Probestudium Physik 2020

Der Welle-Teilchen-Dualismus

oder: Licht = Welle oder Teilchen?

1.VO Jochen Heub: Mathematik, Vektorrechnung in der Ebene

3.VO nächste Woche: FWM, von der Quantenmechanik zum Quantenalgorithmus

→ diese VO: Brücke zwischen diesen Veranstaltungen, wir benutzen die Vektordarstellung aus der Mathematik um Licht als Welle zu beschreiben, sehen aber auch, dass in manchen Exp. Licht als Teilchen (Photon) angenommen werden muss.

- Diese Exp. Erkenntnisse haben zur Entwicklung der QM geführt.
- Frage: lassen sich diese beiden Darstellungen Welle vs. Teilchen vereinbaren?

1. Wellen und Wellenbewegung

- bekannt (?): Schwingungsbewegung, z.B. Federpendel – periodische Bewegung von Körpern
- Wellen: ebenfalls periodische Bewegungen, aber Ausbreitung in Raum und Zeit
  - = räumliche Ausbreitung von Schwingungen

- Wellenausbreitung in Medien:
  Wasser- / Schall- / Seismische Wellen (Erdbeben)
- Ausbreitung ohne Trägermedium:
  elektromagnetische (elm.) Wellen, z.B. Radiowellen, Licht

Wellenausbreitung

formal: Eine Welle ist ein Vorgang, bei dem sich eine Schwingung vom Ort ihrer Erregung infolge von Kopplungen an benachbarte, schwingungsfähige Systeme im Raum ausbreitet ... (-> Folie)

- falls Auslenkung ⊥ Ausbreitungsrichtung der Störung
  -> transversale Welle (z.B. Seilwelle) | Tipler 12.1
- falls Auslenkung ∥ Ausbreit.-richt. -> longitudinale Welle (z.B. Schallwelle, Komprimierung / Ausdehnung eines Mediums) | Tipler 12.2
- Wellen können sich in mehreren Dimensionen ausbreiten (wie viele Dim. brauche ich zur Beschreibung der Ausbreitung?)

  1D -> Seilwelle, long. Feder-Welle
  2D -> Wasserwelle (Kreiswelle, ebene Welle)
  3D -> Kugelwelle (z.B. punktförmige Schallquelle) | Tipler 12.3

- Flächen konst. Auslenkung (z.B. Wellenberge bei Wasserwellen) = Wellenfronten | Tipler 12.4
- Abstand zwischen 2 Wellenfronten = Wellenlänge

Math. Beschreibung der Wellenausbreitung

|Tipler 12.7|

- betrachte Wellenberg zur Zeit $t = 0$ im Koord.syst. mit Ursprung O
- Form des Wellenbergs sei durch Fkt. $y = f(x)$ beschrieben
- Wellenberg bewegt sich mit Geschw. v in pos. x-Richt.
- $t > 0$: Wellenberg hat sich nach rechts bewegt; Annahme: hat Form beibehalten (also durch gleiche Fkt. beschrieben)
- 2 Möglichkeiten zur Beschreibung:
  1) neues x bestimmen, Fkt. dort ausrechnen
  2) Koord.syst. mit Wellenberg bewegen → "bewegtes Bezugssystem" → neues Koordsyst. (x', y') mit Ursprung O'
- Wellenberg jetzt beschreiben durch $y' = f(x')$ mit Transformation:

$$y' = y$$
$$x' = x - v \cdot t$$

$\Rightarrow f(x') = f(x - v \cdot t)$

$\Rightarrow$ Funktionsgleichung der Welle im unbewegten Koord.syst.:

$$(1) \quad \boxed{\begin{array}{l} y = f(x - v \cdot t) \\ y = f(x + v \cdot t) \end{array}} \quad \begin{array}{l} \text{für pos. x-Richt.} \\ \text{/. neg. x-Richt.} \end{array}$$

- v: Ausbreitungsgeschw. der Welle
- Fkt: $f(x - v \cdot t)$: Wellenfunktion

Harmonische Wellen

- wenn jeder Punkt des Mediums harmonische Schwingungen (z.B. lineares Kraftgesetz) ausführt
  → harmonische Welle

| Tipler 12.2 | harmon. Welle für festen Zeitpunkt t

- jeder Punkt: Schwingung mit Frequenz ν und Schwingungsdauer $T = 1/\nu$
- während T bewegt sich Welle um λ → Geschw.:

$$\boxed{v = \frac{\lambda}{T} = \nu \cdot \lambda} \quad (2)$$

- harmon. Welle wird oft durch Sinusfkt. beschrieben

$$\underbrace{y(x)}_{\text{Auslenkung}} = \underbrace{A}_{\text{Amplitude}} \cdot \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) = A \cdot \sin(k \cdot x) \quad \text{für festes } t$$

$y(x)$ unverändert, wenn x um Vielfaches von λ verschoben

mit $\boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda}}$ (3) Wellenzahl

- für beliebige Zeiten: $x \to x - v \cdot t$

$$\Rightarrow y(x,t) = A \cdot \sin(k(x - v \cdot t)) = A \sin(kx - kvt)$$

mit (2), (3): $k \cdot v = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \nu \cdot \lambda = 2\pi\nu = \omega$

mit $\boxed{\omega = 2\pi\nu}$ (4) Kreisfrequenz

$$\Rightarrow \boxed{y(x,t) = A \cdot \sin(kx - \omega t)} \quad (5)$$

harmonische Wellenfunktion

→ Folie: harm. Welle
- für festen Ort/Zeit

2. Elektromagnetische Wellen

- Licht ist eine elm. Welle = oszillierende elektrische u. magnetische Felder erzeugen sich gegenseitig und breiten sich gemeinsam aus
- oft nur el. Feld betrachtet; beschreiben durch el. Feldstärke: $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ Vektor!
- elm. Welle (im Vakuum) ist Transversalwelle
  → 1 Koord. zur Beschreibung der Ausbreitung, 2 Koord. zur Beschreibung der Richtung des el. Feldes in Ebene $\perp$ zur Ausbreitungsrichtung (z)
  (x,y)

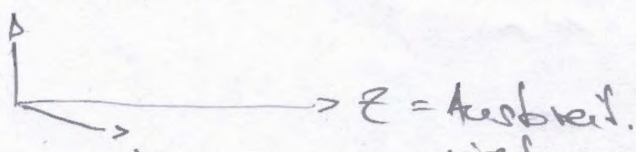
$$\Rightarrow \boxed{\vec{E}(z,t) = \vec{E_0}\,\sin(k\cdot z - \omega\cdot t) = \begin{pmatrix} E_{0,x} \\ E_{0,y} \end{pmatrix} \cdot \sin(kz - \omega t)} \quad (6)$$

mit $\vec{E_0} \perp \hat{e_z}$; $\hat{e_z}$: Einheitsvektor in z-Richtung

andere Schreibweise: $\vec{E_0} = E_{0,x}\,\hat{e_x} + E_{0,y}\,\hat{e_y}$

- wenn $\vec{E_0} = \text{const.}\ \forall t$ → <u>linear polarisierte Welle</u>
  → E-Feld schwingt in einer Ebene | Dem: 7.4

- für Koordinatensystem

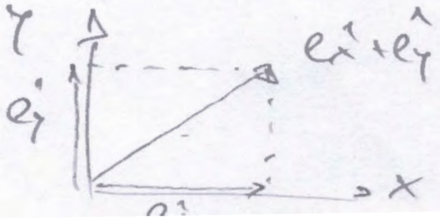


$\vec{E_0} = E_0\,\hat{e_x} = E_0\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$ → <u>horizontal</u> pol. ↔ H

$\vec{E_0} = E_0\,\hat{e_y} = E_0\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$ → <u>vertikal</u> pol. ↕ V

$\vec{E_0} = E_0\,\frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e_x} + \hat{e_y})$ → <u>diagonal</u> pol. ↗ D

Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ wegen Normierung:



$\left|\frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e_x}+\hat{e_y})\right| = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e_x}+\hat{e_y})\,\frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e_x}+\hat{e_y})}$

$$\left|\frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e_x}+\hat{e_y})\right| = \sqrt{\frac{1}{2}(\underbrace{\hat{e_x}^2}_{=1}+\underbrace{\hat{e_y}^2}_{=1}+\underbrace{2\hat{e_x}\hat{e_y}}_{=0 \text{ da } \hat{e_x}\perp\hat{e_y}})} = 1$$

$\vec{E_0} = E_0 \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e_x}-\hat{e_y}) \rightarrow$ anti-diagonal pol. ≙ A

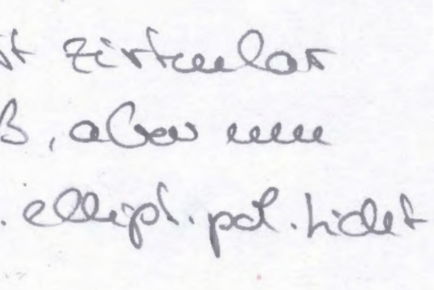
- (H, V) oder (D, A) bilden eine Basis → jede lineare Polarisation kann durch Linear-kombination von H und V (D und A) dargestellt werden.
- speziell: $D = \frac{1}{\sqrt{2}}(H+V) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e_x}+\hat{e_y})$

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}}(D+A) = \frac{1}{\sqrt{2}}\cdot\frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e_x}+\hat{e_y}+\hat{e_x}-\hat{e_y}) = \hat{e_x}$$

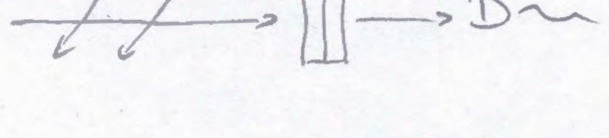
- Anmerkung: zusätzlich existiert zirkular pol. Licht = x, y-komp. gleich groß, aber um 90° phasenverschoben und allg. ellipt. pol. Licht
- Polarisator: optisches Bauelement, das nur Licht einer bestimmten linearen Polarisationsrichtung passieren lässt (z.B. Absorption durch langkettige Farbstoffmoleküle in Pol.folien)
- Wirkung auf lin. pol. Licht:

$E_{0x} = |\vec{E_0}| \cdot \sin\varphi$

$E_{0y} = |\vec{E_0}| \cdot \cos\varphi$



- Polarisator in y-Richtung (V) lässt nur E_{0y}-Komponente durch: $\vec{E}_{trans} = |\vec{E_0}| \cos\varphi \, \hat{e_y}$
- Messung:



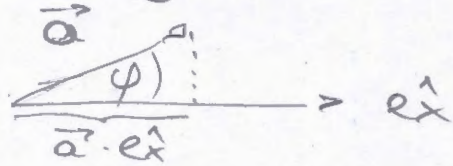
Detektor misst Intensität

- Intensität $I \propto |\vec{E}_{trans}|^2 = \underbrace{|\vec{E}_0|^2}_{I_0} \cdot \cos^2\varphi \cdot \underbrace{\hat{e}_y^{\,2}}_{=1}$

$$\Rightarrow \boxed{I \propto I_0 \cdot \cos^2\varphi} \quad (7)$$ Gesetz von Malus

{VO-Exp + Hinweis auf Prakt. im Probestudium}

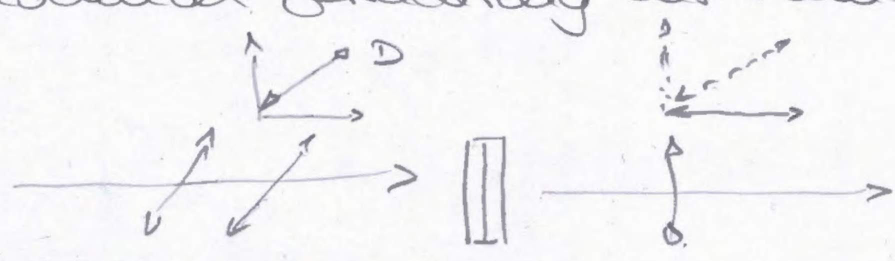
- Erinnerung an Mathematik: orthogonale Projektion von Vektoren



$\vec{a} \cdot \hat{e}_x = \cos\varphi \cdot |\vec{a}||\hat{e}_x|$

$\Rightarrow$ Messung der Polarisation ≙ Projektion des Polarisationsvektors auf Einheitsvektor des Messapparats {allg. Gesetz der QM}

- Messbasis = E.V. des Messapparats kann durch Drehung des Polarisators rotiert werden
  $\rightarrow$ "Basiswechsel"
- Rotation des Polarisationsvektors: Halbwellenplatte, $\lambda/2$-Platte $\boxed{\text{VO-Exp}}$
  z.B. $R_{45°}\,H = R_{45°}\binom{1}{0} = \binom{1/\sqrt{2}}{1/\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\binom{1}{1} = D$
- nochmal Betrachtung des Malus'schen Gesetzes



D-pol. Licht + V-orient. Analysator

$\rightarrow$ $\boxed{\text{Welle wird am Pol. aufgeteilt!}}$

von D-pol. Licht wird $\cos^2(45°) = \frac{1}{2}$ transmittiert, andere Hälfte wird absorbiert oder reflektiert (je nach Bauart Pol.)

- Polarisation = Welleneigenschaft
- viele weitere Exp. zeigen ebenfalls die Wellen-eigenschaft von Licht, z.B. Interferenz, Beugung
- allerdings gibt es Exp., die sich nicht durch das Wellenbild erklären lassen, z.B.

  Strahlung schwarzer Körper

  Photoeffekt

→ hier ein Hallwachs-Exp als $\boxed{\text{VO-Exp}}$

  Beobachtungen auflisten

  Einstein-Erklärung des Photoeffekts

  Hinweis auf Probestudium-Praktikum:

  Bestimmung von h aus Photoeffekt

→ Hinweis auf Teilcheneigenschaft des Lichts!

- Was passiert mit einzelnem Photon am Polarisator? $\boxed{\to \text{Folie}}$
  - da $V = \frac{1}{\sqrt{2}}(D+A)$ → 50% Wahrsch. für Transmission eines V-pol. Phot. durch D-orientierten Analysator

→ ein V-pol. Photon befindet sich in einem Überlagerungszustand (Superposition) aus einem D- und einem A-pol. Photon

- einfach zu schreiben als math. Superposition:

$$V = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} (D - A) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right\}$$

- aber konzeptionell schwierig: ein Photon kann in beiden Zuständen gleichzeitig sein, erst die Messung = Projektion trifft eine Messwahl
- Vereinigung von Wellen- / Teilchenbild: statistische Deutung
- Superpos.-Zustände = wichtige Ressource für Quantencomputer → nächste VO
- Schrödingers Katze als Beispiel

Veranstaltungsreihe „Quantenwelten“

Probestudium Physik 2020

Licht: Welle oder Teilchen?
Der Welle-Teilchen-Dualismus

Prof. Dr. Christoph Becher

1. Wellen & Wellenbewegung

Eine Welle ist ein Vorgang, bei dem sich eine Schwingung vom Ort ihrer Erregung infolge von Kopplungen an benachbarte, schwingungsfähige Systeme im Raum ausbreitet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt ab von der Stärke der Kopplung und von der Masse der schwingenden Systeme.

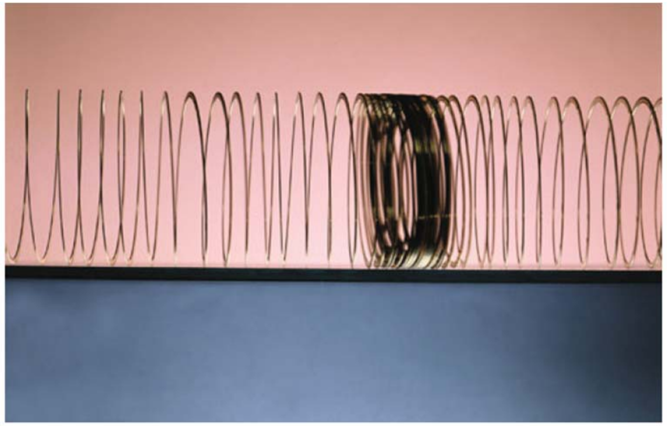


Abbildung 12.2 Longitudinaler Wellenpuls auf einer Feder. Die Störung (Verdichtung, Verdünnung) bewegt sich entlang der Feder. *(© Richard Megna/-Fundamental Photographs.)*

Abbildung 12.3 Von einer punktförmigen Quelle gehen kreisförmige Wellenfronten aus. *(© Alexander Hess/Pitopia.)*

Welle an festem Raumpunkt:

Schwingung

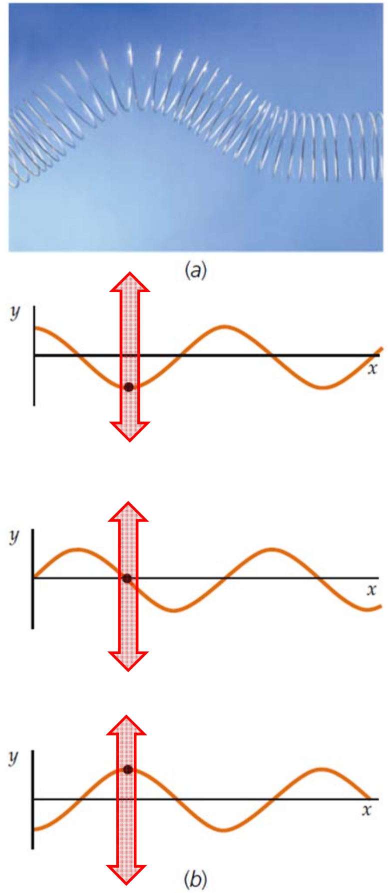


Abbildung 12.1 a) Transversaler Wellenpuls (Wellenberg) auf einer Feder. Die Störung ist senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. b) Drei aufeinanderfolgende Skizzen einer transversalen Welle auf einer Saite, die sich nach rechts ausbreitet. Ein Element der Saite (schwarzer Punkt) bewegt sich auf und nieder, während sich die Wellenberge und -täler nach rechts ausbreiten. *(© Richard Megna/Fundamental Photographs.)*

1. Wellen & Wellenbewegung

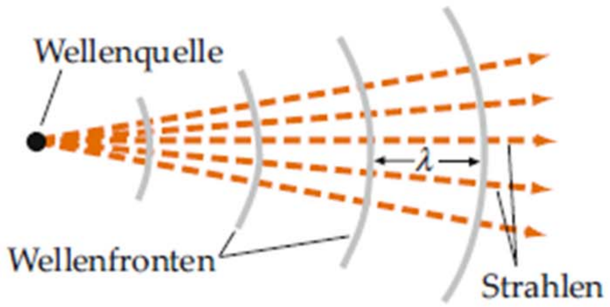


Abbildung 12.4 Die Bewegungsrichtung der Wellenfronten kann durch Strahlen dargestellt werden, die von der Wellenquelle ausgehen und senkrecht zu den Wellenfronten verlaufen. Für eine punktförmige Quelle sind die Strahlen von der Punktquelle ausgehende radiale Linien.

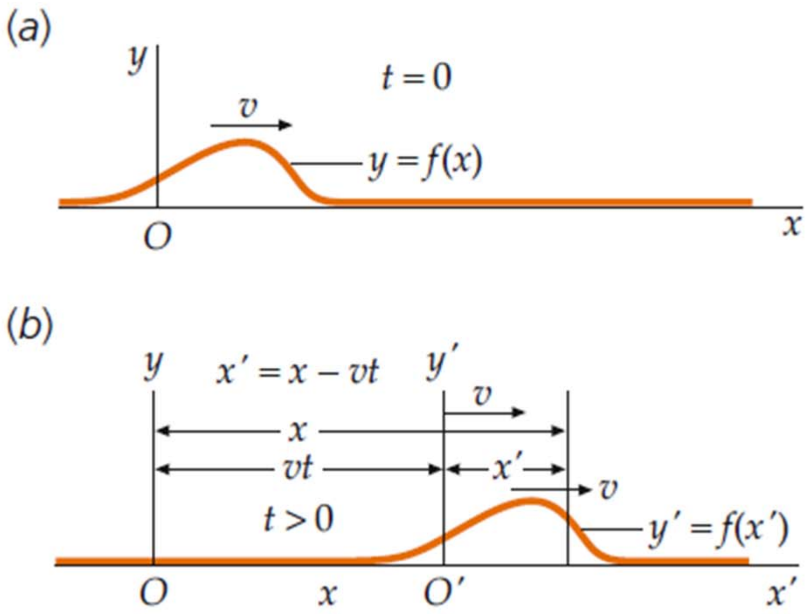


Abbildung 12.7 Ausbreitung eines Wellenbergs längs eines Seils

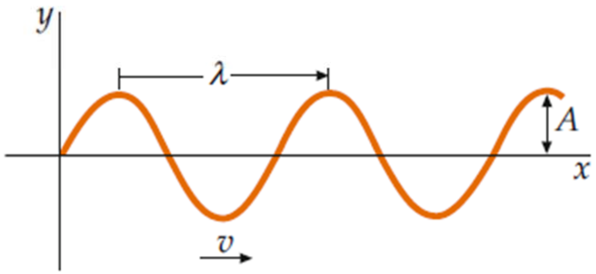


Abbildung 12.12 Harmonische Welle, betrachtet zu einem festen Zeitpunkt. A ist die Amplitude und λ die Wellenlänge. Eine solches Bild erhält man beispielsweise durch eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme einer schwingenden Saite.

1. Wellen & Wellenbewegung

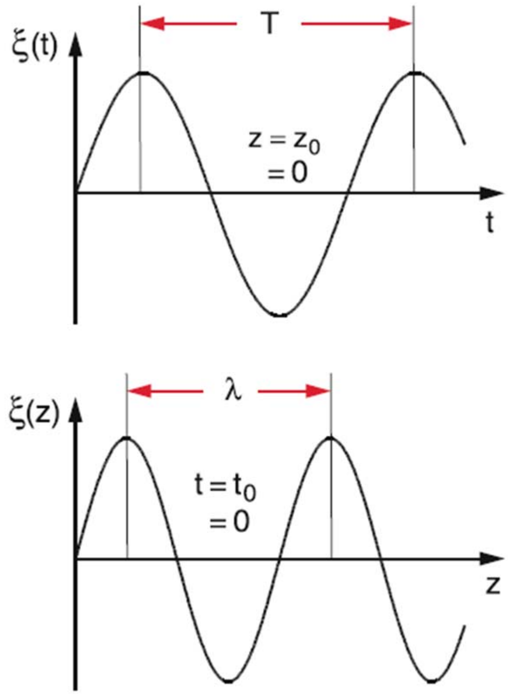
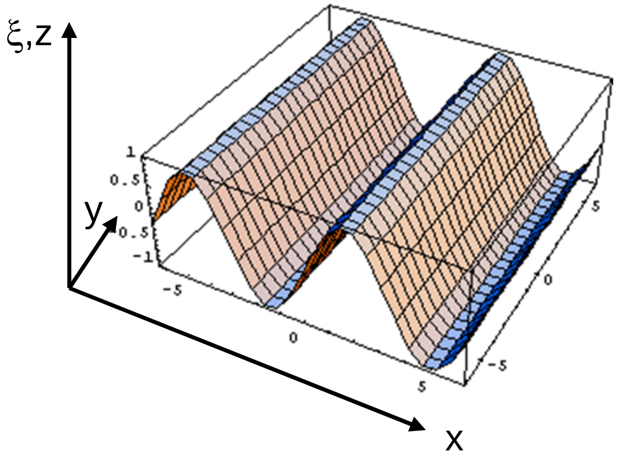
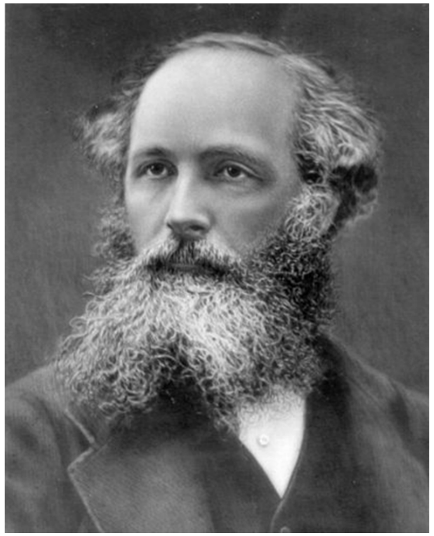


Abbildung 11.37 Darstellung einer harmonischen Welle. **a** als ortsfeste Schwingung $\xi(z_0, t)$ für $z_0 = 0$. **b** als räumliche periodische Funktion $\xi(z, t_0)$ zum festen Zeitpunkt $t_0 = 0$



Licht als elektromagnetische Welle

James Clerk Maxwell
(1831 – 1879)



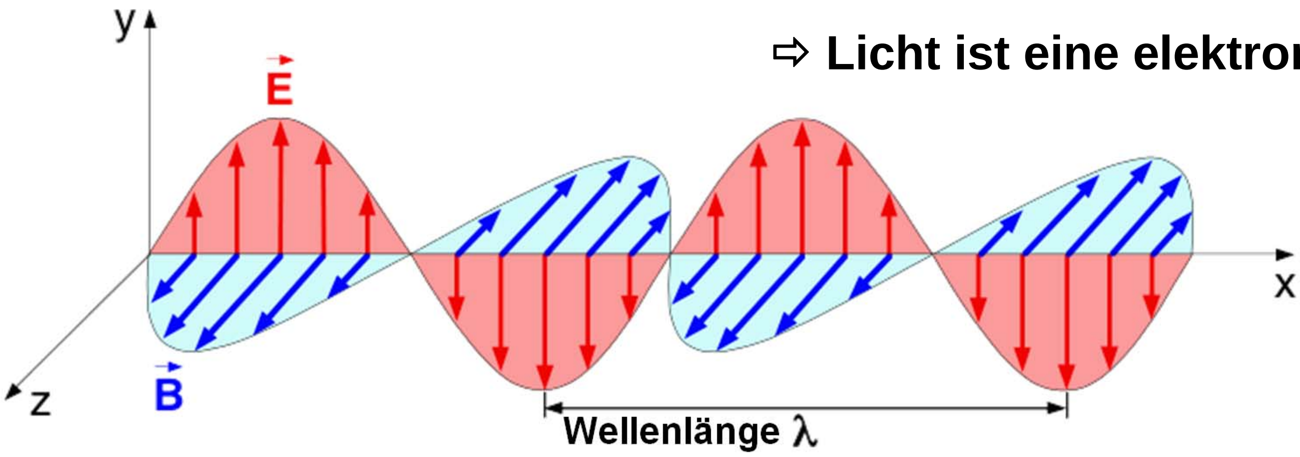
Die Maxwell Gleichungen

$$
\begin{aligned}
\varepsilon_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \rho \\
\vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \\
\vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\
\vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \right)
\end{aligned}
$$

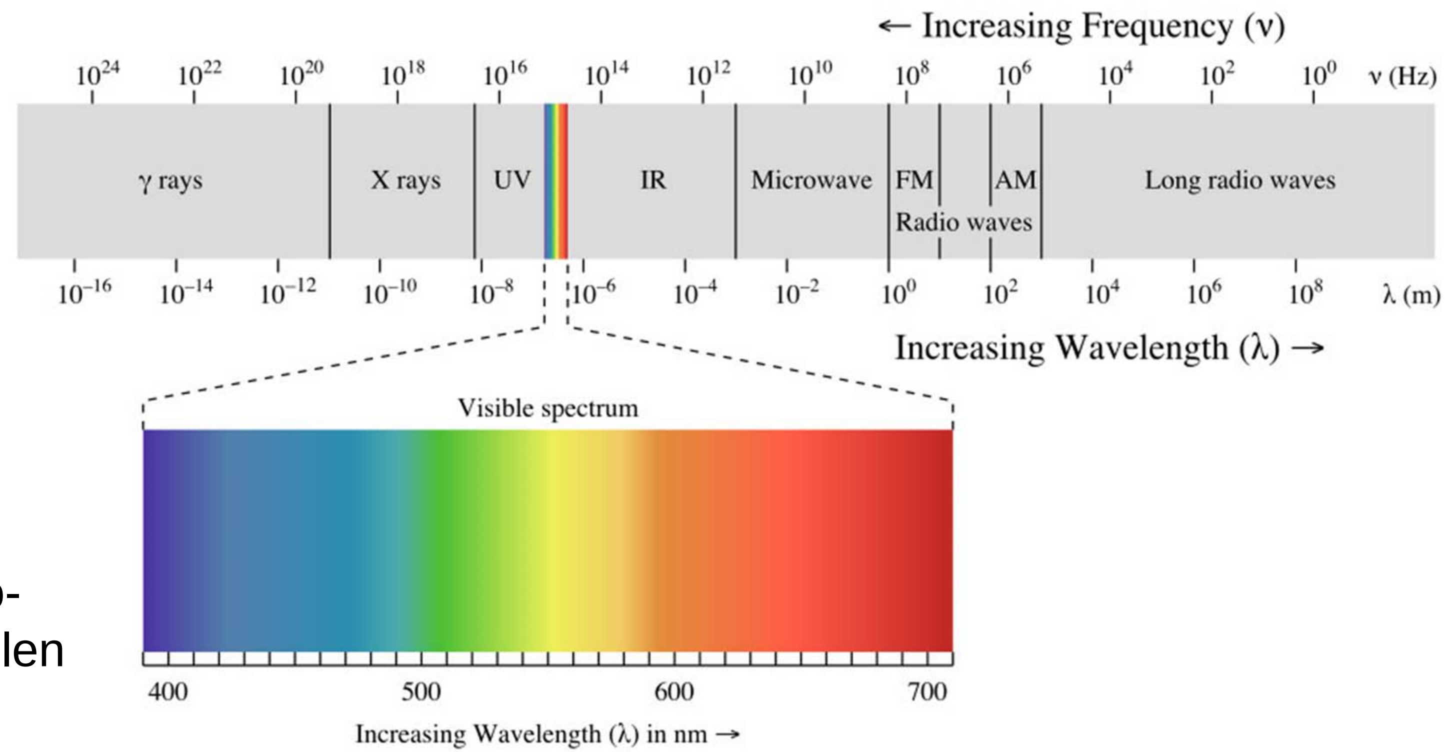
- Grundlage aller elektromagnetischen Phänomene
- Wellengleichung
- Ausbreitungsgeschwindigkeit (theor.) stimmt mit Lichtgeschwindigkeit (exp.) überein

$$\Delta \vec{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}$$

⇨ **Licht ist eine elektromagnetische Welle**



⇨ **Licht ist eine elektromagnetische Welle**



sichtbares Licht ist nur ein kleiner Ausschnitt des Spektrums elektromagnetischer Wellen

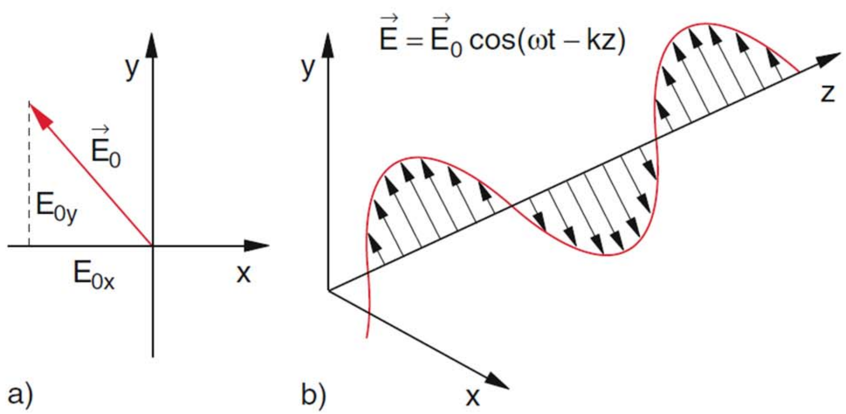


Abbildung 7.4 Momentaufnahme einer linear polarisierten Welle $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 \cdot \cos(\omega t - kz)$. **a** Richtung des Vektors $\boldsymbol{E}$ in der x-y-Ebene. **b** Räumliche Darstellung des elektrischen Vektors $\boldsymbol{E}(z, t = t_1)$

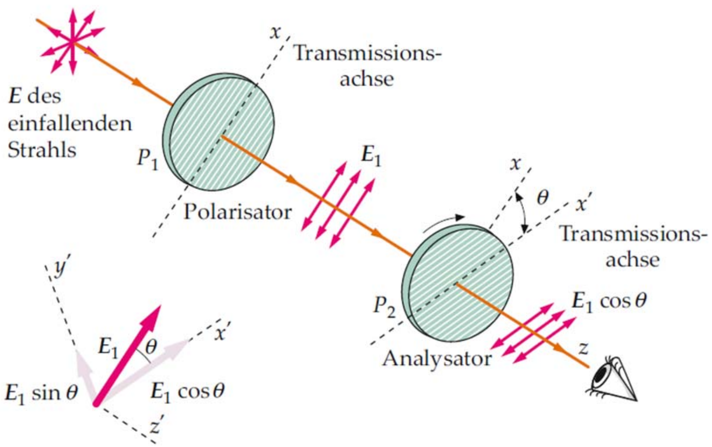


Abbildung 28.32 Ein unpolarisierter Lichtstrahl fällt auf eine Polarisationsfolie, deren Transmissionsachse in Richtung der x-Achse angeordnet ist. Diese Folie lässt polarisiertes Licht mit dem elektrischen Feldvektor $\boldsymbol{E}_1$ durch. Die Welle ist hinter der Folie in Richtung der Transmissionsachse x polarisiert. Ihre Intensität ist I_1, und sie gelangt auf die zweite Polarisationsfolie. Diese bildet gegen die x-Achse den Winkel θ und lässt daher nur die Feldkomponente $\boldsymbol{E}_1 \cos\theta$ durch. Deren Intensität, also die Intensität der von beiden Folien durchgelassenen Welle, ist $I_1 \cos^2\theta$, wobei I_1 nur halb so groß ist wie die ursprüngliche, auf die erste Folie eingestrahlte Intensität I_0.

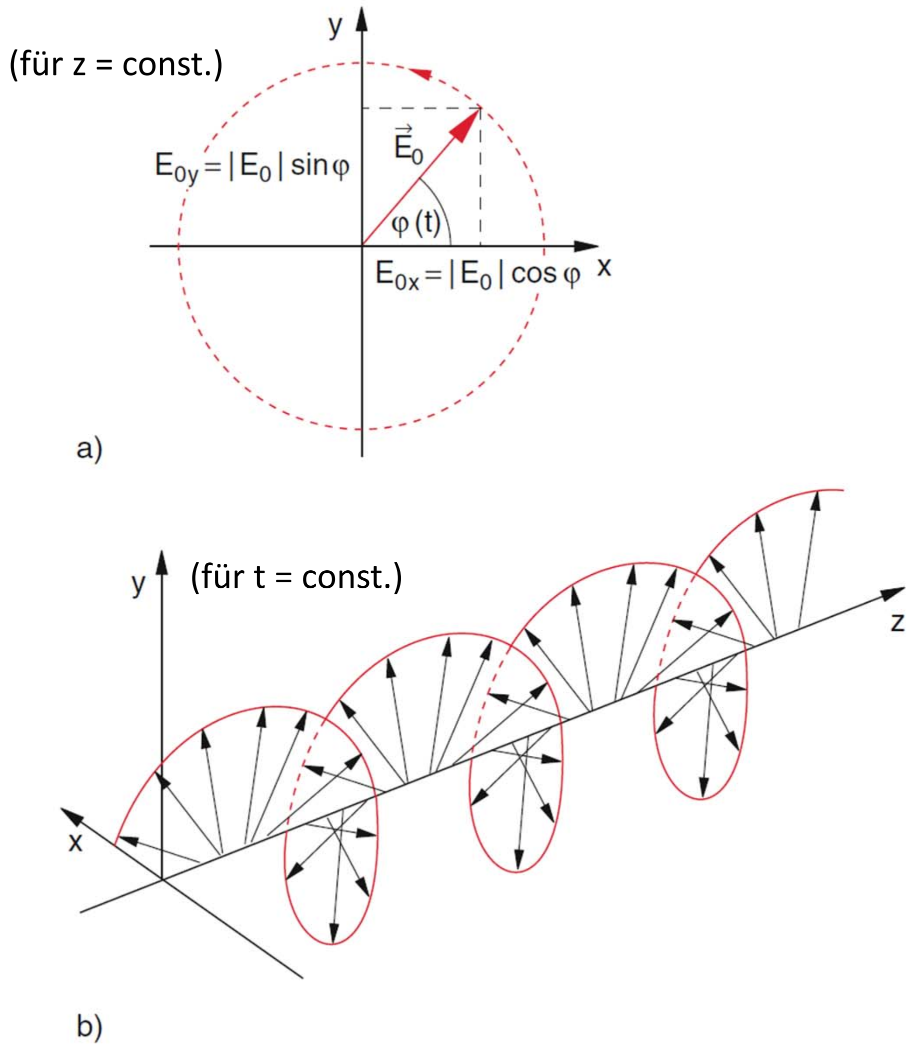


Abbildung 7.5 Linkszirkular polarisierte elektromagnetische Welle. **a** $\boldsymbol{E}_0(x, y)$ mit Blick in $-z$-Richtung; **b** räumliche Darstellung

Photoelektrischer Effekt

Beobachtungen:

- Kinetische Energie der Photoelektronen hängt nur von der Frequenz ν des Lichts ab nicht von der Intensität
- Eingestrahltes Licht muss Mindestfrequenz aufweisen um Elektronen auszulösen
- Zahl der Photoelektronen ist proportional zur Intensität
- Es gibt keine messbare Zeitverzögerung zwischen Elektronen Austritt und Lichteinfall (neueste Exp: ~40 as)

Klassische Erklärung:

- Mindestdauer für Emission bis genügend Energie akkumuliert um W_A zu überwinden
- es existiert keine Mindestfrequenz

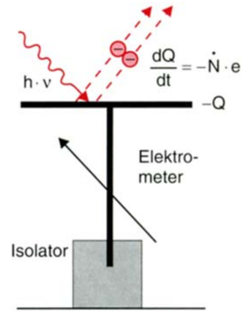


Abb. 3.8. Versuch von *Hallwachs* zum Nachweis des photoelektrischen Effekts

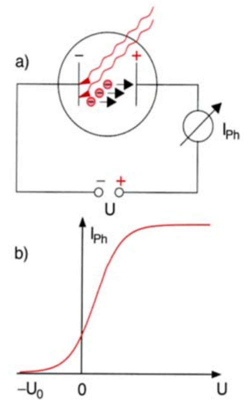
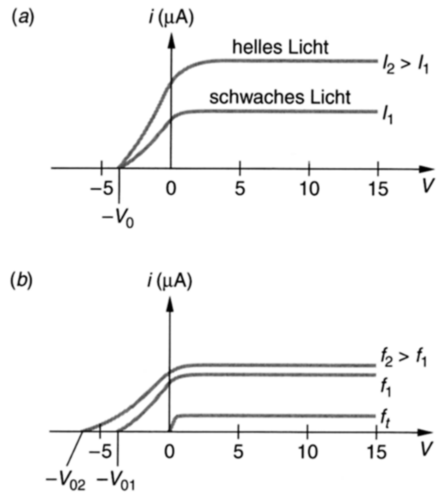


Abb. 3.9. (**a**) Photozelle zur Messung des Photostroms als Funktion der angelegten Spannung; (**b**) Photostrom $I(U)$



ANNALEN

DER

PHYSIK.

BEGRÜNDET UND FORTGEFÜHRT DURCH

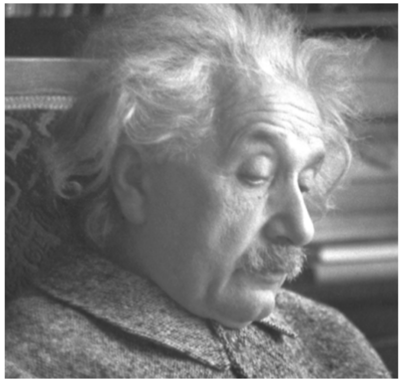
F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

VIERTE FOLGE.

BAND 17.

DER GANZEN REIHE 322. BAND.

- **Erklärung des Fotoelektrischen Effekts durch A. Einstein (1905)**
- **Nobelpreis 1921**



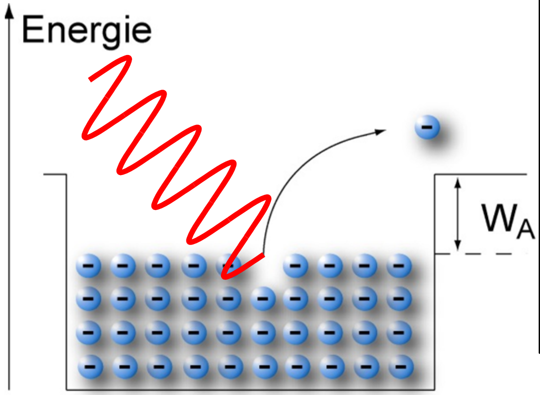
132

6. ***Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;***
von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderabeln Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderabeln

<u>Lichtquantenhypothese</u>

„Monochromatische Strahlung von geringer Dichte verhält sich in wärmetheoretischer Beziehung so, wie wenn sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten der Größe $h \cdot \nu$ bestünde.“



Deutung Photoeffekt durch Einstein

- Jedes absorbierte Lichtquant gibt seine Energie $h{\cdot}\nu$ vollständig an ein Elektron ab
- Kinetische Energie des Elektrons: $E_{kin}^{max} = h{\cdot}\nu - W_A$

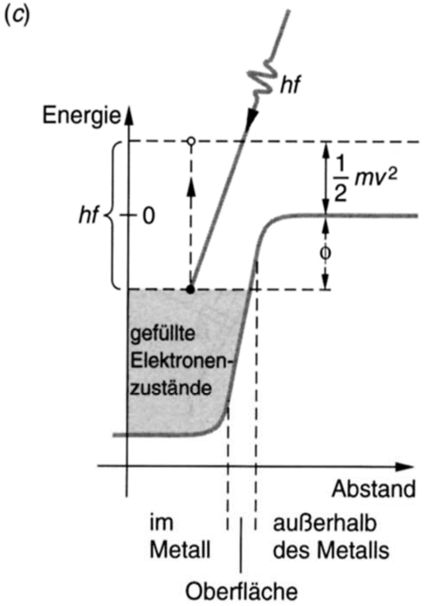


Abb. 3.12. (c) Potentialkurve der Elektronen entlang der Metalloberfläche. Ein Elektron im obersten noch gefüllten Zustand absorbiert ein Photon der Energie hf. Die Energieerhaltung erfordert, daß die kinetische Energie des Elektrons nach Verlassen der Oberfläche $hf - \phi$ ist.

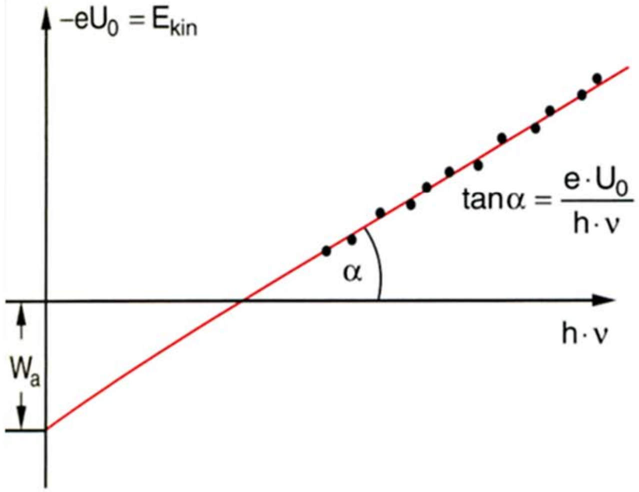
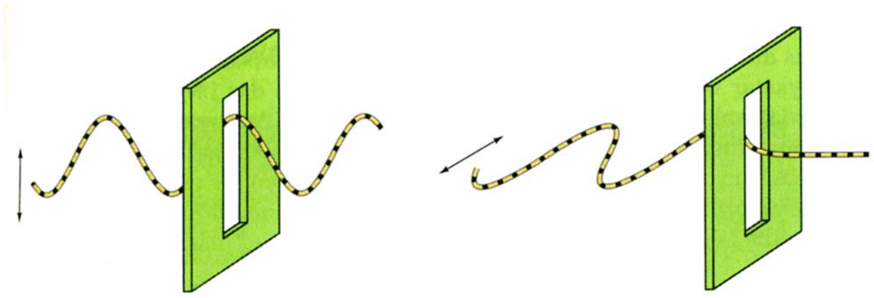


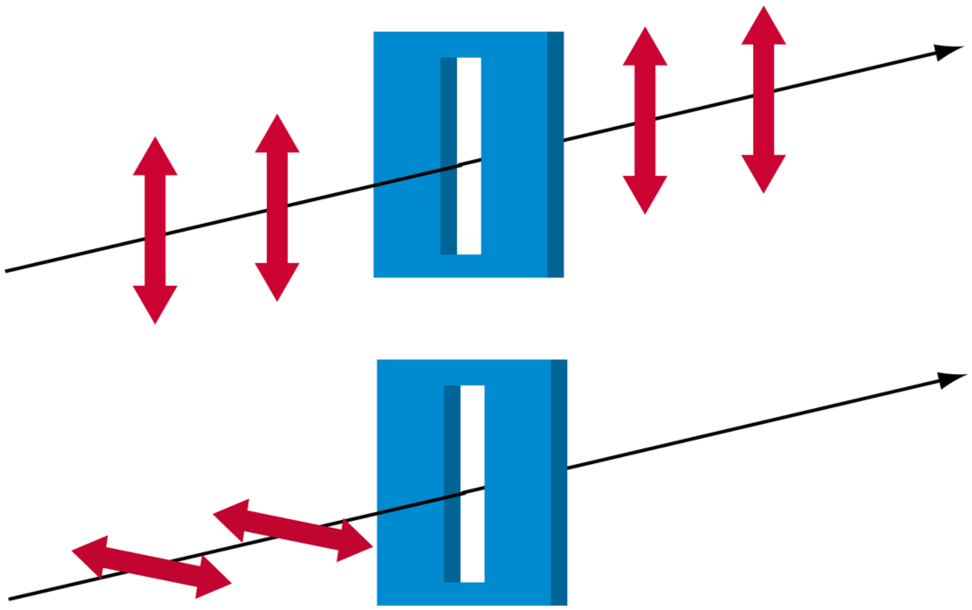
Abb. 3.10. Messung der maximalen Gegenspannung U_0 als Funktion der Frequenz ν des einfallenden Lichtes

Projektion des Polarisationszustandes **einer Welle** am Polarisator

Analyse des Polarisationszustandes: **Polarisator**

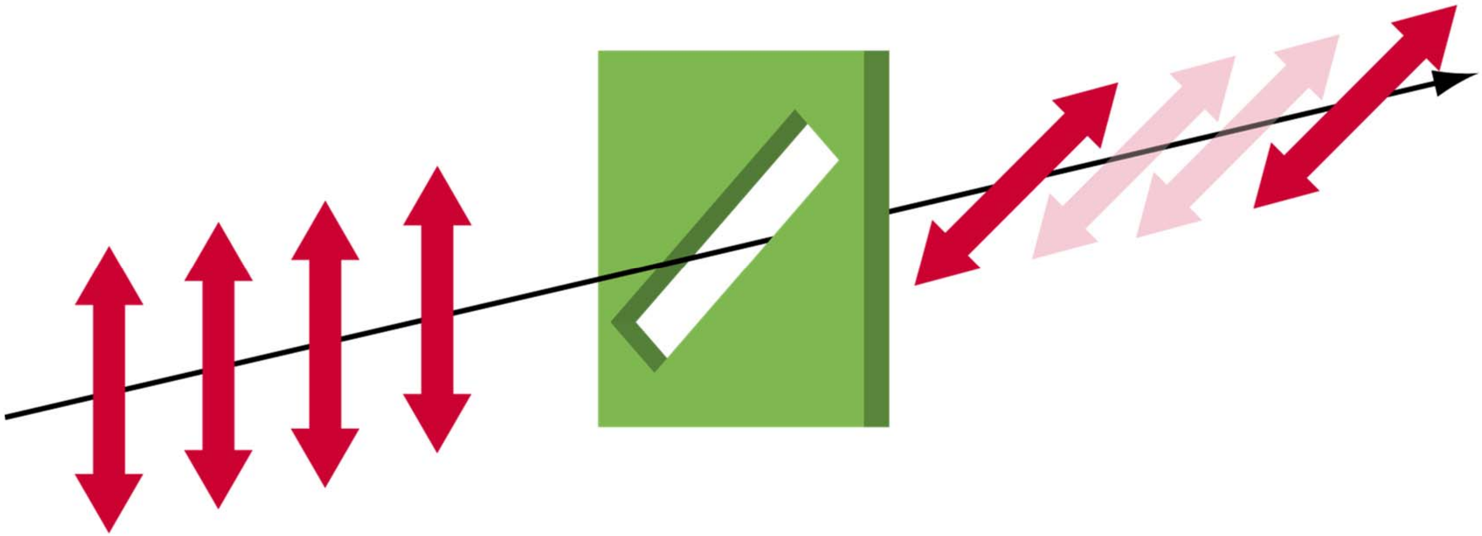
Funktionsprinzip





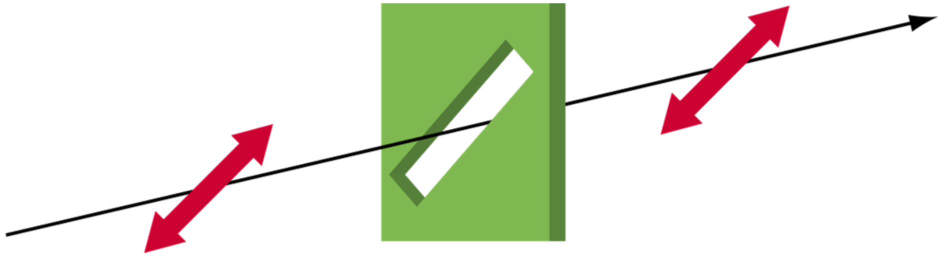
Projektion des Polarisationszustandes **einer Welle** am Polarisator

Analyse des Polarisationszustandes: **Polarisator**



Projektion des Polarisationszustandes **einzelner Photonen** am Polarisator

Passende Polarisationsbasis: deterministische Transmission



Nicht-passende Polarisationsbasis: stochastische Transmission

entweder:

Wahrscheinlichkeit: je 50%

oder:

Schrödingers Katze