Die ziemlich *verrückte* Welt der Quantencomputer

Ein Einblick

Bernd Däne

TU Ilmenau, Fakultät I/A

Tel.: 03677-69-1433
Bernd.Daene@TU-Ilmenau.de

Gliederung

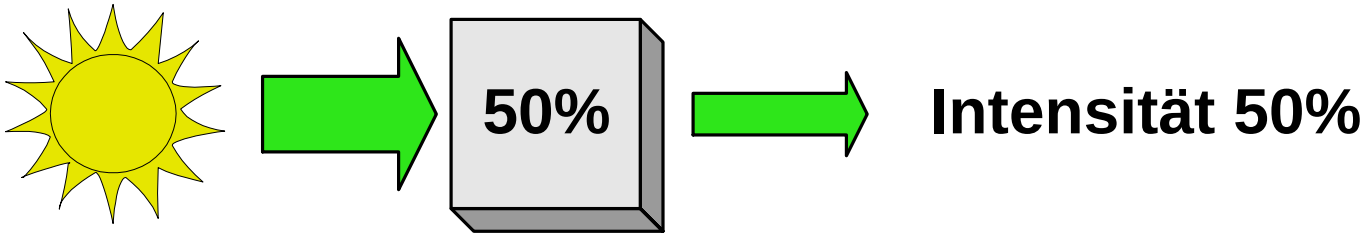
1. Quanteneffekte sind überall
2. Quantenbits und weiteres
3. Quantenalgorithmen
4. Realisierungen
5. Kryptographie mit Quanten
6. Ein Fazit
7. Literatur und Links

1. Quanteneffekte sind überall

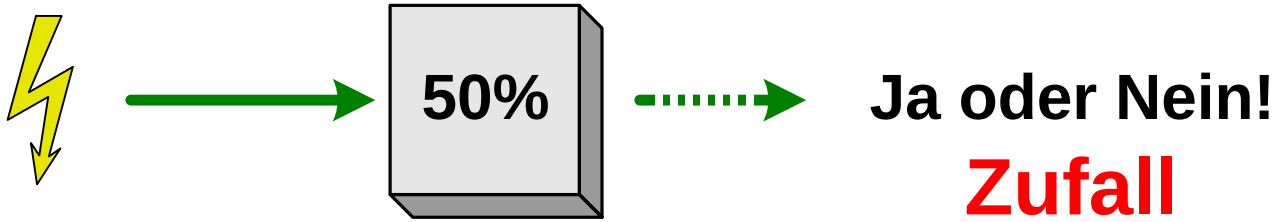
- Photonen
  - Energie
  - Polarisation
- Elektronen
  - Ladung
  - Energieniveau (in der Atomhülle)
- Spins von Teilchen
- Quanten-Hall-Effekt
- Radioaktiver Zerfall
- .....

Zum Beispiel: Licht

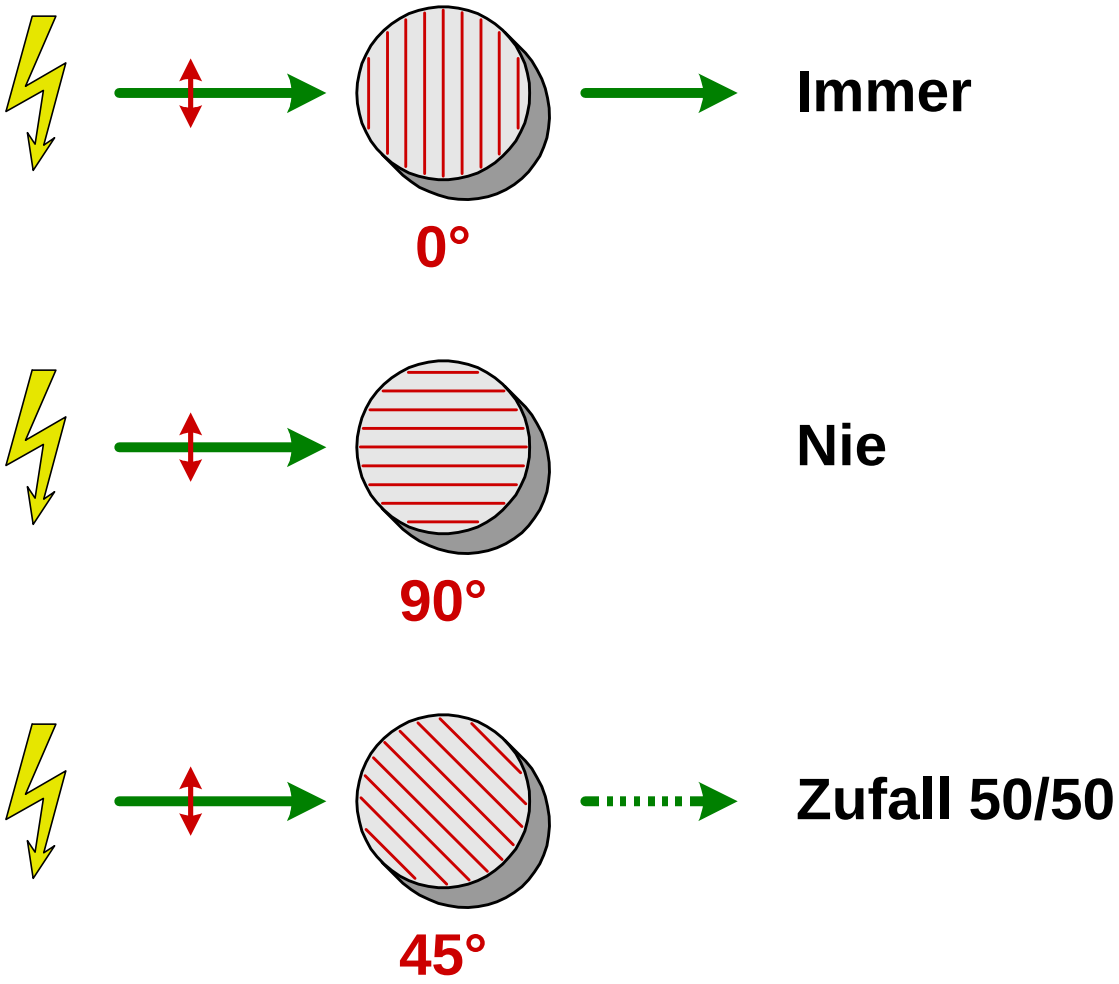
Viele Photonen:



Ein Photon:



Dasselbe mit Polarisation



Eigenschaften der Quanten

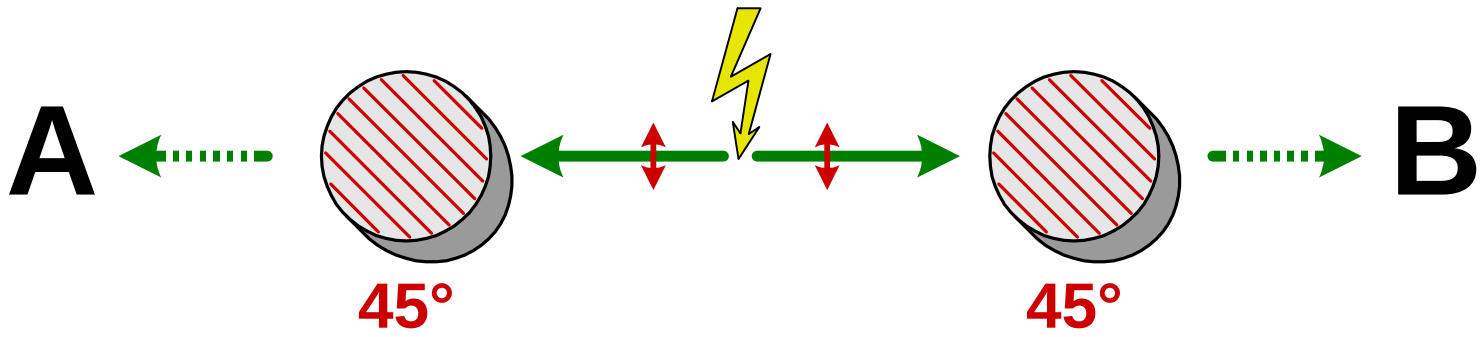
- Unteilbar
- Diskrete Zustände
- Stochastisch
- Mikroskopisch
- *Intuitiv schwer erfassbar*

- **Das Wichtigste kommt noch!**

Nochmal die Photonen

Beispiel: EPR-Photonen

(nach Albert **E**instein, Boris **P**odolsky und Nathan **R**osen, 1935)



A	B	Klassisch	Quantentheorie	Experiment
0	0	25 %	50 %	~ 50 %
0	1	25 %	0 %	~ 0 %
1	0	25 %	0 %	~ 0 %
1	1	25 %	50 %	~ 50 %

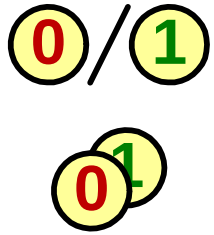
Zwei weitere Eigenschaften

- **Verschränkung:**
  - Gegenseitige Abhängigkeit von Quantenereignissen
  - Stochastischer Charakter

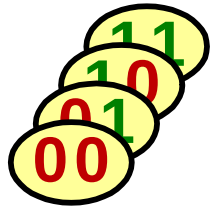
- **Superposition:**
  - Unbestimmter (unscharfer) Zustand
  - Enthält alle möglichen Zustände
  - Wird durch jede Interaktion (‚Messung‘) zerstört!

2. Quantenbits und weiteres

- **1 qubit:**
  - Quantenereignis mit zwei Zuständen
  - Superposition: beide Zustände **gleichzeitig**



- **Quantenregister mit n qubit:**
  - Verschränkung aus **n** solchen Ereignissen
  - Superposition: 2^n Zustände **gleichzeitig**

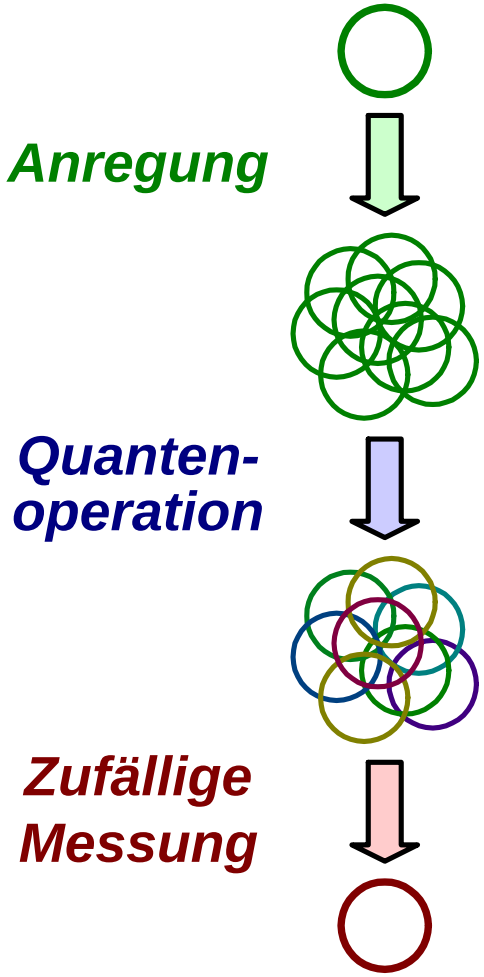


➔ Parallelität 2^n mit **n** Elementen!

Probleme mit Quantenbits

- Stabilität:
  - Äußerer Einfluss zerstört die Superposition
- Messung:
  - Nur eine Messung
  - Zufällige Auswahl
- Registerbreite:
  - Passend zur Aufgabe
- Fehler:
  - Zufällige Fehler bei jeder Operation

3. Quantenalgorithmen



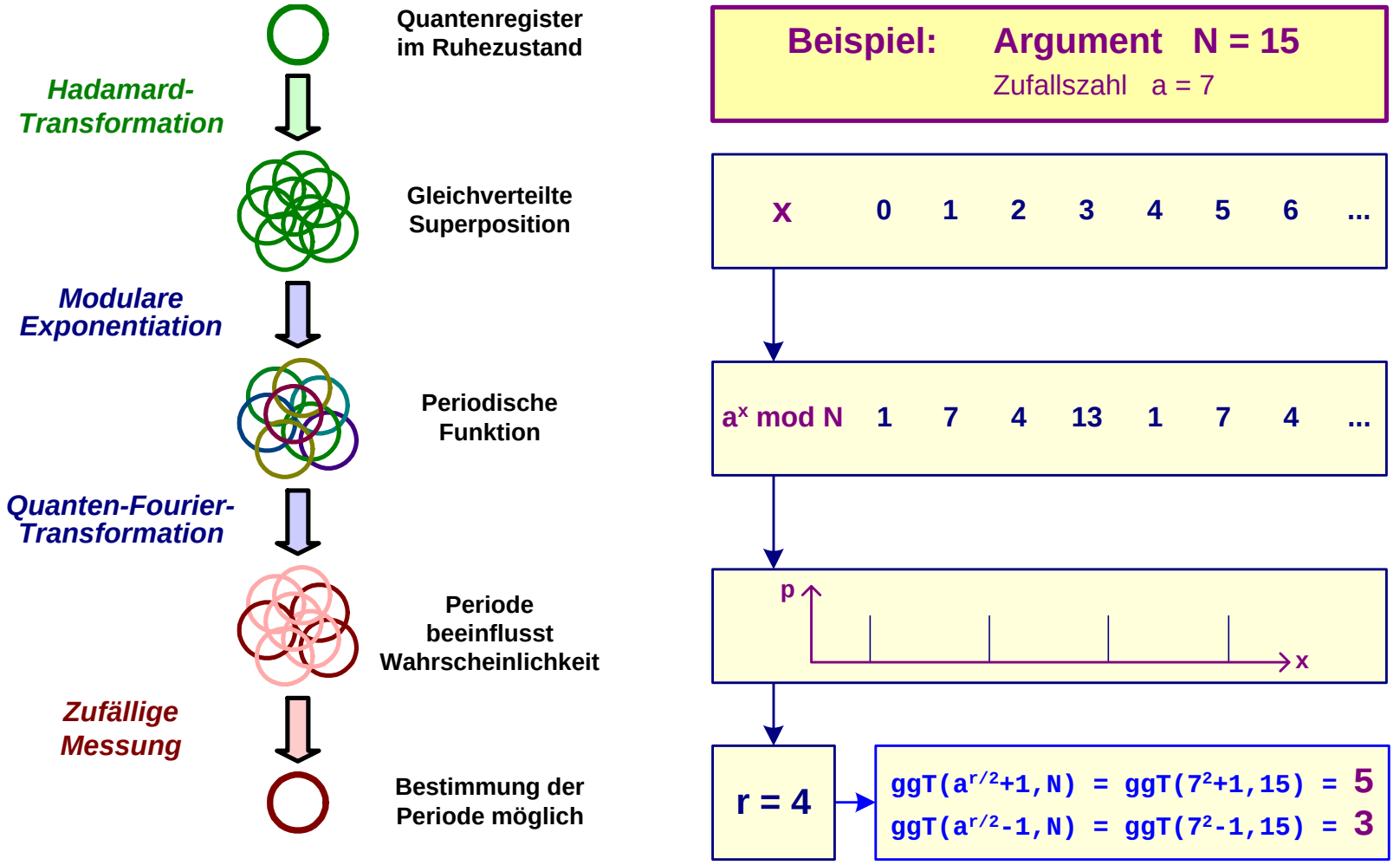
Quantenregister: **n** qubit

Superposition: $\mathbf{2^n}$ Zustände

Superposition: $\mathbf{2^n}$ Ergebnisse

Ergebnis: **1** Wert

Faktorisierung nach Shor



Effizienz des Shor-Algorithmus

- Zeitbedarf: $\mathrm{O}((\log N)^2(\log\log N)(\log\log\log N))$
- Registerbreite: $\geq 2 \cdot \mathrm{ld}\, N - 1$ (qubit)

Fiktives Zahlenbeispiel		
Länge des Arguments (bit)	**Heutiger Supercomputer (10^6 MIPS)**	**Hypothetischer Quanten-computer (10^7 Op/s)**
512	**3 Tage**	**15 Tage** 1023 qubit
1024	**60 000 Jahre**	**80 Tage** 2047 qubit
2048	**70 Bill. Jahre**	**400 Tage** 4095 qubit

Quantengatter

- Umkehrbarkeit
- Erhaltungssätze und Symmetriebedingungen
- Basissystem

Toffoli-Gatter

Input			Output		
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1
1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	0

"gesteuer-tes NOT"

NAND

Fredkin-Gatter

Input			Output		
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1
1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1

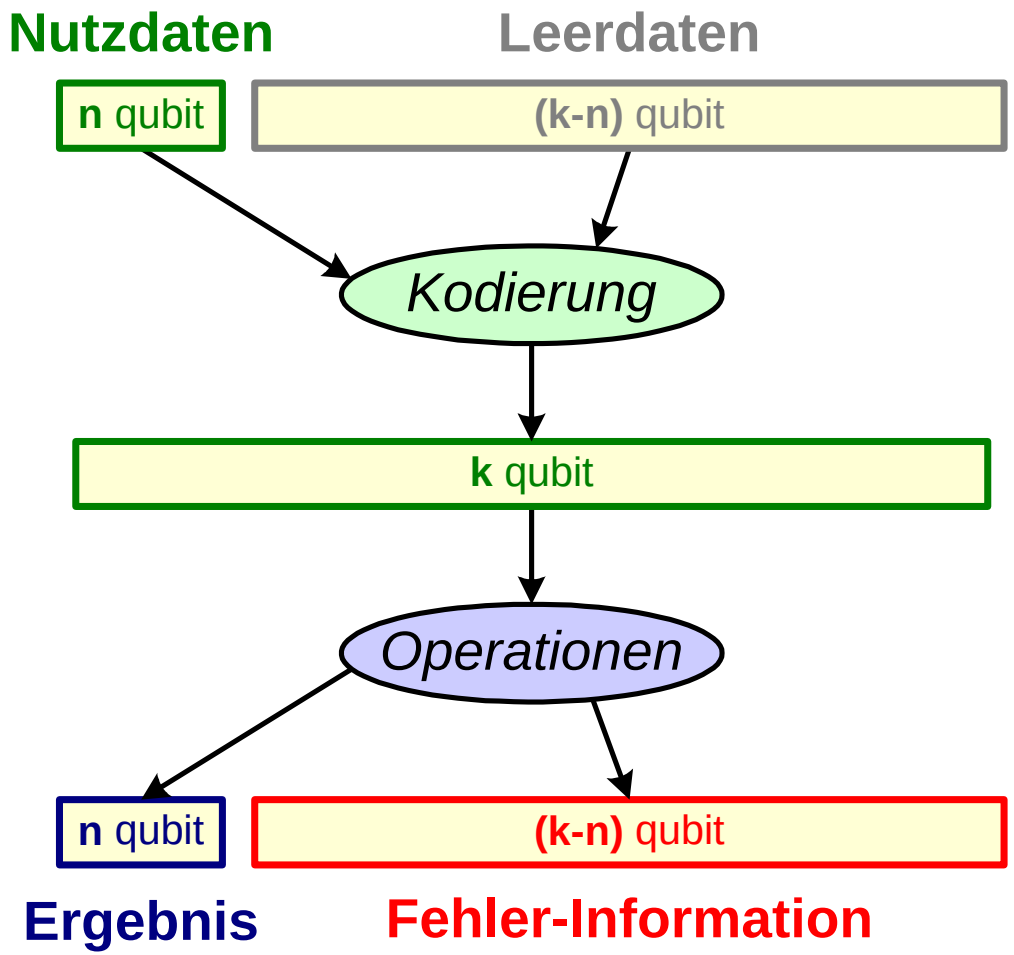
Tausch

NOT

AND

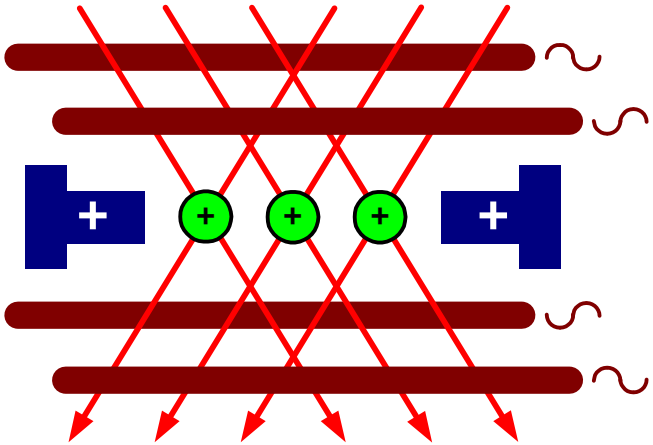
Fehlerkorrektur

- **[k,n]** - Code:
  - Nutzdaten **n qubit**
  - verteilt auf **k qubit**
- Fehlerauswertung:
  - Messung
  - Korrekturoperationen
- Beispiel:
  - **[5,1]** - Code
    Optimum für Einzel-Qubit-Operationen



4. Realisierungen: Ionenfalle (MOT)

- Energiezustände in der Atomhülle
- Kopplung durch Vibration
- Anregung durch Laser
- Kurze Dekohärenzzeiten
- Aktuell:
  - Gatter 2 qubit
  - Rudimentäre Operationen bis etwa 10 qubit



Tauschoperation in der Ionenfalle:

http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/feb01/quantf4.gif

Abbildung: IEEE Spectrum Feb. 2001, S. 46

Kernspin-Resonanz (NMR)

- Spins im Atomkern
- Kopplung im Molekül
- Anregung mit HF
- Viele Moleküle
- Aktuell:
  - Shor-Algorithmus für N=15 (mit 7 qubit)
- Beispiel:
  - $CHCl_3$ (2 qubit)

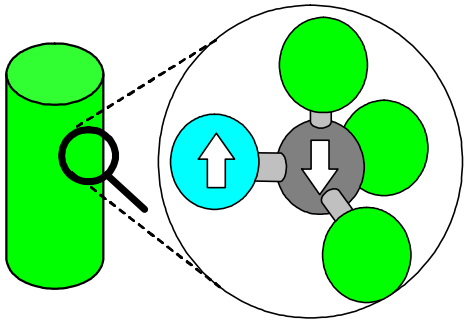


Abbildung: Torsten Koch

„Gesteuertes NOT“ mit Kernspin-Resonanz:

http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/feb01/quantf3.gif

Abbildung: IEEE Spectrum Feb. 2001, S. 45

Quantenpunkte

- Diskrete Energieniveaus von Elektronen in kleinen Leiterstrukturen
- Abmessung: <= 20 nm
- Elektrostatische Kräfte und Tunneleffekte
- Auch für „konventionelle“ Logik

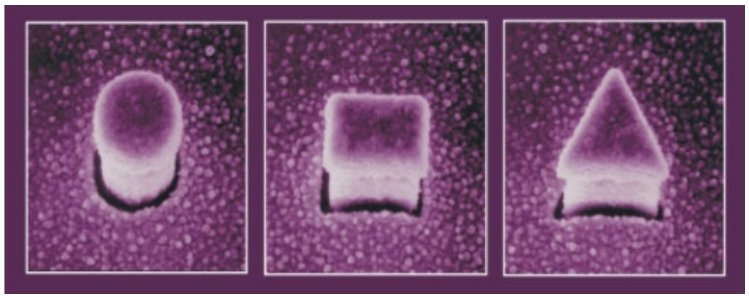
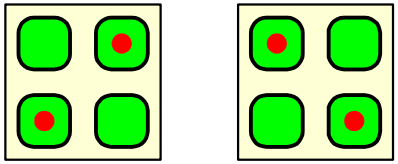
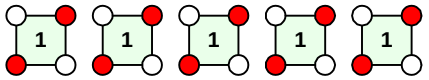


Abbildung: TU Delft

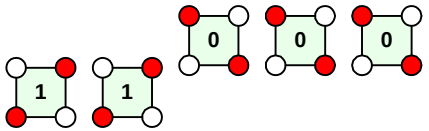
Logikzelle aus vier Quantenpunkten:



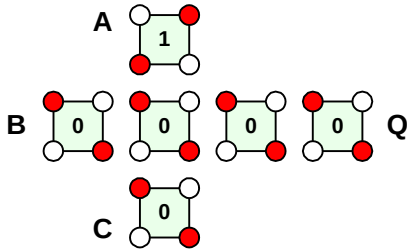
Transmission:



Negation:



Gatter:



C=0: Q = A and B
C=1: Q = A or B

Weitere Kandidaten

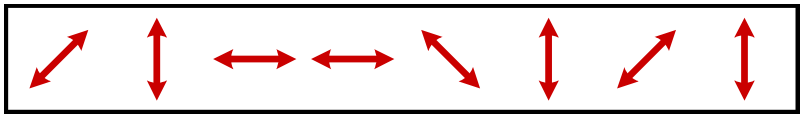
- Kristalline Atomfalle
  - Atome eingesperrt in Festkörpern
- Molekülkaskade
  - Moleküle „kleben“ auf einer Fläche
- Nanoröhren
  - Winzige Strukturen aus Kohlenstoff
- Supraleitende Ringe
  - Kreisende Elektronen tragen Information
- Bose-Einstein-Kondensate
  - Atome im „Gleichschritt“
- EPR-Photonen für Teleportation und Klonen

5. Kryptographie mit Quanten

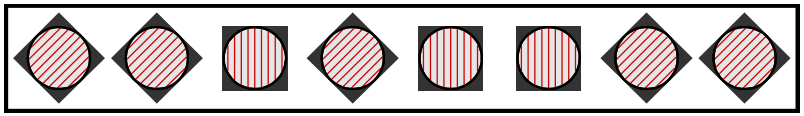
- Grundproblem:
  - Sicherer Transport von Geheimnissen
- Derzeitiger Ansatz:
  - Rechenoperationen, deren Umkehrung extrem zeitaufwendig ist
  - Gefährdet durch Quantencomputer
- Quantenkryptographie:
  - Echter Zufall
  - Messung zerstört Info
  - Quantenparallelität nicht benötigt

Protokoll zur Schlüsselerzeugung

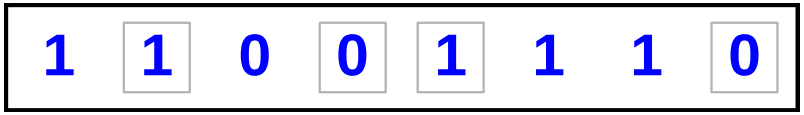
BB84-Protokoll (nach Bennett/Brassard 1984)



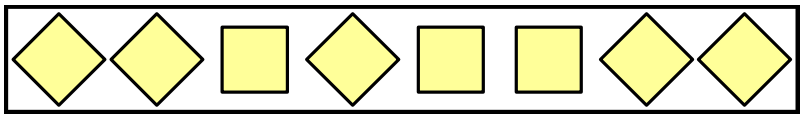
A sendet Photonen mit zufälliger Polarisation



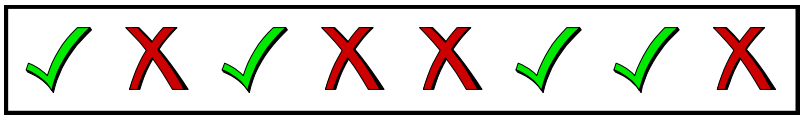
B wählt zufällige Filterstellungen



B führt Messung durch



B sendet Info über die Filterstellung



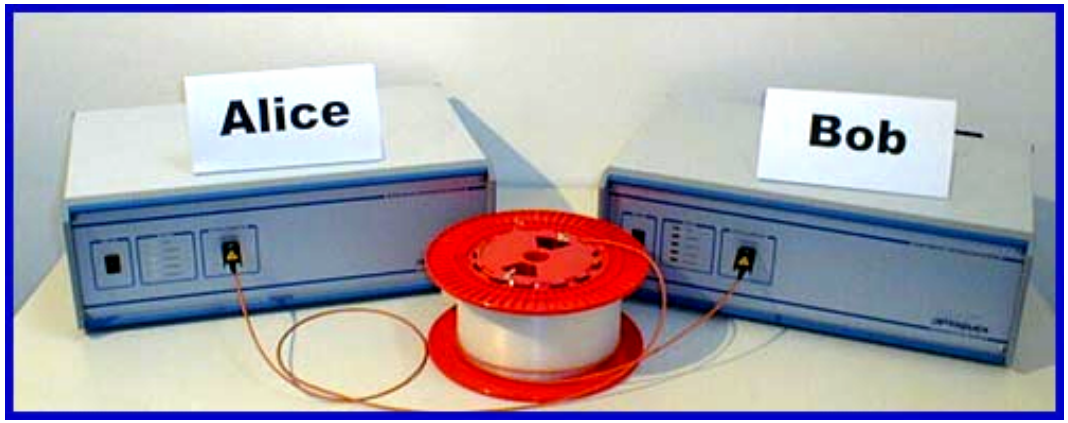
A sendet Info über deren Richtigkeit

Verbleibende Bits sind der Schlüssel

Ergebnis und Probleme

- Braucht zwei Kanäle:
  - Optische **Direkt**verbindung
  - Beliebiger öffentlicher Kanal
- Abweichungen im geheimen Schlüssel:
  - Hinweis auf Spionage
  - Erkennung durch Hash oder Testübertragung
- Problem:
  - Fehler bei Übertragung und eigener Messung
    - Müssen toleriert werden
    - Müssen von Spionage unterscheidbar sein

Das erste Produkt



- **Hersteller:** id Quantique (Genf, Schweiz)
- **Faserlänge:** bis 70 km (nur Punkt-zu-Punkt)
- **Preis:** etwa US-$ 90.000,-
- **Konkurrenz:** Quantum Confidential Inc. (Lacanada, USA)
- **Zukunft:** Optische Netze mit „quantentauglichen“ Routern

6. Ein Fazit

- **Wann?**
  - In 5 bis 100 Jahren ...
- **Wer?**
  - Forscher, Geheimdienste, Militär, Verbrecher, ..., alle.
- **Wie?**
  - Technologie noch nicht entschieden.
  - Mikroelektronik zwangsweise betroffen.
- **Wozu?**
  - Kryptographie
  - Naturwissenschaften
  - Datenbanken
  - ...

7. Literatur und Links

- **P. Shor: Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer.**
  SIAM J.Sci.Statist.Comput. 26 (1997) pp. 1484-1509
- **J. Rink: Quäntchen für Quäntchen.**
  c't Magazin für Computertechnik 16/1998, S. 150 ff.
- **A. Steane, E. Rieffel: Beyond Bits. The Future of Quantum Information Processing.**
  IEEE Computer, Jan. 2000, pp. 38-45
- **R. Sietmann: Kleine Sprünge, große Wirkung.**
  c't Magazin für Computertechnik 25/2000, S. 118-133
- **J. Mullins: The Topsy Turvy World of Quantum Computing.**
  IEEE Spectrum, Febr. 2001, pp. 42-49
- **J. Mullins: Making Unbreakable Code.**
  IEEE Spectrum, May 2002, pp. 40-45

- Dieser Foliensatz und weitere Quellenhinweise:

  tin.tu-ilmenau.de/ra/ver