

Vorlesungsmaterial
von
Prof. Dr. Horst Völz

Quantentheorie

Dieses Material beruht teilweise auf dem Buch

Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Allgemeine Grundlagen für
Naturwissenschaft, Technik und Medizin. Shaker Verlag, Aachen 2001

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

Der Inhalt wurde erheblich verkürzt, erheblich ergänzt, 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/volz bzw. <http://www.medienwissenschaft.hu-berlin.de/vlz>
Email: [hvoelz\(at\)fpk.cs.tu-berlin.de](mailto:hvoelz(at)fpk.cs.tu-berlin.de) bzw. [h.voelz\(at\)infocity.de](mailto:h.voelz(at)infocity.de)
Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 296 31 07

Was ist Licht?

Genesis, erstes Kapitel: Da sprach **Gott**: „*Es werde Licht!*“

Altertum und altes China zwei Auffassungen vom Licht:

- Vom Auge gehen Lichtstrahlen aus und „tasten“ die Umgebung ab, z.B. EMPEDOKLES (494 – 482 v. Chr.)
- Vom leuchtenden Körper breiten sich Lichtatome als Strahlen aus, für 5 Farben schwarz, blau, grün, rot oder gelb, z. B. PYTHAGORAS (ca. 570 – 500 v. Chr.)

Astronomische Beobachtungen und Schattenwürfe bereits im frühen Altertum

Gesetze der Reflexion und Lichtbrechung zwischen Wasser und Luft bereits in der griechischen Antike

200 v. Chr. erfindet DIOKLES den Parabolspiegel zur Bündelung von Licht

Erneut im 17. Jh.

- 1665 ROBERT HOOKE (1635 – 1703) Licht ist Schwingung (Vibration) hoher Frequenz
1669 ISAAC NEWTON (1643 – 1727) Licht besteht aus Körpern, verschiedener Farbe (Emanationstheorie)
1677 CHRISTIAAN HUYGENS (1629 – 1695) Wellentheorie, erfordert als Medium Licht-Äther, kann sich nur sehr langsam durchsetzen

Ende 19. Jh. elektromagnetische Schwingungen MAXWELL-Gleichungen auch für Licht und Nachweis durch HEINRICH HERTZ

- 1900 14.12. PLANCK stellt in Berlin seine Theorie zur Schwarzer Körper-Strahlung vor
1905 A. EINSTEIN Lichthypothese: Lichtquanten = Photonen und Energie-Masse $E = m \cdot c^2$
1922 ARTHUR HOLLY COMPTON (1892 – 1962) Compton-Effekt + Begriff Photon eingeführt
1924 LOUIS DE BROGLIE (1892 - 1981) Materie-Wellen $\lambda = h/m \cdot v$

Heute kann optisches Geschehen mit drei Modellen behandelt werden, die z.T. widersprüchlich erscheinen:

1. **Strahlenoptik** Lichtstrahlen breiten sich geradlinig aus, werden an Grenzflächen abgelenkt und reflektiert. Hierfür ist der Brechungsindex n entscheidend, beeinflusst auch die Geschwindigkeit
2. **Wellenoptik**: Licht ist eine elektromagnetische Welle, die sich von jedem Punkt kugelförmig ausbreitet. HUYGENS'sches Prinzip, dazu gehören: Interferenz, Beugung und Polarisierung
3. **Quantentheorie**: Licht besteht aus Teilchen ohne Masse, Photonen, die im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit bewegen und eine Energie $E = h \cdot v$ besitzen

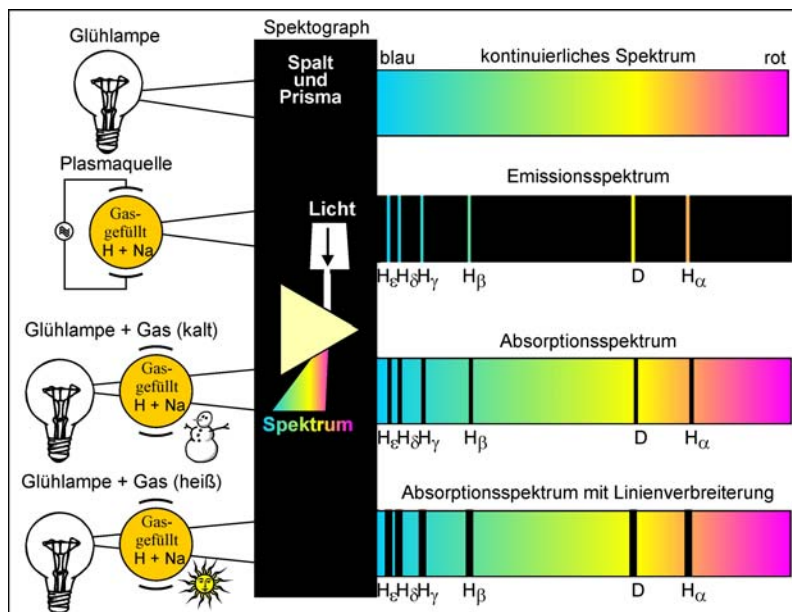
Spektren der Lichtstrahlung

Kontinuierliches Spektrum durch erhitzte Festkörper, z. B. Glühlampe, sehr genau untersucht, dennoch keine einsichtige Erklärung, nach Kirchhoff 1859 unabhängig vom Material

Linienhaftes Spektrum von angeregten Gasen z. B. Natrium- und Quecksilberdampf Lampe, umfangreiche Spektral-Atlanten, kein inhaltlicher Zusammenhang erkennbar

Kontinuierliches Spektrum **mit dunklen Stellen** (Absorptionslinien) zunächst im Sonnenlicht beobachtet, 1802

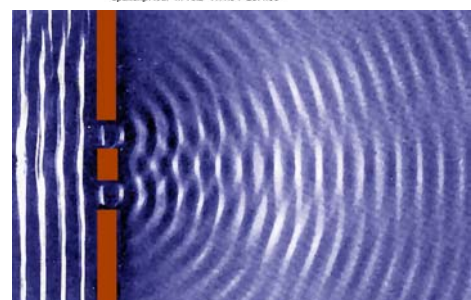
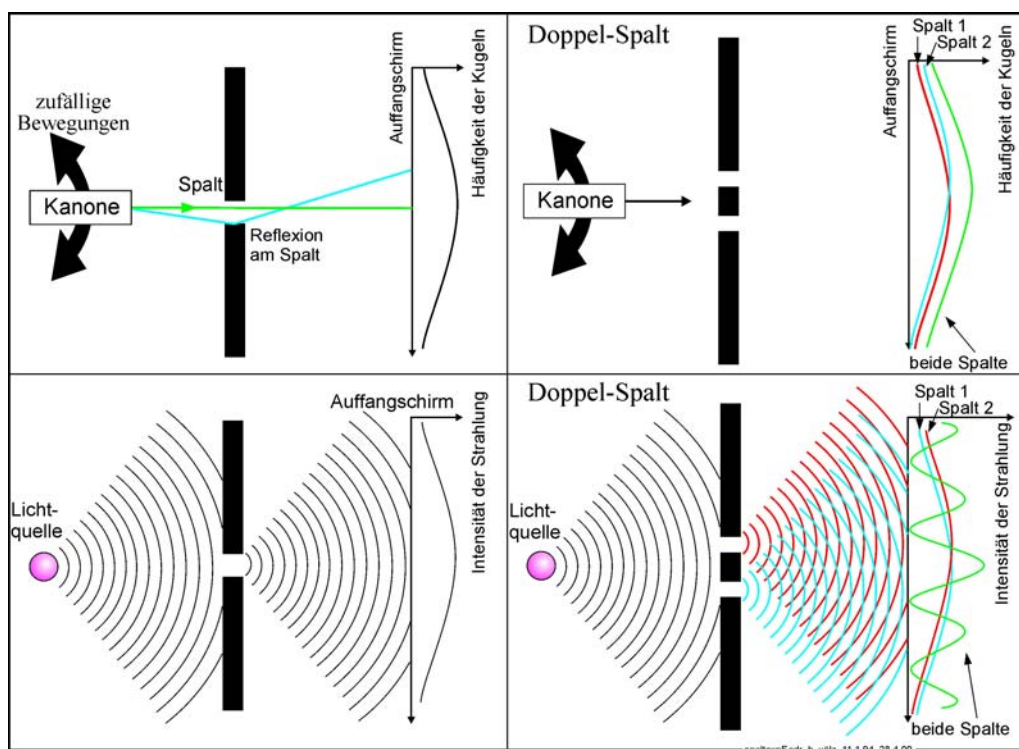
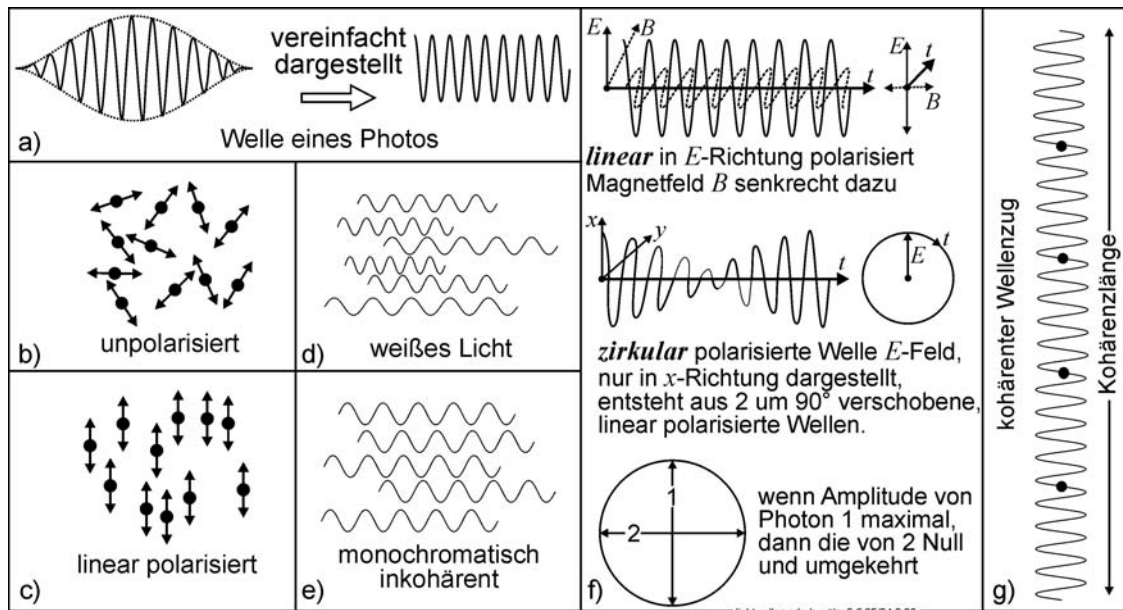
WILLIAM HYDE WOLLASTON (1766 – 1828) 1813 JOSEPH VON FRAUNHOFER (1787 – 1826)

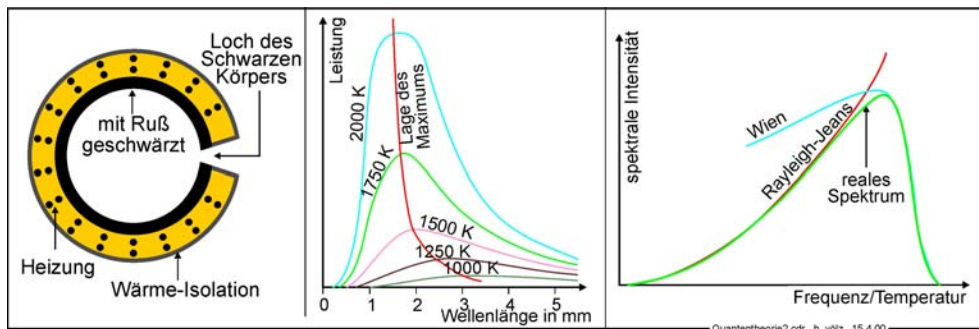


Licht polarisiert, monochromatisch, kohärent

Griechisch **pólos** Achse, Drehpunkt, Erdpol, Griechisch **χρῶμα** **chroma** Haut; Hautfarbe; Farbe, Lateinisch **cohaerere**, **cohaesi** zusammenhängen

1801 THOMAS YOUNG (1773 - 1829) entwirft den Doppelspaltversuch





Problem: kontinuierliches Spektrum

Strahlung thermisches Gleichgewicht: Emission = Absorption (Re-Emission)

Schwarzer Körper (ideal) = aufheizbares Gehäuse, innen gründlich mit Ruß geschwärzt, an einer Seite ein kleines Loch, wo Strahlung ein- und austreten kann. Innen wird alle eintretende Strahlung absorbiert

A Strahlungsfläche, T absolute Temperatur, f Frequenz, u Spektraldichte

Gesamter Strahlungsfluss: 1879 Gesetz von JOSEF STEFAN (1835 – 1893), LUDWIG BOLTZMANN (1844 – 1906)

$$\Phi_{\text{total}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

STEFAN-BOLTZMAN-Strahlungs-Konstante $\sigma = 5,67 \dots \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

Maximum: Verschiebungs-Gesetz von WILHELM CARL WERNER OTTO FRITZ FRANZ WIEN (1864 – 1928)

$$\lambda_{\text{max}} = b/T$$

WIEN-sche Konstante $b = 2,8978 \dots \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

Langwelliger Bereich (rot $hf \ll k \cdot T$): 1896 Gesetz von WIEN; führt zur UV-Katastrophe

$$u(f, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot f^3 \cdot h}{c^3} \cdot e^{-\frac{h \cdot f}{k \cdot T}}$$

Kurzwelliger Bereich (blau, UV, $hf \gg k \cdot T$): 1900 Gesetz von JOHN WILLIAM RAYLEIGH (1842 – 1919), JAMES HOPWOOD JEANS (1877–1946)

$$u(f, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot f^2}{c^3} \cdot k \cdot T \quad \text{bzw.} \quad u(\lambda, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot k \cdot T}{\lambda^4}$$

BOLTZMANN-Konstante $k = 1,38 \dots \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

PLANCK-sche Formel

Wurde am 19.10. und 14.12.1900 in der Physikalischen Gesellschaft Berlin vorgetragen

$$u(f, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot f^2}{c^3} \cdot \frac{h \cdot f}{e^{\frac{h \cdot f}{k \cdot T}} - 1}$$

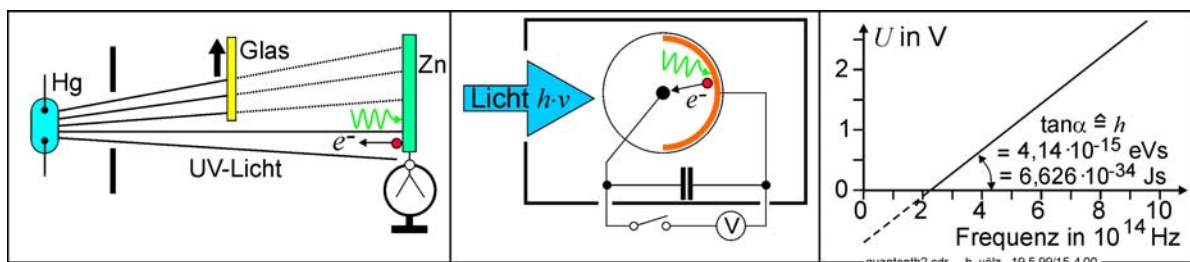
PLANCK-Konstante $h = 6,626 \dots \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Energie kann also nur **diskrete Stufen** gemäß $E = hf \Rightarrow$ Quanten annehmen

h hat die Dimension einer **Wirkung** $J \cdot s$, Wert ist sehr klein und wurde daher früher nicht bemerkt

1887 HEINRICH RUDOLF HERTZ (1757 – 1894): Licht löst aus einer Metallplatte Elektronen aus, Fotoeffekt

Problem Energie einer Welle sollte von der Amplitude und nicht von der Frequenz abhängen, z.B. Höhe einer Wasserwelle und nicht der Abstand der Wellenberge



1905 A. EINSTEIN Lichthypothese: Lichtquanten = Photonen und Energie-Masse $E = m \cdot c^2$

Materie-Wellen

1923 Dissertation LOUIS-VICTOR PIERRE RAYMOND DE BROGLIE (1892 – 1987) „Recherches sur la théorie des Quanta“.
Aus $E = m \cdot c^2$ folgt die DE-BROGLIE-Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Die Idee ist so ungewöhnlich, dass Gutachter PAUL LANGEVIN (1872 – 1946) um ein zweites Exemplar bat, das er an EINSTEIN weiterleitete, der es positiv befürwortete

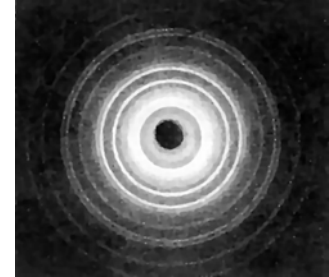
1927 These wird mit Röntgenstrahlen durch Interferenzmuster an Kristallen bestätigt, CLINTON JOSEPH DAVISSON (1881 – 1958), LESTER HALBERT GERMER (1896 – 1971), GEORGE PAGET THOMSON (1892 – 1975)

1931 Nutzanwendung u.a. Elektronen-Mikroskop ERNST AUGUST FRIEDRICH RUSKA (1906 – 1988) Später sogar Protonen- oder Neutronen-Mikroskop

1957 CLAUD JÖNSSON weist mit Metallfolien mit Spaltbreite von $0,5 \mu\text{m}$ Elektronen-Interferenz (Doppelspalt) nach

Wellenlängen in nm

Spannung	1 V	10 V	100 V	1 kV	10 kV	100 kV	1 MV
Elektron	1230	388	123	38,8	12,2	3,7	0,87
Proton	28,6	9,05	2,86	0,905	0,286	0,0905	0,0286



Compton-Effekt

1922 ARTHUR HOLLY COMPTON (1892 – 1962) Streuung hochenergetischer Röntgenstrahlen an Graphit:

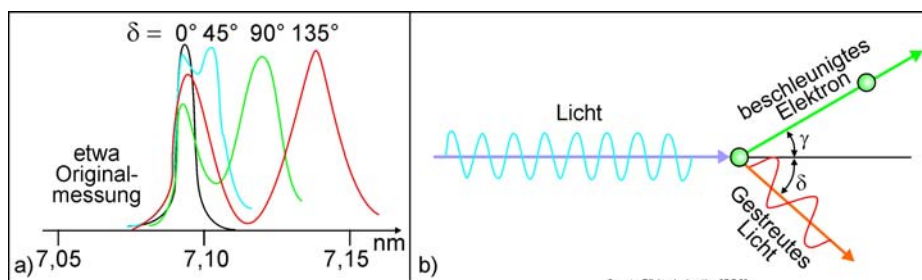
- Die Streuwinkelverteilung in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung waren nicht gleich
- Wellenlänge der gestreuten Strahlung war länger als die der einfallenden Strahlung
- Wellenlänge der gestreuten Strahlung hängt vom Streuwinkel ab

Erklärung nur möglich, wenn Licht aus Partikeln besteht und Stöße mit freien Elektronen erfolgen

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 \cdot c} \cdot (1 - \cos(\varphi))$$

Für $\varphi = 90^\circ$ beträgt $\Delta\lambda = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

Der Effekt ist bei sichtbarem Licht $\approx 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ für einen Nachweis zu klein



Spektralanalyse

1859 entwickeln ROBERT WILHELM BUNSEN (1811 – 1899) und GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824 – 1887) die **Spektralanalyse**.

Es entstehen umfangreiche Spektral-Atlanten zur Bestimmung vorhandener Elemente

Der Schweizer Mathematiklehrer JOHANN JAKOB BALMER (1825 – 1898) tüftelte viel mit Zahlen und fand so die

Formel für die ersten vier H-Linien:

$$\lambda = \frac{364,5n^2}{n^2 - 4} [\text{nm}]$$

Atom-Modelle

Griechisch **a-** nicht und **témnein** schneiden; **átomos** ungeschnitten, unteilbar:

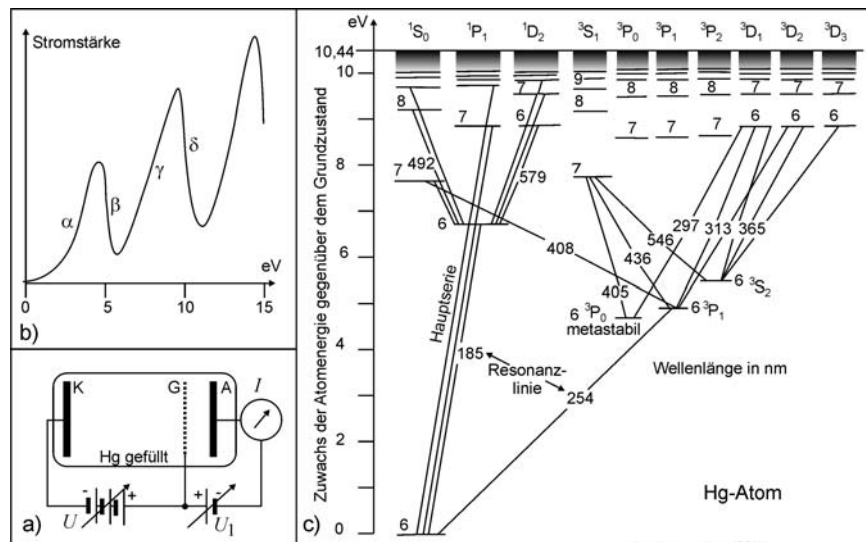
Begriff prägte um 440 v.Chr. DEMOKRIT von Abdera (460 – 375 v.Chr.) für kleinste unteilbare Teile der Materie

Chemische Verbindungen setzen sich ganzzahlig aus Bestandteilen, den Atomen zusammen = Stöchiometrie, griechisch **stoicheia** Grundstoff und **metrein** messen

1803 werden daher die Atome von JOHN DALTON (1766 – 1844) eingeführt
 Physiker akzeptierten sie lange nicht: da sie nicht experimentell erfassbar waren
 1890 wird das Elektron und 1914 das Proton als Wasserstoffkern nachgewiesen
 JOSEPH THOMSON (1856 – 1940) entwickelt „**Rosinenkuchen**“-Modell: Atom = positiv geladener Materieteil, in den die negativen Elektronen eingebettet sind

Planeten-Modell

1908 erhält ERNEST RUTHERFORD (1871 – 1937) für Arbeiten zur Radioaktivität den Nobel-Preis für Chemie
 1911 leitet RUTHERFORD aus Streuung von **α -Strahlen** ein Atom-Modell ab ($\approx$ *Planetensystem*), Elektronen laufen auf Bahnen im Abstand $\approx 10^{-10}$ m um den noch nicht identifizierten positiv geladenen Kern mit 10^{-14} m. Zentrifugalkraft $\leftrightarrow$ elektrische Anziehung. *Atom jetzt zerlegbar!* Es müsste aber elektromagnetische Strahlung auftreten, wodurch Elektronen dann sofort auf den Kern stürzen
 1913 NIELS BOHR postuliert bzgl. Rutherford: Bahndrehimpuls (Energie) ermöglicht dem Elektron nur bestimmte diskrete Werte, die **erlaubten Bahnradien**, Abstrahlung erfolgt nur bei Sprüngen zu niederen Bahnen = Spektrallinien; zu höheren Bahnen gelangen Elektronen nur durch Energiezufuhr.
 RUTHERFORD ermutigt in einem Brief: „Bohr, Du erklärst Wasserstoff und Du erklärst Helium, und jeder wird Dir alles Übrige glauben.“
 1913 **Experiment von JAMES FRANCK und GUSTAV HERTZ**: Elektronen werden durch eine mit Hg-Dampf gefüllte Röhre mittels U geschickt, müssen kleine negative Gegenspannung U_1 durchlaufen. Mit U steigt zunächst der Strom an. Bei mehreren diskreten Werten sinkt er rapide ab. Dabei reicht die Energie der Elektronen gerade aus, um ein Quecksilberatom auf einen höheren, angeregten Zustand zu bringen. Rest-Energie genügt nicht mehr zum Überwinden der Gegenspannung. An diesen Stellen schlägt auch die leuchtende Farbe um.
 Übersichtlicher sind die Verhältnisse beim Wasserstoff (s.u.)



1922 Korrespondenzprinzip von BOHR

= Komplementaritätsprinzip = Kopenhagener Deutung
 klassische $\rightarrow$ quantentheoretische Betrachtung ist intuitiv möglich, wenn für beide Modellen große Quantenzahlen angenommen werden
 So sind Quanten-Gesetze zu erraten
 Beispiel: Bei klassischen Schwingungen existieren Grundwelle und Oberwelle
 Über die Auswahlregeln der Atomzustände folgen die stabilen Bahnen der Atome
 Jede Bahn bedeutet einen Energiezustand des Atoms.

Elektronen-Bahnen = stehende Wellen

Materiewellen 1923 von LOUIS DE BROGLIE $\rightarrow$ BOHR: Elektronen-Bahnen sind stehende Wellen
 Bahnlänge muss ganzes Vielfaches k der Wellenlänge λ entsprechen, mit Elektronenmasse $m_e \rightarrow$ Radius r :

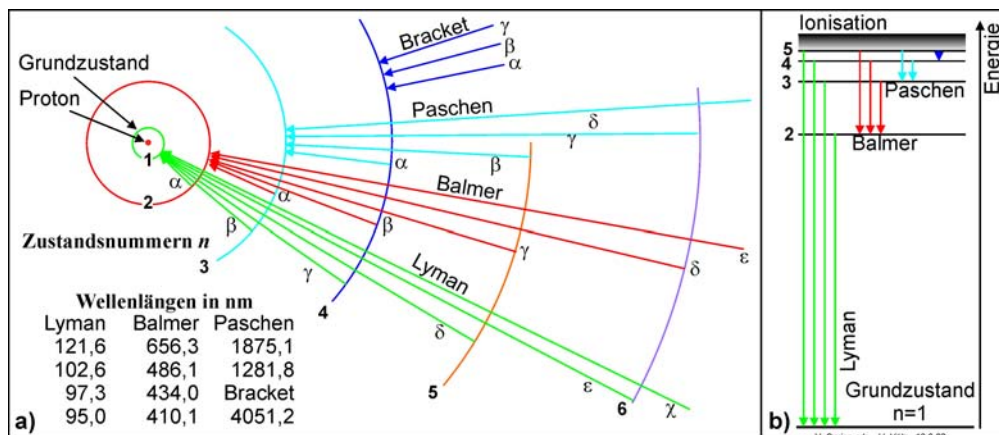
$$2 \cdot \pi \cdot r = k \cdot \lambda = k \cdot \frac{h}{m_e \cdot v}$$

Zum Grundzustand entsteht die LYMAN-Serie; THEODORE LYMAN (1874 – 1954), Linien im UV
 Zum 2. Term die BALMER-Serie im sichtbaren Bereich

Zum 3. Term die PASCHEN-Serie; FRIEDRICH LOUIS CARL HEINRICH PASCHEN (1865 – 1947) im IR

Zum 4. Term die BRACKET-Serie

Der Reihe nach werden die Spektrallinien mit α , β , γ , δ , ϵ usw. bezeichnet



Magnetismus

Mit einem umlaufenden Elektron müsste auch Magnetismus entstehen

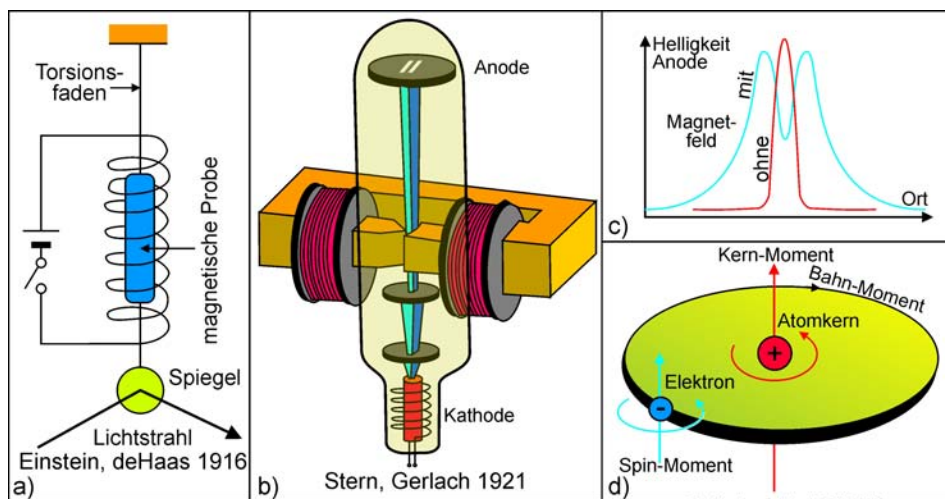
Mit der Ladung e_0 führt BOHR zunächst hypothetisch BOHR'sche Magneton ein

$$\mu_B = \frac{e_0 \cdot h}{4 \cdot \pi \cdot m_e} \approx 9,2704078 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Achtung! Trotz Symbol μ_B kein Zusammenhang mit magnetischer Permeabilität, z.B. μ_0

1915 Versuch von ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955) und WANDER JOHANNES DE HAAS (1878 – 1960), Eisenstab an einem dünnen Torsionsfaden aufgehängt, kann mit Spule magnetisiert werden, Mitgedrehter Spiegel → kreiselmagnetischer, gyromagnetischer, EINSTEIN-DE-HAAS- oder RICHARDSON-EINSTEIN-DE-HAAS-Effekt

1921 wiesen OTTO STERN (1888 – 1969) und WALTHER GERLACH (1889 – 1979) die Rotation (Spin) nach, inhomogenes Magnetfeld bewirkt Aufspaltung des Strahles, ursprünglich nur für Atome



Einführung des Spins

1925 nehmen GEORGE EUGENE UHLENBECK (1900 – 1988) und SAMUEL ABRAHAM GOUDSMIT (1902 – 1978) auch Eigenrotation für Elektronen an = **Spin** (englisch **to spin** spinnen; (sich) drehen)

Legten die Arbeit ihrem Lehrer PAUL EHRENFEST (1880 – 1933) vor, der leitet sie weiter an HENDRIK ANTOON LORENTZ, (1853 – 1928), der zunächst keine Entscheidung trifft, aber ohne Kenntnis der Autoren die Arbeit zum Druck einreicht: »Ich habe Ihre Abhandlung bereits vor längerer Zeit abgeschickt. Sie sind beide noch jung genug, um sich ein paar Dummheiten erlauben zu können!«

Pech mit gleicher Idee hatte KRONIG; WOLFGANG PAULI (1913 – 1993) meinte, das könne nicht richtig sein

Elektronspin liefert Erklärung für die 1896 von PIETER ZEEMAN (1865–1943) entdeckte Aufspaltung von Spektrallinien durch ein Magnetfeld (Magneto-Optik)

Meisten **Materialien unmagnetisch**, denn die Einzel-Spins kompensieren sich, Ausnahme Fe, Ni, Co (Mn)

Bosonen sind Elementarteilchen mit **keinem oder ganzzahligem** Spin, benannt nach SATYENDRA NATH BOSE (1894 – 1974)

Fermionen sind Elementarteilchen mit **halbzahligem** Spin (Elektron, Proton und Neutron), benannt nach ENRICO FERMI (1901 – 1954)

1988 wird der Elektronen-Spin erstmalig mittels **GMR-Elemente** (giant **m**agnetic **r**esistive) bei Festplatten genutzt.
Heute existieren etliche Elektronik-Anwendungen

Quantenzahlen

1915 ARNOLD SOMMERFELD (1868 – 1951) vermutet **Ellipsenbahnen**.

1. **Haupt**quantenzahl n (Schale, K, L, ...), entspricht großer Ellipsen-Achse, Energie proportional n^2
2. **Neben**quantenzahl l (Drehimpuls, 0, 1, 2, ...) entspricht kleiner Ellipsen-Achse; Achsverhältnis

Bezeichnung der Nebenquantenzahlen (für $l > 4$; g und h sind Orbitale deutlich komplizierter)

l	Herleitung	Aussehen der Orbitale (s. SCHRÖDINGER)
0	s: sharp	radialsymmetrisch
1	p: principal	hantelförmig in den drei Raum-Achsen
2	d: diffuse	gekreuzte Doppelhantel
3	f: fundamental	rosettenförmig

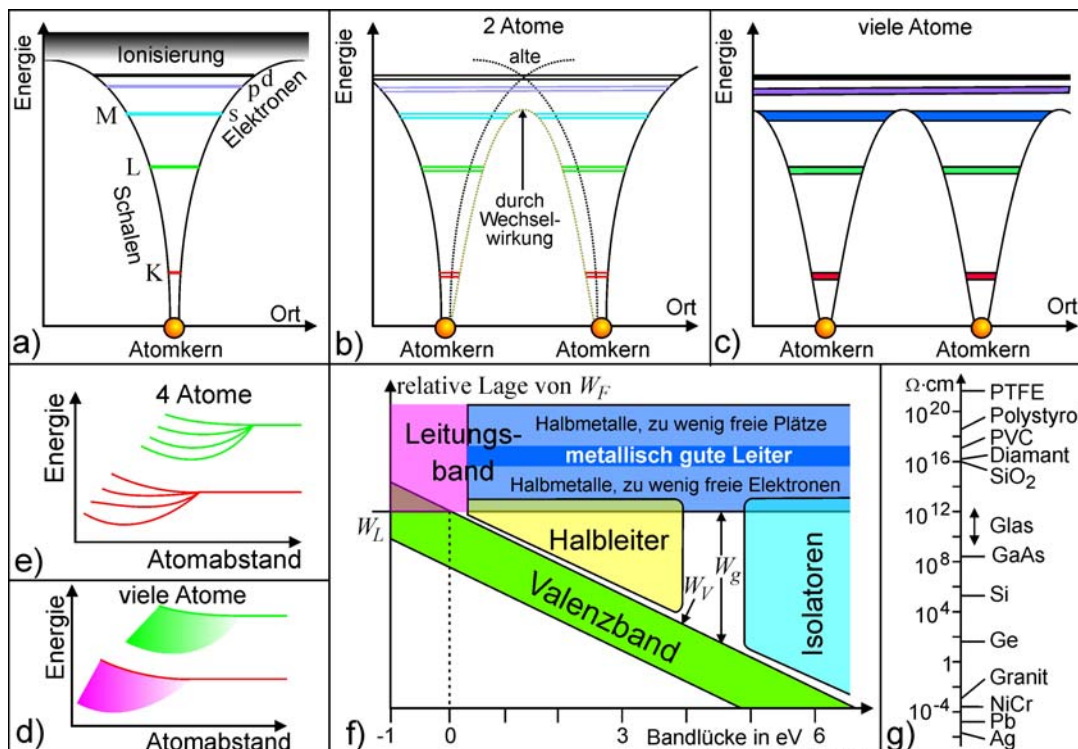
3. **magnetische Quantenzahl** als $2 \cdot l + 1$ Ausrichtung der Achsen (Orbitale) im Raum, entspricht Feinstruktur von Spektrallinien, je Schale sind maximal $2 \cdot n^2$ Elektronen möglich

n	Schale	maximale Anzahl der Elektronen	Zustände
1	K	$2 = 2 \times 1s$	$1s^2$
2	L	$8 = 2 \times 2s + 6 \times 2p$	$2s^2, 2p^6$
3	M	$18 = 2 \times 3s + 6 \times 3p + 10 \times 3d$	$3s^2, 3p^6, 3d^{10}$
4	N	$32 = \dots + 14 \times 4f$	$4s^2, 4p^6, 4d^{10}, 4f^{14}$
5	O	$50 = \dots + 18 \times 5g$	$\dots 5g^{18}$
6	P	$72 = \dots + 22 \times 6h$	$\dots 6h^{22}$

4. **Spin**-Quantenzahl s bzw. S mit $s = +\frac{1}{2}$ bzw. $-\frac{1}{2}$, nicht anschaulich erklärbar

1925 WOLFGANG ERNST PAULI (1900 – 1958) **Verbot für Quantenzustände**: zwei Teilchen an einem Ort müssen sich zumindest durch einen der 4 Quantenzustände unterscheiden

Für Kristalle folgt daraus das **Bänder-Modell**



Stimulierte Emission und Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Erzeugung und Verstärkung von kohärentem Licht durch stimulierte Emission

Lateinisch **stimulare** mit einem Stachel stechen, anstacheln

Lateinisch **emissio** das Herausschicken, Ausströmenlassen

1917 ALBERT EINSTEIN beschreibt stimulierte Emission (Laser)

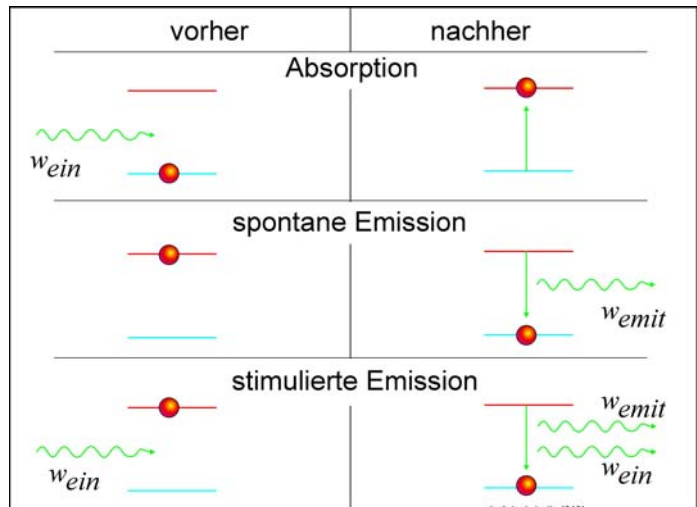
1928 RUDOLF LADENBURG (*1882) und HANS KOPPERMANN (*1895) weisen stimulierte Emission nach

1951 CHARLES HARD TOWNES (*1915) benutzt stimulierte Emission für ersten Maser

1954 NH_3 -Laser durch NIKOLAJ GENNADIJEWITSCH BASSOW (*1922) und PROCHOROW

1957 GORDON GOULD (1920 – 2005) prägt Begriff Laser

1960 THEODORE HAROLD MAIMAN (*1927) erster Festkörper-Laser, Rubin-Laser



LASER-Prinzip

Die einzelnen Energie-Terme sind lokal – über und zwischen den Atomen – leicht verformt

Eine spontane Emission kann nur erfolgen, wenn ein direkter, senkrechter Übergang möglich ist

Ist der minimale Abstand zwischen Termen seitlich verschoben → indirekter Übergang = metastabiler Term

Für die Emission zusätzlich „seitliche“ (thermische) Energie = Phononen (Gitterschwingungen) erforderlich

Ihre statistischen Gesetze bedingen eine beachtliche Verzögerung der Emission bis zu Minuten

Normal gehorcht die Belegungsdichte der Bänder der thermodynamischen BOLTZMANN-Verteilung

Eine pumpende Energiequelle erhöht die Ladungsträger im metastabilen Band

Durch stimulierte Emission können alle Elektronen schlagartig „herunterfallen“

Durch „Synchronisation“ = Kopplung der Photonen lässt sich so die Kohärenzlänge gewaltig vergrößern

Hierzu ist ein Fabry-Pérot-Resonator = Fabry-Pérot-**Interferometer** notwendig

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

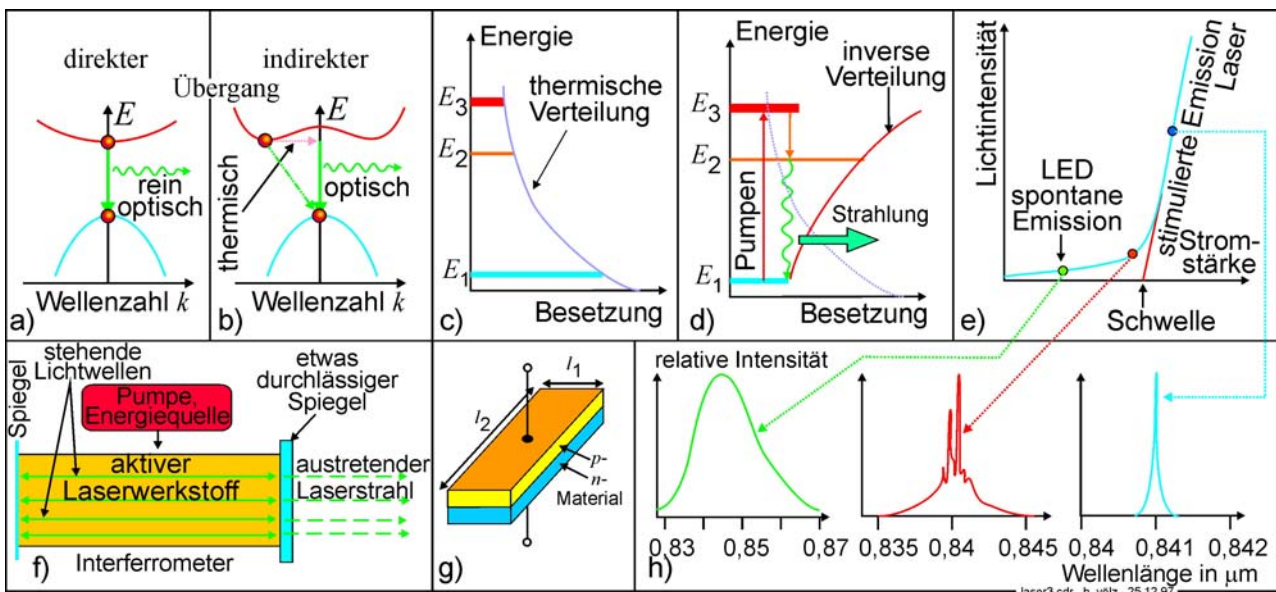
lateinisch **ferire** schlagen, treffen. CHARLES FABRY (1867 – 1945) und ALFRED PÉROT (1863 – 1925)

Wurde bereits Ende des 19. Jh. für andere optische Zwecke, z.B. für Lichtfilter entwickelt

Ein Spiegel ist undurchlässig, der andere um wenige Promille durchlässig

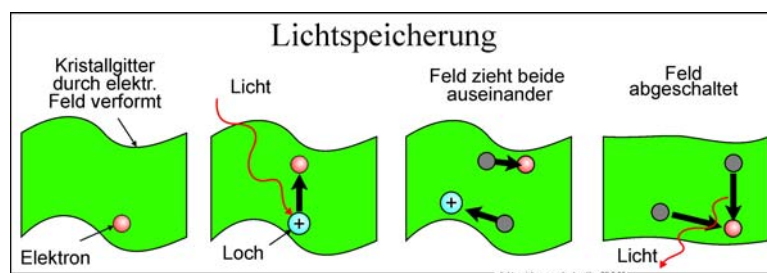
Wenn die Elektronen massenweise „herunterfallen“ entsteht im Resonator eine stehende Licht-Welle

Energie im Laser-Material ist immer viel höher als im Laser-Strahl → Lebensdauer-Probleme



Wichtige LASER-Varianten.

1. Ein **Festkörper-Laser** benutzt speziell dotierte Kristalle mit 3-Term-Schema. Wichtig ist Rubin (694,3 nm). Natürlicher **Rubin** (lateinisch **rubeus** rot) ist Edelstein Korund ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), der durch geringe Mengen Cr_2O_3 tiefrot gefärbt ist. Für Laser wird synthetisch sehr fehlerfrei hergestellter Rubin verwendet. Pumpen erfolgt mit energiereichen Blitzröhren. Andere Materialien sind Glas oder YAG (Yttrium-Aluminium-Granat), andere Dotierungen Neodym (1,064 μm), Ytterbium (940 nm) und Titan (670 - 1100 nm).
2. Beim **Gas-Laser** ist der Resonator mit einem Gas gefüllt, z.B. HeNe (632 nm), CO_2 (11 μm , wichtiger Industrielaser), 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 erfolgt mittels Gasentladung, seltener Mikrowellen. Spektralbereich reicht vom fernen Infrarot bis ins Ultraviolette
3. Der **Farbstoff-Laser** benutzt organische Farbstoffe in alkoholischer Lösung (oft Methanol oder Ethanol) oder in durchsichtigen Werkstoff Farbzentren. Gepumpt wird mit Blitzröhren gepumpt, zuweilen mittels Stickstoff-Gas-Laser. Bei einigen Farbstoffen ist ein Durchstimmen in einem Wellenbereich möglich. Um Ausbleichen zu vermeiden, wird die Farbstofflösung oft ständig umgepumpt
4. Ein **chemischer Laser** benutzt chemischen Reaktionen zum Pumpen
5. Der **Halbleiter-Laser** bzw. Injektions-Laser nutzt den Stromfluss eines pn-Übergangs zum Pumpen



Die Matrizenmechanik

WERNER KARL HEISENBERG (1901 – 1976) litt stark unter **Heuschnupfen**

Im Mai 1925 beurlaubt ihn MAX BORN (1882 - 1970) für **Helgoland**

Dort rechnet er mit den Zahlen der Spektren, seine so gewonnenen formalen Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Experimenten überein

Bei der Rückkehr erkennt MAX BORN das in der Mathematik

lange bekannte **Rechnen mit Matrizen** $\neq$

Hier gilt nicht das übliche kommutative Gesetz: $a \cdot b = b \cdot a$,

sondern $a \times b - b \times a = \Delta x$

Aus Impuls p , Ort q , PLANCK'schem Wirkungsquantum h und Einheitsmatrix I folgt dann $p \cdot q - q \cdot p = (h/2 \cdot \pi \cdot i) \cdot I$

Diese Formel steht auf dem Grabstein von MAX BORN in Göttingen.

Die Bilder stellte mir Oskar Schirmer zur Verfügung

Hieraus leitet 1926 HEISENBERG die Unschärfe-Beziehung

ab. Für Zeitunsicherheit Δt , Energie-Unbestimmtheit ΔE

und h gilt dann $\Delta t \cdot \Delta E = h/2$ bzw. $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2$ (eigentlich müsste $\hbar = h/2\pi$ benutzt werden)

BORN, HEISENBERG und PASCUAL JORDAN (1902 - 1980) bauen dann Matrizenmechanik aus. Ihr Ergebnis erscheint 1926 in der „Zeitschrift für Physik“

WOLFGANG PAULI (1913 – 1993) berechnet auf dieser Basis exakt das vollständige Wasserstoffspektrum

Langsam entsteht so die Einsicht, dass **Partikel und Welle** nur zwei unterschiedliche Beschreibungen des gleichen Sachverhalts sind. Es gilt also nicht „Welle oder Partikel“, sondern „Welle und Partikel“. → Welle-Teilchen-Dualismus

RICHARD FEYNMAN (1918 - 1988) sagt sogar: „Es ist keins von beiden“. Beides sind nur Modelle zu Beschreibung. Ob sie real existieren, ist fraglich

Unschärfe = Unbestimmtheit macht sich nur im Kleinen, aber nicht im Makroskopischen bemerkbar

Der LAPLACE-Dämon ist tot!

Die Klassische Physik ist ein Grenzfall! → Korrespondenz-Modell

Die Zuordnung der Matrizenmechanik nur zu HEISENBERG ist also historisch falsch

Insbesondere wird BORN als Lehrer von HEISENBERG und J. ROBERT OPPENHEIMER (1904 – 1967, »Vater der Bombe«) und weiterer wichtiger Ergebnisse (s.u.) nicht genügend gewürdigt. Außerdem wurde er von den Nazis vertrieben

NORBERT WIENER (1894 – 1964) sagte, BORN sei „der bescheidenste Gelehrte, den ich kenne“



Quanten-Fluktuation

Ein Pendel schwingt mit einer Frequenz, die nahezu unabhängig von der Amplitude ist

Das gilt generell für einen idealen harmonischen Oszillatoren

Voraussetzung dafür ist, dass die Energie E mit dem Quadrat der Auslenkung x zunimmt: $E \sim x^2$

Im klassischen Modell befindet sich das System ohne Anregung in der Ruhelage mit der geringsten Energie

Doch infolge der thermischen Energie wird es immer eine gewisse Schwankung um die Ruhelage durchführen

Für $T \rightarrow 0$ sollte sich jedoch das System (Pendel) in absoluter Ruhe im Energieminimum befinden

Dann wären aber Ort und Geschwindigkeit (Impuls) des Pendels oder Partikels exakt bestimmt

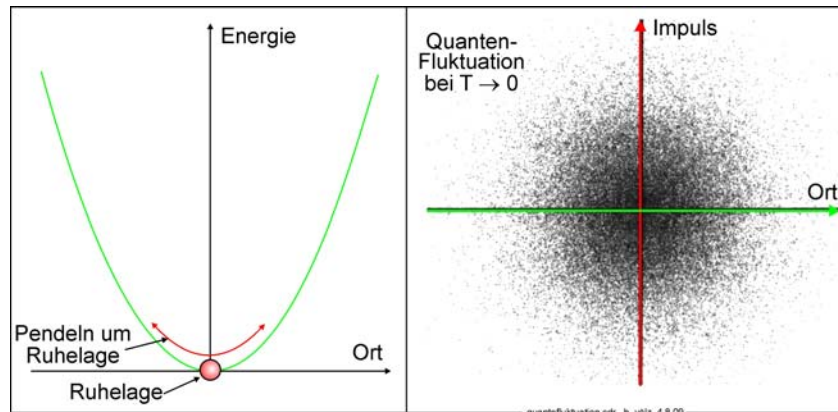
Dies ist wegen der HEISENBERG-Unschärfe nicht möglich. Es muss zufällige „Quantfluktuationen“ geben

Sie sind folglich selbst im „absoluten“ Vakuum vorhanden und wurde über die CASIMIR-Kraft nachgewiesen

Der Effekt wurde 1948 von HENDRIK BRUGT GERHARD CASIMIR vorhergesagt

Er macht sich u.a. in der Anziehung der Spiegelflächen eines Resonators bemerkbar (weniger Moden!)

Beim He entsteht infolge der Quantenfluktuationen beim Abkühlen kein Festkörper sondern Super-Flüssigkeit



SCHRÖDINGER-Wellen-Gleichung

Im November 1925 hielt ERWIN SCHRÖDINGER in Zürich ein Seminar zu DE BROGLIES Arbeit ab

Nachher fragte der Leiter des Instituts PETER DEBYE (Petrus Josephus Wilhelmus, 1884 – 1966):

„Sie sprechen über Wellen, aber wo ist die Wellengleichung, die beschreibt, wie sich die Wellen im Raum fortpflanzen?“

Daraufhin schuf sie SCHRÖDINGER als Weiterentwicklung der klassischen Wellengleichung. Hierzu soll er auch Hinweise von EINSTEIN erhalten haben

Es muss eine neue ortsabhängige komplexe Wellenfunktion ψ eingeführt werden (Interpretation s.u.). Eine einfache Schreibweise erfordert den Nabla-Operator

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k = \frac{\partial}{\partial r}$$

Mit Gesamt-Energie W , potentieller Energie U , Masse m und PLANCK-Konstante h gilt dann

$$\nabla \psi = (W - U) \cdot \psi \cdot \frac{2 \cdot m}{h^2}$$

Die Ableitung kann u.a. über Energieerhaltungssatz und die Unschärfe-Relation erfolgen

Es entsteht erneuter Streit kontinuierlich $\Leftrightarrow$ diskret, gemäß SCHRÖDINGER $\Leftrightarrow$ HEISENBERG

Zunächst existierten beide nahezu gleichzeitig entstandenen Quantentheorien völlig getrennt und lieferten jeweils hervorragende Voraussagen.

1926 konnte SCHRÖDINGER beweisen, dass beiden mathematisch vollkommen äquivalent sind

Rechnungen mit der SCHRÖDINGER-Variante sind jedoch einfacher und so setzte sie sich durch

Interpretation als Wahrscheinlichkeit

1927 Interpretiert MAX BORN das Betrags-Quadrat der Wellenfunktion ψ als Wahrscheinlichkeitsamplitude

Die Wellenfunktion ψ beschreibt also nicht den Zustand eines Quantenobjekts, sondern gibt nur die Wahrscheinlichkeit dafür an, bei einer Messung das Objekt anzutreffen

Für die Aufenthalts-**Wahrscheinlichkeit** im Volumen V gilt daher

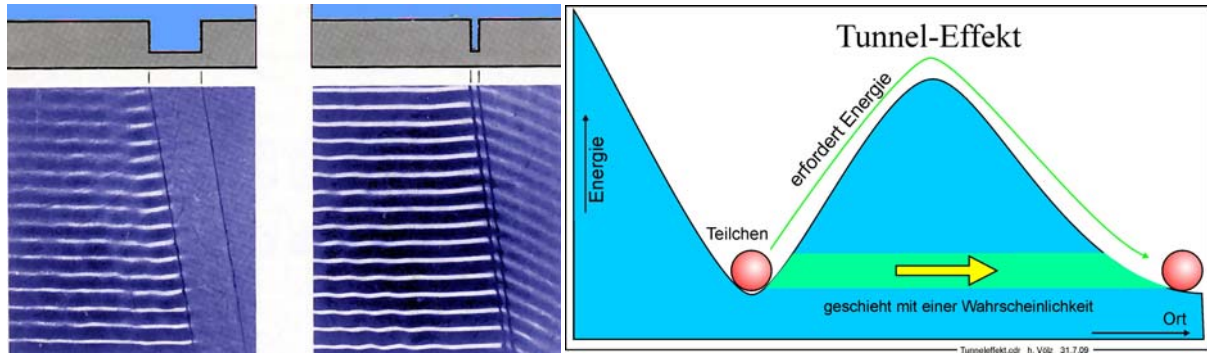
$$dW = |\psi|^2 \cdot dV$$

U.a. lassen sich so Doppelspalteneffekt für Elektronen, Tunneffekt, Radioaktivität und Supraleitung erklären

1926 FRIEDRICH HUND (1896 – 1997) postuliert den Tunneffekt

1928 GEORGE ANTHONY GAMOW (1904-1968) interpretiert den Alphazerfall als Tunneffekt

Außerdem wird unser Alltag zur wahrscheinlichsten aller Welten



Orbitale

Die räumliche Wahrscheinlichkeits-Verteilung eines Objektes zeigt sein Orbital (*lateinisch orbis* Umlauf)

Sie entsprechen klassisch den umlaufenden Elektronen

Die Form der Orbitale ist nur sehr wenig von der Schale = Hauptquantenzahl n abhängig

Ähnlich wie bei klassischen Bahnen wird durch sie fast nur ihre Größe proportional n^2 verändert

Besitzt ein Atom (Molekül) mehrere Elektronen (notwendig in verschiedenen Zuständen), dann überlappen und durchdringen sich die einzelnen Orbitale

Mathematisch gilt hierfür das Überlappungs-Integral S der Wellenfunktionen Ψ_i im Volumenelement dV

$$S = \int \psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \dots \cdot \psi_i \cdot dV .$$

Kugelförmige Orbitale sind gut mittels einer Windmühle zu veranschaulichen

Bei schneller Drehung sind nicht die Flügel, sondern nur eine unterschiedlich dicht belegte Scheibe zu erkennen

Aus den Helligkeiten der Scheibe im Drehpunktabstand ist auf die Breite der Flügel zu schließen

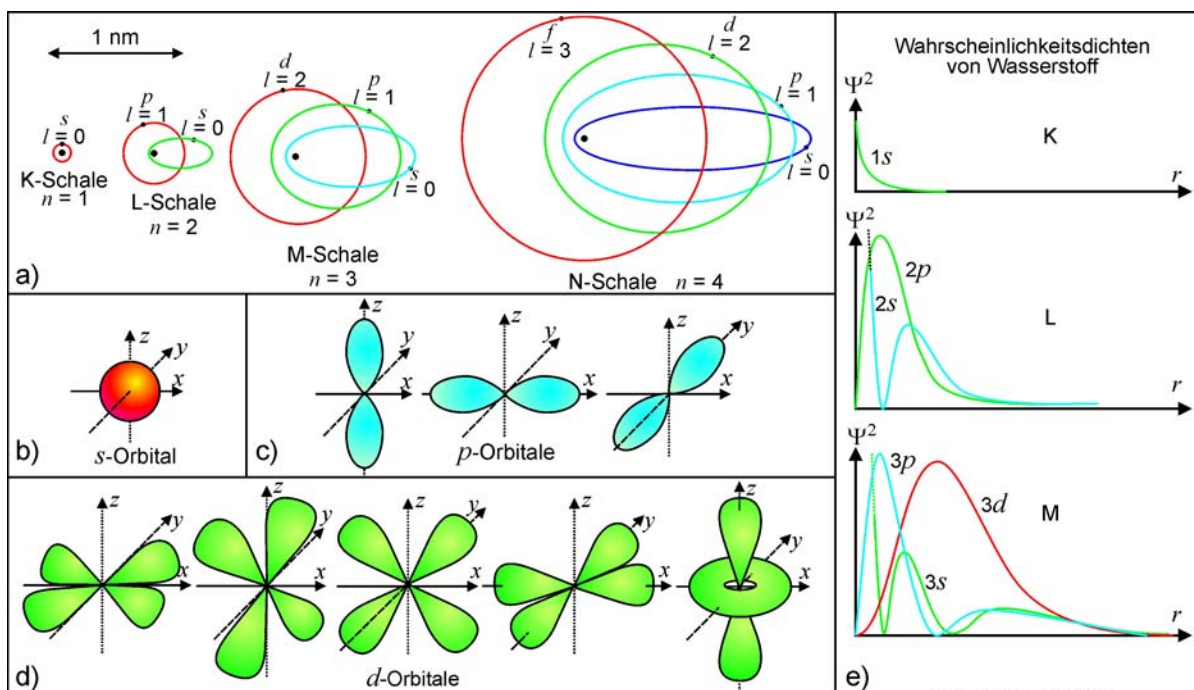
Im klassischen Modell bewegen sich die Elektronen um den Atomkern und erscheinen ähnlich „verschmiert“

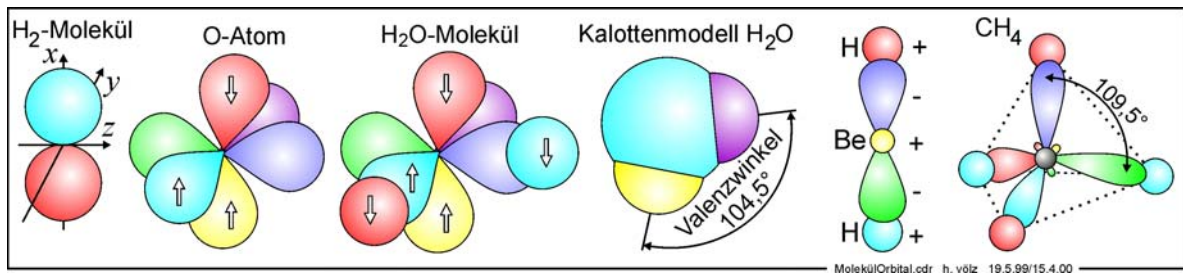
Die Grenze unserer zeitlichen Auflösung kann dabei mit der Unschärfe-Relation verglichen werden

Für nicht kugelsymmetrische Orbitale muss eine winkelabhängige Geschwindigkeit angenommen werden

Das stimmt Ellipsenbahnen überein, bei denen sich Elektronen in Kernnähe schneller bewegen

Mehrfache Ausbeulungen der Orbitale entsprechen dann unterschiedlichen Flügeln der Windmühle





Subjektiver und objektiver Zufall

Subjektiver Zufall beruht auf Informationsmangel zu den Anfangsbedingungen und/ oder zu den Bedingungen des Prozessablaufes sowie zu den gerade bekannten Gesetzen

Dann ist keine korrekte Vorausberechnung möglich

Typisch ist es für Unfälle und Wetter sowie Würfel- oder Lottospiel

In beiden Fälle wird vorausgesetzt, dass es deterministische Gesetze (LAPLACE'scher Dämon?!)

Objektiver Zufall liegt – im extremen Gegensatz dazu – bei wirklich zufälligem Geschehen vor

Seine Ursache ist nicht mangelnde Kenntnis. Es existiert kein Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung

Er liegt bei Quanten-Erscheinungen vor. Dies ist eine Folgerung aus der Unschärfe-Relation

Ein Quantenobjekt besitzt daher teilweise keine bestimmten Eigenschaften

Ist sein Impuls genau festgelegt, so kann der Aufenthaltsort nicht nur ungenau festgestellt werden, sondern es besitzt sogar keinen bestimmten Aufenthaltsort (s.u. Superposition)

Provokant ausgedrückt: Wenn ein Elektron gezwungen wird, in eine bestimmte Richtung zu fliegen, weiß es nicht einmal selbst, wo es sich aufhält.

Um so etwa zu vermeiden suchte u.a. EINSTEIN nach verdeckten Parametern (s.u.)

Fünf Feststellungen

- Quantentheorie ist eine Theorie des **begrenzten Wissens** konzipiert
Obwohl es nur Wahrscheinlichkeitsaussagen gibt, ist sie vielfach **sehr genau**,
z. B. die Energiezustände von Atomen und Molekülen sind sehr genau berechenbar
- Anschaulich gibt es zwar keine **Schalen um den Kern**, auf denen sich Elektronen bewegen
abstrakten und auf Mittelwerte bezogen, besteht jedoch eine Analogie zum Schalenaufbau
- MAXWELL und BOLTZMANN setzen die **kausalen Gesetze an die Spitze**
und leiten aus ihnen **Durchschnittswerte** ab
Die **Quantentheorie** tut das Gegenteil: Grundaussagen sind Durchschnittswerte,
Einzelwerte sind bei Aufsummierung wieder kausalartig.
- Relativitätstheorie** gilt großräumig, **Quantentheorie** im Mikrobereich
insbesondere gibt es bis heute keine relativistische Quantenmechanik
- Wir verfügen entsprechend unserer **Erfahrungen** nur über eine **Sprache der Makrowelt**. Daraus folgen die **Probleme** bei der Beschreibung der anderen, der Mikrowelt. Dies betrifft auch unsere **Intuition**

Einsteins Kritik

Mit Wahrscheinlichkeit $\approx$ Inderterminiertheit $\approx$ objektiven Zufall konnte sich EINSTEIN nie abfinden: In einem Brief von 1926 an BORN schreibt er:

„Die Quantenmechanik ist sehr achtung-gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt.“

An anderer Stelle sagt er:

„Ich will wissen, wie Gott diese Welt erschaffen hat. Ich bin nicht an dieser oder Erscheinung interessiert, am Spektrum dieses oder jenes Element. Ich möchte Seine Gedanken kennen, das übrige sind Details. Was mich wirklich interessiert ist, ob Gott bei der Erschaffung der Welt eine Wahl hatte.“

Weiter schreibt er in einen Brief an seinen Kollegen DAVID BOHM:

„Falls Gott die Welt geschaffen hat, war seine Hauptsorge sicherlich nicht, sie so zu machen, dass wir sie verstehen können.“

Die Wendung „der wahre Jakob“, d. h. nicht das Richtige, Echte, Wahre bezieht sich auf den Anspruch des spanischen Ortes San Jago di Compostella (= Giacomo Postolo = Jakobus Apostel). Er will die Gebeine des heiligen Jakob d. Ä. zu besitzen, der hier den Märtyrertod erlitten haben soll. Ansprüche anderer Orte und Kirchen wurden zurückgewiesen. So wurde nach Jerusalem und Rom San Jago di Compostella im Mittelalter zum berühmtesten Wallfahrtsort. 1161 wurde ein Ritterorden (bis 1835) gleichen Namens

zum Schutze der Pilger gegründet. Sie nannten sich bald Jakobsbrüder und sangen eigene Wallfahrtslieder «auf sant jacob's strassen». Der Name der sozialdemokratischen satirischen Zeitschrift „Der wahre Jakob“ (1884 bis 1933) wurde als Kontrast zu der geflügelten Wendung gewählt.



DIRAC-Schreibweise

1958 schuf PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC (1902 – 1984) eine abstrakte Schreibweise

Sie gilt für die Matrix-Schreibweise von HEISENBERG und die Wellengleichung mit Ψ von SCHRÖDINGER

Benutzt wird ein komplexer Wert ξ gemäß $a + b \cdot i$ mit $i = \sqrt{-1}$

Für die Zeile der Matrix wird $\langle \xi |$ (gesprochen bra) und für die Spalte $| \xi \rangle$ (gesprochen ket) eingeführt

Einfache zweifach entartet Beispiele sind:

Abstraktes (binäres) System	Elektronenspin	Photon-Polarisation	Atomares System*)
$ 0\rangle$	up $ \uparrow\rangle$	horizontal $ \leftrightarrow\rangle$	Grundzustand
$ 1\rangle$	down $ \downarrow\rangle$	vertikal $ \updownarrow\rangle$	angeregter Zustand
Standardbeschreibung	STERN-GERLACH-Versuch	Polarisator	Energieniveaus

*) Dies ist eine Vereinfachung, denn eigentlich existieren bei einem atomaren System viele Zustände

Für den Betrag der Matrix gilt dann $\langle \xi | \xi \rangle$ (gesprochen bra-ket, englisch Klammer)

Für zwei Lösungen (Zustände) A und B – z. B. der SCHRÖDINGER-Gleichung – ist dann $\langle A | B \rangle$ ihr Skalar-Produkt

Superposition und BLOCH-Kugel

Für ein gegenüber allen Einwirkungen von der Außenwelt abgeschirmtes Quantensystem gilt

$$\Psi = c_1 \cdot |A\rangle + c_2 \cdot |B\rangle \text{ mit } c_1^2 + c_2^2 = 1$$

Darin sind c_1 und c_2 beliebige, frei verfügbare Konstanten

Es existieren also gleichzeitig unendlich viele überlagerte Quantenzustände

Hier liegen die Vorteile vom Quantenrechner und QuBit (s. u.)

Die Überlagerung der unendlichen vielen Zustände heißt **Superpositionsprinzip**

1932 beschrieb es JOHN VON NEUMANN (1903 – 1957) in „Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik“

Es kann durch alle Punkte auf der **Kreisoberfläche** mit $r = \langle A | B \rangle$ veranschaulicht werden

Dieses Kugelbild schuf FELIX BLOCH (1905 – 1983)

Am oberen „Nordpol“ befindet sich der eine Zustand (z. B. A), am unteren „Südpol“ der andere (B)

Durch eine **externe Einwirkung**, z. B. durch Messung wird **zufällig** nur ein einziger Zustand angenommen

Dem System wird Quantenenergie entnommen und so verstärkt, dass ein Makrosystem sich ändert

Das Makrosystem kann dabei aber von den vielen Quantenzuständen nur einen einzigen übernehmen

Hierbei tritt der Zufall, die Wahrscheinlichkeit auf

Die Folge ist **Dekohärenz** als aufgehobene Superposition

Messung an einem Quantensystem entspricht folglich einer zerstörenden Wiedergabe

Außerdem ergibt sie nicht deterministisch eindeutige, sondern nur statistisch bedingte Werte

Das ist letztlich auch Ursache der Heisenbergschen Unschärferelation.

SCHRÖDINGERS Katze versucht derartige Zusammenhänge zu veranschaulichen

Im Alltag sehen wir deshalb keine Superposition, weil **makroskopische Objekte** praktisch nicht von der Umwelt hinreichend zu isolieren sind und damit sehr schnell Dekohärenz auftritt

Quantentheoretisch sollte eine **instabil hochgestellte Karte** superpositioniert nach links *und* rechts umfallen
Durch die Dekohärenz fällt sie aber nur nach einer Seite

Das QuBit

Den Begriff **Quantenphysikalisches Bit** hat 1995 hat BENJAMIN W. SCHUMACHER geprägt

Neben QuBit sind auch qbit, QBit und Qbit gebräuchlich

Hierzu werden die SHANNON'schen Bit-Zustände $\text{Bit} = \{0, 1\}$ formal auf ein Quantensystem übertragen

$$\text{QuBit} = \{c_1|0\rangle + c_2|1\rangle\}.$$

Es kann somit alle Werte der **Kreisoberfläche** mit dem Radius 1 annehmen

Durch eine Messung wird jedoch nur ein reeller Wert mit c_{1m} und c_{2m} angenommen

$$x = c_{1m} \cdot 0 + c_{2m} \cdot 1.$$

Er liegt im abgeschlossenen Intervall $[-1 \dots \pm 0 \dots 1]$. Die technischen Folgen hiervon sind:

1. Für Quantenzustände gibt es **kein Backup**
2. Quantenzustände sind nicht zu **klonen**
3. QuBits sind **fest an einen Ort** gebunden
4. Eine **Fehlerkorrektur** dürfte sehr schwierig sein
5. Da die Abmessungen für QuBit (nm) extrem klein sind, ist eine sehr hohe **Speicherdichte** möglich ist

Das Traumaskop

Das Traumaskop [Völz 2007] ist ein Vorläufer des Films

und wird zuweilen noch als Kinderspielzeug benutzt

In der Mitte auf einen langen Faden ist eine runde

Pappscheibe befestigt

Auf ihrer Vorder- und Rückseite befinden zwei

Bewegungsphasen eines Bildes

Durch Rotation kann so dem Auge Bewegung vorgetäuscht werden

Leicht abgeändert sind hier zwei Teilbilder auf der Scheibe, die sich durch schnelle Rotation ergänzen

Das Traumaskop als QuBit

Für das QuBit werden die Vorder- und Rückseite per Zufall mit 0 oder 1 belegt

Zusätzlich werden unterschiedliche Schriftfonts, Farben und Größen verwendet

Die Rückseite der Pappscheibe erhält außerdem einen grünen Rand

Auf beiden Seiten sind so vier Belegungen möglich:

11, 12, 21 oder 22

Klassisch informationstheoretisch sind zur Feststellung der Belegungsvariante zwei Bit erforderlich

Zunächst wird die Ziffer auf der Vorderseite und nach dem Umdrehen die auf der Rückseite gefunden

Bei schneller Rotation f überlagern sich beide Seiten, beide Belegungen sind sofort (unscharf) sichtbar

„Unscharf“ bedeutet: es existieren auch mehr oder weniger geneigte Zwischenzustände

Dieser Zustand entspricht dem Korrespondenzprinzip von BOHR mit Betrachtungszeit $\Delta t \rightarrow \infty$, bzw. $\Delta t \gg 1/f$

Mit kurzzeitigem Blitzlicht entstehen Aufnahmen, welche die Scheibe in „zufälligen“ Lagen zeigt

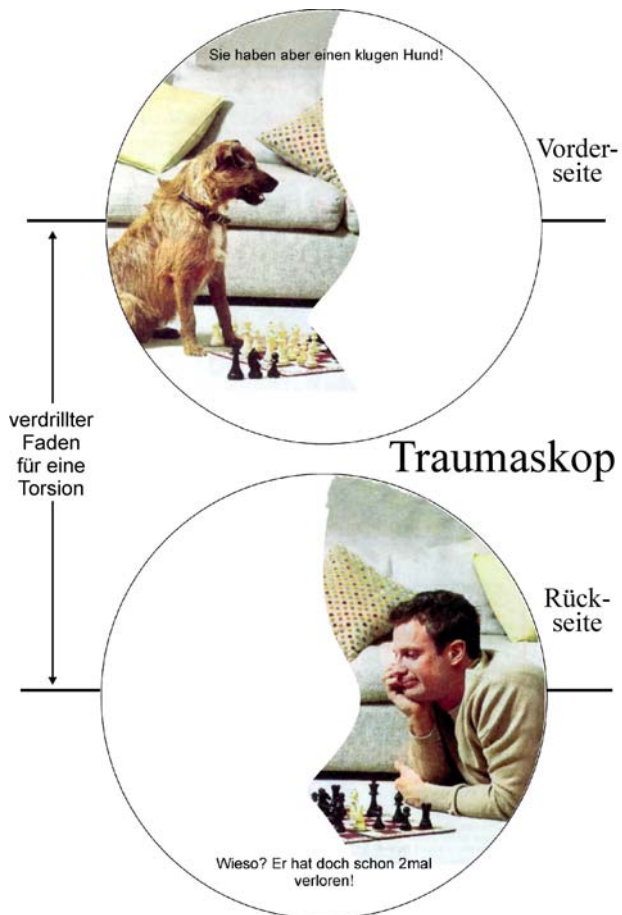
Wenn sie z.B. gerade senkrecht stand, erscheint nur ein Strich, andernfalls Schräglagen.

Jede Aufnahme entspricht speziellen Werten von c_1 und c_2

Weitere Varianten werden erhalten, wenn unterschiedliche Blitzlängen gewählt werden

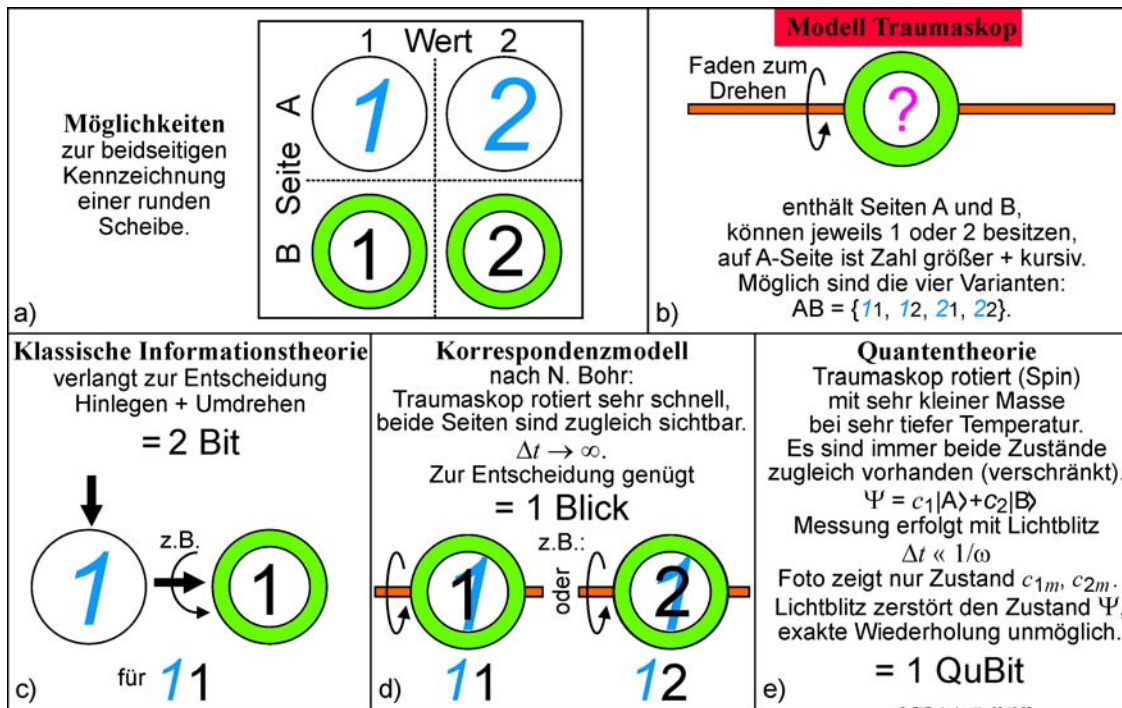
Mit dem Traumaskop lassen sich also Aussagen gewinnen, die recht nahe der Quantentheorie sind

Noch besser ist ein gedanklicher Übergang zu mikrophysikalischen Abmessungen



Bei extrem kleiner Masse ist dann unmittelbar die Analogie zum Spin möglich
Jede Einwirkung, auch ein Blitz, zerstört dann den auf dem Bild gezeigten Zustand

Es gibt keine Superposition mehr!



Verschränkung und Nichtlokalität

Für Anwendungen, z. B. Computer und Speicher werden mehrere Bit und entsprechend auch QuBit benötigt
Dazu müssen zwei oder mehrere Quantensysteme in enger Wechselwirkung „**Verschränkung**“ stehen
Begriff wurde 1935 von SCHRÖDINGER eingeführt

Auch diese Quanten-Registern müssen völlig gegenüber Umwelteinflüssen geschützt werden

Bisher sind nur Quantenregister bis zu maximal einigen hundert QuBit realisiert

Bei Quanten-Rechnungen liegen immer alle möglichen Ergebnisse gleichzeitig als Superposition vor

Daher wären Quanten-Computer viel leistungsfähiger und schneller!

U.a. würden so die heute üblichen Krypto-Verfahren unsicher werden (Primzahlzerlegung)

Sind zwei Partikel, z.B. Photonen, verschränkt, so betrifft die Änderung des einen sofort das andere

Das gilt auch dann, wenn sie sich inzwischen beliebig weit voneinander entfernt haben

Die Änderung eines Teilchens wird völlig unverzüglich, d. h. mit ∞ Geschwindigkeit vom zweiten übernommen

Fast ähnlich gilt: Ein Elektron existiert als Welle in einen großen Raum

Wird es aber als Teilchen registriert, so geschieht das nur an einem genau definierten Ort

Hierbei erfolgt also – wie bei jeder Messung – ein **Kollaps der Wellenfunktion** → Kopenhagener Deutung

Ohne Verzögerung mit $v = \infty$ muss die Welle im gesamten Raum verschwinden

Eigenschaften der Quantenobjekte können prinzipiell nicht störungsfrei gemessen werden

Insgesamt sprach daher EINSTEIN von **spukhafter Fernwirkung** (s. u.)

Woraus auch die **Nichtlokalität** der Quantentheorie folgt

Vereinfacht und anschaulich gilt das für ein **Paar Handschuhe**: Steckt man morgens nur einen in die Tasche, so ist der andere zuhause geblieben. Das gilt auch dann, wenn man erst mittags den mitgenommenen betrachtet

Ist die Quantentheorie unvollständig?

An einem einzelnen Photon ist die Polarisierung nicht zu bestimmen

Passiert es ein Polarisationsfilter, so könnte es genauso ausgerichtet gewesen sein

Es könnte aber auch seine **Chance** gemäß der Wahrscheinlichkeit **genutzt haben**

Entsprechendes gilt, wenn das Photon **reflektiert** wurde, das Filter stand evtl. senkrecht zur Polarisationsrichtung, oder auch hier ist nur die Wahrscheinlichkeit wirksam geworden

Erst über viele gleich polarisierte Photonen ist die Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Winkel bestimmbar

Hat das einzelne Photon das Filter passiert (reflektiert), so ist seine Polarisierung unabänderlich festgelegt

Der Zustand des Photons wird durch die Messung verändert, festgelegt, wie es für Quantenmessungen üblich ist

Für 2 klassische, wechselwirkende Teilchen, auch größere Objekte sind ihre Zustände unabhängig anzugeben

Beispiel: Bewegung der Erde um die Sonne, die durch die Gravitationskraft beeinflusst ist

Bei verschränkten Quantensystemen, z.B. Photonen ist das nicht möglich (spukhafte Fernwirkung)

Zwei Photonen werden nun so verschränkt, dass ihre Polarisationen senkrecht zueinander sind

Sie sollen in entgegengesetzte Richtungen fortfliegen

Wird nun ein Photon per Polarisator festgelegt, so gilt das auch sofort für das andere

Wegen fehlender Wechselwirkung muss das zweite Photon diese Polarisation schon vor der Messung des ersten gehabt haben

Ein Zustand beschreibt also beide Photonen

Ein Artikel von EINSTEIN, BORIS PODOLSKY und NATHAN ROSEN in „The Physical Review“ Mai 1935

Sie zweifeln nicht mehr die Quantentheorie an, sie hat sich inzwischen zu sehr bewährt

Sie könnte aber **unvollständig** sein, es könnten **verdeckte Parameter** bzw. mehr Information vorhanden sein

Vollständigkeit bedeutet, dass jedes Element in der Realität genau einem in der Theorie entspricht

Realität bedeutet, dass eine physikalische Größe ein Element der Realität ist und mit Sicherheit vorausgesagt werden kann, ohne das System zu stören

Doch wie die Unvollständigkeit experimentell zu bestimmen sei, ist noch völlig unklar

Dieser Artikel soll BOHR „wie ein Blitz aus heiterem Himmel getroffen haben“ [Rae] S. 84

Er ließ sofort alle anderen Arbeiten liegen und kam schließlich zu der ihn befriedigenden Antwort:

„Sie [EINSTEIN, PODOLSKI, ROSEN] *machen es geschickt, aber worauf es ankommt, ist, es richtig zu machen.*“

Auf Einsteins „Gott würfelt nicht“, soll er geantwortet haben: „Schreiben Sie Gott nicht vor, was er tun soll!“

Der experimentelle Ansatz

1964 findet JOHN S. BELL (1928 – 1990) einen experimentellen Ansatz

Er wird von JOHN CLAUSER, MICHAEL HORNE, ABNER SHIMONY und RICHARD HOLT (CHSH) präzisiert

Schließlich von ALAIN ASPECT (*1952) überprüft

Grundgedanke bezieht sich auf Prof. BERTLMANN, den es wirklich, mit BELL befreundet in Wien gab

Er trug fast immer verschiedenfarbige (verdeckte Information) Socken

Wenn er mit einem Fuß um die Ecke kam, so wusste man, dass die zweite Socke eine andere Farbe hat

Zwei verschränkte, senkrecht zu einander polarisierte Elektronen fliegen wieder in entgegengesetzte Richtung

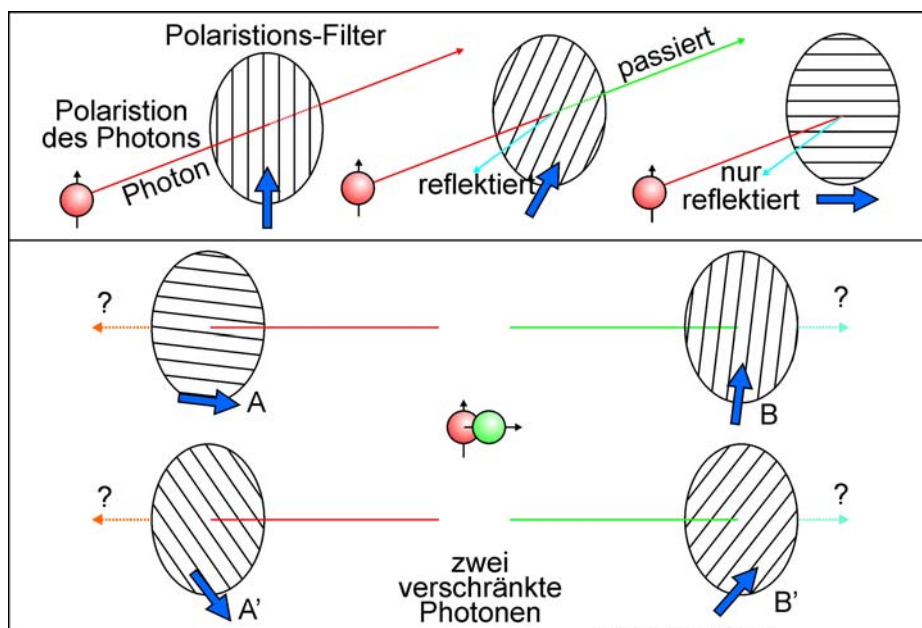
Auf beiden Seiten sind Polarisationsfilter vorhanden, die in je zwei Stellungen A, A', B, B' gebracht werden

So werden vier Messungen an dem Photonenpaar (gedanklich) vorgenommen

Jedes Photonenpaar sei durch eine (eventuell auch mehr versteckte) Variable charakterisiert

Mit der Stellung des zugehörigen Polarisationsfilters bestimmt sie das Messresultat des ersten Photons (usw.)

Wesentlich ist dabei, dass die Stellung des zweiten Polarisationsfilters ohne Einfluss bleibt



Experiment und Theorie

Passiert ein Photon ein Filter, so wird das Ergebnis mit +1, bei Reflexion mit -1 gekennzeichnet
Für beide Photonen werden diese Werte multipliziert, wodurch wiederum nur +1 oder -1 möglich ist
Die CHSH-Vorschrift lautet $\{AB\} + \{A'B\} + \{A'B'\} - \{AB'\}$; $\{\}$ bedeutet Ergebnis der Filterstellungen
Es muss sich immer +2 oder -2 ergeben (durch Überprüfung der 16 Möglichkeiten feststellbar)

Anschaulich zeigt dies ein Spiel mit zwei Spielern und Skatkarten (s. Tabelle)

Die Spieler entsprechen den beiden Messapparaten, Jede Karte ist eine „Überlagerung“ von zwei Kennzeichen

1. **Farbe**, also Karo, Herz, Pik, Kreuz
2. **Wert**, also 8, 9, 10, Bube, Dame, König und AB

Das Photonenpaar wird erzeugt, indem ein Spielleiter eine verdeckte Spielkarte von Stapel entnimmt

Zur Messung wird die Karte (zweifach identisch) an die beiden Spieler gegeben

Die Information des ersten Photons (Spieler 1) liegt in der Farbe, die des zweiten (Spieler 2) im Wert

Der erste Spieler führt die Messungen A und A' (Wert verdeckt), der zweite B und B' (Farbe verdeckt) aus

Jeder erhält zwei Messwerte (Tabelle) = 4 nicht vorhersehbare Einzelergebnisse für die CHSH-Korrelation

Beispiel: **Pik-Bube**: Spieler 1 → +1 und -1. Spieler 2 → -1 und 1. Gemäß CHSH-Vorschrift $+1 \cdot -1 - (-1) = -2$

Leicht überprüfbar ergibt sich immer +2 oder -2

An jedem Photonenpaar (gezogener Karte) ist jedoch immer nur eine Messung möglich

Sie wird von den Spielern immer zufällig und unabhängig voneinander eine Messvariante ausgewählt

Dann wird das Spiel sehr lange gespielt

Über die Spiele wird je ein Mittelwert für $\{AB\}$, $\{AB'\}$, $\{A'B\}$ und $\{A'B'\}$ gebildet

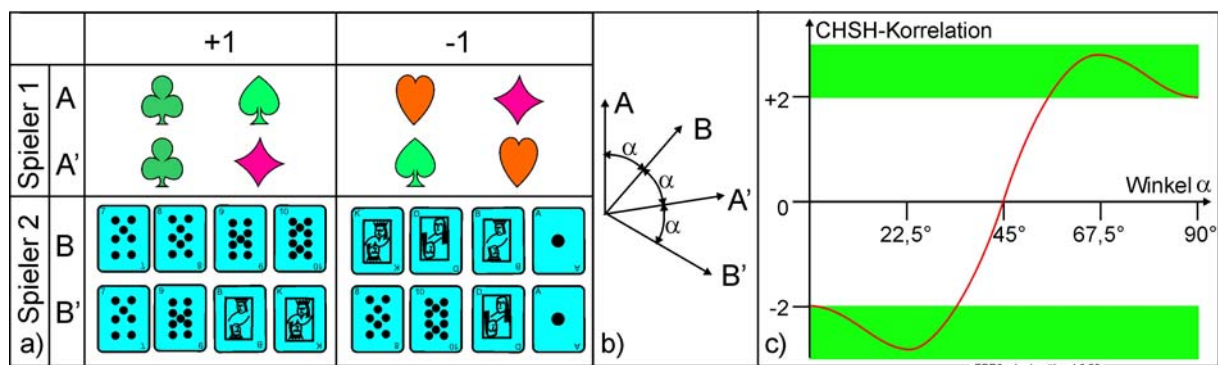
Daraus wird ein Wert nach CHSH-Vorschrift gebildet. Er muss zwischen -2 und +2 liegen

Aus der Quantentheorie und experimentellen Untersuchungen ergeben sich jedoch abweichende Ergebnisse

Für gleiche Winkel α zwischen den Richtungen der Polarisatoren folgen um $22,5^\circ$ und $67,5^\circ$ zu große Werte

Damit ist die Annahme von verdeckten Variablen widerlegt

Inzwischen konnte die Nichtlokalität der Quantentheorie über mehr als zehn Kilometern nachgewiesen werden



Viele Welten Theorie

1957 schlägt HUGH EVERETT (1930 – 1982) in seiner Doktorarbeit die „Viele-Welten-Interpretation“ vor

Der Name geht auf einen späteren Vorschlag von BRYCE DEWITTS (1923 -2004) zurück

Die Quantentheorie ist danach auch auf alle größeren, ja makroskopischen Objekte anwendbar

Sie ist also für alle physikalischen Systeme gültig, aber bei jeder Messung verzweigt sich das Universum

= Interpretation des verzweigten Universums

Das gesamte Universum kann, muss unitär durch eine hoch komplexe Wellenfunktion beschrieben werden

Mikroskopische Superpositionen werden extrem schnell zu komplexen makroskopischen überlagert

Jeder Beobachter nimmt so seine ihm eigene Welt wahr

Diese Vereinfachung erzwingt, dass alle parallel unterschiedlichen Wahrnehmungen der Wirklichkeit real sind.

Im Gegensatz zur Kopenhagener Deutung stellt die SCHRÖDINGER-Gleichung nicht nur unser Wissen über den Zustand

eines Quantenobjekts dar, sondern liefert für jedes Quantensystem die vollständige Beschreibung

Die Dekohärenz, das Verschwinden der Superposition erfolgt durch die Wechselwirkung mit der Umgebung

Hierzu wird Zeit benötigt und der Kollaps der Wellenfunktion ist nicht mehr notwendig

Beleg könnte sein: Viele Eigenschaften makroskopischer Objekte sind durch Quanteneigenschaften bestimmt

z.B. ob Festkörper Metalle, Halbleiter oder Isolatoren sind

Ich habe dazu nichts gefunden: Besteht gewisse Ähnlichkeit zu den gegeneinander bewegten System der Relativitätstheorie

Supra-Leitung = makroskopischer Quantenzustand

1911 entdeckte HEIKE KAMERLINGH ONNES (1853 – 1926) die Supraleitung von Hg bei $T \leq 4,2 \text{ K} = -269 \text{ °C}$
 Hierbei gibt es keinen elektrischen Widerstand: Ein Kreisstrom fließt unaufhörlich und ist als Magnetfeld zu messen
 Zur Erklärung führte 1956 LEON N. COOPER (*1930) die Cooper-Paare von Elektronen ein
 1957 entsteht BCS-Theorie für Supraleitung, JOHN BARDEEN (*1908), LEON N. COOPER (*1930) und JOHN ROBERT SCHRIEFFER (*1931)

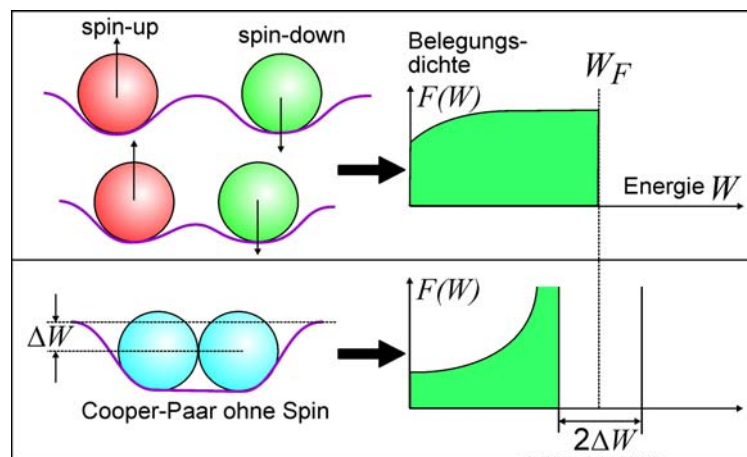
Zwei Kugeln befinden sich auf einem aufgespannten Gummituch und drücken sich etwas in die Unterlage ein
 Wird ihre Entfernung verringert, so laufen sie irgendwann unter Energiegewinn aufeinander zu und bilden dann ein Paar mit gemeinsamer Vertiefung

Ähnliches gilt für zwei Elektronen mit gegensätzlichem Spin und Impuls
 Dabei wird die elektrostatische Abstoßung überwunden und ein Energiegewinn $\Delta W \approx 10^{-4}$ bis 10^{-3} eV erreicht
 Es entstehen COOPER-Paare. Hierbei hebt sich der Spin auf, sie werden zu Bosonen
 Da nun das Pauli-Verbot nicht mehr gilt, können viele Paare ($\approx 10^{20}$) den gleichen Zustand einnehmen
 Es entsteht ein BOSE-EINSTEIN-Kondensat
 Der Durchmesser von COOPER-Paaren liegt bei ca. $10^{-7} - 10^{-6} \text{ m} = 100\text{- bis } 1000\text{facher Atomdurchmesser}$
 Deshalb werden sie an nicht mehr gestreut → elektrischer Strom fließt verlustfrei

Bei Zimmertemperatur gilt für Elektronen die FERMI-DIRAC-Statistik
 Die Belegungsdichte $F(W)$ endet an der FERMI-Grenze W_F
 Die Mehrzahl der Cooper-Paare befindet im Abstand $\Delta W/2$ links von der Fermi-Kante

COOPER-Paare zerfallen wieder in Elektronen, wenn eine Energie $> \Delta W$ zugeführt wird
 Das kann durch höhere Temperatur oder ein Magnetfeld erfolgen → Material wird normalleitend

Die experimentelle Beobachtung supraleitender Eigenschaften bestätigt die Gültigkeit der Quantenphysik für makroskopischen Systeme



Speicher- = Dekohärenz- und Schaltzeit beim QuBit

QuBit sind nur solange beständig, wie kein äußerer Einfluss ausgeübt wird, keine Dekohärenz erfolgt
 Da thermisches Rauschen stört, sind sehr tiefe Temperaturen – mK und μK – notwendig
 Weiter stören kosmische und radioaktive Strahlung, spontane Photonen-Emission, spontaner Atom-Zerfall
 Näherungsweise gilt, je größer die Masse (z.B. des Quanten-Registers), desto kürzer ist die Dekohärenzzeit
 z.B. ist die Superposition zweier Zustände mit 1 g Masse und 1 cm Abstand ist bereits nach 10^{-23} s zerstört
 Typischen Dekohärenzzeiten hängen erheblich vom verwendeten Quantensystem ab
 Die besten Werte wurden bisher nur beim gut „abgeschirmten“ Kernspin erreicht
 Für Quantencomputer sind außerdem noch die „Schaltzeiten“ der Quanten-Gatter wichtig
 Typisch sind folgende Werte, die allerdings stark von der Temperatur abhängen:

System	$t_{\text{Dekohärenz}}$	t_{Gatter}	Verhältnis
Ionenfallen	10^{-4} s	10^{-17} s	10^{13}
Kernspin	10 s	10^{-6} s	10^7
Quantenpunkte	10^{-6} s	10^{-9} s	10^3

Das Verhältnis gibt die maximal mögliche Anzahl der Operationen an.

In der Aufzählung fehlen u.a.

- JOSEPHSON-Kontakte und BOSE-EINSTEIN-Kondensate, zu ihnen wurden keine Daten gefunden
- Die Polarisierung von Licht, doch Lichtspeicherung ist bisher nur indirekt möglich

Realisierte QuBit-Systeme

JOSEPHSON-Kontakte wurden 1997 von SHNIRMAN u.a. vorgeschlagen. BRIAN DAVID JOSEPHSON (*1940)
Notwendig Supraleitung (Cooper-Paare), also extrem tiefen Temperaturen

Quantenpunkte (= quantum dots = Quanten-Fallen) schlugen 1998 DANIEL LOSS und DAVID DIVINCENZO vor
Mit Rasterkraftmikroskop werden atomweise im Halbleiterkristall „Fehlstellen“ von wenigen nm³ eingebaut
In ihnen sind einzelne Elektronen (QuBit) in der Bewegungsfreiheit stark eingeschränkt, Wände reflektieren sie
Anregung erfolgt u.a. mit Lichtblitzen von 100 fs
Als „Wiedergabesignal“ senden sie genau definierte Photonen aus
Quantenpunkte sind leider immer etwas mit dem umgebenden Kristallgitter verknüpft → kurze Dekohärenzzeit

Kernspin: Nutzung erfolgt durch NMR (nuclear magnetic resonance = Kernmagnetische Resonanz)

Bisher das einzige Prinzip, das bei Zimmertemperatur funktioniert
Alle erforderlichen QuBit sind in einem Molekül (Quantenregister) unterzubringen

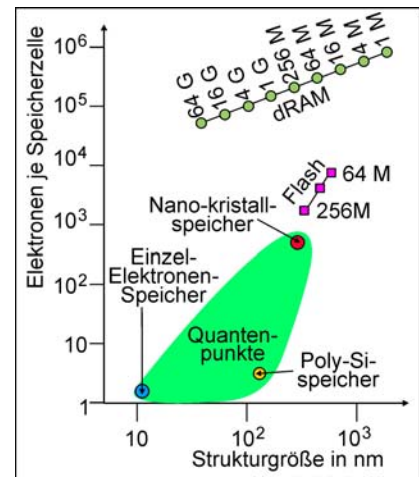
Durch externes Magnetfeld können die Kernspins (QuBit) parallel oder antiparallel ausgerichtet werden

Weil immer gleichzeitig sehr viele Moleküle ($\approx 10^{18}$) notwendig sind, ist Speicherdichte sehr gering

1997 nutzen D. CORY, N. GERSCHENFELD und I. CHUANG dafür Atome komplexer Moleküle

1999 wurde erster 5-QuBit-Computer mit Molekül BOC ¹³C₂-¹⁵N-²D₂-Glycerin-Fluorid realisiert

Der 1994 von PETER SHOR entwickelte Algorithmus wurde zur Primzahlzerlegung der Zahl 15 benutzt



Ionenfallen verlangen zweierlei

- *Vakuum-Gefäß* um restliche Wechselwirkungen zu unterbinden
- *Mehrstufige Kühlung* bis nK zur Senkung der thermischen Bewegung
Sie wurde von THEODOR WOLFGANG HÄNSCH (*1941) und ARTHUR LEONARD SCHAWLOW (*1921) für freie Atome und von WINELAND und DEHMELT für Ionen vorgeschlagen
Die zusätzliche optische Laser-Kühlung empfahlen 1995 JUAN IGNACIO CIRAC (*1965) und PETER ZOLLER
- *Lokalen Fixierung* durch speziell geformte elektrische und zusätzliche magnetische Felder
Teilweise werden auch stehende Lichtwellen als „optische Spiegel“ benutzt (s. MOT)

Bereits Ende der 50er Jahre schlug WOLFGANG PAUL (1913 – 1993) die heutigen PAUL-Fallen für Ionen vor

Zunächst wurden sie nur in der optischen und Massenspektroskopie eingesetzt

Ende der 80er Jahre gelang es mit ihnen, einzelne Ionen zu speichern

Die **Magneto-optische Falle** (= MOT = magneto optical trap) wurde 1987 von JEAN DALIBARD (*1958) entworfen und etwas später von DAVID PRITCHARD und STEVEN CHU (*1948) gebaut.

Sie verwendet 2x3 Laserstrahlen nicht sehr hoher Energie (mW), je 2 gleicher Polarisation und Wellenlänge

Die 3 um jeweils 90° versetzten stehenden Wellen erzeugen Lichtgitter mit periodisch getrennten Volumen

Mit Magnetfeld (Spulen) werden dann Ionen in Licht-Gitterfeld des Vakuumgefäßes festgehalten

Eine Weiterentwicklung benutzt zusätzlich einen Halbleiter-Chip zur Steuerung, dient zugleich als Spiegel

Eine andere Variante benutzt Hohlraum-Resonatoren

BOSE-EINSTEIN-Kondensat (BEK englisch BEC) wurde 1924 von ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955) und SATYENDRA NATH BOSE (1894 – 1974) vorhergesagt, kann als Weiterentwicklung der Ionenfallen gelten

Bei Raumtemperatur verhalten sich Atome eines Gases wie kleine, harte Kugeln

Gemäß Masse m , Geschwindigkeit v und PLANCK-Konstanten h = Materiewelle $\lambda = h/m \cdot v$

U.a. durch Laser-Kühlung werden sehr tiefe Temperaturen erreicht

Dann wird die (thermische) Geschwindigkeit sehr klein und λ enorm groß

So werden viele Bosonen auf engstem Raum zusammengedrängt und nehmen den gleichen Grundzustand an

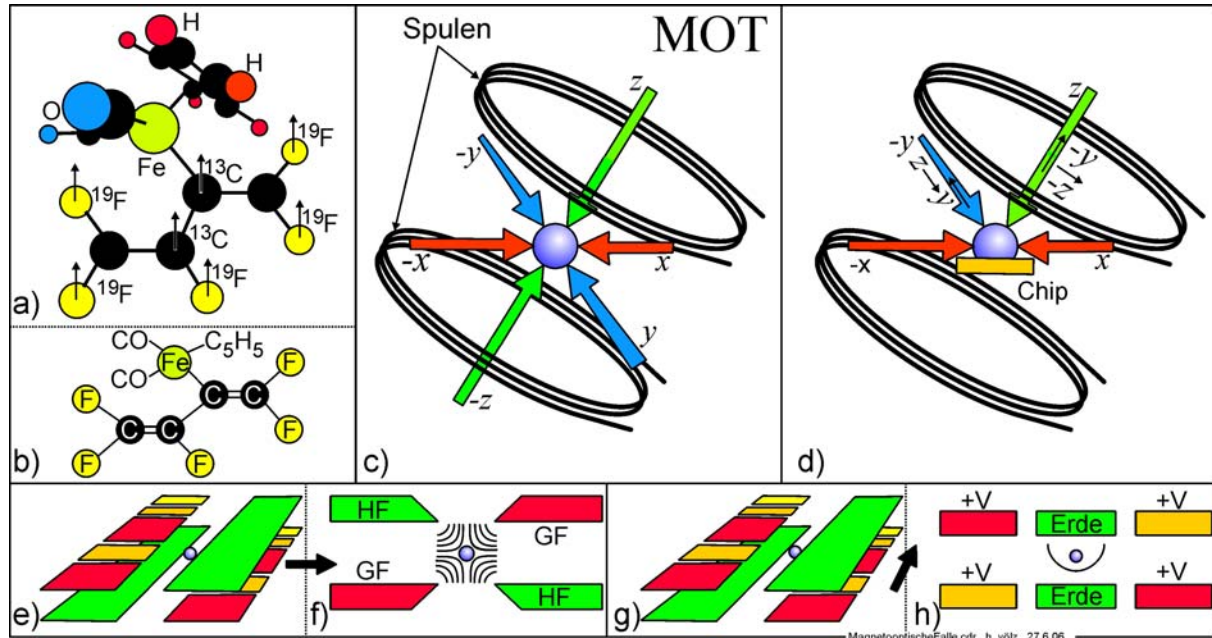
Alle Teilchen verlieren ihre Individualität, sind korrekt – wie in einem Eierkarton – angeordnet

Es entsteht eine einzige, makroskopische, phasenkohärente Wellenfunktion ψ

Die Atome wechselwirken kaum miteinander, reagieren völlig synchron, wie Soldaten bei einer Parade

Es liegt ein einziges Quantenobjekt von makroskopischer Dimension, das BEK vor
 Es entspricht einen superfluiden Zustand und zeigt daher keine Reibung (Viskosität)
 Ein Optisches Analogon ist der kohärente elektromagnetische Wellenzug eines Lasers = Vielzahl von phasenstarr
 verkoppelter Photonen

1995 wurde es erstmalig von WOLFGANG KETTERLE (*1957) bei wenigen μK mit Rubidium-Atomen realisiert und dann
 für QuBit von IGNACIO CIRAC und PETER ZOLLER vorgeschlagen

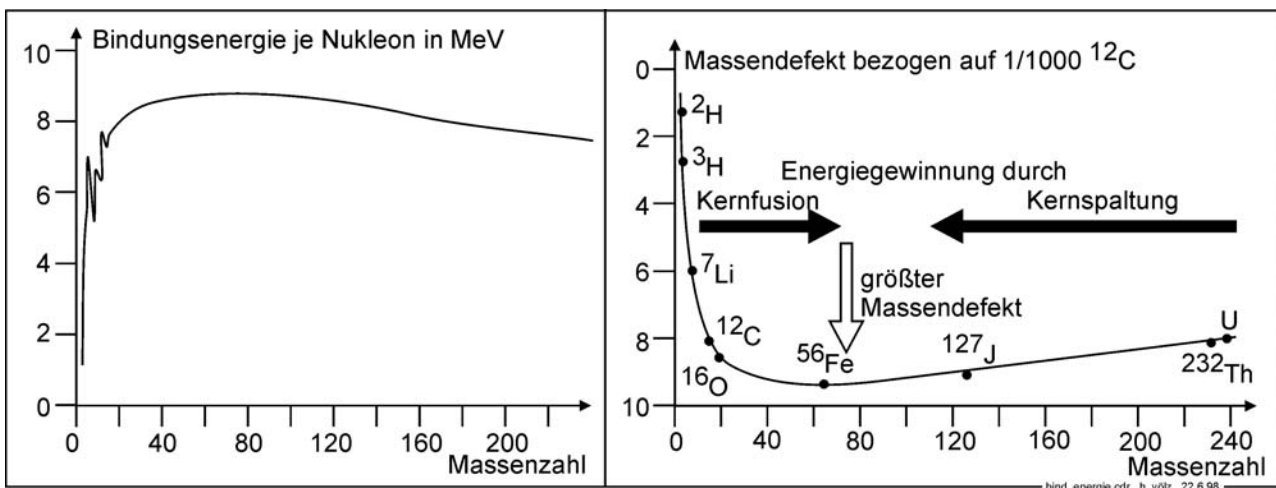


Paradoxa zur Quantentheorie

- Als der sechzehnjährige MAX PLANCK sich nach seinem Abitur 1874 mit der Frage an den Physiker JOHANN PHILIPP GUSTAV VON JOLLY (1809 – 1884) wandte, ob er Physik studieren sollte, erhielt er den Rat:
„Studieren Sie ja nicht Physik. Das ist doch ein Gebiet, in dem alles Wesentliche erforscht ist, nur einige unbedeutende Lücken sind noch zu füllen.“
- 1905 entwickelt EINSTEIN die Idee der Lichtquanten als materielle Teilchen (Photonen). Zur Berufung in die Akademie der Wissenschaften kreidet ihm das PLANCK in seiner Laudatio als Jugendsünde an

Eventuelle spätere Ergänzungen

Quanten-Computer, Quanten-Operationen, Rechnerkomplexität $P \leftrightarrow NP$ und Leistung des Quantencomputers, Bewusstsein und Quantentheorie, Elementarteilchen und Energiegewinn usw.



Geschichte Quantentheorie

- 1250 Linsen werden benutzt, u.a. Brillen
- 1540 LEONARD DIGGES und SOHN THOMAS erfinden Teleskop (Armee geheim)
- 1610 GALILEO GALILEI (1564 – 1642) benutzt Teleskop zur Beobachtung von Sternen
- 1621 Lichtbrechung von WILLEBRORD SNELLIUS (Willebrord Snel van Rojen, 1580 – 1626) entdeckt
- 1637 RENÉ DESCARTES (Cartesius, 1596 – 1650) beschreibt in Diooptric u.a. Lichtbrechung
- 1657 PIERRE DE FERMAT (1601 – 1665): Licht wählt den Weg zwischen zwei Punkten mit der kürzesten Zeit
- 1665 ROBERT HOOKE (1635 – 1703) erkennt Licht breitet sich als Schwingung hoher Frequenz aus
- 1665 ISAAC NEWTON (1643 - 1717) zerlegte mittels Prisma das Sonnenlicht in seine Spektralfarben
- 1669 Theorie von Sir ISAAC NEWTON (1643 – 1727) Licht besteht aus Körpern, verschiedener Farbe (Emanationstheorie). Sie sind mittels Prismen zu trennen: „*Da wir nun den Grund der Farben nicht in den Körpern, sondern im Licht gefunden haben, so haben wir guten Grund, dieses als Substanz zu bezeichnen*“ [Schreier, S.185], gilt trotz der nach ihm benannten NEWTON-Interferenzringe
- 1675 OLAF RÖMER (1644 - 1719) bestimmt die Lichtgeschwindigkeit.
- 1675 ROBERT HOOKE (1635 – 1703): „Theorie des Lichts und der Farbe“ → Licht Vibration
- 1677 CHRISTIAAN HUYGENS (1629 – 1695): entwickelt Wellen-, Undulationstheorie, erfordert als Medium Licht-Äther
- 1685 JAMES CLERK MAXWELL (1831 – 1879) sagt die elektromagnetischen Wellen voraus
- 1801 THOMAS YOUNG (1773 - 1829) führt den ersten Doppelspaltversuch durch
- 1802 WILLIAM HYDE WOLLASTON (1766 - 1828) entdeckt im Sonnen-Spektrum sieben dunkle Linien
- 1808 ETIENNE LOUIS MALUS entdeckt an Kalkspatkristallen die Licht-Polarisation
- 1813 JOSEPH VON FRAUNHOFER (1787 – 1826) entdeckt die nach ihm benannten Linien im Sonnenspektrum
- 1814 FRAUNHOFER erfindet das Spektroskop
- 1818 AUGUSTIN FRESNEL (1788 – 1827) vereinigt die Ideen CHRISTIAAN HUYGENS (1629 – 1695) und THOMAS YOUNG (1773 – 1829), erklärt so die **Beugung**
- 1856 MAXWELL: Allgemeine Theorie des elektromagnetischen Feldes
- 1859 ROBERT WILHELM BUNSEN (1811 – 1899) und GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824 – 1887) entwickeln die Spektralanalyse
- 1859 KIRCHHOFF (1824 – 1887) erkennt, dass die Wärmestrahlung unabhängig von Material
- 1871 MAXWELL: Licht ist auch eine elektromagnetische Schwingungen (Maxwell-Gleichungen)
- 1879 Gesetz von JOSEF STEFAN (1835 – 1893) und LUDWIG BOLTZMANN (1844 – 1906)
- 1887 HEINRICH RUDOLF HERTZ (1757 – 1894): Licht löst aus einer Metallplatte Elektronen aus, Fotoeffekt
- 1887 ALBERT ABRAHAM MICHELSON (1852 – 1931), EDWARD WILLIAMS MORLEY (1838 – 1923): Es gibt keinen Äther
- 1888 HEINRICH HERTZ Nachweis der elektromagnetischen Schwingungen
- 1895 8.11. WILHELM CONRAD RÖNTGEN (1845 – 1923) entdeckt die Röntgenstrahlen
- 1896 Strahlungs-Gesetz von WILHELM CARL WERNER OTTO FRITZ FRANZ WIEN (1864 – 1928)
- 1896 BECQUEREL entdeckt, dass Uranerze Foto-Platten schwärzen, Radioaktivität
- 1896 PIETER ZEEMAN (1865–1943) entdeckt Aufspaltung von Spektrallinien durch Magnetfeld
- 1898 28.12. Ehepaar CURIE entdeckt Radioaktivität von Radium
- 1899 MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK (Deutschland) entdeckt Plancksches Wirkungsquantum
- 1900 Gesetz von JOHN WILLIAM RAYLEIGH (1842 – 1919) und JAMES HOPWOOD JEANS (1877–1946)
- 1900 19.10. + 14.12. PLANCK stellt in Berlin seine Theorie zur Schwarzer Körper-Strahlung vor
- 1902 PHILIPP EDUARD ANTON LENARD (Deutschland): Energie der Photoelektronen
- 1905 A. EINSTEIN Lichthypothese: Lichtquanten = Photonen und Energie-Masse $E = m \cdot c^2$
- 1911 Atommodell von ERNEST RUTHERFORD: (1871 – 1937) Elektronen-Hülle und Kern
- 1911 HEIKE KAMERLINGH ONNES (1853 – 1926) entdeckt die Supraleitung von Hg bei $T \leq 4,2 \text{ K} = -269 \text{ °C}$
- 1912 GUSTAV HERTZ (1887 – 1975) und JAMES FRANCK (1882 – 1964) Elektronenstoßversuche, später wesentliche Stütze der BOHR'schen Atom- und der Quantentheorie
- 1912 MAX VON LAUE (1879 – 1960) beweist, dass Röntgenstrahlen Wellen sind, Interferenz an Kristallgittern
- 1913 NILS BOHR (1885 - 1962): Planetenmodell der Atome, Sprung = Licht, erklärt Spektren
- 1914 HENRY GWYN JEFFREYS MOSELEY: (1887 – 1915) Röntgenstrahlen = Übergänge inneren Schalen
- 1915 ARNOLD SOMMERFELD (1868 - 1951) elliptische Elektronenbahnen vermutet
- 1915 Umwandlung von Wasserstoff in Helium erwogen
- 1916 Funktion des Elektrons bei der chemischen Bindung untersucht
- 1917 ALBERT EINSTEIN beschreibt stimulierte Emission (Laser)
- 1922 NILS BOHR: Physikalische Theorie der Periodensystems
- 1922 ARTHUR HOLLY COMPTON (1892 – 1962) COMPTON-Effekt + Begriff Photon eingeführt
- 1924 SATYENDRA NATH BOSE (1894 – 1974) und ALBERT EINSTEIN sagen Bose-Einstein-Kondensat vorher
- 1924 LOUIS DE BROGLIE (1892 - 1981) verteidigt Dissertation (1923) Materie-Wellen $\lambda = h/m \cdot v$ an der Sorbone
- 1925 WERNER HEISENBERG (1901 - 1975) Heuschnupfen, Helgoland: entwickelt dort Matrizenmechanik

- 1925 WOLFGANG ERNST PAULI (1900 – 1958) formuliert, dass nach ihm benannte Verbot
- 1926 Brief EINSTEIN an MAX BORN (1882 – 1979) „Gott würfelt nicht“
- 1926 MAX BORN führt Begriff Quantenmechanik und Matrizenformel $p \cdot q - q \cdot p = (h/2\pi i) \cdot I$ ein
- 1926 Februar: HEISENBERG (1901 – 1976) formuliert seine Unschärfe-Relation $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2 \cdot \pi$
- 1926 ENRICO FERMI (1901 – 1954) und PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC (1902 – 1984) entwickeln Quantenstatistik der Teilchen
- 1926 ERWIN SCHRÖDINGER (1887 – 1961) formuliert Quantentheorie, Wellengleichung
- 1926 FRIEDRICH HUND (1896 – 1997) postuliert den Tunneleffekt
- 1927 CLINTON JOSEPH DAVISSON (1881 – 1958) und LESTER HALBERT GERMER (1896 – 1971) bestrahlen Kristalle mit Elektronen und finden Interferenz
- 1927 Chemische Bindung wird mittels Quantenmechanik erklärt
- 1927 MAX BORN (1882 – 1970) definiert die Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei der SCHRÖDINGER-Gleichung
- 1927 NIELS BOHR formuliert Komplementaritätsprinzip, später „Kopenhagener Deutung“
- 1927 Beugung von Elektronen entdeckt
- 1928 GEORGE ANTHONY GAMOW (1904 – 1968) interpretiert den α -Zerfall als Tunneleffekt
- 1928 RUDOLF LADENBURG (*1882) und HANS KOPPERMANN (*1895) weisen stimulierte Emission nach
- 1931 ERNST AUGUST FRIEDRICH RUSKA (1906 – 1988) baut Elektronenmikroskop
- 1932 JOHN VON NEUMANN (1903 – 1957) beschreibt das Superpositionsprinzip
- 1935 Begriff Verschränkung von SCHRÖDINGER eingeführt (Die Naturwissenschaften **23**, 48 (1935))
- 1935 Mai: EINSTEIN, BORIS PODOLSKY und NATHAN ROSEN erscheint in The Physical Review: »Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?«
- 1938 22.12. OTTO HAHN (1879 – 1968) spaltet den Uran-Kern
- 1948 HENDRIK BRUGT GERHARD CASIMIR sagt die CASIMIR-Kraft voraus
- 1951 CHARLES HARD TOWNES (*1915) benutzt stimulierte Emission für ersten Maser
- 1954 NH₃-Laser durch NIKOLAJ GENNADIJEWITSCH BASSOW (*1922) und PROCHOROW
- 1956 LEON N. COOPER (*1930) definiert Cooper-Paare von Elektronen ein
- 1957 Für die Supraleitung wird die BCS-Theorie vorgestellt: JOHN BARDEEN (*1908), LEON N. COOPER (*1930) und JOHN ROBERT SCHRIEFFER (*1931)
- 1957 GORDON GOULD (1920 – 2005) prägt Begriff Laser
- 1957 ARTHUR LEONARD SCHAWLOW (1921 – 1999) erste infrarote Laser-Variante
- 1957 HUGH EVERETT schlägt die Viele-Welten-Interpretation vor
- 1957 CLAUS JÖNSSON Doppelspaltversuch für Elektronen mit Metallfolien, Spaltbreite ca. 0,5 μm
- 1958 PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC (1902 – 1984) führt die quantenphysikalische Schreibweise $\langle \xi | \xi \rangle$ ein
- 1958 Vorschlag für Halbleiterlaser von BASSOW
- 1960 THEODORE HAROLD MAIMAN (*1927) erster Festkörper-Laser, Rubin-Laser 694 nm
- 1962 Injektionslaser von BASSOW
- 1964 JOHN S. BELL (1928 – 1990) stellt die BELL'ssche Ungleichung auf
- 1980 PAUL BENIOFF die Idee einer Turing-Machine mit Quanteneffekten
- 1982 RICHARD FEYNMAN zeigt, dass Quantecomputer schneller sein könnten
- 1987 JEAN DALIBARD (*1958) entwirft Magneto-optische Falle (= MOT = **m**agneto **o**ptical **t**rap)
- 1988 Elektronen-Spin wird bei GMR-Elementen (**g**iant **m**agnetic **r**esistive) für Festplatten genutzt
- 1994 PETER SHOR entwickelt Algorithmus zur Primzahlzerlegung mit QuBit
- 1995 PETER SHOR zeigt Möglichkeiten zur Fehlerkorrektur durch Redundanz auf
- 1995 BENJAMIN W. SCHUMACHER prägt den Begriff QuBit (Physical Review A, 51 (4); 2738 - 2747, 1995)
- 1995 PETER ZOLLER und IGNACIO CIRAC schlagen Ionen als QuBit vor
- 1995 BOSE-EINSTEIN-Kondensat für QuBit durch WOLFGANG KETTERLE (*1957) u. a. realisiert
- 1996 SETH LLOYD und CHRISTOF ZALKA zeigen, dass Quantencomputer möglich sind
- 1966 LOV GROVER entdeckt einen Algorithmus zur schnellen Suche eines Elementes
- 1997 erfolgreiche Teleportation zweier Photonen durch ANTON ZEILINGER
- 1997 Erste QuBit: JOSEPHSON-Kontakte, Kernspin
- 1998 DANIEL LOSS und DAVID DIVINCENZO schlagen Quantenpunkte (Quanten-Fallen) vor

Literatur

- Bruß, D. Quanteninformation. Fischer, Frankfurt 2003
- Camejo, S. A.: Skurrile Quantenwelt. Fischer Taschenbuch. Frankfurt a.M. 2007
- Feynman, R. P.: QED. 12. Aufl. Piper, München – Zürich 2006 (1985 engl., 1992)
- Hey, T.; Walters, P.: Quantenuniversum. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - New York 1990
- Ingold, G.-L.: Quantentheorie. 4. Aufl. C. H. Beck, München 2008
- Kiefer, Cl.: Quantentheorie. Fischer Taschenbuch, Frankfurt a.M. 2002
- Pohl, R. W.: Optik und Atomphysik. 9. Aufl. Springer-Verlag, Berlin – Göttingen Heidelberg 1954
- Rae, A.: Quantenphysik: Illusion oder Realität? Reclam, Stuttgart 1996

- Schreier, W. (Hrsg.): Die Geschichte der Physik. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1988
- Schreiner, J.: Physik - Anschauliche Quantentheorie. Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt/M - Berlin - München 1978.
- Völz, H.: Eine anschauliche Darstellung des Quanten-Bit. GrKG 48(2007) 4, 147 – 154
- Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 2 Technik und Geschichte vorelektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2005
- Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3 Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2007
- Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. CD der Digitalen Bibliothek, Bd. 159, Berlin 2007