

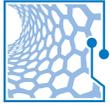
Nanoelektronik

als Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik

Peter Russer

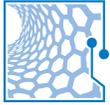
Lehrstuhl für Nanoelektronik
der Technischen Universität München

Email: russer@tum.de

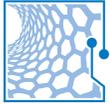


Einleitung

1. Was ist Nanoelektronik?
 2. Die Bedeutung der Nanoelektronik als Basistechnologie für den Industriestandort Deutschland
 3. Die Förderung der Nanoelektronik im internationalen Vergleich
 4. Geschichtliche Entwicklung der Elektronik
 5. Nahziele und Fernziele der Nanoelektronik
 6. acatech empfiehlt
-



Was ist Nanoelektronik?

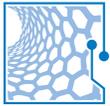


Nanoelektronik

Die National Nanotechnology Initiative (NNI, USA) schreibt zum Begriff Nanoelectronics:

- “Nanoelectronics, the application of nanotechnology to make electronic circuits, offers revolutionary alternatives to the component technology used in existing computer circuits“
- “Nanotechnology is the understanding and control of matter at dimensions between approximately 1 and 100 nanometers, where unique phenomena enable novel applications. Encompassing nanoscale science, engineering, and technology, nanotechnology involves imaging, measuring, modeling, and manipulating matter at this length scale.”

Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology: *The National Nanotechnology Initiative- Strategic plan 2007*. Washington, DC, 2007.

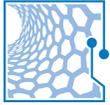


Nanoelektronik

Die Europäische Kommission umschreibt den Begriff “Nanoelektronik” wie folgt:

“Nanoelectronics can be defined as electronics on the deep submicron level – that is with circuit dimensions of less than 0.1 micron. The term covers both the manufacturing of ever-smaller and hence higher performance of existing semiconductor devices and advances in molecular electronics that involve exploiting single atoms or molecules.”

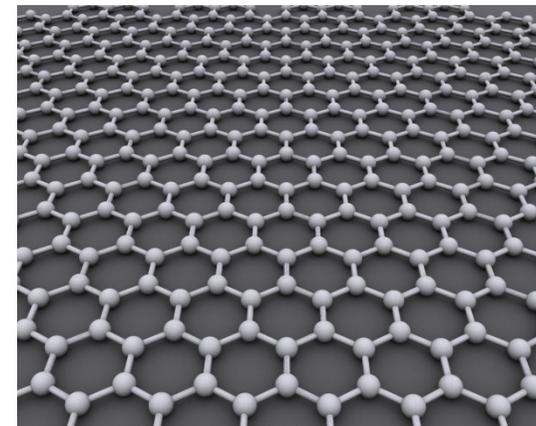
High Level Group of the European Commission:
Vision 2020 Nanoelectronics. Brüssel, 2004.

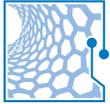


Nanoelektronik

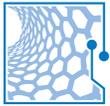
Hintergrund:

- Deutschland hat große Tradition und starke Stellung in der Halbleitertechnologie
- Vielzahl von Forschungsinitiativen, aber zögerliche Umsetzung in nanoelektronische Produkte
- Siliziumtechnologie
 - kleinere Strukturen
 - höhere Integrationsdichten
 - erweiterte Funktionalitäten
- Neue Materialien
- Neue Bauelemente
- Neue Systemarchitekturen



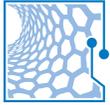


Die Bedeutung der Nanoelektronik als Basistechnologie für den Industriestandort Deutschland

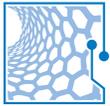


Die Bedeutung der Nanotechnologie für den Industriestandort Deutschland

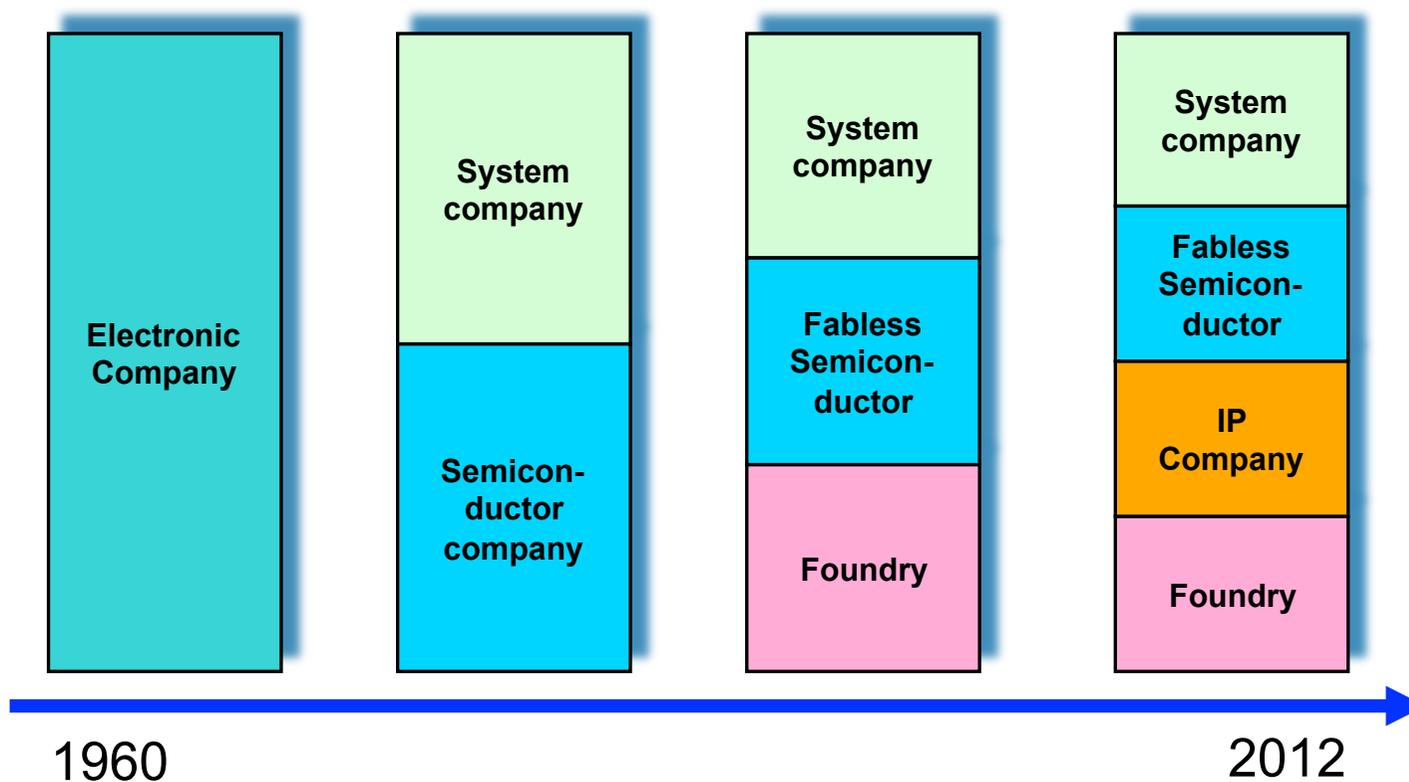
- Informations- und Kommunikationstechnik, Verkehrstechnik, Sensorik und Aktorik, Energietechnik und Medizintechnik stellen wichtige Anwendungsbereiche für nanoelektronische Technologien dar.
 - Die Integration dieser unterschiedlichen Technologien wie auch die Gewähr der Zuverlässigkeit sind hier besondere Herausforderungen.
 - Zur Umsetzung von Innovationen außerhalb der Großindustrie wurde die Notwendigkeit festgehalten, dass aktuellste Fertigungstechnologien für kundenspezifische Lösungen verfügbar gemacht werden sollten.
 - Eine kostengünstige Verfügbarkeit kann hier durch den Aufbau von Zentren und Netzwerken zur Förderung der Kooperation gelingen.
- [acatech bezieht Position Nr. 8: Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland, www.acatech.de, 2011.](http://www.acatech.de)



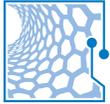
Förderung der Nanoelektronik im internationalen Vergleich



Semiconductor Industry: Vertical Disintegration

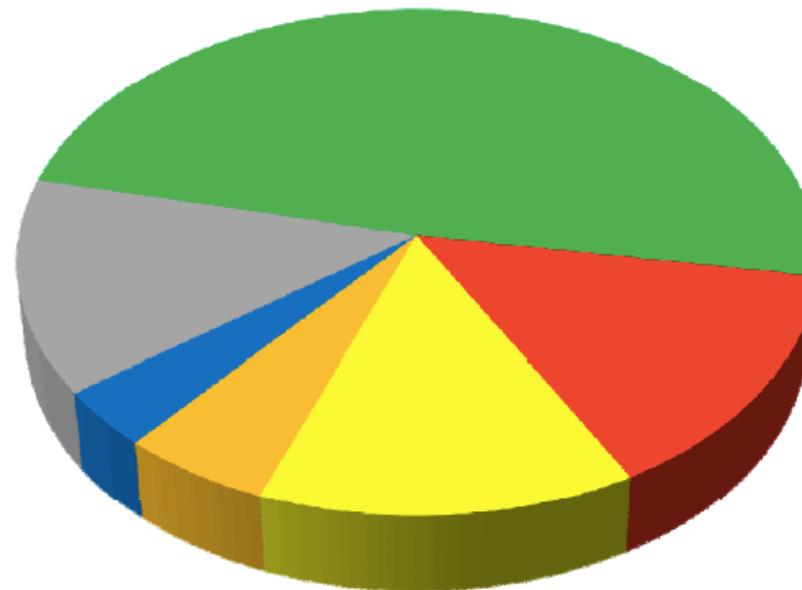


Manfred Glesner: „Podiumsdiskussion ‚Quo Vadis Nanoelektronik?‘ International Symposium on Frontiers of the Nanoelectronics, TUM, 8.-9.9.2010.

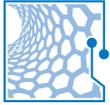


Förderbereiche Elektroniksysteme und Elektromobilität

- Mobilität, Elektromobilität
- Energie/Umwelt
- Maschinenbau/Automatisierung
- Medizin/Gesundheit
- Sicherheit
- Basistechnologien der Elektronik



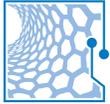
Ulrich Katenkamp: „Die Förderung von Elektroniksystemen und Elektromobilität durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)“, Vortrag gehalten auf acatech-Diskussionsveranstaltung im Rahmen des Projekts „Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland“ am 21.10.2009.



Förderung der Nanoelektronik im internationalen Vergleich

- Weltweit gibt es sehr starke öffentliche Förderung im Bereich der Nanotechnologie.
- Diese beinhaltet auch die Förderung der Nanoelektronik.
- Die Staaten verfolgen unterschiedliche Förderstrategien.
- Asiatische Schwellenländer wie China, Südkorea und Taiwan zeigen hierbei zu den etablierten Industrienationen vergleichbare Aufwendungen.
- Noch deutlicher werden deren Anstrengungen, wenn ihre Ausgaben mit der lokalen Kaufkraft normiert werden.
- Hier liegt China bereits an dritter Stelle nach den USA und Japan und vor Deutschland.

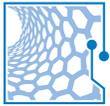
acatech bezieht Position Nr. 8: Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland, www.acatech.de, 2011.



Förderung der Nanoelektronik im internationalen Vergleich

- Auch in Europa gab und gibt es starkes öffentliches Interesse und Förderung für die Nanotechnologie.
- Die Europäische Union fördert Forschung und technologische Entwicklungen in zeitlich begrenzten Forschungsrahmenprogrammen.
- Das FP6 beinhaltete eine explizite Förderung der Nanotechnologie und Nanoelektronik in Höhe von €1.4 Mrd.
- Ausgehend von dem Bericht der „High Level Group“ wurde das „European Nanoelectronics Initiative Advisory Council“ (ENIAC) als eine europäische Technologieplattform gegründet.
- Aufgabe des ENIAC ist die Erstellung einer strategischen Forschungsagenda (SRA), um sowohl öffentliche als auch private Investitionen zu steuern und zu motivieren.

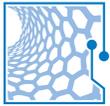
[acatech](http://www.acatech.de) bezieht Position Nr. 8: Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland, www.acatech.de, 2011.



Förderung der Nanoelektronik im internationalen Vergleich

- Für das FP7 vollzog die ENIAC einige Änderungen in der Organisationsstruktur sowohl für die SRA als auch für die Industriekooperation.
- Die ENIAC Joint Technology Initiative (JTI) für Nanoelektronik soll im Wesentlichen die Ergebnisse der SRA in konkrete anwendungsorientierte Projekte mit hoher Beteiligung von kleineren und mittleren Unternehmen (KMU) umsetzen.
- Für den Zeitraum 2008-2017 beträgt das Budget dieser Joint Technology Initiative 3 Mrd. €, von denen 1.7 Mrd. € aus Sachleistungen aus dem privaten Sektor bestehen.
- Die restlichen Finanzmittel werden überwiegend von den Mitgliedsstaaten und der EU gestellt

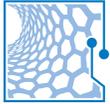
acatech bezieht Position Nr. 8: Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland, www.acatech.de, 2011.



Förderung der Nanoelektronik im internationalen Vergleich

- Des Weiteren fungiert die ENIAC JTI als Schnittstelle zwischen den öffentlichen Verwaltungen in der EU und den Mitgliedsstaaten und einer neu gegründeten Industrievereinigung (AENEAS), in der die Akteure der Forschung und Entwicklung (KMU, Großunternehmen und öffentliche Forschungseinrichtungen) organisiert sind.
- Weitere geförderte Forschungsinitiativen stellen EUREKA Programme dar.
- Das MEDEA+, ein EUREKA Programm mit mikroelektronischer Ausrichtung wurde im Jahr 2008 vom CATRENE Programm abgelöst welches Nanoelektronik beinhaltet .
- Im Jahr 2010 innerhalb der Europäischen Kommission eine Analyse von sogenannten Key Enabling Technology gestartet. Dazu wurde auch die Mikro-/Nanotechnologie ausgewählt.

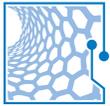
acatech bezieht Position Nr. 8: Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland, www.acatech.de, 2011



Förderung der Nanoelektronik im internationalen Vergleich

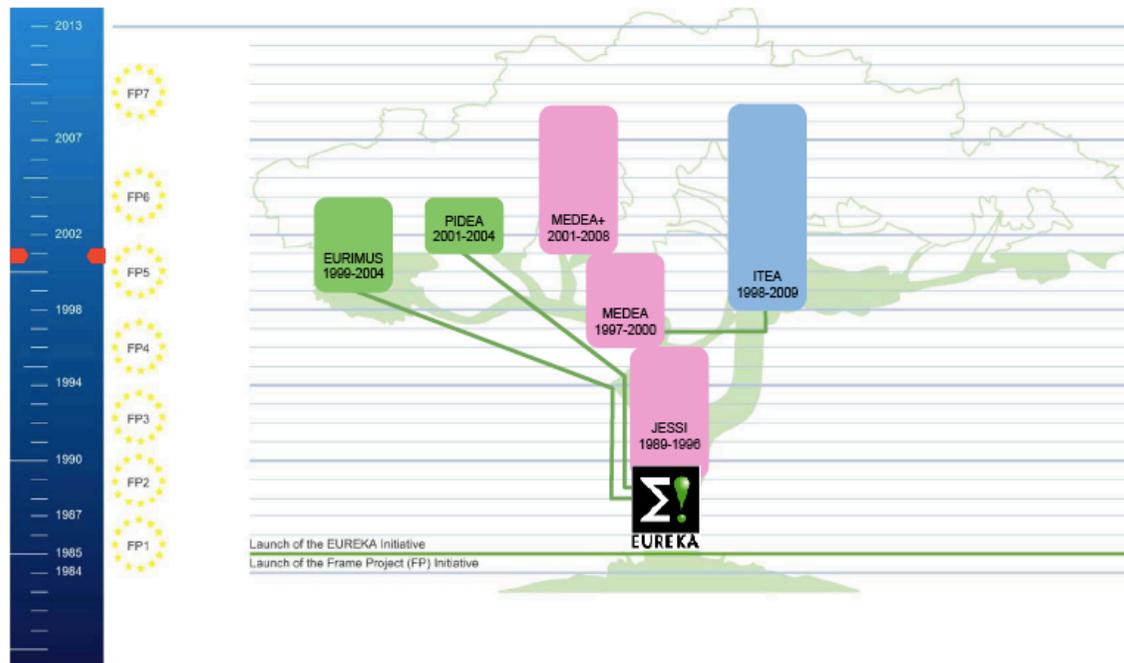
- Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert die Nanotechnologie seit 2001 innerhalb der High-Tech Strategie „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“.
- Eine mikro- bzw. nanoelektronische Komponente ist mit der Leitinnovation „NanoFab“ mit einem Fördervolumen von €323 Mio. enthalten.
- Bis einschließlich 2006 wurde innerhalb des Förderprogramms „IT-Forschung 2006“ durch das Förderkonzept „Nanoelektronik“ Projekte mit einem Gesamtvolumen von 396 Mio € gefördert.
- Der Förderkatalog des BMBF listet 775 laufende Projekte (Stand 01/2011) mit einem „Nano“ Bezug.

acatech bezieht Position Nr. 8: Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland, www.acatech.de, 2011.

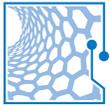


Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Europäische IKT-Initiativen – 2001



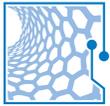
Ulrich Katenkamp: „Die Förderung von Elektroniksystemen und Elektromobilität durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBWF)“, Vortrag gehalten auf acatech-Diskussionsveranstaltung im Rahmen des Projekts „Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland“ am 21.10.2009.



Spitzencluster CoolSilicon



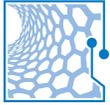
Ulrich Katenkamp: „Die Förderung von Elektroniksystemen und Elektromobilität durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBWF)“, Vortrag gehalten auf acatech-Diskussionsveranstaltung im Rahmen des Projekts „Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland“ am 21.10.2009.



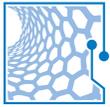
Förderung der Nanoelektronik im internationalen Vergleich

- Von hoher Bedeutung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie ist das Vermögen, neue Forschungsergebnisse aus Universitäten und Forschungszentren in neuen Produkten umzusetzen.
- Ein solcher Wissenstransfer erfordert Finanzmittel, aber erst hierdurch entsteht aus der Forschung Wertschöpfung, die den gesellschaftlichen Wohlstand sichern kann.
- Vergleicht man nun die Finanzmittel für den Bereich der Nanoelektronik, ist auffällig, dass trotz ähnlicher öffentlicher Förderung in Europa und den USA in den USA in Summe mehr Geld durch private Investitionen in den Sektor fließt.
- Japan kann sogar höhere Gesamtinvestitionen aufweisen, obwohl die öffentlichen Mittel deutlich unter denen Europas liegen.

acatech bezieht Position Nr. 8: Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland, www.acatech.de, 2011.



Die geschichtliche Entwicklung der Elektronik

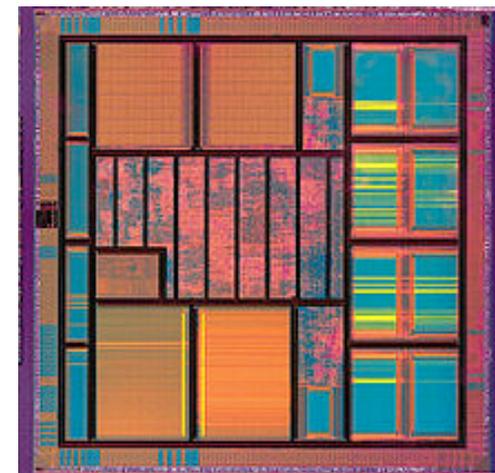


Geschichtliche Entwicklung der Elektronik

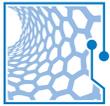
- Im folgenden wird ein geschichtlicher Überblick über die Entwicklung der Elektronik von den Anfängen bis zu den ersten integrierten Schaltkreisen gegeben.



Kupfersulfidkristall
1874



VLSI - Schaltkreis
2012



Karl Ferdinand Braun

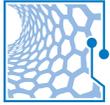
Grundlegende Beiträge zu Elektronik und Radiotechnik:

1. Entdeckung des Sperrschicht-Gleichrichtereffektes (1874)
2. Erfindung der Kathodenstrahlröhre (1897)
3. Einführung der gekoppelten Resonanzkreise für die drahtlose Telegraphie (1898)

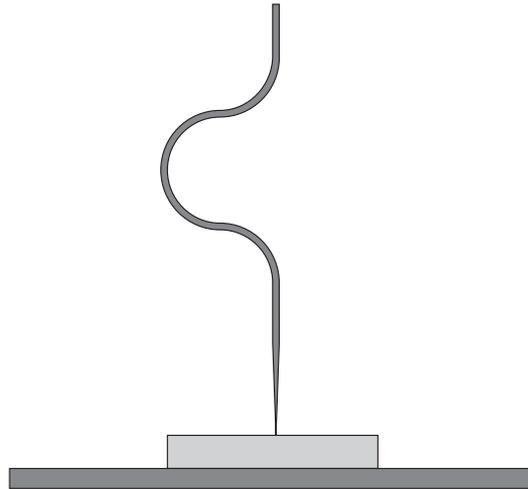


Ferdinand Braun
1850 - 1918

Peter Russer: "Ferdinand Braun - A Pioneer in Wireless Technology and Electronics",
In „A Wireless World“, Contributions to the history of the Royal Swedish Academy of Sciences,
Vol. 42, Firenze University Press, 2012.



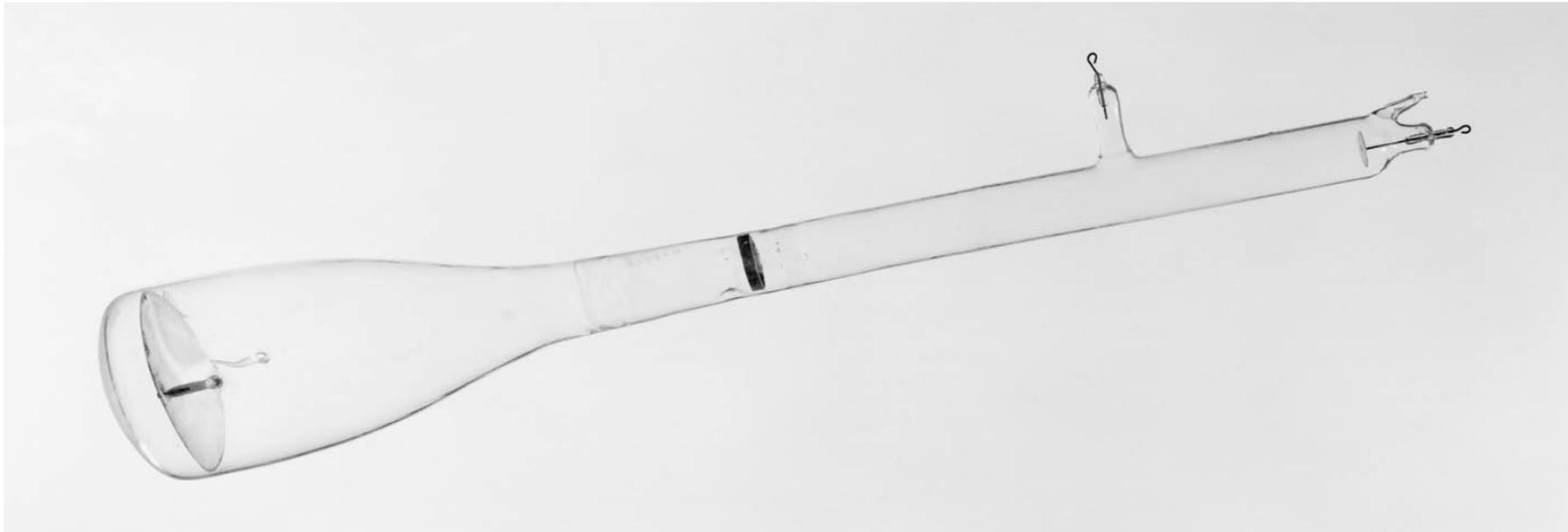
Der Sperrschicht-Gleichrichtereffekt



Ferdinand Braun: „Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle“, eingereicht bei [Annalen der Physik und Chemie](#) am 23 November 1874. Beobachtung, dass der elektrische Widerstand verschiedener natürlicher und künstlicher Schwefelsulfide von der der Richtung, der Intensität und der Dauer des elektrischen Stromes abhängig ist.

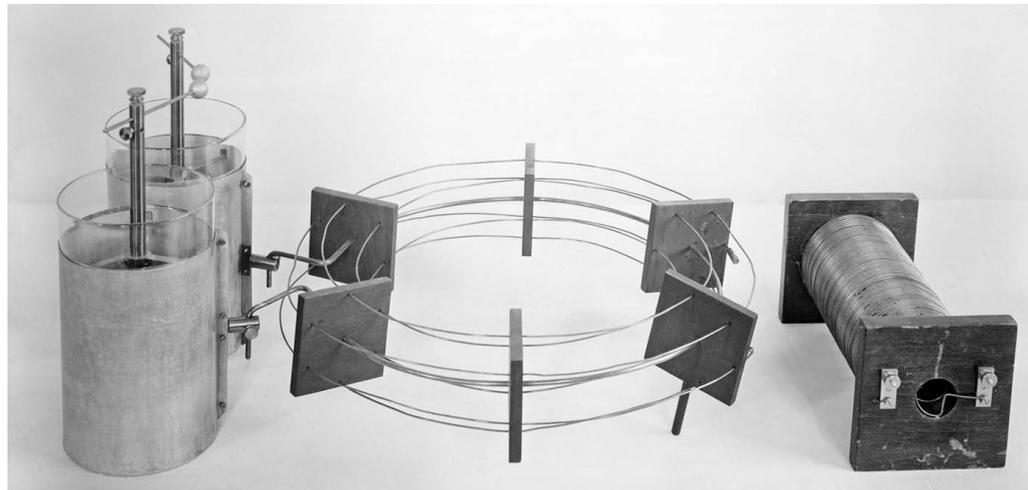
F. Braun, “Ueber die unipolare Elektrizitätsleitung durch Gasschichten von verschiedener Leitungsfähigkeit”, *Annalen der Physik und Chemie*, 230(1875), 4.

1897: Die Braun'sche Röhre



- Ferdinand Braun: „Über ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufes variabler Ströme“, Annalen der Physik, 15. Februar 1897.
- In dieser Arbeit auch Beschreibung des Oszilloskops.

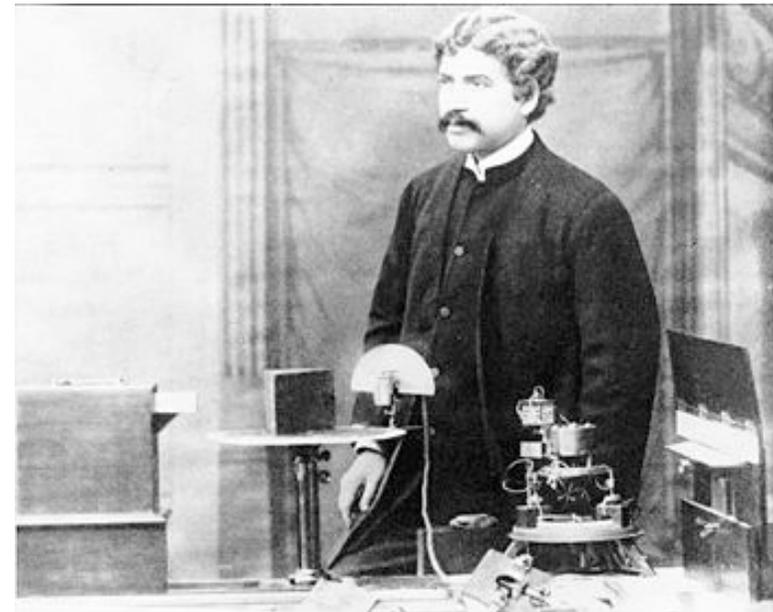
1898: Die gekoppelten Schwingkreise



- Die Einführung der gekoppelten Schwingkreise durch Ferdinand Braun im Jahr 1898 war eine Voraussetzung, die es ermöglichte, in der drahtlosen Telegraphie die Überbrückung größerer Distanzen und war die Voraussetzung für Marconi's erste transatlantische Funkübertragung im Jahr 1901.

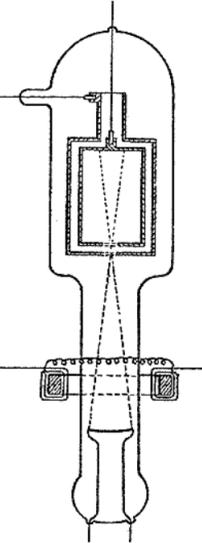
1899: Erster Halbleiter-Detektor

- **Jagadis Chandra Bose**, Professor für Physik am Presidency College in Kolkata, Indien, verwendete mit Metalldrähten kontaktierte Bleisulfidkristalle zur Detektion von Millimeterwellen.
- Bose berichtete von seinen Experimenten am 27. April 1899 in der Royal Society in London.
- Boses Detektor wurde von Marconi in seiner ersten transatlantischen Funktelegraphie-Übertragung verwendet.



Jagadis Chandra Bose
1858 - 1937

1906: Elektronenröhre



für Schutzklasse.....
Gruppe 21g.

KAISERLICHES PATENTAMT.

PATENTSCHRIFT
— № 179807 —
KLASSE 21g. GRUPPE 4.

ROBERT VON LIEBEN IN WIEN:
Kathodenstrahlenrelais.

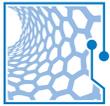
Patentiert im Deutschen Reiche vom 4. März 1906 ab.

Die vorliegende Erfindung bezweckt, mittels Stromschwankungen kleiner Energie solche von großer Energie auszulösen, wobei Frequenz und Kurvenform der ausgelösten Stromschwankungen denen der auslösenden entsprechen

hängigen Stromkreises magnetisch oder elektrostatisch verschieden stark abgelenkt. Diese Ablenkungen bewirken nun durch die Wahl der im folgenden beschriebenen Anordnung die gewünschten starken Schwankungen. die



Robert von Lieben
1878 - 1913



Die Entwicklung der Halbleiterphysik



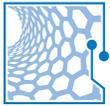
Arnold Sommerfeld
1868 - 1951



Felix Bloch
1905 - 1983

Es dauerte mehr als fünfzig Jahre von Ferdinand Brauns Entdeckung des Sperrschicht-Gleichrichter-Effekts im Jahr 1874 bis durch die Arbeiten von **Arnold Sommerfeld** und **Felix Bloch** im Jahr 1928 ein Verständnis der elektronischen Eigenschaften von Festkörpern auf Basis der Quantentheorie erzielt wurde.

A. Sommerfeld, "Zur Elektronentheorie der Metalle", *Naturwissenschaften*, 16(1928), 21, pp. 374–381.
F. Bloch, "Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern", *Zeitschrift für Physik*, 52(1929), 7, pp. 555-600.



1939: Theorie des Halbleiter-Gleichrichters

- Auf Basis der quantenmechanisch begründeten Theorie der Halbleiter entwickelte Walter Schottky eine Theorie der Sperrschicht- und Spitzengleichrichter, die grundlegend für das Verständnis aller modernen Halbleiterbauelemente ist.
- W. Schottky: “Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht- und Spitzengleichrichter,” Zeitschrift für Physik, Bd. 113, Nr. 5, pp. 367–414, Mai 1939.



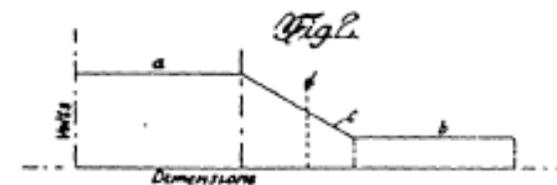
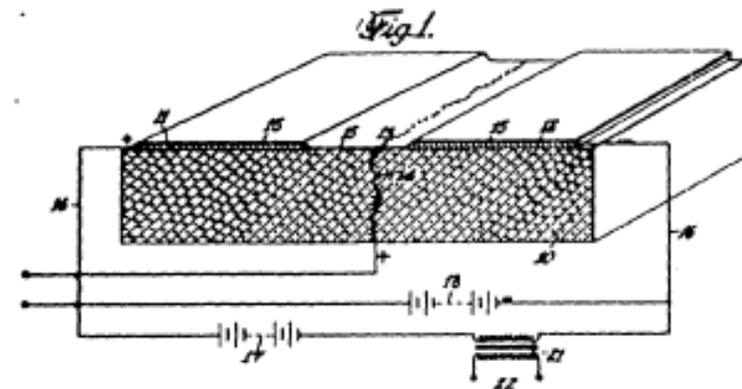
Walter Schottky
1886 - 1976

1925: Feldeffekttransistor



Julius Edgar Lilienfeld
1882 – 1963

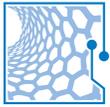
Jan. 28, 1930. J. E. LILIENFELD 1,745,175
METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS
Filed Oct. 8, 1926



US Patent 1,745,175

Angemeldet: 8.10.1926, erteilt: 28.1.1930

B. E. Crawford: *The invention of the transistor*, Master Thesis, Univ. of Vermont, 1991.



1948: Der Bipolartransistor



William Bradford Shockley



John Bardeen

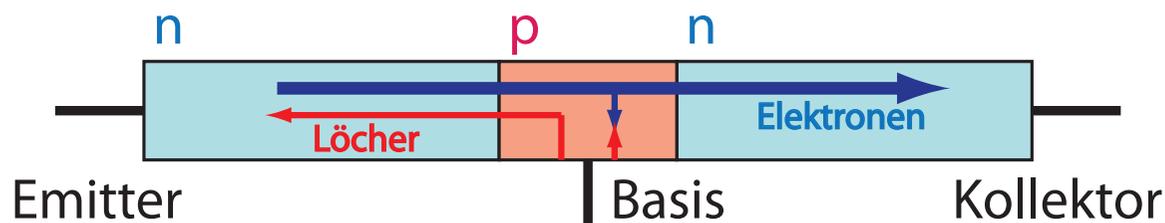


Walter Houser Brattain

J. Bardeen, W. H Brattain: *The Transistor. A Semi-Conductor Triode*. In: *Physical Review*. 74, Nr. 2, 1948,



Nachbau des ersten Transistors von 1947/48
Nixdorf Museum



1948: Der Bipolartransistor



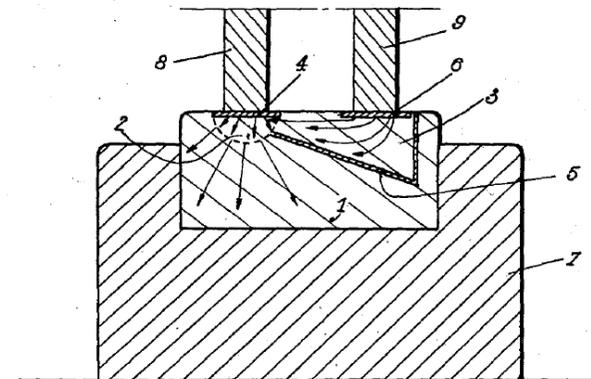
Herbert F. Mataré
1912 - 2011



Heinrich Welker
1912 - 1981

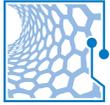
March 30, 1954 H. F. MATARÉ ET AL 2,673,948
CRYSTAL DEVICE FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS
BY MEANS OF A SOLID SEMICONDUCTOR
Filed Aug. 11, 1949 2 Sheets-Sheet 1

Fig. 1



Nach 1945 Arbeit bei Westinghouse in Paris – erster europäischer Transistor

H. F. Mataré, H. Welker: Patent FR1010427: *Nouveau système cristallin à plusieurs électrodes réalisant des effets de relais électroniques*. Angemeldet am 13. August 1948.



1949: Integrierter Schaltkreis

Werner Jacobi
1904 – 1985?



DEUTSCHES PATENTAMT

50 PATENTSCHRIFT

Nr. 833 366

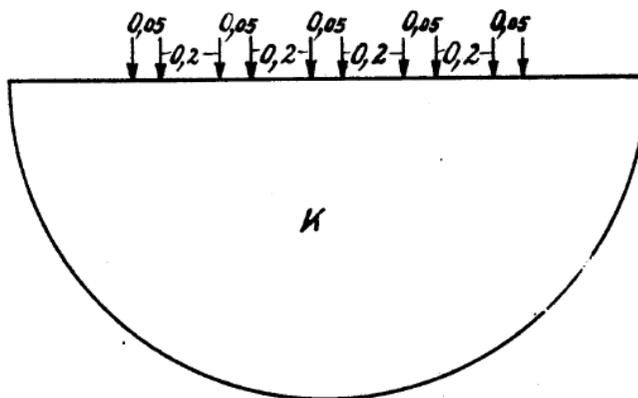
KLASSE 21a² GRUPPE 18⁰⁸

p 2589 VIII a / 21 a² B

PATENTANSPRÜCHE:

1. Halbleiterverstärker, dadurch gekennzeichnet, daß auf den Halbleiter mehrere in verschiedenen Schalt- bzw. Verstärkerstufen wirkende Elektrodensysteme aufgesetzt werden.
2. Halbleiterverstärker, insbesondere nach

55

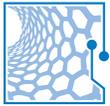


Dr. phil. Werner Jacobi, Erlangen
ist als Erfinder genannt worden

Siemens & Halske A. G., Berlin und München

Eingereicht am 15. April 1949

Patentiert im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland vom 15. April 1949 an
Patenterteilung bekanntgemacht am 15. Mai 1952



1949: Integrierter Schaltkreis als

Wenn der Halbleiter in der zur Zeit bekannten Form vielleicht auch nicht geeignet ist, in allen Fällen von Verstärkeranordnungen an die Stelle einer Elektronenröhre zu treten, so scheint seine Anwendung jedoch für bestimmte Zwecke vorteilhaft zu sein. So dürfte er sich u. a. besonders für Schwerhörigengeräte eignen. Aus dieser Zweckbestimmung heraus entsteht die Aufgabe, deren Lösung selbstverständlich auch für jegliche andere Anwendung des Halbleiterverstärkers grundsätzliche Bedeutung z. B. aus preislichen Gründen hat, einen solchen Halbleiterverstärker nicht nur billig, sondern auch raum-, gegebenenfalls auch gewichtsparend aufzubauen. Zur Lösung dieser Aufgabe wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, auf den Halbleiter mehrere in verschiedenen Schalt- bzw. Verstärkerstufen wirkende Elektroden zu setzen.

Eingereicht am 15. April 1949

Patenterteilung bekanntgemacht am 15. Mai 1952

1. Halbl
net, daß a
schiedenen
kende Elek
2. Halbl

5

10

15

AMT

RIFT

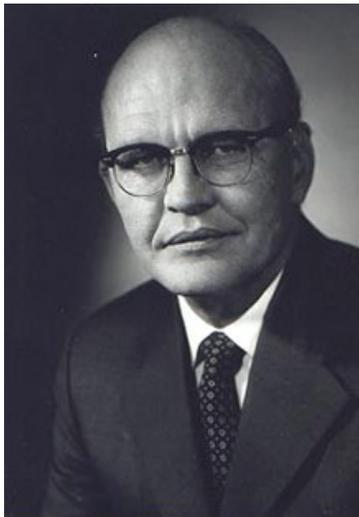
18 08

langen
ten

nd München

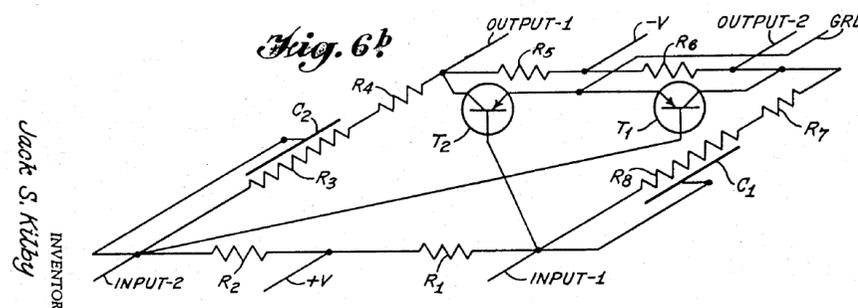
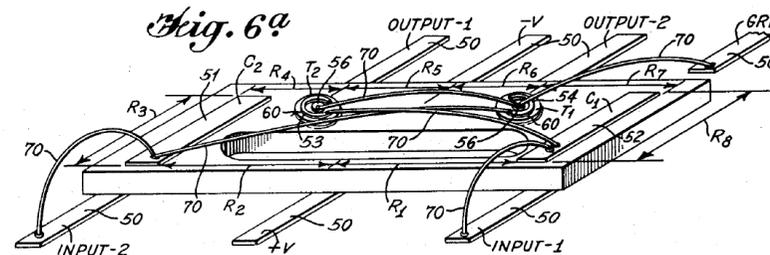
d vom 15. April 1949 an

1958: Integrierter Schaltkreis

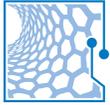


Jack S. Kilby
1923-2005

Jack S. Kilby realisierte 1958 bei Texas Instruments den ersten integrierten Schaltkreis.

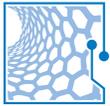


- Jack S. Kilby: *Invention of the integrated circuit*. In: *IEEE Transactions on Electron Devices*. 23, Nr. 7, 1976, S. 648–654.

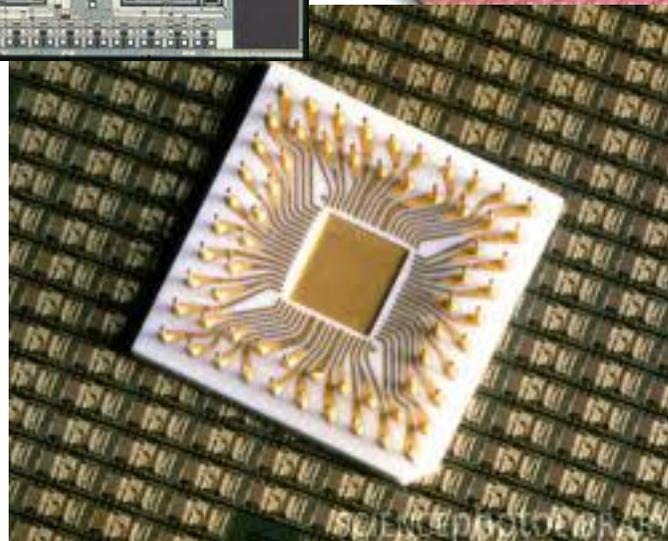
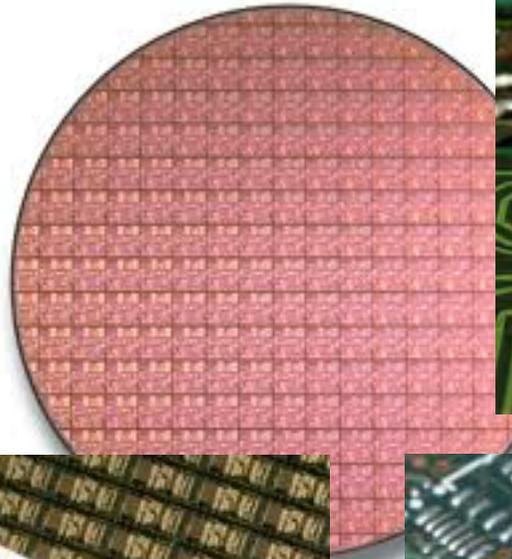
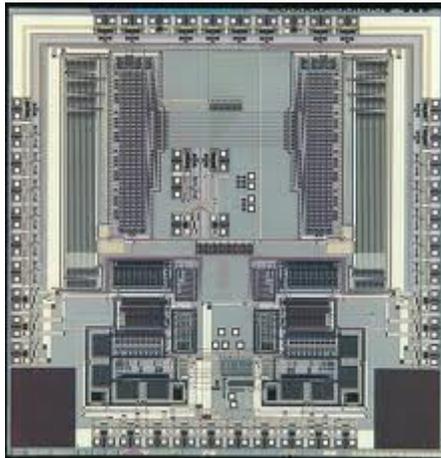


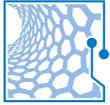
Mikroelektronik

- Gegenstand der Mikroelektronik sind miniaturisierte Elektronische Schaltungen, vor allem integrierte Schaltungen.
- In monolithisch integrierten Schaltungen werden verschiedene Bauelemente, wie z.B. Transistoren, Dioden, Widerstände, Kondensatoren, Induktivitäten in einheitlicher Technologie auf einem gemeinsamen Halbleitersubstrat integriert.
- Das heute wichtigste Substratmaterial ist Silizium.
- VLSI (very large scale integration) – Technologie ermöglicht heute, auf einem Chip Rechenleistungen unterzubringen, welche die von Großrechenanlagen der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts um Größenordnungen übertrifft.



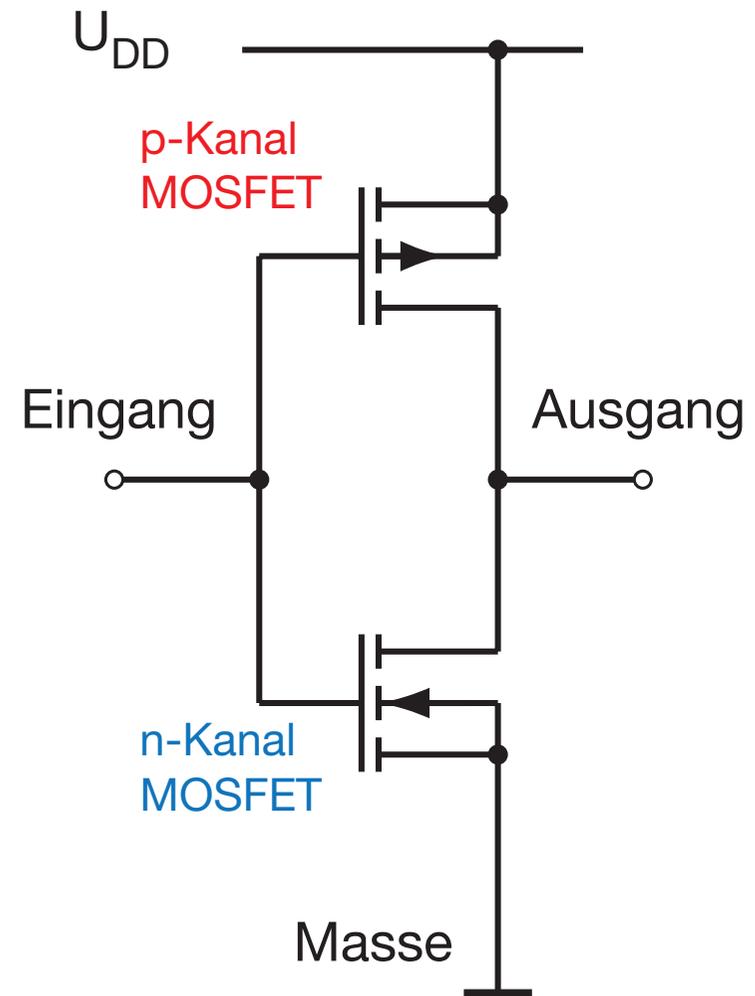
Integrierte Schaltkreise





CMOS - Technologie

- Die siliziumbasierte komplementäre Metall-Oxid-Halbleitertechnologie (CMOS) basiert auf der Kombination von komplementären MOSFETs (metal oxide semiconductor field effect transistors).
- In den letzten 25 Jahren entwickelte sich die CMOS-Halbleitertechnologie Mainstreamtechnologie für digitale, analoge und Mixed-Signal-Anwendungen.



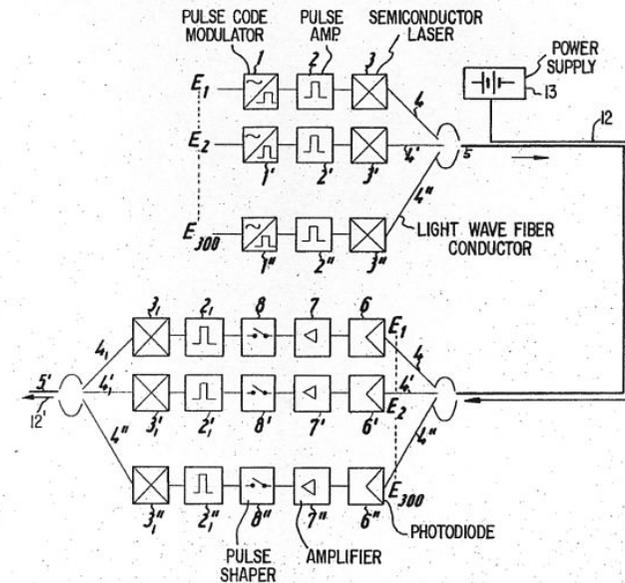
1966: Optoelektronik



Manfred Börner
1929 - 1996



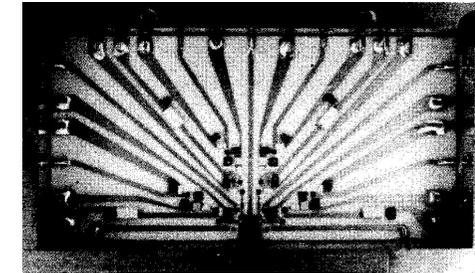
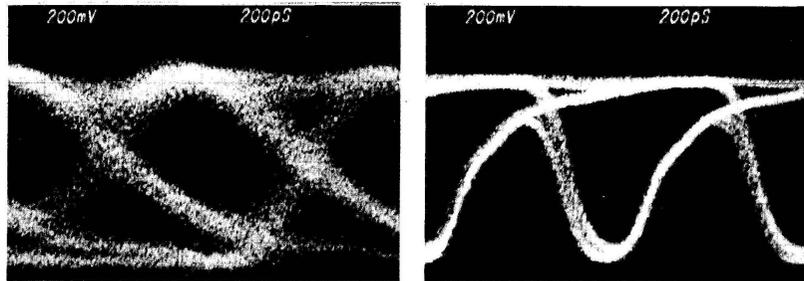
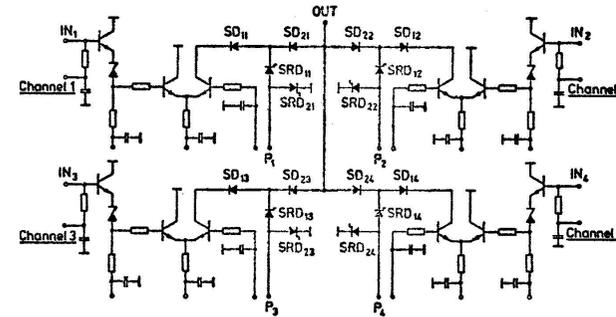
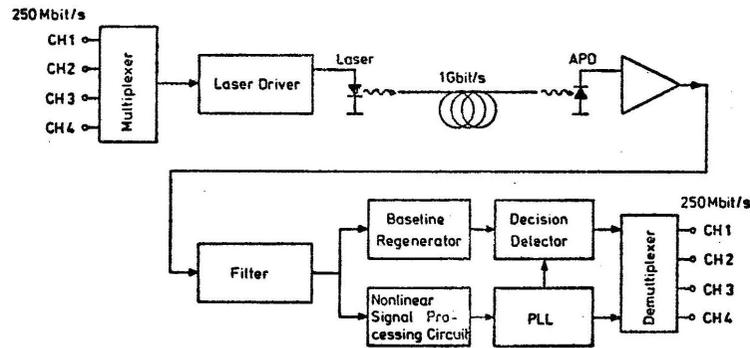
Charles Kao
* 1933



Patent Börner 1966

- Manfred Börner: „Mehrstufiges Übertragungssystem für in Pulsmodulation dargestellte Nachrichten,“ DP 1 254 523, erteilt: 21. Dez. 1978, eingereicht: 30. April 1966.
- Charles K. Kao and George A. Hockham, “Dielectric–fibre surface waveguides for optical frequencies,“ *Proceedings of the IEE*, 113:1151–1158, 7 July 1966.
- Alain Werts: «Propagation de la lumière cohérente dans les fibres optiques. *L'Onde Électrique*», 46:967–980, 1966.

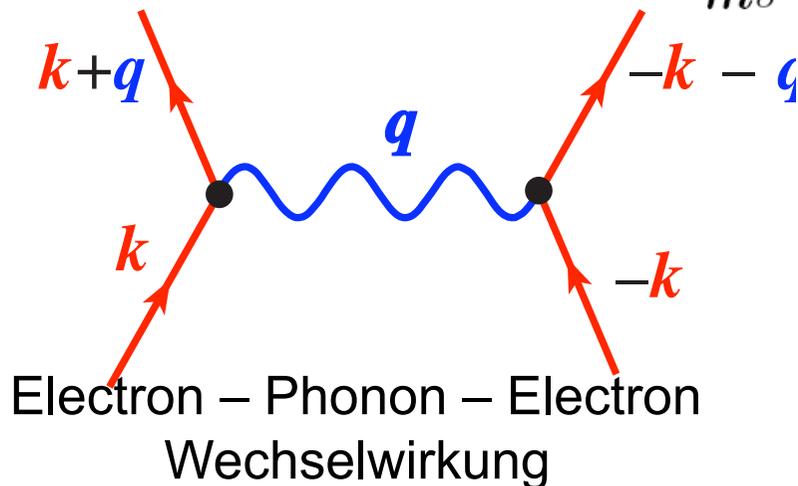
1978: 1 Gbit/s Lichtleitfaserübertragungsstrecke



Johann Gruber, Peter Marten, Reinhard Petschacher, Peter Russer, and Edgar Weidel.
 "A 1Gbit/s fibre optic communication link. In *Proc. 4th European Conference on Optical Communication*," *Genova*, pages 556–563, September 12th–15th 1978.

1957: BCS – Theorie der Supraleitung

$$H = \sum_{k\sigma} E_k c_{k\sigma}^\dagger c_{k\sigma} + \sum_{\substack{k\sigma'''l\sigma'' \\ m\sigma'n'\sigma}} W_{kk'} c_{k\sigma'''}^\dagger c_{l\sigma''}^\dagger c_{m\sigma'} c_{n\sigma}$$

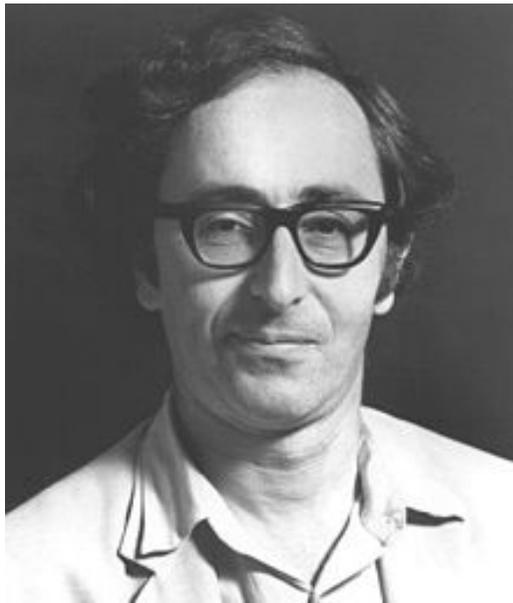


$$|\psi\rangle = \left[\prod_k \left(u_k + v_k c_{k\uparrow}^\dagger c_{-k\downarrow}^\dagger \right) \right] |0\rangle$$

$$|u_k|^2 + |v_k|^2 = 1$$

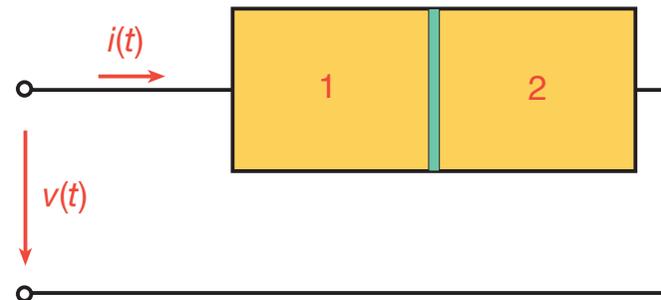
J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, “Microscopic theory of superconductivity,” *Phys. Rev.*, vol. 106, no. 1, pp. 162–164, 18 Feb. 1957.
 J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, “Theory of superconductivity,” *Phys. Rev.*, vol. 108, no. 5, pp. 1175–1204, 1 Dec. 1957.

1962: Josephson Effekt



Brian D. Josephson
* 1940

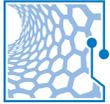
- Kohärentes Tunneln
supraleitender Ströme



$$I(t) = I_{max} \sin \phi(t)$$

$$\dot{\phi} = \frac{2e_0 V_0}{\hbar}$$

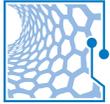
B. D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunnelling,"
Phys. Lett., vol. 1, no. 7, pp. 251–253, July 1962.



Nahziele und Fernziele

E. Kasper, D. Kissinger, P. Russer and R. Weigel: “High Speeds in a Single Chip”,
IEEE microwave magazine Volume 10 Issue 7, S. 28-33. 2009.

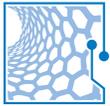
P. Russer and N. Fichtner: “Nanoelectronics in Radio-Frequency Technology”,
IEEE Microwave Magazine, 11 (2010), Nr. 3, S. 115-135.



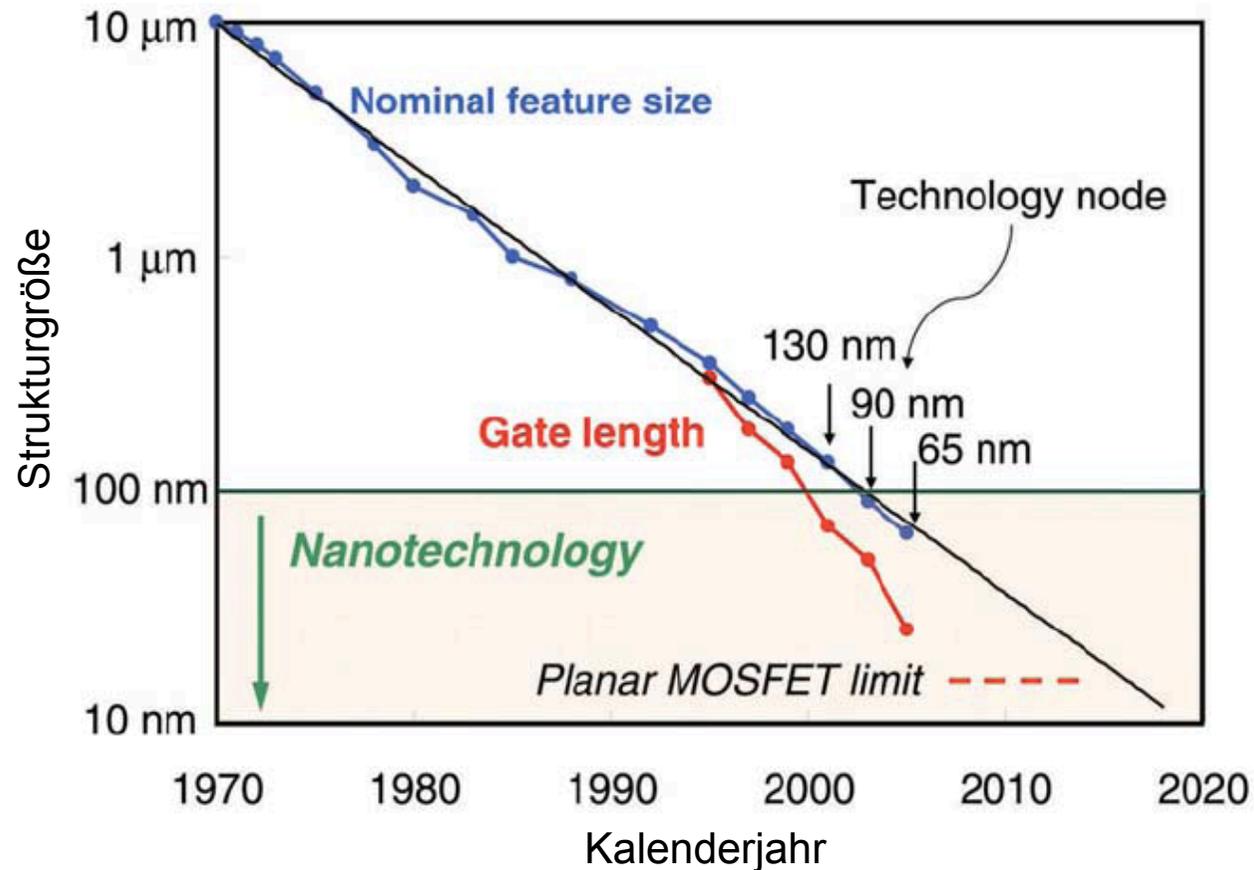
Moore'sches Gesetz

- Während der vergangenen 40 Jahre folgte die Entwicklung der Mikroelektronik dem sogenannten Moore'schen Gesetz:
- Die Bauelementedichte und die Leistungsfähigkeit monolithisch integrierter Siliziumschaltkreise verdoppeln sich in zeitlichen Abständen von 18 Monaten (Thompson 2006).
- Während dieser 40 Jahre verringerten sich die Strukturgrößen von Transistoren von 10 Mikrometer auf etwa 30 Nanometer.

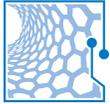
Gordon E. Moore: "Cramming more components onto integrated circuits Electronics," Volume 38, Number 8, April 19, 1965



Moore'sches Gesetz

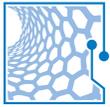


Scott E. Thompson, Srivatsan Parthasarathy: Moore's law: the future of Si microelectronics. In: *Materials Today*, 9 (2006), Nr. 6, S. 20-25.



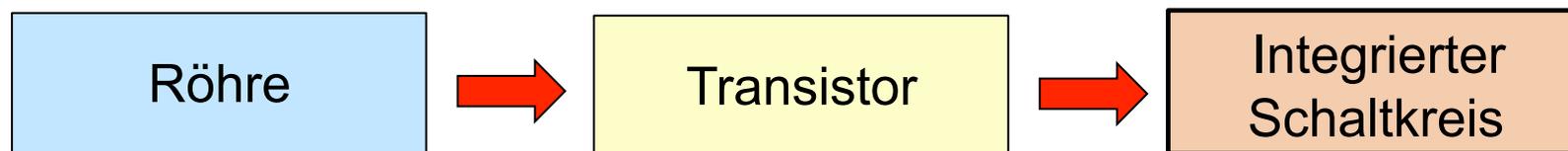
Eine Roadmap

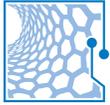
- **Nahziele** (industriennahe und anwendungsorientierte Forschung; Zeithorizont bis 8 Jahre)
 - Siliziumelektronik
 - Grenzen der Miniaturisierung
 - Mikroelektronisch-mechanische Systeme
- **Fernziele** (neuartige Entwicklungen, Zeithorizont jenseits 8 Jahre)
 - Nanoelektronisch-mechanische Systeme
 - Organische Halbleiter, Kohlenstoff-basierte Materialien
 - Spintronik, Spinelektronik
 - Molekulare Elektronik
 - Quantencomputer, Quanteninformationstheorie



Fernziele der Nanoelektronik

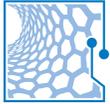
- Fernziele einer Technologie sind durch Überlegungen über die Entwicklung der Anforderungen an eine Technologie sowie den Wunsch, neue Horizonte zu öffnen bestimmt.
- Darüber hinaus ist es erforderlich, dass eine Idee existiert die die Erreichung des Fernzieles zumindest im Prinzip ermöglicht.
- Beispiel:





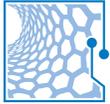
Fernziele der Nanoelektronik

- So erfolgreich die Fernziele des letzten Jahrhunderts auch erreicht wurde, so sind doch die heutigen Bauelemente der Mikroelektronik nicht in der Lage die Dichte der Festkörper voll auszunutzen.
- Der Grund dafür ist, dass alle Bauelemente der Chip-Technologie auf der Dotierung von Halbleitern beruhen.
- Die dabei verfügbare Ladungsträgerdichte liegt ungefähr um einen Faktor 10^4 unterhalb der gesamten Elektronendichte im Festkörper.
- Die meisten Konzepte zur Realisierung von Fernzielen der Nanoelektronik beruhen auf der Idee, diesen Faktor von 10^4 zu gewinnen und Möglichkeiten zu finden die durch die niedrigen Dichten der Dotierungen gesetzten Grenzen zu umgehen.



Silizium Nanoelektronik

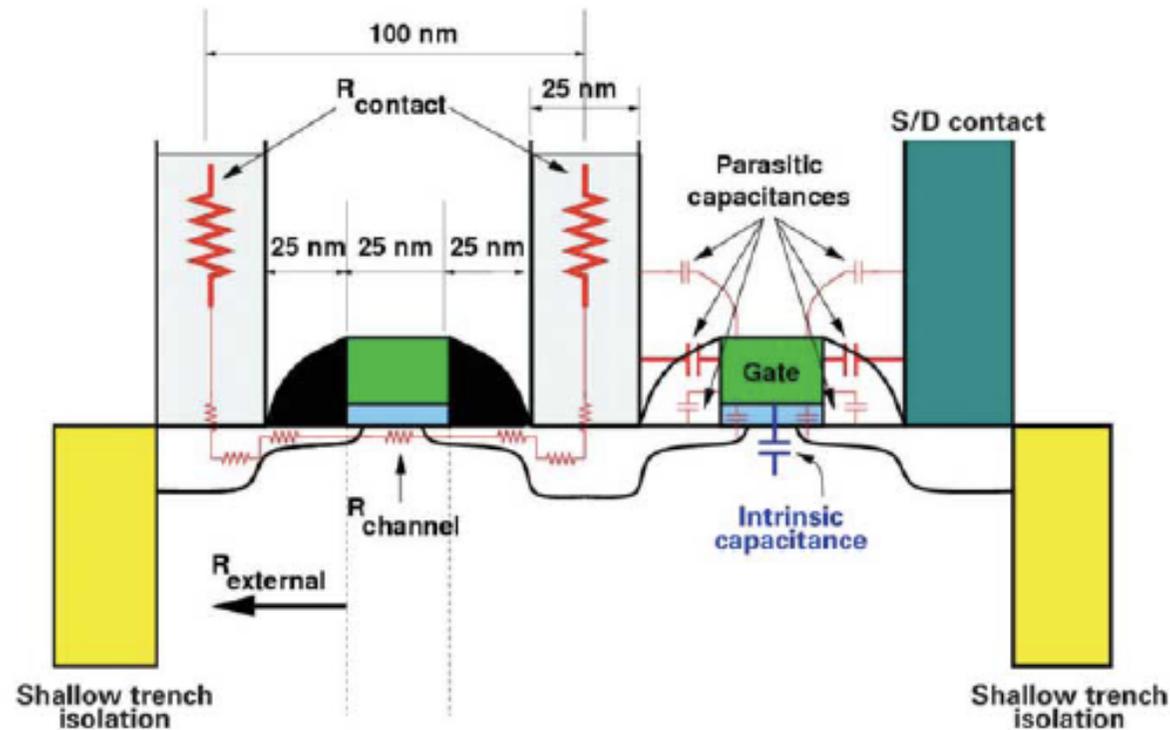
- Herstellungstechnologie und Entwurfstechniken von Halbleiterbauelementen haben sich innerhalb der weltweiten Halbleiterindustrie in Reaktion auf wirtschaftliche Einflussfaktoren entwickelt.
- Seit 1999 gibt ein industrielles Konsortium, die “*International Technology Roadmap for Semiconductors*” (ITRS) heraus.
 - *ITRS–International Technology Roadmap for Semiconductors - 2007 edition.*
 - *In ITRS–International Technology Roadmap for Semiconductors - 2008 update.*
 - 5. Axel Thielmann. Blockaden bei der Etablierung der Nanoelektronik. In *TAB Brief*, Nr. 35, pp. 36–39. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Juni 2009.



Silizium Nanoelektronik

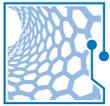
- Die Herunterskalierung von CMOS-Transistoren folgt dem Moore'schen Gesetz und verbessert in erster Linie die Signalverarbeitung und Datenspeicherung in den sogenannten Systems-on-Chip.
- Die Kanallängen in MOSFETs liegen bereits unterhalb von 10 nm.

Physikalische Grenzen in CMOS - ICs

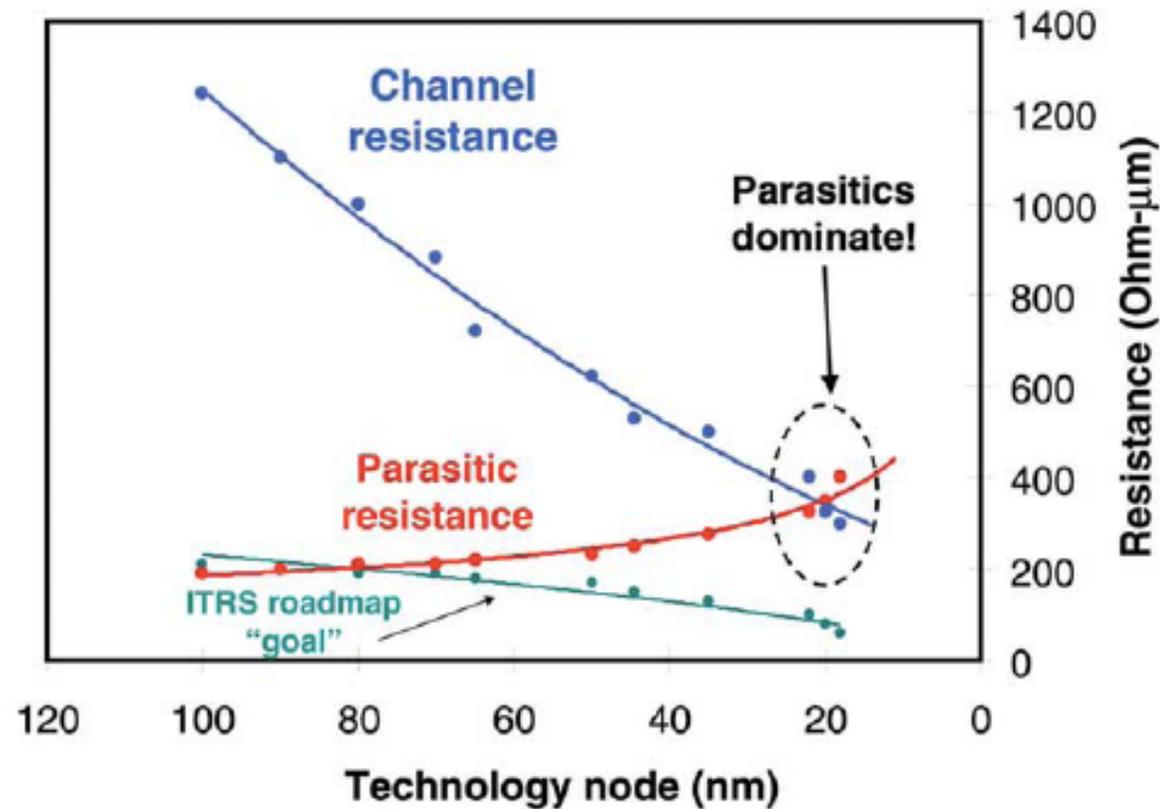


32 nm – Prozess, Transistorabstand 100nm

Scott E. Thompson, Srivatsan Parthasarathy: Moore's law: the future of Si microelectronics. In: *Materials Today*, 9 (2006), Nr. 6, S. 20-25.

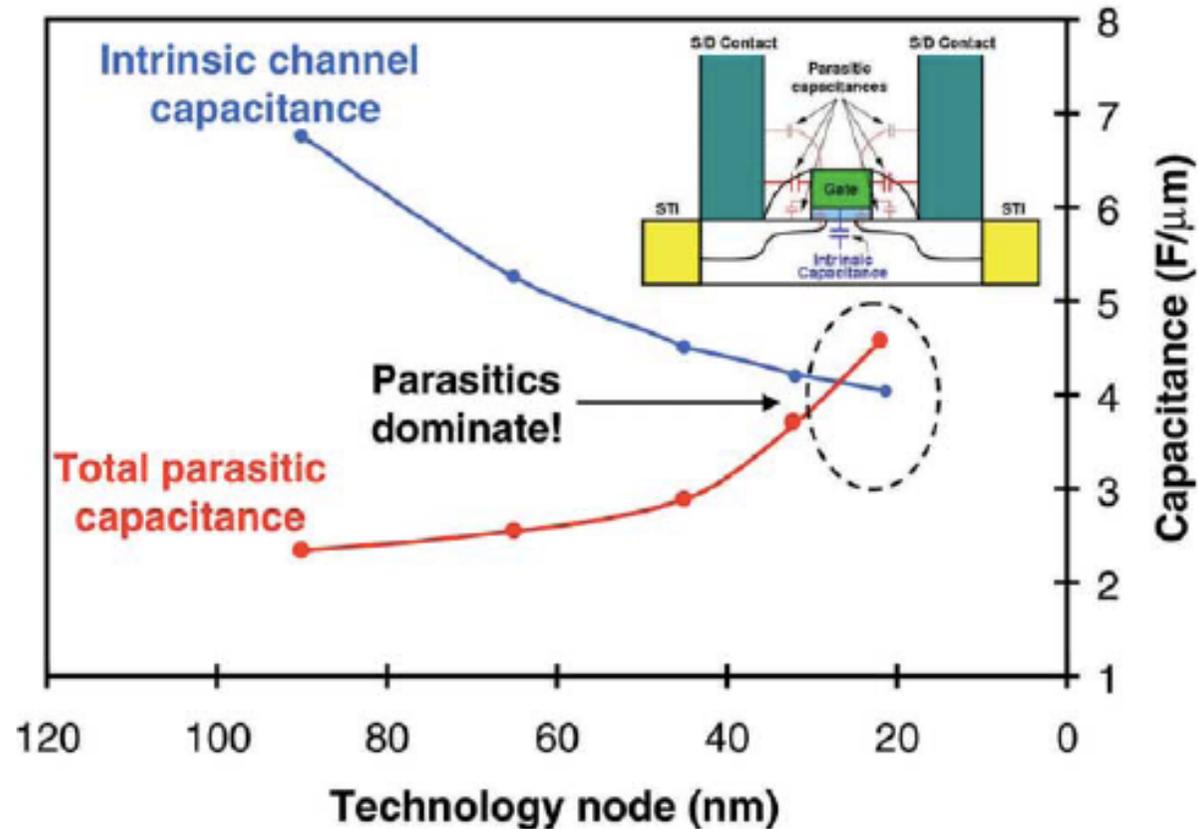


Physikalische Grenzen in CMOS - ICs

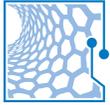


Scott E. Thompson, Srivatsan Parthasarathy: Moore's law: the future of Si microelectronics. In: *Materials Today*, 9 (2006), Nr. 6, S. 20-25.

Physikalische Grenzen in CMOS - ICs



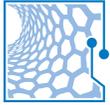
Scott E. Thompson, Srivatsan Parthasarathy: Moore's law: the future of Si microelectronics. In: *Materials Today*, 9 (2006), Nr. 6, S. 20-25.



Silizium Nanoelektronik

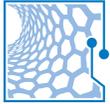
- Unter der Berücksichtigung der durch das Material sowie die Bauelemente- und Systemeigenschaften gegebenen Grenzen wird vermutet, dass die Siliziumtechnologie das Potential zur Erzielung einer *terascale Integration* mit mehr als 10^{12} *Transistoren pro chip* hat.
- Diese Voraussage basiert auf einem Konzept mit MOSFETS mit einer Gate-Oxid-Dicke von etwa 1 nm, Kanaldicken von etwa drei Nanometer und einer Kanallänge von etwa 10 nm.

J. D Meindl, Q. Chen, and J. A Davis. Limits on silicon nanoelectronics for terascale integration. *Science*, 293(5537):2044–2049, 2001.



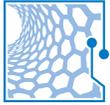
III-V Halbleiter

- III-V Halbleiter weisen exzellenten Elektronenbeweglichkeiten auf:
InAs: $33000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
InSb: $80000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
 - Ideal für Hochgeschwindigkeitsbauelemente.
 - Insbesondere Sb-basierte Verbundhalbleiter haben die realistische Möglichkeit, aufgrund der hohen Beweglichkeit von Elektronen sowie von Löchern, als Substitut für Silizium im CMOS-Kanal Anwendung zu finden.
 - InAs kann in exzellenter Materialqualität in Form von Nanodrähten direkt auf Si-Substraten gewachsen werden.
-



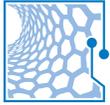
Germanium

- Ge: exzellente Elektronen-Volumenbeweglichkeit von $3900 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (fast dreimal höher als in Silizium).
- Leider hat sich in gefertigten Bauelementen gezeigt, dass die Güte der Germanium/Dielektrikum-Grenzschicht sehr niedrig ist und somit nur wesentlich geringere Beweglichkeiten erreicht werden.
- Als leistungssteigernde Technik ist die Strain-Technologie in Ge-basierten n-Kanal-MOSFET-Architekturen untersucht worden.
- III-V Halbleiter und Germanium-FETs sind mögliche Kandidaten, um CMOS an das Ende seiner Roadmap zu führen.



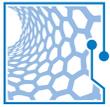
Silizium Nanoelektronik

- Seit 2005 berücksichtigt die ITRS auch Erweiterungen der CMOS-Technologien und radikal neue Lösungsansätze, welche auch neue Produktionskonzepte zur weiteren Reduktion der Kosten pro Funktion berücksichtigt.
- In diesem Dokument wurden die hauptsächlichen Entwicklungstendenzen wie folgt kategorisiert:

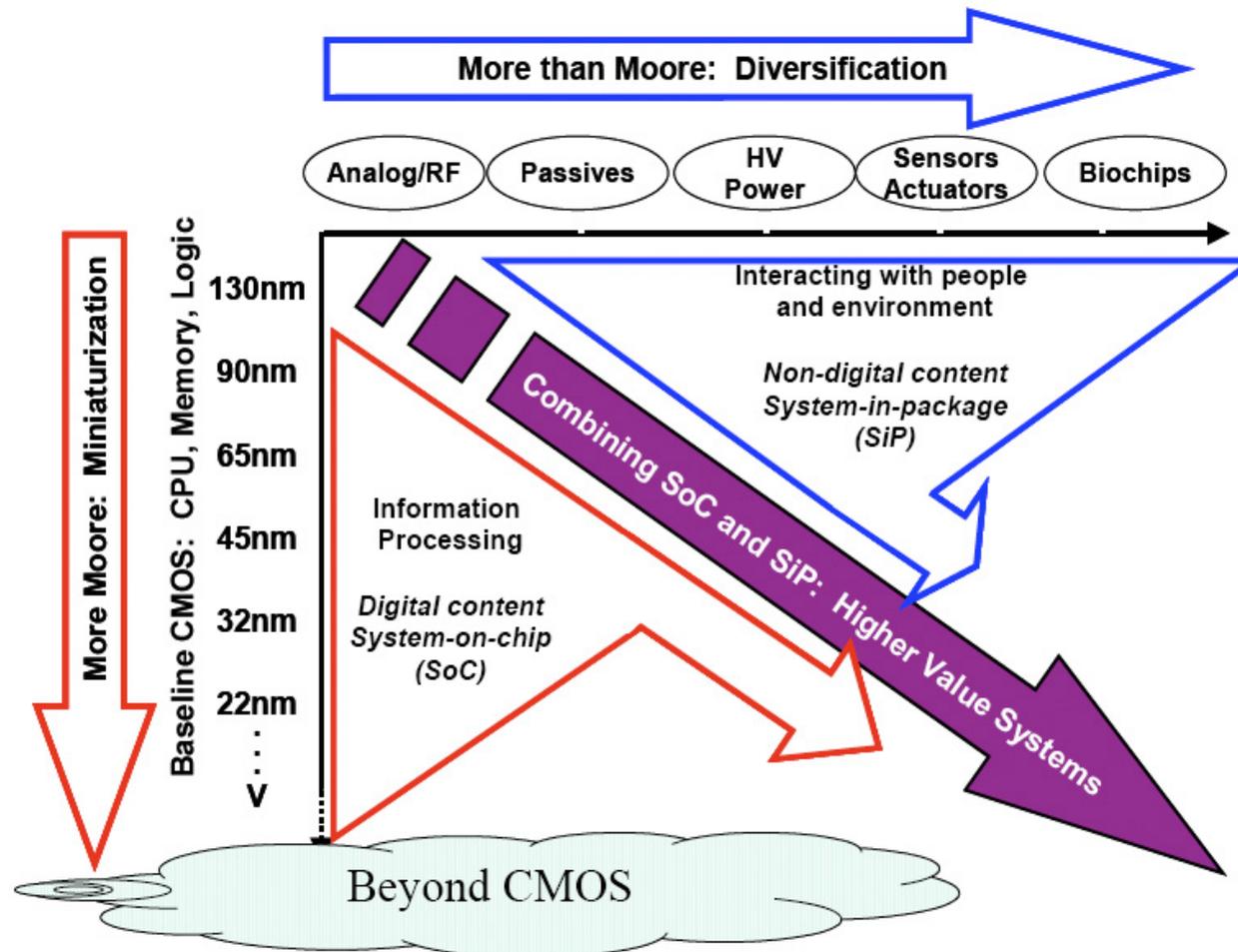


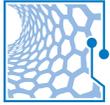
Silizium Nanoelektronik

- **More Moore:** Diese Entwicklungen haben die weitere Miniaturisierung von Schaltelementen mit Strukturgrößen von unterhalb 100nm bis hinunter zu den physikalischen Grenzen der CMOS-Technologie sowie die komplette Systemintegration auf dem Chip zum Ziel.
 - **More than Moore:** Dieser Zweig reicht jenseits der Grenzen konventioneller Halbleitertechnologie und Halbleiteranwendungen und integriert verschiedene nicht digitale Funktionalitäten unter Kombination verschiedener Typen von Chips zu miniaturisierten *Systems in Package*.
 - **Beyond CMOS:** Dieses Gebiet konzentriert sich auf innovative Bauelemente, welche auf neuartigen Prinzipien, neuartigen Materialien und neuartigen Technologien basieren.
-



Silizium Nanoelektronik

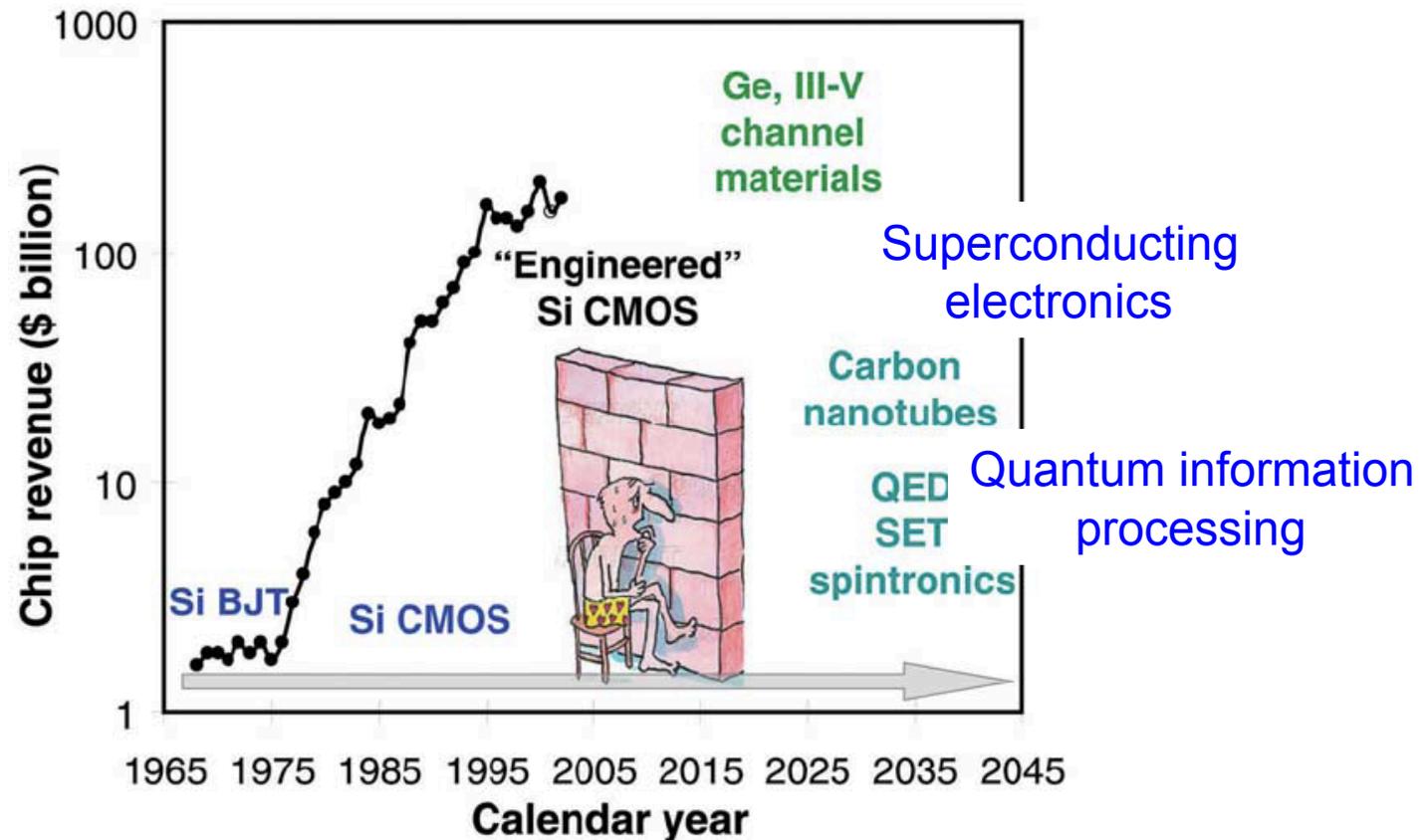




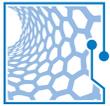
Fernziele

- Die dem Moore'schen Gesetz folgenden Entwicklungen haben die weitere Miniaturisierung von Schaltelementen mit Strukturgrößen von unterhalb 100 nm bis hinunter zu den physikalischen Grenzen der CMOS-Technologie sowie die komplette Systemintegration auf dem Chip zum Ziel.
- Dabei wird die Entwicklung innerhalb der nächsten beiden Dekaden mit Annäherung der Strukturgrößen an atomare Dimensionen an ihre physikalischen Grenzen und noch früher an Kostengrenzen stoßen.
- Durch Kombination verschiedener Chips zu "Systems in Package" und ähnliche Entwicklungen wird sich noch eine gewisse Steigerung der Leistungsfähigkeit konventioneller halbleiterelektronischer Systeme erreichen lassen.

Fernziele – Möglicher Zeithorizont

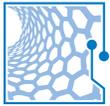


Scott E. Thompson, Srivatsan Parthasarathy: Moore's law: the future of Si microelectronics. In: *Materials Today*, 9 (2006), Nr. 6, S. 20-25.



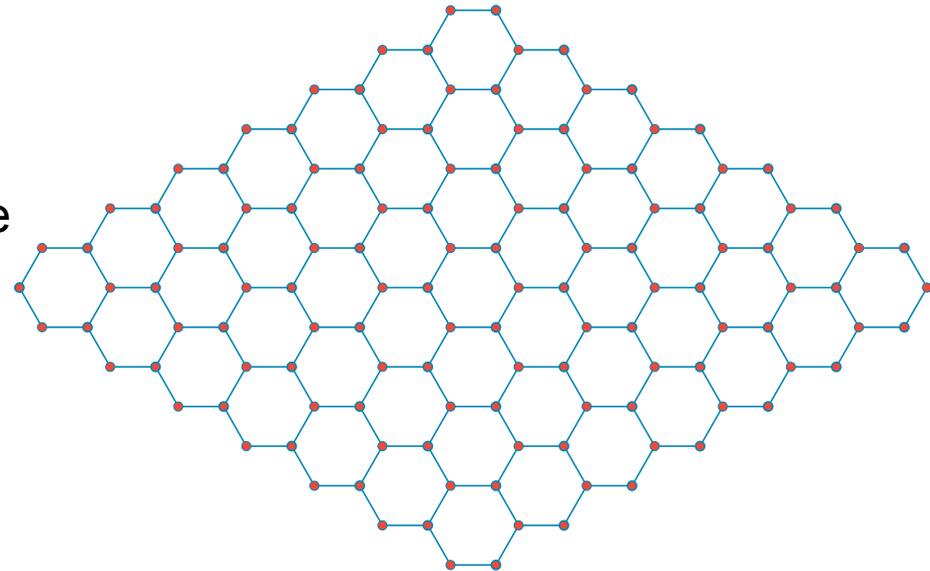
Fernziele

- Ein wesentliches Voranschreiten der Entwicklung ist nur auf Basis neuartiger physikalischer Effekte, neuer Materialien und innovativer Bauelemente- und Systemkonzepte zu erwarten, die in elektronischen Systemen zu einem Paradigmenwechsel führen werden.
 - Es gibt in diesem Bereich bereits eine Vielzahl von vielversprechenden Forschungsansätzen, wovon einige bereits an der Schwelle zur Entwicklung stehen, andere, hoch ambitionierte Konzepte jedoch weit ausgreifende Forschungsanstrengungen erforderlich machen.
 - Zu letzteren gehört die Quanteninformationsverarbeitung.
 - Der Zeithorizont für die Erreichung der Fernziele weit gefächert und kann mit fünf bis zwanzig Jahren angesetzt werden.
-



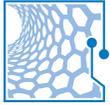
Graphene

- ist ein zweidimensionales, hexagonales Gitter aus Kohlenstoff-Atomen.
- Einzigartige elektronische, optische und mechanische Eigenschaften.
- Interessant für eine Vielzahl von Anwendungen, zum Beispiel in Transistoren, Sensoren, Bildschirmen Antennen.



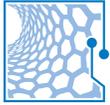
K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science*, vol. 306, no. 5696, pp. 666–669, 2004.

A. K. Geim and K. S. Novoselov, "The rise of graphene," *Nature Materials* 6, pp. 183 - 191 (2007).

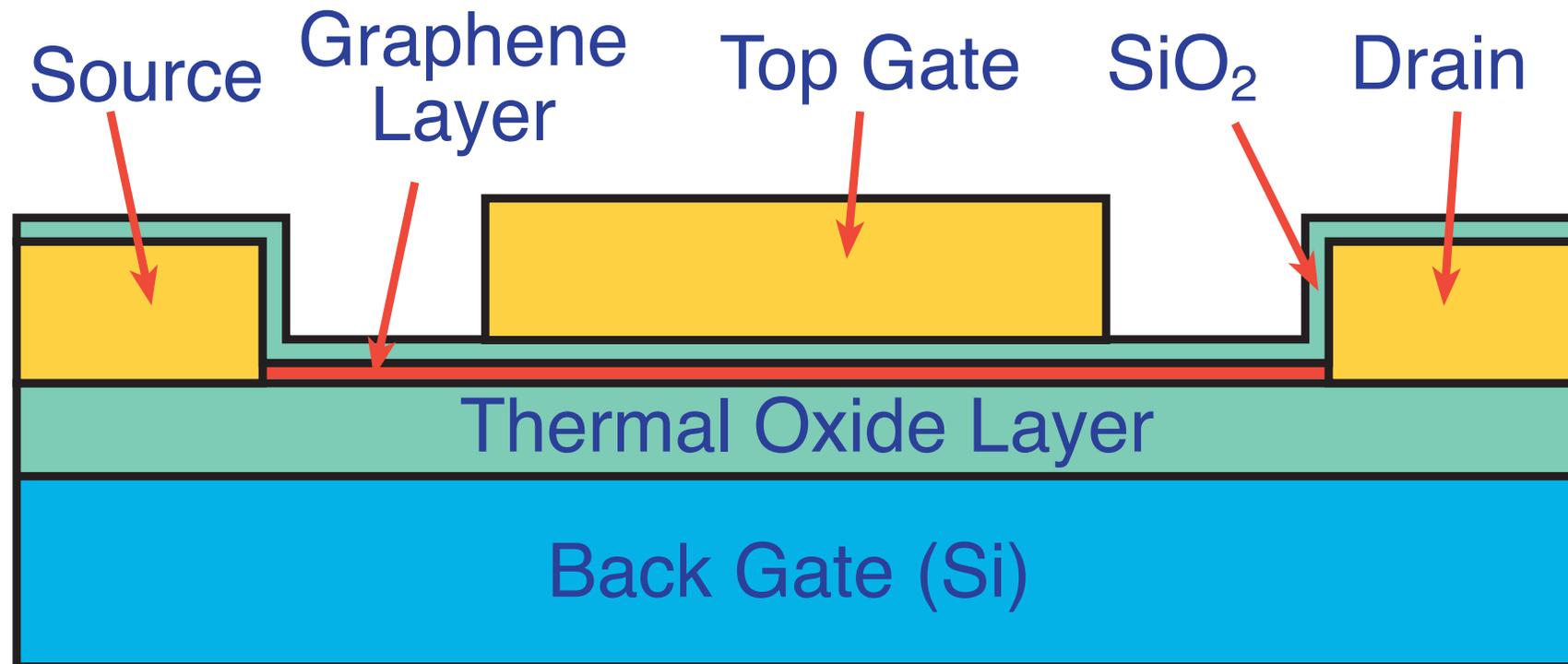


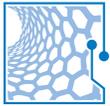
Graphene

- Freihängendes Graphen oder Graphen-Schichten auf chemisch inerten Substraten, wie zum Beispiel Bornitrid, können Beweglichkeiten von bis zu $100\,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ bei Raumtemperatur erreichen.
- Aufgrund der ungewöhnlichen Bandstruktur von Graphen weisen Löcher und Elektronen vergleichbare Beweglichkeit auf.
- Dank seiner extrem hohen Elektronenmobilität ist Graphen ein ideales Material für Hochfrequenztransistoren.
- Grenzfrequenz von bis zu 200 GHz wurden berichtet.

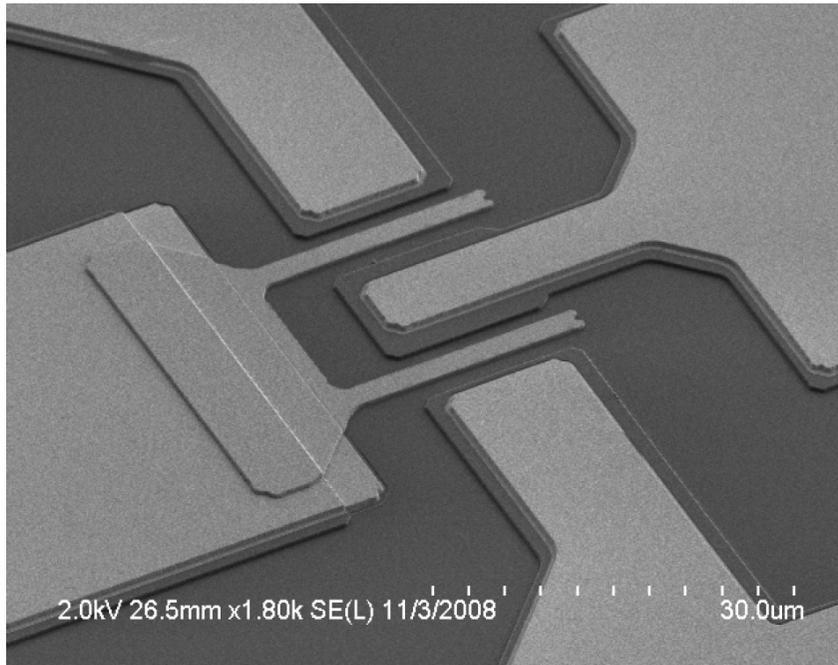


Graphene Transistoren

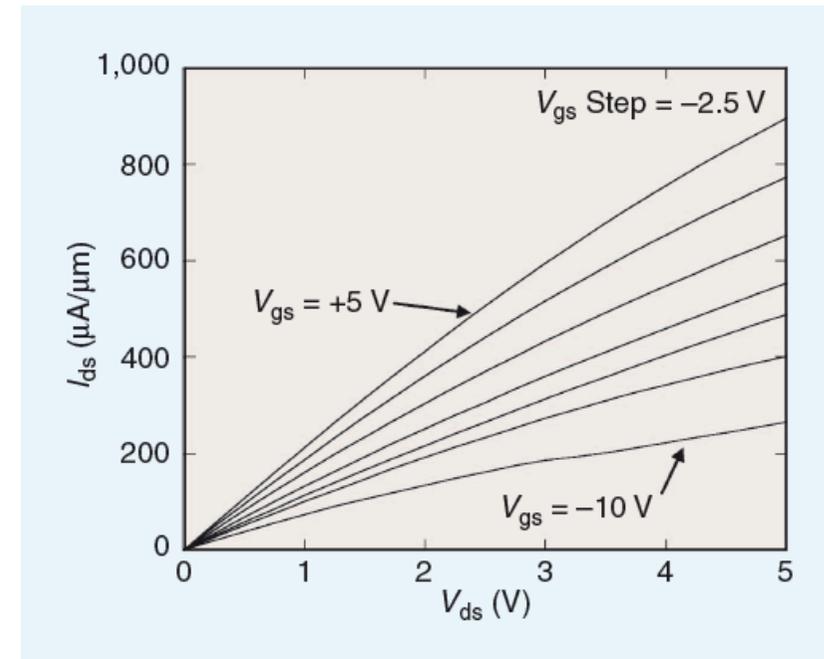




Graphene - FET



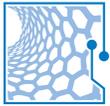
REM Aufnahme



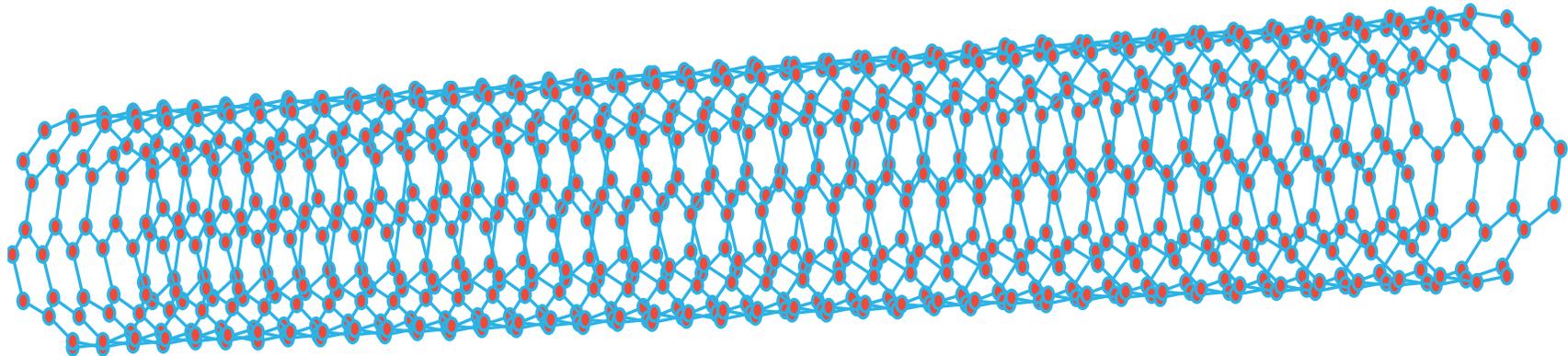
I/V – Kennlinie

2µm × 12µm Graphene - FET

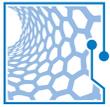
J. Moon et al., "Development toward wafer-scale graphene RF electronics," in *Proc. Topical Meeting Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems*, Jan. 11–13, 2010, pp. 1–3.



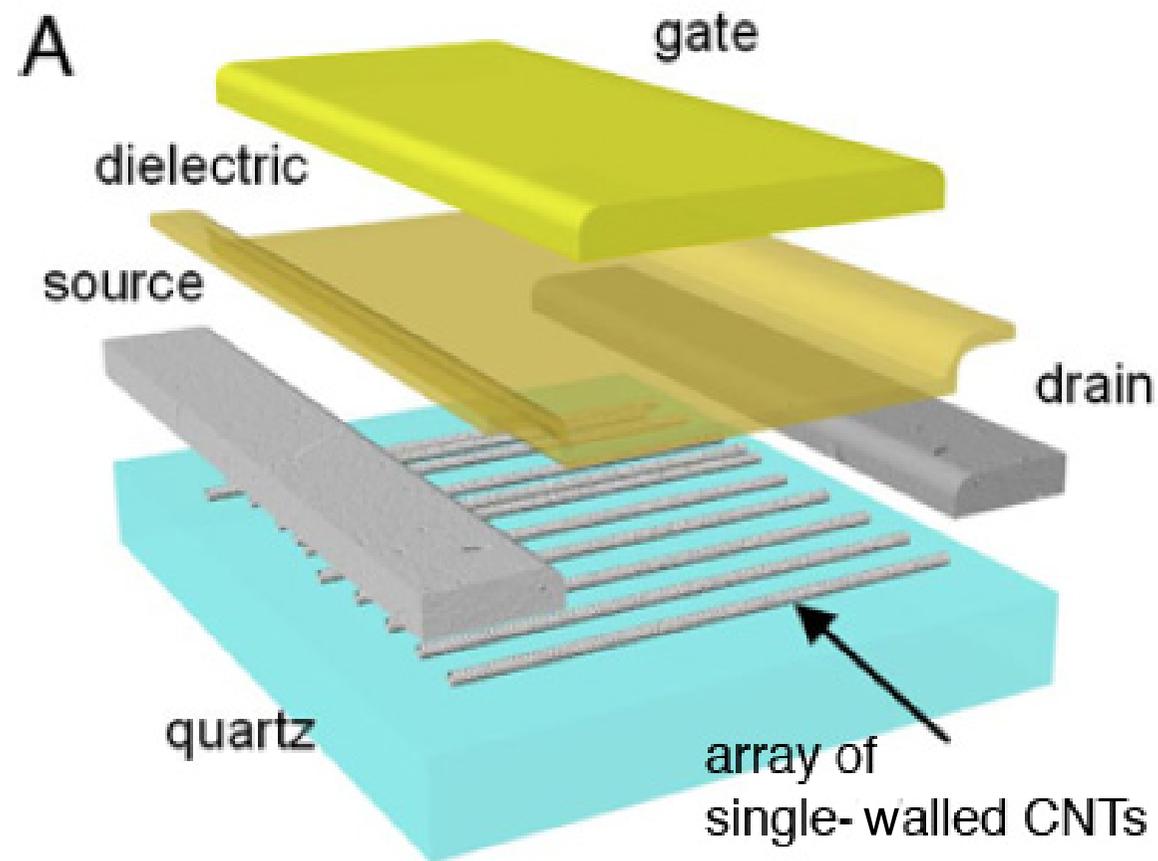
Struktur einer Carbon Nanotube

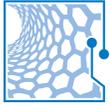


- Carbon Nanotubes (CNTs) sind zylindrische Strukturen von Kohlenstoffatomen in einem aufgewickelten hexagonalen Gitter.
- Der Durchmesser variiert zwischen 1 nm und 10 nm.
- Längen bis zu 1 mm wurden realisiert.
- CNTs haben herausragende Elektronentransport-Eigenschaften, wie z.B. ballistischen Transport.
- Bei Raumtemperatur ist die mittlere freie Weglänge 0,7 nm und die Ladungsträgerbeweglichkeit $10.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

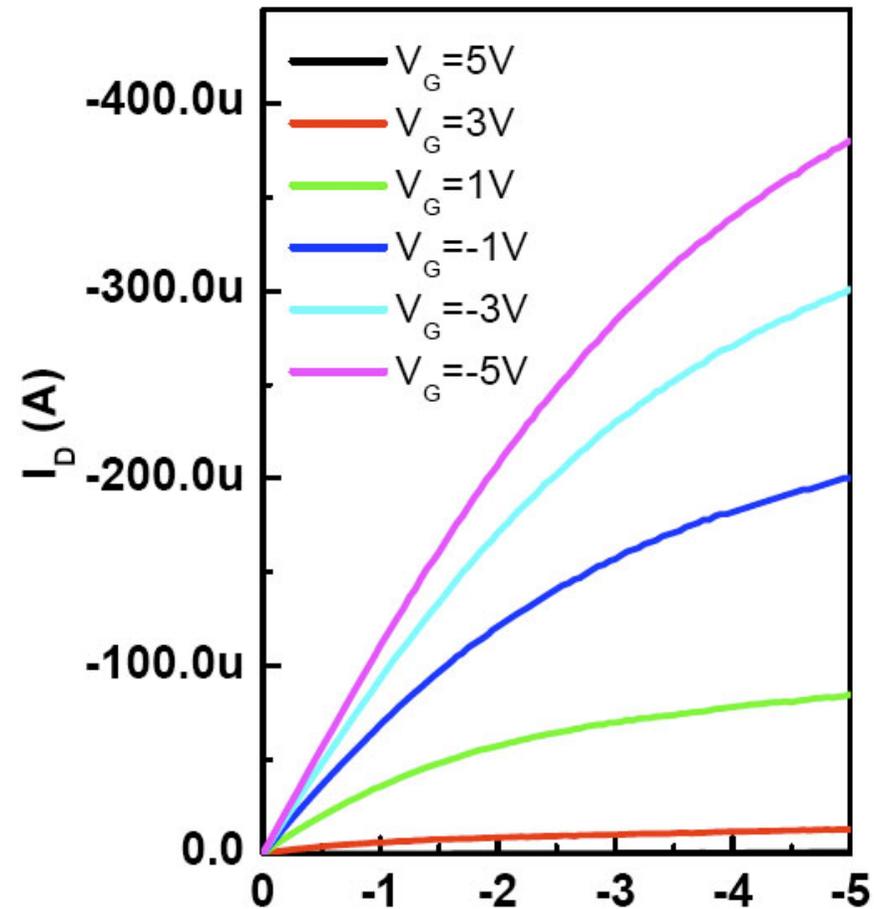


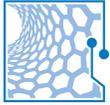
Hochfrequenztransistor mit regelmäßig angeordneten einwandigen Carbon Nanotubes



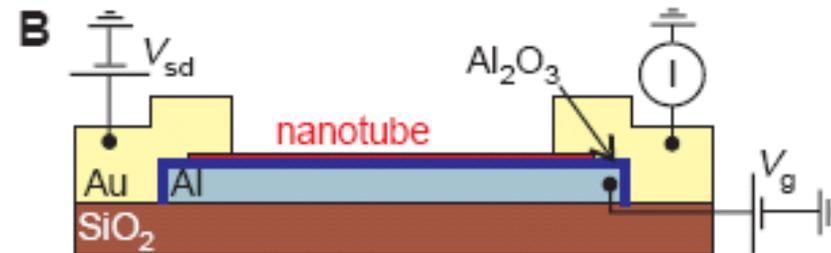
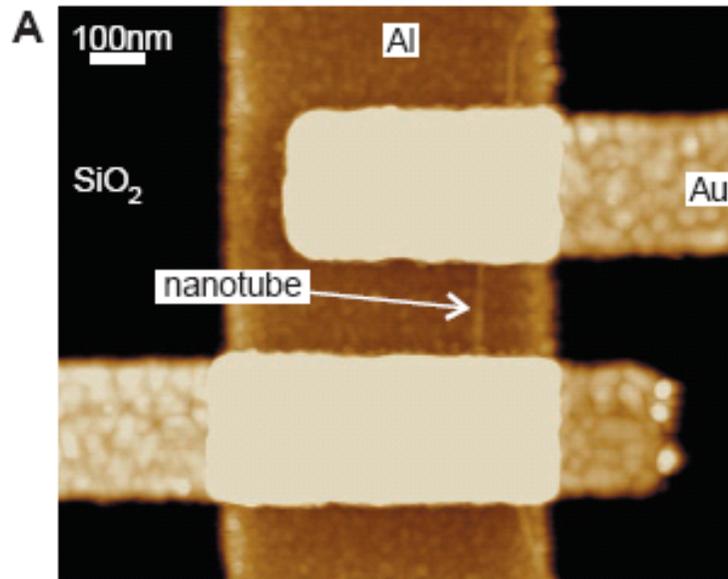


Strom-Spannungs-Kennlinien eines Carbon Nanotube-Feldeffekttransistors



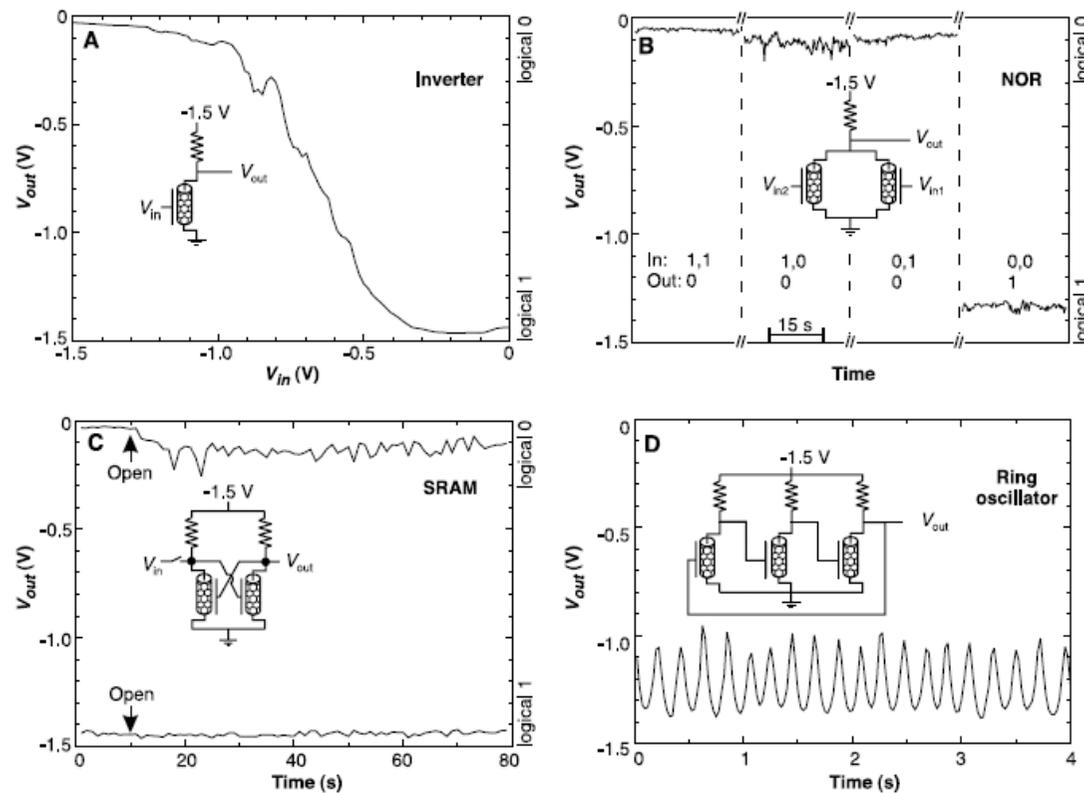


CNT - Transistor

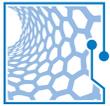


W. Hoenlein, et al, Carbon nanotubes for microelectronics: status and future prospects, Materials Science and Engineering: C, Vol. 23, No. 6–8, 15 December 2003, pp.663-669,

Logikschaltungen mit CNT - Transistoren

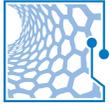


W. Hoenlein, et al, Carbon nanotubes for microelectronics: status and future prospects, Materials Science and Engineering: C, Vol. 23, No. 6–8, 15 December 2003, pp.663-669,

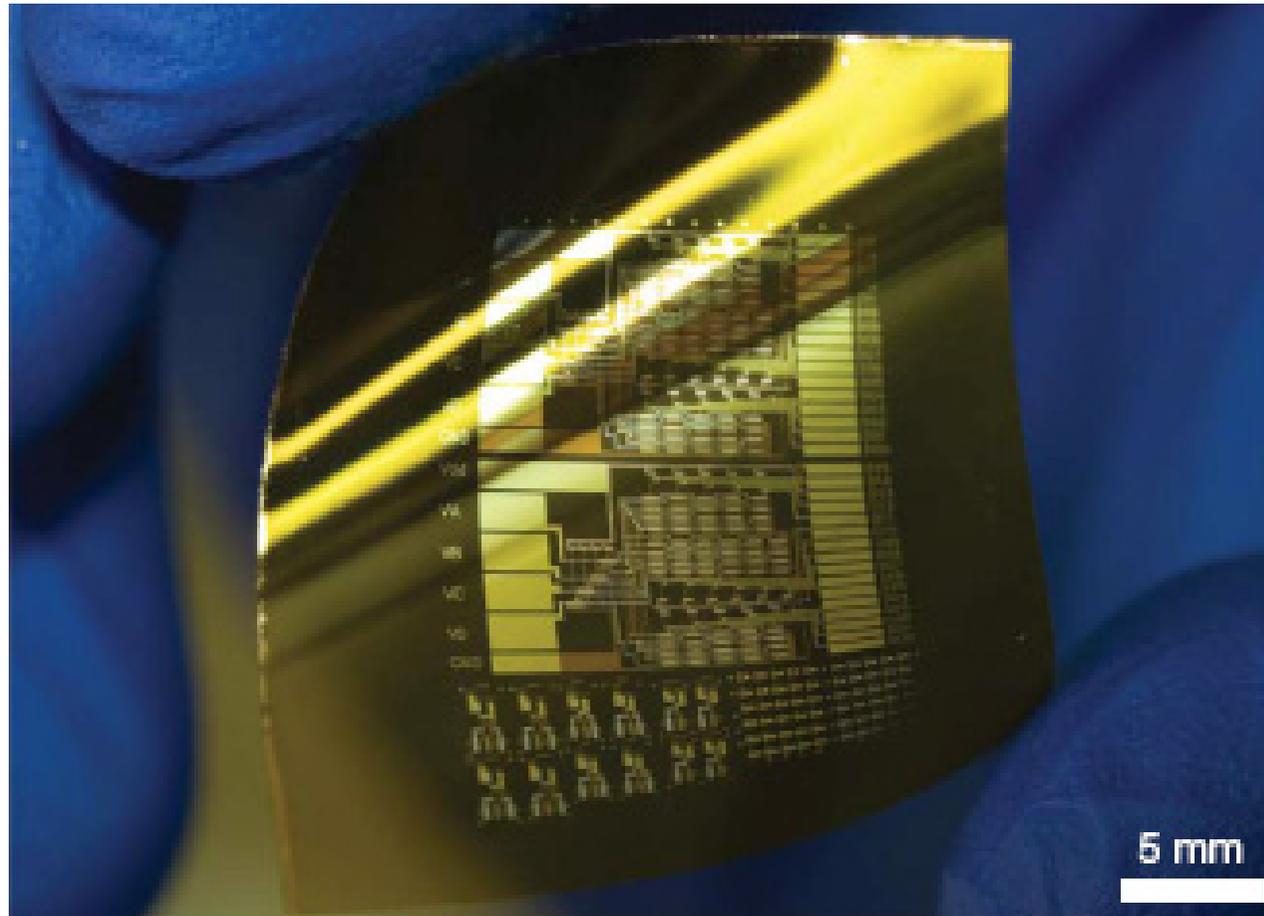


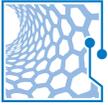
Carbon Nanotube-Transistor-Schaltkreise auf einer dünnen Kunststoffolie

- Für Anwendungen im Niedrigpreisbereich sind auf flexible Substrate aufgebrachte Filme aus einwandigen CNTs von Interesse.
- Auf diese Weise lassen sich durch Drucktechniken Dünnschichttransistoren auf unterschiedlichen Trägern kostengünstig herstellen.
- Integrierte Mediumscale-Schaltkreise auf CNT-Dünnschichtbasis verwenden ein unregelmäßiges Netzwerk einwandiger CNTs.
- Es lassen sich damit flexible integrierte Schaltkreise für Anwendungen in der Konsumelektronik realisieren.

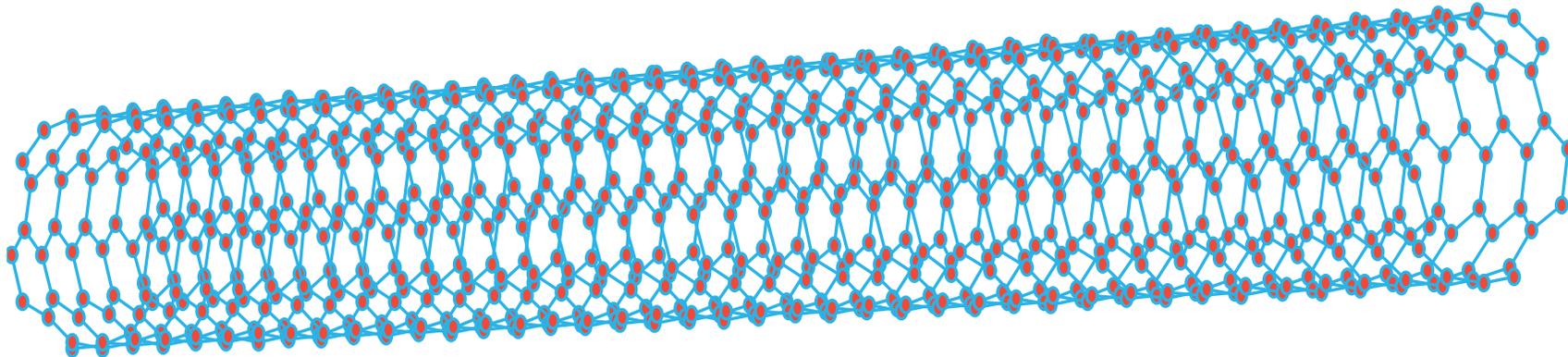


Carbon Nanotube-Transistor-Schaltkreise auf einer dünnen Kunststoffolie

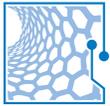




CNT-Netzwerke



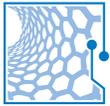
In letzter Zeit haben sich CNT-Netzwerke als Möglichkeit herausgestellt, um solche Systeme wettbewerbsfähig zu Polymeren zu machen, die großflächige, kostengünstige elektronische und optoelektronische Anwendungen ermöglichen



Spintronik

- Bisher wird die Information in der Elektronik hauptsächlich durch die elektrische Ladung dargestellt.
- Spintronics (spin transport electronics or spin-based electronics) ist eine Technologie, bei der der Elektronenspin Informationsträger ist.
- Neuartige Bauelemente, die auf der Wechselwirkung des Elektronenspins mit den magnetischen Eigenschaften des Materials beruhen.

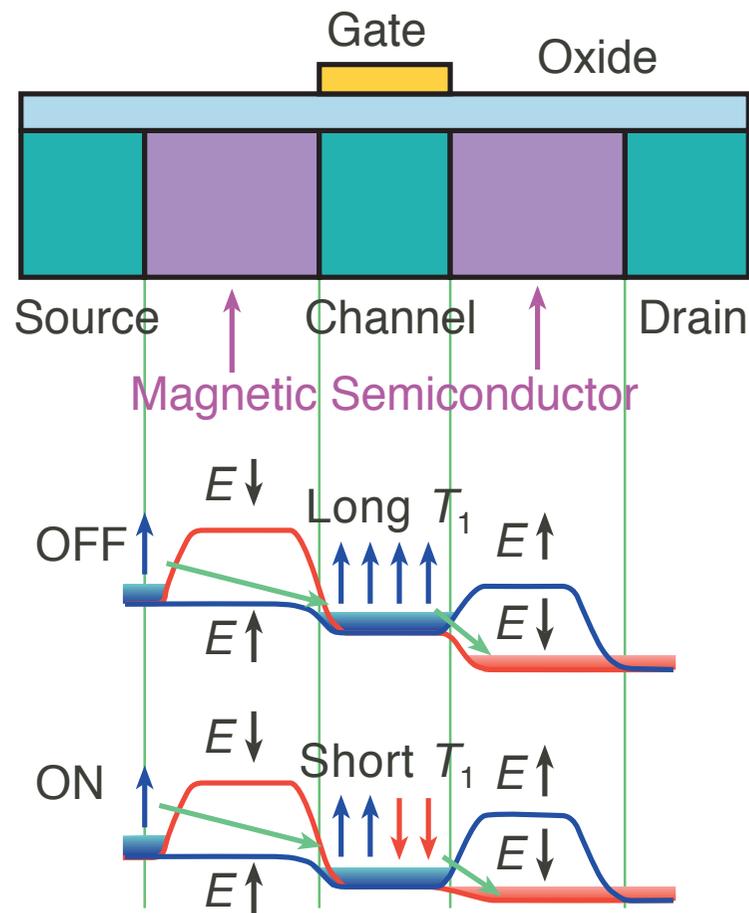
D. D. Awschalom and M. E. Flatté, “Challenges for semiconductor spintronics,” *Nature Phys.*, vol. 3, no. 3, pp. 153–159, Mar. 2007.



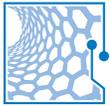
Spintronik

- Bei ladungsbasierten Bauelementen werden die logischen Zustände 0 und 1 durch an bestimmten Orten lokalisierte Ladungen dargestellt.
- Um eine Ladung von einer Stelle zu einer anderen zu bewegen wird eine Energie von $E_{\text{bit}} = k_B T \ln 2 < 23 \text{ meV}$ benötigt (R. Landauer 1961).
- Nach einer ITRS – Prognose wird in 1918 die Schaltenergie für low-standby-power CMOS Schalter mit 10 nm Gateweite 15 eV betragen und damit drei Größenordnungen höher als das theoretische Limit sein.
 - *International Technology Roadmap for Semiconductors (Semiconductor Industry Association, San Jose, California, USA, 2003); <http://public.itrs.net>.*
- In Spin-basierten Bauelementen wird der Übergang zwischen den Zuständen 0 und 1 durch ein Magnetfeld bewirkt. Man erhofft, dadurch dem theoretischen Limit näher zu kommen.
- D. D. Awschalom and M. E. Flatté, “Challenges for semiconductor spintronics,” *Nature Phys.*, vol. 3, no. 3, pp. 153–159, Mar. 2007.

Spinbasierter Feldeffekttransistor



- Der Spin-basierte FET hat statische Spin-abhängige Barrieren (erzeugt durch einen magnetischen Halbleiter oder Isolator).
- Die Funktion beruht auf der Steuerung der Spinzustands-Lebensdauer in der Anlegen eines elektrischen Feldes ruft ein magnetisches Feld und dadurch eine Dekohärenz der Spins hervor.
- Nachdem die Spin-Orientierungen der Source-Kanal-Barriere und der Kanal-Drain-Barriere entgegengesetzt sind, kann ein Strom nur bei kurzer Spin-Lebensdauer fließen.

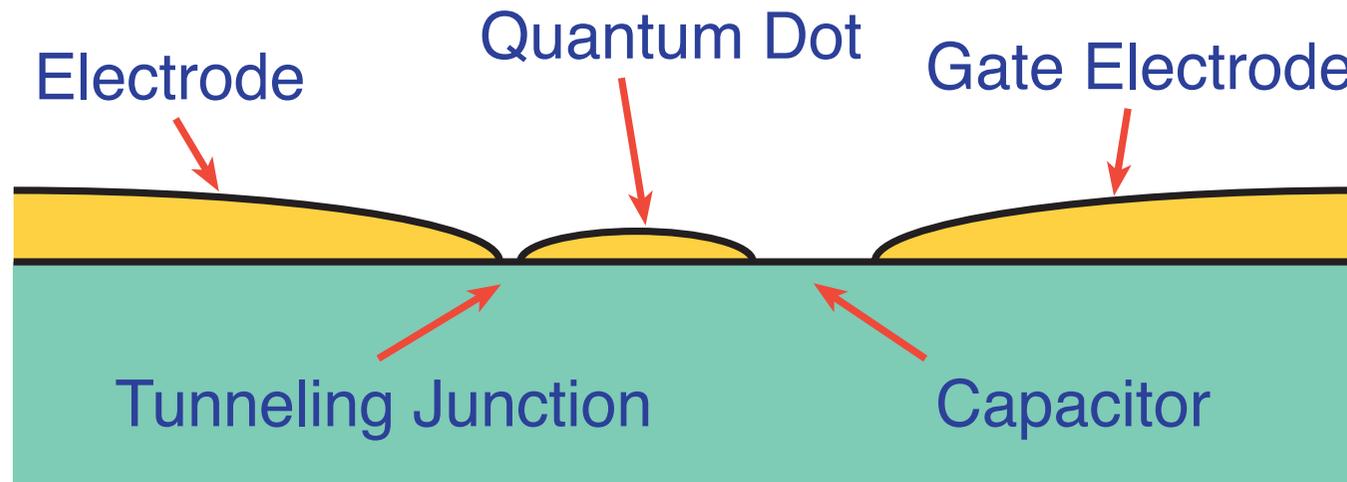


Einzelektron-Bauelemente

- Die Herunterskalierung der MOSFETs unterhalb 30 nm wird durch das Auftreten von Quanteneffekte (z.B. Tunneleffekt) begrenzt.
- Man sucht nach neuen Bauelementen, deren Funktionsweise die Quanteneffekte ausnutzt.
- Einzelektronenbauelemente sind bis zu atomaren Dimensionen herunter skalierbar,
- Extrem hohe Integrationsdichte und sehr geringe Leistungsaufnahme wären die Eigenschaften derartiger Bauelemente.

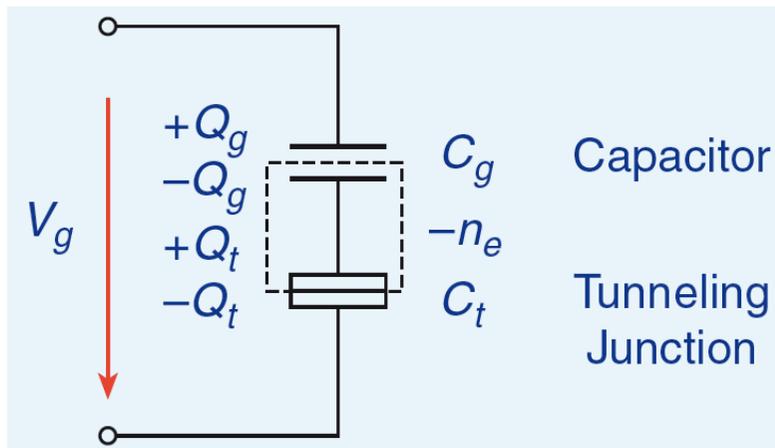
K. Likharev, "Single-electron devices and their applications," *Proc. IEEE*, vol. 87, pp. 606–632, Apr. 1999.

Single - Electron Box



- Die kleinste Konfiguration eines funktionellen Einzelelektronenbauelementes ist die aus einem Quantenpunkt und zwei Elektroden bestehende single-electron box.
- Eine Elektrode ist mit dem Quantenpunkt über eine Tunnelbarriere verbunden. Die andere Elektrode ist die Steuerelektrode.

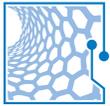
Äquivalente Schaltung der Single - Electron Box



$$C_{\Sigma} = C_t + C_g$$

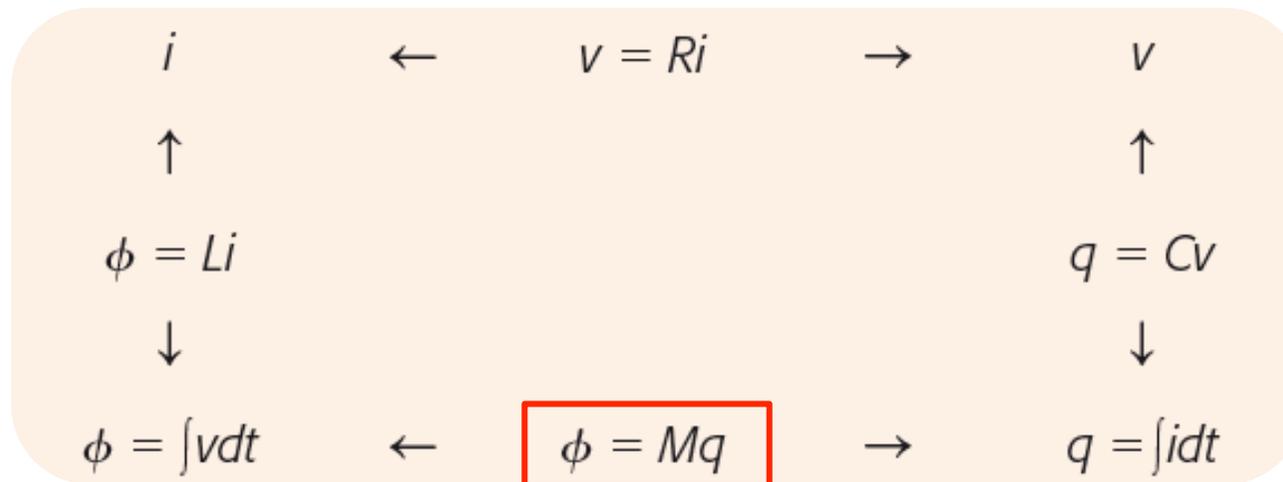
$$W_c = e^2 / 2C_{\Sigma}$$

- Wenn der Quantenpunkt hinreichend klein ist, ist die Ladungsenergie W_c eines Elektrons wesentlich größer als die thermische Anregungsenergie $k_B T$.
- Auf dem Quantenpunkt ist eine definierte, durch die Gate - Elektrode steuerbare Anzahl von Elektronen gespeichert.



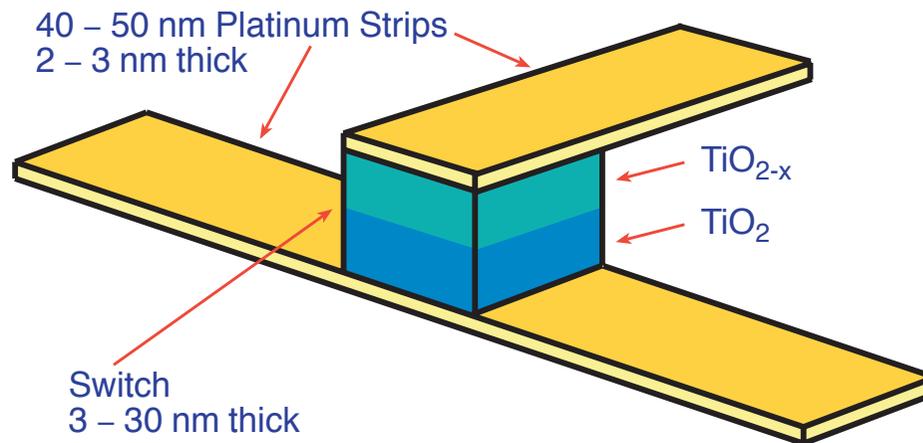
Der Memristor

- Der Memristor (*memory resistor*) wurde 1971 von Leon Chua als viertes grundlegendes Schaltelement neben dem Widerstand, dem Kondensator und der Induktivität vorgeschlagen.



L. Chua, "Memristor—The missing circuit element," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. 18, no. 5, pp. 507–519, Sept. 1971.

Memristor - Schalter

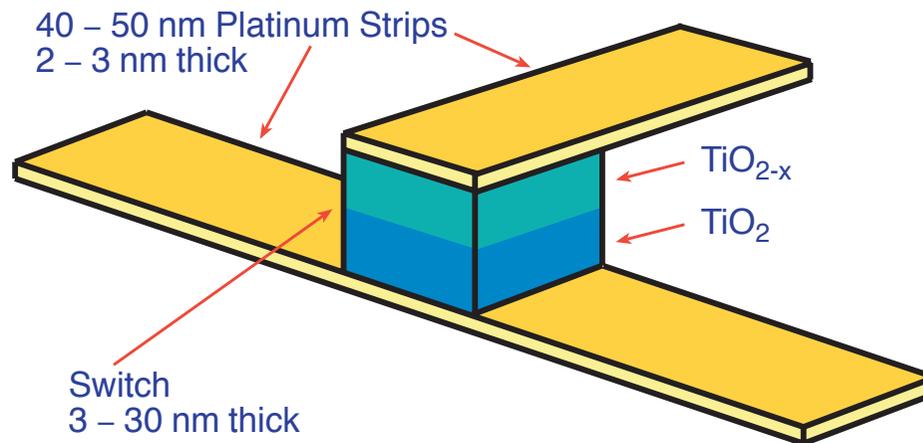


$$\Phi = M q$$

- Beim Memristor wird der Widerstandswert durch die Dauer und die Amplitude des durch den Memristor fließenden Stromes gesteuert.
- Die Widerstandsänderung ist nicht flüchtig.
- Das macht den Memristor als Speicherelement geeignet.

D. Strukov, G. Snider, D. Stewart, and R. Williams, "The missing memristor found," *Nature*, vol. 453, pp. 80–83, May 2008.

Memristor - Schalter

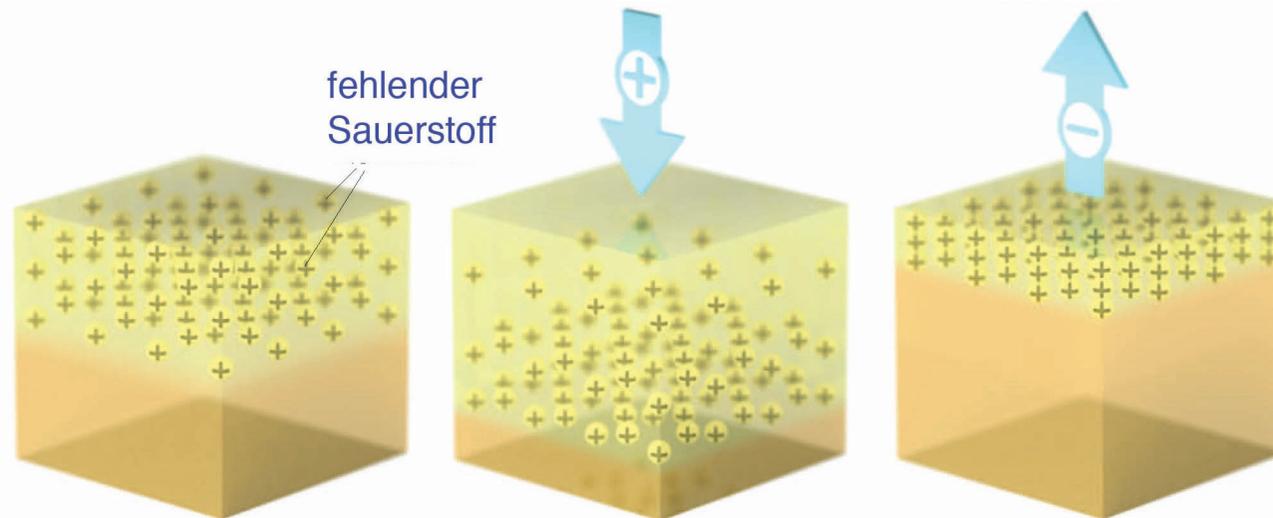


$$\Phi = M q$$

- Beim Memristor wird der Widerstandswert durch die Dauer und die Amplitude des durch den Memristor fließenden Stromes gesteuert.
- Die Widerstandsänderung ist nicht flüchtig.
- Das macht den Memristor als Speicherelement geeignet.

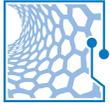
D. Strukov, G. Snider, D. Stewart, and R. Williams, "The missing memristor found," *Nature*, vol. 453, pp. 80–83, May 2008.

Memristor - Kreuzschienenarchitektur

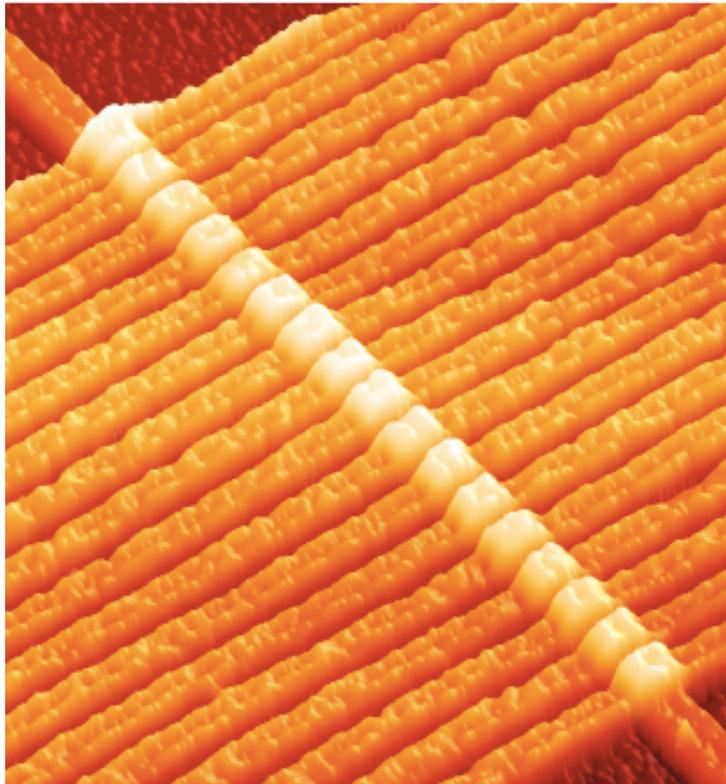


- Der Schalter besteht aus einem 40 nm – Würfel aus TiO_2 . Die untere TiO_2 – Schicht hat ein ideales 2:1 Verhältnis von O und Ti und ist ein Isolator.
- In der oberen TiO_{2-x} – Schicht fehlt 0.5 % O wodurch sie metallisch leitend ist.
- Eine angelegte positive Spannung lässt die Grenze der Schichten nach unten wandern und erhöht die Leitfähigkeit.

R. Williams, “How we found the missing memristor,” *IEEE Spectr.*, vol. 45, no. 12, pp. 28–35, 2008.

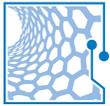


Memristor - Kreuzschienenarchitektur



Raster – Tunnelmikroskop –
Aufnahme einer Memristor -
Kreuzschienenanordnung

R. Williams, "How we found the missing memristor," *IEEE Spectr.*, vol. 45, no. 12, pp. 28–35, 2008.



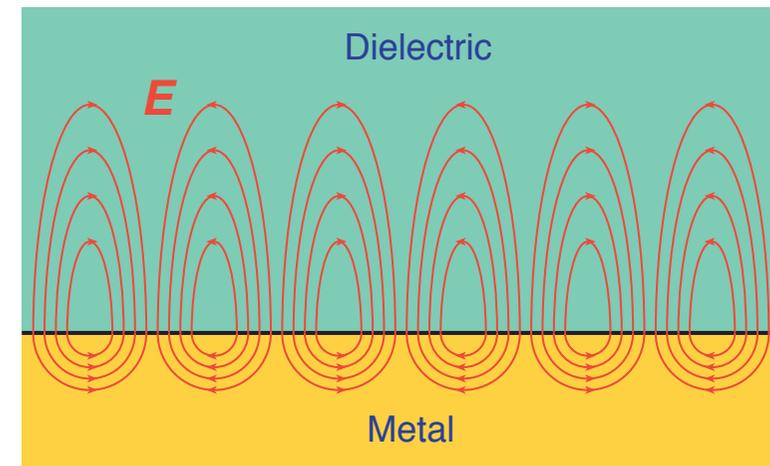
Plasmonische Bauelemente

- Die Verbindungstechnik ist ein limitierender Faktor für die Erhöhung der Taktraten von Prozessoren.
- Die Gründe liegen in Laufzeitverzerrungen, in Signalüberkopplungen und in thermischen Problemen.
- Optische Verbindungstechnik erlaubt hohe Bandbreiten jedoch nur begrenzte Miniaturisierung.
- **Plasmonik** ist ein neues Gebiet, welches sich mit der kontrollierten Ausbreitung von Lichtsignalen im Nanoskalen- Bereich befasst.

R. Zia, J. Schuller, A. Chandran, and M. Brongersma, "Plasmonics: The next chip-scale technology," *Mater. Today*, vol. 9, no. 7–8, pp. 20–27, July–Aug. 2006.

Oberflächenplasmon entlang einer Grenzfläche zwischen Metall und Dielektrikum

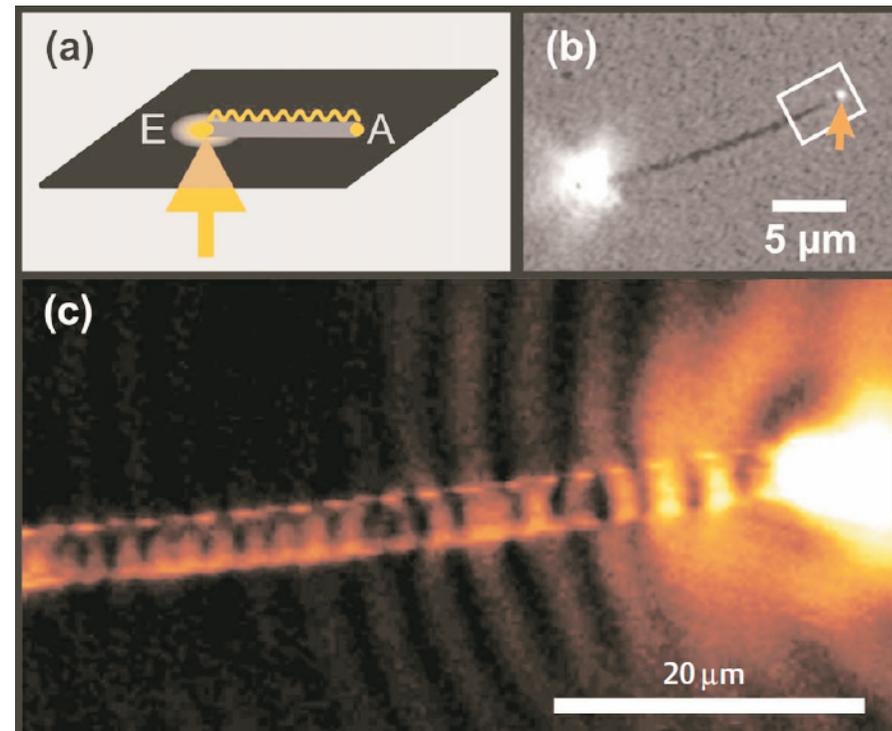
- Ein lokales entlang einem Nanodraht ausgerichtetes elektrisches Feld bewirkt eine lokale Ladungsträgerseparation, welche sich entlang des Nanodrahts in Form eines Oberflächenplasmons ausbreitet.
- Das Oberflächenplasmon besteht aus einer kollektiven Anregung von Elektronen und einem optischen Nahfeld und breitet sich mit 50% bis 80 % der Lichtgeschwindigkeit aus.



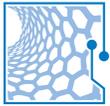
H. Ditlbacher, A. Hohenau, D. Wagner, W. Kreibig, M. Rogers, F. Hofer, F. Aussenegg, and J. Krenn, "Silver nanowires as surface plasmon resonators," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 95, no. 257403, pp. 1–4, 2005.

Plasmonische Lichtausbreitung entlang eines Silber-Nanodrahtes

- (a) Lichteinkopplung mit fokussiertem Laserstrahl bei 785 nm
- (b) Mikroskopaufnahme eines 18.6 μm langen Silber - Nanodrahtes
- (c) REM – Aufnahme des Endes eines Nanodrahts.



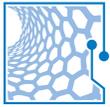
H. Ditlbacher, A. Hohenau, D. Wagner, W. Kreibig, M. Rogers, F. Hofer, F. Aussenegg, and J. Krenn, "Silver nanowires as surface plasmon resonators," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 95, no. 257403, pp. 1–4, 2005.



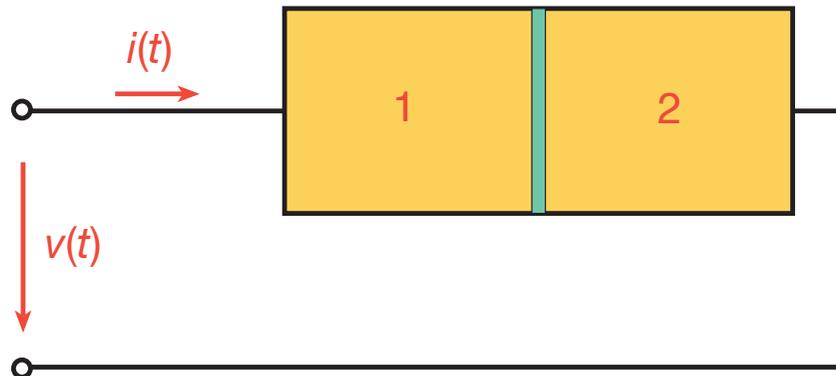
Supraleitende Nanoelektronik

- Supraleitende nanoelektronische Bauelemente haben ein großes Potential für Anwendungen bei höchsten Frequenzen und niedrigsten Leistungen.
- Die supraleitende Elektronenphase wird durch eine kohärente Materiewellenfunktion beschrieben.
- Das führt zu hoher Leitfähigkeit, niedrigen Fluktuationen und makroskopischen kohärenten Quanteneffekten.
- Josephson-elemente sind die aussichtsreichsten Kandidaten für Quanteninformationsverarbeitung.

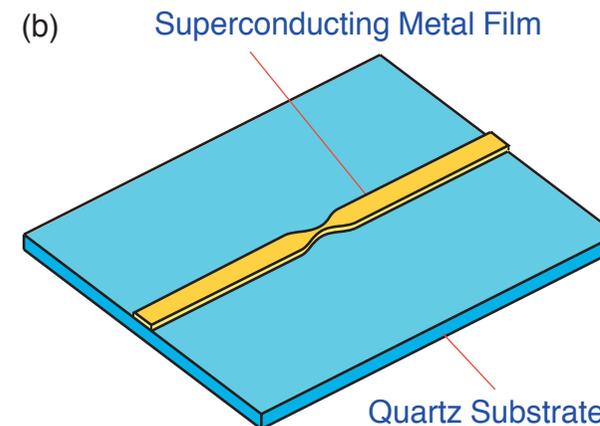
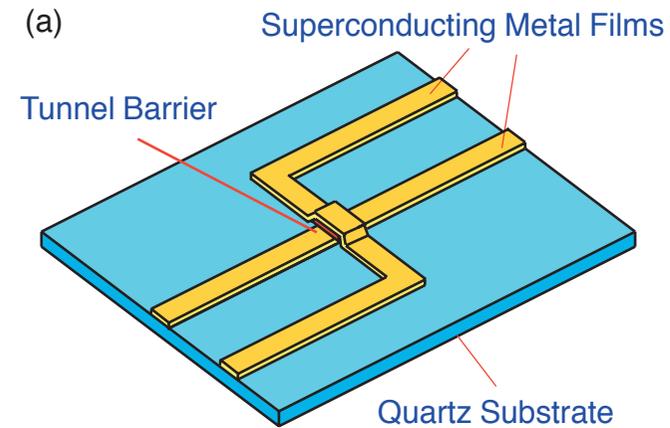
P. Russer und J. A. Russer, „Nanoelectronic RF Josephson Devices“, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Bd. 59, Nr. 10, S. 2685 – 2701, Okt. 2011.

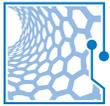


Josephson elemente

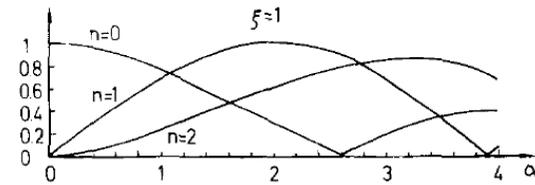
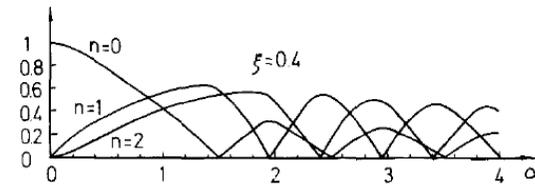
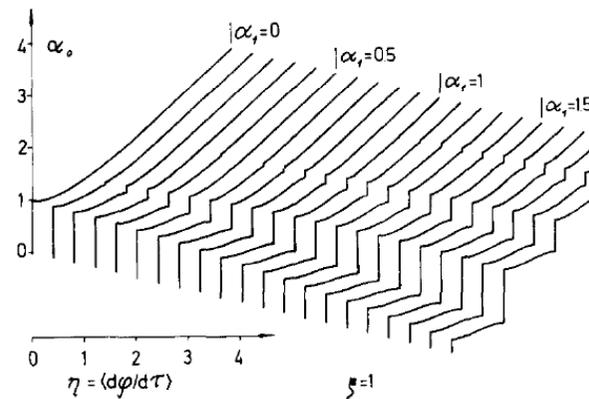
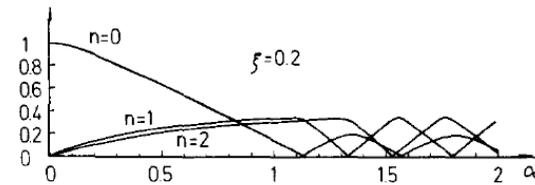
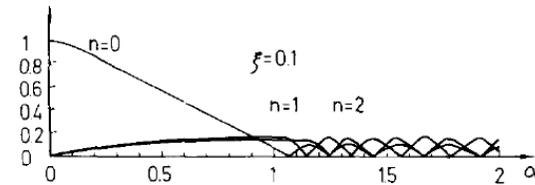
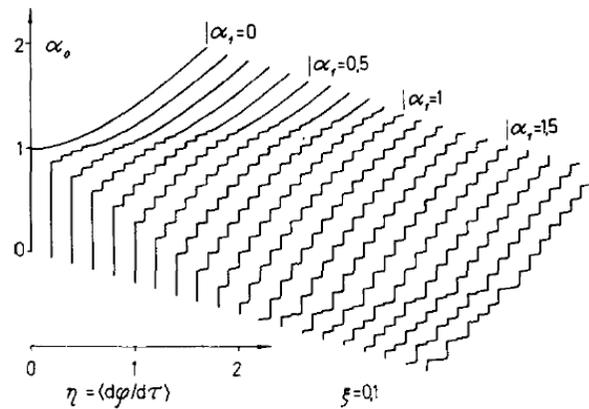


$$I(t) = I_{max} \sin \phi(t)$$
$$\dot{\phi} = \frac{2e_0 V_0}{\hbar}$$



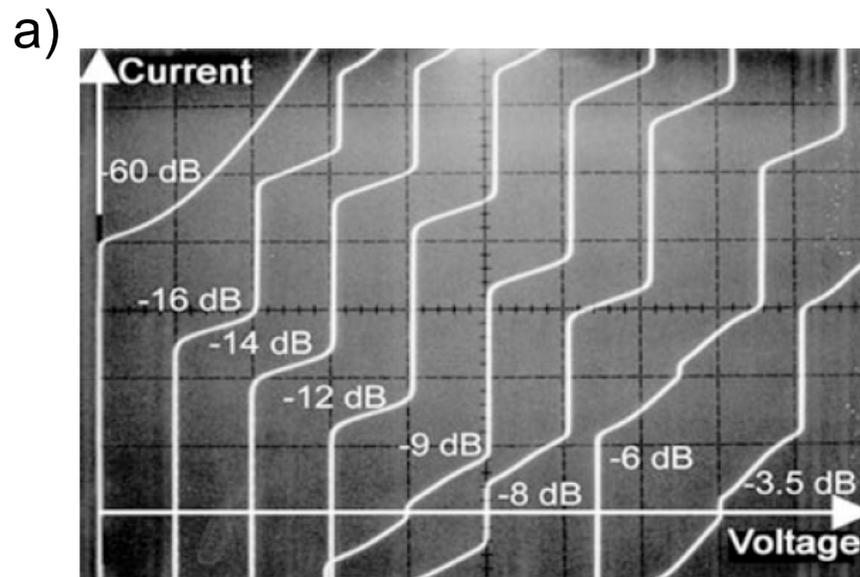


Der Wechselstrom – Josephsonneffekt

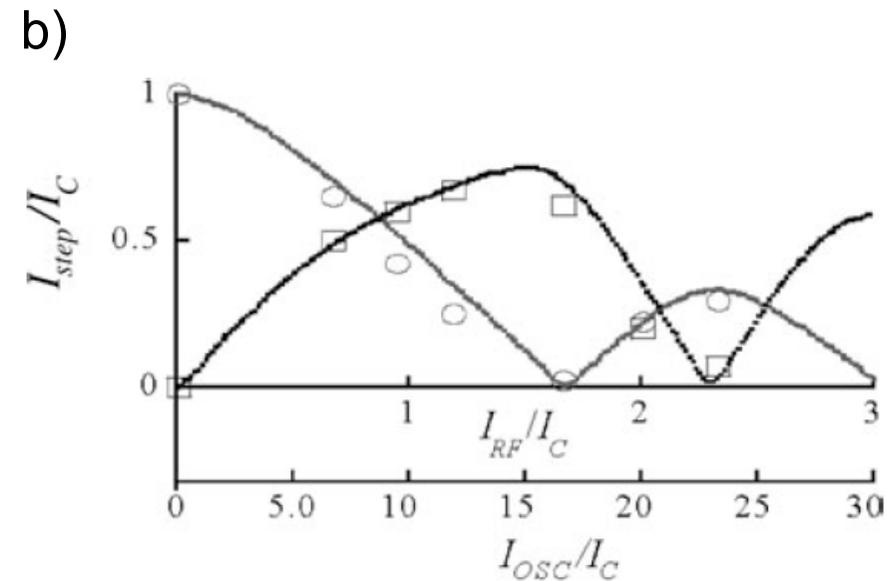


P. Russer, "Influence of microwave radiation on current-voltage characteristic of Superconducting weak links," *Journal of Applied Physics* 43, (1972), pp. 2008-2010.

Millimeter-Wellen Detektor mit Hochtemperatur-Supraleiter



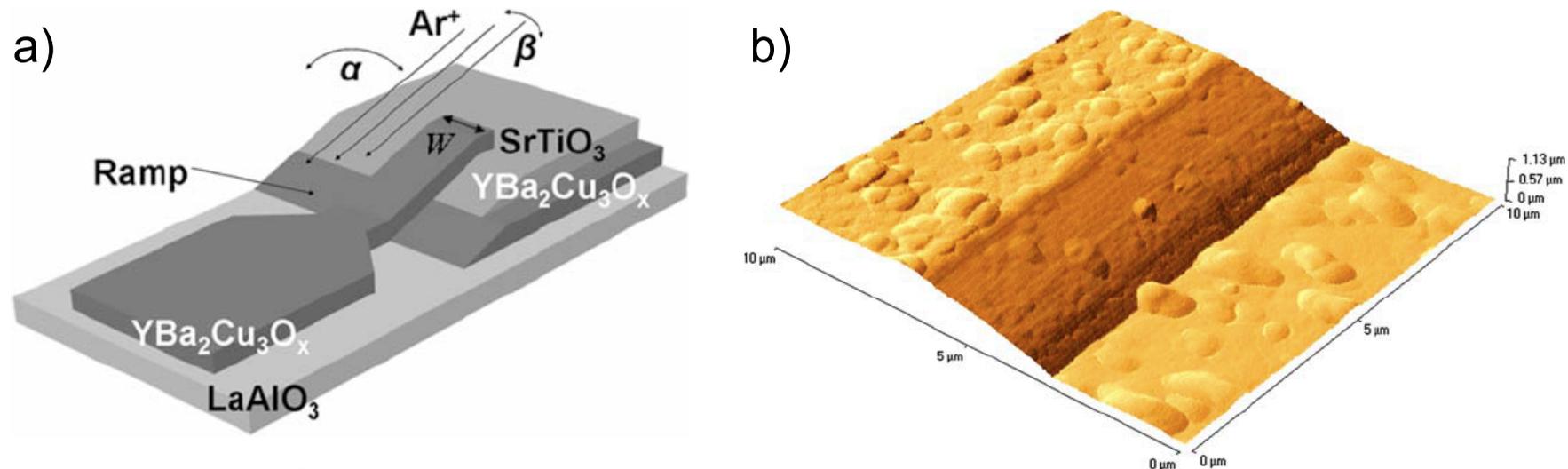
I–V Charakteristik
für Einstrahlung von 98 GHz
($T=64\text{K}$, $X:200\mu\text{V}/\text{div}$, $Y: 100\mu\text{A}/\text{div}$)



Gemessene und berechnete
Stufenhöhe.

J. Chen and Y. Kurigata and H. B. Wang and K. Nakajima and T. Yamashita and P. H. Wu,
“Sensitivity of high temperature superconducting Josephson detectors at millimetre-wave band,”
Superconductor Science and Technology vol. 16, pp. 1391–1393, (2003).

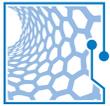
Ramp-type $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ SNS Josephson Junction



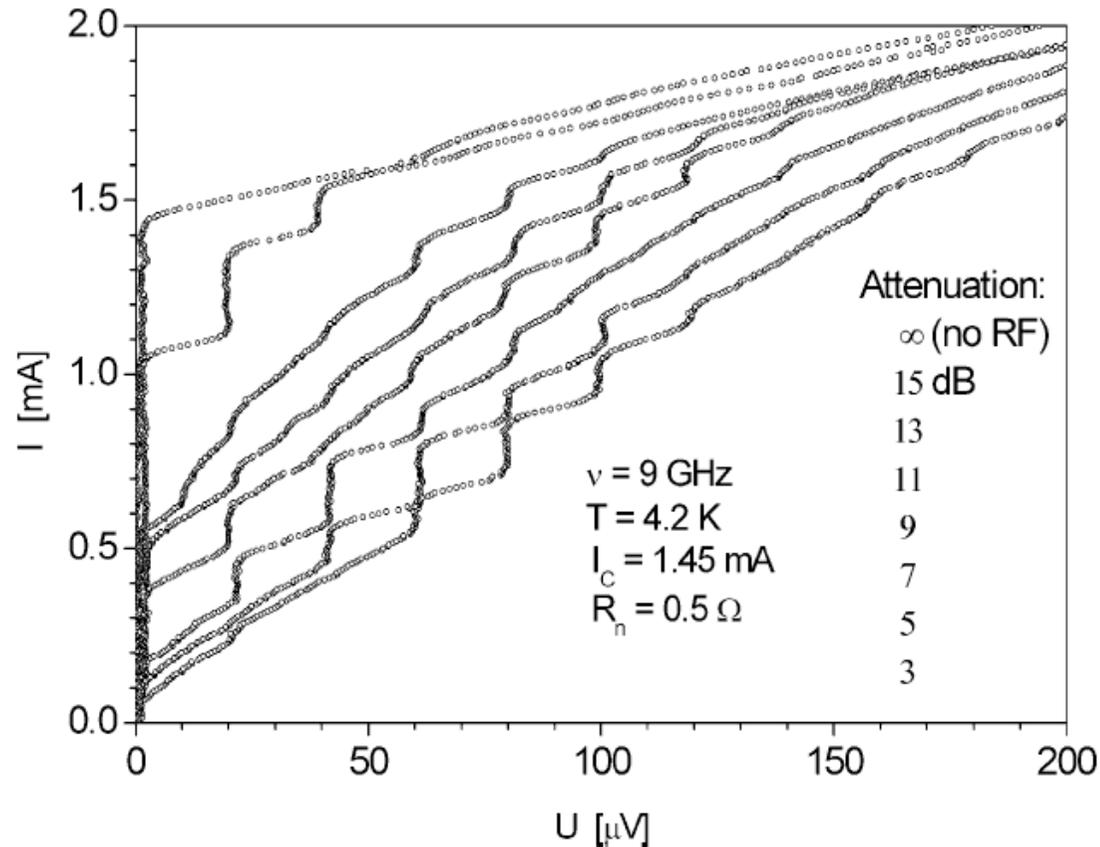
a) Drawing, b) atomic force microscope micrograph of
b) Ramp-type $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ SNS Josephson Junction.

SNS Josephson junctions have been fabricated on 200nm thick YBCO Thin film deposited on LaAl_2O_3 substrates. The 300 nm thick SrTiO_3 Insulation layer was in situ deposited by RF-sputtering.

Z. Ószi, Š. Beňačka, M. Španková, und Š. Chromik, "Ramp-type $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ SNS Josephson junctions with interlayer via ion damage," *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 435, 2006, S. 46–49.

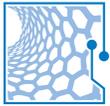


Ramp-type $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ SNS Josephson Junction

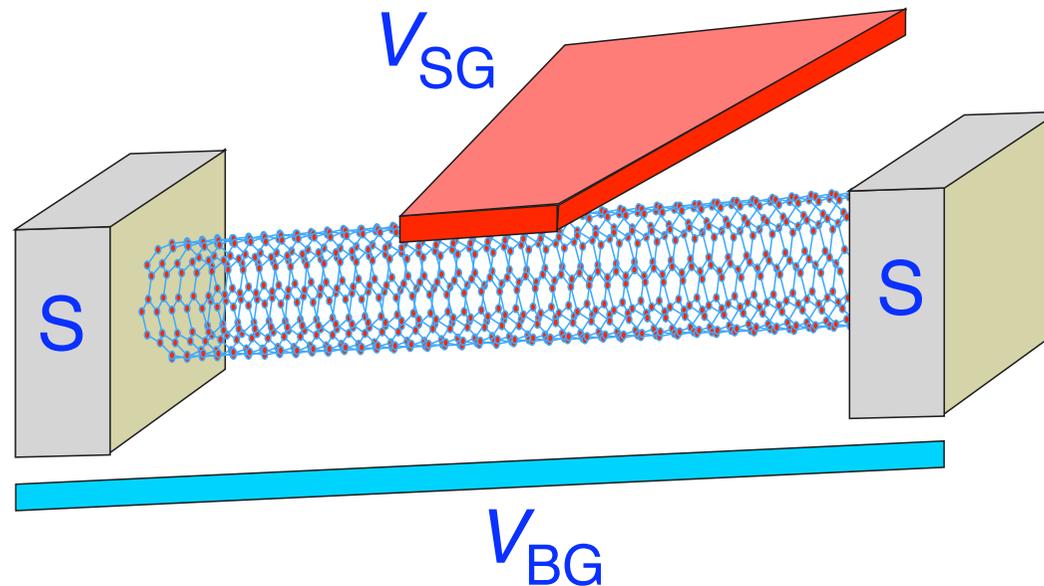


DC characteristics under 9 GHz
Microwave irradiation at different
Amplitudes.

Z. Ószi, Š. Beňačka, M. Španková, and Š. Chromik, "Ramp-type $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ SNS Josephson junctions with interlayer via ion damage," *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 435, 2006, S. 46–49.



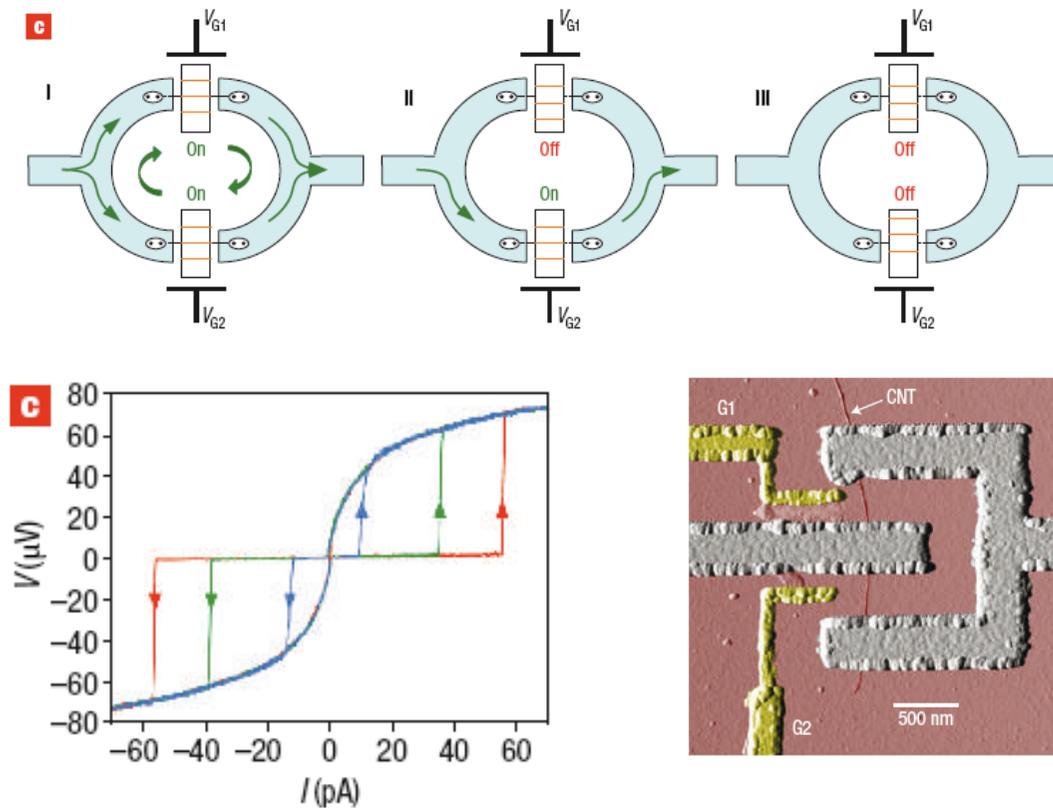
Gate - gesteuerte CNT Josephson Junction



Das Vorzeichen der Strom-Quantenphasenbeziehung kann über die Gate – Elektrode gesteuert werden.

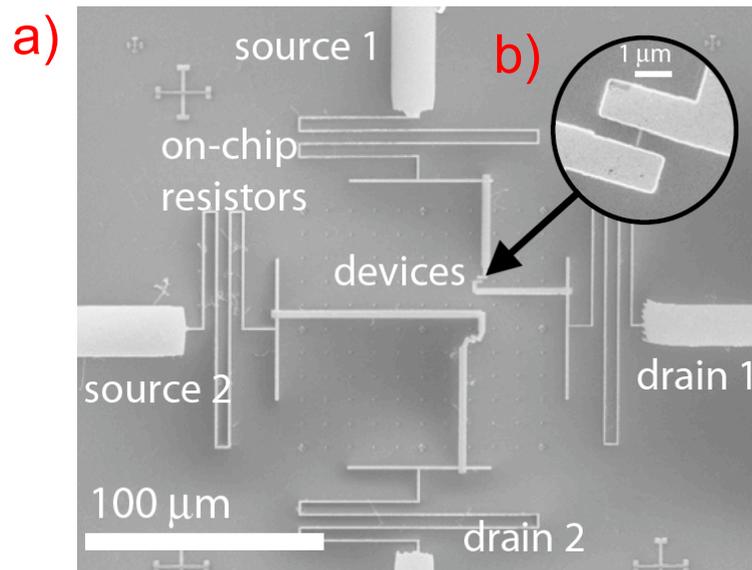
J.P. Cleuziou, W. Wernsdorfer, V. Bouchiat, T. Ondarcuhu, und M. Monthieux, "Tuning the Kondo effect with back and side gates-Application to carbon nanotube superconducting quantum interference devices and pi-junctions," *Arxiv preprint cond-mat/0610622*, 2006.

Gate - gesteuertes CNT - SQUID

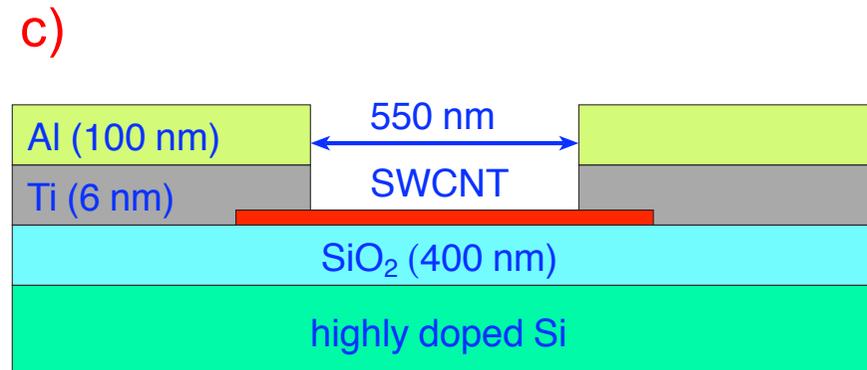


J.P. Cleuziou, W. Wernsdorfer, V. Bouchiat, T. Ondarçuhu, und M. Monthieux, "Carbon nanotube superconducting quantum interference device," *Nature nanotechnology*, vol. 1, 2006, p. 53.

Gesteuerte CNT Josephson Junction

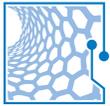


- a) Scanning electron micrograph
b) of the electrical on-chip environment of the CNT.

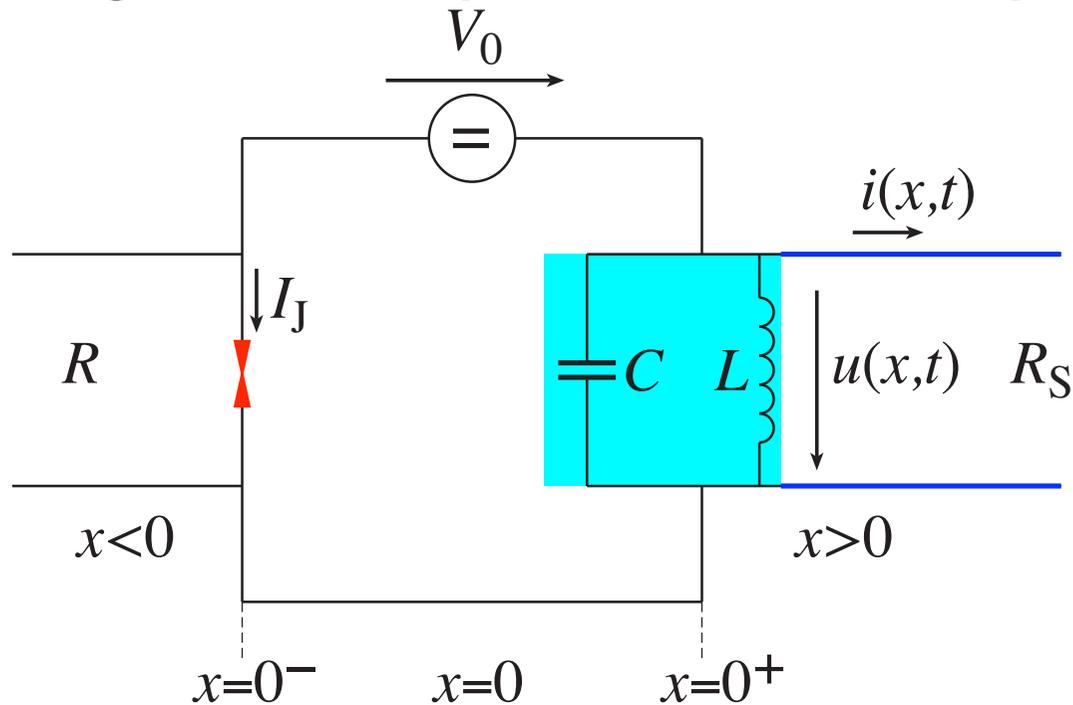


- c) Cross section of the mounted CNT

A. Eichler et al, "Tuning the Josephson current in carbon nanotubes with the Kondo effect," *Physical Review B*, vol. 79, Apr. 2009, S. 161407.



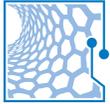
Squeezed-State Generation by a DC Pumped Degenerate Josephson Parametric Amplifier



Squeezed states may be generated with a DC pumped degenerate Josephson junction parametric amplifier (DCPJPA).

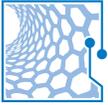
F.X. Kaertner, P. Russer, "Generation of squeezed microwave states by a dc-pumped degenerate parametric Josephson junction oscillator," *Phys. Rev. A* **42**, (1990), pp. 5601 – 5612.

P. Russer, F.X. Kärtner "Squeezed-state generation by a DC pumped degenerate Josephson parametric amplifier", *AEÜ Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, **44** (1990), pp. 216-224.

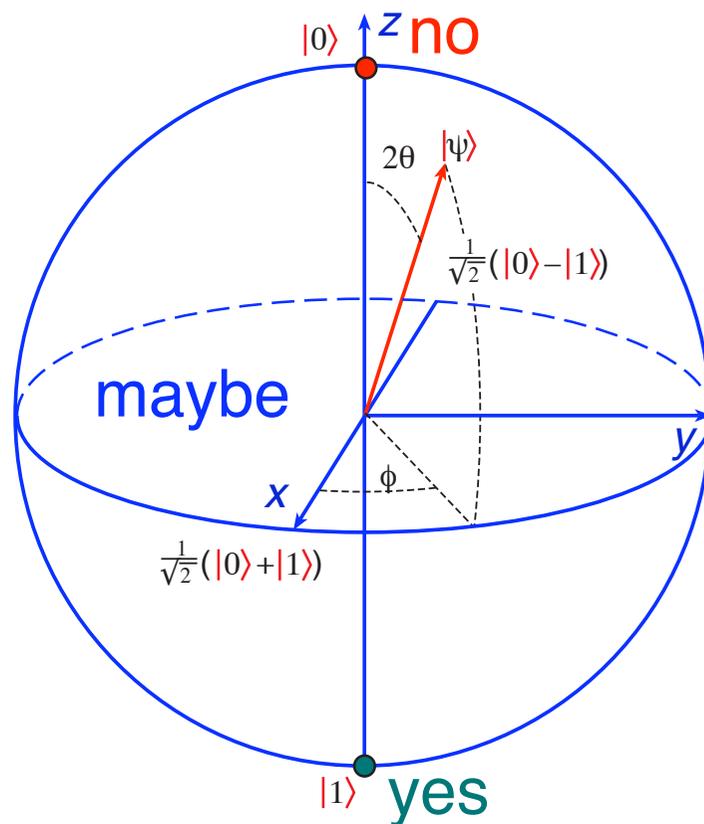


Quanteninformationsverarbeitung

- Quanteninformationsverarbeitung und Quantum Computing basieren auf der Darstellung von Information durch Quantenzustände.
- Im Gegensatz zu einem klassischen binären System, welches nur die Zustände 0 oder 1 annehmen kann, ein quantenmechanisches binäres System beliebige Superpositionen dieser Zustände annehmen kann.
- Richard P. Feynman hat in seiner Arbeit “Simulating physics with computers” festgestellt, dass ein quantenmechanisches System mit vielen Freiheitsgraden durch eine entsprechend hochdimensionale Wellenfunktion dargestellt werden muss.
 - Richard P. Feynman. *Simulating physics with computers. International Journal of Theoretical Physics, 21(6/7):467–488, 1982.*



Das Qubit (Quantenbit)

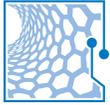


Die Bloch - Kugel

$$|\psi\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle$$

$$|\alpha_0|^2 + |\alpha_1|^2 = 1$$

- Die Messung eines Qubit liefert immer das Ergebnis **0** oder **1**.
- Die komplexen Amplituden α_0 und α_1 bestimmen die Wahrscheinlichkeiten $|\alpha_0|^2$ und $|\alpha_1|^2$, das Ergebnis **0** oder **1** zu erhalten.
- Nach der Messung ist das Qubit im Quantenzustand **$|0\rangle$** oder **$|1\rangle$** .

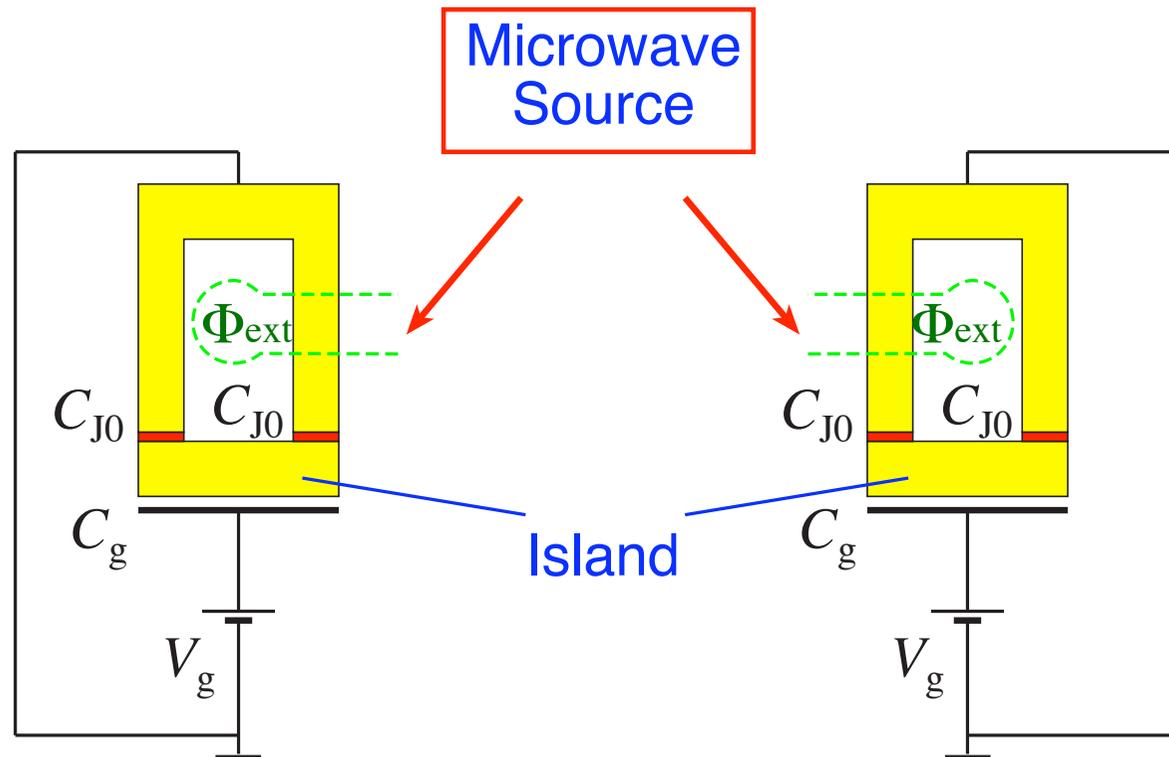


Quanteninformationsverarbeitung

- Im Jahr 1985 hat David Deutsch erstmalig ein vollständiges quantenmechanisches Modell für Quantencomputer gegeben.
- Die quantentheoretische Simulation von komplexen klassischen Systemen wird Quantencomputer erfordern, welche über eine große Anzahl von Speicherzellen für Quantenzustände verfügen, vergleichbar der Größe klassischer Computer.
- Das wird zu Problemen mit der sogenannten Dekohärenz führen.
- Dekohärenz tritt auf, wenn ein Quantensystem in Wechselwirkung mit einem klassischen Vielteilchensystem tritt.
- Dabei wird der Quantenzustand gemessen und kann beobachtet werden. Er wird jedoch dabei auch zerstört.

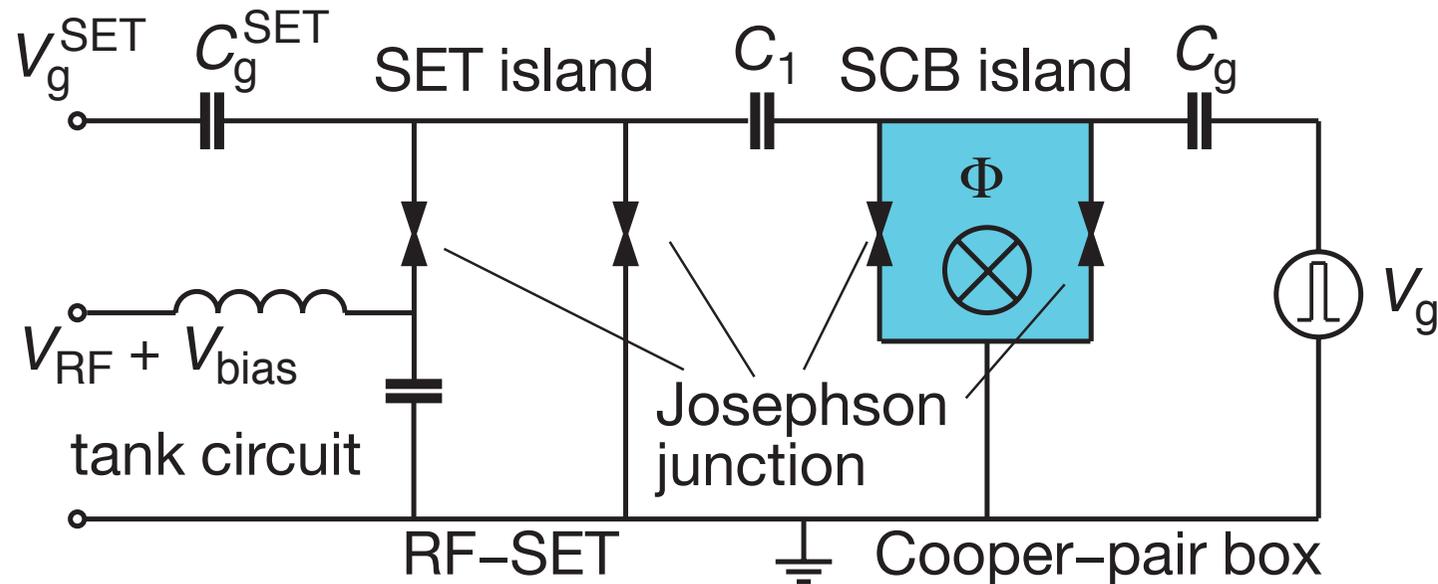
Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

Entanglement between two superconducting qubits via interaction with nonclassical radiation



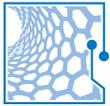
M. Paternostro, G. Falci, M. Kim, und G. Massimo Palma, "Entanglement between two superconducting qubits via interaction with nonclassical radiation," *Physical Review B*, vol. 69, 2004, S. 214502.

Josephson Charge-Qubit

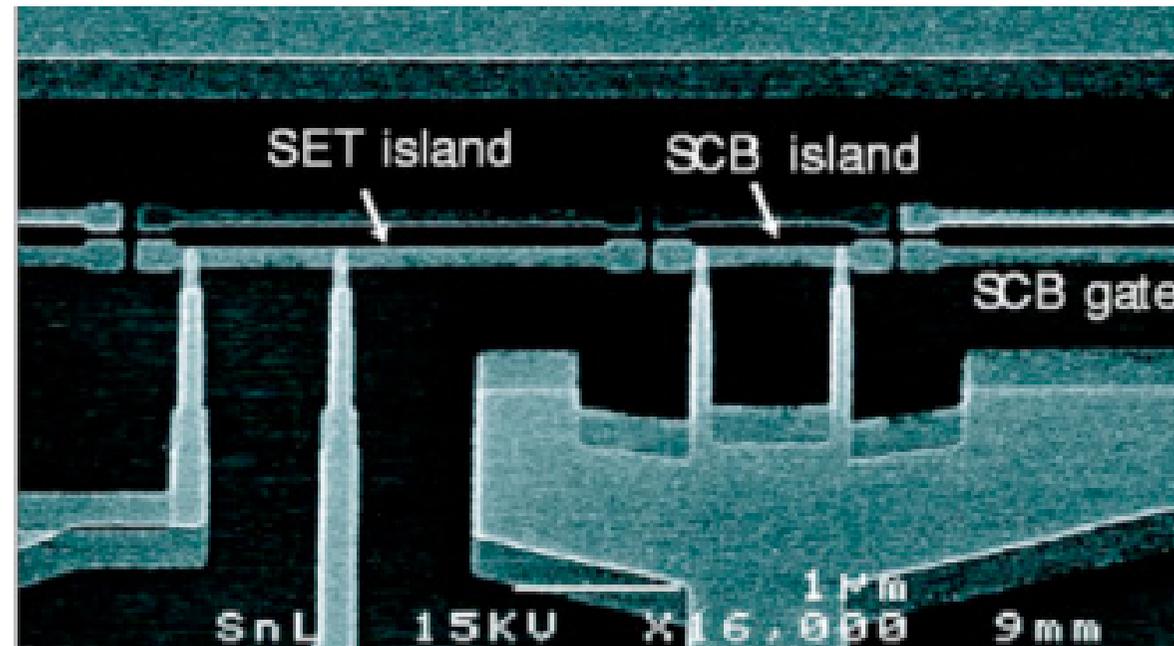


Josephson charge qubit, realized on the basis of a single-Cooper-pair box (SCB) coupled to a single electron transistor electrometer.

T. Duty, D. Gunnarsson, K. Bladh, and P. Delsing, "Coherent dynamics of a Josephson charge qubit," *Phys. Rev. B*, vol. 69, no. 140503, pp.1–4, 2004.

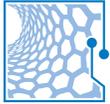


Josephson Charge-Qubit



SCB circuit fabricated by electron beam lithography and shadow vaporation of aluminium films onto oxidized silicon substrate.

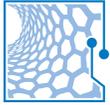
T. Duty, D. Gunnarsson, K. Bladh, and P. Delsing, "Coherent dynamics of a Josephson charge qubit," *Phys. Rev. B*, vol. 69, no. 140503, pp.1–4, 2004.



Quantencomputer

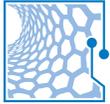
- Ob und inwieweit sich Quantencomputer für die Behandlung allgemeiner Aufgaben als Hochleistungsrechner einsetzen lassen werden können ist noch Gegenstand der Forschung.
- Durch den Quantenparallelismus wird eine erhebliche Leistungssteigerung im Vergleich zu klassischen Computern erwartet.
- Für die Behandlung allgemeiner Aufgaben benötigt man eine extrem große Anzahl an Quantenbits.
- Die Realisierung von Systemen mit einer großen Anzahl kohärenter Quantenbits ist jedoch noch nicht gelungen und stellt wegen des Dekohärenz-Problems eine große Herausforderung dar.
- In diesem Bereich können mesoskopische supraleitende Bauelemente auf Basis des Josephsoneffektes wegen ihrer steuerbaren Quanteneigenschaften und der langen Kohärenzzeit eine Rolle spielen.

[Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.](#)



Zellulare Automaten

- Zellulare Automaten sind theoretisch mindestens ebenso erforscht wie Quantencomputer.
- Diese Architekturen basieren auf einfachen Gesetzen der direkten nachbarlichen Wechselwirkung zwischen sehr kleinen Bauelementen.
- Man kann sich ihre Funktion leicht vorstellen wenn man an komplizierte Strukturen von Dominos denkt, die nach einfachen mechanischen Regeln mit ihren Nachbarn wechselwirken und dadurch komplizierte Algorithmen ausführen können.
- Tommaso Toffoli. Physics and computation. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(3/4):165–175, 1982.

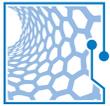


Zellulare Quantenautomaten

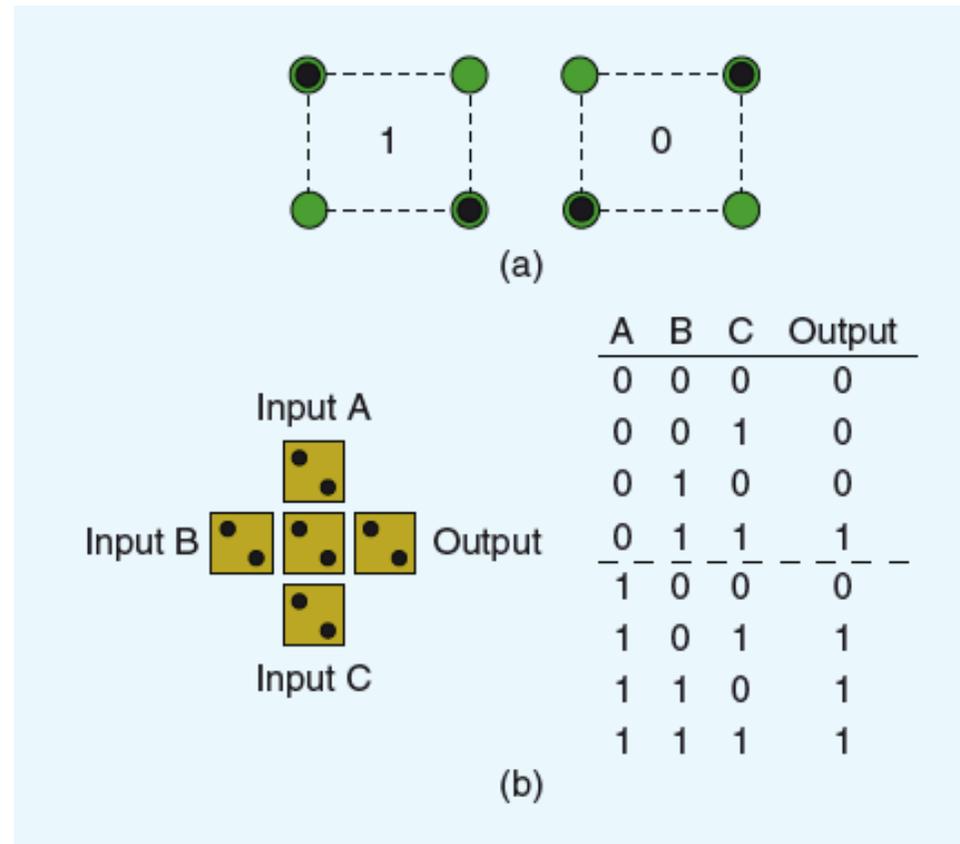
- Zellulare Automaten stellen auch interessante Architekturen für Quantencomputer dar.
- Ähnlich wie klassische zellulare Automaten lassen sie sich mit Quantenpunkten, Josephsonkontakten oder Nanomagneten realisieren.
- Das Problem der Erhaltung der Quantenkohärenz stellt im Vergleich zur Realisierung klassischer zellularer Automaten eine erhebliche Hürde dar.

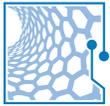
Lin Tian and P. Zoller. Quantum computing with atomic Josephson junction arrays. *Physical Review A*, 68:042321, 20 Oct. 2003.

G.L. Snider, A.O. Orlov I. Amlani, X. Zuo, G.H. Bernstein, C.S. Lent, J.L. Merz and Wolfgang Porod. Quantum-dot cellular automata. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 17(4):1394–1398, Jul–Aug 1999.



Quantum Cellular Automata

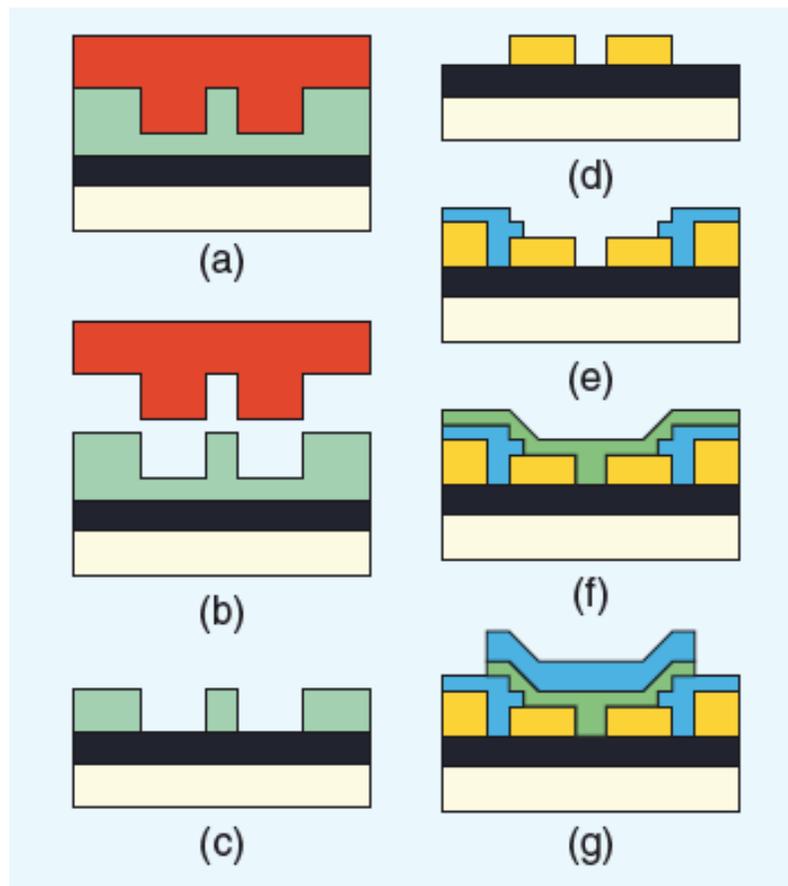




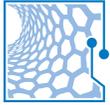
Neue Materialien und Prozesse

- Kohlenstoffbasierte Materialien, wie z.B. Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nanotubes) und Graphene
 - Organische Materialien
 - Flüssighasen-prozessierbare anorganische Materialien
 - Magnetische Materialien für die Spin-Elektronik
 - Nanodrähte und nanostrukturierte metallische, halbleitende und dielektrische Materialien
 - Supraleitende Materialien
 - Biologische Materialien (Nanobiotechnologie)
 - Optische Metamaterialien
-

Nanoimprint - Technologie

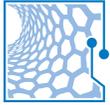


- M. D. Austin and S. Y. Chou, "Fabrication of 70 nm channel length polymer organic thin-film transistors using nanoimprint lithography," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 4421, pp. 4431–4433, 2002.
- [145] G. Scarpa, F. Brunetti, S. Harrer, and P. Lugli, "Nanoimprint lithography for optical components," in *Proc. 9th Int. Conf. Transparent Optical Networks, 2007, ICTON'07, 2007*, vol. 2.



Fazit Fernziele

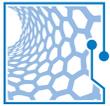
- Nanoelektronik ist eine neue Basistechnologie, deren Beherrschung innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette für den Bestand einer Volkswirtschaft von Entscheidender Bedeutung ist.
- Dazu gehört Führerschaft im Bereich der Technologieentwicklung und davon abgeleiteter Innovationen.
- Es existieren verschiedene Entwicklungslinien, wobei die klassische Siliziumtechnologie gegenwärtig volumenmäßig dominant ist und aus heutiger Sicht bis 2020 noch über ein erhebliches Entwicklungspotential verfügt.
- Trotzdem zeichnet sich deutlich ab, dass die Entwicklung der komplementären Silizium MOS Technologie an ihre inhärenten physikalischen (und Kosten-) Grenzen stoßen wird.



Fazit Fernziele

- Im Sinne der Sicherung der europäischen Wirtschaft ist eine intensive Weiterentwicklung der Nanoelektronik sowohl in den Bereichen der klassischen Siliziumtechnologie als auch in den Bereichen innovativer organischer und kohlenstoffbasierter Halbleitermaterialien, sowie die Erforschung und frühzeitige Überleitung in die Entwicklung von stärker zukunftsorientierten Lösungsansätzen basierend auf neuartigen Materialien und neuartigen Bauelementen (Spintronik, Plasmonik, supraleitende Bauelemente) erforderlich.
- In all diesen Bereichen sind Standorte in Forschung, Entwicklung und Fertigung innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette in Deutschland und in Europa von großer Bedeutung.

[acatech bezieht Position Nr. 8: Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland, www.acatech.de, 2011.](http://www.acatech.de)

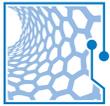


acatech bezieht Position

Empfehlungen

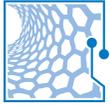
- **zur Strategischen Ausrichtung der Forschung und Entwicklung**
 - Den uneingeschränkten Zugang zu allen Basistechnologien der Wertschöpfungskette sicher stellen
- **zu Forschung und Forschungsförderung**
- **zu Forschung und Forschungsstrukturen**
 - Etablierung fokussierter Forschungszentren





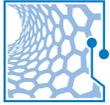
Empfehlungen von acatech

- acatech empfiehlt für Themenstellungen der Nanoelektronik die Etablierung von fokussierten Forschungszentren in Deutschland unter starker Einbeziehung der Industrie und unter Vermeidung von Konkurrenz zwischen Regionen.
- Die Initiative hierzu könnte vom BMBF ausgehen und gemeinsam mit den Forschungsorganisationen und den Hochschulen umgesetzt werden.
- Dabei ist zu berücksichtigen, dass vorhandene deutsche Infrastrukturen einbezogen und eine Kooperation mit anderen europäischen Forschungseinrichtungen vorgesehen wird.



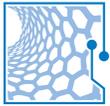
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt die weitere personelle Vernetzung zwischen Wirtschaft und Wissenschaft.**
- Eine personeller Austausch zwischen Unternehmen und Hochschulen sowie Forschungseinrichtungen wird als besonders wichtig für den Bereich der “More than Moore” Technologien angesehen.
- Diese werden im starken Maße vom Mittelstand aufgegriffen und so erst nachgelagerten Branchen verfügbar gemacht.
- Daher werden KMU im besonderen Maße durch wechselseitige Entsendung von Wissenschaftlern unterstützt.
- Bei der Überführung innovativer Entwicklungen in Produkte können Spin-Offs eine wichtige Rolle spielen.



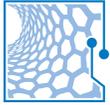
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt die Entwicklung von Abläufen und Strukturen, die den wirtschaftlichen Zugang zu Technologien für Massenmärkte auch bei kleineren Stückzahlen ermöglichen.**
- **Das BMWi bietet sich hier für eine Koordinierung an.**
- Im zunehmenden Maße werden neue Technologien in der Nanoelektronik zunächst für Massenmärkte entwickelt.
- Für den wirtschaftlichen Zugang gelten dabei meist hohe Stückzahlenanforderungen. Insbesondere KMU mit spezialisierten Produkten in profitablen Nischenmärkten, sind damit von der Verbesserung mittels dieser Technologien abgeschnitten.
- Daher wird die Etablierung von Abläufen/Kooperationen und Strukturen (Foundries) empfohlen, die diese Zugangsvoraussetzungen reduzieren können.



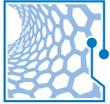
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt, die Systemkompetenz und Technologien zur Systemintegration in Deutschland vorzuhalten und fortzuentwickeln.**
- Durch zunehmende Verwendung von Multi-Chip Packages und System-on-Chip Ansätzen erlangen die hierfür verwendeten Basistechnologien, u.a. auch die 3D Integration immer stärkere Bedeutung.
- Zudem gewinnen diese Komponenten immer größeren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems.



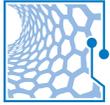
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt den uneingeschränkten Zugang zu allen Basistechnologien der Wert-schöpf-ungs-ket-te sicherzustellen.**
- Für die Verfügbarkeit der gesamten technologischen Wertschöpfungskette muss der uneingeschränkte Zugang zu allen wichtigen Basistechnologien und ihrer Fortentwicklung gesichert werden.
- Sie ist die Basis für Gesamtsystemoptimierungen und für die Erhaltung der Innovationsfähigkeit und damit der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrielandschaft.
- Dabei ist es insbesondere wichtig, dass die für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit notwendigen Basistechnologien in Deutschland und Europa in der Forschung und Industrie vorhanden sind.



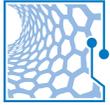
Empfehlungen von acatech

- Alle Ebenen der Wertschöpfungskette sollten zumindest innerhalb der Europäischen Union vorhanden sein, damit man die Möglichkeit hat, auf geänderte wirtschaftliche Rahmenbedingungen zu reagieren.
- Auf diesem Gebiet empfiehlt acatech eine industriepolitische Förderung, z.B. auch durch das Wirtschaftsministerium.
- Dabei sind insbesondere auch Maßnahmen zum Schutz der deutschen und europäischen Industrie vor den Folgen von Wettbewerbsverzerrungen durch die Förderungspolitik und staatliche Auftragsvergabe in außereuropäischen Regionen gefordert.



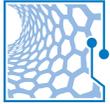
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt die verstärkte Förderung der Systemintegration und der Zuverlässigkeit von Sensorik und Aktorik.**
- Die Kombination von nanoelektronischen Systemen mit Sensorik und Aktorik ist ein starkes Innovationselement für viele wichtige Anwendungsbereiche.
- Darunter fallen im besonderen Maße die zukünftigen gesellschaftlichen Herausforderungen wie Umweltschutz, Energieeffizienz und eine alternden Bevölkerung.
- Gleichzeitig besteht ein erheblicher Entwicklungs- und Finanzierungsbedarf hinsichtlich der Systemintegration und einer Verbesserung der Zuverlässigkeit von sensorischen und aktorischen Komponenten.



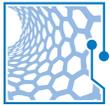
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt, auf eine abgestimmte Entwicklung der Technologie- und Systemseite zu achten.**
- Neue Technologien und Konzepte werden sich am Markt nur durchsetzen können, wenn sie zu besseren Problemlösungen im Vergleich zu bereits bestehenden Produkte führen.
- Daher muss die gesamte Technologiekette bis zum Gesamtsystem betrachtet werden.
- Bereits ab dem Beginn von Entwicklungsprojekten sollte die Technologie- und die Systemseite abgestimmt vorangetrieben werden.



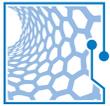
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt die Erforschung und Entwicklung von Bauelementen auf Basis von organischen Halbleitern.**
- Derartige Bauelemente sind für kostengünstige und großflächige Bauelemente, z.B. Bildschirme von großer Bedeutung und bereits an der Schwelle zur industriellen Produktion.



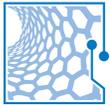
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt ein Engagement der Industrie in der Entwicklung von Bauelementen auf Basis von kohlenstoffbasierten Materialien und deren weitere Erforschung.**
- Kohlenstoff-Nanoröhren und Graphen sind hervorragende Basismaterialien für eine Vielzahl von innovativen Bauelementen.
- Mit Kohlenstoff-Nanoröhren lassen sich in Drucktechnik kostengünstig Transistoren und Schaltkreise herstellen. Integrierte Schaltkreise auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren oder Graphen können die Leistungsdaten der besten Halbleiterschaltkreise übertreffen.
- Integrierte Antennen auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren oder Graphen können vielfältige Anwendungen finden.
- Besonders interessant sind die Kohlenstoff-Nanoröhren und Graphen für Anwendungen in Superkondensatoren zur Energiespeicherung.



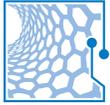
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt die Entwicklung neuartiger Bauelemente wie z.B. magnetische Bauelemente, plasmonische Bauelemente, zellulare Automaten, supraleitende Bauelemente, biologische Bauelemente.**
- Diese Bauelemente erfordern noch größere Forschungsanstrengungen bis zur Erreichung der Schwelle für die industrielle Entwicklung, haben jedoch ein so hohe zu erwartende Leistungsfähigkeit, dass es wichtig ist, diese Schwelle möglichst frühzeitig zu erreichen.
- Diese Forschungsanstrengungen sollten ermöglicht und unterstützt werden durch eine Finanzierung durch das BMBF. Durchgängig ist zu erarbeiten, welche Forschungsfelder die aussichtsreichsten sind und weiter zu verfolgen sind.



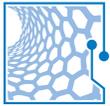
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt intensive Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung.**
 - Die Quanteninformationsverarbeitung hat sich inzwischen als Wissenschaftsdisziplin hervorragend etabliert und weist bereits beträchtliche wissenschaftliche Erfolge auf.
 - Trotzdem sind viele wesentliche Fragen noch ungeklärt. Insofern ist auf diesem Gebiet ein sehr weiter zeitlicher Horizont anzusetzen.
 - Wegen des sehr großen Potentials der Quanteninformationsverarbeitung ist diesem Gebiet eine entsprechende Wichtigkeit beizumessen.
 - Insbesondere ist bei diesen Entwicklungen verstärkt ein ingenieurmäßiges Systemdenken einzubringen.
-



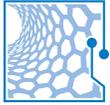
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt der Politik und der Industrie durch Öffentlichkeitsarbeit das Bewusstsein der Wichtigkeit der Nanoelektronik für die positive Entwicklung der deutschen Volkswirtschaft zu verstärken.**
- Dieses Bewusstsein ist wichtig, um Entscheidungen zur Bewahrung und Weiterentwicklung der nanoelektronischen Industrie reifen zu und im politischen Umfeld mehrheitsfähig werden zu lassen.



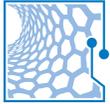
Empfehlungen von acatech

- **acatech empfiehlt, die Umsetzung von der Forschung in die Produktion systematisch zu fördern.**
- Hierzu ist ein Prozess zu etablieren, um systematisch zu evaluieren, welche neuen Entwicklungen in der nationalen und internationalen Forschung für die deutsche Wirtschaft von besonderer Bedeutung sind.
- Auf solchen Feldern sollten gezielte produktorientierte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zügig in Gang gesetzt und gefördert werden.
- Dabei ist auch die Generierung von Schlüsselpatenten wichtig.
- Das vorrangige Ziel dieser Maßnahmen soll sein, der deutschen Industrie durch frühen Markteintritt mit neuen Produkten Differenzierungsvorteile zu verschaffen.



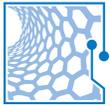
Danksagung

- Mitarbeit in der acatech Projektgruppe Nanoelektronik:
- Stellvertretende Projektleitung und Koordination des Bereichs Nahziele:
 - Doris Schmitt – Landsiedel
- Koordination des Bereichs Fernziele:
 - Paolo Lugli



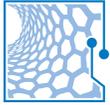
Danksagung

- Mitglieder der Projektgruppe:
- Dr. Ralf Anselmann, Evonik Degussa GmbH
- Dr. Wolfgang Arden, Infineon Technologies AG
- Prof. Dr. Christian Boit, Technische Universität Berlin
- Prof. Dr. Patrick Dewilde, Technische Universität München, IAS
- Prof. Dr. Harald Fuchs, Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- Prof. Dr. Heinz Gerhäuser, Fraunhofer - IIS, Universität Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr. Prof. h.c. mult. Thomas Geßner, Technische Universität Chemnitz
- Prof. Dr. rer. nat. Ernst Otto Göbel, PTB
- Dr. Karl-Heinrich Hahn, BASF SE
- Prof. Dr. Josef Hausner, Infineon Technologies AG
- Prof. Dr. Wolfgang M. Heckl, Deutsches Museum
- Prof. Dr. Joachim Heinzl, Bayerischen Forschungsförderung



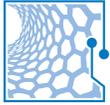
Danksagung

- Mitglieder der Projektgruppe:
- Prof. Dr. Karl Hess, Inst. f. Advanced Study, Univ. of Illinois at Urbana/Champaign, IL, USA
- Prof. Dr. Wolfgang J. R. Hoefer, Institute of High Performance Computing IHPC, Singapore
- Prof. Dr. Erich Kasper, Universität Stuttgart
- Prof. Dr. Günter von Kiedrowski, Ruhr-Universität Bochum
- Dr. Michael Lentze, Deutsche Forschungsgemeinschaft
- Prof. Dr. Paolo Lugli, Technische Universität München
- Prof. Dr. Wolfgang Mathis, Leibniz Universität Hannover
- Prof. Dr. Reinhard Neumann, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- Prof. Dr. techn. Josef A. Nossek , Technische Universität München



Danksagung

- Mitglieder der Projektgruppe:
- Prof. Dr. Wolfgang Porod, University of Notre Dame, Notre Dame, IN, USA
- Prof. Dr. techn. Dr. h. c. Peter Russer, Technische Universität München
- Prof. Dr. Doris Schmitt-Landsiedel, Technische Universität München
- Prof. Dr. Martin Stutzmann, Technische Universität München
- Prof. Dr. Roland Thewes, Technische Universität Berlin
- Prof. Dr. Frank Träger, Universität Kassel
- Prof. Dr. Robert Weigel, Universität Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr. Roland Wiesendanger, Universität Hamburg



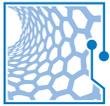
Danksagung

- **PROJEKTMANAGEMENT**

- Dr. Marc – Denis Weitze, acatech Geschäftsstelle München

- **PROJEKTMITARBEITER**

- Dr. Nikolaus Fichtner, TUM
 - Christoph Friederich, TUM
 - Dr. Rolf Gausepohl, Fraunhofer-Institut ISI, Karlsruhe
 - Dr. Johannes Russer, TUM
 - Elna Schirrmeister, Fraunhofer-Institut ISI, Karlsruhe
-



Danksagung

- Das Projekt wurde finanziell unterstützt durch:
 - BMBF, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Fraunhofer Verbund Mikroelektronik, Infineon Technologies AG, Kommission für Mikro/Nanoelektronik in Sachsen
- Das Symposium „Fernziele“ wurde finanziell unterstützt durch:
 - Gauss Instruments GmbH, Infineon Technologies AG, NIM, Siemens AG