

# Quantencomputer

oder

## eine mögliche Zukunft in der EDV



In der Physik ist bereits alles Wesentliche erforscht, es gibt nur noch Detailarbeit für Geister zweiter Ordnung zu erledigen...

(Physiker Philipp von Jolly, der dem damaligen Abiturienten Max Planck im Jahre 1874 riet, sich einem anderen Fach zuzuwenden )

# Gliederung



- Grundsätzliches
  - Was ist ein Quantencomputer?
  - Was ist Quantenmechanik?
  - Grundsätzliches zur Notation
  - Was sind die Unterschiede zur klassischen Mechanik?
- Quantencomputer
  - Qubits
  - Register
  - Komplexität
  - RSA-Verschlüsselung
  - Der Shor-Algorithmus
  - Was Quantencomputer NICHT können
- Sonstige Anwendungen der Quantenmechanik in der Informatik
  - Quantenkryptographie
  - Quantenteleportation
- Neuronale Netze - Kurzübersicht
  - Nervenzellen
  - Vor- und Nachteile gegenüber Computern

# Was ist ein Quantencomputer?

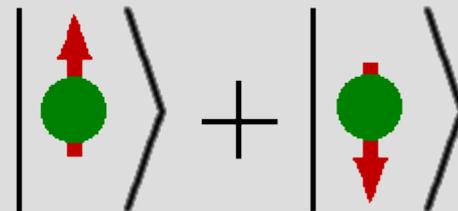
- Ein Quantencomputer ist ein Computer,
  - der die Gesetze der Quantenmechanik ausnutzt, um gewisse Rechnungen effizienter durchzuführen als konventionelle Computer, die zwar quantenmechanische Effekte in der Realisation ihrer Bauteile nutzen, für deren Rechenprozesse jedoch die klassische Physik ausreichen würde
  - dessen Recheneinheit mit quantenmechanischen Überlagerungszuständen, so genannten Qubits arbeitet

# Was ist Quantenmechanik?

- Die Quantenmechanik ist ein Teil der Quantentheorie, der Theorie über die mikrophysikalischen Erscheinungen, die das Auftreten von Quanten in diesem Bereich berücksichtigt
- Die Quantenmechanik beschreibt die Mechanik der kleinen, massebehafteten Teile (so genannte Quantenobjekte beispielsweise Atome, Photonen, Elektronen, Moleküle, Ionen, Neutrinos, ...)

# Quantenmechanik - Grundsätzliches zur Notation

- Bra-Ket-Notation von Paul Dirac
  - Eine spezielle Vektornotation
  - Koordinatenfrei und somit für allgemeine Notation tauglich
- Vektoren werden in spitze Klammern Ket aus dem Vektorraum  $V$  geschrieben  $|u\rangle$
- Jedem Ket entspricht ein Bra aus dem Dualraum  $V^*$   $\langle u|$
- Das Ergebnis der Operation eines Bras  $\langle u|$  auf ein Ket  $|\omega\rangle$  wird  $\langle u|\omega\rangle$  geschrieben, was dem Skalarprodukt entspricht



Da ich bemüht bin, in diesem Referat ohne Mathematik aus zukommen und eine komplette Erklärung den Rahmen sprengen würde, verweise ich auf:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Bra-Ket-Notation>

# Was ist der Unterschied zwischen Quantenmechanik und klassischer Mechanik? - Unschärferelation

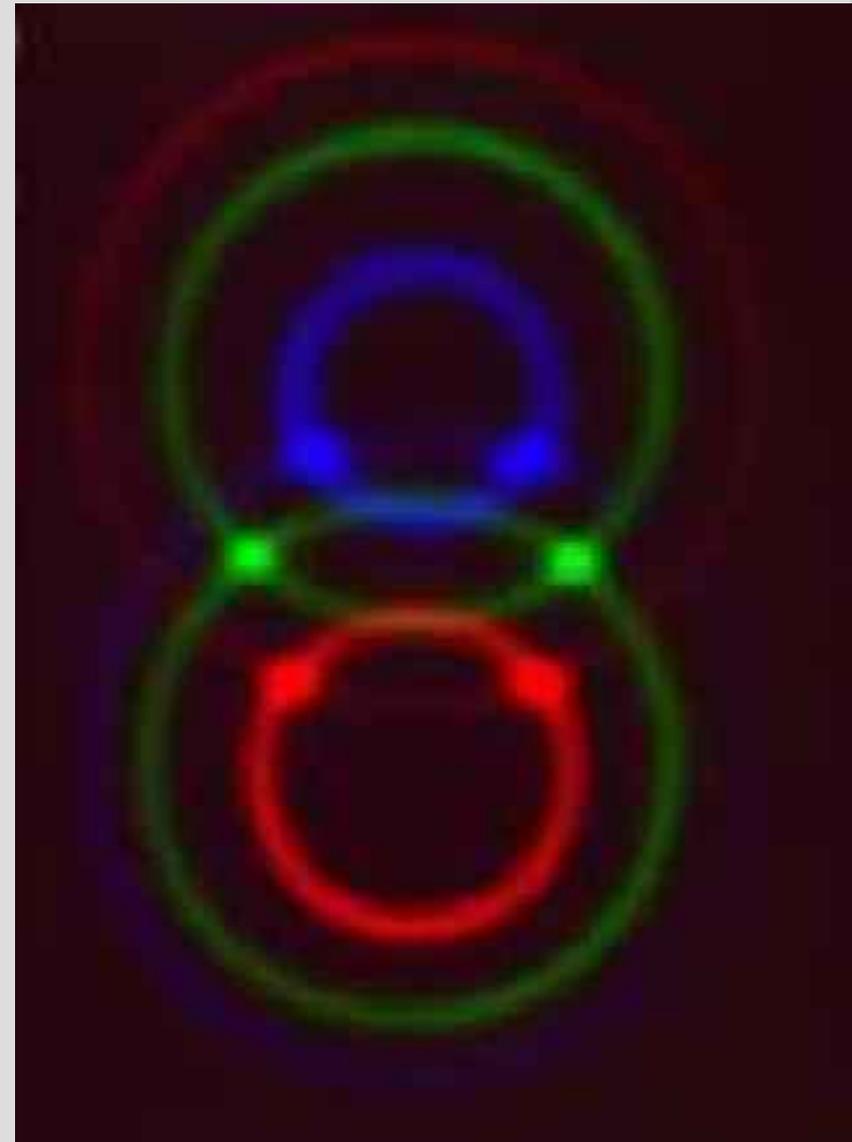
- In der klassischen Mechanik wird ein Zustand über Ort und Impuls definiert (raumzeitliche Darstellung) und bei gegebenem Anfangszustand kann der zeitliche Verlauf bestimmt werden (Kausalitätsprinzip)
- In der Quantenmechanik kann auf Grund Heisenbergs Unschärferelation nie beides gleichzeitig bekannt sein

$$\Delta x \times \Delta p \leq \hbar/2 \quad \text{wobei} \quad \hbar = h/2\pi \quad \text{und} \quad h = 6,6261 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

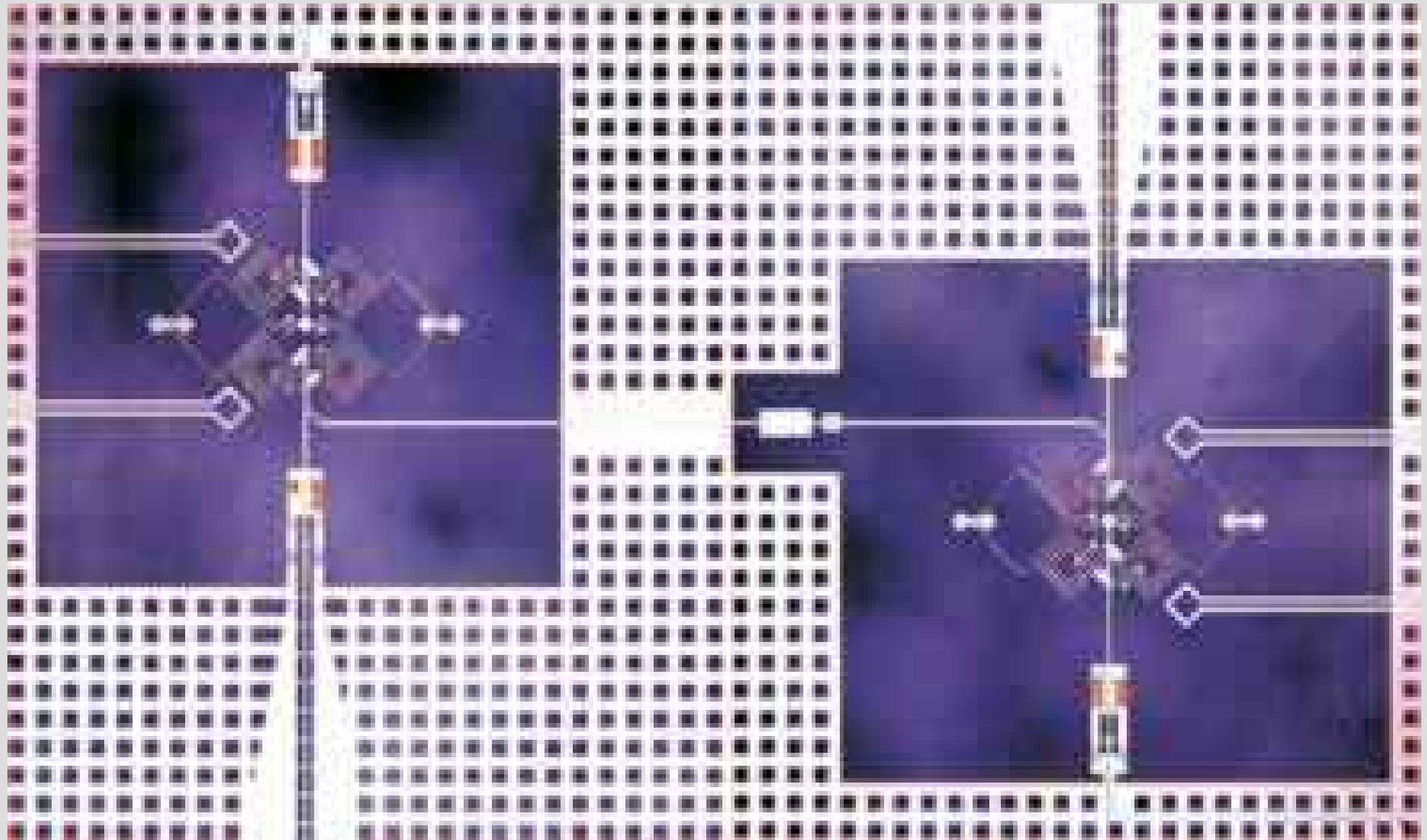
*h = Plancksches Wirkungsquantum     $\hbar$  = Diracsche Konstante*

# Was ist der Unterschied zwischen Quantenmechanik und klassischer Mechanik? - Verschränkung

- In der klassischen Mechanik besteht die Möglichkeit, Körper zu betrachten, ohne Eigenschaften von anderen Körpern kennen zu müssen
- In der Quantenmechanik gibt es die Möglichkeit der Korrelation zweier Körper nach einer Wechselwirkung, die sich beispielsweise bei Photonen in einer Verschränkung der Polarisation zeigt



# Zwei miteinander gekoppelte Quantenbits aus Josephson-Kontakten

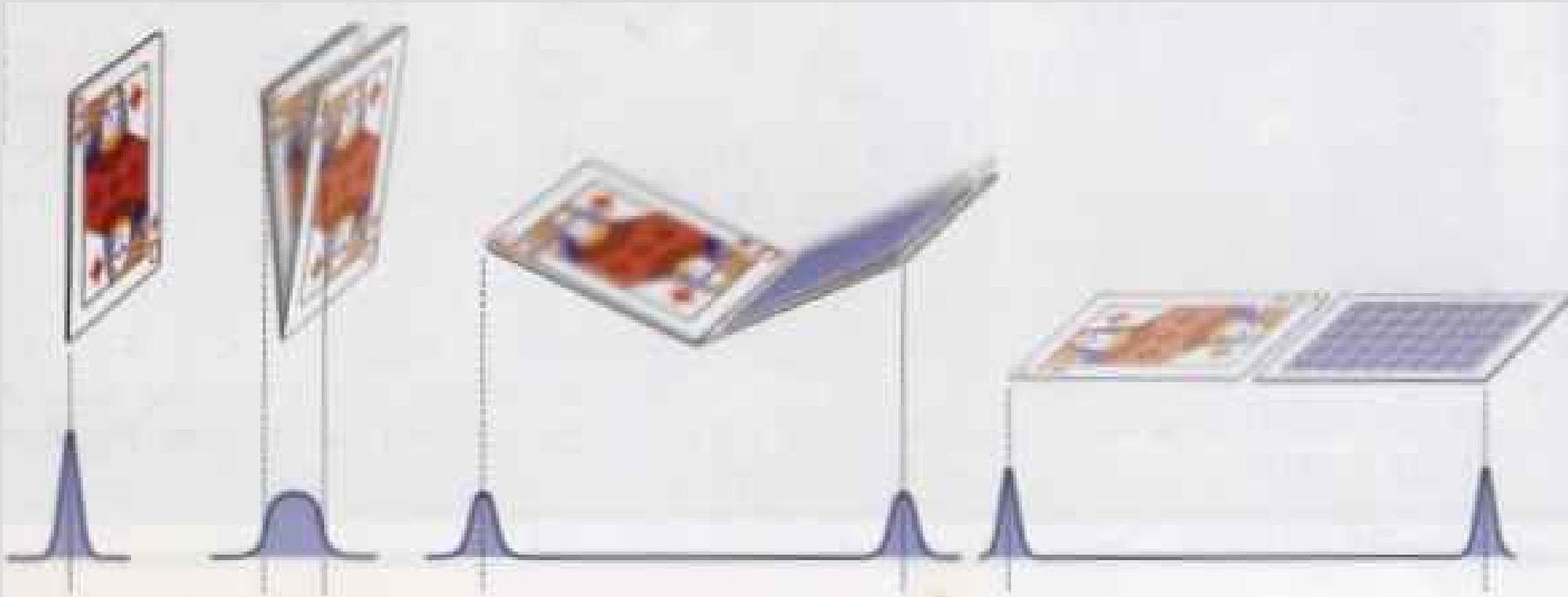


# Was ist der Unterschied zwischen Quantenmechanik und klassischer Mechanik? - Superposition

- In der Quantenmechanik besteht die Möglichkeit, dass sich ein Objekt an zwei Orten gleichzeitig befindet, bis man diesen Zustand (beispielsweise mit einer Messung) zerstört
- Als Gedankenexperiment diente „Schrödingers Katze“: Ein Apparat tötete eine Katze in dem Moment, wenn ein radioaktives Atom zerfällt – da das Atom aber eine Superposition aus zerfallen und nicht zerfallen bildet, erzeugt es eine Katze in einer Überlagerung aus tot und lebendig

# Was ist der Unterschied zwischen Quantenmechanik und klassischer Mechanik? - Superposition

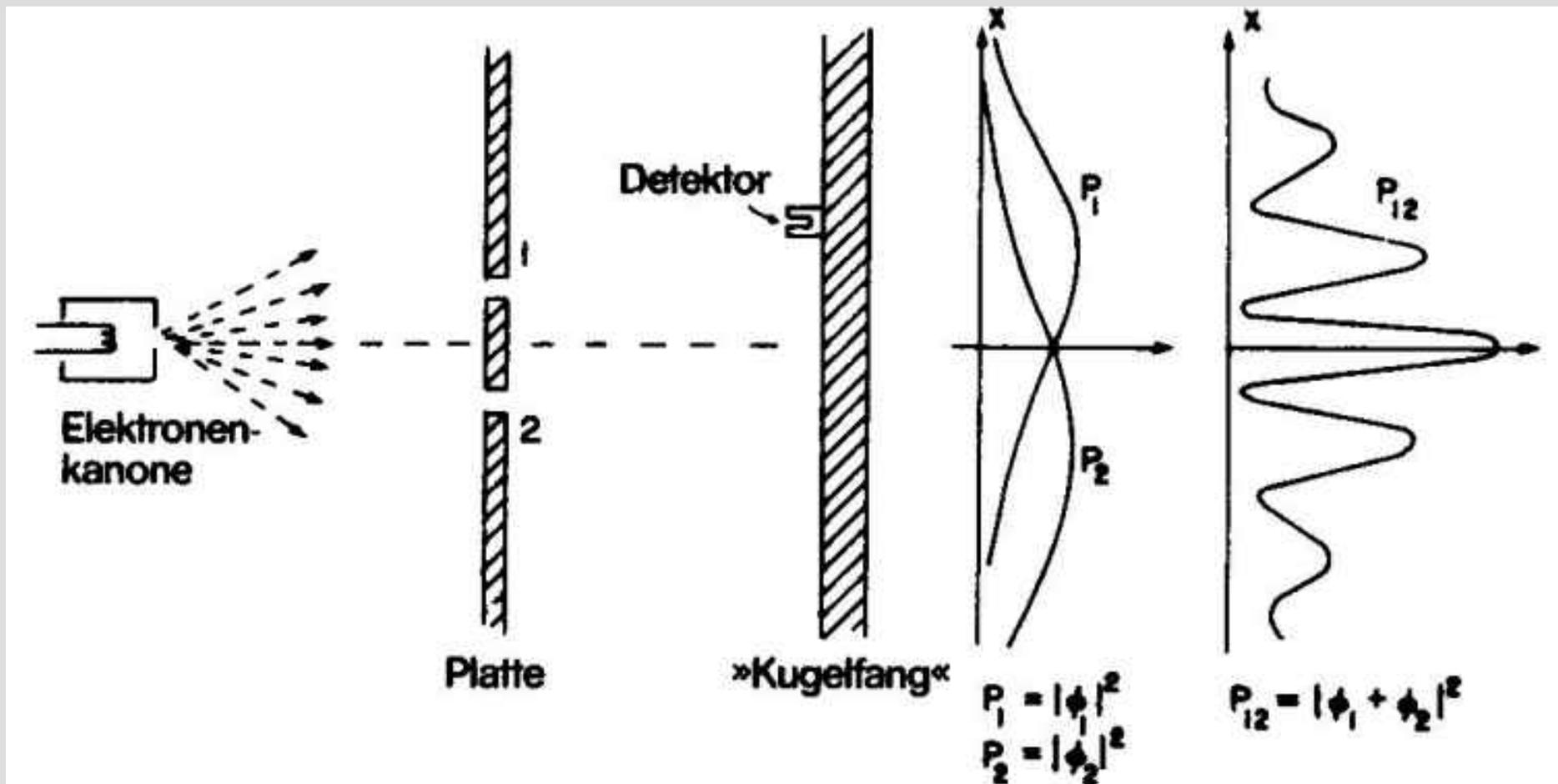
Superposition am Beispiel einer Spielkarte



Durch Messung („Nachsehen“ = Wechselwirkung mit einem Photon) wird die Spielkarte dekohärent (=klassisch) – Sie liegt auf einer Seite

# Was ist der Unterschied zwischen Quantenmechanik und klassischer Mechanik? - Interferenz

- Interferenz ist die Auslöschung und Addition zweier Wellen  
Als Veranschaulichung hierzu dient der Doppelspaltversuch:



# Quantencomputer

- Qubits

- Analog zu den Bits im herkömmlichen Computer gibt es im Quantencomputer die Qubits, die den Wert 1 oder 0 annehmen können
- Zusätzlich können diese jedoch die Superposition beider Werte annehmen – also beide Werte gleichzeitig
- Die Werte 0 und 1 können beispielsweise durch den Spin eines Atoms repräsentiert werden

$$+ \frac{1}{2} (\rightarrow 0), \quad - \frac{1}{2} (\rightarrow 1) \quad \text{oder} \quad \pm \frac{1}{2} (\rightarrow \textit{Superposition aus 0 und 1})$$

Durch Messung erhält man aus der Superposition wieder einen klassischen Zustand ( $+\frac{1}{2}$  oder  $-\frac{1}{2}$ ) – wobei die Wahrscheinlichkeit beeinflussbar ist

Da in der Superposition jeder Zustand aus den Basiseinstellungen möglich ist kommt man auf die allgemeine Form für ein Quantenbit:

$$a_0 \times |0\rangle + a_1 \times |1\rangle$$

# Quantencomputer

- Qubits können auf verschiedene Weise realisiert werden:
  - Spin
    - $+\frac{1}{2} \hbar$
    - $-\frac{1}{2} \hbar$
  - Lineare Polarisation
    - vertikal
    - horizontal
  - Zirkulare Polarisation
    - Links drehend
    - Rechts drehend
  - Interne Zustände/Energieniveaus eines Atoms/Ions
    - Elektronenbahnen / angeregte Elektronen
  - Beide Moden vor und nach dem Strahlteiler für jede Art von Strahlung

# Quantencomputer



- Ionenfallen
  - In denen wenige Atome im elektromagnetischen Wechselfeld gefangen sind, und deren Anregungszustände als Qubits dienen
- Kernspinresonanz
  - Qubits sind hier die Spins der Kerne verschiedener Atome in einem Molekül, die in einem Magnetfeld mit Mikrowellenimpulsen manipuliert werden – Allerdings ist hier die Anzahl der Qubits stark begrenzt
- Elektromagnetische Hohlraumstrahlung
  - Qubits sind hier die Besetzungszustände der Eigenschwingung eines Feldes in einem Hohlraum
- Optische Gitter
  - Sehr neue Möglichkeit, die möglicherweise zu einem Umdenken in der Quantencomputertechnik führt, bei der durch verstimmte Laser einzelne Atome zur Wechselwirkung gebracht werden
- Quantenpunkte
  - Dies ist die Möglichkeit mit den meisten Chancen auf Realisierbarkeit – es werden einzelne Elektronen gespeichert und manipuliert
- Atomchips
  - Hier werden einzelne Atome über der Festkörperfläche des Chips in magnetischen und elektrischen Feldern gehalten und manipuliert

# Quantencomputer

Als Beispiel für die **Verschränkung von Qubits** nehmen wir folgenden Fall an:

Wir haben ein Paar von Qubits und immer, wenn das erste den Zustand „1“ hat, hat das zweite „0“ und umgekehrt

Betrachtet man nun nur eines der Qubits, so wird man am anderen mit Wahrscheinlichkeit den Wert „0“ oder „1“ vorfinden

Dies gilt **nicht nur** für die Basiszustände („0“ oder „1“), sondern auch für alle Überlagerungen der Basiszustände

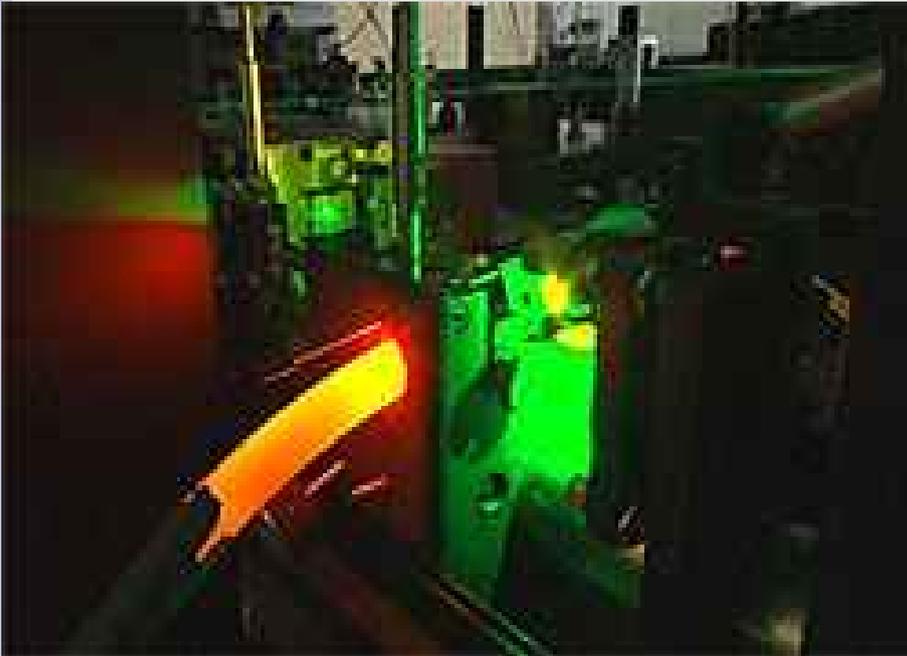
Die wesentlichen Eigenschaften verschränkter Paare von Qubits sind:

- 1: **perfekte Korrelation zwischen den Messresultaten** der Teilchen eines Paares, obwohl die Einzelmessungen vollständig unbestimmt sind
- 2: **unterschiedliche Statistik** bei Messungen an verschränkten und unverschränkten Paaren
- 3: die Möglichkeit, die vier Basiszustände (Bell-Zustände) durch Manipulation **nur eines** der beiden Teilchens ineinander zu überführen

# Quantencomputer

- Register
  - So wie die einzelnen Qubits kann sich auch ein Register in Superposition befinden
  - Bei einer Messung würde dann ein Endergebnis entsprechend der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Qubits in ein klassisches Ergebnis zerfallen
  - Die Register speichern nicht nur die digitalen Zustände, sondern Quantensysteme bzw Freiheitsgrade eines Quantensystems
  - Der Zustand eines Registers wird hochgradig verschränkt sein

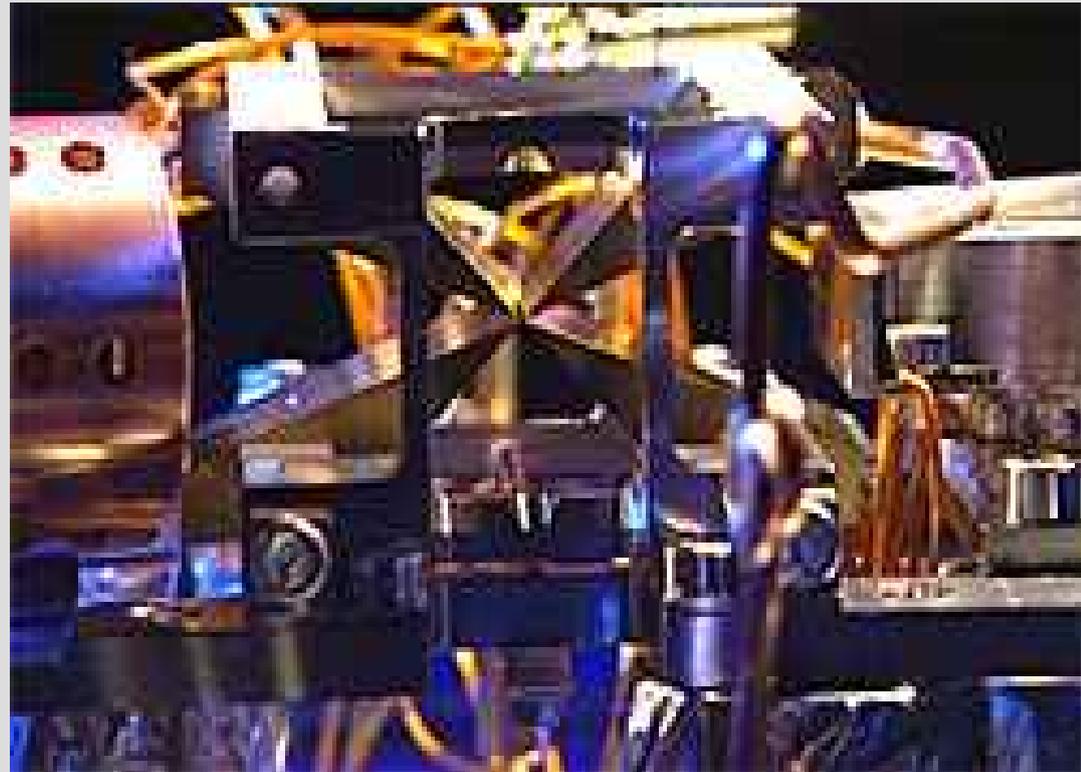
# Quantencomputer



Zur Kühlung und Isolierung von  
Atomen und Molekülen werden  
Laser verwendet

Mehr Info [www.uni-bayreuth.de](http://www.uni-bayreuth.de)

Quantenphysikalische Versuchsanordnung



# Exkurs: Komplexität

Die **Komplexität** einer Aufgabe ist im Grunde die Anzahl von Schritten, die benötigt werden oder die Zeit um diese Aufgabe zu lösen.

Hier sind als Beispiele für **polynomiale** Komplexität die Multiplikation, Division, der größte gemeinsame Teiler (ggT), die Exponentialfunktion (exp), die Sinusfunktion (sin), usw.

Zu den **exponentiell** wachsenden Funktionen gehört beispielsweise das Faktorisieren von Zahlen

# Exkurs: RSA-Verschlüsselung

Die Standardverschlüsselung in Public-Key-Systemen ist der RSA-Algorithmus, der genau auf der Schwierigkeit des Faktorisierens basiert.

Zur **Verschlüsselung** braucht man nur die **Zahl N** – zur **Entschlüsselung** aber auch die **Faktor-Zerlegung** (-> sogenannte asynchrone Verschlüsselung)

Somit kann ich N als Schlüssel für an mich gerichtete Daten veröffentlichen, und bin sicher, dass niemand meine Nachrichten lesen kann – solange niemandem die Lösung der Faktorisierungsaufgabe gelingt

Hierbei werden in der Regel Zahlen von 128 oder 168bit Länge benutzt, was etwa 50-stelligen Dezimalzahlen entspricht

Gelingt ein Fortschritt in der Rechnertechnik, so genügt eine Verlängerung des Schlüssels, um die Faktorisierung exponentiell zu verlängern (Wer will schon 10 Jahre auf das Ergebnis warten?)

# Der Shor-Algorithmus

Mitte der Neunziger veröffentlichte Peter W. Shors einen Faktorisierungsalgorithmus in polynomialer Zeit – der einzige Schönheitsfehler:

**Er benötigt einen Quantencomputer**

# Der Shor-Algorithmus

Begriffserklärung: Die Periode einer Funktion ist der Teil einer Funktion, bis sich die Funktionswerte wiederholen. Dies kann also nur bei periodischen Funktionen der Fall sein (sin, cos, tan, usw.)

Vereinbarung: Im folgenden sei  $N$  die zu Faktorisierte Zahl und  $a$  eine beliebig gewählte, einigermaßen große und zu  $N$  teilerfremde, natürliche Zahl.

Der Shor-Algorithmus verwendet zum Faktorisieren einen Umweg über die Periode der Funktion:  $x \rightarrow a^x \bmod N$

Ausgegangen wird von folgender Formel:  $a^{2m} - 1 = (a^m - 1)(a^m + 1)$

Es wird nach Lösungen für  $m$ , bei der sich auf der linken und somit auch auf der rechten Seite eine durch  $N$  teilbare Zahl ergibt. Rechts steht dann das Produkt zweier Zahlen  $N_{\pm} = (a^m \pm 1)$ , das durch  $N$  teilbar ist.

Das gleiche gilt, wenn man  $N_{\pm}$  durch die Reste bei Division durch  $N$  ersetzt. Mindestens eine dieser Zahlen muss einen echten Teiler mit  $N$  gemeinsam haben, der sich durch den euklidischen Algorithmus bestimmen lässt.

# Der Shor-Algorithmus

Es bleibt zu klären, wie man ein  $m$  findet, so dass  $a^{2m}$  bei Division durch  $N$  den Rest 1 lässt. Dazu wird sukzessiv die Potenz  $a^n$  bis auf Vielfache von  $N$  berechnet, bis sich ein Wert wiederholt.

Wenn gilt  $a^n \equiv 1 \pmod{N}$  (also beide Seiten den gleichen Rest bei Division durch  $N$  lassen) ist

entweder  $a^n \equiv 0 \pmod{N}$  (was auf eine falsche Wahl von  $a$  hinweist)

oder  $a^n \equiv 1 \pmod{N}$

Da es aber höchstens  $N$  verschiedene Reste bei Division durch  $N$  gibt, MUSS sich die Folge  $a^n \pmod{N}$  irgendwann wiederholen, was die Lösbarkeit der Gleichung garantiert.

Wenn  $p$  jetzt gerade ist, so setzt man  $m = \frac{p}{2}$  und nach der Gleichung  $a^{2m} - 1 = (a^m - 1)(a^m + 1)$  haben wir ein Produkt zweier ganzer Zahlen, das alle Teiler von  $N$  enthält.

Im Fall, dass keiner der beiden Faktoren durch  $N$  teilbar ist und der andere den Rest  $\mp 1$  lässt, kann mit dem euklidischen Algorithmus ein Faktor von  $N$  und dem ersten Faktor der Gleichung  $(a^m - 1)$  bestimmt werden, also ein echter Faktor von  $N$

# Shor-Algorithmus

Ein Beispiel:

Es sei  $N=21$  und  $a=2$

Da  $2^6 = 64 = 3 \times 21 + 1$  finden wir die Periode  $p = 6$

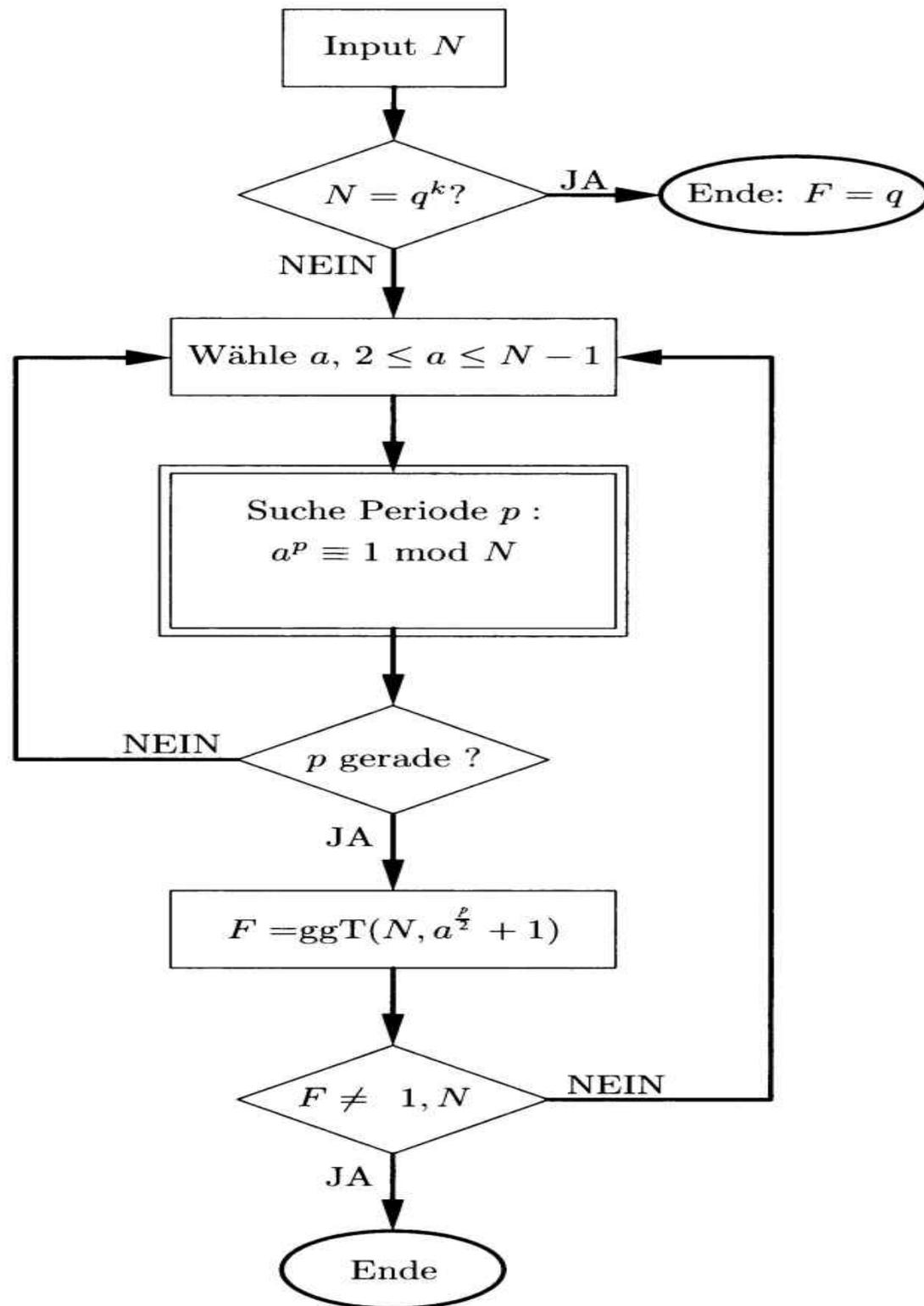
Also ist  $m = 3$  und damit  $N_- = 2^3 - 1 = 7$  und  $N_+ = 9$

Beide haben einen nicht-trivialen Faktor mit  $N$  gemeinsam

Gegenbeispiele:

Für  $a=4$  ergibt sich  $4^3 \cdot 64 \equiv 1 \pmod{21}$ , was zur Periode  $p=3$  führt

Für  $a=5$  ergibt sich  $N_- = 124 \equiv 1 \pmod{N}$  und  $N_+ = 126$ , was durch  $N$  teilbar ist



# Der Shor-Algorithmus

1. Anfangszustand:

$$\Phi_1 = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \times \sum_{x=0}^{2^{L-1}} |x\rangle$$

2. Berechnung:

$$\Phi_2 = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \times \sum_{x=0}^{2^{L-1}} |x, f(x)\rangle$$

3. Danach folgt die Quantenfouriertransformation, die Maxima bei der Grundfrequenz und ihren Vielfachen ergibt

4. Die Fouriertransformation erzeugt starke konstruktive Interferenz bei der Periodenfrequenz von  $f(x)$  und ihren Vielfachen, was einer Wahrscheinlichkeit entspricht, diesen Wert aus dem Register auszulesen

5. Verifikation: Mit der in 4. festgestellten, vermuteten Periode rechnet man den Rest von  $a^p$  bei Division durch  $N$ . Ergibt die Berechnung 1, war die Periodensuche erfolgreich und es wird im klassischen Teil fortgefahren

Mehr Infos: <http://de.wikipedia.org/wiki/Shor-Algorithmus>

# Der Shor-Algorithmus

IBM baute im Jahre 2001 einen Quantenrechner mit 7 Qubit und faktorierte die Zahl 15



Somit wurde bewiesen, dass der Shore-Algorithmus zur Primfaktorzerlegung funktioniert

Mehr Infos: <http://www.quanten.de/quantencomputer.html>

# Was Quantencomputer NICHT können

Die Quantenmechanik ist durch klassische mathematische Strukturen (wie Matrizen, partielle Differentialgleichungen, usw.) definiert -> ein klassisch unlösbares Problem wird auch von einem Quantencomputer nicht lösbar sein

## **Fazit:**

Alles, was auf einem klassischen Computer unlösbar ist – ist auch auf einem Quantencomputer unlösbar

# Quantenkryptographie

Zukünftige Verschlüsselungsverfahren bieten bei Geheimhaltung des Schlüssels sehr hohen Schutz, so auch die One-time-pad-Verschlüsselung, bei der jedes Zeichen im Text durch ein eigenes, zufälliges Schlüsselzeichen kodiert wird.

Die Quantenkryptographie stellt eine sichere Verbindung her, die den Austausch von Schlüsseln ermöglicht und mögliche „Lauscher“ entlarvt. Hierbei wird ein Quantenobjekt übermittelt, das bei einer Beobachtung unweigerlich verändert würde und den Abhörer enttarnt.

Dazu sendet „A“ beispielsweise polarisierte Photonen zu „B“, wobei die Polarisierung zufällig aus den vier Zuständen (H, V, +45°, -45°) gewählt wird.

„B“ stellt ebenso einen zufälligen Wert ein und teilt „A“ mit, wann und mit welcher Einstellung er ein Photon detektierte. Nun kann „A“ aus einer Liste die Zeit entnehmen, in der beide die gleiche Basiseinstellung hatten.

Da ein von „A“ horizontal polarisiertes Photon NUR im H-Ausgang detektiert werden kann, besteht eine eindeutige Beziehung zwischen dem von „A“ eingestellten und „B“ detektierten Wert.

Somit kann diese Bitfolge als Schlüssel verwendet werden  
(nach Vergleich einiger Bits -> Abhörsicherung)

# Quantenteleportation

Die Quantenteleportation ist im Gegensatz zu der „klassischen Teleportation“ (->Enterprise) nicht das Übertragen von Materie, sondern es wird mit Hilfe einer EPR-Quelle (Eine Quelle verschränkter Teilchen) der Zustand des zu Verschickenden Objekts mit dem verschränkten Teilchen (ebenfalls aus der EPR-Quelle) verglichen und ein Substrat mit den Eigenschaften versehen.

Somit wird sichergestellt, dass das Objekt bei „B“ die gleichen Eigenschaften hat wie bei „A“, wobei das Objekt bei „A“ seine Eigenschaften verliert und bei „B“ ein Objekt diese Eigenschaften übernimmt.

Es wird bei „A“ als Vergleichswert mit „B“ nicht der Quantenzustand gemessen, sondern Information über den Zustand der Korrelation des Objekts mit dem Teilchen aus der EPR-Quelle und somit resultiert auch keine Verletzung der Unschärferelation!

Maximalgeschwindigkeit hierbei ist die Lichtgeschwindigkeit, da der Informationsaustausch auf klassischem Wege zustande kommt

# Quantenteleportation

## Vorbereitung einer Quanten-Teleportation ...



In diesem rein fiktiven Szenario wird das Teleportieren an einem lebenden Menschen durchgespielt. Er betritt eine Analyse-Kammer (links) neben einer gleichartigen Kammer, die



mit einer gleich großen Masse von Hilfsmaterial gefüllt ist (grün). Es ist zuvor mit seinem Gegenstück verschränkt worden, das sich in der weit entfernten Empfangsstation befindet (rechts).

# Quantenteleportation

... eine Quantenmessung ...



Eine Messung, die gleichzeitig am Hilfsmaterial und an dem Menschen ausgeführt wird, erzeugt einen zufälligen Quantenzustand und eine riesige Menge zufälliger – aber signifikanter –

Daten: zwei Bits pro elementarem Zustand (links). Durch „spukhafte Fernwirkung“ verändert die Messung zudem augenblicklich den Quantenzustand des Gegenstücks (rechts).

# Quantenteleportation

... Übertragung der Zufallsdaten ...



Die Messdaten müssen auf herkömmlichem Weg zur entfernten Empfangsstation gesendet werden. Da dies auf Grund der Gesetze der Einsteinschen Relativitätstheorie

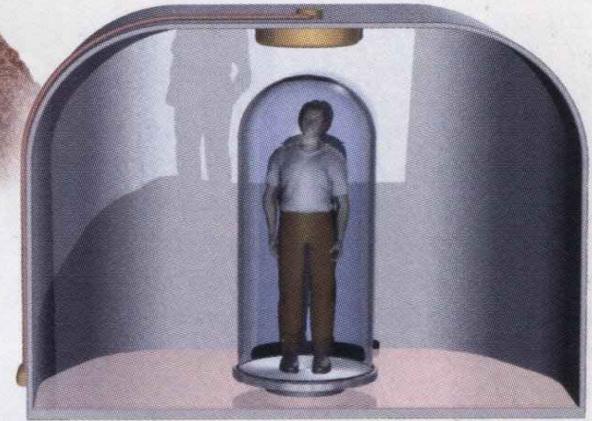
höchstens mit Lichtgeschwindigkeit geschehen kann, ist es prinzipiell unmöglich, eine Teleportation mit Überlichtgeschwindigkeit durchzuführen.

# Quantenteleportation

## ... Rekonstruktion des Reisenden

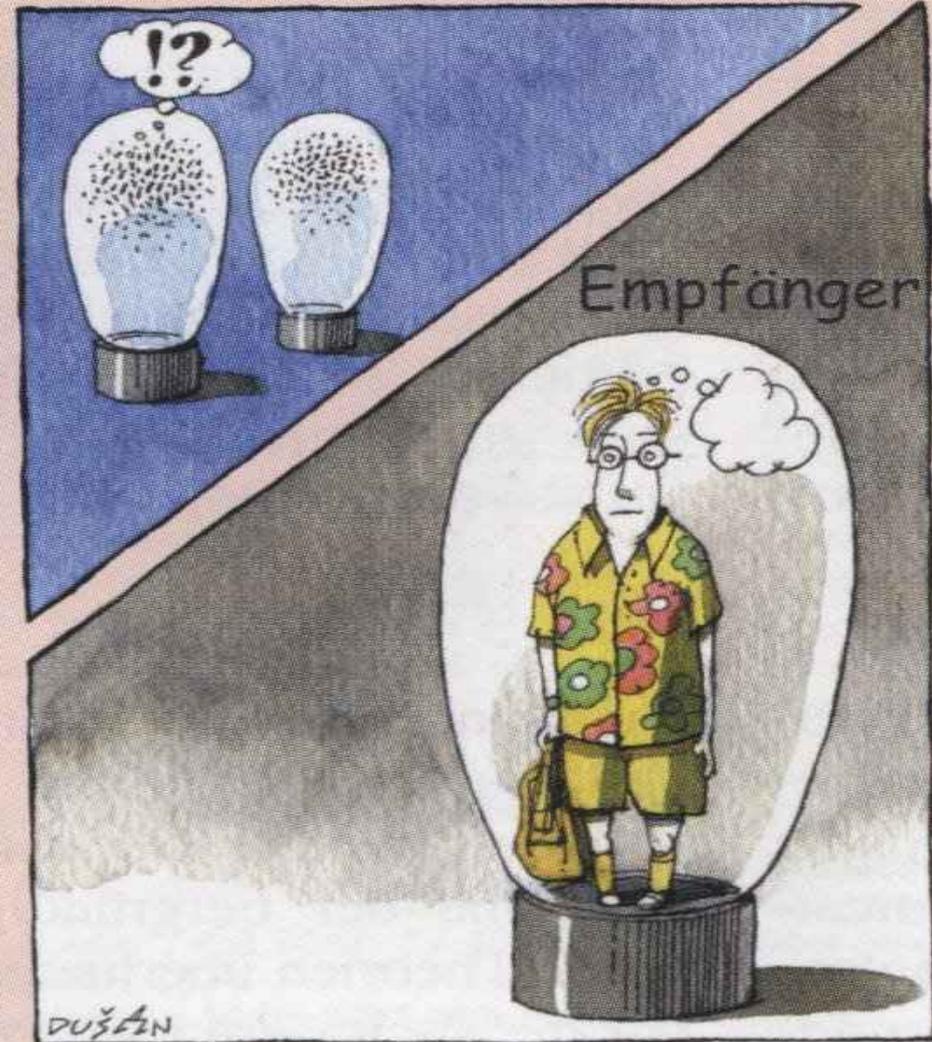


Die Empfangsstation erschafft den Reisenden neu – bis zum Quantenzustand jedes einzelnen Teilchens exakt –, indem die Zustände des Gegenstücks gemäß den zufälligen Messdaten,



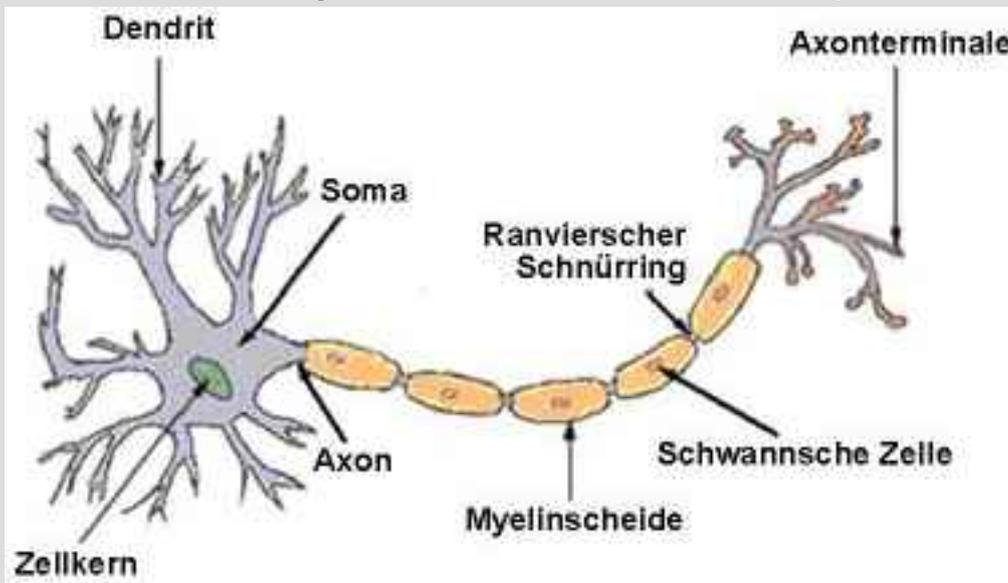
welche die Analyse-Station gesendet hat, angepasst werden. Dieses Kopieren ist kein Klonieren: Im Sender bleibt keine Version des Reisenden zurück.

# Quantenteleportation



# Nervenzellen

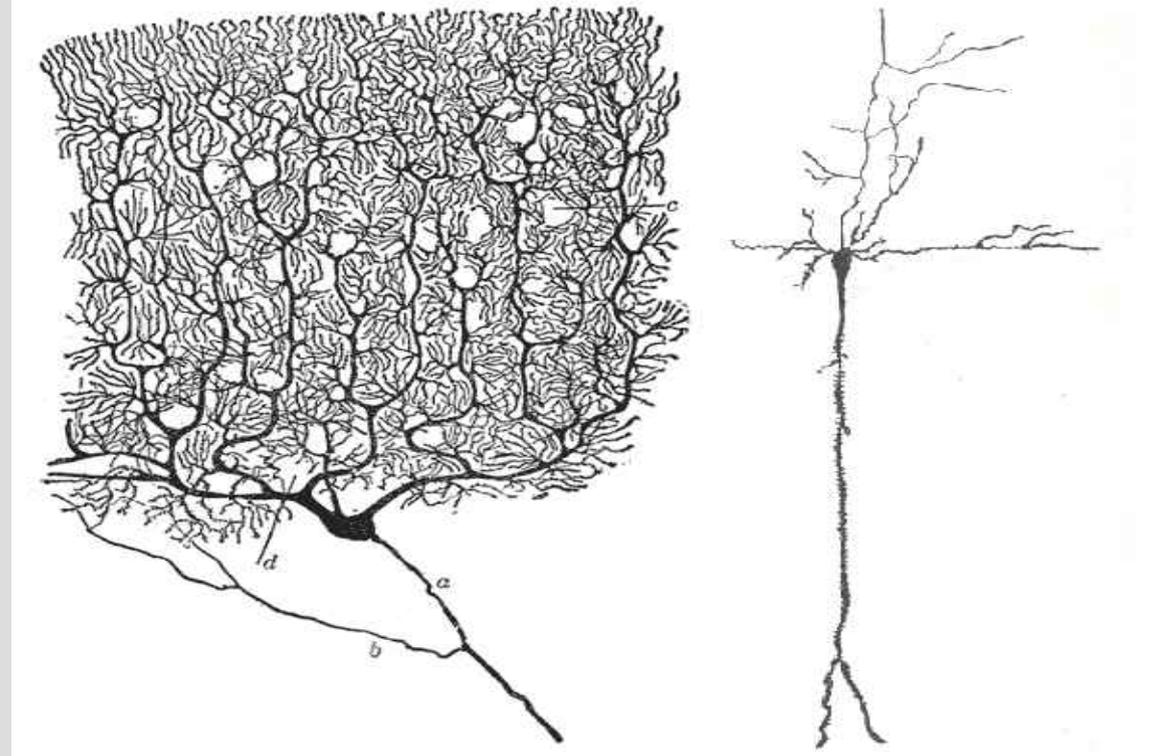
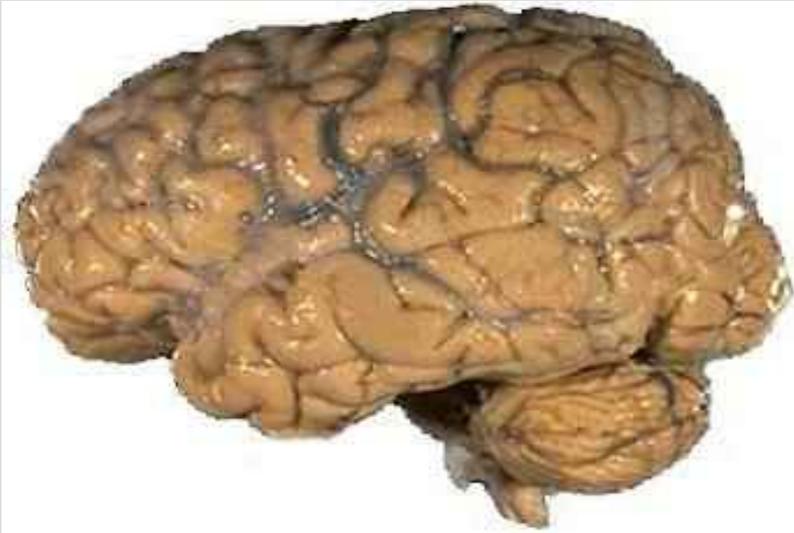
- Aufbau des Neurons:
  - Zellkern
  - Mehrere Eingänge (Dentriten)
  - Ein Ausgang (Axon)
- Funktionsweise des Neurons:
  - Überschreitet die Summe der elektrischen Potentiale aus allen Eingängen einen Schwellwert beginnt das Neuron zu feuern: Ein Ausgangspotential wird entlang des Axons weitergeleitet
  - Schwellwert kann über Inhibitor-Leitung beeinflusst werden
- Neuronales Netz
  - Fähigkeit, Informationen zu speichern und zu verarbeiten



- Menschliches Gehirn
  - 100Mrd. Neuronen ( $10^{11}$ )
  - 100Bil. Synapsen ( $10^{14}$ )
    - ->  $\emptyset$  4 Neuronen in Reihe
  - Retinotop
    - Betrachtete Muster werden als gleiches Muster im Gehirn abgebildet
  - ca 200MB Speicher (Backup!)

# Neuronale Netze

- Anwendungsgebiete
  - Informationsgewinnung aus verrauschten oder schlechten Daten
  - lernende Algorithmen
    - Überwachtes lernen
    - Unüberwachtes lernen
  - Assoziativspeicher



# Neuronale Netze

Während Computer Berechnungen viel schneller ausführen als neuronale Netze, benötigen diese für assoziative Aufgaben viel weniger Zeit – weiterhin ist die Erkennungsleistung viel höher

Weiterhin könne neuronale Netze Aufgaben noch zufriedenstellend erledigen wenn die Eingabe fehlerhaft ist

Information wird verarbeitet, indem sich die Neuronen mit Hilfe von gerichteten Verbindungen untereinander aktivieren

Weitere Vorteile sind Lernfähigkeit, Parallelität bei der Verarbeitung, hohe Fehlertoleranz und verteilte Wissensrepräsentation

Durch die wiederholte Eingabe von Mustern wird die Stärke der Verbindungen zwischen den Neuronen verändert

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## QUELLENANGABEN:

Zeitschrift: „Spektrum der Wissenschaft“ – Dossier 1/2003: Vom Quant zum Kosmos  
Buch: „Verschränkte Welt – Faszination der Quanten“ - Autor: Jürgen Audretsch – Verlag: Wiley-VCH ISBN 3-527-40318-3  
Buch: „Sechs physikalische Fingerübungen“ - Autor: Richard P. Feynman – Verlag: Piper ISBN 3-492-23902-1  
<http://www.wikipedia.org> -> Verschränkung, Superposition, Bra-Ket, Shor-Algorithmus, ...  
<http://wwwmath.uni-muenster.de/SoftComputing/lehre/material/wwwnscript/startseite.html>  
<http://www.br-online.de/wissen-bildung/thema/forschung/quanten-computer.xml>  
...und alle bisher angegebenen Webseiten

## BILDNACHWEIS:

Spins inside Quantum Pro Processor: <http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/~jung/intel1.jpg>  
Quanten: <http://www.josef-graef.de/zukunft/quanten.gif>  
Falle: <http://archives.arte-tv.com/hebdo/archimed/20000516/image/5.jpg>  
verschränkt: <http://www.kantara.de/bluenote/images/TN/1503231205small-twoConeSPDC.jpg>  
Superposition am Beispiel einer Spielkarte: Aus „Spektrum der Wissenschaft – Dossier 1/2003: Vom Quant zum Kosmos“ - Seite 8 links unten  
Gekoppelte Quantenbits aus: [http://www.physics.ucsb.edu/~msteffen/press/coupled/prophysik\\_files/Qubit\\_Josephson\\_350.jpg](http://www.physics.ucsb.edu/~msteffen/press/coupled/prophysik_files/Qubit_Josephson_350.jpg)  
Interferenz am Beispiel von Elektronen: Aus „Sechs physikalische Fingerübungen“ - Abbildung 6.3 – Seite 185 oben  
Der Shore-Algorithmus: Aus „Verschränkte Welt – Faszination der Quanten“ - Abbildung 7.9 – Seite 160 links oben  
 $3*5=15$ : <http://www.physik.tu-dresden.de/~baecker/qcomp.gif>  
quant-index-versuch: <http://www.br-online.de/wissen-bildung/thema/forschung/foto/quant-index-versuch.jpg>  
laser-experiment: <http://www.br-online.de/wissen-bildung/thema/forschung/foto/quant-laser-experiment.jpg>  
Quantenteleportation: Aus „Spektrum der Wissenschaft – Dossier 1/2003: Vom Quant zum Kosmos“ - Seite 24-27 unten  
Würde der Geist zurückbleiben?: Aus „Spektrum der Wissenschaft – Dossier 1/2003: Vom Quant zum Kosmos“ - Seite 29 unten rechts  
Neuron: Aus Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Nervenzelle>  
Gehirn: Aus Wikipedia: [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Human\\_brain\\_NIH.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Human_brain_NIH.jpg)  
2 Neuronen: Aus Wikipedia: [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Zwei\\_Verschiedene\\_Neurone.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Zwei_Verschiedene_Neurone.png)

## Bei Fragen, Wünschen, Anregungen, Drohungen:

[hustinettenbaer@polizisten-duzer.de](mailto:hustinettenbaer@polizisten-duzer.de)

PS: Wer Rechtschreibfehler findet, darf sie behalten!