

Vorlesungsmaterial

Prof. Dr. Horst Völz

Optische Grundlagen für CD usw.

Dieses Material beruht vor allem auf dem Buch

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3 Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2007

Es ist u.a. auch vollständig auf der CD enthalten

Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007

Älteres Buch

Völz, H.: Informationsspeicher, Grundlagen - Funktionen - Geräte. Expert-Verlag, Renningen - Malsmheim 1996

Der Inhalt wurde erheblich verkürzt, auf den neuesten Stand gebracht und die Bilder farbig umgesetzt

Bei Angabe der Quelle ist das Material zum privaten Gebrauch voll nutzbar

Bei kommerzieller Nutzung bzw. in Publikationen usw. ist eine Abstimmung mit mir notwendig

Bilder sind in höherer Qualität ca. 2000×3000 Pixel oder *.cdr Version 12 verfügbar

Dieses Material wurde heruntergeladen von

aes.cs.tu-berlin.de/voelz/PDF

Email: hvoelz(at)fpk.tu-berlin.de bzw. h.voelz(at)online.de

Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 288 617 08

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 1 von 70

Modelle der Optik

Optisches Geschehen ist mit drei Modellen zu beschreiben, die z.T. widersprüchlich erscheinen

Sie heben jedoch nur verschiedene Aspekte des Geschehens hervor

Je nach den auftretenden Wirkungen bzw. der vorhandenen Anwendung sind sie unterschiedlich vorteilhaft

Modell	Besonderheit	vorteilhaft für
Strahlenoptik	Licht wird als geradlinig sich ausbreitender Strahl behandelt, der an Mediengrenzen gebrochen und reflektiert wird (Foto-Apparat)	Linsen, Prismen, Spiegel, Lichtleiter; Totalreflexion, Farbzerlegung
Wellenoptik	Licht breitet sich von jedem Punkt als Kugelwelle aus, die Summe bildet eine Wellenfront, HUYGEN-sches Prinzip	Beugung, Interferenz, Vergütung, Polarisation, Anisotropie, Holographie
Quantenphysik	Licht wird durch Photonen (Partikel, Quanten) beschrieben. Sie entstehen, verschwinden und können sich „verbinden“	Kohärenzlänge, Emission, Absorption, Laser; Belegungsdichte

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 2 von 70

Strahlenoptik

Für die opto-elektronische Speicherung – CD, DVD usw. – sind **nur wenige Aspekte** der Strahlenoptik erforderlich

Es können viele Fehler vernachlässigt werden, u. a.

Astigmatismus, Koma und **sphärische Aberration** von Linsen (-systemen)

Meist kommt nur eine Wellenlängen vor \Rightarrow entfällt Dispersion =

Farbfehler = chromatischer Fehler = Brechung verschiedener Wellenlängen

Wichtig für Linsen sind **Brennweite** f und **Numerische Apertur** N_A sowie **Brechung** und **Reflexion** an Oberflächen

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 3 von 70

Totalreflexion und Lichtleiter

Ein Lichtstrahl geht von einem Medium mit Brechungsindex n in ein Medium mit dem Brechungsindex n' über

Dann entstehen ein **reflektierter** und ein **gebrochener Lichtstrahl**

Ihre Intensität hängt vom Einfallswinkel γ und dem Verhältnis n'/n ab

Wird ein Grenzwinkel γ_G überschritten, so tritt **Totalreflexion** ein, **alles** Licht bleibt im Medium mit n

$$\sin(\gamma_G) = n'/n$$

Dieser Effekt wird bei **Lichtleitern** benutzt: der eingebettete (cladding) Kern (meist SiO_2) besitzt n_2 , der Mantel $n_1 > n_2$

Lichtstrahlen, die hinreichend flach in den Kern eindringen können ihn nicht mehr verlassen, werden **total reflektiert**

Bei geringer Absorption kann so Licht **verlustfrei** weitergeleitet werden

Lichtleiter erstmalig von CHARLES KUEN KAO (*1933) und GEORGE HOCKHAM 1966 **statt Koaxial-Kabeln** erprobt

Werden seit 1980 umfangreich für die Datenübertragung genutzt.

Einkopplung von Licht nur im kleinen Winkelbereich möglich \Rightarrow spezielle Laser, z. B. VCSEL

Lichtstrahlen können aber mit verschiedenen Winkeln bei $\gamma > \gamma_G$ (**Moden**) einfallen \Rightarrow unterschiedlich lange Wege

Lichtleiter sind **biegsam**, Licht kann an verschiedenen Stellen geleitet werden

\Rightarrow **keine mechanische Bewegung der Optik!**

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 4 von 70

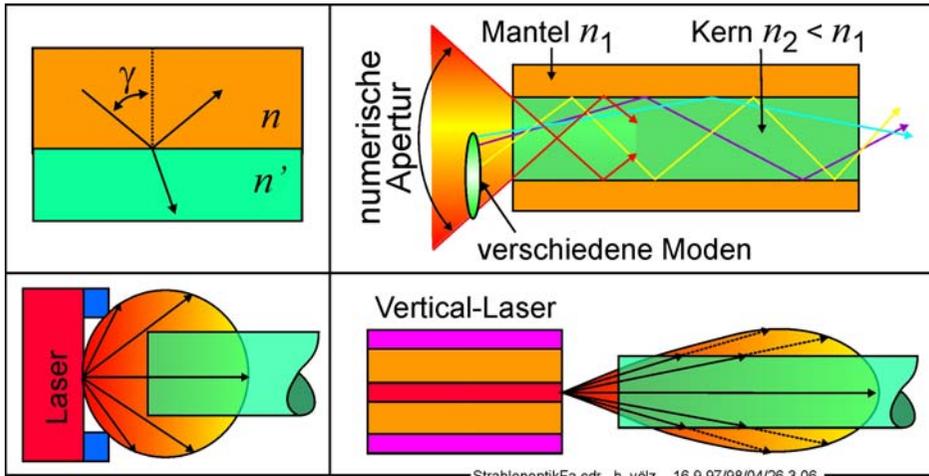


Abbildung mit Linsen

Hier genügt es, sehr dünne Linsen anzunehmen

Mit der **Brennweite** f der Linse sowie dem **Gegenstands-** und **Bildabstand** g bzw. b gilt dann

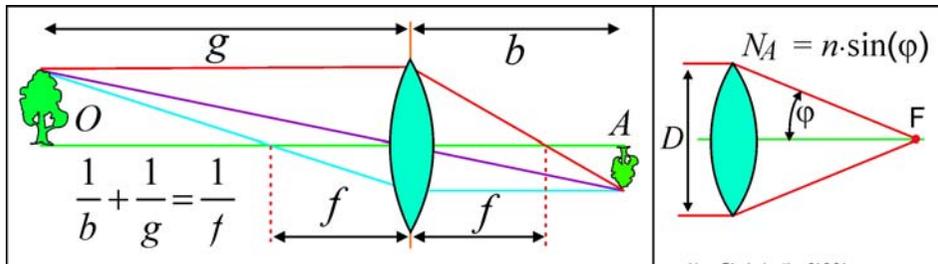
$$\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f}$$

Helligkeit des Bildes bestimmt **Durchmesser** D der Linse bezogen Brennweite $f \Rightarrow$ **relative Öffnung** \tilde{O}

$$\tilde{O} = f / D$$

In der Photographie wird hieraus der **Blendenzahl** B_Z abgeleitet

$$B_Z = 1 / \tilde{O} = D / f$$



Numerische Apertur N_A

Lateinisch *aperire* öffnen, *apertura* Öffnung

Wird u. a. für Mikroskope usw. aber auch für Speicheroptiken benutzt

Berücksichtigt auch ein Medium mit **Brechungsindex** $n \triangleq 1$ zwischen Objektiv und Original

Statt Öffnung bzw. Blendenwert ist dann der **Öffnungswinkel** φ entscheidend

$$N_A = n \cdot \sin(\varphi)$$

Große N_A verlangt für Glaslinsen sehr aufwendige Sonderfertigungen

Für optische Speicher meist $N_A \approx 0,45$ bis $0,80$ ($\varphi \approx 24$ bis 70°)

Wird durch asphärisch **gespresste Plastiklinsen** erreicht

Theoretischer Grenzfall $N_A \rightarrow 1 \Rightarrow$ Objektiv bei endlicher Brennweite unendlichen Durchmesser

Bemerkung

Werden zwei Flächen gegeneinander geschliffen, so entstehen automatisch und ohne jegliche Hilfsmittel immer **Kugelflächen**. Das ist der Grund, weshalb Kugelflächen seit Jahrhunderten für die Linsenfertigung benutzt werden. Auch in der Natur ist dieser Effekt zu beobachten. Sollen dagegen plane Flächen oder gar genau definierte, asphärische Flächen hergestellt werden, so ist dazu ein sehr großer technischer Aufwand notwendig, der effektiv nur mit dem Pressen von Kunststoff möglich wurde.

Numerischer Apertur $N_A \Leftrightarrow$ Blendenzahl B_Z bei $n = 1$

$$N_A = \frac{D/2}{\sqrt{(D/2)^2 + f^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4B_Z}} \text{ bzw. } B_Z = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{N_A^2} - 1 \right).$$

N_A	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
B_Z	2,5	1,3	0,75	0,44	0,26	0,14

Schärfentiefe

Eine Abbildung ist nicht ideal scharf (auch ohne Beugung s. u.)

Bildpunkt erzeugt einen Unschärfekreis mit $\varnothing = u$

Zu ihm gehören eine Fern- und Nah-Entfernung a_f bzw. a_n . Mit der relativen Öffnung gilt bei Abbildungsabstand a

$$a_{n,f} = \frac{a \cdot f^2}{f^2 \pm u \cdot \ddot{O} \cdot (a + f)}$$

Der Schärfentiefebereich beträgt

$$\Delta a = a_f - a_n$$

Näherung für opto-elektronische Speicher benutzt nur die Wellenlänge λ und die Numerische Apertur N_A :

$$\Delta a = \pm \frac{\lambda}{2N_A^2}$$

Je Größer N_A , desto kleiner ist der Bereich der Schärfentiefe,

desto genauer muss die Schärfe bei CD usw. nachgeregelt werden

Reale Werte sind hier etwa 2 bis 4 μm .

Wellenoptik

Die Beschreibung des Lichts als (elektromagnetische) Welle stammt von CHRISTIAAN HUYGENS (1629 – 1695)

Das Wellenmodell wurde vor allen durch den **Doppelspalt-Versuch** belegt $\hat{=}$ 2 kohärente Lichtquellen

Von punktförmiger Lichtquelle geht **Kugelwelle** aus, die sich mit Lichtgeschwindigkeit allseitig im Raum ausbreitet

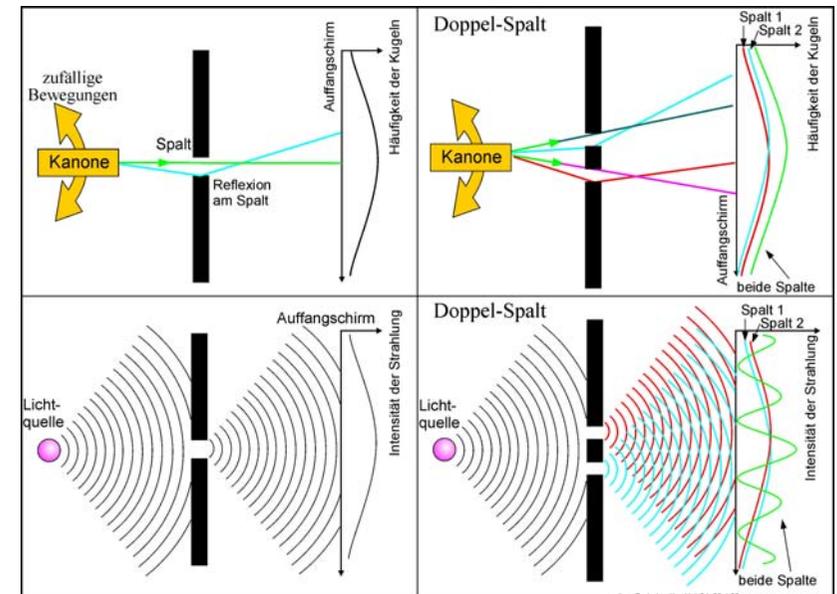
Generell nimmt die **Licht-Intensität** der Entfernung r von der Lichtquelle mit $1/r^2$ ab

In großer Entfernung ($\rightarrow \infty$) kann im kleinen Ausschnitt die Kugelwelle als **ebene Welle** betrachtet werden.

Bei einer **leuchtenden Fläche** überlagern sich alle Punktquellen zu einer **Wellenfront**

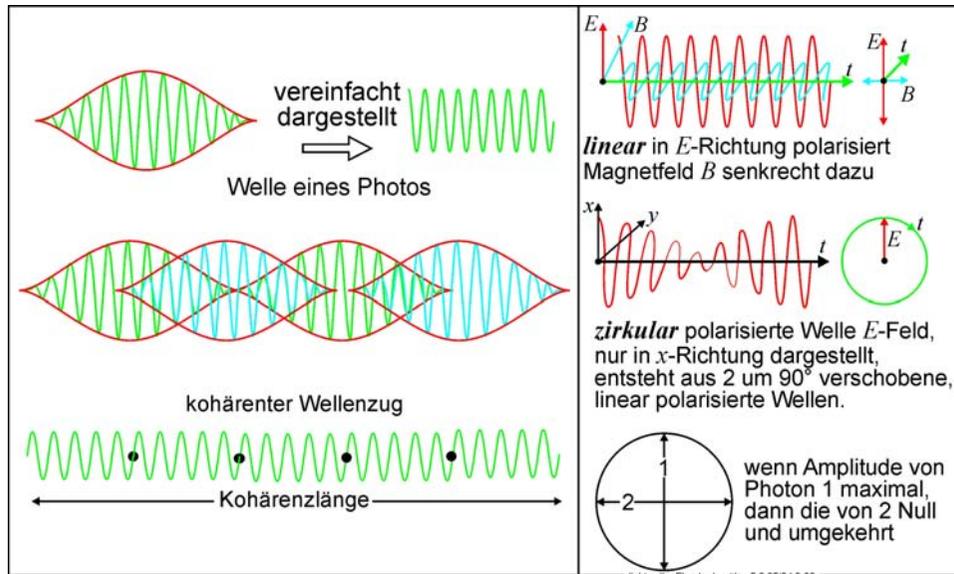
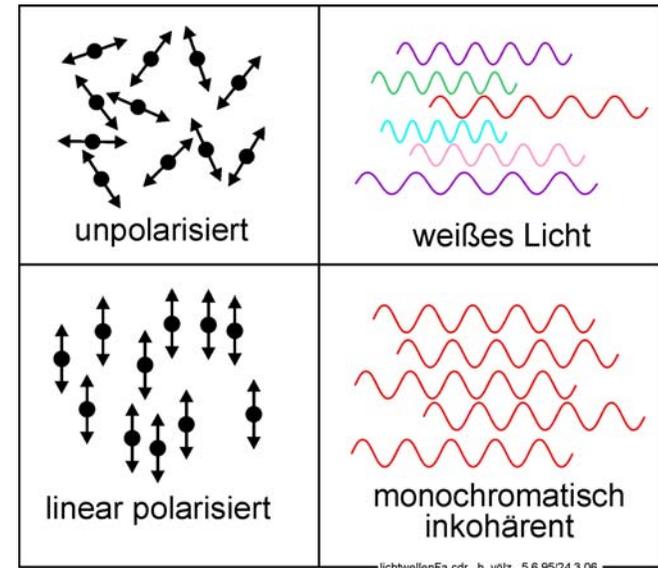
Hierbei kann **Interferenz** entstehen, z. B. Doppelspalt

Lateinisch inter zwischen, unter und *ferire* schlagen, treffen



Wellen-Eigenschaften des Lichts

- **Wellenlänge:** zu jedem einzelnen Photon gehört eine Wellenlänge $\lambda \approx$ Energie E . Im Licht sind mehrere Photonen unterschiedliche Wellenlängen vorhanden, reziprok zur Wellenlänge ist die Frequenz
- **Spektrum** gibt die Verteilung der Wellenlängen des Lichts an
- **Weißes Licht:** enthält Photonen im Bereich von ca. 400 bis 800 nm, es entspricht dem Spektrum des Sonnenlichts
- **Monochromatisches Licht** besteht aus nur einer Wellenlänge (\approx Farbe), evtl. auch sehr enger Wellenlängebereich
- **Polarisation:** Ausrichtung der elektrischen Feldvektors der elektromagnetischen Welle
Magnetvektor senkrecht dazu
- **Kohärenzlänge:** Länge eines Wellenzuges, Tageslicht (einzelne Photonen) mm bis cm.
Durch „Synchronisation“ lassen sich mehrere (gleichartige) Photonen) exakt aneinander „binden“
Das verlängert die Kohärenzlänge. Hierzu dient der **Laser**
- **Interferenz:** Licht kann sich kompensieren (s. o.)
- **Beugung:** Licht kann durch Interferenz in bestimmte Richtung abgelenkt werden



Lochkamera und Punktquelle

Lochkamera = Camera obscura = erzeugt Bilder gemäß **Strahlenoptik**

Punktartige Lichtquelle erzeugt bei **Loch-Radius r** einen mehr oder weniger großen und hellen **Lichtfleck**

Transportierte Lichtmenge entspricht **Fläche $2 \cdot \pi \cdot r^2$** . Lichtfleck hängt auch vom **Abstand f der Wand** zum Loch ab

Eigentlich müsste mit kleinerer Lochgröße die **Schärfe der Abbildung** auf der Wand zunehmen
Wird **Loch zu klein**, so nimmt infolge von **Interferenz und Beugung** die Schärfe wieder ab

Es gibt daher für Güte der Abbildung eine **optimale Öffnung**. Bei klassischer Fotografie gilt $B_z \approx 5,6$
Bei **größerer Blendenzahl** überwiegt Unschärfe wegen zu großer Öffnung, bei **kleineren** infolge Beugung

Mit der Entfernung bzw. Brennweite f und Wellenlänge λ ergibt sich ein optimaler Radius

$$r_{opt} \approx \sqrt{f \cdot \lambda}$$

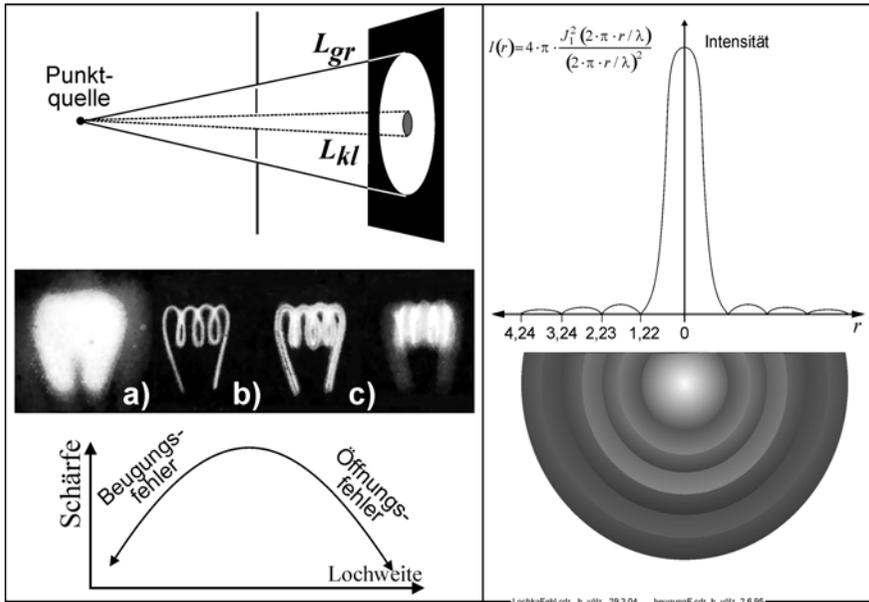
Allgemein wird ein **Punkt** durch sich **wiederholende Maxima und Minima** (Nullstellen) abgebildet
werden durch die **BESSEL-Funktion $J(r)$** für den Abstand r bestimmt (s. Bild)

Damit **2 Punktquellen** getrennt abgebildet werden \Rightarrow bei Lochradius r_L kleinster Winkelabstand

$$\sigma = 0.61 \cdot \lambda / r_L$$

Lochblende und Linse BZ verhalten sich gleichartig

Bei Linse werden jedoch wesentlich höhere ($\approx 10^5$) Lichtintensitäten übertragen



Bei der Abbildung der Kohlefadenwendel betrug der Loch-Wandabstand betrug $f = 60$ cm

	a	b	c	d
Loch \varnothing in mm	0,16	0,98	1,4	2,8
Blendenzahl B_z	3750	610	430	210

Brennpunkt \Rightarrow Brennvolumen V_B

Wegen der Schärfentiefe und der Brennpunkt-Unschärfe ergibt sich brauchbarer Näherung

$$V_B \approx k \cdot \lambda^3$$

Die Konstante k liegt je nach gewählter Anordnung und Numerischer Apertur zwischen 1 und 10

Beugungsgitter

Viele **regelmäßig angeordnete Spalte** bestimmen ein Beugungsgitter

Dadurch werden die periodischen **Maxima** ausgeprägter \Rightarrow **Lichtstrahlen bestimmter Ordnung**

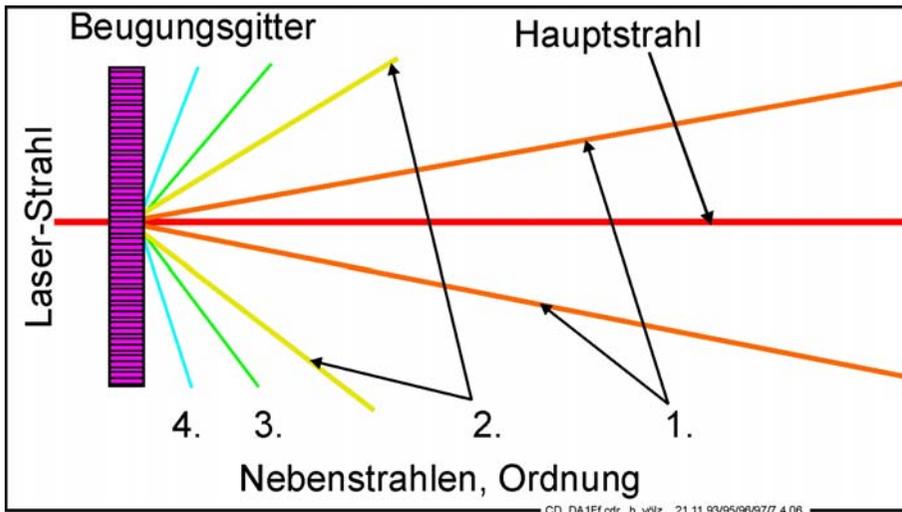
Wichtig ist Verhältnis des periodischen Gitterabstands s_G zur Wellenlänge λ des Lichts

Für den Zusammenhang zwischen Ablenkungswinkel α und der Beugungs-Ordnung $h = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ gilt

$$\sin(\alpha) = \pm h \lambda / s_G.$$

Das negative Vorzeichen berücksichtigt reflektierte Strahlen (s. u.).

Durch **Form und Abstand der Spalte** können **bestimmte Maxima verstärkt** und andere geschwächt werden

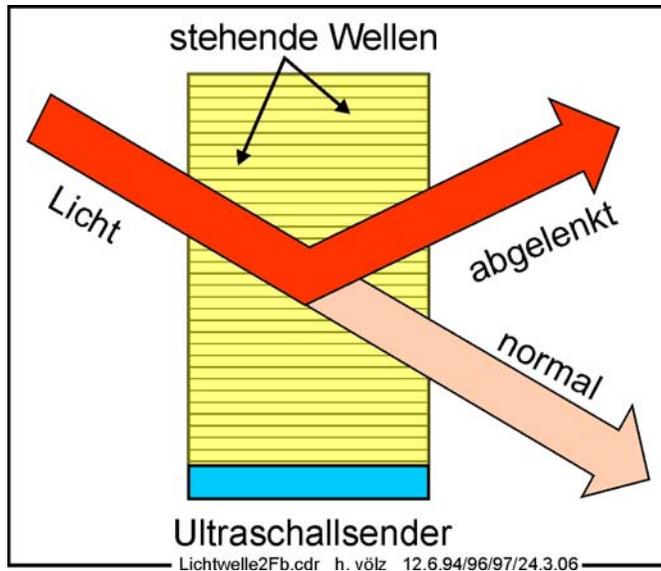


Oberflächenwellen

Auch in **Reflexion** kann Beugung erfolgen (Minuszeichen, oben), Erfolgt u.a. bei Oberflächen-, **Wasserwellen**
 Hierfür haben sich spezielle Materialien wie Lithiumniobat-Kristalle (**LiNbO₃**) durchgesetzt
 Sie werden durch **Ultraschall angeregt**, mit der Frequenz kann dann sogar die Gitterkonstante geändert werden
 So entsteht eine **analoge Lichtablenkung**
 Mit Beugungs-Ordnung h ($0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$) und Gitterkonstanten a gilt für den **Ablenkungswinkel**

$$\cos(\alpha) = h \cdot \lambda / a$$

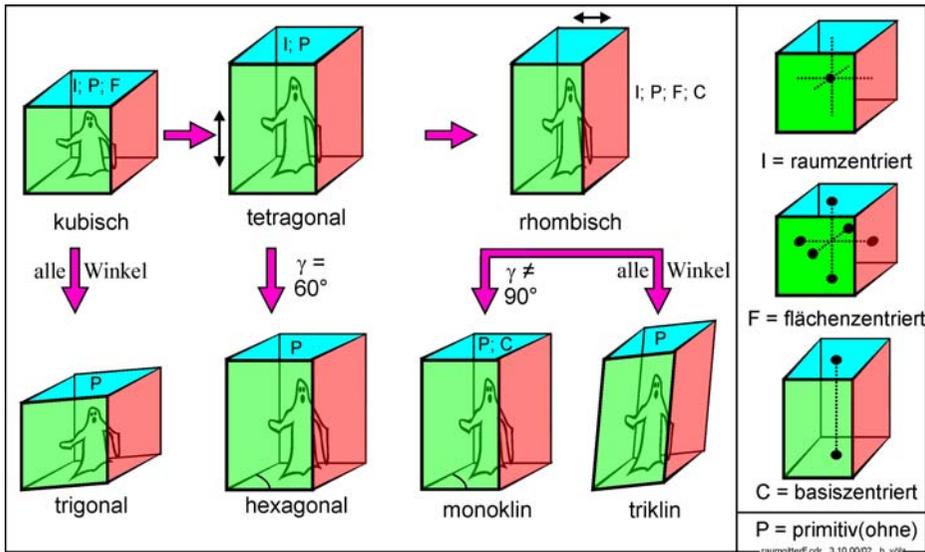
Durch spezielle geometrische Gestaltung der Ultraschallanregung und Oberflächenformen sind sogar **linsenähnliche Effekte** möglich



Optische Anisotropie

Griechisch an- nicht, un-; *ísos* gleich, ähnlich, entsprechend
tropé Wendung, Umkehr, Wechsel bzw. *trópos* Richtung, Wendung, Art und Weise

Anisotrope Materialien besitzen im Kristall meist **richtungsabhängige Atomabstände**
 Sie bewirken **richtungsabhängige Brechungsindizes**



Optische Achse, Anisotropie

Der Brechungsindex n eines anisotropen Materials hängt von der *Polarisation* und *Ausbreitungsrichtung* ab. Dabei werden *ordentliche* und *außerordentliche Achse* unterschieden.

In der *ordentlichen Achse* hat die *Polarisation keinen Einfluss* auf Brechungsindex.

Zur *außerordentlichen Achse* gehört die *Doppelbrechung*.

Ein Bild, das in dieser Richtung unter dem Kristall liegt, erscheint von oben betrachtet, seitlich versetzt doppelt. Phänomen wurde erstmals 1669 von ERASMUS BARTHOLINUS (1625 – 1698) am Kalkspat (Calcit) beobachtet.

Bei *isotropem Material* entsteht Anisotropie durch *äußere Einflüsse* u.a. Druck, Zug, elektrisches, magnetisches Feld. Geschwindigkeit v , Brechungsindex n , Dielektrizitätskonstante ϵ und Lichtgeschwindigkeit c ergeben

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon}$$

Beispiele

Kristall mit zwei unterschiedliche Gitterabständen: von oben nach unten anders als seitlich. Bewirkt bzgl. Polarisation.

Lichtstrahl *unten* \Rightarrow *oben keine Unterschiede* = opt. Achse = n_o

links \Rightarrow *rechts* horizontale und vertikale Polarisation unterschiedliche Atom-Abstände, dito n_{ao} und v_{Licht}

Es entstehen so Gangunterschiede für die polarisierten Wellenanteile proportional der Materiallänge (-dicke) d

$$\Gamma = d \cdot |n_{ao} - n_o|$$

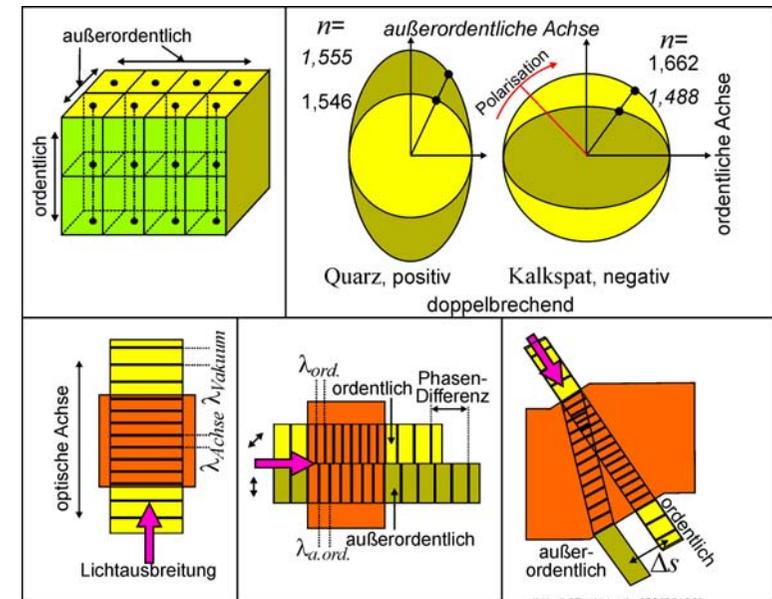
Darstellung erfolgt durch **Richtungsdiagramme** (für die Polarisation)

Ordentliche Strahl bewirkt **Kreis**, außerordentliche **Ellipse**

n außerhalb der der optischen Achse größer \Rightarrow **positiv** doppelbrechendes Material, z.B. Quarz

Anderenfalls **negativ** doppelbrechendes, z.B. Kalkspat

Material	$n_{ordentlich}$	$n_{außerordentlich}$	Δn
Kalkspat	1,6584	1,4864	-0,1720
Quarz	1,5442	1,5533	+0,0091
Wassereis	1,309	1,313	+0,004



Verzögerungsplatte

Zwei senkrecht zueinander polarisierte Wellen werden um Phasenwinkel $\Delta\varphi$ gegeneinander verschoben

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \cdot |n_{ao} - n_o|$$

λ = Vakuumwellenlänge

Bei 90° tritt ein technisch wichtiger Effekt auf $\Rightarrow \lambda/4$ -Platte

Beide polarisierten Wellenanteile erzeugen **zirkular polarisiertes** Licht

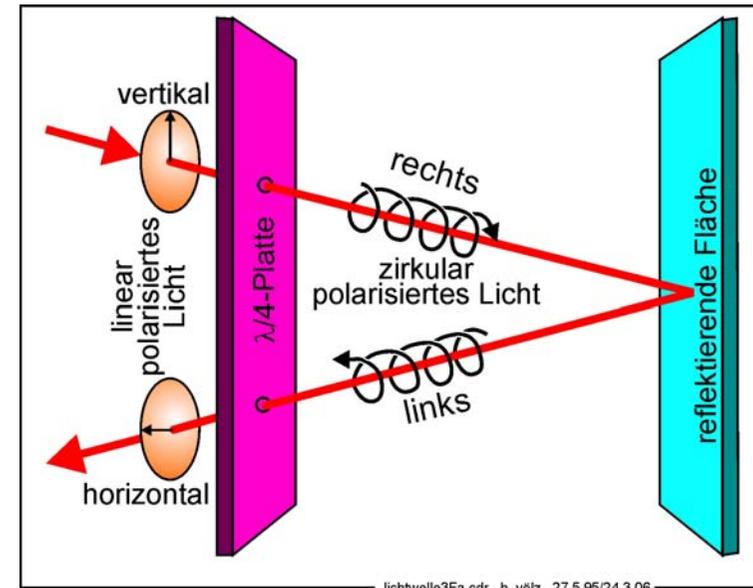
Bei seiner Reflexion der Welle wird die Drehrichtung der Polarisation umgekehrt

Durchdringt eine zirkular polarisierte Welle die $\lambda/4$ -Platte \Rightarrow entsteht linear polarisierte Welle

Deshalb ist Licht nach Reflexion und $\lambda/4$ -Platte senkrecht zur Anfangswelle polarisiert

Materialien für Verzögerungsplatten sind u.a. Glimmer (bis zu extrem dünnen Folien spaltbar), Quarz und Gips

Bemerkung: $\lambda/4$ ist nicht die Dicke der Platte, die ist viel größer, sondern gilt für Phasenunterschied $\lambda/4 = 90^\circ$.



lichtwelle3Fa.cdr h. völz 27.5.95/24.3.06

Dichroismus + amorph \leftrightarrow kristallin

Griechisch *dís* zweimal und *chroós* Farbe, *díchroos* zweifarbig

Erscheinung betrifft durchgelassenes Licht, je nach Farbe oder Polarisation wird **unterschiedlich absorbiert**

Für die Speicherung ist der Übergang **amorph \leftrightarrow kristallin** wichtig

Die ist besonders deutlich bei Schutzscheiben (Auto-Frontscheibe) zu erkennen

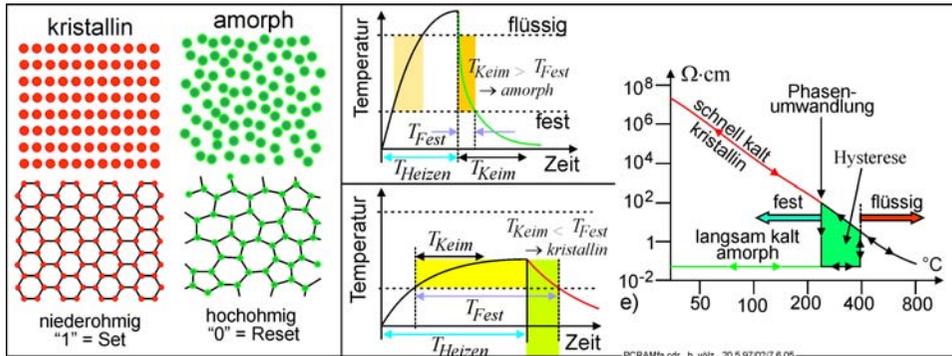
Hergestellt amorph = gut durchsichtig, durch **Schlag, Stoß** entstehen viele Kristalle = praktisch **undurchsichtig**

Ähnlich Vergleich **Kandis- \leftrightarrow Puderzucker**

Langsames Abkühlen lässt Kristalle entstehen, **schnelles** dagegen amorphes Material

Technische Nutzung bei wiederbeschreibbaren Medien und künftigen Halbleitespeichern (Ovonics)



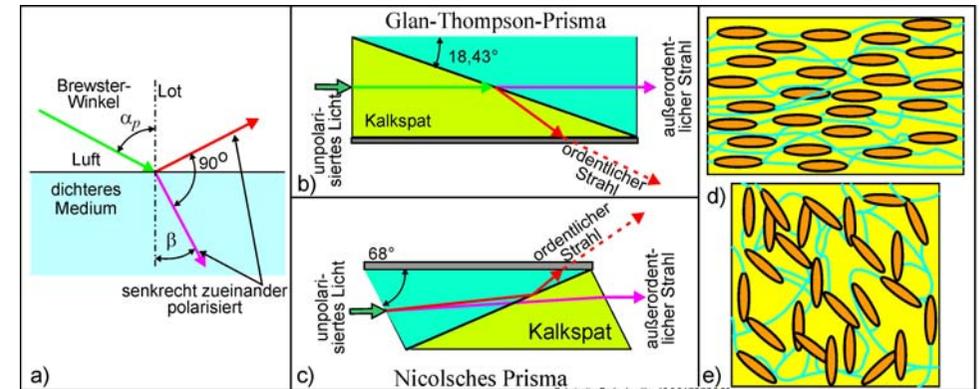


Vier Methoden zur Lichtpolarisation I

1. **Einfachste Methode** benutzt **BREWSTER-schen Winkel** α_p (DAVID BREWSTER; 1781 – 1868)
Nutzt **Wechselwirkung von reflektiertem und gebrochenem Strahl** an Grenzflächen
Stehen sie senkrecht aufeinander \Rightarrow vollständige Polarisation \Leftrightarrow Einfallswinkel = BREWSTER-scher Winkel α_p
In Nähe von α_p **nur teilweise Polarisation**, an allen Grenzflächen (z.B. Wasser-, Glasoberflächen) vorhanden
In **Fotographie** sind daher störende Reflektionen mit Polarisationsfiltern weitgehend zu unterdrücken
Mehrere Glasplatten hintereinander verstärken den Polarisationsgrad des hindurchtretenden Lichts
2. Das **NICOL-sche** (1829) und **GLAN-THOMPSON-sche Prisma** sind sehr hochwertig, aber recht teuer
WILLIAM NICOL (1768 – 1851), PAUL GLAN (1846 – 1898) und SILVANUS THOMPSON (1851 – 1916)
Nutzen Doppelbrechung des rhombischen Kalkspats (CaCO_3), sind nur unterschiedlich zusammengesetzt
Trennfläche so angelegt, dass für ordentlichen Strahl Totalreflexion erfolgt \Rightarrow leicht abtrennbar
Es wird nur der ordentliche bzw. außerordentliche Strahl benutzt, der andere mit Rußschicht absorbiert
Schnittkanten sind mit extrem dünner Schicht aus Kanadabalsam (Brechzahl $n = 1,54$) verkittet
Im Laufe der Zeit sind noch weitere Prismen-Varianten entstanden

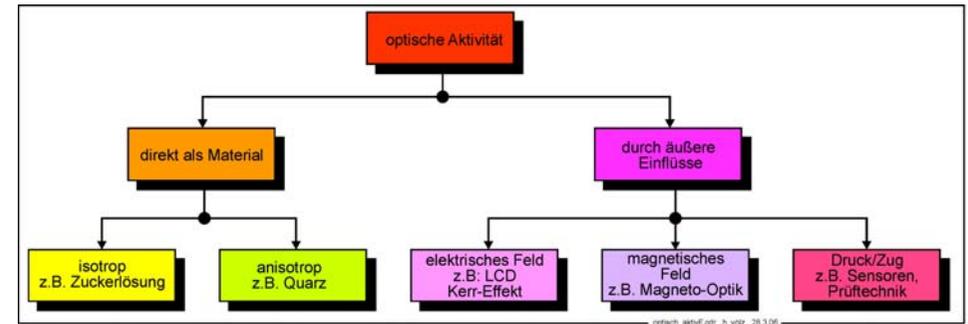
Vier Methoden zur Lichtpolarisation II

3. **Dichroitische Folien** Sind besonders preiswert und ermöglichen großflächige mittelgute Polarisation
Werden kaum bei optischen Speichern, aber LCD usw. benutzt
Kunststoff-Folien, vorwiegend Polyvinylalkohol (Ausgangsprodukt der **Fa. Polaroid** von EDWIN HERBERT LAND)
Unmittelbar nach Herstellung liegen die **Makromoleküle** ($\ll \lambda$) unregelmäßig im Material
Folie wird einachsigt **längs verstreckt** \Rightarrow Makromoleküle ordnen sich bevorzugt in Längsrichtung
 \Rightarrow gitterförmige Struktur
Folie = stark anisotrop, absorbiert Licht, das in der Längsrichtung der Makromoleküle polarisiert ist
Zur **Verstärkung des Effekts** werden die Folien mit **Zusatz von Jod** leicht eingefärbt
Bei hinreichender Dicke, < 1 mm, wird fast nur noch linear polarisiertes Licht hindurchgelassen, Rest < 1 %
4. **Gitter-Polarisatoren** ähneln dichroitischen Filtern, vor allem im Infrarot- und Mikrowellenbereich angewendet
Benutzen oft entsprechend angeordnete **Drahtgitter**



Optische Aktivität

Eigenschaft einer Substanz, die **Polarisationsebene** beim Durchgang (oder Reflexion) **zu drehen**
 Effekt **proportional**: Länge des **Lichtweges** im Material **oder Konzentration** des gelösten Stoffes (z. B. Zucker)
 Für Substanzen werden **spezifische optische Drehwerte** angegeben
 Effekt kann sowohl **isotrop** (z.B. Zuckerlösung) als auch **anisotrop** (z.B. Quarz) sein
 Es gibt eine **Vielzahl optischer Aktivitäten**
Für Speichern sind nur die Einflüsse von **elektrischem und magnetischem Feld** wichtig
 Je nach Material, Aufbau usw. kann elektrisches Feld **Brechungsindex** ändern oder **Polarisationsebene** drehen
 Das ermöglicht Lichtmodulation und Lichtablenkung, wichtig ist u. a. die **KERR-Zelle**
 Das magnetische Feld ermöglicht **magneto-optische Speichermedien**



Elektrisches Feld und POCKELS-Effekt

Bei elektro-optischen Zellen tritt u.a. der **POCKELS-Effekt** mit **Proportionalität**
 FRIEDRICH POCKELS (1865 – 1913)
 Mit der POCKELS-Konstante K_p ergibt sich die Phasenverschiebung beider Polarisationen (Doppelbrechung):

$$\Delta\varphi = K_p \cdot l \cdot E$$

 K_p = POCKELS-Konstante, l = Lichtweg im Medium, E = angelegte Spannung

Pockels-Konstante K_p bei 550 nm und Zimmertemperatur

Material	K_p in 10^{12} m/V
Ammoniumarsenat ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$)	5,3
Ammoniumphosphat ($\text{ADP} \cdot \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	8,5
Kaliumarsenat (KH_2AsO_4)	11,6
Kaliumphosphat ($\text{KDP} \cdot \text{KH}_2\text{PO}_4$)	10,5

Elektrischer KERR-Effekt

Wurde 1875 von JOHN KERR (1824 – 1907) an Flüssigkeiten gefunden
Quadratischer Zusammenhang bzgl. der Änderung der Brechzahl n , abhängig von der Wellenlänge λ

$$\Delta n = K_K \cdot \lambda \cdot E^2$$

Der relative Gangunterschied beträgt

$$\frac{\Delta l}{\lambda} = K_K \cdot l \cdot E^2$$

Hieraus folgt der Drehwinkel α des polarisierten Lichts

$$\alpha = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot K_K \cdot \lambda \cdot E^2$$

Effekt ist **sehr gering**, selbst beim am stärksten drehenden Nitrobenzol gilt
 KERR-Zelle 1 cm lang: für Drehwinkel $\pi/2$ wird Feldstärke von $\approx 20 \text{ kV/cm}$ benötigt
 Dennoch war die KERR-Zelle beim **Tonfilm** zunächst unersetzbar
 Vorteilhaft wird sie für eine **digitale Lichtablenkung** benutzt, s. u., bis zu vielen MHz nutzbar

Kerr-Konstanten K_K bei 550 nm und Zimmertemperatur

Material	K_K in 10^{15} m/V^2
Benzol	8
Schwefelkohlenstoff	40
Chloroform	34
Wasser	50
Chlorbenzol	117
<i>m</i> -Nitrotoluol	2500
Anilin	4000
Nitrobenzol	4500

Digitale Lichtablenkung

Benötigt zwei Komponenten

1. Doppelbrechendes Prisma

Ordentlicher und außerordentlicher Lichtstrahl *in 2 Richtungen gebrochen* und *senkrecht zueinander polarisiert*
Intensität beider Strahlen hängt von Anteilen beider Polarisationsrichtungen im Eingangslicht ab

2. Vorgeschaltete Kerrzelle

Verändert durch **Drehung** die die senkrecht zueinander polarisierten Anteile

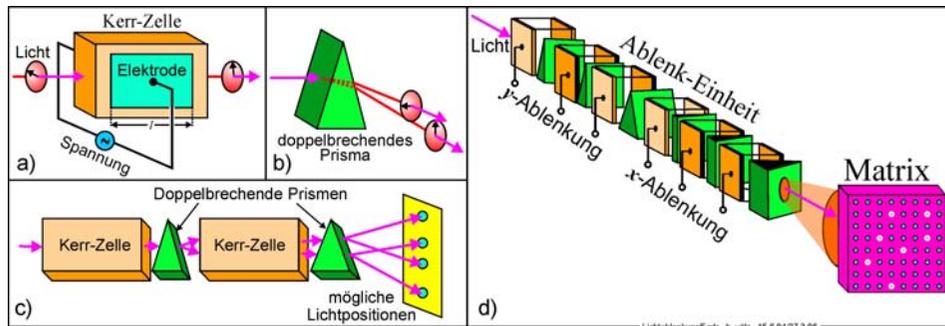
Beide Zusammen

ermöglichen bei richtigem Abgleich vollständig zwischen den 2 Ausgangsrichtungen umzuschalten
m derartige Bauelemente hintereinander angeordnet ermöglichen, 2^m Positionen anzusteuern
 Unzulänglichkeiten, wie unvollständige Entspiegelung, Kristallfehler, Raumladungen, Beugungseffekte usw.
begrenzen m

Günstig ist **Ablenkung in x- und y-Richtung**, \Rightarrow alle Positionen liegen einer Ebene

Erreicht $\approx 2 \times 10$ Stufen $\Rightarrow 2^{20} = 1\,048\,576$ Positionen, das ermöglicht **Hochleistungsspeicher** (s. u.)

Achtung: Gegensatz zur kontinuierlichen Lichtablenkung mit Oberflächenwellen, s. o.



Magnetooptik

Magnetfelder beeinflussen **Polarisationsrichtung** und **Intensität** von Licht bei Reflexion und Durchgang

Die möglichen **Erscheinungen** sind **vielfältig**, recht **kompliziert** und die auftretenden **Effekte sehr klein**

In den letzten zwanzig Jahren sind noch Effekte der **Spinelektronik hinzugekommen**

Die meisten Phänomene sind nach ihren **Entdeckern benannt**

Hier **nur** Effekte behandelt, die bei **Speicherung** bereits angewendet werden oder Bedeutung erlangen könnten

Licht mit der **Intensität I_0** treffe auf ein Material, **reflektiert** wird (Reflexionskoeffizienten R) Anteil

$$I_R = R \cdot I_0$$

Ins Material dringt der andere Anteil, wird dort mit Absorptionskoeffizienten α geschwächt ($l =$ Weglänge)

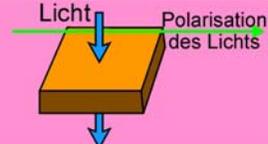
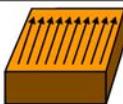
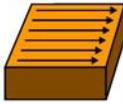
$$I_T = (1 - R) I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l}$$

Magnetfeld kann **R , α** und **Polarisationsrichtung** sowie **deren Anteile** verändern

Abhängig von: Richtung der Magnetisierung sowie Richtung bzw. Ebene der Lichtausbreitung

Insgesamt entstehen so mindestens je 3 Varianten für den Lichtdurchtritt und die Lichtreflexion

Alle Effekte bei **Reflexion** werden **KERR-Effekt** genannt

Lichteinfall Magneti- sierung		
	Faraday-Effekt $\varphi = V_d \cdot B = F \cdot d$ F spezifische Faraday-Drehung φ Drehwinkel der Polarisation V Verdet'sche Konstante B magnetische Flussdichte d durchstrahlte Schichtdicke	Kerr-Effekte $\varphi \sim B + c \cdot B^2$ φ Drehwinkel der Polarisation c Wert $\ll 1$ B magnetische Flussdichte
	polar 	
	trans- versal 	
longitu- dinal 		

Etwas Geschichte

1845 wurde der erste magnetooptische Effekt von **MICHAEL FARADAY** (1791 – 1867) entdeckt es wird die Polarisationsebene im Medium gedreht

1876 entdeckte **JOHN KERR** (1824 – 1907) den polaren magnetischen **KERR-Effekt**
Drehung der Polarisationsebene bei Reflexion an ferromagnetischen Metalloberflächen
Achtung: Unterschied magnetischer \leftrightarrow elektrischer Effekt s. o.

1895 sagte **HENDRIK ANTOON LORENTZ** (1853 – 1928) die **Aufspaltung der Spektrallinien** im Magnetfeld

1896 wurde er als **ZEEMAN-Effekt** von **PIETER ZEEMAN** (1865 – 1943) nachgewiesen
keine Bedeutung für Speicherung, aber Nachweis von kosmischen Magnetfeldern (**Astrophysik**)

1907 wurde der **COTTON-MOUTON-Effekt** von **A. COTTON** (1869 – 1951) und **H. MOUTON** an Nitrobenzol entdeckt
Beruht auf Ausrichtung anisotroper Moleküle (Einstelleffekt)
Stärker ausgeprägt ist der **MACALUSO-CORBINO-Effekt** wegen größerer Teilchenaggregate

1908 schuf **WOLDEMAR VOIGT** (1850 – 1919) eine umfassende Theorie der Magnetooptik
VOIGT-Effekt = starke magnetische Doppelbrechung in der Nähe von Absorptionslinien bei der Transmission

MAJORANA-Effekt (**QUIRINO MAJORANA**; 1871 – 1957) betrifft kolloidale Lösungen
u.a. diamagnetische Sole, z. B. Eisenoxydsol

Bei Transmission tritt oft **Doppelbrechung** auf \Rightarrow Differenz der Brechungsindizes $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} \neq 0$.

FARADAY-Effekt

Drehwinkel φ_F hängt von durchdrungener Schichtdicke l und magnetischer Flussdichte B ab

$$\varphi_F = V_d \cdot l \cdot B$$

V_d = VERDET-Konstante = KUNDT-sche Konstante K

Temperatur und Wellenlänge λ bestimmen wesentlich Dispersion des Brechungsindex n ($dn/d\lambda$)

$$V_d = V_0 \cdot \lambda \cdot dn/d\lambda.$$

Die **Drehrichtung** ist unabhängig von der Lichtrichtung

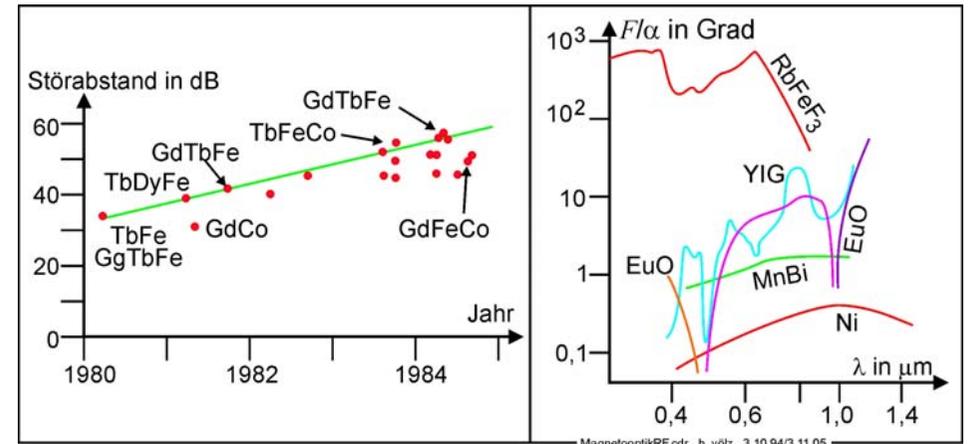
Wird bei Reflexion hinter Material verdoppelt

VERDET-Konstanten in Bogenminuten/T·cm.

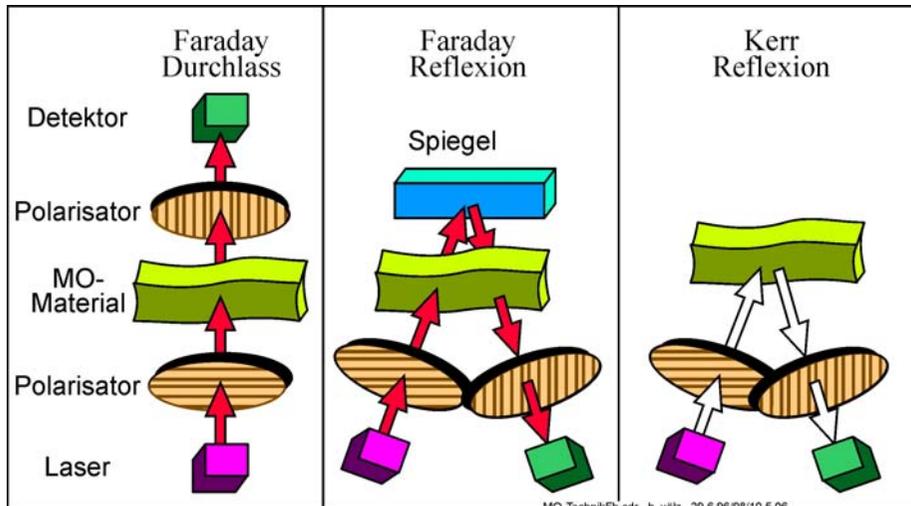
Stoff	V_d
Luft	0,063
CO ₂	0,094
NH ₄ Fe(SO ₄) ₂ ·12 H ₂ O	-5,8
CaF ₂	-120
C ₂ H ₅ OH	120
H ₂ O	131
Quarz	166
Flintglas	317
NaCl	359
CS ₂	440
Ce-Phosphat-Glas	550
TbAlSi-Glas	2000
EuF ₂	50000
EuSe	100000

Übergang zu Anwendungen

1956 gelang erstmalig WILLIAMS eine magnetische *Aufzeichnung und Wiedergabe* bei MnBi
 Um 1985 wurde der für die Speicherung (Fehlerarmut) *erforderliche Störabstand ≈ 50 dB* erreicht
 Hierzu mussten *spezielle Materialien* geschaffen und
 zusätzliche *optische Schichten zur Verstärkung* entwickelt werden
 Transmission und Reflexion nicht mehr eindeutig unterscheidbar \Rightarrow alles KERR-Effekten genannt



YIG = Yttrium-Eisen-Granat



Übergang zur Quantenphysik

Nur sehr wenige Aspekte der Quantenphysik werden hier behandelt, *betreffen*
 Bändermodell, stimulierte Emission, Laser und künftig mögliche Lichtspeicherung

Die bisher „unendlich“ andauernde *Lichtwelle* wird durch *Photonen* (Quanten-Teilchen) ersetzt

Zur *Lichtfrequenz* ν gehört *Energie* $E = h \cdot \nu$

$h \approx 6,6262 \cdot 10^{-34}$ J·s = Plancksche Konstante (MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK; 1858 – 1947)

Photonen bewegen sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit $c \approx 2,99793 \cdot 10^8$ m/s

Für die *Lichtwellenlänge* λ gilt $\nu = c/\lambda$.

Ein *Lichtstrahl* besteht aus einer *sehr großen Anzahl* „unabhängiger“ von *Photonen*

Notwendigkeit Laser

light amplification by stimulated emission of radiation
Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung

Jedem *Photon* entspricht ein *kurzes Wellenpaket*, beim üblichen Tageslicht nur Millimeter

Es gibt so gut wie keine optische Strahlung,

die *kontinuierlichen elektromagnetischen Wellen* (Rundfunk, Fernsehen) entspricht

Für viele *Anwendungen* wird jedoch ein recht *langes Wellenpaket benötigt*

Dazu müssen viele Photonen auf spezielle Weise gekoppelt werden. Das realisiert der *Laser*

Alle Photonen müssen dazu *gleiche Wellenlänge* (Energie) und *gleiche Polarisationsrichtung* aufweisen

Zusätzlich müssen sie nacheinander *in genau passender Zeit und Phase* auftreten

Erst dann ist ein Wellenpaket größerer *Kohärenzlänge* möglich

Lateinisch co zusammen, mit, *haerere* hängen bleiben, haften

Heute sind Werte bis zu mehreren Metern erreichbar

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 53 von 70

Zum Bändermodell

Zu jedem Atom gehören *Energie-Zustände*,

die *Kreis-* und *Ellipsen-Bahnen* entsprechen, auf denen sich die Elektronen bewegen

Der *Bahndurchmesser* kann um den Ort des Atomkernes angeordnet werden \Rightarrow *Energie-Orts-Bild*

Werden mehrere Atome zum Kristall zusammengefügt. So beeinflussen sich die Bahnen

PAULI-Verbot (WOLFGANG PAULI; 1900 - 1958) im Kristall können nicht „*gleich-energetische*“ vorkommen

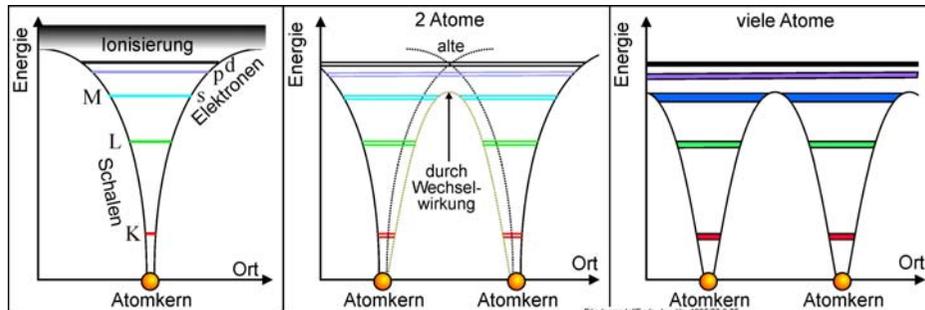
Die *Energieniveaus* verbreitern sich dadurch im Kristall zu *Bändern*

Ab einer bestimmten Energie gehören dann einzelne *Elektronen* zu keinem einzelnen Atom

Sie gehören zum gesamten Kristall und sind daher *frei beweglich*

Dieses erste Band ist das *Leitungsband*

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 54 von 70



H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 55 von 70

Stimulierte Emission

Wechselwirkung zwischen Licht und Materie *drei wichtige Prozesse*

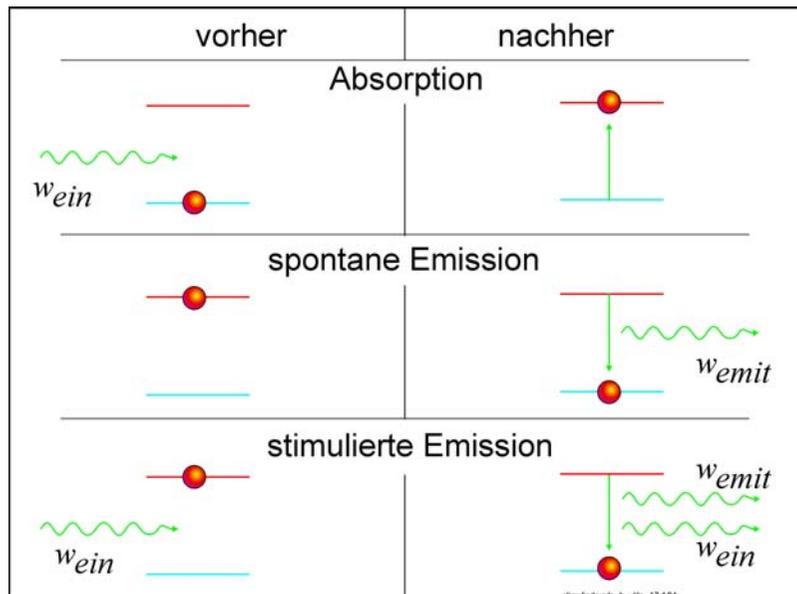
1. **Absorption:** Licht (oder andere Energie) hebt ein Elektron auf eine höhere Bahn (Term, Band). Das Elektron bzw. Atom befindet sich dann im „*angeregten*“ Zustand
2. **Spontane Emission:** das angeregte Elektron geht zu einer Bahn mit niedriger Energie über. Die *Energiedifferenz ΔE* wird als *Photon* mit der Frequenz $\nu = \Delta E/h$ *abgestrahlt*
3. **Stimulierte Emission:** sagte 1916 ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955) voraus. Angeregtes Elektron mit ΔE wird durch ein Photon mit ΔE quasi resonanzartig in den Grundzustand überführt. So wird zweites gleiches Photon erzeugt, das sich phasenstarr an das Wellenpaket des primären Photons anhängt

Die stimulierte Emission bedeutet Lichtverstärkung

1928 gelang es RUDOLF LADENBURG (*1882) und HANS KOPFERMANN (*1895) den Effekt nachzuweisen

Zur praktischen Nutzung müssen jedoch langfristig viele angeregte Elektronen bereitstehen

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 56 von 70



H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 57 von 70

Indirekter Übergang

Allgemein sind die **Bänder** im Energie-Orts-Diagramm nicht auf konstanter Höhe, sie sind **verbogen**

direkter Übergang

Minimum vom oberen befindet sich mit Maximum vom unteren Band am gleiche Ort (Radius)

Dann stellt sich eine thermische stabile Belegungsdichte beider Bänder E_1 und E_2 mit Elektronen ein

Es werden gleichviel Elektronen auf das höhere Niveau gehoben wie herunterfallen

Belegungsdichte der Bänder mit Elektronen gehorcht daher der thermodynamischen BOLTZMANN-Verteilung ein

Indirekten Übergang

Maximum vom unteren Band ist seitlich gegenüber Minimum vom oberen seitlich verschoben

Zusätzlich wird daher „**seitliche**“ (**thermische**) **Energie** für das Herunterfallen auf E_1 benötigt

Hängt vom **thermischen Zufall** ab, daher kann sich Emission erheblich, sogar **bis zu Stunden verzögern**

Deshalb heißt der Zustand E_2 **metastabil**, auf ihn können viele Elektronen langfristig gebracht werden

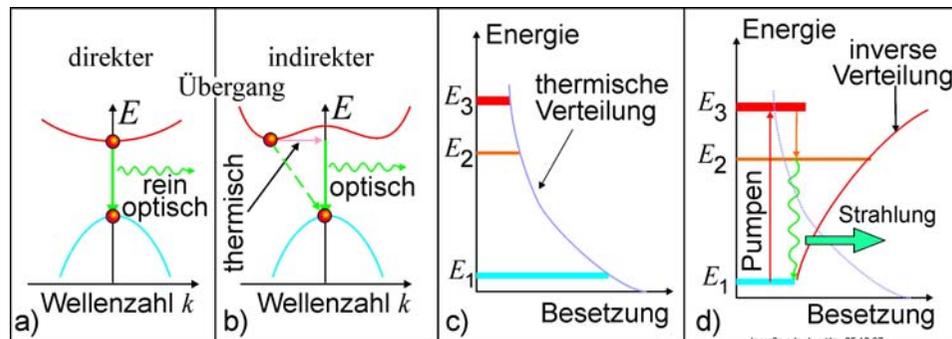
Hierfür ist **dritter Term** E_3 und **Pumpen** erforderlich

Pump-Energie kann u.a. durch Licht, elektrischen Strom oder mittels chemische Reaktionen zugeführt werden

Von E_3 fallen Elektronen sofort zum metastabilen Zustand E_2 und bleiben dort lange erhalten

So entsteht eine **inverse Häufigkeitsverteilung**

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 58 von 70



H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 59 von 70

Der Laser, ein Lichtblitz

Setzt die **inverse Verteilung**, viele Elektronen auf E_2 voraus

Sie kann spontan durch die **stimulierte Emission** aufgehoben werden

Dann fallen ein bis alle Elektronen zum Grundzustand E_1 und **erzeugen dabei Photonen**

Damit eine **große Kohärenzlänge** entsteht müssen viele Elektronen fest verkoppelt werden

Erfordert „**Synchronisation**“ mittels Lawineneffekt notwendig

Hierzu dient ein **Interferometer** aus zwei parallel angeordneten Spiegeln = **FABRY-PÉROT-Resonator**

Resonator lateinisch *re-* wieder, zurück; *sonare* tönen, hallen; *resonare* wieder ertönen

Interferometer lateinisch *ferire* schlagen, treffen

CHARLES FABRY (1867 – 1945) und ALFRED PÉROT (1863 – 1925) benutzen es zur frequenzselektiven Filterung

Spiegelabstand muss möglichst **wenige ganzzahlige Vielfache n** der entstehenden Wellenlänge λ sein

Die ersten herunterfallenden Elektronen erzeugen dann eine **stehende Welle** im Interferometer

Sie bewirkt **synchronisiert das Herunterfallen** aller Elektronen von E_2

Hat einer der beiden Spiegel eine **Lichtdurchlässigkeit** von 1 bis 10 %, so tritt dort **ein Lichtblitz** aus

Er besitzt bei großer Kohärenzlänge nur **eine Wellenlänge und Polarisation**

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 60 von 70

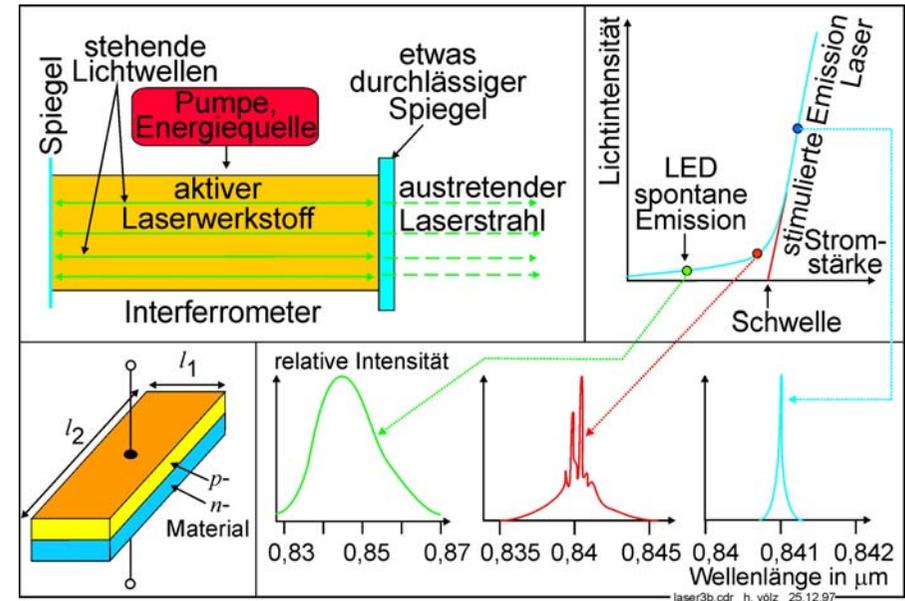
Der Laser, ein Lichtstrahl

Für einen Lichtstrahl ist eine **dichte Folge von Lichtblitzen** notwendig
 Für **jeden Lichtblitz** muss erst wieder E_2 durch **Pumpen** aufgefüllt werden
 Die darauf folgenden Lichtblitze können eine etwas **andere Polarisation** besitzen
 Auch ihre Wellenlängen können etwas abweichen, weil sich im Resonator ein etwas anderes $n \cdot \lambda$ ausbildet
 Insgesamt kann so nur ein (quasi-) **kontinuierlicher Lichtstrahl** erzeugt werden

Die **Energiedichte** im **3-Terme-Laserwerkstoff** ist sehr hoch
 Das brachte und bringt Probleme bzgl. seiner **Lebensdauer**
 Für CD-Abtastlaser wurden um 1984 ≈ 1000 Betriebsstunden erreicht, 1987 waren bereits 20 000 üblich.

Daher entstanden **zunächst** und **immer noch** für bestimmte Wellenlängen nur **Impulslaser**

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 61 von 70



H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 62 von 70

Früh-Geschichte des Lasers

1953 realisierte **Charles Hard Townes** (*1915) den ersten Maser (microwave ...) bei Mikrowellen
 1957 gelang ihm mit ARTHUR LEONARD SCHAWLOW (1921 – 1999) die erste infrarote Variante
 1958 schlug NIKOLAJ GENNADIJEWITSCH BASSOW (*1922) den Halbleiter-Laser vor
 1959 erschien die wesentliche Arbeit für die Definition des Lasers von GORDON GOULD (*1920)
 1960 THEODORE HAROLD MAIMAN (*1927) erster funktionierender Laser: Rubin-Kristall und Blitzlampe für 694 nm
 1962 realisiert BASSOW den Injektions-Halbleiter-Laser auf Basis von GaAs
 1978 Laserdisk mit He-Ne-Gaslaser
 1982 Anwendung des Halbleiterlasers beim CD-Spieler
 1995 entstanden erste blaue Laser, Grüne Laser sind immer noch ein Problem
 2004 wurden weltweit $>5 \cdot 10^8$ Laser produziert, $\frac{2}{3}$ für CD- und DVD-Laufwerke, $<\frac{1}{3}$ für Nachrichtentechnik

Heute viele Anwendungen

u.a. Werkstoffbearbeitung, Medizin, Messtechnik, Wissenschaft, Holographie, Daten- und Militärtechnik

Konsumsektor z.B. Laser-Pointer, RGB-Projektoren, Discos-Laser-Show und Speicherung

Durch die oft sehr hohe Strahlungsintensität besteht z.T. erhebliche Gefahr für **Augenverletzungen**

Spezielle Laser: sehr hohe Leistungen, sehr kurze Impulse (bis herab zu as) und durchstimmbare Wellenlängen

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 63 von 70

Laser-Varianten

Wichtige Unterscheidungen betreffen das **Lasermaterial** und z. T. die **Energie des Pumpens**

- **Festkörper-Laser** benutzen speziell dotierte Kristalle als Laser-Material, z. B. Rubin 694,3 nm)
Lateinisch rubeus rot = Edelstein aus Korund ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), der durch geringe Mengen Cr_2O_3 tiefrot gefärbt ist.
 Glas, YAG (Yttrium-Aluminium-Granat), Neodym (1,064 μm), Ytterbium (940 nm) und Titan (670 - 1100 nm)
Pumpen erfolgt mittels energiereicher Blitzröhren
- **Gas-Laser:** Resonator mit Gas gefüllt, z. B. HeNe (632 nm), CO_2 (11 μm , wichtiger Industrie-Laser), CO (6–8 μm), N_2 (337 nm), Ar (mehrere Linien 450 – 500 nm) und He (442 und 325 nm)
 Gasdruck: 10 bis 10^6 Pa
Pumpen: elektrische Gasentladung, seltener Mikrowellen, Spektralbereich reicht fernes IR bis UV
- **Farbstoff-Laser** nutzen organische Farbstoffe in alkoholischer Lösung (oft Methanol oder Ethanol) bzw. durchsichtigen Werkstoff mit Farbzentren.
Pumpen mit Blitzröhren oder Stickstoff-Gas-Laser
 Sind zuweilen in einen Wellenbereich durchstimmbar
- **Chemische Laser** nutzen zum *Pumpen* von chemische Reaktionen
- **Halbleiter-Laser** = Injektions-Laser nutzt den Stromfluss eines *pn-Übergangs* zum *Pumpen*
 besitzt negativen Temperaturkoeffizienten \Rightarrow Gefahr der Selbsterstörung \Rightarrow Strombegrenzung notwendig
 Problem der Intensitätssteuerung, oft nur ein-ausschaltbar

H. Völz angelegt 1.11.10 aktuell 08.11.2010 Seite 64 von 70

Halbleiter-Laser

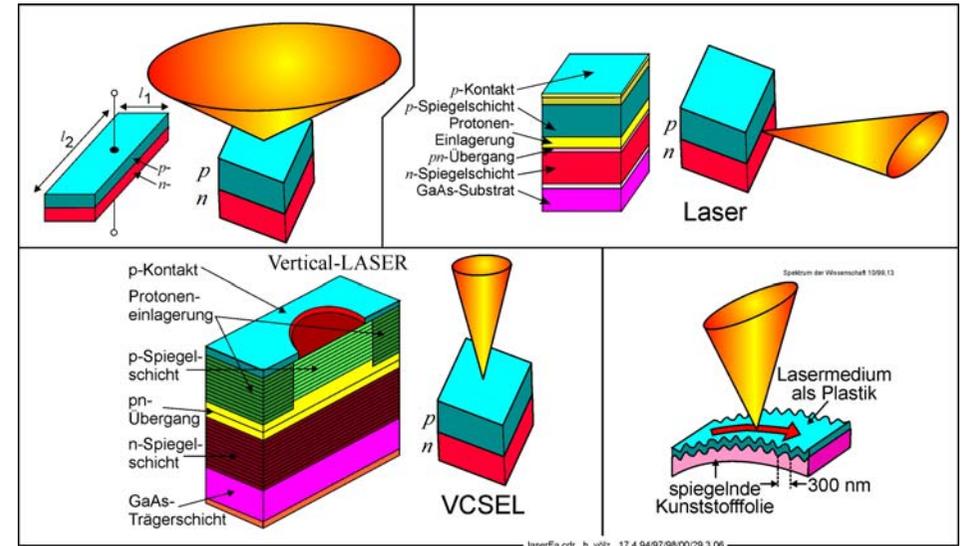
Vorstufe ist **LED** (light emitting diode) = Lumineszenz- = Leuchtdiode, strahlt ihr Licht in einem Kegel ab
Laser: zwei gegenüberliegende **Grenzflächen** werden **verspiegelt**, bilden FABRY-PÉROT-Resonator
 Anordnung der Grenzflächen bewirkt eine **seitliche Lichtabstrahlung**
 Oft zwei unterschiedliche Breiten $l_1, l_2 \Rightarrow$ **Abstrahlkegel** nicht kreisförmig, sondern **elliptisch**

Später wurde der **Resonator in Richtung des pn-Überganges** angeordnet. Dann erfolgt eine **seitliche Abstrahlung**

90er Jahre entstand **VCSEL** (vertical cavity surface emitting laser \approx vertikal vertiefter Oberflächen-Emitter)
 Ober- und unterhalb, aber parallel zum pn-Übergang Vielfachschichten = Spiegelschichten
 Brechungsindex ändert sich dann periodisch mit einem Abstand \approx Lichtwellenlänge λ
 Entspricht Gittern, erstmalig Sir WILLIAM HENRY BRAGG (1862 – 1942) für Moleküluntersuchungen benutzt
 Daher = **BRAGG-Strukturen** oder -Gitter bzw. Phasen-Gitter
 Wirken beim VCSEL wie ein Resonator: Licht kann nur senkrecht zu ihnen, in vorgegebener Wellenlänge austreten
 Vorteilhaft: Anzahl der Moden wesentlich eingeschränkt, typische Halbwertsbreiten $\Delta\lambda \approx 10^{-4} \text{ nm}$
 Schmaler Strahlungskegel $\approx 10^\circ$ ermöglicht gute **Einkopplung in Lichtleiter**

Weiterentwicklungen: IGL = indexgeführter Laser; von Brechungsindex
 DBF = distributed feed back \approx verteilte Rückkopplung
 DBR = distributed Bragg reflector \approx verteilter Bragg-Reflektor

Seit einigen Jahren im Labor Laser mit **organischem** Material \Leftrightarrow organischen LED + Oberfläche = BRAGG-Stuktur



Direkte Lichtspeicherung

Photonen besitzen **Ruhemasse Null**, müssen sich daher mit Lichtgeschwindigkeit **bewegen**
 Im Material mit Brechungsindex n verlangsamt sich die Geschwindigkeit auf c/n
 Damit Photonen eingefangen werden und ruhen, muss $n \rightarrow \infty$ gelten $\Rightarrow \lambda \rightarrow \infty$
 Zum Speichern müssen daher Photonen-Zustände reversibel auf andere **Objekte, z.B. Atome, übertragen** werden

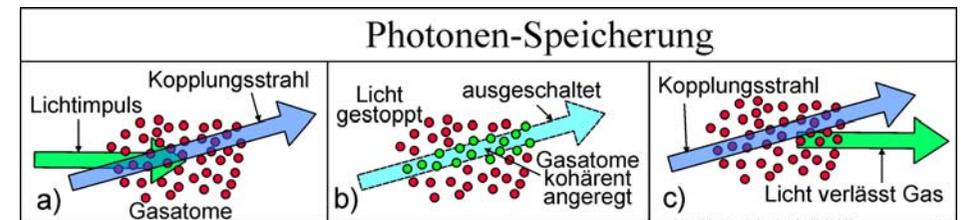
Hierfür sind bisher **drei Möglichkeiten** bekannt geworden

Lichtspeicherung I, zusätzlicher Kopplungsstrahl

Photonen-**Frequenz** muss mit **Absorptionsbande eines Gases** (z. B: Cs oder Ru) übereinstimmen
 Kontrollstrahl teilt Energieterm der Atome in zwei Terme geringerer Energie
 Photonen werden dann nicht vom Gas absorbiert, sondern nur etwas abgebremst
 Gas ist dabei für die Photonen (Lichtimpuls) durchsichtig = **EIT** = elektromagnetisch induzierte Transparenz

Wird **Kontrollstrahl abgeschaltet** \Rightarrow Photonen werden im Gas absorbiert, festgehalten = **Aufzeichnung**
 = **Dunkelzustands-Polarisation**, für etwa $10 \mu\text{s}$ stabil

Wird **Kontrollstrahl wieder eingeschaltet**
 \Rightarrow Atome geben den zuvor eingefangenen Lichtimpuls wieder unverändert frei = **Wiedergabe**



Direkte Lichtspeicherung II, Verbogene Bandstruktur

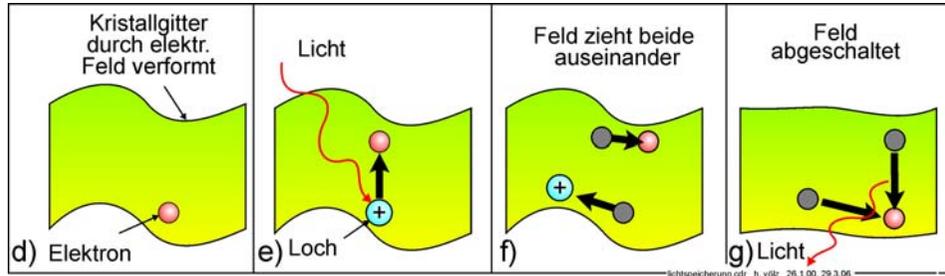
Mit einem speziellen elektrischen Feld wird die **Bandstruktur örtlich verbogen**

Photon hebt dann ein Elektron auf ein höheres Niveau

Das verformte Band **verschiebt** das zurückgebliebene „**Loch**“ und das angehobene **Elektron** seitlich **voneinander**

Weil es keinen senkrechten Übergang gibt, kann Elektron nicht zurückkehren, Photon ist gefangen = **Aufzeichnung**

Aufhebung der Bandverformung gibt es frei \Rightarrow Photon-**Wiedergabe**



Direkte Lichtspeicherung III, Farblose, goldhaltige Kristalle

speichern ultraviolettes Licht auf noch nahezu **unbekannte Weise**

Anschließend Kontakt mit einer Flüssigkeit (z. B. Dichlormethan)

Wird Licht als gelbe Fluoreszenzstrahlung 10 s abgestrahlt = **Wiedergabe**

= **Solvolumineszenz** ist beliebig oft wiederholbar