Thomas Neukirchner
Humboldt Universität zu Berlin
Institut für Mathematik, I.310
neukirch@math.hu-berlin.de

Dualismus: Von der Anschauung zum Formalismus

Vortrag im Hauptseminar bei Prof.L.-H.Schön - SS06

'Philosopische Grundgedanken zur Struktur der Physik'

Inhaltsverzeichnis

1 Eine kurze Geschichte des Lichts (17.-19.Jh) 1

2 Was ist eine Welle? 3

2.1 Analogien: formal mathematisch oder real physikalisch? . . . 3

2.2 Gegenüberstellung von Schall- und Lichtwellen . . . 6

3 Photoelektrischer Effekt 7

3.1 Das Experiment . . . 7

3.2 Die Vorgeschichte . . . 7

3.3 Einsteins Lichtquantenhypothese . . . 8

4 Die Quantennatur des Lichts 8

4.1 Welle-Teilchen-Dualismus . . . 8

4.2 *Q*uanten*E*lektro*D*ynamik . . . 10

5 Zeittafel 11

1 Eine kurze Geschichte des Lichts (17.-19.Jh)

Heron von Alexandria (1.Jh.n.Chr.)

- Licht nimmt bei Reflexion den kürzesten Weg

Pierre Fermat(1601-1665)

- Interpretiert das von Snellius 1620 gefundene Brechungsgesetz als *schnellsten Weg* unter der Annahme, dass sich Licht im dichteren Medium langsamer ausbreitet.
- Dieses Gessetz ist für ihn Ausdruck der 'causa finalis' des Lichts (teleologische Sicht) [4][1].

[1] Erst später wird durch die Euler-Lagrange-Gleichung ein Zusammenhang zwischen Extremalprinzip (Variationsproblem) und kausaler Gesetzmäßigkeit (Differentialgleichungen) sichtbar. Allerdings ist im vorliegenden Fall das Extremalprinzip stärker.

Christiaan Huygens (1629-1695)

- Sieht Licht als Fortpflanzung mechanischer Stoßprozesse ohne Materietransport. Einer der ersten numerischen Werte der Lichtgeschwindigkeit stammt von Huygens [3].
- Jeder Stoss erzeugt eine *Elementarwelle*, d.h. eine sich kugelförmig ausbreitende Wellenfront. Die Wellenfront zu einem späteren Zeitpunkt ergibt sich als Einhüllende aller Elementarwellen längs der momentanen Wellenfront.
- Geradlinigkeit, Reflexion und Brechung von Licht kann er damit erklären - qualitativ auch Beugung (vgl. [7]), obwohl er dieses Phänomen vermutlich noch nicht kannte.
- Interferenz- und Polarisationserscheinungen bleiben mit diesen Modell unverständlich: die Stosswelle ist kein periodisches Phänomen und die Auslenkung aus der Gleichgewichtslage zeigt in Ausbreitungsrichtung (Longitudinalwelle).

Isaac Newton (1643-1727)

- Vorstellung von *Lichtglobuli* in einem hydromechanisch gedachten Äther, hauptsächlich gestützt duch die geradlinige Ausbreitung von Lichtstrahlen. Er ist sich bewusst, dass dies eine Arbeitshypothese darstellt, die er nicht zweifelsfrei aus seinen Beobachtungen ableiten kann.
- Will seine experimentellen Befunde über die Zusammensetzung weißen Lichts nicht durch spekulative Modellannahmen gefährden [3].
- Er weiss nach Korrespondenz mit dem Astronom Flamsteeds, dass die (Vakuum-)Lichtgeschwindigkeit unabhängig von dessen Farbe ist. Die chromatische Abhängigkeit der Lichtbrechung (Dispersion) führt er auf unterschiedliche Masse oder Größe der Globuli zurück.

Thomas Young (1773-1829)

- Wird geleitet duch Analogie zu Schall- und Wasserwellen.
- Formuliert das Prinzip der Interferenz (für Transversalwellen).
- Leitet aus Newtonschen Ringen Wellenlänge des Lichts in Abhängigkeit von dessen Farbe ab.

Augustin J.Fresnel (1788-1829)

- Untermauert den Ansatz von Young theoretisch und durch ausserordentlich geschickte Experimente zur Interferenz
  - Ersetzt Doppelspalt durch 2 Spiegel mit Winkel von nahezu 180°, um Beugungsphänomene auszuschliessen
  - Senkrecht zueinander polarisiertes Licht interferiert nicht
- Zahlreiche Anwendungen: Fresnel-Linse, Fresnel-Zonenplatte (heute: Röntgenlinse, Vorläufer der Holographie), Beugungsformel
- Als Trägermedium des Lichts betrachtet auch Fresnel einen Äther, muss ihn aber bereits mit recht künstlich wirkenden Eigeschaften ausstatten, u.a. hoher Elastizität, um den immer komplexeren Phänomenen Rechnung zu tragen.

James C.Maxwell (1831-1879)

- Vergleich elektrischer und magnetischer Feldlinien mit Stromlinien einer inkompressiblen Flüssigkeit. Erklärt deren Form, nicht aber die von ihnen ausgehenden Kräfte [5].
- Modelliert B als mechanische Wirbel, E als elastische Verzerrung und wird dadurch auf den *Verschiebungsstrom* geführt [5].
- Erkennt Fähigkeit der elektromagnetischen Felder zur Ausbildung von Wellen, deren Geschwindigkeit er aus experimenteller Bestimmung von ϵ_0, μ_0 (Kohlrausch, Weber) ableitet: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$.
- Die Übereinstimmung von c mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit lässt ihn sein mechanisches Modell verwerfen. Postuliert Licht als elektromagnetische Erscheinung.

Zusammenfassung:

- Wellen- und Teilchenvorstellung des Lichts lassen sich nicht 1-zu-1 Personen oder Epochen zuordnen (vgl. [4]).
- In manchen Beobachtungen äussern sich formale Aspekte, die zu einem gewissen Grad unabhängig von der geltenden Modellvorstellung sind. Gerade diese haben bis heute ihre Gültigkeit bewahrt.

	Welle	**Formal**	**Teilchen**
Fermat		**Brechung:** Licht wählt den schnellsten Weg	
Newton	**Interferenz:** periodische Anwandlung der Globuli zwischen Reflexion und Transmission	**Dispersion:** weisses Licht besteht aus Bestandteilen unterschiedlicher Brechbarkeit	**Geradlinige Bewegung:** Bildhafte Vorstellung von Globuli umströmt von hydromechanischen Äther;
Huygens	**Wellenfront:** Einhüllende von Elementarwellen; Erklärt geradlinige Ausbreitung und Brechung	**Elementarwelle**	**Stossprozess:** Ausbreitung ohne Materietransport
Young/ Fresnel	**Transversalwelle** im elastischen Äther	**Interferenz:** periodische Phase und Superposition	
Maxwell		**Feldtheorie:** Analogien sind erkenntnisleitend und dienen der Veranschaulichung	

2 Was ist eine Welle?

2.1 Analogien: formal mathematisch oder real physikalisch?

Was verbindet/unterscheidet Schallwellen und elektromagnetische Wellen?

Beim Betrachten der Grundgleichungen der Akustik (**Navier-Stokes**) bzw. Elektrodynamik (**Maxwell**) dürften vorallem Unterschiede ins Auge fallen:

Die physikalischen Grössen der Strömungsdynamik sind uns aus dem Alltag gut vertraut (Druck, Dichte, Geschwindigkeit), sie sind i.a. jedoch äusserst kompliziert miteinander verknüpft, so dass ihre Dynamik intuitiv wenig zugänglich ist, trotz anschaulicher Modellvorstellungen. Die mathematichen Schwierigkeiten mit diesen Gleichungen scheinen dies zu bestätigen.

Gerade umgekehrt verhält es sich mit der Elektrodynamik. Einmal formuliert, sind ihre Gleichungen relativ einfach zu interpretieren. Dafür bedarf es einer gewissen Anfreundung mit den abstrakten Feldern E, B.

Mathematische Techniken wie **Linearisierung** und **Potentialtheorie** führen dann jeweils zu einem Satz von **Wellengleichungen**. In der Regel müssen die Lösungen noch **Kopplungsbedingungen** erfüllen, die der Herkunft der Wellengleichungen geschuldet sind, nicht aber direkt aus dieser folgen. So gibt es z.B. sowohl akustische als auch elektromagnetische **Kugelwellen** - d.h. Flächen gleicher Phase sind Sphären. Für die vektoriellen Felder besteht allerdings ein entscheidender Unterschied: während die Schallschnelle v in *radiale* Richtung zeigt, stehen die elektromagnetischen Felder E, B senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, sind also *tangential* an die Sphäre. Darum müssen sie irgendwo verschwinden und können folglich nicht kugelsymmetrisch sein. Eine gute Annäherung wird von einer Dipolantenne erzeugt.

Sowohl bei Schall- als auch bei Lichtwellen kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Wellenfrequenz abhängen (**Dispersion**). Für Schall wird dies nur in Festkörpern beobachtet.

Was Unterscheidet Longitudinal- von Transversalwellen?

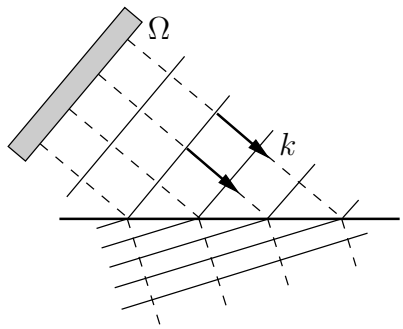
Diese Unterscheidung gibt es nur für vektorwertige Wellenfunktionen $\Phi(x,t) \in \mathbb{R}^3$ (Bsp.Schallschnelle) im Gegensatz zu skalaren (Bsp. Druckschwankung). Sei $k(x,t)$ die **Ausbreitungsrichtung** der Welle, dann gilt:

$$\begin{array}{lcl} \Phi \text{ longitudinal} & & \Phi(x,t) \parallel k(x,t) \\ \Phi \text{ transversal} & \Leftrightarrow & \Phi(x,t) \perp k(x,t) \end{array}$$

Allerdings ist nicht bei jeder Lösung einer 'Wellengleichung' sofort klar, was die Ausbreitungsrichtung ist (Bsp. stehende Welle). Zwei Konzepte wollen wir hier erwähnen:

Wellenfront: Eine Fläche, deren Punkte zu einem Sender Ω gleiche Laufzeit haben, also die Einhüllende von gleichzeitig startenden Elementarwellen. Die Ausbreitungsrichtung k steht dann senkrecht auf den Wellenfronten. In Medien mit Dispersion 'zerläuft' die Wellenfront allerdings und man geht von der Ausbreitungsgeschwindigkeit zur Gruppengeschwindigkeit über.

Phase: Bei Lösungen der Form $\Phi(x,t) = Ve^{i\varphi(x,t)}$ bezeichnet man $e^{i\varphi(x,t)}$ als Phase (Bsp. ebene Welle: $\varphi(x,t) = \omega t - cx$). Als Wellenfronten kann man nun Flächen konstanter Phase bezeichnen.



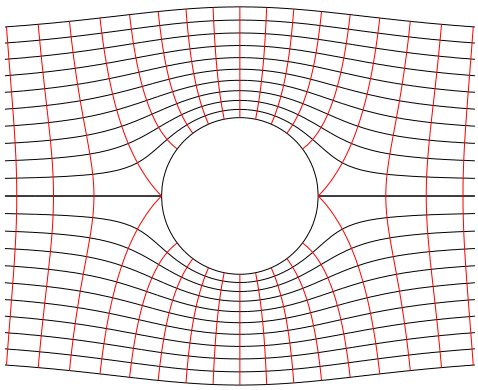
Das **Interferenzbild** zweier gleich polarisierter Transversalwellen unterscheidet sich (im Fernfeld) nicht wesentlich von dem zweier Longitudinalwellen (Bsp. Doppelspalt). Dahingegen kommt es bei unterschiedlich polarisierten Wellen nicht zur vollständigen Auslöschung. In vielen Fällen ist ferner die **Energieflussdichte** $\boldsymbol{S}$ parallel zur Ausbreitungsritchung einer Welle. $\boldsymbol{S}$ ist jedoch nur bis auf ein divergenzfreies Feld bestimmt...

Kann man elektromagnetische Feldlinien als Stromlinien einer Flüssigkeit verstehen?

Betrachten wir den Fall statischer Felder. Die Eigenschaft $\operatorname{div} B = 0$ erlaubt eine Interpretation von B als Geschwindigkeitsfeld v einer **inkrompessiblen** Flüssigkeit. Analoges gilt für E, wobei die Ladungsverteilung ρ Quellen/Senken entspricht:

> *'Es liegt kein Widerspruch in der Vorstellung solcher Stellen, wo die Flüssigkeit erschaffen oder vernichtet wird. Die Eigenschaften der Flüssigkeit liegen ja ganz in unserem Belieben. Gerade so, wie es uns freistand, sie absolut unzusammendrückbar vorzustellen, können wir jetzt voraussetzen, dass sie an gewissen Stellen aus nichts hervorgebracht und an anderen wieder in nichts aufgelöst wird.'* [5]

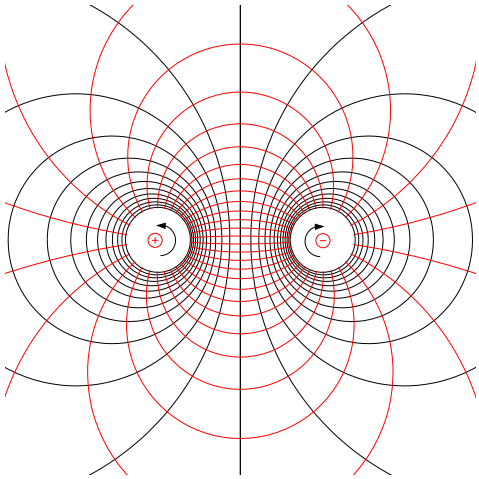
Erfolg: Geometrie stimmt überein (umströmter Gegenstand entspricht Leiter im E-Feld):

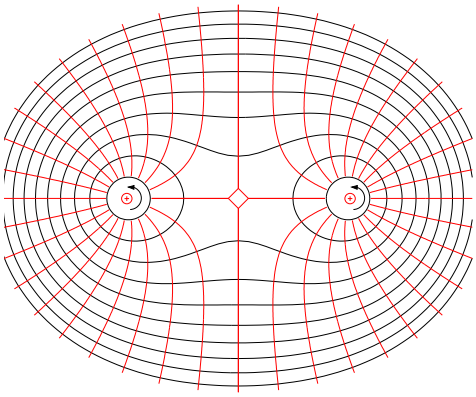


Problem: Die Kräfte zwischen Ladungen/Strömen widersprechen der Hydrodynamik: Faraday's

Kraftlinien stossen sich ab bzw. verkürzen sich, d.h. die Feldstärke $|B|^2$ entspricht einem Druck[2]. Die Bernoulli-Gleichung für eine stationäre Strömung B besagt aber das Gegenteil: $\frac{1}{2}|B|^2 + p = konst.$. Maxwell suchte einen Ausweg, indem er der Flüssigkeit im Grenzwert unendlich kleine Dichte und unendlich grosse Reibungskräfte einprägt:

> *'Nun soll vorausgesetzt werden, dass die Flüssigkeit keine Trägkeit besitzt und dass ihrer Bewegung eine Kraft entgegenwirkt. Diese soll so beschaffen sein, dsas wir uns vorstellen können, sie rühre von dem Widerstand eines Mediums her, durch welches wir uns die Flüssigkeit strömend denken.'*





Warum ist die Energiedichte akustischer oder elektromagnetischer Wellen unabhängig von deren Frequenz?

Diese Tatsache ist entscheidend für die Schwierigkeiten mitverantwortlich, die der Photoelektrische Effekt aufwarf.

Aus unserer Alltagswahrnehmung wissen wir: je schneller man etwas tut, desto anstrengender ist es. Berechnen wir etwa die Energie, die notwendig ist, um ein Seil in Schwingung zu versetzen. Dazu regen wir es mit der Amplitude s_0 und der (Kreis-)Frequenz ω an:

$$s(x,t) = s_0 \sin(\omega t - kx)$$

Die kinetische Energie eines Seilsegments Δx ist $E_{kin} = \frac{1}{2}\rho\Delta x\dot{s}^2$, die zeitlich gemittelte Energiedichte also

$$\frac{d\langle E\rangle}{dx} = \frac{\rho}{2}(s_0\omega)^2$$

In diesem Beispiel vollführt die Ortsvariable eine harmonische Schwingung - die **energietragende** Grösse ist aber die Geschwindigkeit, d.h. deren Ableitung. Darüber kommt die Frequenz ins Spiel.

Im Fall von akustischen und elektromagnetischen Wellen ist die schwingende Grösse hingegen selbst energietragend wie z.B. der Druck. Daher ergibt sich die Energiedichte direkt aus dem Amplitudenquadrat. Wegen $\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T \sin^2(\omega t)\,dt = \frac{1}{2}$ ist die Leistung ebenfalls unabhängig von der Frequenz.

[2] Im Bild sind nur die Feldlinien eingezeichnet. Das Feld ergibt sich (lokal) als Gradient des Potentials, dessen Höhenlinien senkrecht dazu verlaufen. Die Feldstärke ist also proportional zur Feldliniendichte im Fall verschwindender Divergenz.

2.2 Gegenüberstellung von Schall- und Lichtwellen

Grundgleichungen:

Massenerhaltung: $\dot\rho + \operatorname{div}(\rho v) = 0$ Impulserhaltung: $\rho\dot v + \frac{1}{2}\nabla\lvert v\rvert^2 + \nabla p = 0$ Abschlussbedingung: $f(p,\rho) = 0$ ρ Dichte, p Druck, v Geschwindigkeitsfeld, *nichtlineare* PDG	$\operatorname{div} B = 0$ $\quad \epsilon \operatorname{div} E = \rho$ $\operatorname{rot} E + \dot B = 0$ $\quad \frac{1}{\mu}\operatorname{rot} B - \epsilon\dot E = j$ $\Rightarrow$ Ladungserhaltung: $\dot\rho + \operatorname{div} j = 0$ E elektr.Feld, B magn.Feld, ρ Ladungsdichte, j Stromdichte, *lineare* PDG für E, B

Linearisierung:

Grundzustand: $v = 0,\ p = p_0,\ \rho = \rho_0$ Druckschwankung: $p_1 = p - p_0$ Dichteschwankung: $\rho_1 = \rho - \rho_0$ $p_1 = -K\frac{\Delta V}{V} = K\frac{\rho_1}{\rho_0}$, ($K$ Kompressionsmodul) $\dot p_1 + K \operatorname{div} v = 0$ $\rho_0\dot v + \nabla p_1 = 0$ Und $\frac{d}{dt}\operatorname{rot} v = 0$ (Helmholtz)

Potentiale:

Potentiale: $B = \operatorname{rot} A,\quad E = -\big(\dot A + \nabla\varphi\big)$ Lorentz-Eichung: $0 = \epsilon\dot\varphi + \frac{1}{\mu}\operatorname{div} A$ Eichinvariante Trafo: $\left\{\begin{array}{l}\varphi \mapsto \varphi + \varphi_1\\ A \mapsto A + A_1\end{array}\right\}$ $\epsilon\dot\varphi_1 + \frac{1}{\mu}\operatorname{div} A_1 = 0$ $\dot A_1 + \nabla\varphi_1 = 0$ Und $\operatorname{rot} A_1 = 0$

Wellengleichung: $\Box\Phi = \ddot\Phi - \frac{1}{c^2}\Delta\Phi$

$\Box p_1 = 0 \qquad \Box v + \operatorname{rot}\operatorname{rot} v = 0$ Schallgeschwindigkeit: $c = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}}$	$\Box\varphi = \frac{1}{\epsilon}\rho \qquad \Box A = \mu j$ Lichtgeschwindigkeit: $c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon\mu}}$ Für $\rho = 0,\ j = 0$ gilt : $\Box E = 0,\ \Box B = 0$

Lösungen und Kopplungsbedingung:

Eben harmonische Welle: $p_1(x,t) = p_{max}\sin(\omega t - k\cdot x)$ $v(x,t) = v_{max}\sin(\omega t - k\cdot x)$ $\quad \omega = c\lvert k\rvert$ Kopplung: • $k \parallel v_{max}$ d.h. *longitudinal* • $\frac{p_{max}}{\lvert v_{max}\rvert} = \frac{K}{c}$ Wellenwiderstand (*Impedanz*)	$E(x,t) = E_{max}\sin(\omega t - k\cdot x)$ $B(x,t) = B_{max}\sin(\omega t - k\cdot x)$ $\quad \omega = c\lvert k\rvert$ • $k \perp E_{max}, B_{max}$ d.h. *transversal* • $E_{max} = \frac{c^2}{\omega}B_0 \times k$, • $\frac{\lvert E_{max}\rvert}{\lvert\frac{1}{\mu}B_{max}\rvert} = \mu c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$
Sphärisch harmonische Welle: $p(r,t) = p_0\frac{1}{r}\sin(\omega t - kr)$	(Dipol-Fernfeld) $B(x,t) \approx B_0\frac{1}{r}\sin(\omega t - k\cdot x)P \times e_r$ $E(x,t) \approx cB \times e_r$

Energie- und Energieflussdichte

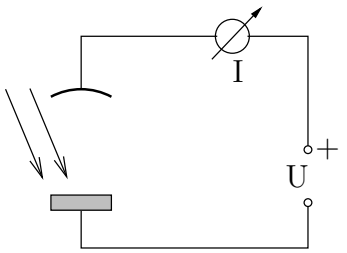
Energiedichte: $\eta = \frac{1}{2}\big(\rho_0\lvert v\rvert^2 + \frac{1}{K}{p_1}^2\big)$	$\eta = \frac{1}{2}\big(\epsilon\lvert E\rvert^2 + \frac{1}{\mu}\lvert B\rvert^2\big)$
Energieflussdichte: $S = c^2 p_1 v$	$S = \frac{1}{\mu}E \times B$
Energieerhaltung: $\dot\eta + \operatorname{div} S = 0$	$\dot\eta + \operatorname{div} S + E\cdot j = 0$
Ebene Welle: $\langle\eta\rangle = \frac{1}{2K}{p_{max}}^2$	$\langle\eta\rangle = \frac{\epsilon}{2}\lvert E_{max}\rvert^2$

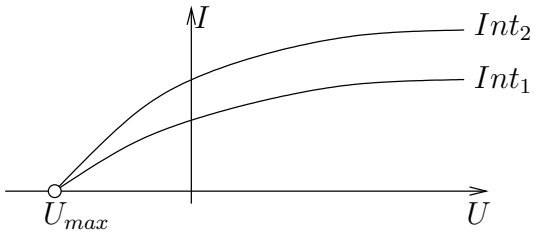
3 Photoelektrischer Effekt

3.1 Das Experiment

Versuch 1: Bestrahle eine Metalloberfläche (Kathode) mit UV-Licht unteschiedlicher Intensität. Messe den Strom zur Anode bei unterschiedlicher Gegenspannung U.

Beobachtung: Es fließt ein Strom $I(U)$ bis zu einer Sperrspannung U_{max}. Bei grösserer Lichtintensität $Int_2 > Int_1$ wächst $I(U)$ an, aber U_{max} bleibt gleich.

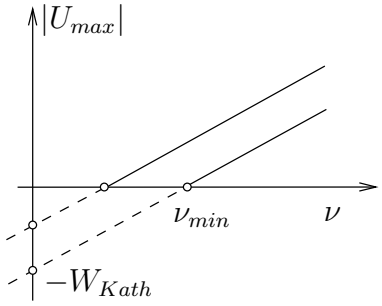




Versuch 2: Untersuche die Abhängigkeit der Sperrspannung U_{max} vom Kathodenmaterial und der Frequenz ν des bestrahlenden Lichtes.

Beobachtung: Licht unterhalb einer gewissen Grenzfrequenz ν_{min} löst keine Elektronen aus, unabhängig von der Intensität des Lichts. Für grössere Frequenzen gilt:

$$\boxed{eU_{max} = \hbar\nu - W_{Kath}}$$



Fazit:

- $E_{kin} = eU_{max}$ ist die kinetische Energie, die den Elektronen beim Austritt aus der Metallschicht maximal zur Verfügung steht. Die Summe von E_{kin} und einer vom Kathodenmaterial abhängigen Energie W_{Kath} hängt linear von der Frequenz des Lichtes ab und ist wiederum unabhängig von dessen Intensität.
- Auch bei niedrigster Intensität ist diese Energie sofort beim Eintreffen der Lichtwelle für das Elektron verfügbar (Belichtung von Photoplatten).
- **Widerspruch zur Elektrodynamik:** Die Energiestromdichte (Intensität) einer elektromagnetischen Welle ist proportional zum Amplitudenquadrat und unabhängig von der Frequenz.

3.2 Die Vorgeschichte

Licht:

1875 Beschreibung als elektromagnetische Welle durch H.A.Lorentz. Erste Modelle für Wechselwirkung von Licht mit Materie unter der Hypothese atomarer Ladungen.

1888 Erzeugung und Nachweis elektromagnetischer Strahlung durch H.Hertz.

1903 Messung des Lichtdrucks durch Lebedev, Nicholson und Hull: vermeintlich proportional zur Intensität und unabhängig von der Frequenz [3].

Elektronen:

1859 Kathodenstrahlung wird entdeckt

1897 J.J.Thomson bestimmt die spezifische Ladung e/m der vermuteten Kathodenstrahlteilchen. Als e setzte man die Elementarladung an, die man aus der Faraday- und Avogadro-Konstante herleitete: $e = F/A$ wobei F Ladung pro Mol eines einwertigen Ions, A Anzahl Molekühle pro Mol.

1916 Direkter Nachweis der Elementarladung durch A.Milikan.

Photoeffekt:

1897 H.Hertz beobachtet Verkürzung der Funkenstrecke bei gleichzeitigen Zünden eines zweiten Funken

1898 W.Hallwachs zeigt: UV-Licht kann Metallplatte positiv Aufladen

1902 P.Lenard erkennt, dass U_{max} unabhängig von der Lichtintensität ist

1915 R.Milikan bestätigt experimentell Einsteins Energieformel $eU_{max} + W_{Kath} = \hbar\nu$ (wollte sie eigentlich widerlegen)

3.3 Einsteins Lichtquantenhypothese

- Lösungsansatz von Lenard: E_{kin} stammt garnicht vom Licht; dieses hat nur die Funktion eines Triggers. Daher hat er E_{kin} nicht als Funktion von ν gesehen - obwohl er eine Abhängigkeit feststellte.
- Einsteins Lichtquantenhypothese:

  > *'bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahls ist die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganzes absorbiert und erzeugt werden können'* [1]:

  Im folgenden Sinne hat Licht damit Teilchencharakter:

  > *'Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahls nach der Maxwellschen Theorie des Lichts auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt'* [1]:

  Teilcheneigenschaften wie Masse und Impuls werden mittels relativistischer Mechanik aus der Energie abgeleitet.

4 Die Quantennatur des Lichts

4.1 Welle-Teilchen-Dualismus

- In der QM[3] werden klassische Teilchen (Elektron, Neutron etc.) durch eine Zustandsfunktion ψ auf dem Ortsraum beschrieben, deren zeitliche Entwicklung durch die Schrödingergleichung gegeben ist. $|\psi(x)|^2$ beschreibt dabei die Wahrscheinlichkeit, dass Teilchen bei einer Ortsmessung in x anzutreffen.
- Umgekehrt legt dies die Interpretation klassischer Wellen (z.B. Licht) als Wahrscheinlichkeitsdichte eines Teilchens nahe ('Photon'). Die Bewegungsgleichung ist hier aber noch die klassische (Maxwell)! Die Quantisierung von Feldern ist nicht Gegenstand der klassischen QM sondern der Quantenfeldtheorie.

[3] Genauer ihrer Formulierung durch Schrödinger

- Die anschaulich nicht zu vereinigenden (**komplementären**) Modelle 'Welle' und 'Teilchen' werden im Formalismus der QM widerspruchsfrei abgebildet.
- Kritikpunkt: Messprozess selbst wird nicht beschrieben - nur seine Auswirkungen.

	Welle	Teilchen
Phänomenologisch	Interferenz (z.B. Doppelspalt)	Lokalisierbarkeit, Quantelung von Energie (z.B. Photoeffekt)
Formal in der klass. QM	Bewegungsgleichung - Dynamik	Messprozess - Kollaps der Wellenfunktion
Interpretation	Dichte, 'verschmiertes' Teilchen	Wahrscheinlichkeit

Einstein sucht anfänglich zwar nach 'Bildern' (Modellen) für seine Lichtquanten, kommt aber 1911/12 zu dem Schluss [3]:

> *'Ob diese Quanten wirklich existieren, dass frage ich nicht mehr. Ich suche sie auch nicht mehr zu konstruieren, weil ich weiss, dass mein Gehirn sie nicht durchzudringen vermag. Aber ich suche möglichst sorgfältig die Konsequenzen ab, um über den Bereich der Anwendbarkeit dieser Theorie unterrichtet zu werden.'*

- Zeigt der Dualismus die Grenzen der Modellvorstellung?
- Müssen wir die Frage nach dem Wesen des Lichts aufgeben?

  > *'Das alles sind Denkstrukturen. Den Übergang zur Wirklichkeit vollzieht die theoretische Physik, indem sie den beobachteten Phänomenen mathematische Symbole zuordnet. Wo dies möglich ist, wird damit auch den Phänomenen eine in ihnen verborgene Struktur zugeordnet, und diese ist es, die der Physiker als die hinter den Erscheinungen liegende Wirklichkeit anerkennt'* [Max Born S.86 des Seminar-reader]

- Klaus Hentschel spricht in seinem Aufsatz [3] von der *'Anreicherung der Bedeutungsschichten von Lichtquantum'*. Er macht dabei die folgenden 12 Bedeutungsschichten aus:

  1. Teilchenartik lokalisiert
  2. Endliche Lichtgeschwindigkeit
  3. Energieübertragung
  4. Impulsübertragung (Strahlungsdruck)
  5. Die Energie ist korreliert mit der Frequenz ($E \sim \nu$)
  6. Die Energie ist quantisiert ($E = \hbar \cdot \nu$)
  7. Lichtquanten werden von Materie absorbiert/emittiert
  8. Welle-Teilchen-Dualismus
  9. Spin ± 1
  10. Ununterscheidbarkeit von Lichtquanten bei bei gleicher Spinausrichtung und Energie
  11. Bosonen

4.2 *Q*uanten*E*lektro*D*ynamik

Maxwellgleichung: Elektron = Ladung tragendes Teilchen

Photon = Vakuumlösung für B, E

$\Rightarrow$ Wechselwirkung (z.B.Faradayeffekt)

klassische QM: Elektron = Dirac-Spinor

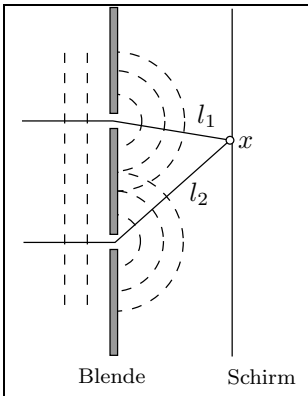
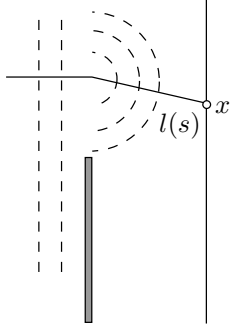
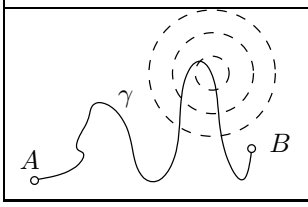
Photon = ?

$\Rightarrow$ Wechselwirkung ?

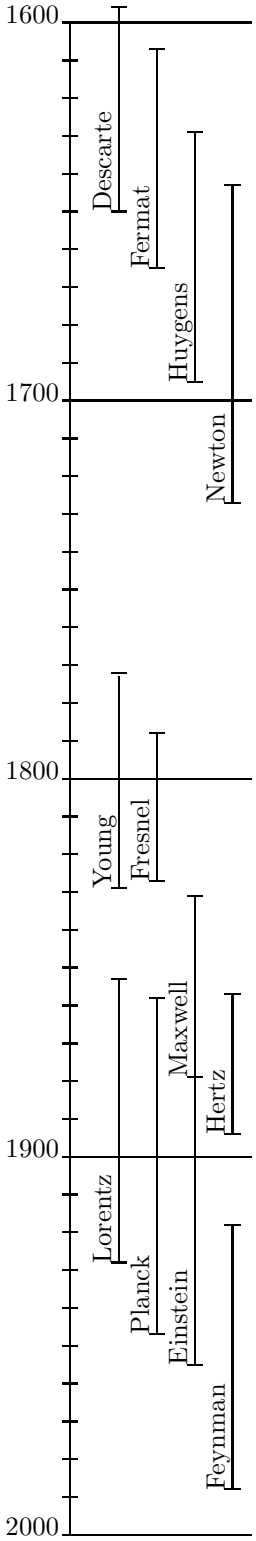
Die Dynamik der Felder wird dadurch bestimmt, dass sie ein Wirkungsfunktional minimieren. Hier gibt es verschiedene Formulierungen:

- Eichfeldtheorie
- Pfadintegrale

Von der Elementarwelle (Huygens) zum Pfadintegral (Feynman):

	$\psi(x) = \left\lvert \frac{e^{ikl_1}}{l_1} + \frac{e^{ikl_2}}{l_2} \right\rvert$
	$\psi(x) = \left\lvert \int \frac{e^{ikl(s)}}{l(s)}\, ds \right\rvert$
	$\psi(A,B) = \left\lvert \int\limits_{\{\gamma: A \to B\}} \frac{e^{ikl(\gamma)}}{l\gamma} \right\rvert$

5 Zeittafel



-Beugung (Grimaldi)

-Lichtgeschw. $< \infty$ (Roemer)

-Polarisation bei Reflexion (Malus)

-Messung Lichtgeschwindigkeit in fließenden Wasser (Fizeau)

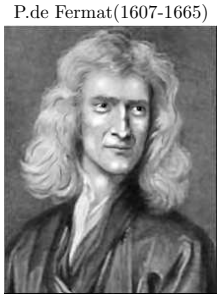
-Röntgenstrahlung
-Elektron (Thomson)
-Lichtquantenhyp.(Einstein)

-Elementarladung (Milikan)

R.Descartes (1596-1650)

P.de Fermat(1607-1665)

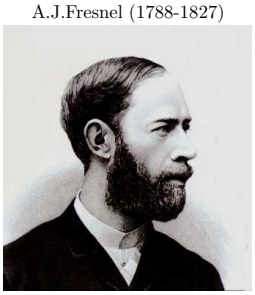
Huygens (1629-1695)

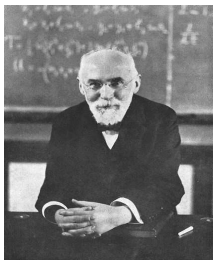

I.Newton (1643-1727)

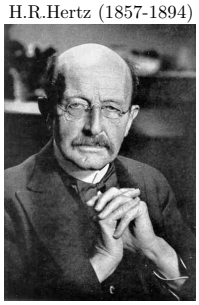
T.Young (1773-1829)

A.J.Fresnel (1788-1827)

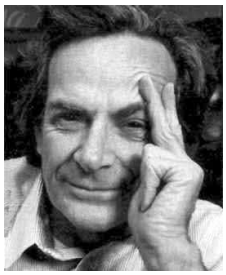
J.C.Maxwell (1831-1879)


H.R.Hertz (1857-1894)


H.A. Lorentz (1853-1928)


M.Planck ()1858-1947

A.Einstein (1879-1955)


R.Feynman (1918-1988)

Literatur

[1] Albert Einstein. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *The Collected papers*, 1905.

[2] Richard P. Feynmann. *QED - Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie.* 1992.

[3] Klaus Hentschel. Einstein und die Lichtquantenhypothese - die stufenweise Anreicherung der Bedeutungsschichten von 'Lichtquantum'. *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 58(6/7):311–319,363–371, 2005.

[4] Wilfried Kuhn. *Ideengeschichte der Physik.* 2001.

[5] J.C. Maxwell. *Über Faradays Kraftlinien (1855) und Über physikalsiche Kraftlinien (1861).* Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Band 69, 1995.

[6] Herbert Pietschmann. *Quantenmechanik verstehen - Eine Einführung in den Welle-Teilchen-Dualismus für Lehrer und Studierende.* 2001.

[7] Helmut Vogel. *Gerthsen Physik.* 1995.