

Neue, eventuell zu erwartende Speicher

Eventuell langfristig mögliche Speicher

Techniken mit neuer Qualität folgen immer wieder aufeinander, dies gilt sicher auch für Speicher

Jahr (ca.)	Speichertechnik	ca. Abstand (Jahre)
-300 000	Werkzeuggebrauch	Bezug
-35 000	Felsbilder	300 000
-5 000	Schrift	30 000
1450	Buchdruck	6 500
1830	Photografie	380
1900	Lochkarte, Schallplatte	70
1950	elektronische Medien	50
1985	opto-motorische Medien	35
2015	? ? ?	30

Nach den opto-motorischen Speichern (CD, DVD usw.) wäre daher eine neue Technologie zu erwarten

Selbst bei verlängertem Zeitraum auf 30 Jahre ist sie noch nicht zu erkennen

Gründe hierfür könnten vielfältig sein:

Sie tritt *unvermittelt* auf oder es gibt *keine weitere*, denn jetzige Speicher befriedigen alle Bedürfnisse

Vielleicht gelingt aber einer, der heute im Labor untersuchten Varianten der Durchbruch

Eventuell mögliche Varianten

Im Folgenden kurz vorgestellt:

- **Nanotechnologien** ersetzen das bisherige top-down durch ein bottom-up und nutzen u.a. Selbstorganisation und Selbstheilung
- **Photonik** (Optronik) u.a. photonische Kristalle und nichtlinear optisches Verhalten. Vielleicht sind sogar rein optische Lösungen möglich, die nicht oder nur indirekt auf Elektronik zurückgreifen, evtl. auch **Holografie**
- **Quantenmechanik** mit QuBit, Probleme sind hierbei u.a.: Zufall, kein Kopieren und Vervielfältigen
- **Bio-Elektronik**, z.B. auf Basis von Nukleotiden, Aminosäuren usw. oder neuronal-elektronische Kopplungen
- **Supraleitung** mit Notwendigkeit von Tieftemperatur, unwahrscheinlich. da schon mehrere Versuche in der Vergangenheit

Zukunft ohne Technologiewechsel

Sind neuartige Speicher **überhaupt erforderlich?** → andersartige Lösungen!

Seit etwa 2000 ist die kostengünstig, individuell verfügbare **Kapazität fast immer ausreichend**

Im Prinzip ist **alles, was elektronisch geschieht**, vollständig zu speichern

Ausnahmen bei Videobearbeitung und für extrem große Datenbanken

Aber für **Videotechnik** muss eventuell das heute übliche **Grafik-Konzept (Pixel) in Frage** gestellt werden

Vergleich **ASCII-** und **MIDI-Code** sowie **Kontinuierliche Digitaltechnik**

Eine Grenze ist heute eher unzureichende **Datenrate**, nicht Speicherkapazität

Problem „**digitales Vergessen**“, Zu schneller Wechsel der Hardware und Datenformate (z. B. 8“-Diskette, alte Bänder)

„**Migration**“ von **Daten** = ständiges Umkopieren der Daten und Datenformate häufig notwendig (vgl. Mikrofilm)

Wenn mit **Gewissheit kein Technologiewechsel** erfolgen würde, wären viele Probleme schlagartig verschwunden.

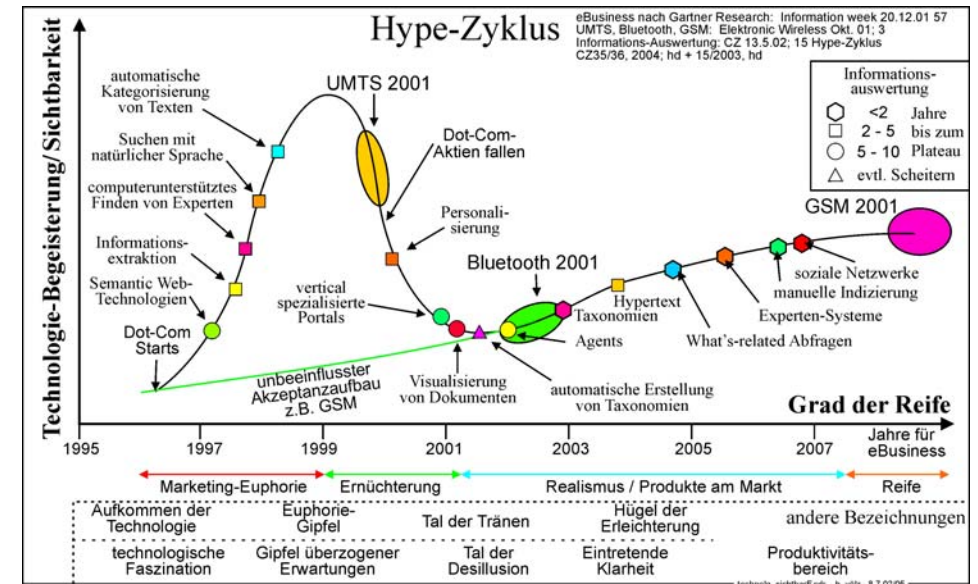
Neuer **Umgang mit gespeicherten Daten**, u.a. Notwendigkeit und mehrfache Speicherung untersuchen (Internet?!)

Wegen **gespeichertem Kultur-, Wissensgut** müsste hier sogar **Politik neuartig eingreifen**, nicht nur bzgl. der Privatsphäre

Offensichtlich sind die Probleme noch nicht hinreichend erkannt

Für neue Technologien beachten

1. Prognostische Aussagen von **Experten** betreffen jenes, was heute realisierbar ist
Neues betreffend sollte man ihnen nur sehr bedingt Glauben schenken
Dies belegte KARL STEINBUCH (1917 – 2005) mit vielen und beeindruckenden Beispielen
2. Eine **breit eingeführte Technik/Technologie** (gilt für Halbleiterspeicher) kann nicht verdrängt werden, verschwinden
Bekannte *Ausnahmen* nur Zeppelin, Gaslicht und Dampfmaschine
Bei *Speichern* sind dies Ferritkern- und Relaispeicher sowie Lochkarten und Lochbänder
Meist erlangen verdrängte Varianten in technischen Lücken immer wieder eine, zumindest noch geringe Verbreitung
z. B: Elektronenröhre bei Mikrowellen, Display und Oszilloskop
3. Prinzipien, die trotz vieler Vorteile und positiver Prognosen **nach Jahrzehnten nicht eingeführt** wurden besitzen **keine Chance** mehr
Hierzu zählen u.a. die Bubbles, magnetische Dünnschicht- und Drahtspeicher sowie die Blochlinienspeicher
Vielleicht gilt dies auch für Assoziativ-, Tieftemperatur- und digitale Holographie-Speicher
4. Wegen **Neuheit** keine Aussagen zu Nano-, Quanten- und weitere Speicher, jedoch **Hypezyklus** ist zu beachten
Provokativ ist, ob langfristig Elektronik durch andere Prinzipien, wie z.B. Optik oder Quantenelektronik ergänzt oder abgelöst wird
5. Einmal **breit eingeführte Techniken** sterben ganz selten aus
Die bekannten Ausnahmen sind nur Zeppelin (Luftschiff), Dampfmaschine, Glühstrumpf (Gaslicht)
Für die Speichertechnik: Ferritkernspeicher, Lochkarten, Lochbänder und teilweise die Diskette
Mit großer Wahrscheinlichkeit bleiben also irgendwie auf lange Sicht bestehen
Halbleiterspeicher, Festplatten und optischen Medien, insbesondere CD, DVD und Nachfolger
Ihnen gegenüber müssen neue Techniken massive Vorteile bieten



Was muss künftig und wie lange gespeichert werden?

Im Prinzip ist heute alles was auf der Welt elektronisch geschieht vollständig speicherbar
Doch dabei wird die Menge so groß, dass kein sinnvoller Zugriff mehr möglich ist
Hierzu zählt eine erhebliche Reduzierung des Ballastes „überflüssiger“ Daten (Markt, Geheimdienste usw.)
Künftig wird daher zu fragen sein, was gespeichert werden muss und wo Doppelungen erforderlich sind
Hierzu sind entsprechende **Redundanz** und **Relevanz** neu zu definieren
Zunächst sind Inhalte, Sachbezüge zu unterscheiden, hierfür sind inhaltliche zeitbegrenzende Kriterien zu entwickeln

- Was **wofür**: Utility. Anwendbarkeit
- Was für **wen**: individuell oder allgemein
- Was für **Kultur und Geschichte**: Originale der Kunst, Menschenbild, Religion usw.
- Was für die **Menschheit**: Notwendigkeit, Nutzen
- Was in einem (oder mehreren) **Welt-Archiv**, „Weltwissen on demand“

Wie mit Daten umzugehen ist

- Wie Daten vor **Zerstörung, Verlust** usw. **geschützt** werden
- Wie der **Zugriff** auf einzelnen Stellen und Daten zu regeln ist, neben Geschwindigkeit auch Möglichkeiten, Rechte usw.; für Ausbildung und Kulturgüter kostenlos erforderlich
- Wie mit **Urheberrechten** umzugehen ist: Zitate, Plagiate, Vergütungen
- Wie sind **Sammler** und **Nostalgiker** einzuordnen
- Wie ist mit **Geheimhaltung** umzugehen: strenge zeitbegrenzte Zulässigkeit
- Wie ist mit **Schädlichem, Destruktivem** umzugehen: moralisch wichtiger als gesetzlich?!
- Problem „**Wissen ist Macht**“ für alle verfügbar machen! Abschwächen, Wie?

Mögliche Eingrenzungen, Beschränkungen

Für **Lehrbücher, Lexika, Publikationen** usw. genügt ein eingeschränkter, stets aktuell zu haltender Anteil (*Didaktik*)
Museen, Archive, Bibliotheken usw. müssen vor allem typische Originale in geringer Anzahl aufheben
Rundfunk und Fernsehen usw. müssen wichtige Zeitdokumente und (Eigen-) Produktionen speichern
Historiker interessieren vor allen Original-Dokumente, die ständig neu interpretiert werden müssen
Archäologie muss kulturhistorische Inhalte sichern

Entwicklung von **Universalformaten** und **spezieller Hardware**, gegen „digitalen Verlust“
Speichern der *Originale* oder/und *Rekonstruktion* mittels Formeln und Algorithmen

Vergleich von **inhaltlichen** und **ökonomischen Grenzen**
Frage nach der **Vollständigkeit** der hier genannten Argumente und Inhalte, **ordnen nach Wichtigkeit**

Vereinfachte Zusammenfassung der vier wichtigsten Bereiche

Bereich	Fakt, Zweck	Maximaler, notwendiger Bestand des Gespeicherten
Natur	Ständigkeit, Irreversibilität, Geologie	$\rightarrow \infty$
Genetik	Erhaltung der Art	$\approx 10^9$ Jahre
Neuronal	Überleben des Individuums	bis zum Tod ≈ 100 Jahre
Gesellschaft	Wissen, Kultur, Werte	, $0 \rightarrow \infty$, Bestehen der Menschheit, $\approx 10^6$ Jahre?

Versuch einer Einteilung und Abgrenzung

Inhalt der Information	Art der Information	Umgang für die Speicherung
Historisch	Originale	Dauerhaft aufheben
Kulturell, künstlerisch	Menschliche Werte betreffend	Große Auswahl von Originalen aufheben, allgemein verfügbar machen
Utilitär, technisch, wissenschaftlich	Wissen, Fakten, Gesetze, Methoden	Ständig aktualisieren
Didaktisch	Darstellungsform, gut lehrbar	Besseres ersetzt Älteres
Geheimhaltung	Fakten, Geschehen	falls überhaupt notwendig, dann unbedingt zeitliche Begrenzung
Destruktiv, zerstörerisch	Wissen, Methoden	moralische Verurteilung (Strafen?)

Top-down ↔ botton up

Zwei deutlich verschiedene Techniken

top down = von oben abwärts = aus einem Ganzen herausarbeiten
Bildhauer gestaltet Plastik → meißelt sie aus großen Steinblock heraus
Details der Konturen sind durch sein Können und die Feinheit seiner Werkzeuge bestimmt
So werden mikroelektronische Schaltkreise auf dem Silizium-Wafer erzeugt
Selbst mit Elektronenstrahl-Lithographie Maximal ist nur bis ≈ 10 nm Strukturieren möglich

bottom up = von unten aus aufbauen = aus bekannten Bausteinen zusammengefügt
Ein Kind setzt so eine Figur aus Lego-Steinen zusammen.
Geschieht in der Natur „automatisch“ und ermöglicht dennoch große Vielfalt
Für die erstmalig im Dezember 1959 RICHARD PHILLIPS FEYNMAN (1918 – 1988) im öffentlichen Vortrag vorgeschlagen
Hierfür erfand dann 1974 NORIO TANIGUCHI den Begriff „Nanotechnologie“; *griechische **nānos*** Zwerg
Aber auch SI-Vorsatzzeichen $n = 10^{-9}$ (System **I**nternational der Maßeinheiten)
Ab 1980 ERIC DREXLER (*1955) Bücher mit visionären Ideen → viele Wissenschaftler wandten sich dem Gebiet zu
Wesentliches Ziel ist Manipulation von Materie im atomaren Maßstab
Bald zeigte sich, dass eine technische Umsetzung der Gedanken äußerst schwierig ist

Inzwischen entstanden *mehrere Hauptwege*:
Raster-Tunnel-Mikroskop, Nanotechnik, Selbstorganisation, neue optische Methoden, Molecular-Engineering und Qubit

Magnetischer Kabel-Laufzeitspeicher

Historische Variante mit Zukunft?!

1965 entstand die Idee eines Kabel-Laufzeit-Speichers, erfolgreich erprobt, mehrere Patente, doch technisch viel zu früh
Vorteil: er hat keine obere, sondern nur eine untere Datenrate (Frequenz)

daher vielleicht noch für Zukunft interessant

Verbindet zwei bekannte Fakten:

Signalausbreitung im Kabel mit $v = c/n$ aus: c die Lichtgeschwindigkeit, n den Brechungsindex

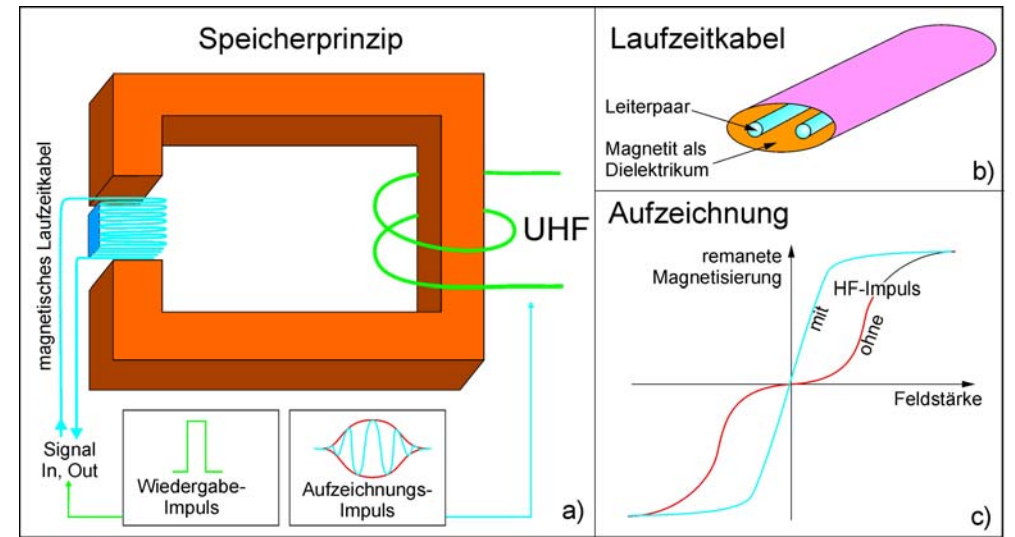
Nach einiger Zeit befindet sich das zeitliche Signal entsprechend örtlich verteilt im Kabel, müssen „eingefroren“ werden

Hierfür eignet die **HF-Vormagnetisierung** der Magnetbandtechnik, ändert Remanenzkurve magnetischer Materialien

Das Laufzeitkabel kann sehr dicht „aufgewickelt“ werden, auf die das Magnetfeld des HF-Impulses global einwirkt

Wiedergabe zerstörend durch einen kurzen Gleichstromimpuls, treibt das „Gespeicherte“ hinaus

Je Magnet-Position sind bis zu 256 Stufen = 9 Bit möglich



katapultF.cdr h.völz 2.1.04

RTM = STM und RKM = AFM

1986 entwickelten GERD KARL BINNIG (*1947) und HEINRICH ROHRER (*1933) das **Raster-Tunnel-Mikroskop (RTM)**

Englisch = scanning tunneling microscope (STM) nur für **elektrisch leitende** Oberfläche

Hiermit gelang es später **einzelne Atome direkt zu manipulieren**

1994 Matsushita 20 nm GaSbTe-Schicht $\Rightarrow$ Volumen 30 Atome: kristallin $\rightarrow$ amorph: Widerstandsänderung nachgewiesen
 Wegen hochpräziser Bewegungen Datenrate nur 100 Bit/s.

1997 demonstrierte IBM einen Abakus aus einzelnen Atomen

Feine Sonde mit ≈ 3 V (Bias) wird in etwa 1 nm gegenüber einer bewegt

Tunneleffekt bewirkt Strom, der exponential von der Entfernung abhängt

constant gap width method (CGM) $\Leftrightarrow$ constant current method (CCM), Strom- $\Leftrightarrow$ Abstand-Änderung

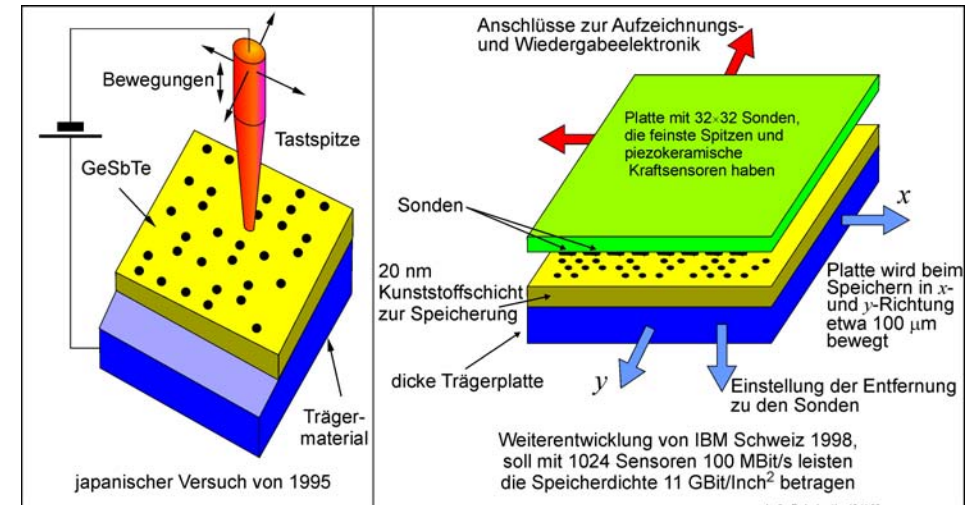
Später für **nichtleitendes Material** BINNIG, CALVIN QUATE und CHRISTOPH GERBER

Raster-Kraft-Mikroskop (RKM), = Englisch atomic force microscope (AFM)

Spitze an Blattfeder (*englisch cantilever* freitragend)

Unebenheiten der Oberflächenstruktur bewirken Kraft $\Rightarrow$ Verbiegung der Blattfeder

Kann u.a. kapazitiv, optisch oder piezoelektrisch gemessen werden



katapultF.cdr h.völz 12.11.98

Milliped

Insbesondere mehrjährige Forschungsarbeit im IBM Almaden Research Center (San Jose)

1998 gelang es BINNIG im IBM-Zürich-Laboratorien das Muster eines Speichersystems vorzustellen

5 × 5 Abtastspitzen in einem Feld von 25 mm² benutzt, Anzahl wurde später mehrfach erhöht

2002 bereits 64 × 64 = 4096 RKM-Spitzen ⇒ **Milliped** (Tausendfüßler)

Spitzen an biegsamen, V-förmigen Federungen = Balken = Cantilever (*englisch* frei schwebend), 1998 = 50 µm lang

Vollständige Struktur in MEMS-Technologie (**micro electro mechanical systems**) auf Silizium-Basis hergestellt

Unter Cantilever-Array ein mikromechanisch in definierten feinen Schritten verschiebbares Substrat = 6 × 6 mm²

Maximaler Rasterabstand des Cantilevers etwa 100 µm in x- und y-Richtung, Speicherdichte ≈ TBit/inch²

System muss sehr erschütterungsarm gelagert werden.

Auf Substrat eine etwa 20 nm dünne Schicht eines speziellen Polymers, im Schleuderverfahren aufgebracht

Ursprünglich PMMA (**Poly-methyl-meth-acrylat**), inzwischen besser geeignete Polymere, Beständigkeit > 3 Jahre

Speichervorgänge mehrfach geändert, ab 2002:

Aufzeichnen Spitze = Stromwärme ≈ 1 µs auf etwa 200 °C erhitzt → Vertiefung = 1 mit Ø = 10 - 50 nm, ≈ 50 000 Bit/s

Wiedergabe thermischer (Piezo-) Sensor ca. 100 °C erhitzt: 1 sinkt Spitze ins Loch

So Sensor näher kalter Kunststoffschicht als bei einer 0 → kühlt sich stärker ab. 100 000 Mal lesbar

Löschen zunächst nur global: Kunststoffschicht auf ≈ 150 °C erhitzt glättet die Oberfläche, Löcher verschwinden

Ab 2000 lokale Löschung ≈ Aufzeichnung 1, jedoch dicht neben der Bit-Position: neue Mulde glättet

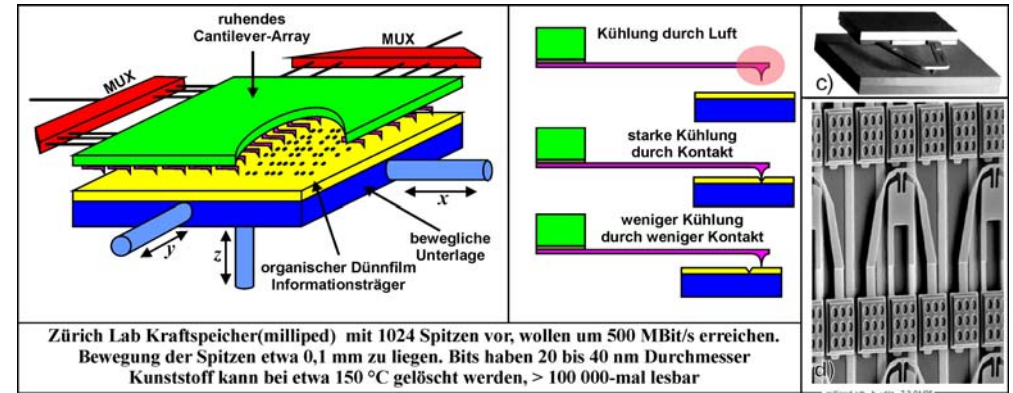
So mehrfaches Wiederbeschreiben möglich.

2005 sollte ein Nano-Laufwerke (*englisch* nanodrive) auf den Markt kommen

Leistung von 100 mW, Größe ähnlich CF-Karten, sehr großer Kapazität, hohen Parallelität → mehreren MBit/s

Als Erinnerung an die IBM-Lochkarte auch als **Mikro-Lochkarte** bezeichnet

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 17 von 110



Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 18 von 110

Nano-Technik

Versuch einer Definition

Seit 1995 gewaltige Entwicklung. Erster Überblick [Rubahn].

Bis heute **kein theoretisches oder lehrbares Gebäude** und kein einheitlicher Inhalt

Technisch nutzbare Möglichkeiten liegen noch weit in der Zukunft

In einer Nano-Prognose von 2002 wurden aber bereits für 2008 und 2011 Milliarden-\$-Umsätze abgeschätzt!?

So besteht Gefahr, dass Nanotechnik, -technologie usw. zu inhaltslosen Schlagwörtern verkommen könnten

Wichtig ist das **selbstorganisierte Entstehen** (englisch: self-assembly) von **Clustern**

Für Nano-Technik entsprechendes Zusammenwachsen von Atomen und Molekülen zu einer festen Einheit

Prozesse müssen gemäß Vorbild der Natur (bottom-up) gesucht und dann technisch realisiert werden

Es entstehen häufig spezielle strukturelle, magnetische und elektronische Eigenschaften

auch Quantenpunkte sind möglich (s. u.)

Beispiele: magnetische Strukturen aus PtFe → magnetische Speicherung

≈ 10 nm PbS- und magnetische Eisenoxyd-Partikel → magnetooptische Speicherung

Besonders wichtig sind spezielle C-Strukturen (s. u.)

Englisch cluster Büschel, Menge, Haufen, Traube, Schwarm, Begriff sonst vielfältig benutzt, z. B.:

- **Medizin:** Zellwucherungen
- **Musik:** viele übereinandergestellte kleine Intervalle
- **Rechentechnik:** Zentral-Computer mit den angeschlossenen Rechnern
- **Chemie:** nichtstöchiometrische chemische Verbindungen aus direkt verknüpften, durch Liganden stabilisierte Metallatomen

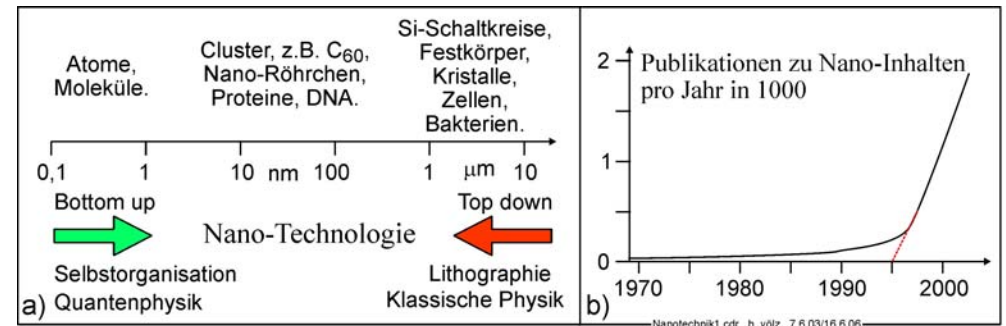
Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 19 von 110

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 20 von 110

Richtungen der Nano-Technik

- **Nano-Elektronik** benutzt Schaltelemente, z. T. mit Quanteneffekten
März 1998 wurde erstmalig der hierzu gehörende **Einzel-Elektronen-Transistor** beschrieben (s. u.)
Wichtiger Zweig mit speziellen **Kohlenstoff**-Varianten, u. a. Fullere, C-Röhrchen und Graphene
- **Nano-Computer** nutzen klassische Rechentechnik, verwenden jedoch u.a. **Polymere und DNA-Stränge**
1994 LEONARD ADLEMAN (*1945) DNA-Fragmente: Berechnung des NP-vollständigen Traveling-Salesman-Problems
Gehört zur Klasse NP-vollständiger Probleme: Rechenaufwand, Rechenzeit steigen exponentiell mit Parameterzahl
Z.T. werden hier auch die **Quanten-Computer** eingeordnet
- **Nano-Mechanik** benutzt mechanische Elemente im nm-Bereich
Dazu gehörend MEMS (**m**icro **e**lectro **m**echanical systems)
Meist lithographisch hergestellt, z. B. kleinste bewegliche Spiegel, Motoren, Schalter, Zahnräder, Mikrophone usw.
U.a. **Millipede** von IBM (s. u.) von IBM und **Vielfach-Spiegel**-Chips für Großprojektoren von Texas Instruments
Erprobt wurden auch kleinste bistabile mechanische Schalter als Speicherelemente, noch zu langsam

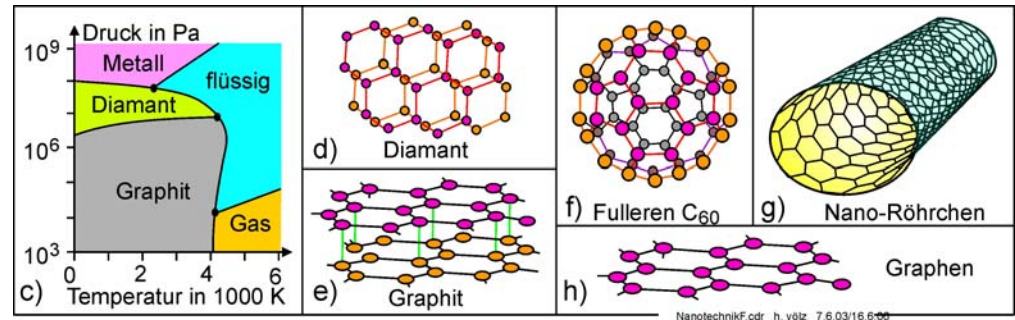
Getrennt sind Quanten-Elemente mit **QuBit** zu betrachten (s. u.)



Geschichte neuer C-Varianten

- 1950** Rein theoretische Untersuchungen von Graphenen durch P. R. WALLACE
- 1985** ROBERT FLOYD CURL (*1933), HAROLD W. KROTO (*1939) und RICHARD E. SMALLEY (*1943) zufällig **Fullerene**
- 1991** synthetisierte SUMIO IJIMA (*1939) Nanodrähte aus Kohlenstoff = **Nano-Röhrchen** = CNT (carbon nano tubes)
zunächst nur **Multiwall** (MW-NT) einige zig Röhrchen konzentrisch ineinander, Ø ca. 10 bis über 100 nm
- 2003** einlagige CNT = single wall (SW-NT) etwa 0,4 – 5 nm Ø
- 2004** einatomare C-Schichten = **Graphene** = Nanobänder

Nur Nano-Röhrchen und Graphene werden wahrscheinlich zu neuen Anwendungen führen



Fullerene

1985 von R. F. CURL, H. W. KROTO und R. E. SMALLEY zufällig gefunden
Beim mit Lichtbogen erzeugten Graphit fanden sie die kugelförmigen (fußballähnliche) Gebilde aus **60 C-Atomen**
Nur aus **6- und 5-Ecken zusammengesetzt**, nicht im Phasendiagramm des Kohlenstoffs! Nur Diamant und Graphit
Besitzen große Ähnlichkeiten zu den Kuppelbauten des Architekten RICHARD BUCKMINSTER FULLER (1895 – 1983)
Besonders bekannt die gewaltige Kuppel des amerikanischen Pavillons der Weltausstellung 1967 in Montreal
So erhielten sie den Namen **Fullerene**; auch Buckyball ist gebräuchlich
Mehrere Varianten: Allgemein 12 Fünfecke und (n-10) Sechsecke → C_{2n} Fullerene

Eigenschaften

Hohe Symmetrie und hohe **Stabilität** wie Diamant, ungewöhnliche **elektronische** und **optische** Eigenschaften
Versuche zur **Dotierung** C₈₀:1 C → 1 N + innen 2 Yttrium ⇒ Cluster mit nutzbarem Spin, auch mit Terbium möglich
C₆₀ unter hohem Druck bis etwa 200 °C gering **magnetisch**, nur etwa 1 % der Fullerene bewirkt einen Spin
Supraleitung bei tiefen Temperaturen, Zugabe von Kalium oder Rubidium kritische Temperatur auf -245 °C erhöht
Einbau sperriger Chloro- oder Boroform-Moleküle -224 °C, teilweise sogar -156 °C erreicht
Gegenüber anderen Supraleitern alle drei Richtungen zur Strom-Leitung nutzbar
Bisher wurde keine nützliche Anwendung erreicht

Nano-Röhrchen

Kurze Geschichte

1991 SUMIO IJIMA (*1939) synthetisiert erste **Nano-Röhrchen** = **CNT**, noch **Multiwall** (MWNT)
1996. RICHARD E. SMALLEY **Laserverfahren** zur Herstellung von einwandigen Kohlenstoffnanoröhren
1998 Erste **Transistoren** von S. J. TAUS, A. VERSCHNEREN und C. DEKKER vorgestellt
2003 **einlage CNT** = single wall (SW-NT) etwa 0,4 nm Ø
2005 Samsung: Twin-Si-Nanowire MOSFET (TSNWFET) mit zwei Nanodrähten, je r = 5 nm
2006 einen **Gate-All-Around**-(GAA)-TSNWFET mit 2 Si-Drähten r = 4 nm, Sehr kurze effektive Gatelänge (ähnlich FinFET)
2007 CNT als künftige **elektromechanische** Datenspeicher
2007 **Ge-NT** für „**CrossPoint**“-Speicherzelle
2007 auch Material für **Phasenwechsel**-Speicher

Heute in großer Vielfalt und auch bei anderen Stoffen, u.a. Si, GaAs, ZnO bekannt

Fünf Herstellungsverfahren

- Immer müssen Katalysatoren anwesend sein, etwa Eisen, Nickel oder Kobalt
- **Gleichstrom-Bogenentladung** zwischen zwei Graphitelektroden, in die Metallkatalysatoren eingearbeitet sind
 - **Laser-Ablation** (verdampfen) durch Laserimpulse auf Graphitelektroden, 1996 RICHARD E. SMALLEY
 - **CVD** (chemical vapour deposition) durch Zersetzung eines kohlenstoffhaltigen Gases (z.B. Kohlenwasserstoff) = katalytische Abscheidung aus der Dampfphase = CCVD (catalytic chemical vapor **d**eposition)
Substrat z. B. mit „precursor“ Fe(NO₃)₃ belegt (Kondensationspunkte), Azetylen-Atmosphäre C₂H₂ bei 700 -1000°C entstehen Metall-Cluster = Zentren für das Wachsen der Nanoröhren
Auf Siliziumchip bildet sich eine Art „Rasen“
 - **HipCO-Verfahren** (high pressure carbon monoxide) zersetzt gasförmiges Eisenkarbonyl Fe(CO)₅
 - **Kondensieren** von Kohlenstoffdampf, der sich beim Erhitzen einer Mischung von Ethylen und Paraffinöl bildet

Gehandelt wird Pulver unterschiedlicher Korngrößen, Ø mehrere µm, Röhrchen pappen ungeordnet zusammen
Vereinzeln mit Tensid-Dispersionsmittel und Ultraschall, Nanoröhren entstehen meist nicht fehlerfrei
Reparatur mit ultrakurzen Laser-Impulsen möglich, wichtiger ist jedoch Selbstheilung

Absichtliche **Störung** beim Wachsen – z. B. Fe- oder Ti-Legierungen – bewirkt **Y-förmige Abzweigung**
Mit Spannung ist dann Stromfluss digital zu schalten bzw. analog zu steuern
Drei Verzweigungen ermöglichen **Transistoren**, Bit-Zelle nur wenige nm². >1000 Atome = quasi-klassische Speicherung

Aufbau-Arten (1)

1. MWNT $\Leftrightarrow$ SWNT + (RNT)

Länge ca. 10 bis über 100 μm , selten mm oder gar cm
Abstand zwischen benachbarten Atomen = 0,142 nm

Zunächst gab es nur **MWNT** (**m**ultiple **w**all **n**ano **t**ube) einige zig Röhrrchen konzentrisch ineinander
 $\varnothing$ ca. 10 bis über 100 nm, Abstand zwischen den Schichten $\approx$ 0.34 nm.

SWNT (**s**ingle **w**all **n**ano **t**ube) $\varnothing$ 0,4 – 1,5 nm, bei 1,2 nm auf Umfang etwa 20 C-Atome, bei MWNT bis etwa 100
Entstehen meist $\frac{2}{3}$ halbleitend, $\frac{1}{3}$ metallisch.

RNT (Kohlenstoff-Riesen-Röhren) $\varnothing$ 40 - 100 μm , Längen bis zu mehreren cm
Wände 1,4 μm dick und schwammartig, innen zylinderförmige Hohlräume
Außen von Schichten aus grafitartigem Kohlenstoff umschlossen
Brechen beim Biegen nicht, verformen sich ähnlich wie Metalldrähte
Kombination aus Stärke, Biegsamkeit und Leichtigkeit optimal zum Weben von Stoffen
effiziente und leichte kugelsichere Weste, besser als bisher verwendetes Kevlar

Aufbau-Arten (2)

2. Endkappen

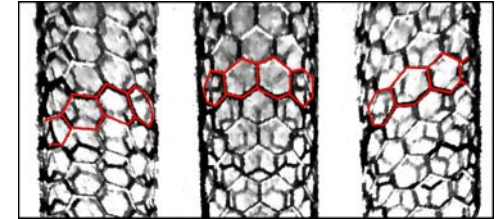
Nur z. T. vorhandenen, entsprechen „halbe“ Fullerene
Jede Endkappe enthält dabei sechs 5-Ecke, Anzahl der 6-Ecke vom Durchmesser bestimmt

3. Helizität in 3 Varianten

Betrifft Aneinanderfügung von Kohlenstoffatomen =
Ausrichtung der Sechsecke zur Längsachse
Ist über Rollwinkel sichtbar = Kanten der 6-Ecke radial
verfolgen, beeinflusst elektrischen Eigenschaften
metallisch oder halbleitend

Armchair (Lehnstuhl) $\Leftrightarrow$ Zigzag $\Leftrightarrow$ Chiral

Chiral (griechisch **cheir** Hand) Struktur, kann durch keine
Symmetrieoperation mit ihrem Spiegelbild zur Deckung
gebracht werden



Eigenschaften

Sehr **flexibel**, **leicht** 1,3 - 1,6 g/cm³ $\approx$ Baumwolle

Zugfestigkeit $\approx 5 \cdot 10^{10}$ Pa » Diamant oder übliche Carbonfasern, 20mal Stahl

Beständig an Luft bis etwa 1000 °C, im Vakuum bis 2800 °C

Thermische Leitfähigkeit $\approx$ 6000 W/mK (Diamant nur 2000 W/mK).

Piezoelektrische Verformung $\Delta l/l$ liegt für 1 V bei 0,11 %

Energielücke $E_g/V \approx 1/d$ [in nm] $\approx$ 0,1 - 1 eV, je dünner, desto größer. Bei 1 nm $\approx$ 0,5 eV

In Längsrichtung oft sehr hohe **Leitfähigkeit** $\approx 10^5$ S/m = 20 m Ω ·mm², hängt von Defekten ab » Cu
mittlere **freie Weglänge** der Elektronen $\approx 10 \mu\text{m}$ → elektrischer Widerstand unabhängig von Länge der Röhre
Quantentheoretischer **Einströmwiderstand** = $h/4e^2 \approx 6,5$ k Ω

Molekularen **Wellenfunktionen** über gesamte Röhrenlänge verschmiert $\approx$ kohärenter Quantendraht
Elektronentransport „**ballistisch**“, d.h. ohne Streuung, Widerstand praktisch Null

Elektronenmobilität von 10^5 cm²/V = 200-mal höher als bei Si

Strombelastbarkeit bis zu 10^{10} A/cm² $\approx$ 25 μA je Röhre; praktisch Supraleitung bei Raumtemperatur
Cu schmilzt bei 10^7 A/cm²

Elektrische Werte gelten bis $\approx$ 10 GHz

Nicht-metallische CNT zeigen **magnetisches Verhalten** $\leq$ -240 °C.

Widerspricht üblicher These des **Magnetismus**: nur d- und f-Elemente zeigen Magnetismus zeigen

Wahrscheinlich Störstellen entscheidend, nicht-metallisch kaum Wirbelstromverluste

Könnte zu leichten und preiswerten Magneten führen

Versuchte Anwendungen

1998 erste **Transistoren** von S. J. TAUS, A. VERSCHNEREN und C. DEKKER vorgestellt

Ab 2007 u.a. mehreren Anordnungen um Nanoröhre isoliertes Gate gelegt, ähnlich wie üblicher Si-FET
sehr geringem Kanalwiderstand (Schaltverhältnis 1 : 10^6), s. SET

FET aus Zwillings-Nanodrähten von $\varnothing$ = 2 - 3 nm, Gatelänge 30 nm, Gate „all around“ um Nanodraht
Schreiben bei 1 ps, Löschen bei 1 ms

Diode aus Ge-NT für „CrossPoint“ = matrixförmige **Adressierung**,
Kreuzungspunkten spezielle Moleküle als Speicherzellen

Elektromechanischer Datenspeicher

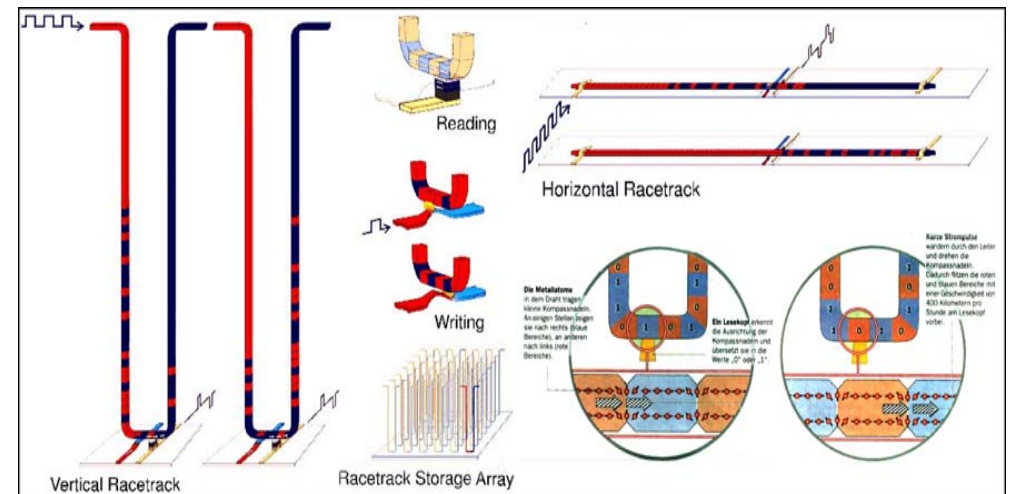
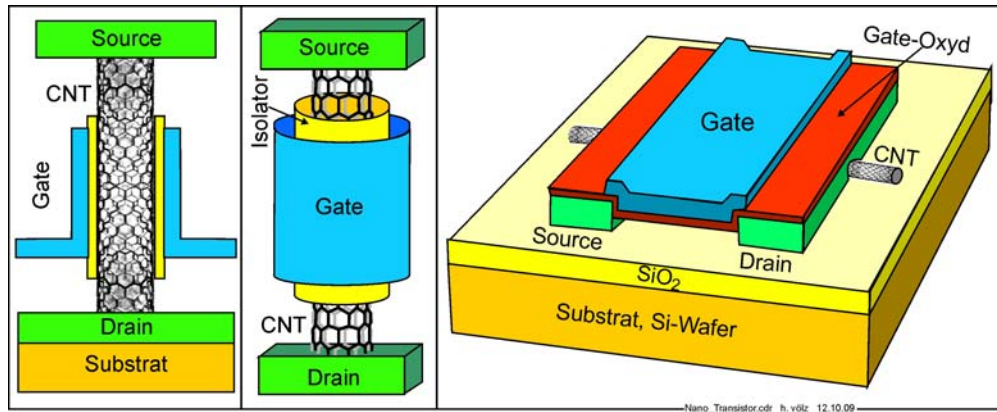
Auf Si-Oberfläche wird **Wald** aufrecht stehender Nano-Röhrchen aufgebracht, jedem Röhrchen eine Elektrode zugeordnet
Elektrische **Spannung** zieht elektromagnetische Kraft Röhrchen an, **verbiegt es**, schließlich wird Elektrode berührt
Elektrisch aufgeladene Röhrchen halten Zustand längere Zeit aufrecht → jedes Röhrchen Speicher für 1 oder 0
Von praktischer Nutzung noch weit entfernt, noch keine Wiedergabemöglichkeit vorhanden

Feldemission bei sehr geringen Spannungen, **Kontaktierung** meist durch Gold-Elektroden

2008. **Racetrack-Speicher = IBM-Patent** = Schieberegister aus Trennwänden zwischen magnetischen Domänen

Sie lassen sich in permanentmagnetischen Nanodrähten definiert mit spinpolarisierten Strömen bewegen

Kopplung mit Si-Halbleitern ist möglich. Hohe Datenrate = jeder Nanodraht hat eigene Schreib-/Leseinheit



Graphene

Bindungsenergie von Graphit zwischen C-Atomen: innerhalb einer Schicht 4,3 eV, zwischen zwei Schichten nur 0,07 eV

1950 hat P. R. WALLACE einatomare C-Schichten = **Graphene** = Nanobänder bereits theoretisch untersucht

2004 gelingt es ANDRE K. GEIM und KOSTYA S. NOVOSELOV Graphen auf einem Siliziumoxid-Substrat zu isolieren

Eigenschaften

Kohlenstoff-Atome sind in einem **hexagonalen Gitter** angeordnet.

Leitungs- und Valenzband berühren sich in 6 ausgezeichneten Punkten, **direkte Übergänge**

Quanten-Hall-Effekt ist bei Raumtemperatur zu beobachten, verlangt sehr hohe Magnetfeldstärken

Schwache Spin-Bahn-Kopplung → Anwendungen in **Spintronik** möglich

Elektronen verhalten sich wie masselose, ultrarelativistische Teilchen; **Flächenwiderstand** von 6 kΩ

Graphen-Schicht ist unter optischem **Mikroskop sichtbar**

Optische Transmission ≈ 80 %

Herstellung u.a.

Low-Tech-Methode: Tesafilm auf Graphitsplitter drücken, am Tesafilm klebende Flocken auf SiO₂-Substrat pressen

Methode von WALT A. DE HEER und CLAIRE BERGER epitaktisches Wachsen von Graphen auf SiC-Substrat

CNT aufschlitzen (2009)

CVD: (2009) Gemisch aus Kohlenwasserstoffen ≈1000 °C über Ni-Schicht leiten, dann rasch mit Argon-Gas abkühlen

Anwendungen u.a.

FET aus 10 nm breiten Graphen-Streifen, wegen sehr hoher Beweglichkeit auch bei Raumtemperatur funktionierend

Als **Elektroden** für LCD statt Indium, dessen weltweite Vorräte in etwa zehn Jahren erschöpft sind

Vermeidet außerdem Nachteil, dass Indiumzinnoxid Sauerstoff freigibt

Möglichkeit für **QuBit** besteht

Organische und biologische Möglichkeiten

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 37 von 110

Allgemein

Die **Natur** kennt als Speicher genetische, Immunbiologische und neuronale (Gehirn) Systeme
Ähnliche Ansätze benutzt die Molekularbiologie, hierzu gehört z.B. die **Sequenzierung** der DNA
Daher könnten entsprechende **technisch** orientierte Varianten möglich werden
Wichtig sind auch die Fortschritte bei der **Kopplung zwischen Neuronen und Elektronik**

Es entstehen neue Gebiete, die Biologie und Technik verbinden, u.a. **Molecular Engineering**
Sehr große, Moleküle, Oligomere und Polymere werden unter definierten Bedingungen zusammengeführt
Selbstorganisation lässt daraus Cluster, u.a. Kugeln, Doppelspiralen oder Gitterstrukturen entstehen

Genutzt werden Membranen, Enzyme und Proteine, auf z. B. die manipulierter Bakterien einwirken

Medizinisch nutzbar: Nano-Moleküle klein gegenüber biologischen Zellen, können daher eingeschleust werden

Das Protein Ferritin mit $\varnothing = 12$ nm wird so in lebenden Organismen zur Anreicherung und Lagerung von Eisen genutzt

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 38 von 110

Technische Speicherzellen aus organischen Materialien

Erfolgreich z. B. bei Fotografie, CD-R usw.: Aufzeichnung/Wiedergabe durch Licht
wichtig jedoch **elektronische Varianten**

Organische Halbleiter ermöglichen OLEDs, Displays, Solarzellen, elektronischen Preisschilder, integrierten Schaltung

1976 entdeckten HIDEKI SHIRAKAWA, ALAN MACDIARMID und ALAN HEEGER: Polyacetylen mit Cl bzw. Br oxidiert:
Leitfähigkeit 10^9 -fach erhöht (10^3 ; Cu = 10^6 S/cm). **Kunststoffe erstmals nicht mehr Isolatoren.**

1998 – 2002 Skandal um JAN-HENDRIK SCHÖN, gefälschte Daten zu organische Transistoren publiziert

2003 benutzt **Philips** Tetracen = orangegelber Kohlenwasserstoff aus vier aneinander gefügten Benzolringen
Entsprechende Einkristalle weisen in dünnen Schichten auf Silizium gute Speichereigenschaften auf

2007 Crossbar-Speicher 160 kBit mit organische Moleküle und Nanodrähte erprobt, total etwa $160 \mu\text{m}^2$
Unten 400 parallele Si-Nanodrähte → Monolage **Rotaxan**-Moleküle → gekreuzt 400 parallele Ti-Nanodrähte
Draht-Abstände 33 nm → Speicherzelle $\approx 1000 \text{ nm}^2 \approx 100$ Rotaxan-Moleküle
Rotaxan ähnelt Hantel, deren Schaft von einem Ringmolekül umschlossen ist
Kann durch +/-Spannung zwei Positionen einnehmen
→ bistabiler molekularer Schalter, technisch noch viele Mängel

2009 Kunststoff mit guter Elektronenbeweglichkeit ($1/1000$ von Si) gefunden = modifizierte Naphthalenketten
Kann mit „**Tintenstrahldrucker**“ verarbeitet werden, brauchbarer FET auf flexibler Unterlage mit Goldkontakten
Es werden billige, flexible Plastikchips als „**Wegwerfware**“ möglich

Genereller Vorteil: organische Schichten lassen sich mehrfach übereinander **stapeln** → **große Speicherkapazität**

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 39 von 110

Weitere Varianten

Zwischen 2 Goldkontakte organische Moleküle, Substanzen ($\varnothing \approx 50$ nm) eingefügt
elektrisches Feld bewegt Orbitale so, dass sie sich überlappen und das Material dabei leitend wird

Bio-Transistor (FET) mit Azurin-Molekül zwischen 2 Goldelektroden und darüber isoliertem Gate

Künstliche DNA-Moleküle werden mit Metall-Ionen zu molekularen, **magnetischen Drähten** zusammengefügt

Mit künstlichen DNA-Strängen werden 2D-Gitter-Plättchen erzeugt, die **Bar-Codes** ähneln, aber nur mit RTM lesbar sind

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 40 von 110

Nichtlineare Optik

Bei **hohen Lichtintensitäten** ändern sich optische Kennwerte, u.a. Brechungsindex, Divergenz und Polarisation
Änderung Brechungsindex kann **Selbstfokussierung** (Rückkopplung) bewirken = **Solitonen** (*lateinisch solus* allein)
Ähnliche Effekte bewirken **optische Bistabilität**, bereits als **optische Schalter** mit Speichereigenschaft benutzt
Frequenzverdopplung: monochromatische Welle mit $\omega \rightarrow$ Oberwellen $n \cdot \omega$ mit $n = 2, 3, 4 \dots$
2 Lichtfrequenzen ω_1 und ω_2 – eine intensiv genügt – erzeugen Frequenzen $n \cdot \omega_1 \pm m \cdot \omega_2$ (n, m ganzzahlig)
Optischen Transistor: ein intensiver Lichtstrahl erzeugt nichtlineares Material, in dem ein anderer lichtschwacher Strahl verstärkt wird
Optische Gitter stehende Wellen erzeugen ortsabhängige Kenndaten, unterschiedliche Wellen aus x -, y - und z -Richtung ermöglichen Raster im Raum, wird bereits für QuBit genutzt (s. u.)
Zur **Speicherung** können nichtlineare Effekte mit 2 oder 3 Lichtstrahlen Speicherzellen adressieren ($\approx$ Ferritkern), gewünscht wäre dazu ein *optisch transparentes Material mit hysteretischen (magnetischen) Eigenschaften*
Effekte sind im **Photonen-Bild** schwierig zu interpretieren

Photonische Kristalle = Metamaterial

Geschichte

1785 FRANCIS HOPKINSON (1737 – 1791): Straßenlaternen, durch ein feines Seidentaschentuch betrachtet erzeugen **Vielfachbilder**
1820 JOSEPH VON FRAUNHOFER (1787 – 1826) benutzt **Gitter** zur Spektralzerlegung
1912 MAX VON LAUE (1879 – 1960) weist **Beugung von Röntgenstrahlen** nach
1921 LOUIS VICTOR DE BROGLIE (1892 – 1987): Doktorarbeit **Materiewellen** gemäß $\lambda = h/m \cdot v$ (v Geschwindigkeit)
1927 CLINTON JOSEPH DAVISSON (1881 – 1958), LESTER HALBERT GERMER (1896 – 1971) Beugung von **Elektronenstrahlen** in Kristallen
1972 V. P. BYKOV **beschreibt Struktur** für photonische Kristalle benutzt aber noch nicht Bezeichnung
1977 SHANHUI FAN und JOHN D. JOANNOPOULOS **Berechnungen** für zweidimensionale optische Kristalle
1987 ELI YABLONOVICH und SAJEEV JOHN weitere, unabhängige **theoretische Arbeiten**
1999 PHILIP ST. J. RUSSEL erzeugt **photonische Fasern** mit Bandlücken
2000 YABLONOVICH, stellt ersten **photonischen Kristall** her

Analogie: elektronische $\leftrightarrow$ photonische Bandlücke

Halbleiter-Energie-Bandlücke Grundlage für elektronische Bauelemente
Analogiebetrachtung: Wellenlänge $\lambda = c/f \rightarrow$ Energie des Photons $E = h \cdot f$
 c Lichtgeschwindigkeit, f Licht-Frequenz, h Plancksche Konstante (v Geschwindigkeit von Materiewellen)
Photonische Bandlücke = energetischer Bereich, in dem keine entsprechenden Photonen existieren können
Entsteht durch periodische Strukturen $\approx \lambda/2$ in dielektrischen Material, realisiert als „3-D-Streuer“ = künstliche Atome
Abstand Si-Atome $\approx 0,25$ nm, für photonische Kristalle einige 100 nm erforderlich $\rightarrow$ richtungsabhängig
Einfacher Fall:
hinter Gitter mehrere Strahlrichtungen (DVD) $\triangleq$ Licht nur in bestimmte Richtungen möglich = Richtungslücken
Ähnlich Mehrfachschichten bei Lasern oder **Entspiegelung** von Optiken
Photonische Kristalle erst dann, wenn Bandlücken weitgehend richtungsunabhängig sind
Berechnung kompliziert, oft nur numerisch möglich, **technische Ausführung** noch mehr

In Natur vorhandene Beispiele

Perlmut besitzt eine zweidimensionale periodische Schichtstruktur, typisches Schillern

Opal ist eigentlich kein Kristall, ausgehärtete, wasserarme Silikat-Kügelchen sind regelmäßig in wasserreichem Silikat eingebettet

Schmetterlingsflügel: es existieren periodische Quer- und Längs-Stege im Submikrometer-Bereich
Dadurch Lichttransmission, -reflexion modifiziert, schillern unter bestimmten Winkeln in allen Regenbogenfarben
Photonische Bandlücke unvollständig, daher Winkelabhängigkeit

Erste technische Anwendungen

1998 NEC **Photonisches „Superprisma“** mit Abmessungen 10 - 100 μm , Periodische Zylinderlöcher eingefügt
10fache Dispersion gegenüber Glasprisma, Bei 1 μm erfolgt 60 ° Richtungsänderung

1999 PHILIP ST. J. RUSSEL **Photonische Faser**: Idee: Licht in Luft wesentlich weniger als in Gläsern absorbiert
Mantel verlangt aber Material mit kleinerem Brechungsindex (Luft $n \approx 1$) existiert nicht
Photonisches Material = Vielzahl sechseckig regelmäßig verteilter Luftkanäle, Licht „Luft-Faser“ nicht verlassen
Großtechnologisch relativ einfach: viele dicke Glasröhren zu 1 mm Bündel,
durch Zug bei erhöhter Temperatur gestreckt $\varnothing \approx 50 \mu\text{m}$
Faser kann 100fache Energie äußerst verlustarm übertragen

2000 YABLONOVICH **erster photonischer Kristall**, regelmäßig kleine Löcher in Diamantkristall
($n = 1,787$) aus 3 Richtungen gebohrt
Experimentell nachweisbare, vollständige Bandlücke im Mikrowellenbereich bei 1,5 μm

Experimente für **Tarnkappen**, **negative Brechungsindizes** usw. ermöglichen neuartige Anwendungen

Blaue LED mit doppelter Strahlung: oberer Kontakt auf GaN regelmäßige kleine Löchern mit 500 nm Abstand

Auch kristallographische Struktur des künstlich veränderten Dielektrikums geht ein
Häufig ist Diamant-Struktur (tetrahedral) günstig, alles erst in Anfängen

U.a. für

selektive optische Filter, Frequenzverdopplung, ultraschnelle optische Schalter, integrierte photonische Schaltungen,
neuartige optische Fasern, Kompression von Lichtimpulsen, Erzeugung negativer Brechungsindizes = **Meta-Material**
Abstrahlcharakteristik Antennen Mobiltelefonen so verändern, dass viele Strahlung vom Menschen ferngehalten
völlig neuartige Linsenkonstruktionen.

Herstellungsmethoden

Strukturen durch **Ätzen** herstellen, Erzeugung **synthetischer Hologramme**,
Fokussierte Atomstrahlen lagern Atome zum 3D-photonischen Kristall zusammen

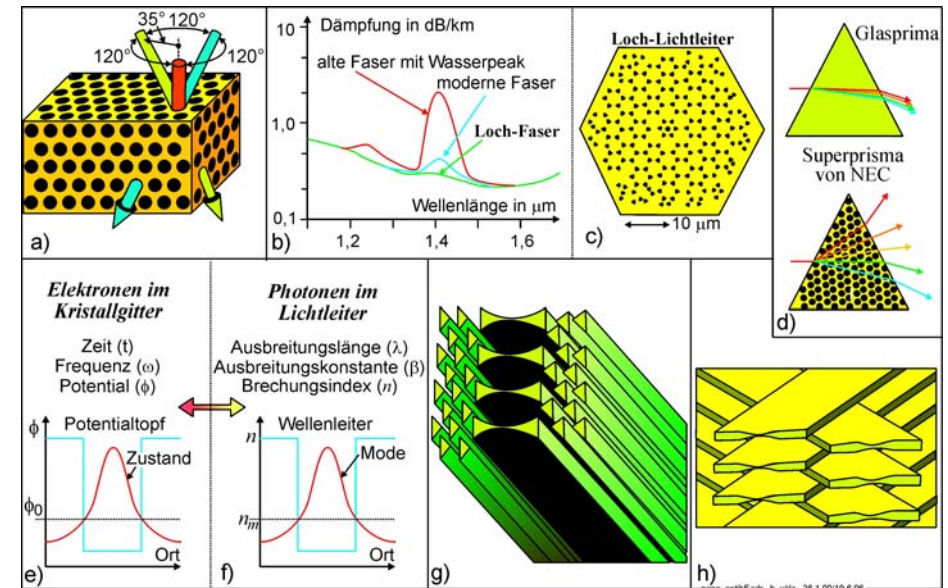
Selbstorganisation

Kleinste Kugeln, u.a. aus Latex werden in möglichst korrekter **kugeldichte Packung** ausgeschichtet
Zwischenräume mit feineren Goldpartikeln aufgefüllt, lagern sich dabei fest aneinander
Latex wird bei 300 °C entfernt, es verbleibt ein photonischer Kristall aus Goldteilchen

Ähnlich: sintert Silikat-Strukturen, füllt Hohlräume durch CVP (chemical vapor deposition) mit kristallinem Silizium
Bei **Opal** Kügelchen entfernen und mit Ti_2O_3 auffüllen, *besser* nur Ti_2O_3 -Matrix mit Poren- $\varnothing = 0,24 - 2 \mu\text{m}$ übrig lassen
Glaskugeln benutzen, Freiräume mit Flüssigkeiten auffüllen, **elektrische Felder** können dann **Bandlücke verschieben**
Polymer durch **Schlitzdüsen** → Polymerschäum mit Poren von 200 - 1000 nm

Meta-Material = Kristall aus Legierung von Yt, Va, O = komplizierte Anordnung von metallischen Gittern und Ringen
Bricht Licht vollständig, es tritt keine Lichtreflexion auf. Damit umhülltes **Objekt ist unsichtbar**

Weiterentwicklung ≈ Dotierung von Halbleitern = gezielt eingebaute **Störstellen** oder **Defekte**
Z: B. größeres Mittelloch der photonischen Faser



Photonen-Speicherung (1)

Photonen Ruhemasse Null, müssen sich daher mit Lichtgeschwindigkeit bewegen
 Im Material mit Brechungsindex n verlangsamt sich die Geschwindigkeit auf c/n
 Damit Photonen eingefangen werden und ruhen, muss $n \rightarrow \infty$ gelten, $\Rightarrow \lambda \rightarrow \infty$
 Grenzwert ist nicht sinnvoll zu interpretieren, auch nicht für Materiewellen gemäß $\lambda = h/m \cdot v$ ($v = m = 0$)
 Daher müssen Photonen-Zustände reversibel auf andere Objekte, z.B. Atome, übertragen werden

Hierfür **drei Möglichkeiten** bekannt geworden

1. Für die zuspeichernden Photonen (Lichtimpuls) wird ein zusätzlicher **Kopplungsstrahl** benutzt
 Frequenz der Photonen muss mit Absorptionsbande eines Gases (z. B: Cs oder Ru) übereinstimmen
 Der Kontrollstrahl teilt den Energieterm der Atome in zwei Terme mit abweichender Energie auf
 Dann können die Photonen nicht vom Gas absorbiert werden, werden nur etwas abgebremst
 Das Gas ist so für den Lichtimpuls völlig durchsichtig = elektromagnetisch induzierte Transparenz (EIT)
 Wird dann der Kontrollstrahl abgeschaltet, erzeugen die Photonen kohärente Anregungsmuster der Gasatome
 Photonen sind aufgezeichnet, der Lichtstrahl ist nicht mehr vorhanden = Zwitterwesen aus Licht und Materie
 = Dunkelzustands-Polarisation, die für etwa 10 μ s stabil ist
 Wird Kontrollstrahl wieder eingeschaltet, geben die Atome den zuvor eingefangenen Lichtimpuls wieder unverändert frei
 Methode ist inzwischen weiterentwickelt auf zwei Kontroll-Laser = Spiegelrater dauernde Reflexion

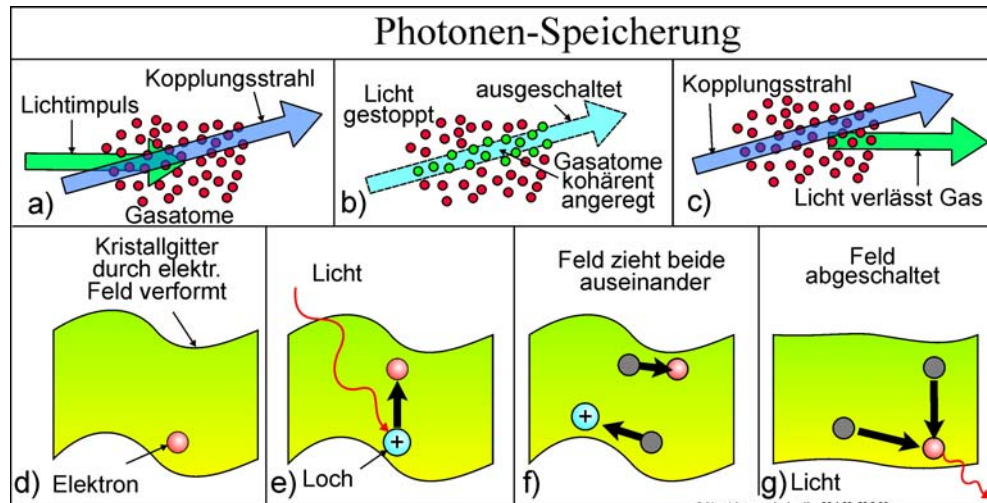
Photonen-Speicherung (2 + 3)

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

Ein Photon hebt dann ein Elektron auf ein höheres Niveau

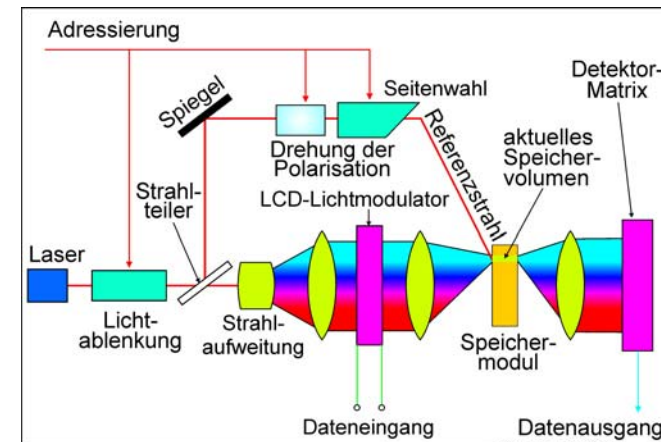
Das verformte Band verschiebt das zurückgebliebene „Loch“ uns das angehobene Elektron seitlich voneinander
 Weil es keinen senkrechten Übergang gibt, kann Elektron nicht zurückkehren, das Photon ist gefangen, gespeichert
 Aufhebung der Bandverformung gibt es frei $\Rightarrow$ Photon-Wiedergabe

3. **Farblose, goldhaltige Kristalle** speichern ultraviolettes Licht auf noch nahezu unbekannte Weise
 Anschließender Kontakt mit Flüssigkeit (z.B. Dichlormethan) gibt Licht als gelbe Fluoreszenzstrahlung 10 s ab
 = *Solvolumineszenz* ist beliebig oft wiederholbar



Holographie

Die Holographie ist primär ein rein optisches Verfahren, das mit filmähnlichem Material arbeitet.
 Zum Verständnis sind viele optische Grundlagen erforderlich, daher wird sie getrennt behandelt.
 Lange bearbeitet wird eine rein digital-optisch-elektronische Variante, nur diese wird hier kurz erklärt.
 Seit kurzen wird sie auch bei CD-DVD-ähnlichen Medien benutzt (s. d.).



Zwischen-Exkurs Quantentheorie $\Rightarrow$ QuBit

Für Quantentheorie existiert ein spezielles, umfangreiches Manuskript

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 57 von 110

Einführung

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

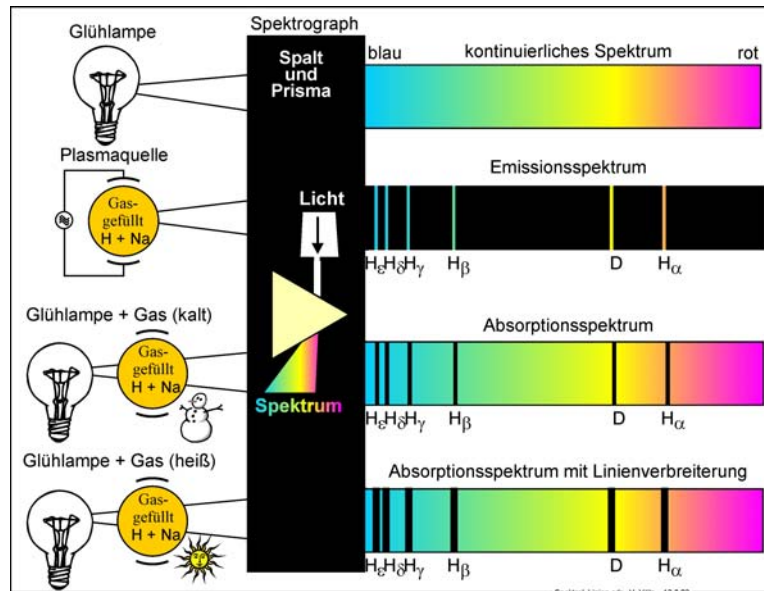
1924 LOUIS DE BROGLIE (1892 - 1981) Materie-Wellen $\lambda = h/m \cdot v$

Für Licht heute drei Modelle:

1. **Strahlenoptik** Lichtstrahlen breiten sich geradlinig aus, an Grenzflächen abgelenkt und reflektiert
2. **Wellenoptik**: Licht ist elektromagnetische Welle, die sich von jedem Punkt kugelförmig ausbreitet HUYGENS'sches Prinzip
3. **Quantentheorie**: Licht besteht aus Teilchen ohne Masse, Photonen mit $E = h \cdot v$ besitzen

Ausgangspunkt ist Beschreibung und Erklärung von Spektren = Wellen-Optik

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 58 von 110



Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 59 von 110

PLANCK-sche Formel

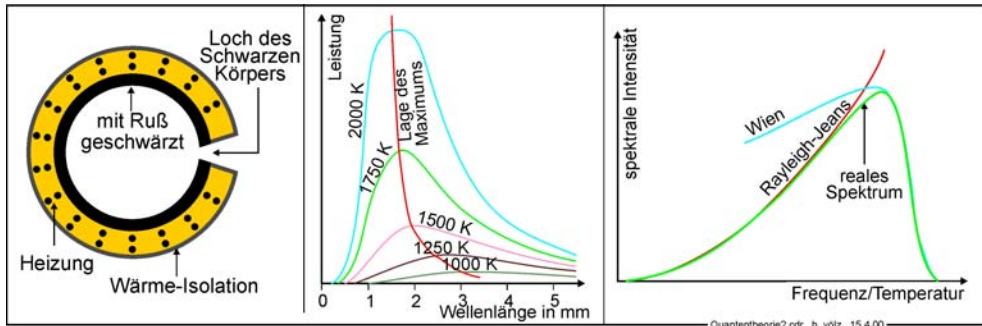
Problem Strahlung des „Schwarzen“ Körpers $\rightarrow$ PLANCK-Formel, PLANCK-Konstante $h = 6,626 \dots \cdot 10^{-34}$ J-s

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

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

h hat die Dimension einer **Wirkung J-s**, Wert sehr klein, wurde daher früher nicht bemerkt

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 60 von 110



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,
gewonnene formale Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Experimenten überein

Bei der Rückkehr erkennt MAX BORN das in der Mathematik lange bekannte **Rechnen mit Matrizen**, ↯

Hier gilt nicht das übliche kommutative Gesetz: $a \cdot b = b \cdot a$, sondern $\sigma \times \sigma \neq \sigma \times \sigma = \Delta x$

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.

1926 leitet HEISENBERG hieraus die Unschärfe-Beziehung ab: $\Delta x \cdot \Delta p = h/2$ bzw. $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2$ (genau müsste $\hbar = h/2\pi$)

BORN, HEISENBERG und PASCUAL JORDAN (1902 - 1980) bauen Matrizenmechanik → 1926 „Zeitschrift für Physik“

WOLFGANG PAULI (1913 – 1993) berechnet hiermit das vollständige Wasserstoffspektrum

Neue Einsicht: *Partikel und Welle* zwei unterschiedliche Beschreibungen des gleichen Sachverhalts
Welle *und* Partikel, Dualismus

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

LAPLACE-Dämon ist tot! Klassische Physik = Grenzfall! → Korrespondenz-Modell

Zuordnung der Matrizenmechanik nur zu HEISENBERG (und BOHR) ist historisch falsch

Insbesondere wird BORN als Lehrer von HEISENBERG und weiterer wichtiger Ergebnisse nicht genügend gewürdigt

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



Bilder von Oskar Schirmer (geändert)

Planeten-Modell

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 **Bahndrehimpuls** (Energie) nur bestimmte diskrete Werte, die **erlaubten Bahnradien**
Abstrahlung erfolgt **nur bei Sprüngen** zu niederen Bahnen = Spektrallinien; Elektron zu höherer Bahn durch Energiezufuhr.

1922 **Korrespondenzprinzip** von BOHR = Komplementaritätsprinzip = Kopenhagener Deutung

Klassisch → quantentheoretisch ist **intuitiv möglich**, wenn für beide Modelle große Quantenzahlen angenommen werden
So sind **Quanten-Gesetze zu erraten**

Beispiele:

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.

Materie-Wellen

1924 LOUIS DE BROGLIE (1892 - 1981) Aus $E = m \cdot c^2$ folgt die DE-BROGLIE-Wellenlänge

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

Elektronen-Bahnen = stehende Wellen; Bahnlänge k-faches $l = k \cdot \lambda$, mit Elektronenmasse $m_e \rightarrow$ Radius r

1931 Anwendung beim Elektronen-Mikroskop ERNST AUGUST FRIEDRICH RUSKA (1906 – 1988)

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

Quantenzahlen und Spin

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

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

- 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
- 3. **magnetische Quantenzahl** als $2 \cdot l + 1$ Ausrichtung der Achsen (Orbitale) im Raum
= Feinstruktur von Spektrallinien, je Schale sind maximal $2 \cdot n^2$ Elektronen möglich
- 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 Teichen an einem Ort müssen sich zumindest durch einen der 4 Quantzustände unterscheiden

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

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
Neue ortsabhängige komplexe **Wellenfunktion ψ** (Interpretation s.u.). Einfache Schreibweise erfordert 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

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

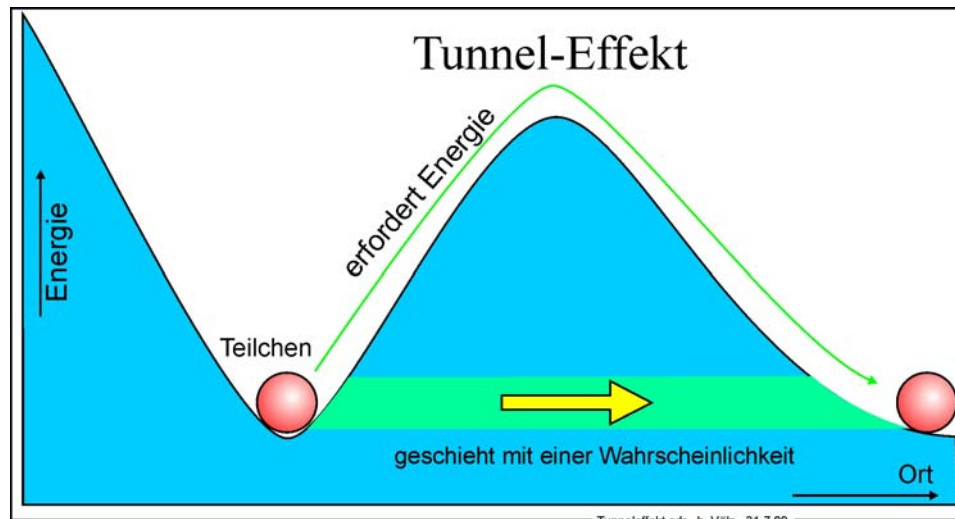
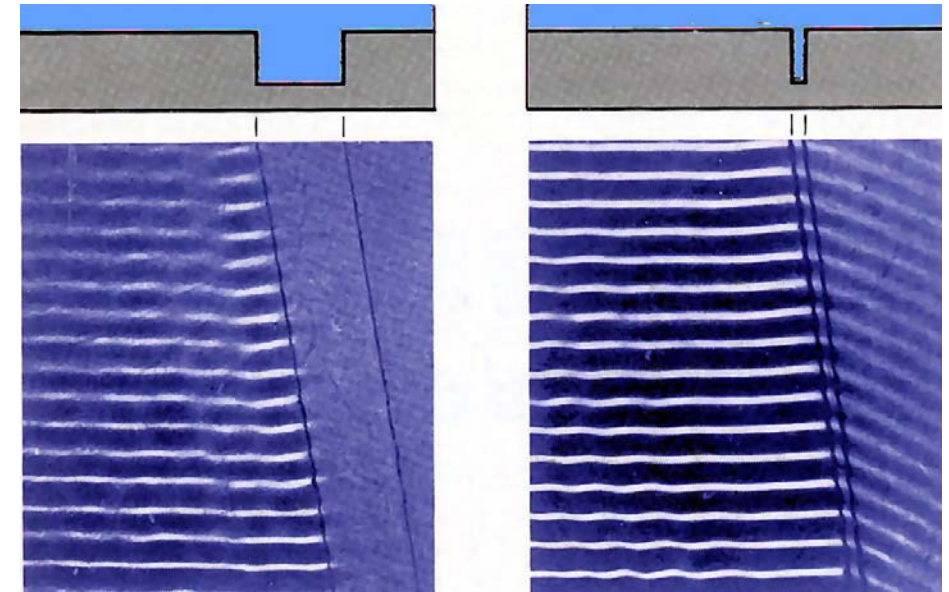
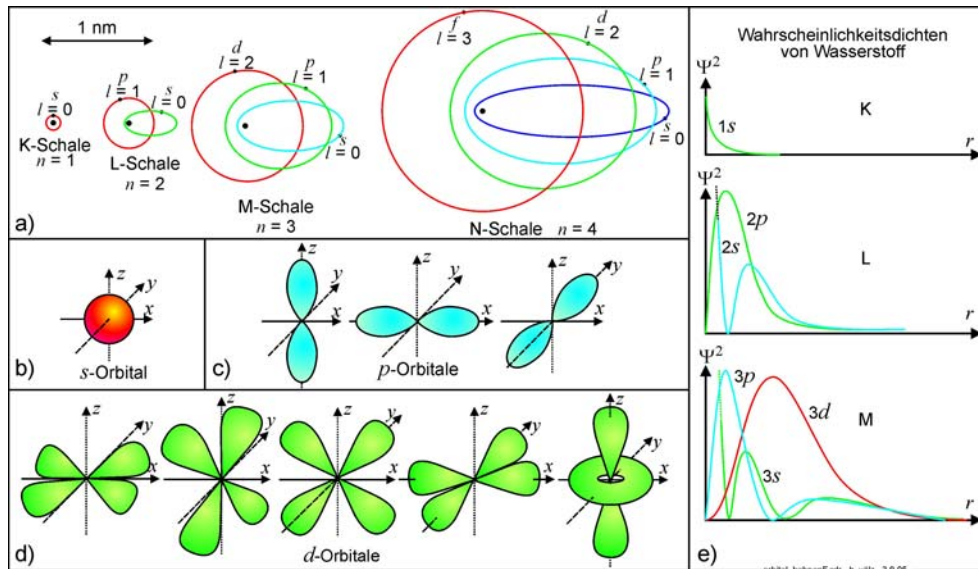
Die Ableitung kann u.a. über **Energieerhaltungssatz** und **Unschärfe-Relation** erfolgen
Es entsteht erneuter Streit **kontinuierlich** $\Leftrightarrow$ **diskret**, gemäß SCHRÖDINGER $\Leftrightarrow$ HEISENBERG
Zunächst existierten beide Quantentheorien völlig getrennt und lieferten jeweils hervorragende Voraussagen
1926 konnte SCHRÖDINGER beweisen, dass sie mathematisch vollkommen äquivalent sind
Rechnungen mit SCHRÖDINGER-Gleichung sind jedoch einfacher und so setzte sie sich durch

Interpretation als Wahrscheinlichkeit

1927 Interpretiert MAX BORN das Betrags-Quadrat der Wellenfunktion ψ als Wahrscheinlichkeitsamplitude
Wellenfunktion ψ beschreibt nicht den Zustand eines Quantenobjekts
gibt nur die Wahrscheinlichkeit dafür an, bei einer Messung das Objekt anzutreffen
= Aufenthalts-**Wahrscheinlichkeit** im Volumen V

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

Es entstehen **Orbitale**
erklären lassen sich so Doppelspalteneffekt für Elektronen, Tunneleffekt, Radioaktivität und Supraleitung
Unser Alltag wird zur **wahrscheinlichsten aller Welten**



Subjektiver und objektiver Zufall

Subjektiven Zufall

= Informationsmangel (Anfangsbedingungen und/oder Prozessablaufes) zu den gerade bekannten Gesetzen
 Keine korrekte Vorausberechnung möglich, typisch Unfälle, Wetter, Würfel- oder Lottospiel
 Es wird vorausgesetzt, dass es deterministische Gesetze (LAPLACE'scher Dämon?!)

Objektiver Zufall

bei wirklich zufälligem Geschehen vor, Ursache nicht mangelnde Kenntnis, nicht Ursache → Wirkung
 Wichtig Quanten-Erscheinungen = Folgerung aus der Unschärfe-Relation
 Ein Quantenobjekt besitzt (teilweise) keine bestimmten Eigenschaften
 Wäre sein Impuls genau festgelegt (gemessen) ⇒ Aufenthaltsort nicht nur ungenau, sondern existiert nicht (s.u. Superposition)

Provokant

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

Dies wollte EINSTEIN mit verdeckten Parametern aufheben, ist aber experimentell widerlegt

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
abstrakt und auf Mittelwerte bezogen, besteht jedoch eine Analogie zum Schalenaufbau
- MAXWELL und BOLTZMANN setzen die **kausalen Gesetze an die Spitze** und leiten daraus **Durchschnittswerte** ab
Quantentheorie Gegenteil: Grundaussagen sind Durchschnittswerte, **Einzelwerte** 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.“



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 entartetet 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	Energieterne

*) 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

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

Da c_1 und c_2 beliebige, frei verfügbare Konstanten sind,
existieren **gleichzeitig unendlich viele** überlagerte Quantenzustände

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

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

Anschaulich alle Punkte auf der **Kreisoberfläche** mit $r = \langle A | B \rangle$. Kugelbild schuf FELIX BLOCH (1905 – 1983)
Am oberen „Nordpol“ befindet sich Zustand A, am unteren „Südpol“ B

Gleichzeitigkeit der Zustände $\Rightarrow$ Vorteile vom Quantenrechner und QuBit

Bedeutung von äußeren Einwirkungen

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 **HEISENBERG'schen 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 (gleichzeitig) nach links **und** rechts umfallen
Durch die Dekohärenz fällt sie aber nur nach einer Seite

Physikalische Modelle für kleine Teilchen.

Modell	Masse	Dichte ρ	Radius r	Zeiteinfluss
Punktmechanik	konstant	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 0$	kein
Starre Körper		endlich, konstant	endlich	
deformierbare Körper		druckabhängig	druckabhängig	$p(t)$
Quantenmechanik	nur als Wirkung	$\rightarrow \Psi(x, y, z, t)$	unbestimmt	vielfältig
Relativitätstheorie	$m(v/c)$	endlich, konstant	endlich	$v(t)$

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

Ausspruch von NIELS BOHR (1885 – 1962):

„Wer über Quantenmechanik nachdenken kann, ohne wirr im Kopf zu werden, hat sie nicht wirklich verstanden.“

QuBit

Begriff **Quantenphysikalisches Bit** hat 1995 hat BENJAMIN W. SCHUMACHER geprägt
Physical Review A, 51(4); 2738 - 2747, 1995

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:

- Für Quantenzustände gibt es **kein Backup**
- Quantenzustände sind nicht zu **klonen**
- QuBits sind **fest an einen Ort** gebunden
- Eine **Fehlerkorrektur** dürfte sehr schwierig sein
- Abmessungen für QuBit (nm) extrem klein → sehr hohe **Speicherdichte**

Das Traumaskop

Das Traumaskop 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





Traumaskop = Modell für QuBit

Vorder- und Rückseite per Zufall mit 0 oder 1 belegt, Zusätzlich unterschiedliche Schriftfonts, Farben und Größen
Die Rückseite der Pappscheibe erhält außerdem einen grünen Rand; **4 Belegungen möglich:** 11, 12, 21 oder 22

Klassisch informationstheoretisch sind zur Feststellung der aktuellen Belegungsvariante zwei Bit erforderlich
Zunächst wird die Ziffer auf der Vorderseite und nach dem **Umdrehen** die auf der Rückseite gefunden

Schneller Rotation mit f : beide Seiten überlagern sich, beide Belegungen sind sofort (unscharf) sichtbar $\triangleq 1$ QuBit

„Unscharf“: Es existieren auch viele geneigte Zwischenzustände

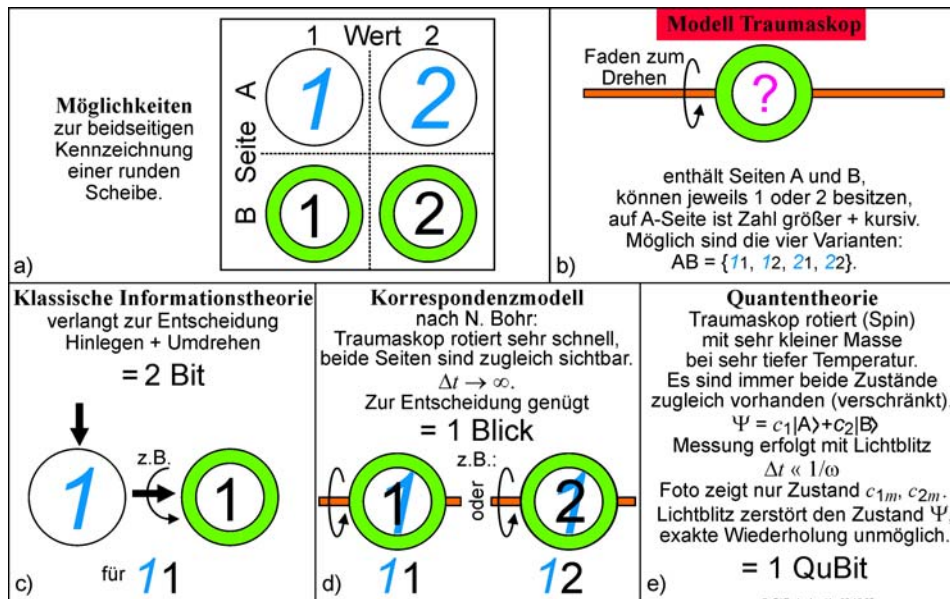
Entspricht dem **Korrespondenzprinzip** von BOHR mit Betrachtungszeit $\Delta t \rightarrow \infty$, bzw. $\Delta t \gg 1/f$

Kurzes Blitzlicht erzeugt Aufnahme in „zufälliger“ Lage, Strich, Schräglage oder eine Seite = Werte von c_1 und c_2

Längere Belichtungen erzeugen „unscharfe“ Bilder

Gedanklicher Übergang zu **mikrophysikalischen Abmessungen**, extrem kleine Masse = Analogie zum Spin

Jede Einwirkung, auch ein **Blitz**, **zerstört** dann den, auf dem Bild **gezeigten Zustand**, **Superposition geht verloren!**



Verschränkung und Nichtlokalität

Anwendungen, z. B. Computer und Speicher verlangen **mehrere QuBit**

Dazu müssen zwei oder mehrere Quantensysteme (-register) in enger Wechselwirkung stehen = „**Verschränkung**“ Begriff 1935 von SCHRÖDINGER eingeführt

Auch Quanten-Registern müssen völlig **gegenüber Umwelteinflüssen geschützt** sein
bisher maximal einige 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** ($v = \infty$)
Können sich dabei bereits beliebig weit voneinander entfernt haben

Ähnlich: Elektron existiert als Welle großräumig, als Teilchen jedoch an genau definierten Ort gemessen
Hier und bei jeder (Quanten-) Messung erfolgt **Kollaps der Wellenfunktion** → Kopenhagener Deutung
Ohne Verzögerung mit $v = \infty$ muss die Welle im gesamten Raum verschwinden

Wichtig: Eigenschaften der Quantenobjekte können prinzipiell nicht störungsfrei gemessen werden
es tritt immer **Dekohärenz** ein, denn Messung entnimmt Energie, muss verstärkt werden, um sie anschließend auf ein Makrosystem zu übertragen = Heisenberg-Unschärfe

Daher **kein Kopieren und Vervielfältigen** von QuBit möglich, zur **Fehlerkorrektur** gibt es Ansätze

EINSTEIN sprach daher von **spukhafter Fernwirkung** ⇒ **Nichtlokalität** der Quantentheorie folgt

Anschaulich vereinfacht: **Paar Handschuhe**: einen morgens in die Tasche, andere ist zuhause geblieben
das gilt auch dann, wenn man erst mittags den mitgenommenen betrachtet

Supra-Leitung = makroskopischer Quantenzustand

1911 entdeckte HEIKE KAMERLINGH ONNES (1853 – 1926) die Supraleitung für Hg bei $T \leq 4,2 \text{ K} = -269 \text{ °C}$
 Es besitzt dann keinen elektrischen Widerstand: Ein Kreisstrom fließt unaufhörlich und ist als Magnetfeld nachweisbar
 Zur Erklärung führte 1956 LEON N. COOPER (*1930) das Cooper-Paar von 2 Elektronen ein
 1957 BCS-Theorie: 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
 Bei geringer Entfernung laufen sie unter Energiegewinn zusammen, **bilden Paar** mit gemeinsamer Vertiefung
 2 Elektronen mit gegensätzlichem Spin und Impuls überwinden elektrostatische Abstoßung

Gewinn $\Delta W \approx 10^{-4}$ bis 10^{-3} eV

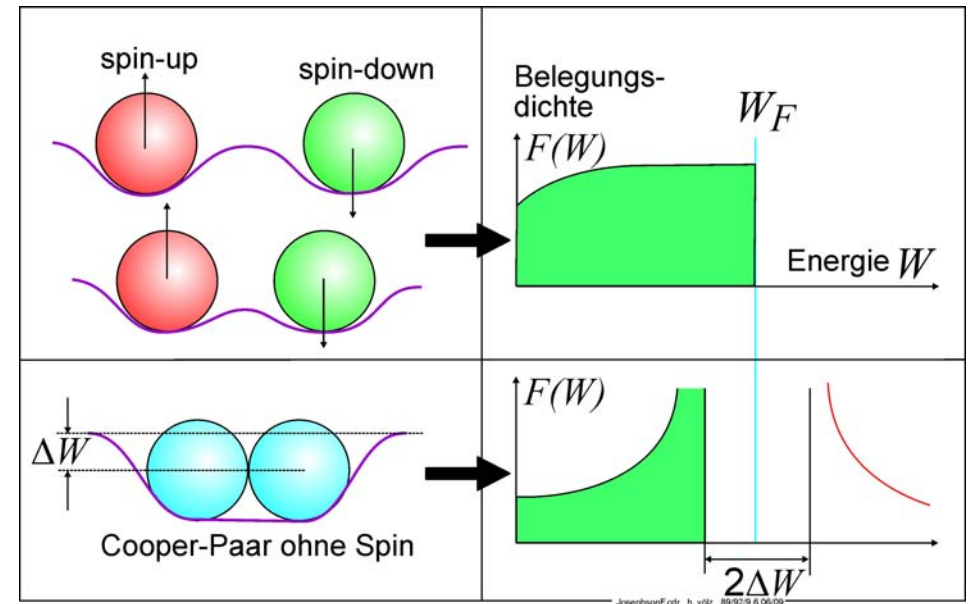
= COOPER-Paare → Spin wird kompensiert, werden zu Bosonen, **PAULI-Verbot** gilt nicht mehr
 Viele Paare ($\approx 10^{20}$) können gleichen Zustand einnehmen ⇒ **BOSE-EINSTEIN-Kondensat** = ein einziges Quantensystem
 COOPER-Paaren $\varnothing = 10^{-7} - 10^{-6} \text{ m} = 100\text{- bis } 1000\text{facher Atomdurchmesser}$

daher nicht mehr gestreut → Strom verlustfrei

Bei Zimmertemperatur gilt für Elektronen die FERMI-DIRAC-Statistik, Belegungsdichte $F(W)$ endet an 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
 Kann durch höhere Temperatur oder Magnetfeld erfolgen → Material wird normalleitend

Experimentelle Beobachtung supraleitender Eigenschaften bestätigt **Gültigkeit der Quantenphysik auch für makroskopische Systeme**



QuBit-Systeme

Wichtige Varianten sind:

1. JOSEPHSON-Kontakt
2. Quantenpunkt
3. Kernspin,
4. Ionenfalle + Magneto-optische Falle
5. BOSE-EINSTEIN-Kondensat

QuBit-Abmessungen in nm-Bereich

→ theoretisch sehr hohe **Speicherdichte** → große **Speicherkapazität**

Bisher gelang es bestenfalls 100 QuBit zu verschränken

Für **Quantenrechner** statt AND, OR, NOT bzw. NAND, NOR oder XOR neue logisch Operationen

Üblich sind Hadamard, Phasengatter und CNOT

JOSEPHSON-Kontakt

1963 BRIAN DAVID JOSEPHSON (*1940) experimentell nachgewiesen

= 2 Supraleiter durch dünne Isolierschicht getrennt

$\approx 10 \text{ }\mu\text{m}$ Kantenlänge, $C \approx 10^{-16} \text{ F}$, schaltet $\approx 1 \text{ }\mu\text{W}$, 1 ps

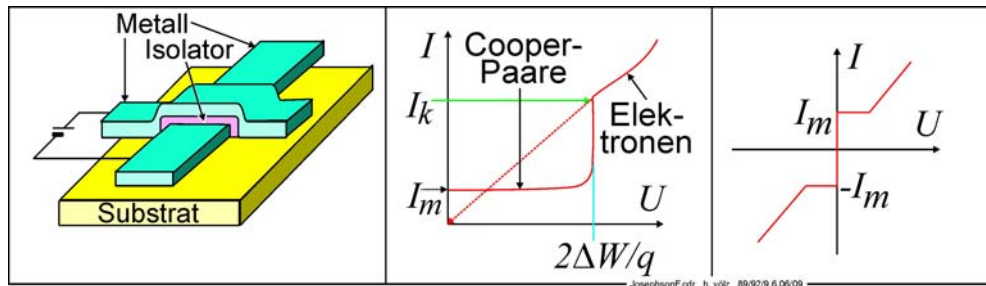
COOPER-Paare: Strom ohne Spannungsabfall $\Leftrightarrow$ zuviel Strom → normalleitend

1997 von SHNIRMAN u.a. als **QuBit** vorgeschlagen

Auslesen verlangt Einzel-Elektronen-Transistor (s.u.) mit Gate-Kapazität $\approx 10^{-18} \text{ F}$, $T \leq 2 \text{ K}$

Für ausreichenden Störabstand jedoch $T \leq 50 \text{ nK}$, QuBit-Operation $\Delta t \approx 100 \text{ ps}$

Theoretisch Computer mit 10 bis 100 verschränkten QuBit möglich



Quantenpunkte

= quantum dots = Quanten-Fallen, 1998 von DANIEL LOSS und DAVID DIVINCENZO vorgeschlagen

Mit **Rasterkraftmikroskop** werden atomweise im Halbleiterkristall „Fehlstellen“ von wenigen nm³ eingebaut. Elektronen und Fehlstellen verhalten sich als Ganzes wie ein großes Atom. In ihnen sind einzelne Elektronen (QuBit) in der Bewegungsfreiheit stark eingeschränkt, Wände reflektieren sie.

Mit **Nanotechnologie** winzige Säulen aus ca. 50 dünnen Schichten von GaAs und AlGaAs herstellen. Tempern in N-Atmosphäre ca. 1100 °C erzeugt Nanokristalle: $\varnothing \approx 2,5$ nm, Dichte 10^{19} Quantenpunkte/cm³.

Selektiv metallisierter **DNA-Strang** als Quantenpunkt führte zum organischen SET bei Zimmertemperatur.

Anregung erfolgt u.a. mit **Lichtblitzen** von 100 fs.

Als „**Wiedergabesignal**“ senden sie genau definierte Photonen aus.

Quantenpunkte sind immer etwas mit dem umgebenden Kristallgitter verknüpft → kurze Dekohärenzzeit.

Kernspin

Nutzung von NMR (nuclear magnetic resonance = Kernmagnetische Resonanz)

Einziges Prinzip, das bei **Zimmertemperatur** funktioniert.

Alle erforderlichen QuBit müssen **in einem Molekül** als Quantenregister vorhanden sein.

Infolge **guter Abschirmung** des Kernspins durch Elektronenhüllen relativ lange Dekohärenzzeit, ca. Sekunden.

Kernspins (QuBit) werden durch externes Magnetfeld parallel oder antiparallel ausgerichtet.

Logische Operationen werden über Gesamt-Drehimpuls-Kopplung erzeugt.

Ergebnis wird als magnetisches Induktions-Signal ausgelesen.

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

Neben NMR auch Elektronenspinresonanz (ESR) möglich, dann nur 10^{12} bis 10^{14} Spin erforderlich.

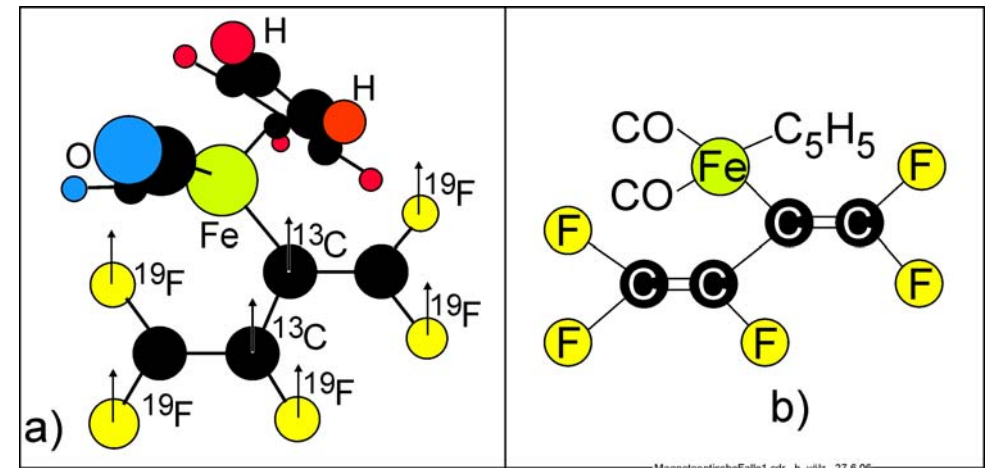
Verbesserung: Detektion im optischen Bereich (Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR) u.a. bei Farbzentren.

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

1999 5-QuBit-Computer mit Molekül BOC = $^{13}\text{C}_2\text{-}^{15}\text{N}_2\text{-D}_2$ -Glycerin-Fluorid.

2001 Perfluorobutadien-Eisen-Komplex = $\text{C}_{11}\text{H}_5\text{F}_5\text{O}_2\text{Fe}$.

mit Algorithmus von PETER SHOR von 1994 Primzahlzerlegung von 15.



Ionenfallen + MOT

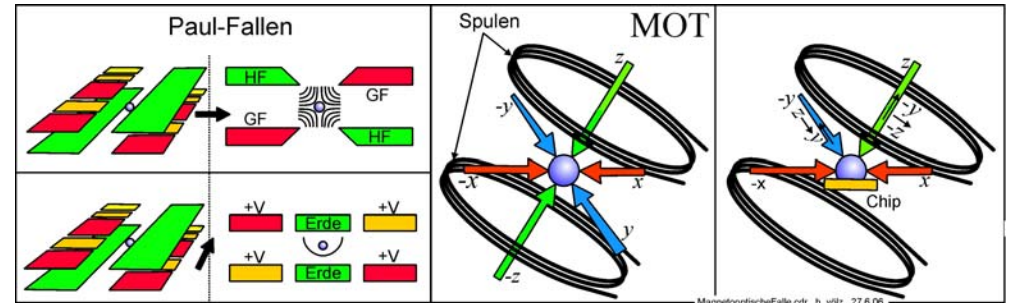
Notwendig **Kombination von 3 Methoden**

- **Vakuum-Gefäß** um restliche Wechselwirkungen zu unterbinden
- **Mehrstufige Kühlung** bis nK zur Senkung der thermischen Bewegung von THEODOR WOLFGANG HÄNSCH (*1941) und ARTHUR LEONARD SCHAWLOW (*1921) für freie Atome und von WINELAND und DEHMELT für Ionen vorgeschlagen
2995 zusätzliche optische Laser-Kühlung von JUAN IGNACIO CIRAC (*1965) und PETER ZOLLER
- **Örtliche Fixierung** durch speziell geformte elektrische und zusätzliche magnetische Felder. U.a. MOT

Varianten

- A.** Bereits Ende der 50er Jahre schlug WOLFGANG PAUL (1913 – 1993) heutige **PAUL-Fallen** für Ionen vor
Zunächst nur für optischen und Massenspektroskopie, Ende 80er gelang es, einzelne Ionen zu speichern
2000 gelang es mit verbesserten PAUL-Fallen 10 Ionen als verschränkte QuBit in einem Quantenregister aufzureihen, einzeln anzusprechen und mit ihnen Quanten-Operationen durchzuführen
- B.** 1987 Idee der **Magneto-optische Falle** = MOT (**m**agneto **o**ptical **t**rap) von JEAN DALIBARD (*1958)
später von DAVID PRITCHARD und STEVEN CHU (*1948) besser als Paul-Fallen
6 Laserstrahlen mW-Energie, je 2 gleicher Polarisierung und Wellenlänge aber entgegen gesetzter Richtung
Die 3 verschiednen um jeweils 90° versetzt. Es entsteht Lichtgitter mit periodisch getrennten Volumen
Durch **Magnetfelder** (Spulen) werden dann Ionen in Licht-Gitterfeld des Vakuumgefäßes festgehalten
Weiterentwicklung benutzt zusätzlich einen **Halbleiter-Chip** zur Steuerung, dient zugleich als Spiegel
- C.** benutzt **Hohlraum-Quanten-Elektrodynamik** (CQED) = stehende Wellen im Hohlraum-Resonator sehr hoher Güte

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 97 von 110



Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 98 von 110

BOSE-EINSTEIN-Kondensat = BEK englisch BEC

1924 von ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955) und SATYENDRA NATH BOSE (1894 – 1974) vorhergesagt
Kann als Weiterentwicklung von Ionenfallen betrachtet werden

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

Bei Raumtemperatur verhalten sich Atome eines Gases wie kleine, harte Kugeln $\rightarrow$ Materiewelle $\lambda = h/m \cdot v$
Bei **sehr tiefer Temperatur** wird thermische Geschwindigkeit v sehr klein $\rightarrow$ **λ enorm groß**
So werden viele Bosonen auf engstem Raum zusammengedrängt $\rightarrow$ nehmen den gleichen Grundzustand an
Alle **Teilchen verlieren ihre Individualität**, sind korrekt – wie in einem **Eierkarton** – angeordnet
Es entsteht eine **einzigste, 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 einem superfluiden Zustand und zeigt daher keine Reibung (Viskosität)

Optisches Analogon ist kohärenter elektromagnetischer Wellenzug eines Lasers
= Vielzahl phasenstarr verkoppelter Photonen

Anmerkung

Bosonen (Nach BOSE benannt) besitzen keinem oder ganzzahligem Spin, kein PAULI-Verbot!
Fermionen besitzen halbzahligem Spin (Elektron, Proton und Neutron) (nach ENRICO FERMI; 1901 – 1954).

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 99 von 110

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 bis pK – 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

Dekohärenzzeiten hängen erheblich vom verwendeten Quantensystem ab,
beste Werte beim gut „abgeschirmten“ Kernspin

Für Quanten-Computer 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.

Keine Daten gefunden zu JOSEPHSON-Kontakte, BOSE-EINSTEIN-Kondensate, Licht-Polarisation

Neue Speicher H. Völz angelegt 7.10.09 aktuell 15.12.2010 Seite 100 von 110

Ein-Elektronen-Transistor

= **single electron transistor** (SET; von **transfer resistor** $\approx$ steuerbarer Widerstand)

Geschichtliche Entwicklung

1960 entstand mittels der Metall-Oxid-Silizium-Technik (MOS) der Feldeffekt-Transistor (FET)
Übergang zu immer kleineren Abmessungen, Zukunft < 50 nm
Probleme: Kurzkanal, Fotolithographie + Abwärme

1991 schlugen AVERIN und LIKHAREV als Ausweg **SET** vor, statt $\approx 10^5$ Elektronen nur 1 Elektron
Notwendig: atomaren Dimensionen, Quanten-, Tunneleffekte
 λ des bewegten Elektrons ebenfalls nm $\rightarrow$ tiefe Temperatur

1998 beschreiben STONE und AHMED im Märzheft „Microelectronics Engineering“
Speicherzelle mit 2 SET + C, arbeitet bei 10 K

Seitdem mehrere Ausführungsvarianten und Prinzipien entstanden, großtechnischen Einsatz nicht vor 2020: 10^{12} Bit/cm²

SET mit Tunnelkontakten (1)

Aufbau

2 in Reihe geschaltete Tunnelkontakten in (halb-) leitender Streifen Querschnitt ≈ 100 nm²

2 Isolatoren wenige nm

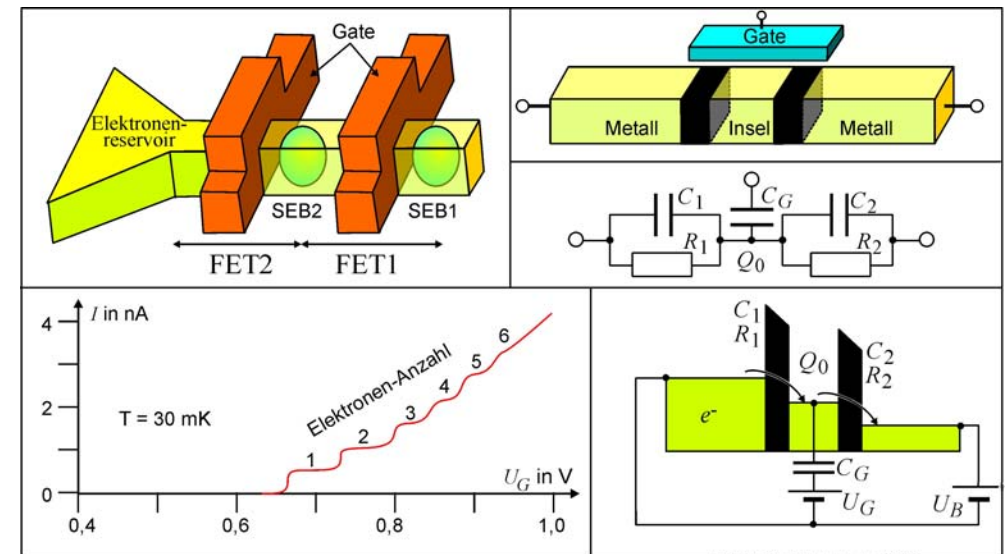
Darüber in geringem Abstand 2 isolierte Gate-Elektroden

Trotz sperrender Gate-Spannungen können Elektronen Barrieren durchtunneln

$\rightarrow$ zwischen Gates entsteht Quantenpunkt

Sind dort bereits Elektronen $\rightarrow$ elektrostatische Abstoßung für weitere Elektronen = Coulomb-Blockade

Weitere Elektronen verlangen höhere Energie $\rightarrow$ treppenförmiger Stromverlauf



SET mit Tunnelkontakten (2)

Näherungsbetrachtung

Tunnelkontakt $\approx$ Kapazität C + Tunnel-Widerstand R im T Ω -Bereich » Quanten-Widerstand $h/2e^2 = 25,8 \text{ k}\Omega$

Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$ bestimmt Verweildauer der Elektronen $\rightarrow$ SET = Reihenschaltung C_1, R_1 und C_2, R_2

Insel-Kapazität $C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_G$, auf ihr befinden sich bereits n Elektronen, **Gate-Elektrode** U_G an C_G

Zum **Tunneln** eines weiteren Elektrons auf die Insel ist **Energie**: $E_C = e^2/2C_\Sigma$ notwendig

Außerdem führt **Potentialdifferenz** Elektrode-Insel zum **Energie-Gewinn**: $E_W = e(U_B C_2 + U_G C_G)/C_\Sigma$

Bei $E_W - E_C > 0$ kann kein Elektron auf die Insel tunneln $\rightarrow$ Stromfluss ist blockiert (Coulomb-Blockade)

Erst wenn U_B **größer**, tunnelt ein Elektron, gilt bis zur nächsten Coulomb-Blockade $\rightarrow$ diskrete Strom-Änderung

Auch Steuerung mit U_G ist möglich, jedoch auch Tunneln von Gegenseite ist möglich

Störung durch thermische Energie $k \cdot T$; k Boltzmann-Konstante, T absolute Temperatur

Es muss gelten $E_C \gg k \cdot T \rightarrow$ kleine Kapazität C_Σ + tiefe Temperatur T , Für C Annahme Kugelkapazität, Radius r : $C = 4\pi\epsilon_0 r$

Ferner beachten HEISENBERG-Unschärfe

$$\partial E \approx \frac{h}{\tau} = \frac{h}{RC} \ll \Delta E \approx E_C = \frac{e^2}{2C}$$

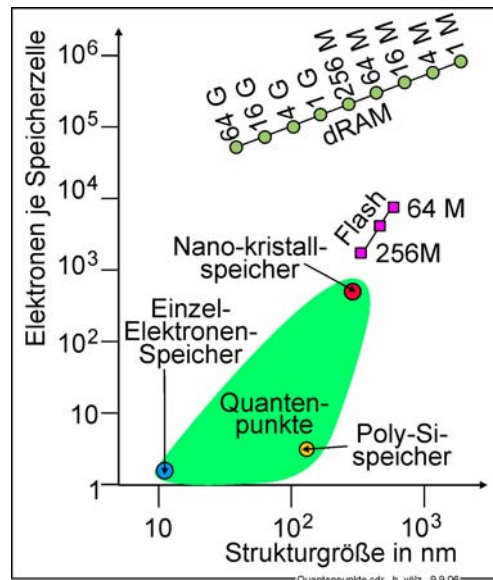
SET mit Tunnelkontakten (3)

Abschätzungen der Daten

Temperaturen für flüssiges Helium, flüssigen Stickstoff und Raumtemperatur; (1 aF = 10^{-18} F)

T	$k \cdot T$	$e^2/2 \cdot k \cdot T$	r_{max}	Bauelement	Schaltung
4,2 K	0,36 meV	220 aF	2000 nm	$C_\Sigma \leq 55 \text{ aF}$	$C_\Sigma \leq 15 \text{ aF}$
77 K	6,6 meV	12 aF	100 nm	$C_\Sigma \leq 3 \text{ aF}$	$C_\Sigma \leq 0,8 \text{ aF}$
300 K	25,2 meV	3,1 aF	3 nm	$C_\Sigma \leq 0,8 \text{ aF}$	$C_\Sigma \leq 0,2 \text{ aF}$

Bei 70 K und $\varnothing \approx 10 \text{ nm}$ erste Ergebnisse bei Metallen und Halbleitern



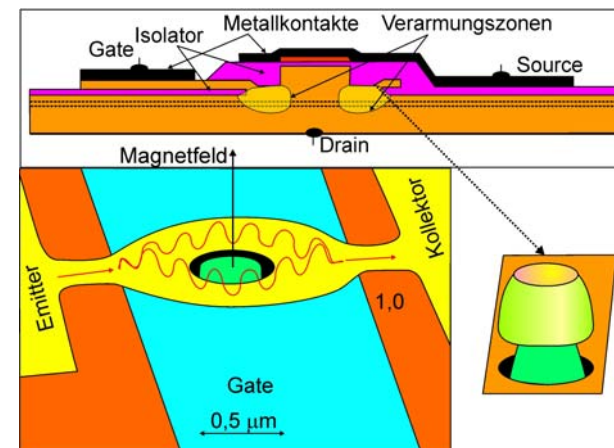
AHARONOV-BOHM-Ring

Besteht z.B. aus einer AlGaAs/GaAs-Heterostruktur, in Mitte Tunnel diode $\varnothing \approx 500 \text{ nm}$

senkrecht zum Ring wird ein Magnetfeld

Darunter ein Gate, erzeugt Verarmungszonen und steuert Geschwindigkeit = Wellenlänge der Elektronen

Wellenlänge ihres Wellenpakets muss ganzzahlig in den Querschnitt passen $\rightarrow$ wieder stufenförmiger Strom-Verlauf



Weitere SET-Versuche

Kohlenstoff-Nano-Röhren auf SiO₂-Substrat, an den Enden Au-Elektroden, Mitte isoliertes Gate
SWNT (einwandig) $\varnothing \approx 1$ nm bei 4 K quantenphysikalischen Eigenschaften, MWNT bei bei 120 mK bzw. 24 K.

1990 SUPRIYO DATTA und BISWAJIT DAS beschreiben theoretisch Nutzung des Spins, 2002 gelang Nachweis Elektronenspin verlustfrei mit seltenem **Spin-Flip auf Atomkern** übertragen
Energie hierfür ≈ 1000 mal größer als für Kernspin-Flip, aber Kernspin viel besser gegen Störungen abgeschirmt
Notwendig sehr tiefe Temperaturen und sehr starke Magnetfelder, auch Rückführung Kernspins $\rightarrow$ Elektronenspin gelang

Organische, Goldsubstrat, organische Barrierschicht, Farbstoffmoleküle als Ladungsinseln, Anregung
Rastertunnelmikroskop

Spezialkunststoff darauf Lösung mit Goldkügelchen, ordnen sich regelmäßig an, ebenfalls Rastertunnelmikroskop
Selektiv metallisierter **DNA-Strang** als Quantenpunkt, bei nahezu Zimmertemperatur

Literaturauswahl

Bruß, D. Quanteninformation. Fischer, Frankfurt 2003
Camejo, S. A.: Skurrile Quantenwelt. Fischer Taschenbuch. Frankfurt a. M. 2007
Ingold, G.-L.: Quantentheorie. 4. Aufl. C. H. Beck, München 2008
Kiefer, Cl.: Quantentheorie. Fischer Taschenbuch, Frankfurt a. M. 2002
Rae, A.: Quantenphysik: Illusion oder Realität? Reclam, Stuttgart 1996
Rubahn, H.-G.: Nanophysik und Nanotechnologie. Teubner, Stuttgart - Leipzig – Wiesbaden 2002
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. 3 Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2007. auch in
Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. CD Digitale Bibliothek, Bd. 159, Berlin 2007
Nanoelektronik: Physik Journal: 2004: 10/39, 2005: 1/12, 5/29, 2007: 7/39; 2009: 2/22
c't: 2003: 17/80; 18/54; 2004: 25/58, 2005: 11/52; 16/54, 19/44; 2009: 11/40