um die Ecke gelenkt“.

Durch Interferenzen von Huygensschen Elementarwellen erhält man **Beugungsmuster**. Beim Auftreffen einer ebenen Welle auf einen **Spalt** sieht man auf einem (entfernten) Schirm links und rechts von dem ungebeugten Lichtstrahl abwechselnd Minima und Maxima der Lichtintensität.

Das i -te ($i = 1, 2, \dots$) **Beugungsminimum** (gegenseitige Auslöschung der Elementarwellen) findet man unter dem Winkel α_i zur Einfallrichtung:

$$b \cdot \sin \alpha_i = i \cdot \lambda$$

b : Spaltbreite, λ : Wellenlänge.

Die **Beugungsmaxima** findet man unter Winkeln α_k , für die gilt:

$$b \cdot \sin \alpha_k = (k + 1/2) \cdot \lambda$$

($k=1,2, \dots$). Die Intensität der Maxima nimmt mit wachsendem k stark ab.

Beim **Gitter** (Anordnung aus vielen parallelen schmalen Spalten) erhält man nahezu gleich intensive schmale **Beugungsmaxima** bei

$$g \cdot \sin \alpha_m = m \cdot \lambda.$$

Gitterkonstante g : Spaltabstand; $m = 0, 1, 2, \dots$

Optische Gitter werden häufig in **Spektrometern** eingesetzt, mit denen aufgrund obiger Gleichung Wellenlängen gemessen werden können. Im Gegensatz zu Prismen, bei denen „Blau“ stärker gebrochen wird als „Rot“, ist der Beugungswinkel beim Gitter für „Rot“ größer als für „Blau“.

Bei einer **Lochblende** (kreisförmige Öffnung) erhält man als **Beugungsbild** eine abwechselnde Folge heller und dunkler **konzentrischer Ringe**. Das **erste Minimum** liegt z.B. unter einem Winkel α_l für den gilt

$$r \cdot \sin \alpha_l = 0,61 \cdot \lambda$$

r: Blendenradius

Mikroskop: Objektiv ist die beugende „Lochblende“.

Bilder zweier nahe beieinanderliegender Objektpunkte sind zwei Scheibchen (zentrale Beugungsmaxima), die einander überlappen können. Die Bilder kann man nur dann noch als getrennt erkennen, wenn der Abstand der Scheibchen mindestens so groß ist, dass das zentrale Beugungsmaximum des einen Objektpunktes in das erste Minimum des zweiten fällt.

Aus dieser Forderung ergibt sich der **kleinste Abstand zweier Objektpunkte, die noch getrennt wahrgenommen werden können**, zu

$$\delta_{min} = \frac{0,61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin \alpha}.$$

Die Brechzahl n des Mediums zwischen Objekt und Objektiv kann z.B. durch Einbringen von Immersionsöl auf 1,51 erhöht werden.

Den reziproken Wert

$$A = 1/\delta_{min}$$

bezeichnet man als **Auflösungsvermögen A** .