

Implementierung von QuBits

Dieses Material ist ein stark verkürzter Auszug aus Band 3 meines Handbuchs der Speichertechnik (siehe Bücher von mir). Quantenspeicher besitzen deutlich andere Eigenschaften als klassische Speicher. In der Literatur werden sie daher fast nur in Bezug auf die Quanten-Computer und -Algorithmen betrachtet. Es besteht eine gewisse, wenn auch recht geringe Ähnlichkeit zu den Arbeitsspeichern klassischer Rechner. Es ist aber sehr unwahrscheinlich, dass hierfür Quantenspeicher jemals eine Konkurrenz werden könnten. Denn während der Speicherzeit müssen die QuBits ständig vollständig von der Umwelt isoliert sein. Sie müssen deshalb nämlich u.a. während der Speicherzeit Quantenspeicher auf extrem tiefe Temperaturen: Andererseits scheiterten bereits mehrfach die klassischen Tieftemperatur-Speicher. Die Speicherzeit wird weiter durch kosmische und radioaktive Strahlung sowie spontane Emission von Photonen und spontaner Zerfall von Atomen verkürzt. Näherungsweise gilt etwa, je größer die Masse des Objekts (z.B. Quanten-Register) ist, desto kürzer ist die entsprechende Dekohärenzzeit. Die

Superposition zweier Zustände mit 1 g Masse und 1 cm Abstand ist bereits nach 10^{-23} s zerstört. Die typischen Dekohärenzzeiten $t_{\text{Dekohärenz}}$ hängen erheblich vom verwendeten Quantensystem ab. Typische Werte zeigt die Tabelle. Für

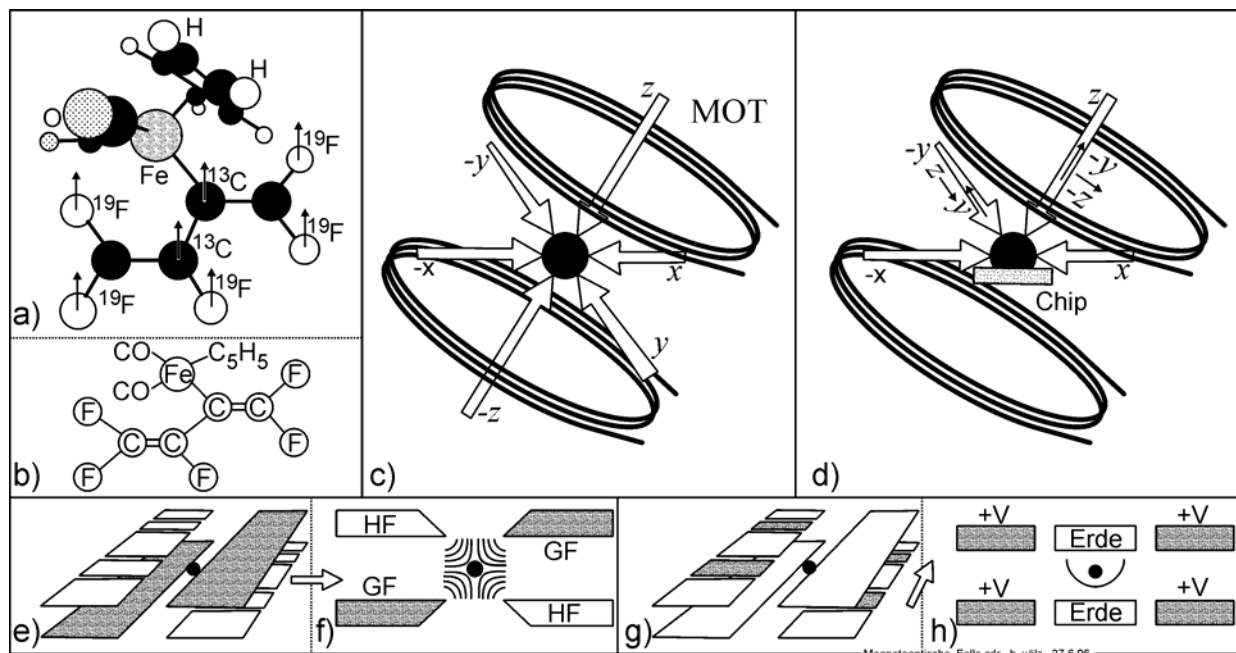
System	$t_{\text{Dekohärenz}}$	t_{Gatter}	Verhältnis
Ionenfallen	10^{-4} s	10^{-17} s	10^{13}
Kernspin	10 s	10^{-6} s	10^7
Quantenpunkte	10^{-6} s	10^{-9} s	10^3

Quantencomputer müssen diese Zeiten möglichst lang gegenüber den „Schaltzeiten“ t_{Gatter} der Quantengatter sein. Das Verhältnis beider gibt die Anzahl der maximal durchführbaren Operationen an. Bisher wurden maximal Dekohärenzzeiten von wenigen Sekunden erreicht. Deutlich längere Zeiten ermöglicht der technisch schwer zugängliche, aber sehr langsam „schaltbare“ Kern-Spin. Durch die Elektronenschalen ist er besonders gut von der Umwelt abgeschirmt. Die typischen Abmessungen der QuBits liegen im nm-Bereich. Sie sind folglich sehr klein und ermöglichen theoretisch eine sehr hohe Speicherdichte. Im klassischen Fall würde sich dadurch auch eine große Speicherkapazität ergeben. Doch bisher ist es bestenfalls gelungen, 100 QuBits zu verschränken. Die Quanten-Algorithmen ermöglichen dennoch wegen der Verschränkung und des gleichzeitigen Vorhandenseins aller Ergebnisse eine enorme Rechenleistung. Andererseits ist jedoch aus klassischer Sicht die nutzbare Speicherkapazität extrem klein (s.o.). Weiter muss die Information aus den QuBits – sie enthalten alle Rechenergebnisse – auf Makrosysteme übertragen werden. Nach bisherigen Erfahrungen ist dies nur sequentiell und nicht parallel möglich. Das bedeutet aber gerade wegen der extrem hohen Rechenleistung der Quanten-Computer eine erhebliche Begrenzung. Es ist dann nämlich ungewiss, ob die gewonnenen großen Datenmengen über hinreichend lange Zeit in den Quantenregistern – gegenüber einer Dekohärenz – aufrechterhalten werden können.

Die Herstellung von Quantenpunkten kann atomweise mit dem Rasterkraftmikroskop erfolgen. Auch die Methoden der Nanotechnologie werden benutzt. Bei der Nutzung des Kernspins werden ausgewählte Atome in komplexen Molekülen benutzt. Ihre Kernspins können als QuBits durch ein externes Magnetfeld parallel oder antiparallel ausgerichtet werden. 2001 wurde mit dem Perfluorobutadien-Eisen-Komplex $C_{11}H_5F_5O_2Fe$ die Zahl 15 in ihre Faktoren zerlegt. Dabei wurde der 1994 von PETER SHOR entwickelte Algorithmus angewendet. Im Bild unten links ist die räumliche Anordnung der Atome und darunter die chemische Struktur gezeigt. Es müssen hierbei aber immer gleichzeitig sehr viele Moleküle benutzt werden (etwa 10^{18}), die alle eigenständige Quantencomputer darstellen. Anderenfalls erzeugt die relativ schwache magnetische Resonanz der angeregten Atome ein viel zu kleines Signal. Josephson-Kontakte als Speicher für QuBits zu verwenden, wurde 1997 von SHNIRMAN u.a. vorgeschlagen. Das Bose-Einstein-Kondensat (BEK englisch BEC) wurde bereits in den 20er Jahren von ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955) und SATYENDRA NATH BOSE (1894 – 1974) vorhergesagt. Es wurde jedoch erstmals 1995 von WOLFGANG KETTERLE (*1957) und anderen bei einer Temperatur von wenigen μK mit Rubidium-Atomen realisiert. Dabei überlagern sich ihre Materiewellen zu einer einzigen, makroskopischen, phasenkohärenten Wellenfunktion. Alle Teilchen verlieren dann ihre Individualität. Wird ein BEK durch ein Lichtgitter (s.u. MOT) beeinflusst, so kann sein Zustand aufgehoben werden. Damit könnte ein BEK zur Speicherung eines QuBits benutzt werden. Schließlich seien noch die Ionenfallen erwähnt. Bei ihnen müssen vielstufige Kühlprozesse benutzt werden, um den Bereich von nK zu erreichen. Besonders häufig wird heute die Magneto-optische Falle (= MOT = magneto optical trap) angewendet. Sie wurde bereits 1987 von JEAN DALIBARD (*1958) entworfen und etwas später von DAVID PRITCHARD und STEVEN CHU (*1948) gebaut. Entsprechend dem Bild benutzt sie 6 Laserstrahlen. Je zwei entgegengesetzt gerichtete Strahlen erzeugen eine stehende Welle, die auf die Ionen wie ein Spiegel wirkt. Deswegen wird auch von einem Lichtgitter gesprochen. Insgesamt entsteht so ein kubischer „Lichtkristall“. Im Zentrum des Magnetfeldes werden in seinen Zellen die Ionen in alle Raumrichtungen eingegrenzt. Eine Möglichkeit ist der MOT-Spiegel in Kombination mit einem Halbleiter-Chip. Dann genügen wegen seiner spiegelnden Oberfläche vier Laserstrahlen. Es gibt weitere z.B. Pauli-Fallen.

Andere Wege betreffen den Ein-Elektronen-Transistor (single electron transistor, SET), den 1991 AVERIN und LIKHAREV vorschlugen. Während bei dem heute üblichen FET etwa 100 000 Elektronen bewegt und bei dem dRAM gespeichert werden, soll dann 1 Elektron genügen. U.a. werden dabei Tunneleffekte, Quantenpunkte usw. benutzt. Es sind ebenfalls sehr tiefe Temperaturen notwendig. Im März 1998 beschrieben STONE und AHMED in der Zeitschrift „Microelectronics Engineering“ die erste Speicherzelle, die mit zwei SET und einem Kondensator bei 10 K arbeitet. Inzwischen sind mehrere Ausführungsvarianten und Prinzipien entstanden. Für die Herstellung

werden hoch spezialisierte Lithographie-Verfahren, der Aufbau mit dem Rastertunnelmikroskop, Nutzung von



Nano-Röhren oder Varianten der Biologie (z.B. Doppelhelix) angewendet. Typischen Daten zeigt die Tabelle. Bild Typisches Molekül für NMR-Computer, a) in räumlicher Darstellung mit Pfeilen für die 7 QuBits, b) seine chemische Struktur; c) und d) zeigt magnetooptische Fallen, e) bis h) eine elektrische Ionenfalle.

Die Wellenlänge eines Wellenpakets muss ganzzahlig in den Querschnitt passen. Dadurch nimmt der Leitwert nicht kontinuierlich, sondern in Stufen zu. Dieser Effekt wird mittelbar bei einem SET mit dem so genannten Aharonov-Bohm-Ring genutzt (Bild unten). Er besteht hier aus einer AlGaAs/GaAs-Heterostruktur. In der Mitte befindet sich eine Tunneliode mit etwa 500 nm Durchmesser. Senkrecht zum Ring wird ein Magnetfeld angelegt. Unterhalb der Schicht ist ein Gate angeordnet. Sein negatives Potential erzeugt die „Verarmungszonen“, aus denen es die Elektronen verdrängt. Mit ihm kann auch die Geschwindigkeit der weiteren Elektronen und dadurch ihre Wellenlänge verändert werden. Die entsprechenden Wellenpakete sind schematisch in Bild h) eingezeichnet. Auch bei diesem SET entsteht wieder abgestufte Widerstandsänderungen gemäß Bild d).

Im Labor werden auch bereits SET mit Kohlenstoff-Nano-Röhren versucht. Dazu werden sie z.B. auf ein SiO₂-Substrat positioniert, an den Enden vorwiegend mit Gold-Elektroden kontaktiert und in der Mitte mit einem isolierten Gate umgeben. Einwandige Röhren mit etwa 1 nm Durchmesser zeigen dann bei 4 K die o.g. quantenphysikalischen Eigenschaften. Andere Varianten arbeiten bei 120 mK bzw. 24 K. Bei organischen SET wächst z.B. auf einem Goldsubstrat zunächst eine organische Barrierschicht. Dann werden Farbstoffmoleküle als Ladungsinselfebracht. Sie lassen sich individuell mittels einer Rastertunnelspitze anregen. So ist ein quantisierter Ladungstransport möglich. Eine andere Variante geht von einem Spezialkunststoff aus, auf dem eine Lösung mit Goldkugeln aufgetragen wird. Sie ordnen sich vollkommen regelmäßig an und können ebenfalls mit dem Rastertunnelmikroskop angeregt werden. Auch ein selektiv metallisierter DNA-Strang wurde bereits als Insel (Quantenpunkt) benutzt. Der wesentliche Vorteil des organischen SET besteht darin, dass er bei nahezu Zimmertemperatur funktioniert.

Das geplante Hauptanwendungsgebiet der SET sind TByte-Speicher. Mit ihnen ließen sich Speicherdichten von 10¹² Bit/cm² realisieren. Außerdem könnte die Leistungsaufnahme extrem stark gesenkt werden. Es wäre keine zusätzliche (!) Kühlung notwendig. Wegen der sehr schwierigen Herstellung ist jedoch – wenn überhaupt – mit einem großtechnischen Einsatz nicht vor 2020 zu rechnen. Eine Nutzung für Logik-Schaltungen ist kaum zu erwarten. Hier stört die relativ hohe RC-Zeitkonstante. Wegen der hohen Empfindlichkeit lassen sich auch sehr leistungsfähige Elektrometer realisieren. Da der Strom gemäß $I = e \cdot f$ mit der sehr präzise zu messenden Frequenz f verknüpft ist, besteht die Möglichkeit für sehr genaue Strom- bzw. Spannungsnormale mit einem $dI/I \approx 10^{-8}$. Auch als Messsonden für sehr tiefe Temperaturen sind SET gut geeignet.

Eine Weiterentwicklung der SET wird bereits mit der Nutzung ihres Spins verfolgt. „Einfache“ Anwendungen sind die GMR. Doch weitaus nützlicher wäre es, wenn es gelänge, den Spin wie die Ladung bei Halbleitern zu manipulieren und insbesondere für Speicherbauelemente zu nutzen. Theoretisch beschrieben diese Möglichkeit SUPRIYO DATTA und BISWAJIT DAS 1990. Die Energie des Elektronenspins ist nämlich rund tausendmal größer als die, für das Umklappen des Kernspins. Andererseits ist der Kernspin sehr viel besser gegen Störungen abgeschirmt. Deshalb waren sehr tiefe Temperaturen und sehr starke Magnetfelder notwendig.

Im Jahr 2002 wurde auch erstmals eine hochmagnetische Verbindung mit zwei ungepaarten Elektronen hergestellt. Dies gelang durch Kombination der beiden nichtmagnetischen Elemente Bor und Phosphor zu einem sogenannten Diradikal. Bereits bei Raumtemperatur ist es eine stabile chemische Verbindung. Die ungepaarten Elektronen

nehmen zudem nicht an chemischen Bindungen teil. Auf dieser Grundlage könnten neue Speichermaterialien entstehen. In Bild ist noch aufgezeigt, in welchen Abmessungen und mit wie vielen Elektronen je Bit heutige und künftige Speicher arbeiten [Physik Journal 2006, 8/9, S. 48].

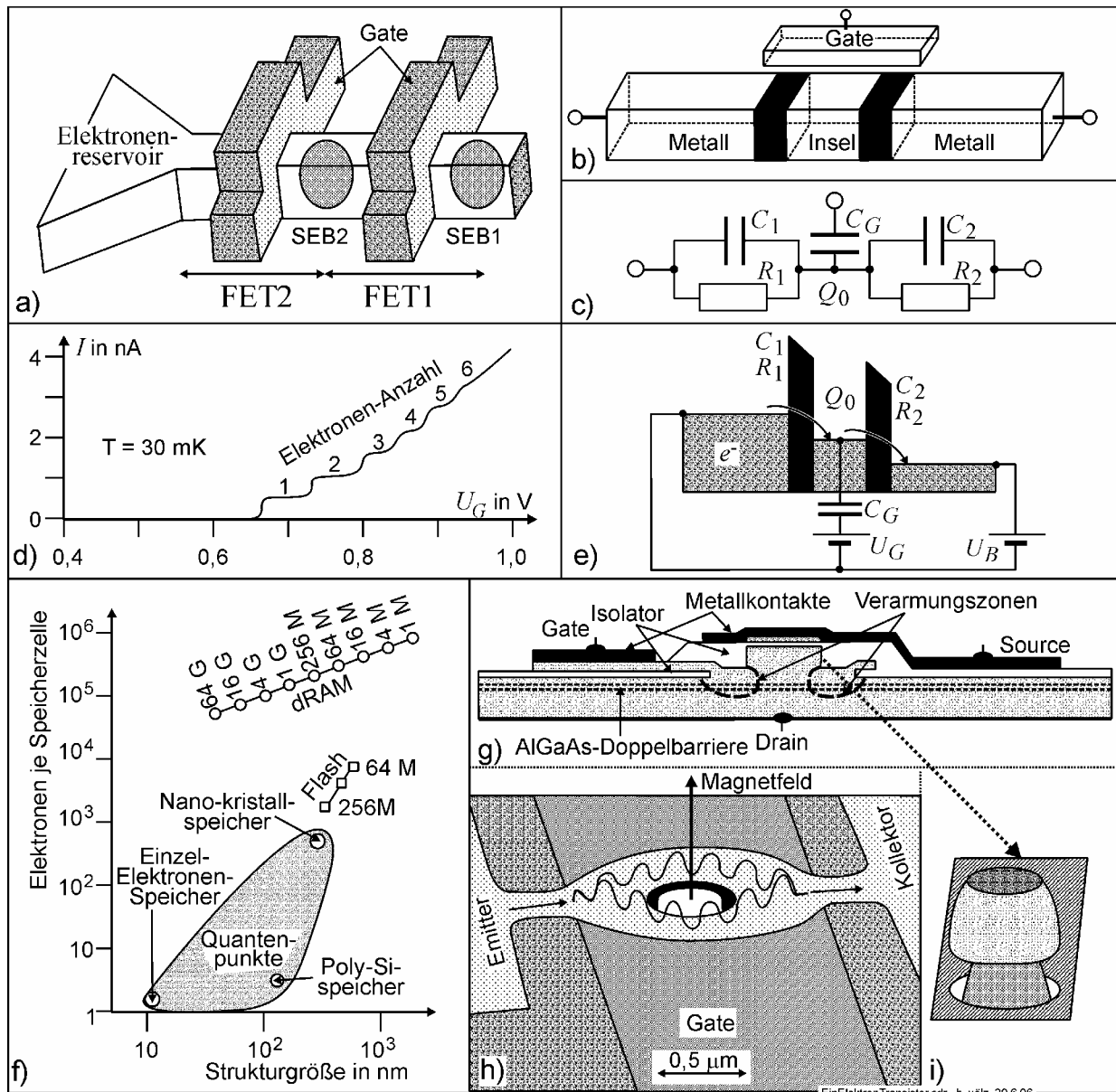


Bild 5. Beispiele und Eigenschaften von Ein-Elektron-Transistoren (SET). Details im Text.