

# *Quantenmechanik am Limit*

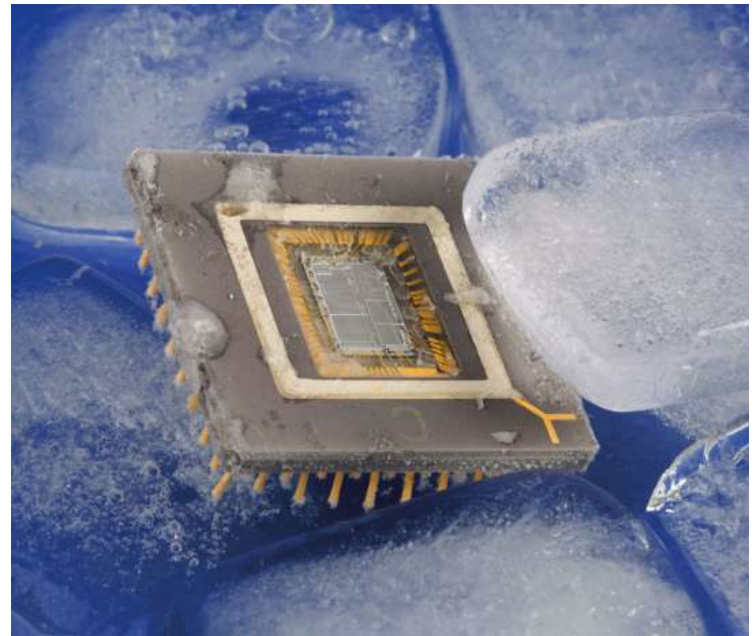
*Die Jagd nach den letzten Quanten*

*Thomas Ihn*

*Solid State Physics Laboratory  
Department of Physics*



**ETH** Eidgenössische  
Technische Hochschule  
Zürich



*Wir alle folgen technologischen Trends...*



# ..... aber was ist da eigentlich drin?



Computer



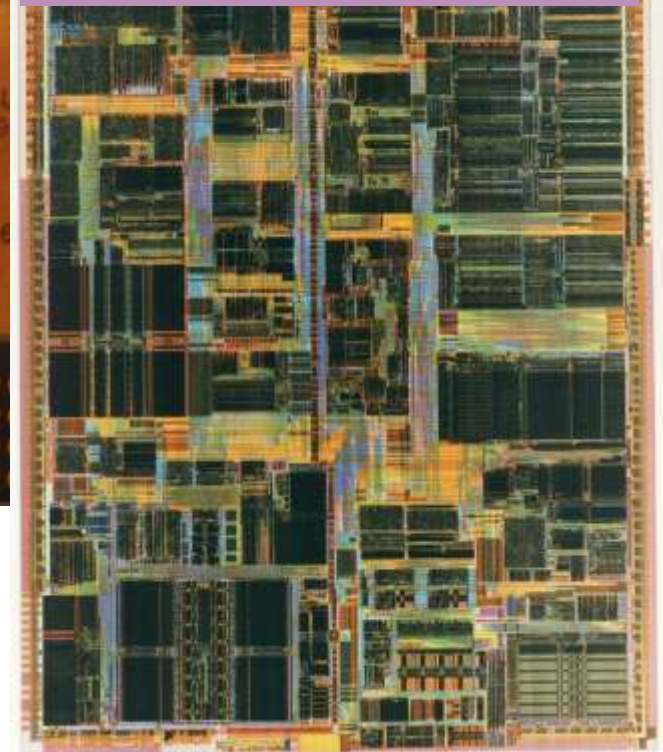
Motherboard



Pentium Prozessor, Intel



Pentium (II) Processor, 1997, Intel



# ..... aber was ist da eigentlich drin?



Pentium Prozessor, Intel

CLOCK DRI

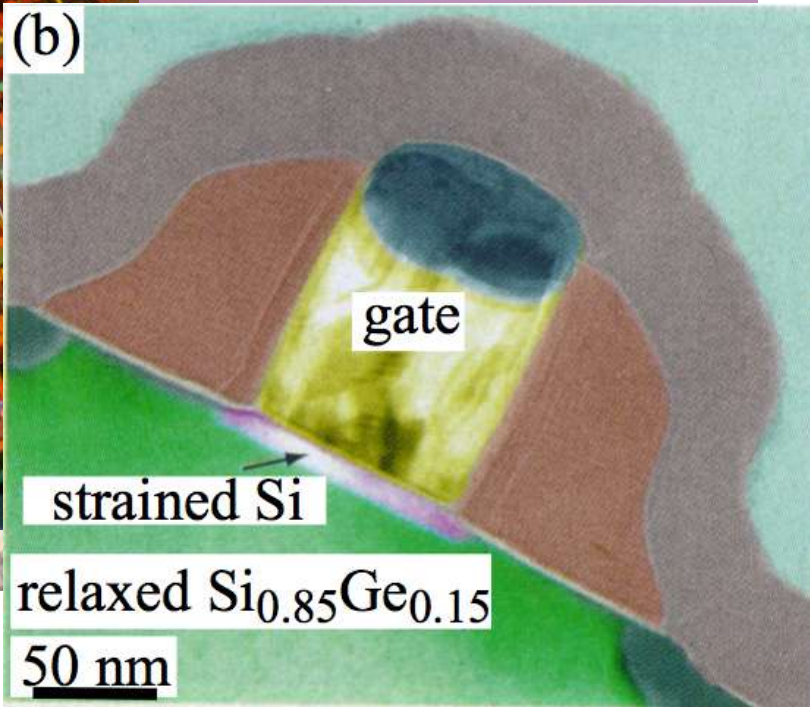
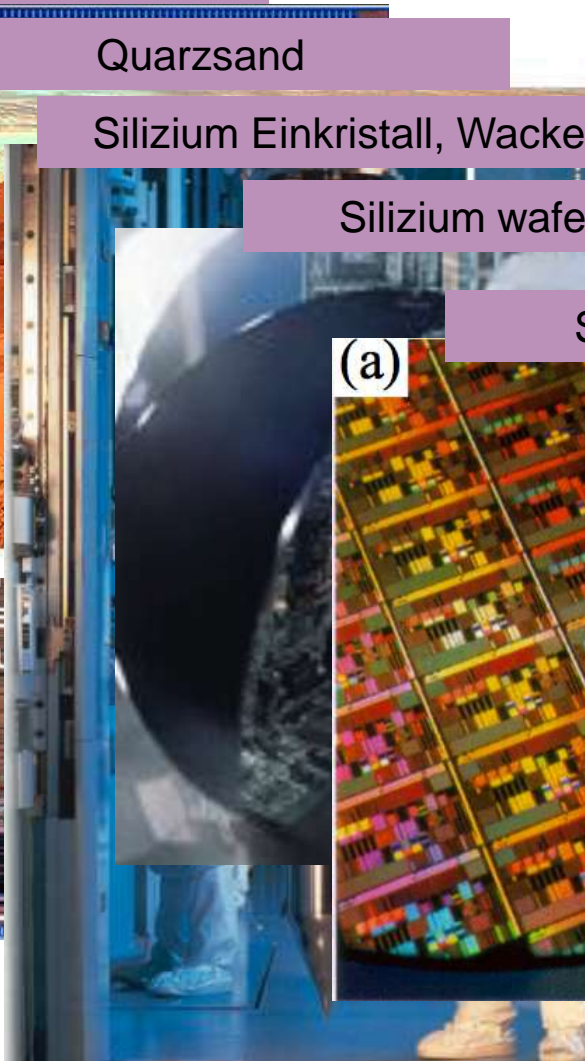
Quarzsand

Silizium Einkristall, Wacker

Silizium wafer, Wacker

Silizium wafer, IBM

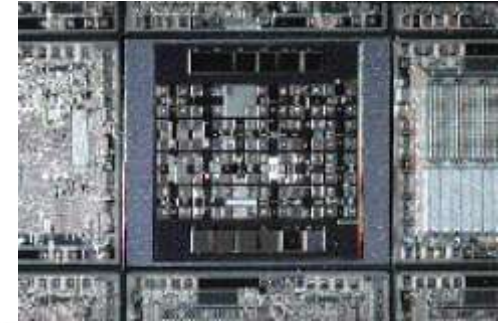
Transistor, IBM



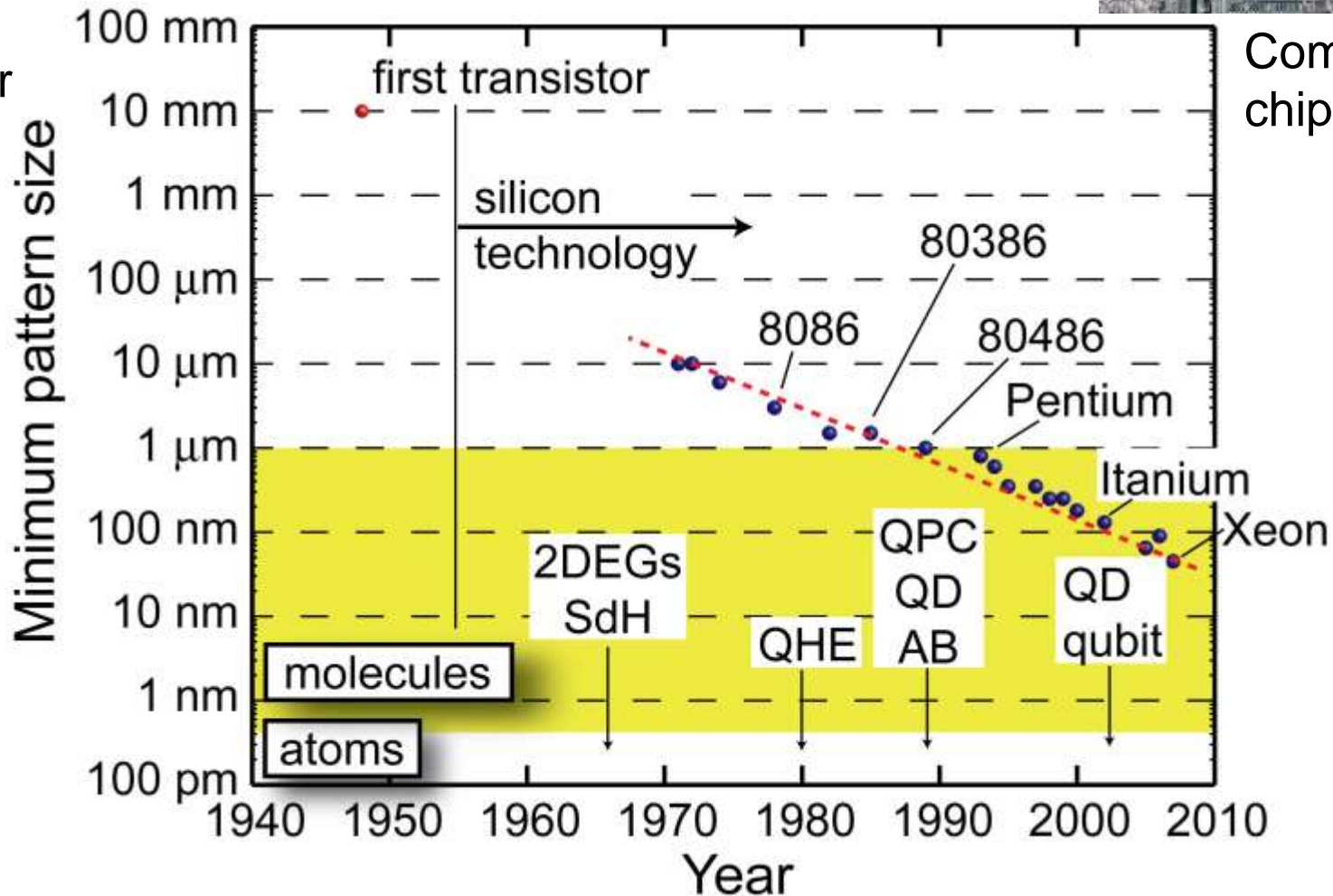
# Die Entwicklung der Elektronik verlief rasant...



Erster Transistor 1948



Computerchip 2005

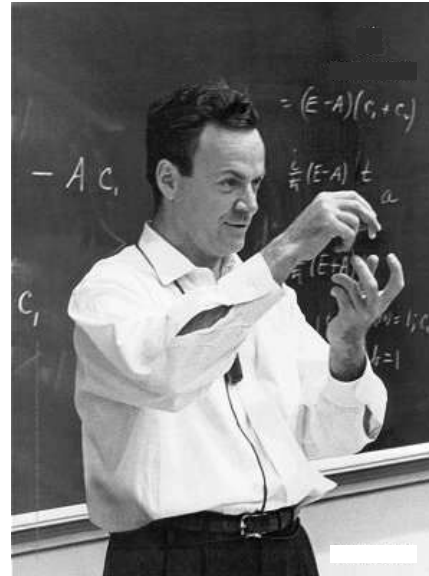


## *...und Visionäre gab es auch.*

Gordon E. Moore,  
Mitgründer von Intel



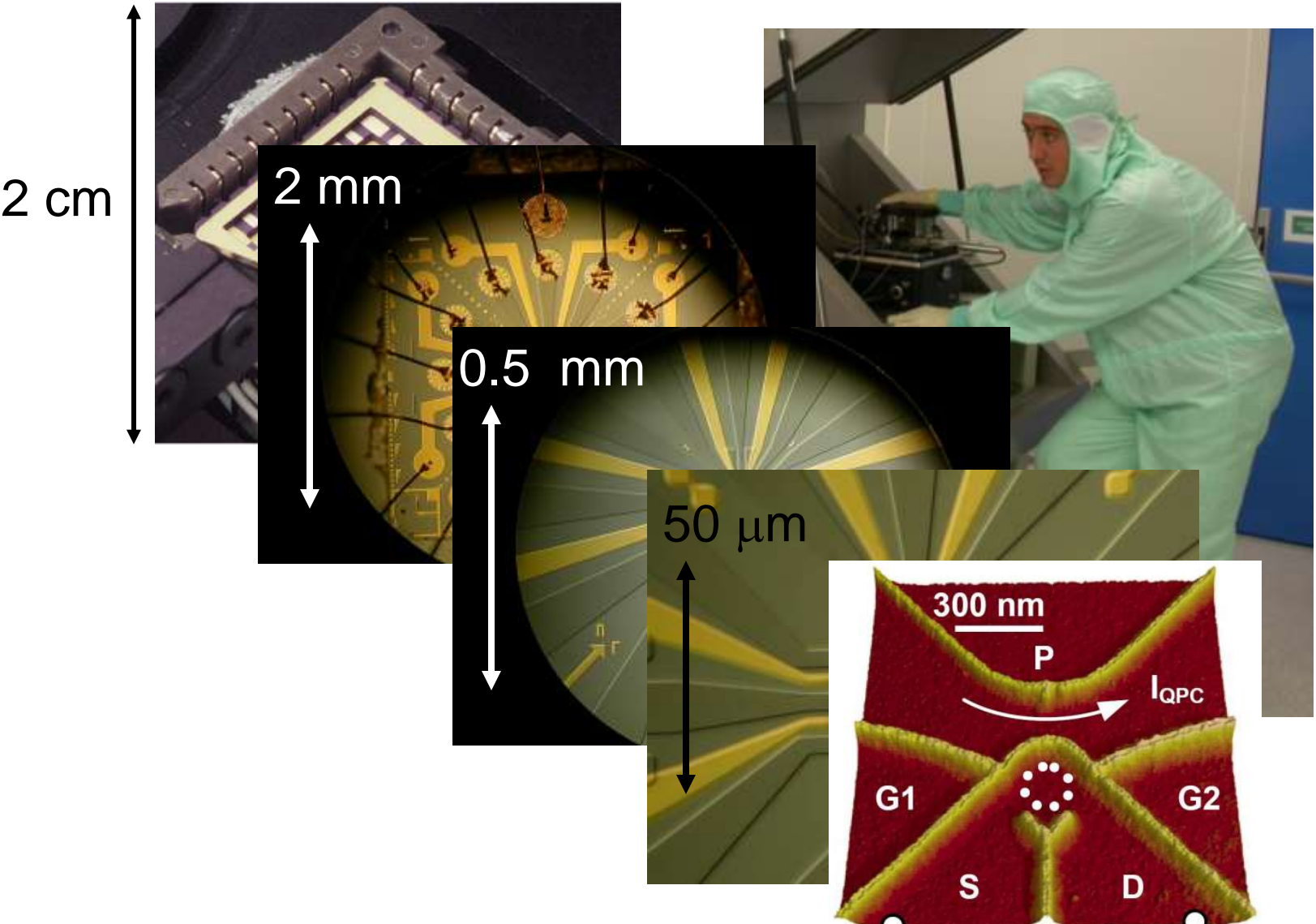
“The number of transistors per chip doubles within two years”  
(Apr 19, 1965)



Richard P. Feynman  
Physiker  
Nobelpreis 1965

“There is plenty of room at the bottom.” (Dec 29, 1959)  
“It seems that the laws of physics present no barrier to reducing the size of computers until bits are the size of atoms and quantum behavior holds sway.” (1985)

*Also machen wir heute Transistoren,  
die mit einem einzelnen Elektron schalten.*



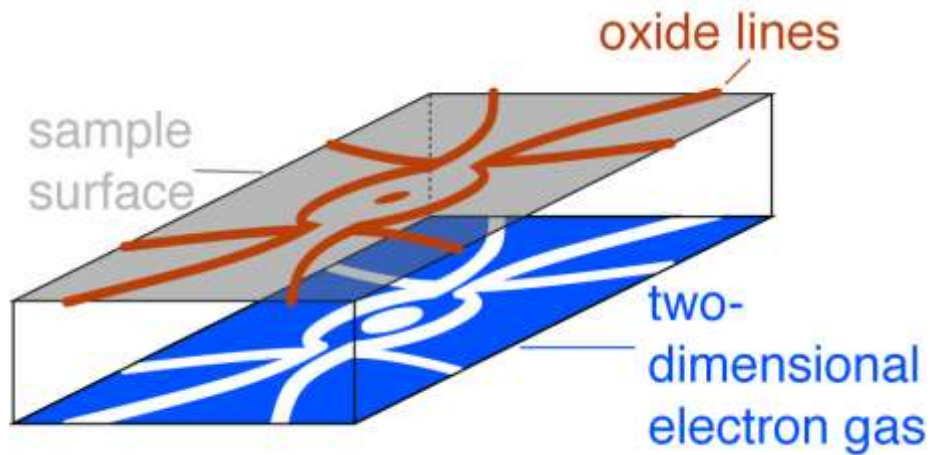
*Dabei werden winzige Strukturen  
mit Nanowerkzeugen  
auf Halbleiteroberflächen geschrieben.*





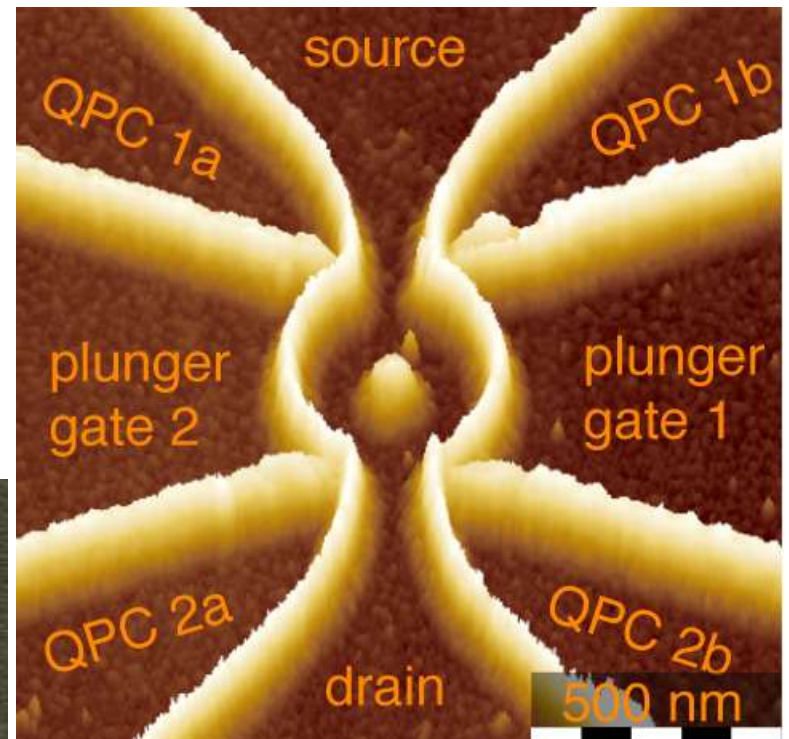
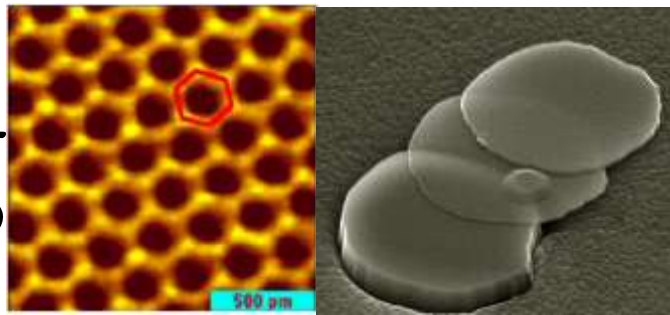
# Die Linien auf der Oberfläche

übertragen sich in ein zweidimensionales Elektronengas unter der Oberfläche.

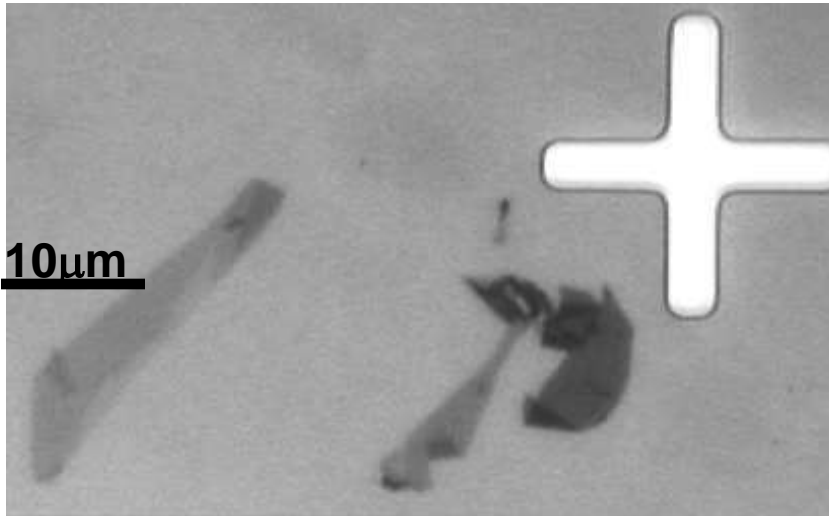
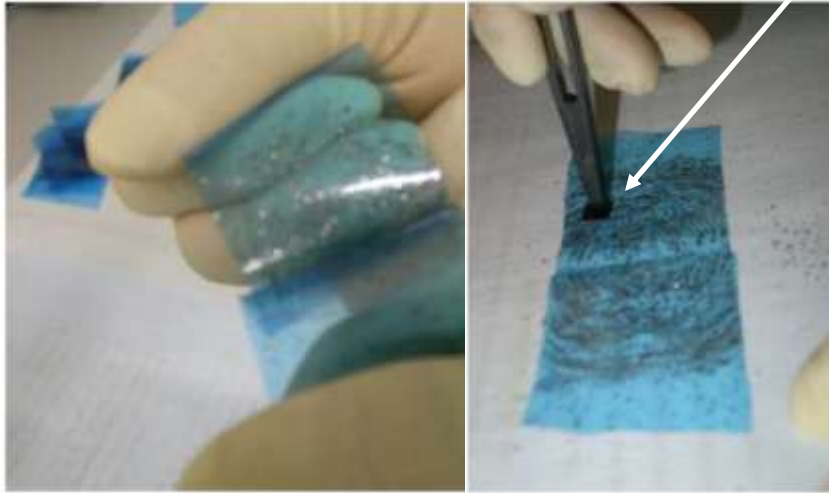


*was heisst hier zweidimensional???*

*graphen ist wirklich 2D*



# *Ein Nobelpreis für Graphen!*



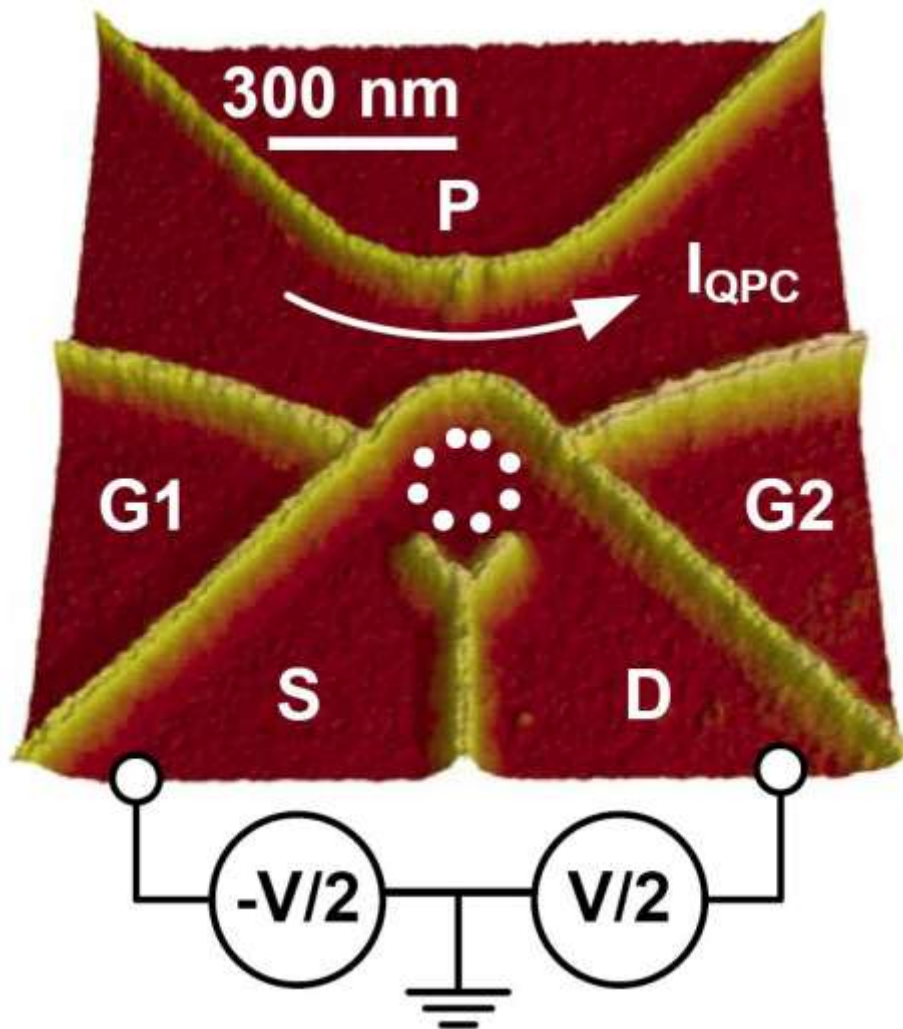
**Andre Geim**



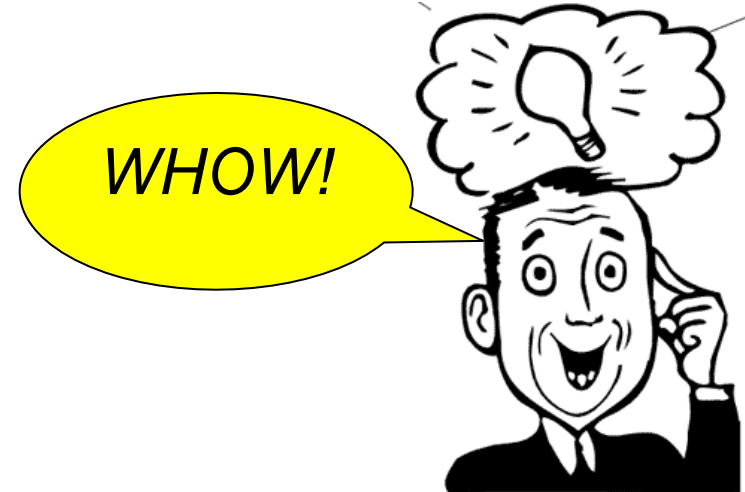
**Konstantin  
Novoselov**

**Nobelpreis 2010**

*In geeigneten Strukturen können  
einzelne Elektronen eingesperrt werden...*



1 Elektron wird kontrolliert  
aber  
im selben Volumen sind  
10 Millionen Atome, d.h.  
1 Milliarde Elektronen,  
Protonen und Neutronen



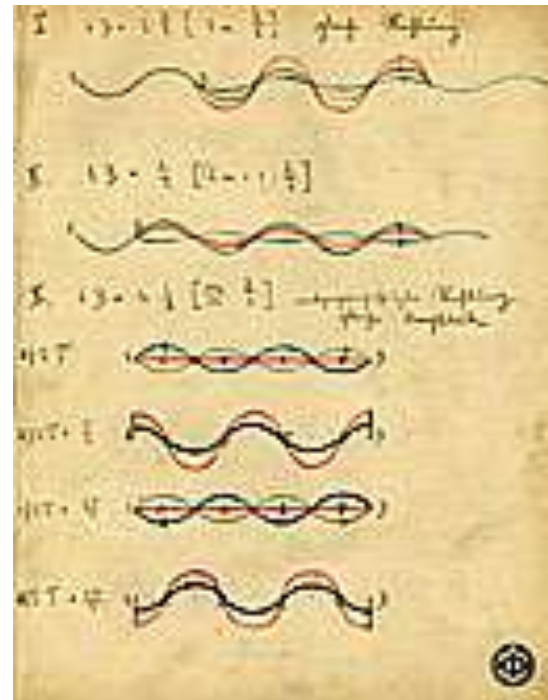
*...die sich ganz anders*

*als Teilchen verhalten.*



Erwin Schrödinger,  
Vater der “Wellenmechanik”

Lehrstuhl für Theoretische Physik, Uni Zürich, 1921-1927

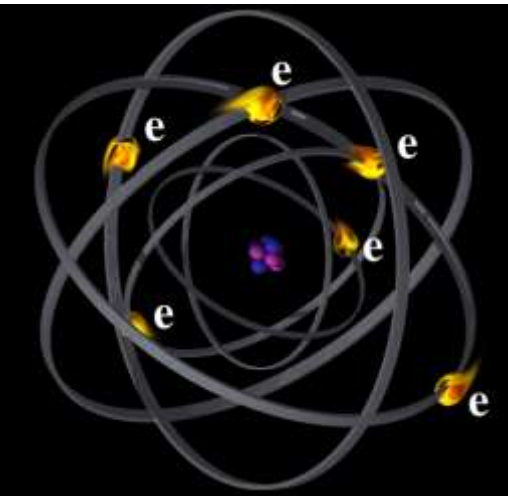


Schulheft Physik (8. Klasse)

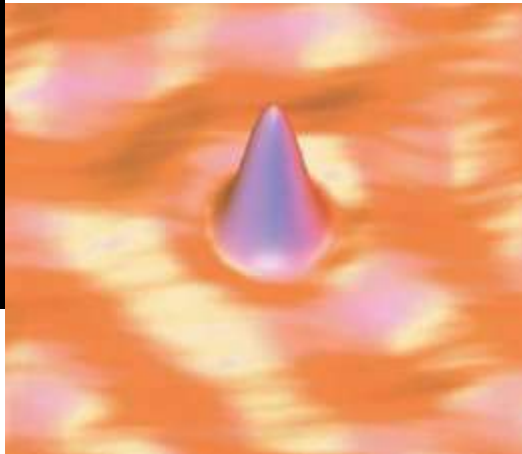
***Wir brauchen die Quantenmechanik!***

# Quantenmechanik...

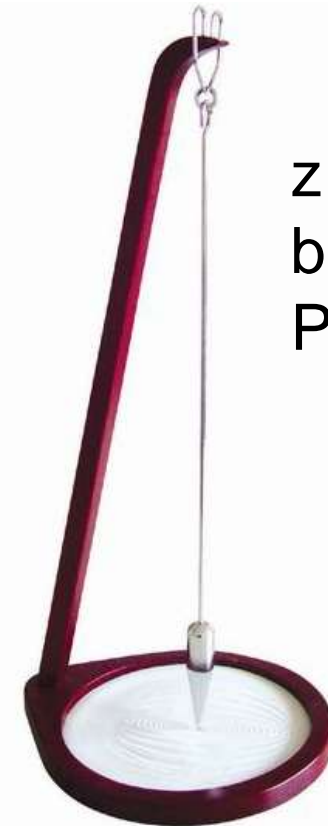
*...ist bei kleinen  
Objekten wichtig...*



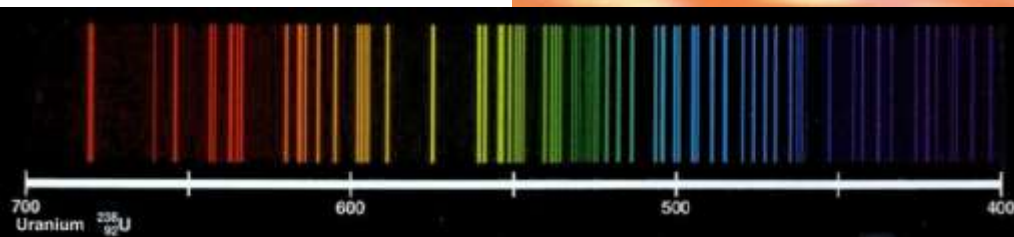
z.B. bei Atomen



*...und spielt bei  
grossen keine Rolle.*

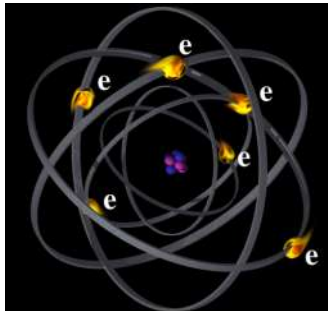


z.B.  
bei einem  
Pendel



*Unsere Strukturen sind nicht ganz so klein wie Atome...*

**Quantenmechanik**

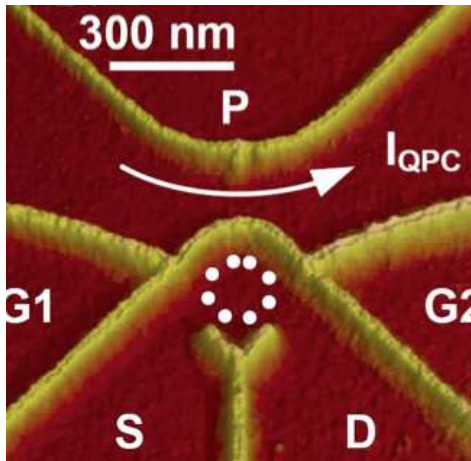
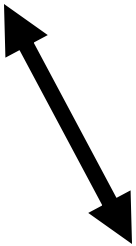


Kleine Strukturen  
**Grosse Energie**

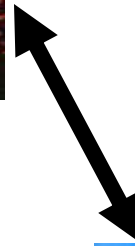
**Wärmelehre**



Heiss  
**Grosse Energie**

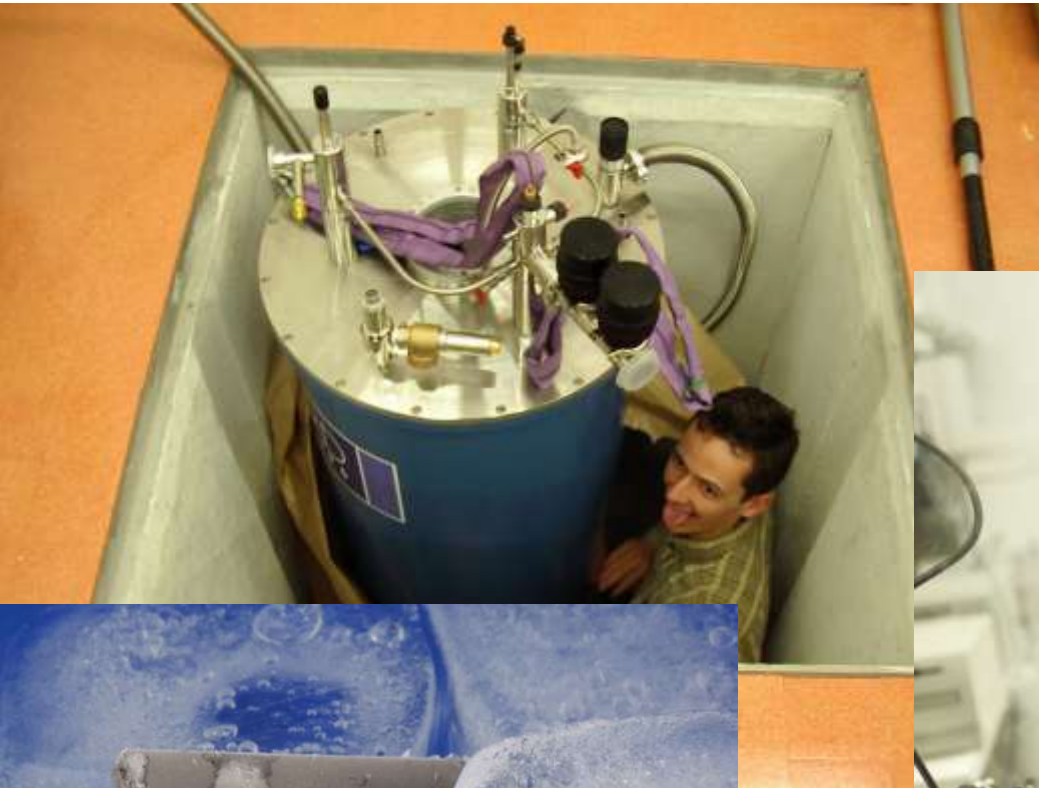


Grosse Strukturen  
**Kleine Energie**

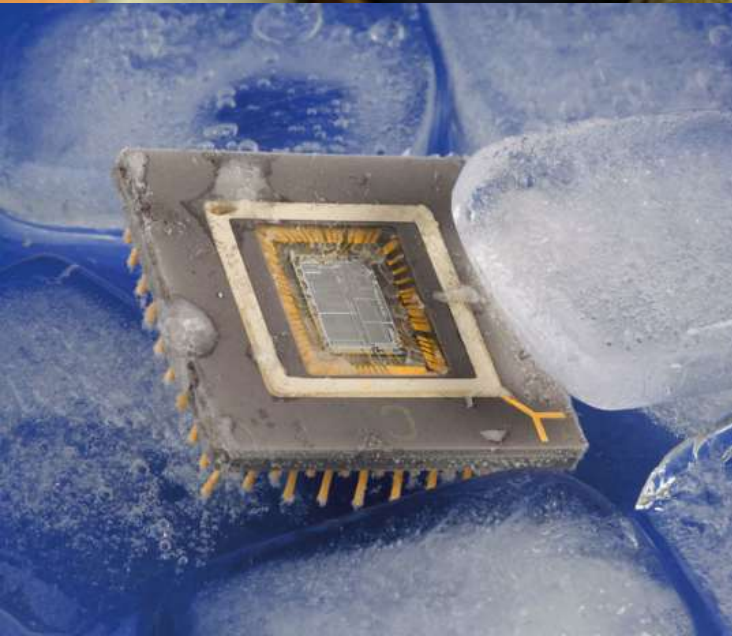


kalt  
**Kleine Energie**

*...darum brauchen wir tiefe Temperaturen.*

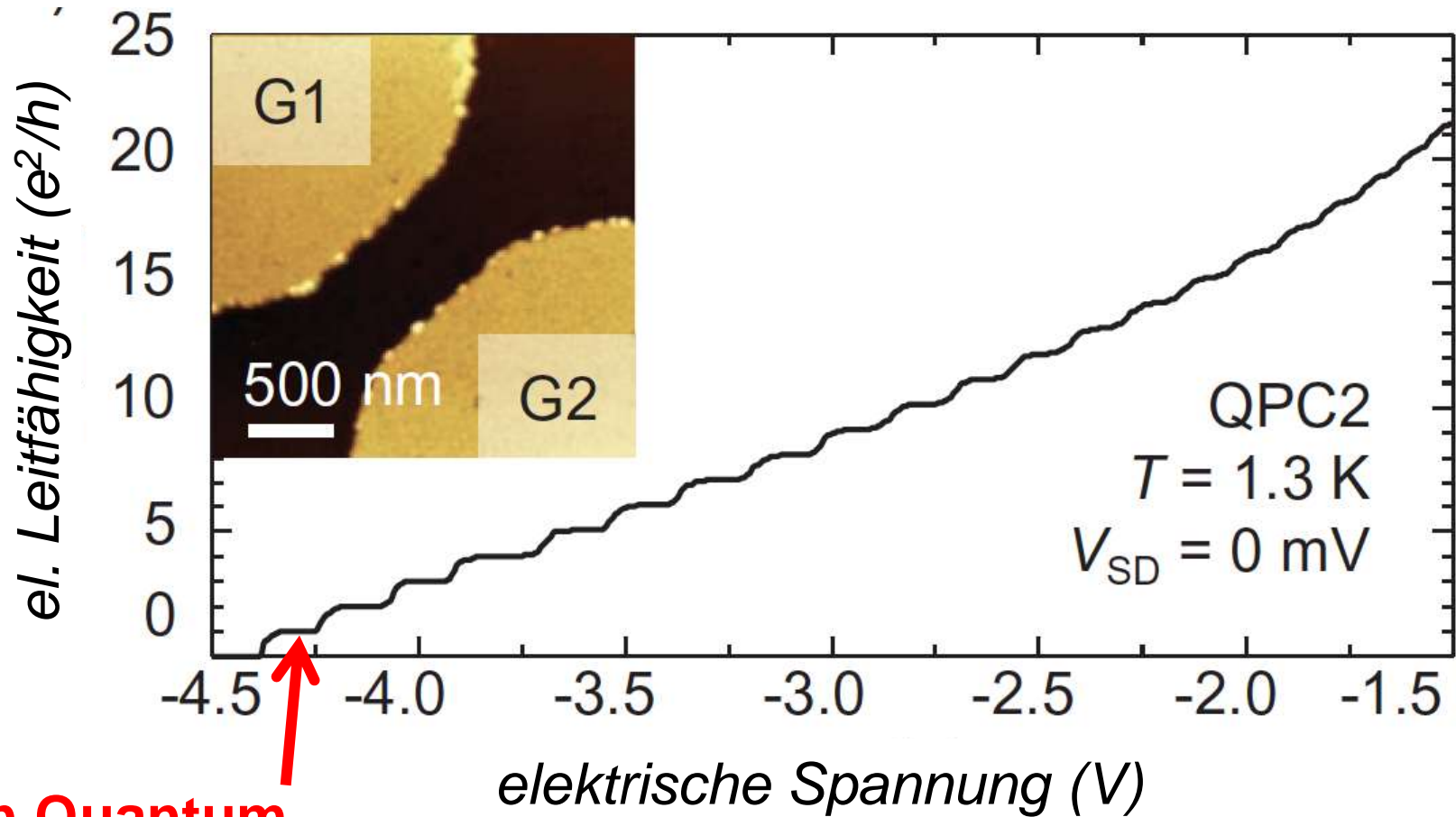


*Supraleitende Magnete  
wie in der Teilchenphysik*



*10 Millikelvin  
Wie kalt ist das eigentlich?*

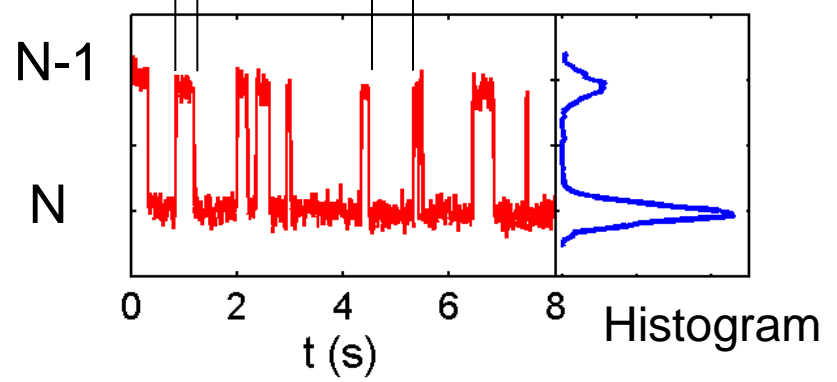
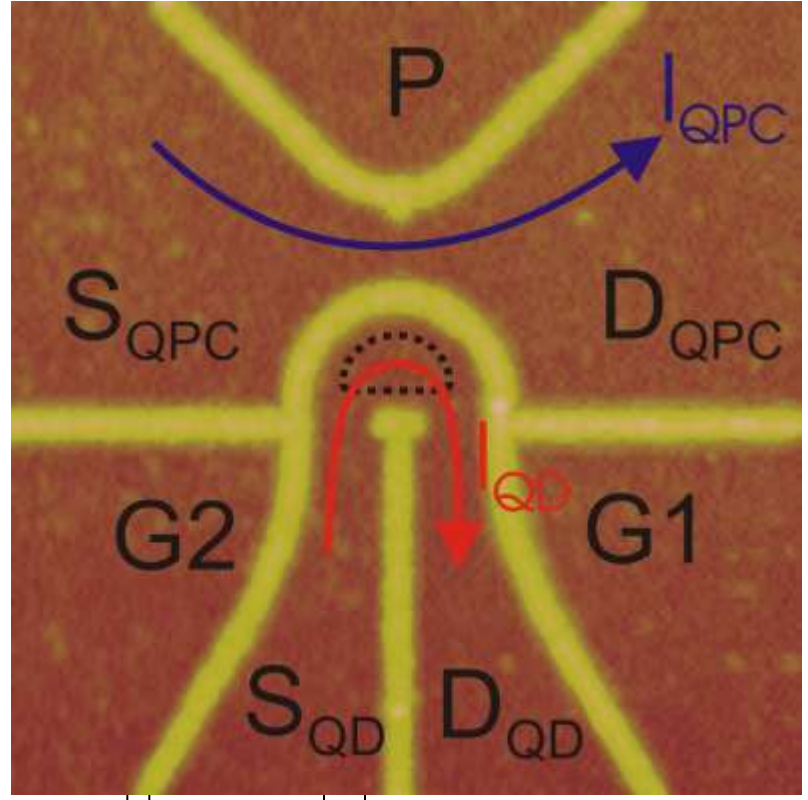
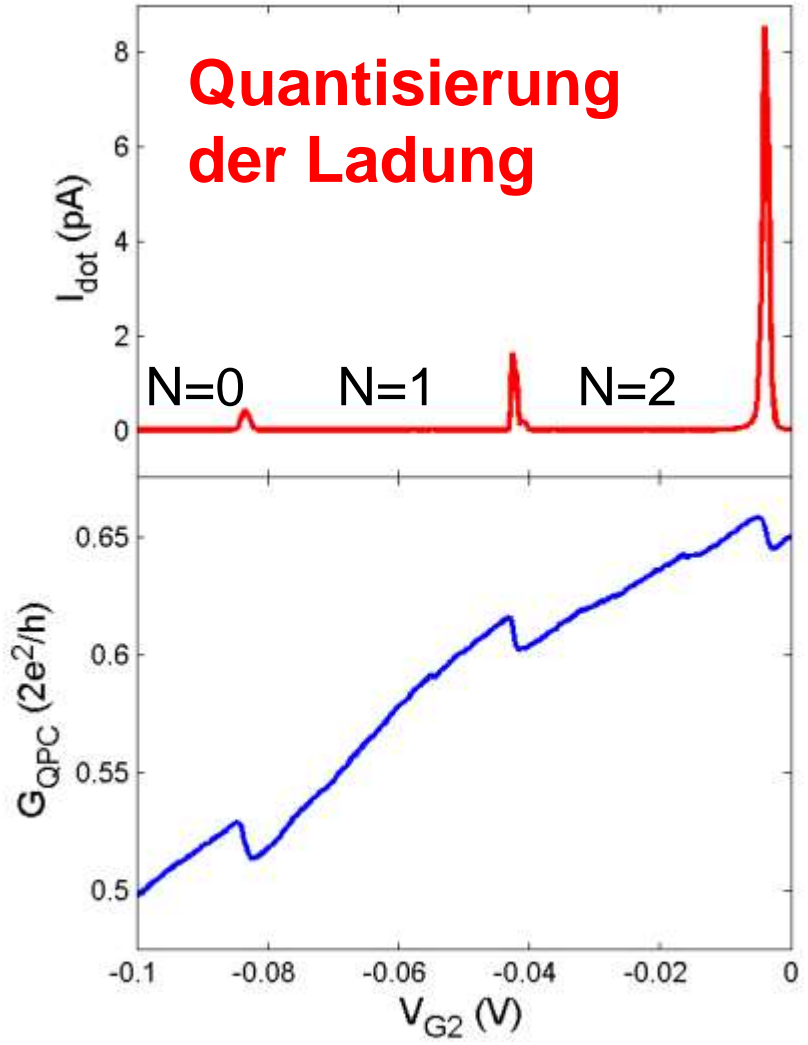
*Dann beobachten wir, dass der elektrische Widerstand quantisiert ist...*



**ein Quantum  
Leitfähigkeit**



...und wir können einzelne Elektronen zählen.



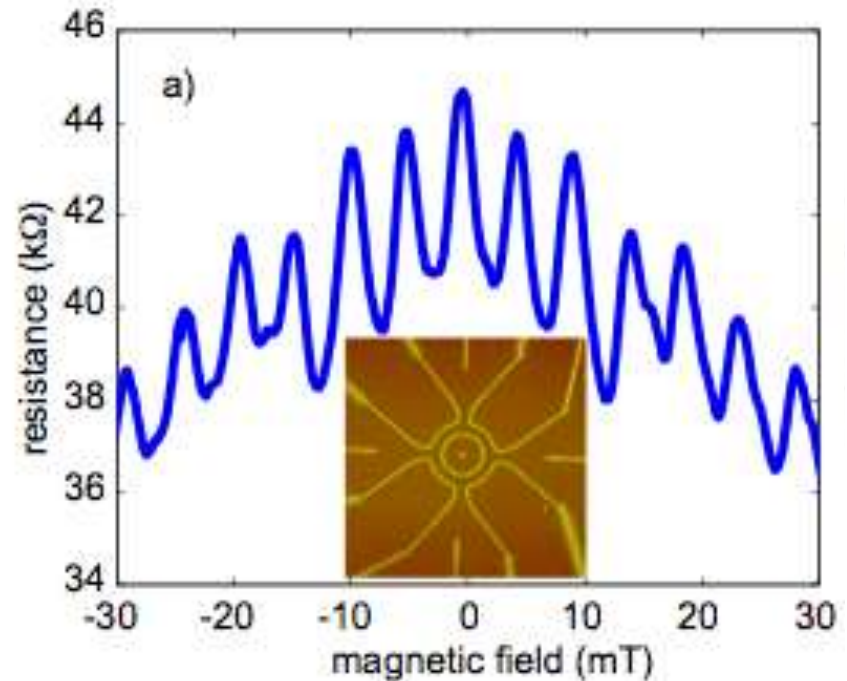


*Manchmal verhalten sich  
Elektronen wie Wellen...*

*... und "überlagern" sich.*

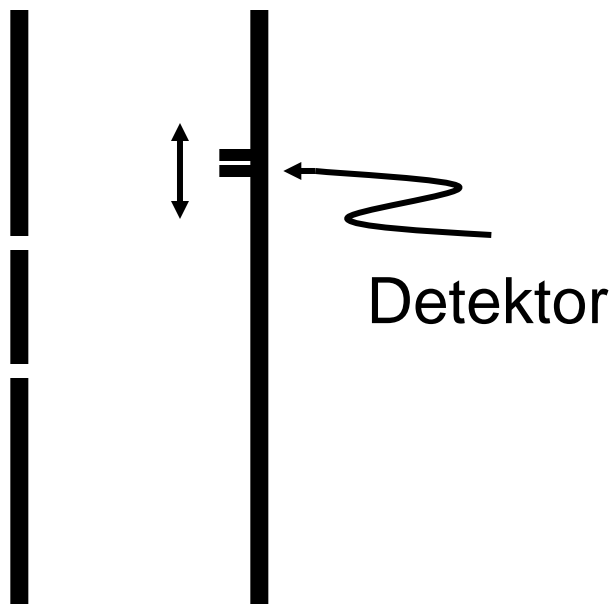


Interferenz von  
Wasserwellen

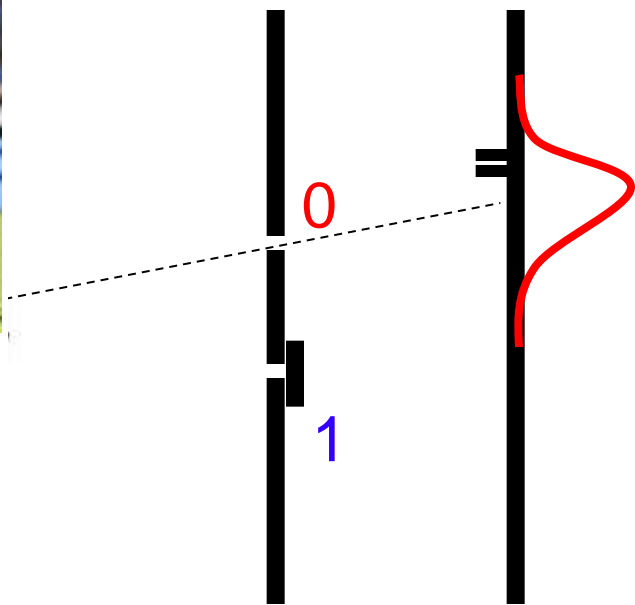


Interferenz von Elektronen

# Das berühmte Doppelspalt Experiment

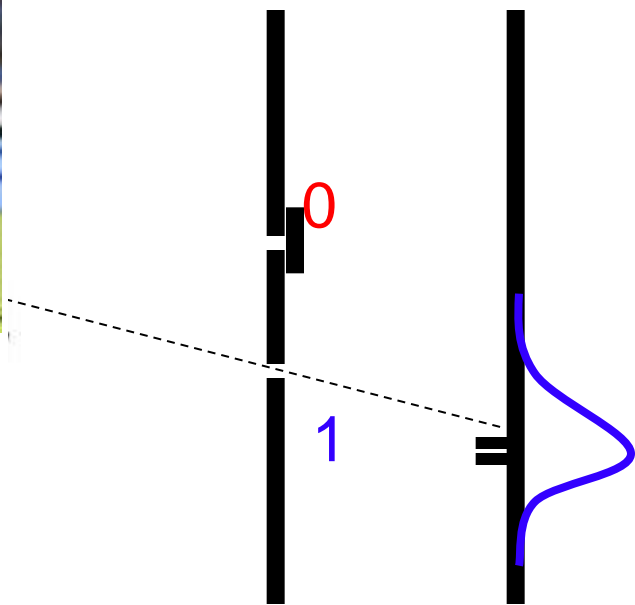


# Das berühmte Doppelspalt Experiment



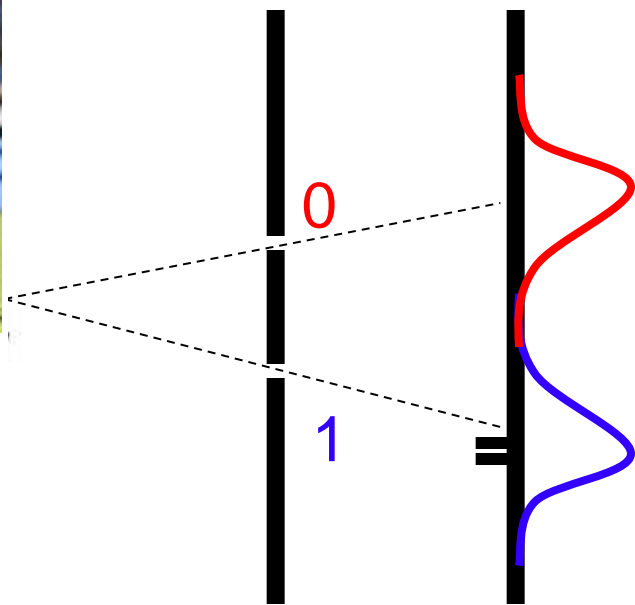
nur Spalt 0 geöffnet

# Das berühmte Doppelspalt Experiment



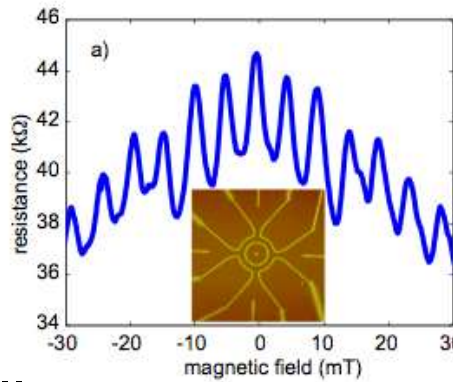
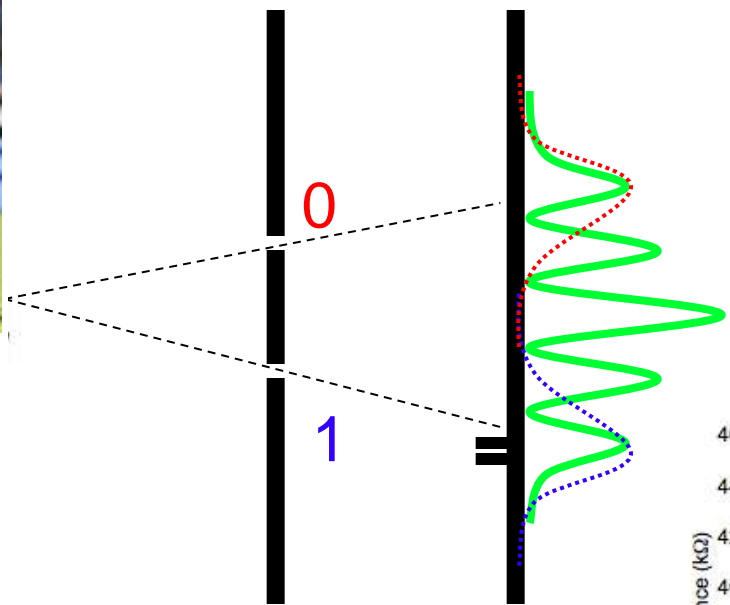
nur Spalt 1 geöffnet

# Das berühmte Doppelspalt Experiment



beide Spalte geöffnet

# Das berühmte Doppelspalt Experiment

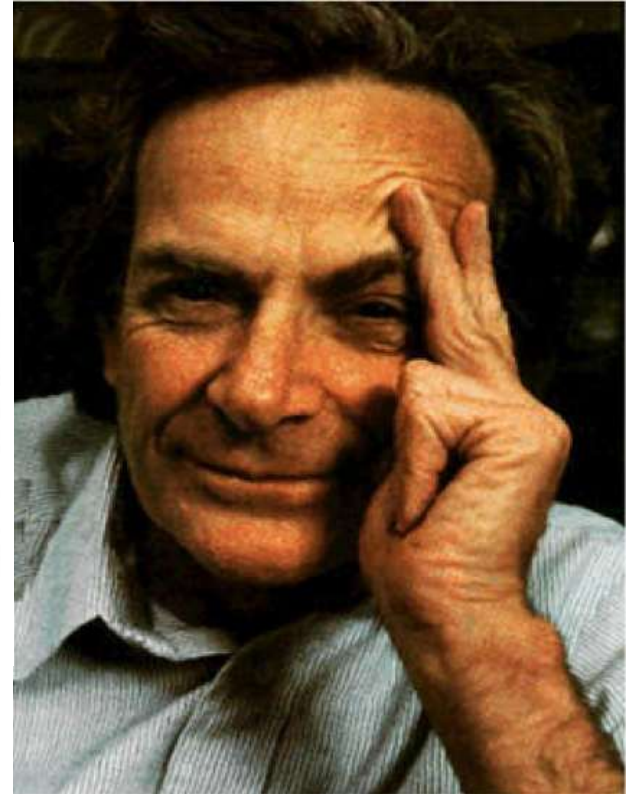


Nun mit dem Elektronenfußball



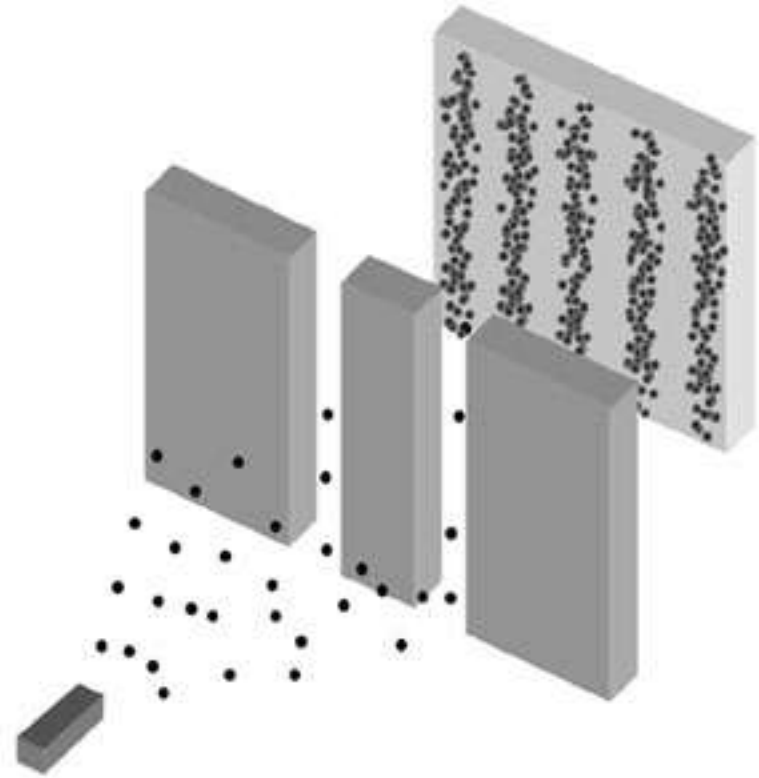
*... und das sagt ein Nobelpreisträger dazu.*

“...Wir können das Geheimnis (dieses Versuchs) nicht aufdecken, indem wir “erklären” wie es funktioniert. Wir können nur **berichten** wie es funktioniert, und indem wir dies tun, erörtern wir die grundlegenden Eigentümlichkeiten der ganzen Quantenmechanik.”

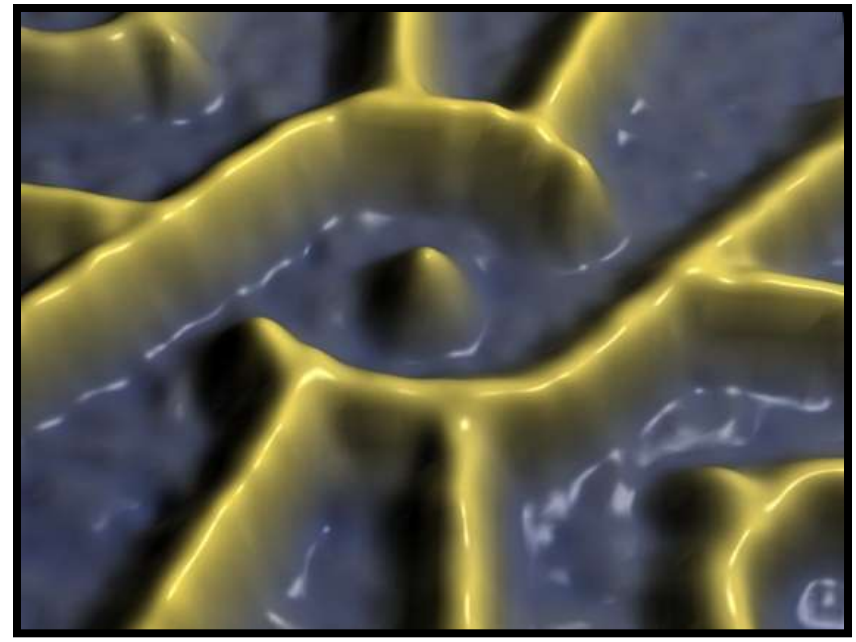


Richard Feynman

*Jetzt schreiten wir zur Tat...*

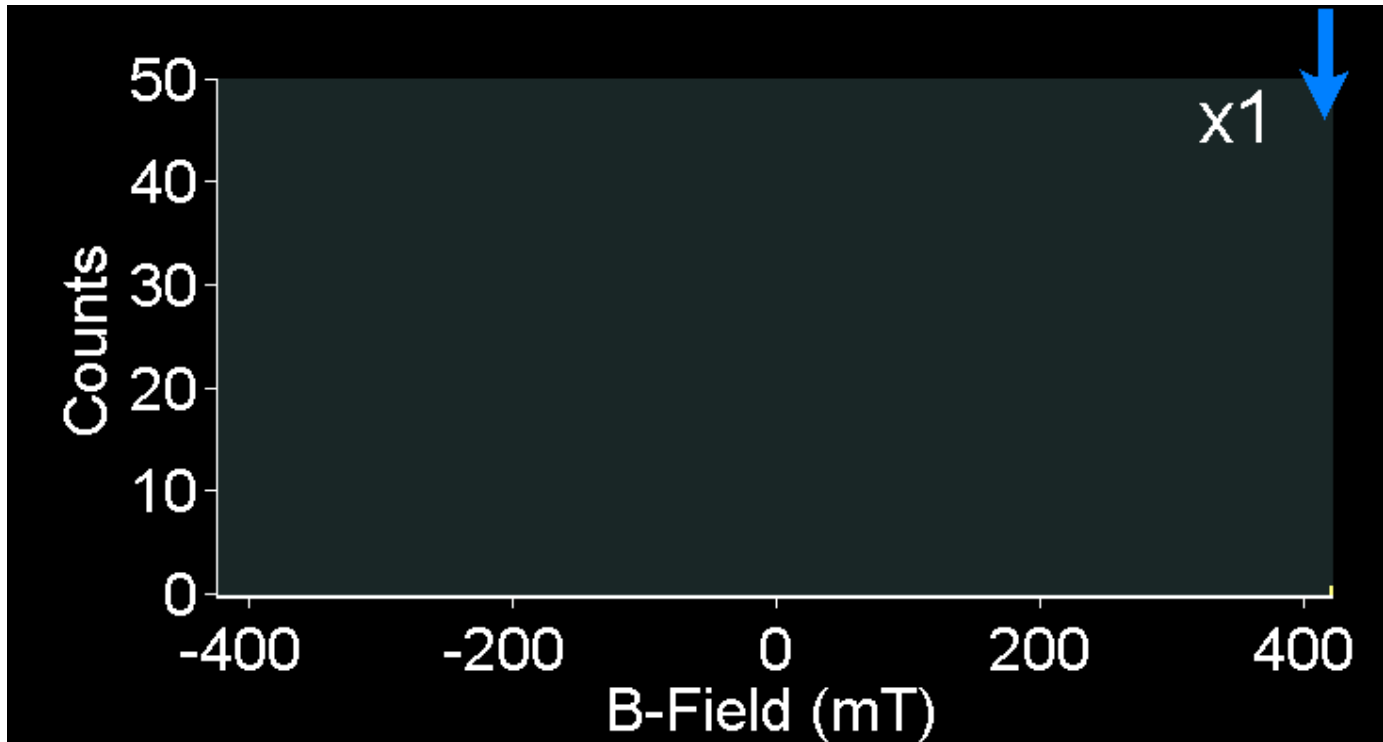


Das Konzept...



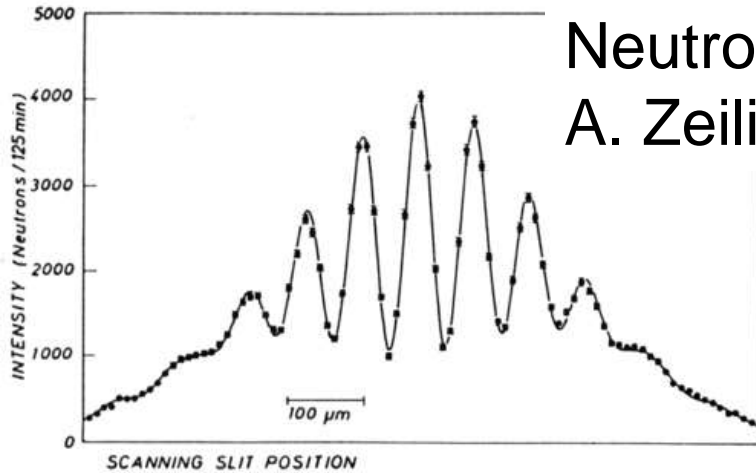
... die Realisierung

*... und machen das Experiment selbst*

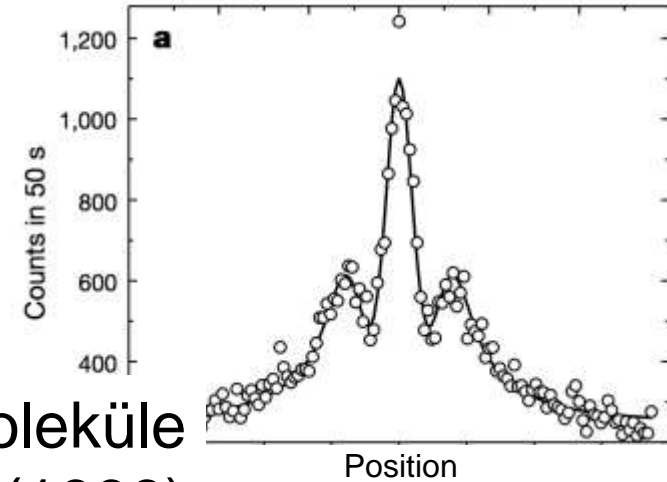


Das Interferenzbild entsteht durch Zählen einzelner Elektronen.

# Heute können Physiker relativ grosse Objekte interferieren lassen...

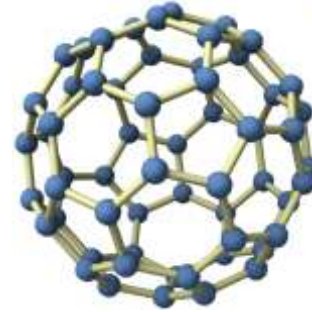
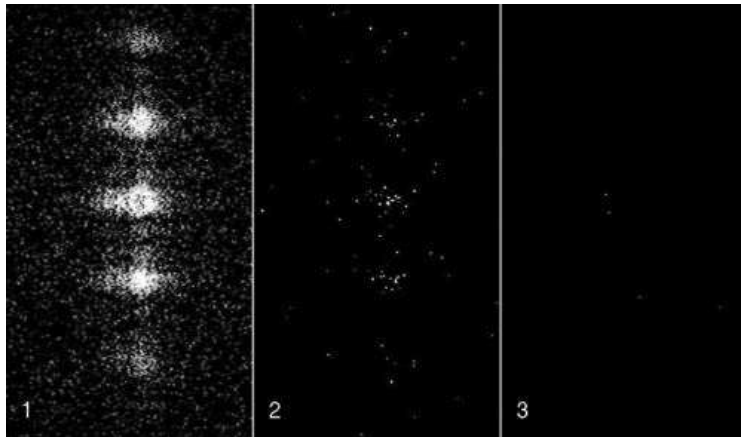


Neutronen  
A. Zeilinger (1988)

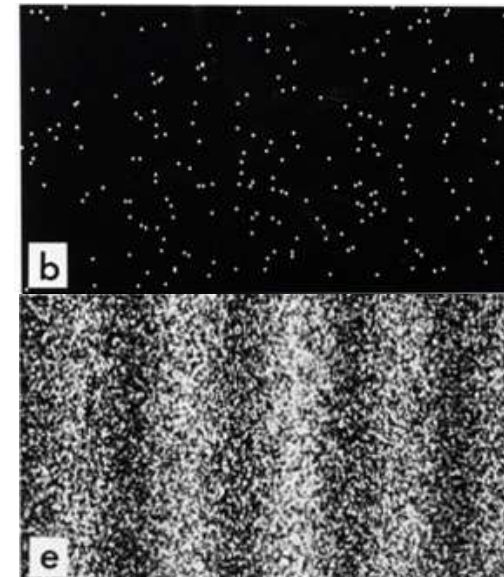


C<sub>60</sub> Moleküle  
A. Zeilinger (1999)

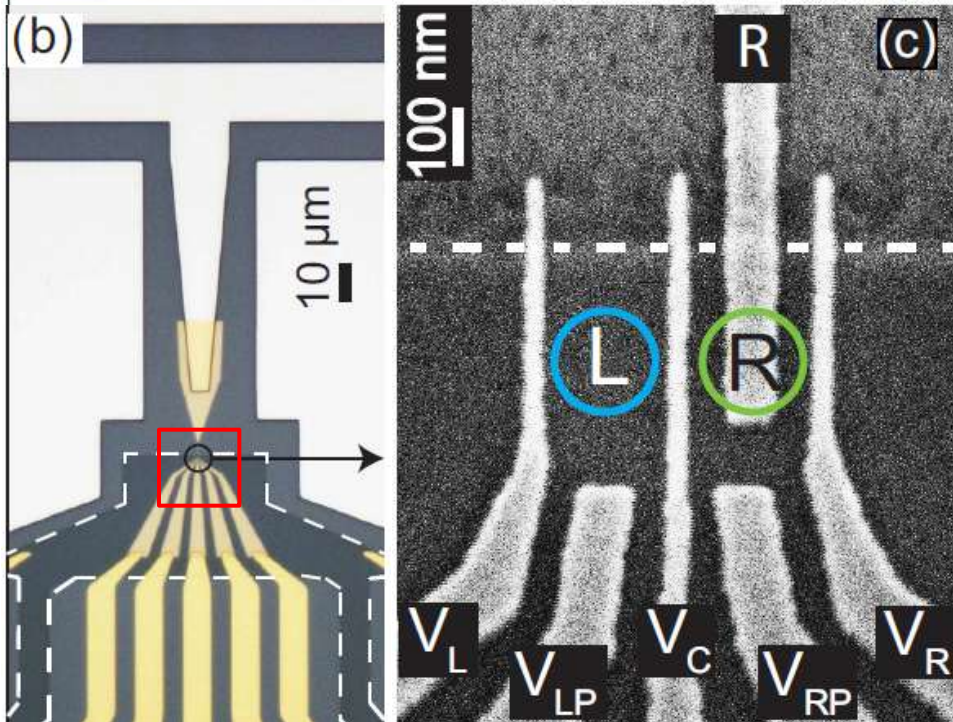
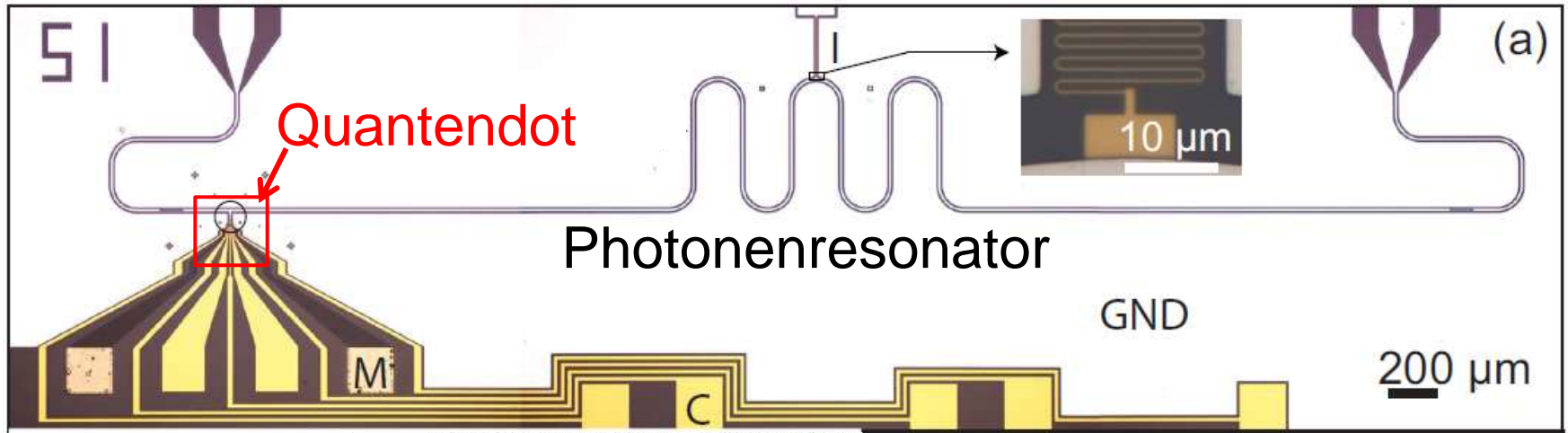
Licht:  
Photonen



Elektronen  
Tanamura (1989)

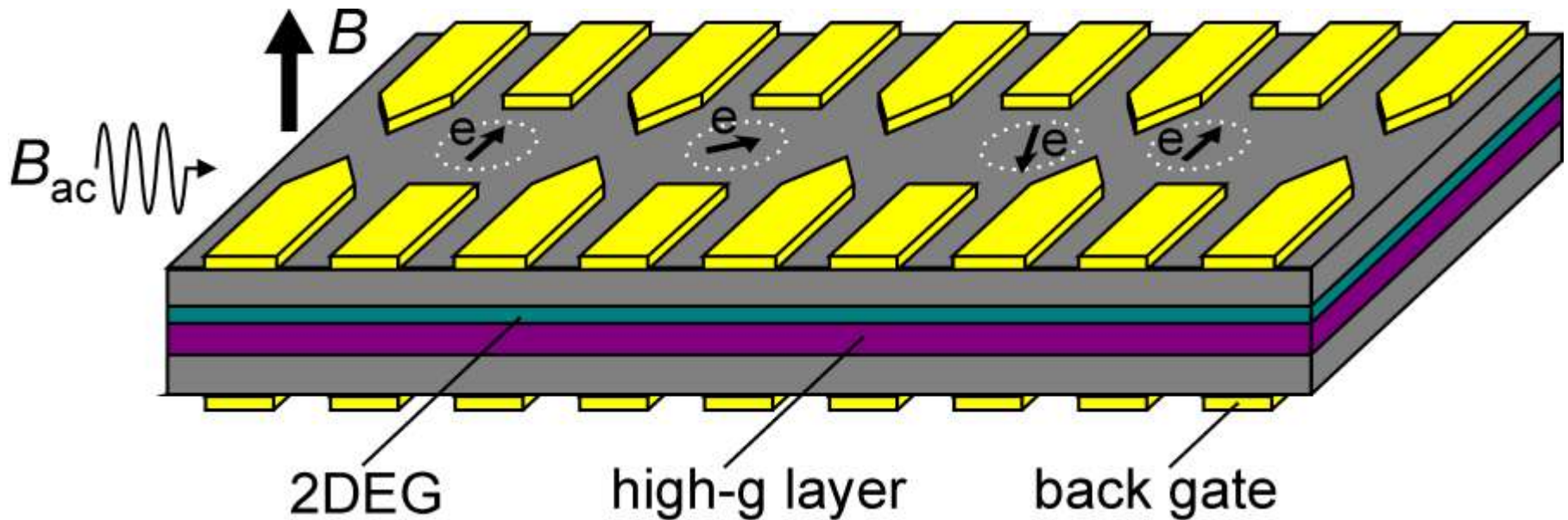


... und einzelne Photonen mit einzelnen Elektronen "interferieren" lassen



*Theoretiker sind sogar auf die Idee gekommen...*

*...einen Quantencomputer vorzuschlagen.*



# Klassische Computer

Information gespeichert in Einheiten von bits: (0) und (1)

Vergleich **Dezimalsystem** - **Binärsystem:**

$$0 - 0$$

$$1 - 1$$

$$2 = 2 \cdot 10^0 - 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$$

$$3 = 3 \cdot 10^0 - 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$$

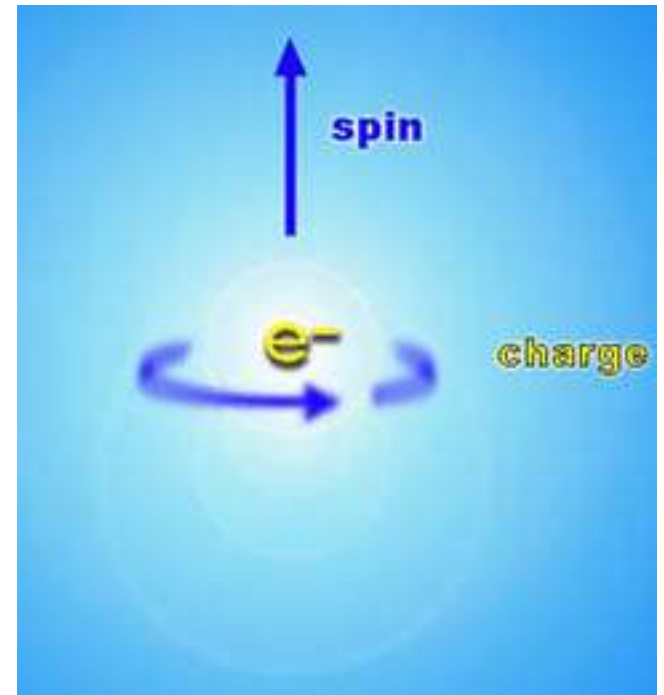
$$4 = 4 \cdot 10^0 - 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$$

$$17 = 1 \cdot 10^1 + 7 = 1 \cdot 10^0 - 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$$

# *Ein Bit im Quantencomputer*

Magnetnadel im Kompass

Ein Elektron ist auch ein Magnet





*Aber: das Elektron gehorcht der*

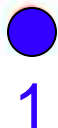
## *Quantenmechanik*

Das **Bit** wird zum **Qubit**.

$|0\rangle$  oder  $|1\rangle$

$$y = a|0\rangle + b|1\rangle$$

Das ist eine recht wilde Sache, die glücklicherweise nur in der Mikrowelt vorkommt.



*Ein Quantencomputer könnte manches besser,...*

*..., zum Beispiel, die Faktorisierung von Zahlen*

Erst mal einfach:  $6 = 2 \text{ mal } 3$   
oder  $15 = 3 \text{ mal } 5$   
oder  $8071 = ? \text{ mal } ?$

oder wie wär' s damit ?

1827365426354265930284950398726453672819048374987653426354857645283905612849667483920396069782635471628694637109586756325221901

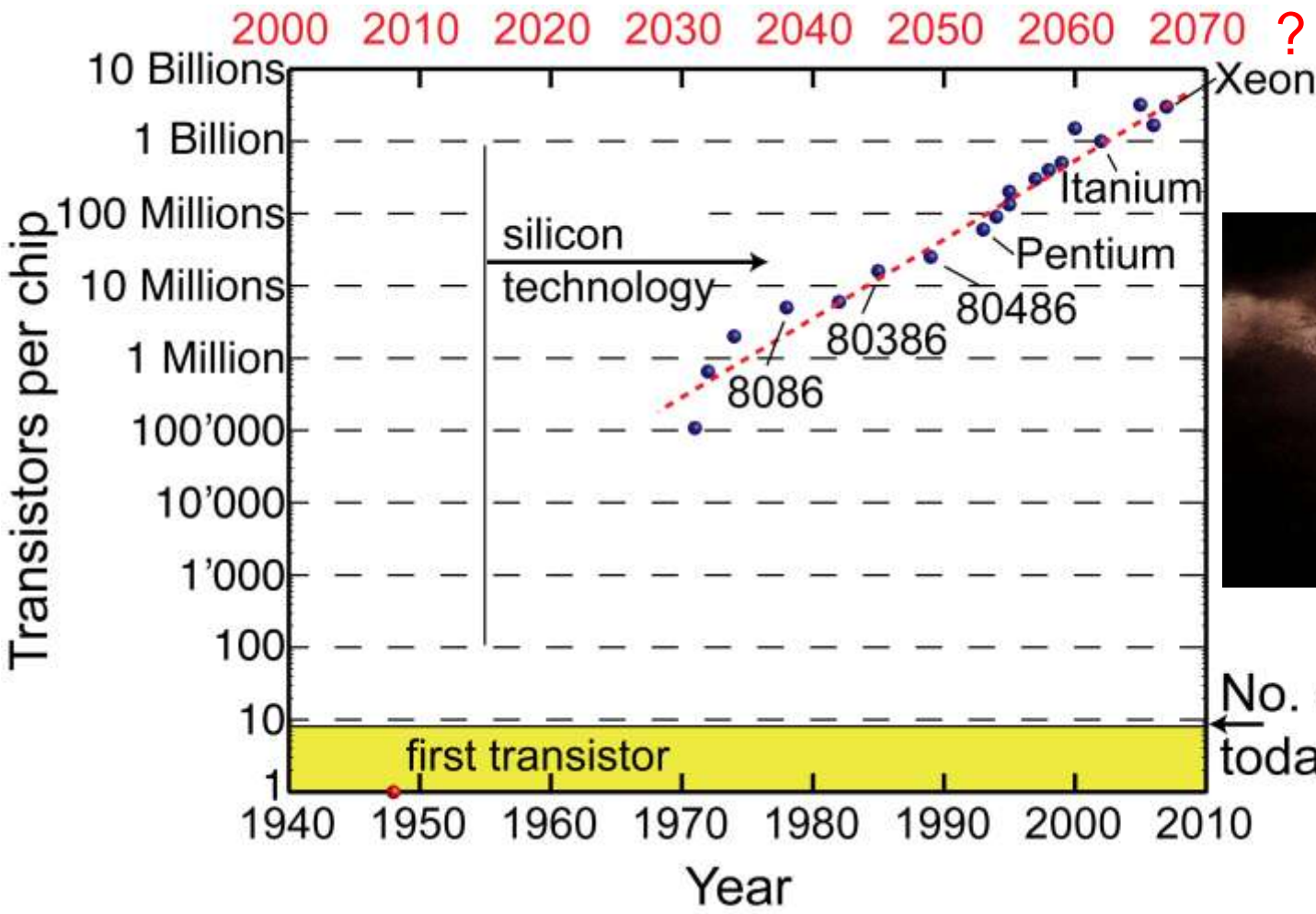
Ein moderner Computer faktorisiert diese 130-dezimal-Zahl innerhalb Tagesfrist, aber würden wir die Zahl nochmals in der Länge verdoppeln,

18273654263542659302849503987264536728190483749876534263548576452839056128496674839203960697826354716286946371095867563252219011342563957186720094761234528475683762910056734856354296715549867102912956488944532675920390161427795028374519672662854329715497

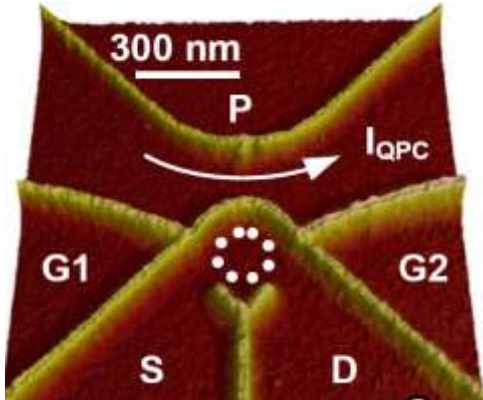
so bräuchte er Millionen von Jahren.

**Ein Quantencomputer würde den Job in Minutenschnelle erledigen**

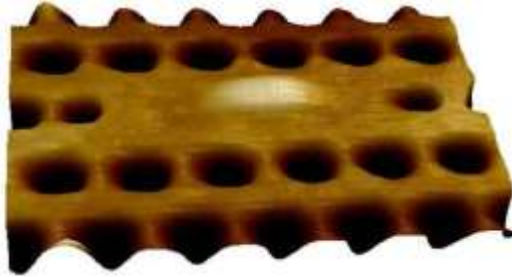
*Aber Vorhersagen über die Zukunft des Quantencomputers ... sind schwieriger, als die Wettervorhersage.*



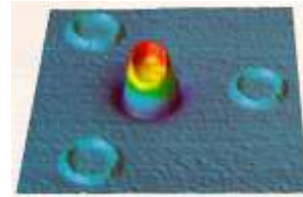
# quantum systems at ETH Zurich



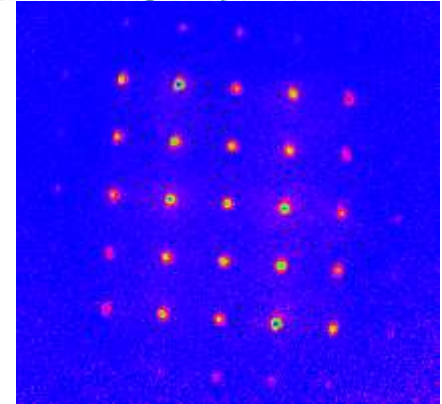
quantum dot



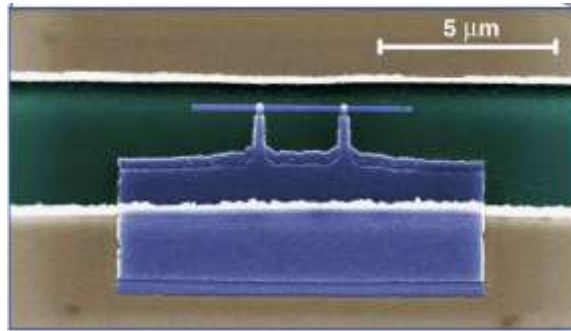
photonic crystals



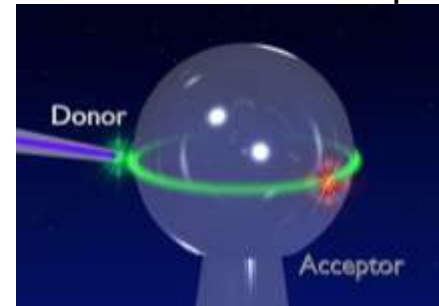
Hamilton battery



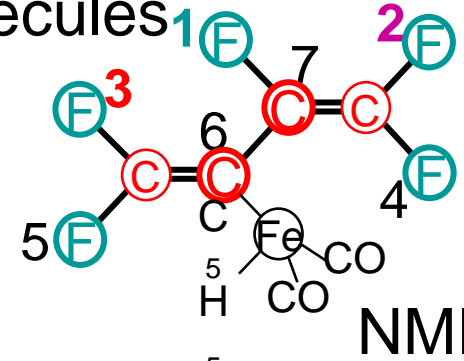
optical lattice



Superconducting qubits



molecules



quantum simulations



Rydberg atoms

# THE STABILITY OF THE BICYCLE

Tired of quantum electrodynamics, Brillouin zones, Regge poles? Try this old, unsolved problem in dynamics—how does a bike work?

David E. H. Jones

ALMOST EVERYONE can ride a bicycle, yet apparently no one knows how they do it. I believe that the apparent simplicity and ease of the trick conceals much unrecognized subtlety, and I have spent some time and effort trying to discover the reasons for the bicycle's stability. Published theory on the topic is sketchy and presented mainly without experimental verification. In my investigations I hoped to identify the stabilizing features of normal bicycles by constructing abnormal ones lacking selected features (see figure 1). The failure of early unridable bicycles led me to a careful consideration of steering geometry, from which—with the aid of computer calculations—I designed and constructed an inherently unstable bicycle.

## *The nature of the problem*

Most mechanics textbooks or treatises on bicycles either ignore the matter of their stability, or treat it as fairly trivial. The bicycle is assumed to be balanced by the action of its rider who, if he feels the vehicle falling, steers into the direction of fall and so traverses a curved trajectory of such a radius as to generate enough centrifugal force to correct the fall. This

---

David E. H. Jones took bachelor's and doctor's degrees in chemistry at Imperial College, London, and has since alternated between the industrial and academic life. Currently he is a spectroscopist with ICI in England.



*Viel Spass mit der Physik...*



„Das Erstaunlichste an der Welt ist, dass man sie verstehen kann.“

# *Halbleiterkristalle*



# *Entwicklung von Leuchtdioden*



1907 Henry Joseph Round SiC – Elektrolumineszenz



1950-1960 moderne GaAs LEDs – Infrarotlicht



Ende 1960er GaAsP rote LED



Mitte 1970er GaP grün und gelbe LEDs



Mitte 1980er GaAlAsP helle grüne LEDs



Mitte 1990er GaN und InGaN helle blaue LEDs



Ende 1990er weisse LEDs durch fluoreszierenden P



Heute: ultraviolett LEDs

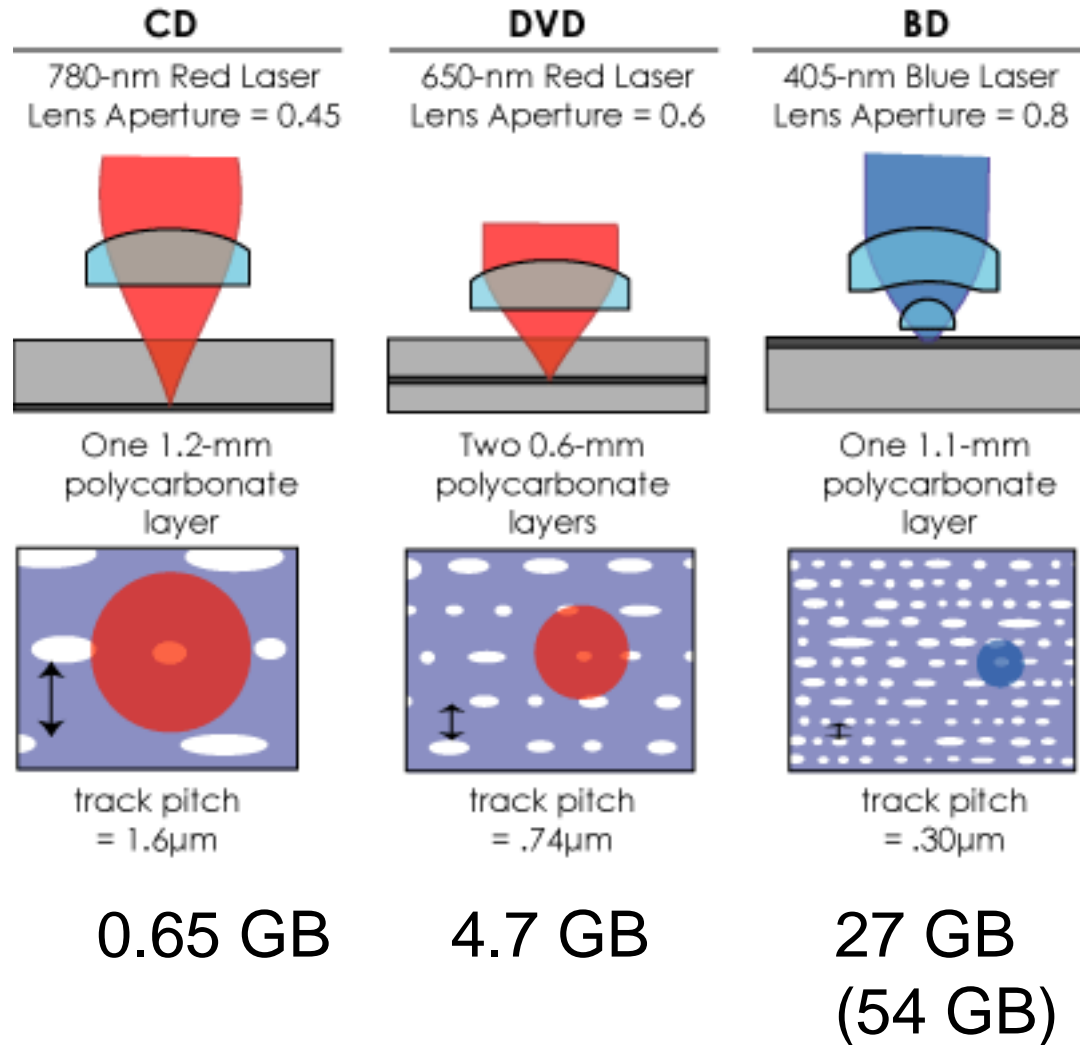




# Neue Speichermedien



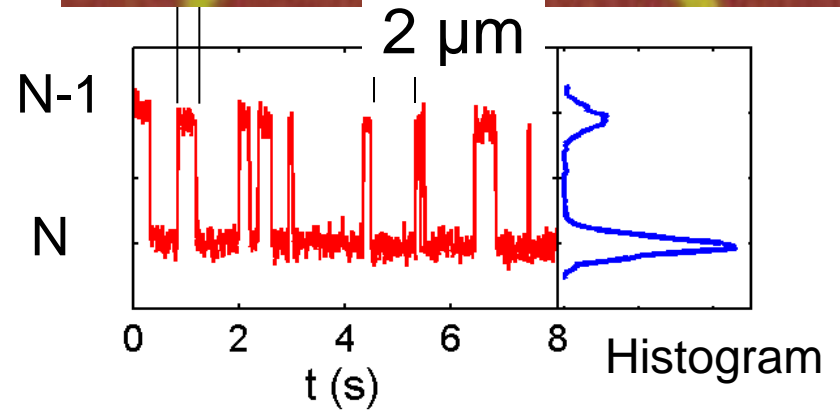
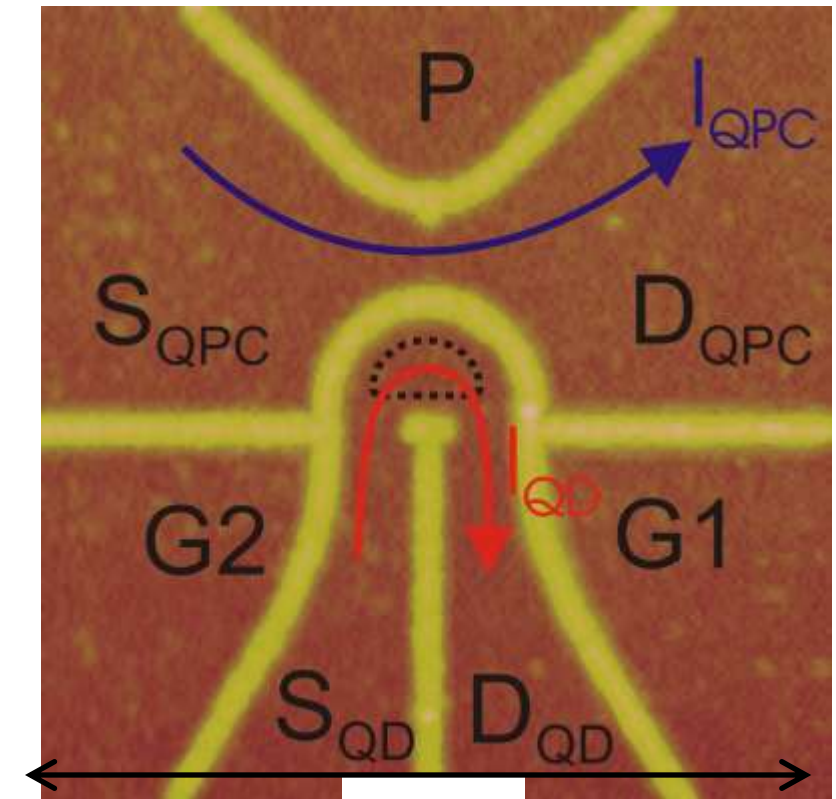
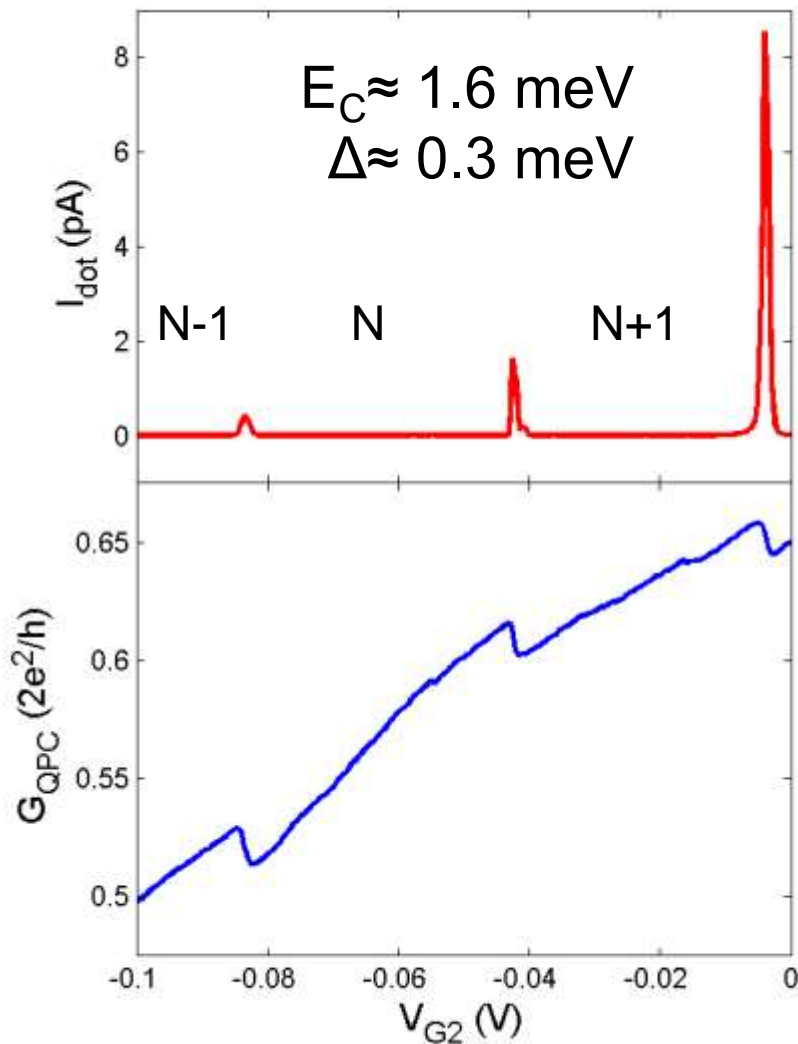
## CD vs. DVD vs. Blu-ray Writing



# *Schnelle Computer*



# Kontrolle über einzelne Elektronen



*Einzelne Quanten-Bauelemente können zu  
Quantenschaltkreisen vernetzt werden...*

