

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

Band: 68 (1977)

Heft: 2

Artikel: Josephson-Kontakte in der Digitaltechnik

Autor: Wolf, P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-914980>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Josephson-Kontakte in der Digitaltechnik ¹⁾

Von P. Wolf

681.325.65

1. Einleitung

Die heutige Digitaltechnik wird fast ausschliesslich von der Silizium-Technologie getragen, die sich immer noch in einer stürmischen Entwicklungsphase befindet. Es werden jedoch Begrenzungen sichtbar, vor allem bei hohen Geschwindigkeiten, die es interessant erscheinen lassen, nach Alternativen Ausschau zu halten. Eine solche, die sich zurzeit im Forschungsstadium befindet, basiert auf den Josephson-Effekten, die im *supraleitenden Zustand* der Materie auftreten. Zunächst folgt eine kurze Einführung in die Supraleitung, an die sich eine Diskussion der Eigenschaften der Josephson-Kontakte anschliesst. Zum Schluss werden einige Digitalschaltungen mit Josephson-Kontakten vorgestellt.

2. Die Supraleitung

Die Supraleitung wurde 1911 von *K. Onnes* entdeckt, als er Quecksilber auf Temperaturen von einigen Kelvin ($0\text{ K} = -273,2\text{ }^\circ\text{C}$) abkühlte. Er stellte fest, dass unterhalb $4,3\text{ K}$ der elektrische Widerstand sprunghaft verschwand. Diese Erscheinung, die er Supraleitung nannte, kennt man

heute bei vielen Metallen, z. B. bei Blei, dessen Sprungtemperatur bei $7,2\text{ K}$ liegt. Induziert man in einem Ring aus supraleitendem Material mit geeigneten Mitteln einen Ringstrom, so bleibt dieser wegen der Widerstandslosigkeit bestehen und verschwindet z. B. erst wieder bei Erwärmung auf Temperaturen oberhalb der Sprungtemperatur. Man hat solche Ringströme über Jahre beobachtet und keine Änderung des Stromes feststellen können, was beweist, dass der elektrische Widerstand tatsächlich Null ist. Wie noch erläutert wird, eignen sich supraleitende Ringstrukturen als Speicherelemente.

Lange Zeit gab es keine Erklärung für die Supraleitung. Erst 1957 wurde von den Physikern *Bardeen, Cooper* und *Schrieffer* in Form der BCS-Theorie ein Modell angegeben, das alle Phänomene des supraleitenden Zustands zufriedenstellend erklären kann. Dafür wurde diesen Forschern 1972 der Nobelpreis verliehen. Gemäss ihrer Theorie besteht in Supraleitern eine schwache anziehende Wechselwirkung zwischen den Leitungselektronen. Bei genügend tiefen Temperaturen führt dies dazu, dass sich die Elektronen zu Paaren zusammenlagern, den sogenannten Cooper-Paaren. Sie sind der Schlüssel zum Verständnis der Supraleitung, worauf hier jedoch nicht weiter eingegangen werden soll; es sei statt dessen auf die Literatur verwiesen [1] ²⁾.

Eine weitere Erscheinung des supraleitenden Zustandes ist die Quantisierung des magnetischen Flusses in supraleitenden Ringen. Ein Ringstrom in ihnen ist von einem magnetischen Feld und demzufolge von einem magnetischen Fluss begleitet. Experimentell wie theoretisch stellt sich heraus, dass nicht beliebige Werte des Flusses möglich sind; der Fluss kann nur ein ganzzahliges Vielfaches eines Flussquantums $\Phi_0 = h/2e$ sein. Dabei ist h die Plancksche Konstante und e die Elektronenladung, womit sich Φ_0 zu $2,07 \cdot 10^{-15}\text{ Vs}$ ergibt. Auch die Flussquantisierung kann für Speicherzwecke ausgenutzt werden.

3. Josephson-Kontakte und ihre Eigenschaften

Aufgrund der BCS-Theorie machte 1962 der Physiker *B. Josephson* einige merkwürdige Voraussagen über das Verhalten von Tunnel-Kontakten mit supraleitenden Elektroden (Josephson-Kontakte). Ein Jahr später konnten die Voraussagen experimentell bestätigt werden. Im Jahre 1973 erhielt *Josephson* den Nobelpreis.

Der prinzipielle Aufbau von Josephson-Kontakten ist in Fig. 2a gezeigt. Sie bestehen aus zwei supraleitenden Elektroden, die durch einen sehr dünnen Isolator, einige 10 Atomlagen dick, getrennt sind. Solch dünne Schichten sind für Elektronen durchlässig, diese können «hindurchtunneln». Für normalleitende Elektroden ist dieser Effekt seit langem bekannt und theoretisch verstanden. Wie in Fig. 1a zu sehen ist, verhält sich ein solcher Kontakt ungefähr wie ein ohmscher Widerstand, dessen Wert exponentiell von der Isolator-dicke abhängt.

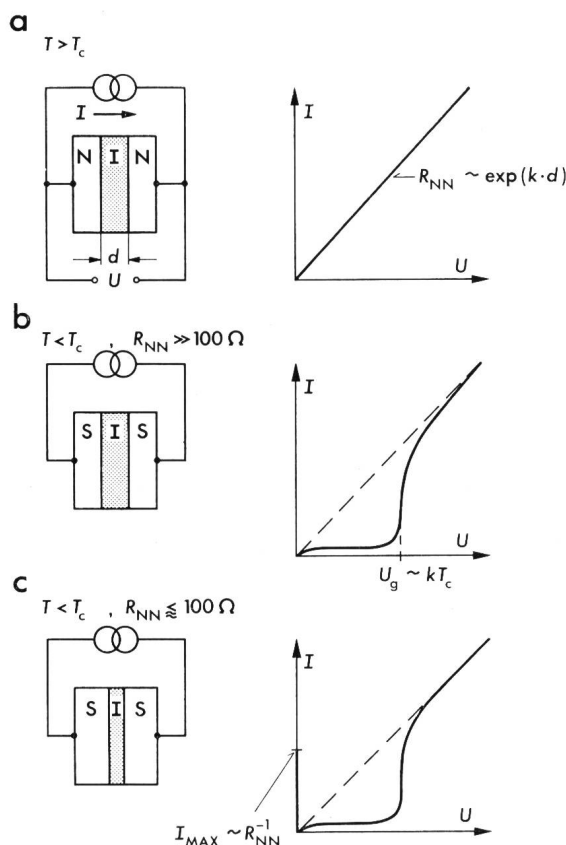


Fig. 1 Elektrisches Verhalten von Tunnel-Kontakten mit supraleitenden Elektroden (schematisch)

- a Tunneln im normalleitenden Bereich ($T > T_c$)
- b Tunneln von Einzelelektronen bei $T < T_c$
- c Tunneln von Cooper-Paaren (Josephson-Tunneln) und Einzelelektronen bei $T < T_c$

T_c Sprungtemperatur
 I Isolator
 N normalleitende Elektroden
 S supraleitende Elektroden

¹⁾ Vortrag, gehalten an der SEV-Informationstagung «Moderne Technologien in der Elektronik» am 11. November 1976 in Biel.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Kühlt man den Kontakt auf Temperaturen unterhalb der Sprungpunkte der Elektroden ab, so bilden sich Cooper-Paare, was zu einer Verringerung der Zahl der Einzelelektronen und, wie Fig. 1b zeigt, zu einer Verringerung des Tunnelstromes führt. Ab einer bestimmten Spannung, der Gap-Spannung U_g , die der Bindungsenergie der Paare entspricht, nimmt der Strom steil zu und erreicht schliesslich die gleiche Kennlinie wie im normalleitenden Zustand. Oberhalb

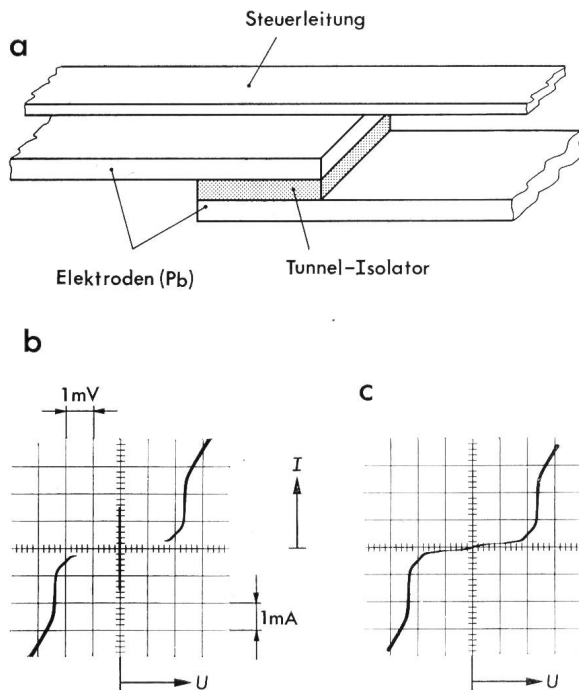


Fig. 2 Aufbau und gemessene Charakteristiken eines Josephson-Kontakts (a) Kontakt-Aufbau mit Steuerleitung. Gemessene Strom-Spannungs-Charakteristiken ohne (b) und mit (c) Magnetfeld. Kontaktgrösse ca. $2 \times 10 \mu\text{m}$

U_g werden Paare aufgebrochen, und die vermehrte Zahl der Einzelelektronen führt zu diesem Stromanstieg.

Nach den Voraussagen von *Josephson* können auch Paare tunneln, und dies bewirkt, wie Fig. 1c zeigt, dass der Kontakt supraleitend wird, d. h., es kann durch ihn ein Strom ohne Spannungsabfall fließen. Dieser Suprastrom ist nach *Josephson* auf einen Wert I_{max} beschränkt, der proportional dem reziproken Kontaktwiderstand R_{NN} im normalleitenden Zustand ist. Das Paartunneln wird durch thermisches Rauschen gestört, daher ist es in hochohmigen Kontakten oft nicht sichtbar und macht sich erst bei niederohmigen Kontakten voll bemerkbar.

Wie sich das Tunneln der Paare und Einzelelektronen auswirkt, zeigt die gemessene Strom-Spannungs-Charakteristik in Fig. 2b. Der Kontakt hat einen supraleitenden Zweig der Charakteristik, der hier auf ca. 1,5 mA begrenzt ist. Überschreitet man diesen Strom, so kann der Kontakt nicht mehr supraleitend bleiben, man springt auf einen Zweig, der durch das Tunneln der Einzelelektronen gegeben ist. Dieser Zweig wird verlassen, wenn ein bestimmter Strom unterschritten wird, der Kontakt geht dann wieder in den supraleitenden Zustand zurück. Der Kontakt ist also in einem gewissen Strombereich ein bistabiles Element. Die Spannung am Gap ist sehr klein und beträgt in der Figur etwa 2,5 mV; sie hängt vom Sprungpunkt T_c der Elektroden ab.

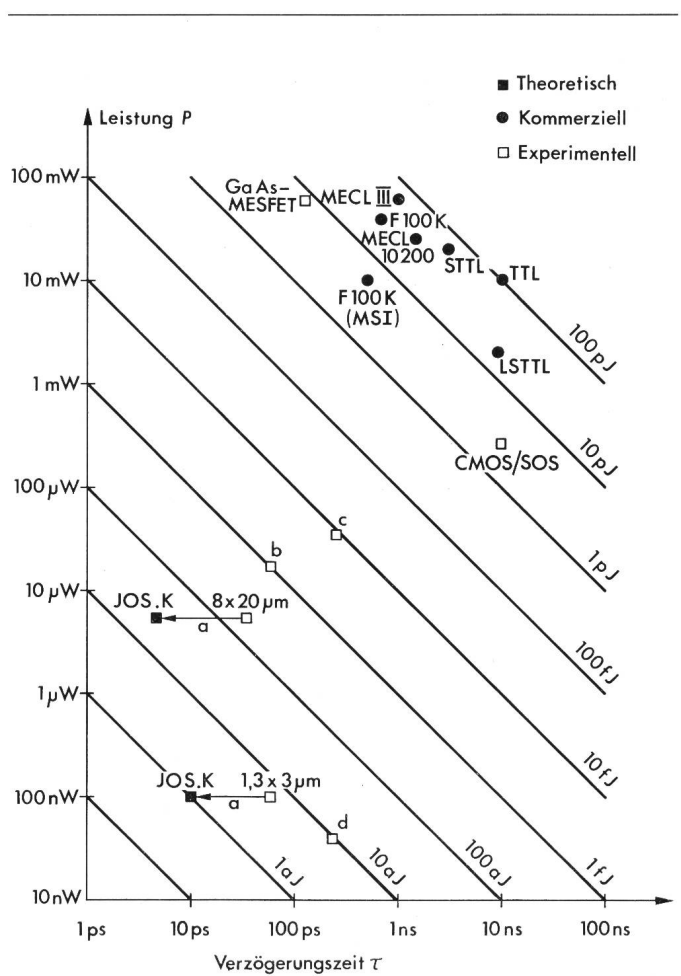


Fig. 3 Vergleich des Leistungs-Verzögerungs-Produkts $P \cdot \tau$ von Transistor- und Josephson-Schaltkreisen

Die Josephson-Daten wurden folgenden Referenzen entnommen: (a) [6], (b) [14], (c) [13], (d) [15] Bezeichnungen teilweise firmenbezogen

Gemäss einer weiteren Voraussage von *Josephson* kann der Suprastrom durch ein Magnetfeld beeinflusst und, wie Fig. 2c zeigt, sogar völlig unterdrückt werden. Wie später zu sehen ist, wird dies bei Schalteranwendungen ausgenutzt. Das Magnetfeld wird, wie Fig. 2a zeigt, durch Ströme erzeugt, welche in einer oder mehreren supraleitenden Steuerleitungen fließen, die oberhalb des Josephson-Kontakts angeordnet sind.

Der Josephson-Effekt ist viel subtiler und komplizierter als hier geschildert werden konnte. Bezüglich weiterführender Literatur sei auf [1; 2] verwiesen. Kurze Zeit nach der Entdeckung des Effekts hat *J. Matisoo* gezeigt, dass der Josephson-Kontakt ein interessantes Bauelement für Digital-schaltungen ist [3]. Zwei Eigenschaften vor allem zeichnen den Josephson-Kontakt aus: die kurze Schaltzeit und der geringe Leistungsverbrauch.

Man kann zeigen, dass die Schaltzeit vom supraleitenden in den Spannungszustand vor allem vom Verhältnis C/I_{max} der Kontaktkapazität C zum maximalen Josephson-Strom I_{max} abhängt [4; 5]. Dieses Verhältnis, und damit die Schaltzeit, nimmt ab, wenn der Tunnelisolator dünner gemacht wird. Man hat Kontakte mit Stromdichten über 1 kA/cm^2 hergestellt, die aus theoretischen Überlegungen Schaltzeiten von einigen ps besitzen sollten [6]. Dies lässt sich mit heutigen Mitteln noch nicht messen, man hat lediglich zeigen

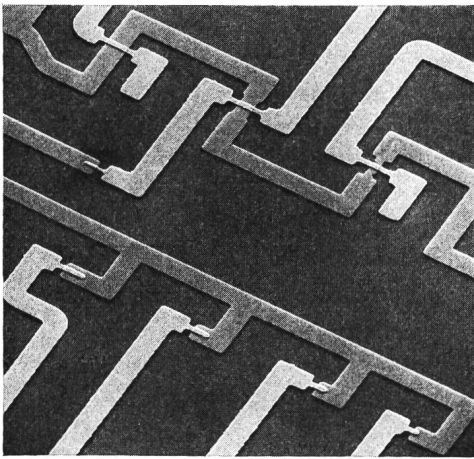


Fig. 4 Mikrophotographie einiger experimenteller Josephson-Kontakte

Der schmalste unter ihnen ist ca. $1,3 \mu\text{m}$ breit und $7 \mu\text{m}$ lang

können, dass die Schaltzeit, gegeben durch die Zeitauflösung der Apparaturen, ca. $30\text{--}40 \text{ ps}$ oder kürzer ist.

Der Leistungsverbrauch der Kontakte liegt wegen der Gap-Spannung von ca. $2,5 \text{ mV}$ und den Betriebströmen von einigen mA im μW -Bereich und damit sehr niedrig. Ein Gütemass für digitale Bauelemente ist das Leistungs-Verzögerungs-Produkt $P \cdot \tau$. In Fig. 3 ist gezeigt, wie sich die Josephson-Kontakte und einige noch zu erwähnende Schaltungen mit ihnen zu bekannten Halbleiter-Schaltungen verhalten ³⁾. Bei schnellen Halbleiter-Schaltungen wie der emittiergekoppelten Logik hat man Werte $P \cdot \tau$ um 10 bis 100 pJ erreicht, die Josephson-Kontakte liegen im femto-Joule(fJ)-Bereich und sind damit mehrere Größenordnungen besser.

Dies wird wichtig in einem schnellen Computer, der in der Zentraleinheit vielleicht $10\,000$ bis $100\,000$ Schaltkreise hat. Um eine kurze Schaltzeit der Schaltkreise auszunützen zu können, muss die elektromagnetische Verzögerung auf den Verbindungsleitungen zwischen den Kreisen ebenfalls kurz sein. Das bedeutet um so höhere Packungsdichte je schneller die Schaltkreise arbeiten. Wie Fig. 3 zeigt, haben Halbleiterkreise aber die Tendenz, bei kürzeren Schaltzeiten auch höheren Leistungsverbrauch zu besitzen. Dies führt zu einem potenzierten Wärmeabfuhrproblem, das die praktisch mögliche Geschwindigkeit von Halbleiter-Computern entscheidend mitbestimmt. Infolge ihres kleinen Leistungsverbrauchs sind die Josephson-Kontakte durch thermische Probleme viel weniger eingeengt, selbst wenn man die schwierigere Wärmeabfuhr bei tiefen Temperaturen berücksichtigt.

Die Herstellung der Josephson-Kontakte geschieht mit ähnlichen Aufdampf- und photolithographischen Technologien, wie sie bei integrierten Schaltungen gebräuchlich sind [7]. Als Elektrodenmaterial sind hauptsächlich Bleilegierungen benutzt worden. Ein wichtiger Schritt ist die Herstellung des sehr dünnen Tunnelisolators. Ein geeigneter Prozess besteht darin, die Basis-Elektrode einer Hochfrequenz-Gasentladung mit Sauerstoff auszusetzen, wodurch eine dünne Oxidhaut kontrollierbar aufwächst [8]. Eine Photographie von hergestellten Josephson-Kontakten ist in Fig. 4 dargestellt. Der schmalste dieser Kontakte ist ca. $1,3 \mu\text{m}$ breit und $7 \mu\text{m}$ lang.

³⁾ Die verwendeten Abkürzungen sind auf S. 70 zusammengestellt.

4. Digitalschaltungen mit Josephson-Kontakten

Josephson-Kontakte haben bereits Eingang in verschiedene Anwendungsgebiete gefunden [9], z. B. bei der Messung sehr kleiner Magnetfelder und bei Präzisionsmessungen von Spannungen. Anwendungen in der Digitaltechnik und in der Submillimeterwellen-Elektronik sind noch im Forschungsstadium. Für digitale Anwendungen sind sowohl logische Schaltkreise wie auch Speicherzellen gebaut worden, über die im folgenden kurz berichtet werden soll [10].

4.1 Logische Schaltkreise

Das Prinzip einer einfachen Logik mit Josephson-Kontakten ist in Fig. 5 dargestellt [10; 11; 12]. Durch den Josephson-Kontakt wird ein Gleichstrom geschickt, der etwas kleiner als der maximale Josephsonstrom ist, so dass sich der Kontakt im supraleitenden Zustand befindet. Durch passende Überlagerung der Steuerströme in A und B lassen sich einfache logische Operationen ausführen. Sind die Ströme so gewählt, dass Strom in einer Steuerleitung bereits ausreicht, den Kontakt zu schalten, dann hat man die ODER-Funktion. Wählt man die Ströme so, dass Strom in einer Leitung zum Schalten nicht ausreicht, sondern erst Stromfluss in beiden Steuerleitungen, dann hat man die UND-Funktion realisiert. Parallel zum Josephson-Kontakt befindet sich ein Ausgangskreis, der aus einer Streifenleitung mit der Impedanz Z_0 und einem Abschlusswiderstand $R = 2Z_0$ besteht. Die Streifenleitung läuft als Steuerleitung über einige andere Josephson-Kontakte und erlaubt es so, die logische Information weiterzugeben und logische Netzwerke herzustellen. Um hochfrequenzmässig gute Streifenleitungen zu erhalten, sind diese auf einer Grundplatte aus supraleitendem Niobium aufgebaut. Solange der Josephson-Kontakt im supraleitenden Zustand ist, herrscht kein Spannungsabfall über ihm, und im Ausgangskreis fließt kein Strom. Dies geschieht erst, wenn der Kontakt geschaltet hat und sich im Spannungszustand befindet. Da die Ausgangsleitung abgeschlossen ist, werden Reflexionen vermieden, und man erhält die kürzestmögliche Verzögerung. Bei digitalen Halbleiter-Schaltungen mit ihren Hübten im Voltbereich müssen abgeschlossene Leitungen immer mit hohem Leistungsverbrauch erkaufte werden. Dies ist bei Josephson-Kontakten nicht der Fall, da die Verluste, die durch U^2/R gegeben sind, wegen der geringen Spannung $U \approx 2,5 \text{ mV}$ der Kontakte sehr klein sind.

Mit diesem Schaltungsprinzip hat man verschiedene, bereits recht komplexe Schaltungen realisiert, z. B. ein auf

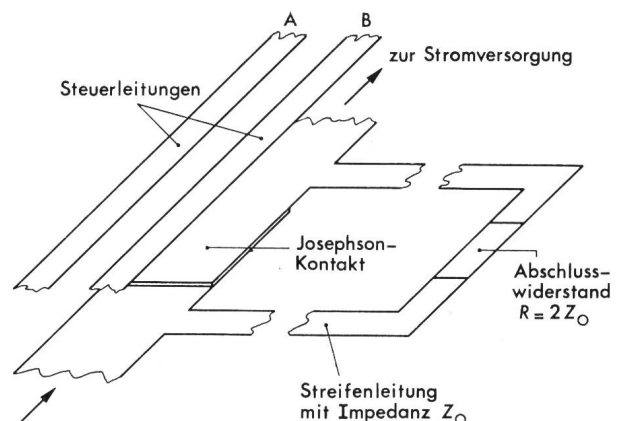


Fig. 5 Prinzipieller Aufbau eines logischen Schaltkreises mit einem Josephson-Kontakt

einem Chip integriertes 4-bit-Multiplizierwerk mit ca. 45 Josephson-Kontakten, das eine gemessene Multiplizierzeit von 27 ns und einen Leistungsverbrauch von ca. 1,6 mW aufwies [13]. Eine Eigenheit des erläuterten Schaltungstyps ist es, dass die Josephson-Kontakte nach dem Schalten im Spannungszustand bleiben, selbst wenn die Eingangs-Steuerströme abgeschaltet sind, d. h. die Schaltung ist nicht rücksetzend. Um die Josephson-Kontakte wieder in den supraleitenden Zustand zu bringen, muss man kurzzeitig den Strom durch die Kontakte abschalten, was eine gepulste Stromversorgung erfordert.

Man hat auch selbstrücksetzende Schaltungen entwickelt, die mit einer Gleichstromspeisung auskommen [14; 15]. Eine dieser Schaltungen benutzt zwei in Serie geschaltete Josephson-Kontakte und hat gemessene Anstiegs- und Abfallzeiten von 60 ps bei einem Leistungsverbrauch von ca. 17 μ W [14].

4.2 Speicherzellen

Wie schon erwähnt, kann man Information als zirkulierende Ströme in supraleitenden Ringen speichern. Links- oder rechtsherum kreisende Ströme können dabei die «0» oder «1» des binären Systems darstellen. Das Prinzip einer solchen Zelle ist in Fig. 6 schematisch gezeigt [16]. Im Ring befinden sich zwei Josephson-Kontakte, die zum Einschreiben der Ringströme dienen. Man kann zeigen, dass man mit einer Stromzuführung zur Zelle in der y-Richtung (Wortleitung) und der Steuerleitung in der x-Richtung (Bitleitung) eine Zelle in einer Speicher-Matrix koinzident adressieren kann, ohne die Nachbarzellen zu beeinflussen. Zum zerstörungsfreien Lesen der Zelle befindet sich am Ring ein Lesekontakt, der durch das Magnetfeld des Ringstroms gesteuert wird. Auch das Lesen kann koinzident durchgeführt werden.

Auf diesem Prinzip basierend sind eine ganze Reihe Zellen hergestellt worden [17...19]. Als Beispiel sei eine Zelle erwähnt [18], bei der kleinste Leitungsbreiten von 2 μ m verwendet wurden und die eine Fläche von ca. 1000 (μ m)² einnimmt. Die gemessene Schaltzeit der Zelle lag bei ca. 80 ps. Eine interessante Eigenschaft dieser Zellen ist, dass sie nicht flüchtig sind, d. h. sie halten die Information ohne äussere Stromzufuhr.

Der Ringstrom in diesen Zellen erzeugt einen magnetischen Fluss, der, wie vorhin erwähnt, das Vielfache des Flussquants sein muss. In den obigen Zellen befinden sich so viele Flussquanten, dass der Fluss und damit auch der Ringstrom als praktisch kontinuierliche Grösse angesehen werden können. Es ist sehr verlockend zu fragen, ob man einzelne Flussquanten zur Informationsspeicherung benutzen kann, denn man würde erwarten, dass dies zu Zellen mit kleinster Fläche und geringster gespeicherter Energie führen könnte. In der Tat hat sich herausgestellt, dass solche Einzelflussquanten-Zellen (englisch: single-flux quantum cells, abgekürzt SFQ cells) möglich sind [20; 21]. Man bedient sich dazu der sogenannten Vortex-Moden, die in einer Reihe von Strukturen mit Josephson-Kontakten unter geeigneten Bedingungen auftreten können. Die Vortex-Moden sind supraleitende Zustände, die durch die Zahl der in ihnen gespeicherten Flussquanten charakterisiert sind.

Durch passende Auslegung der Elemente kann man erreichen, dass für dieselben externen Ströme zwei Vortex-Zustände existieren, von denen der eine oder andere eingenommen werden kann. Mit anderen Worten, das Element ist

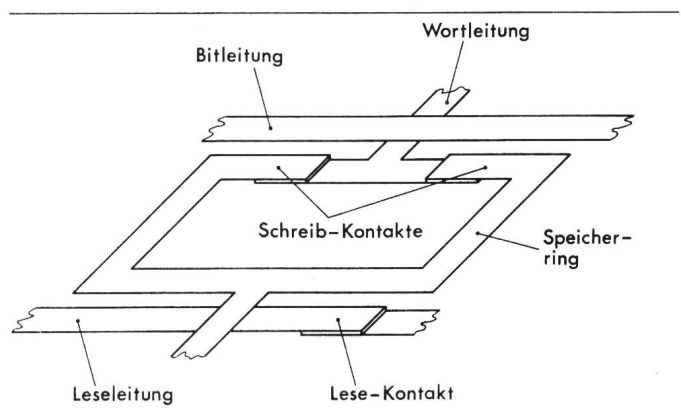


Fig. 6 Prinzipieller Aufbau einer Josephson-Speicherzelle

bistabil und daher zur Speicherung eines Informations-Bits geeignet. Die Vortex-Moden treten in hinreichend langen Josephson-Kontakten auf, d. h. diese können zur Informationsspeicherung benutzt werden [21]. Als etwas geeigneter haben sich jedoch Strukturen mit zwei Josephson-Kontakten und einer supraleitenden Induktivität erwiesen, die sogenannten Interferometer [20; 22], vor allem, weil sie eine besonders einfache Art des Lesens gestatten. Das Lesen ist bei den SFQ-Zellen zerstörend, man muss danach die Information wieder einschreiben. Im Ruhezustand speichern die Zellen die Information ohne Leistungsverbrauch. Eine hergestellte Interferometer-Zelle ist in Fig. 7 zu sehen. Sie ist recht kompakt aufgebaut und nimmt eine Fläche von ca. 1000 (μ m)² ein. Für eine bequeme, koinzidente Adressierung besitzt sie drei Steuerleitungen. Man hat noch wesentlich kleinere Zellen hergestellt, mit Flächen von etwa 150 (μ m)². Die SFQ-Zellen zeigen sehr kurze Schaltzeiten, nach Computer-Simulationen etwa 50 ps, was ungefähr mit gemessenen Werten von 100 ps übereinstimmt. Für eine ausführlichere Diskussion der SFQ-Zellen sei auf [12; 26] verwiesen.

5. Ausblick

Die vorhergegangenen Ausführungen haben gezeigt, dass es möglich ist, mit Josephson-Kontakten logische Schaltungen und Speicherzellen zu realisieren, die kurze Schaltzeiten und äusserst niedrigen Leistungsverbrauch haben. Bis zu

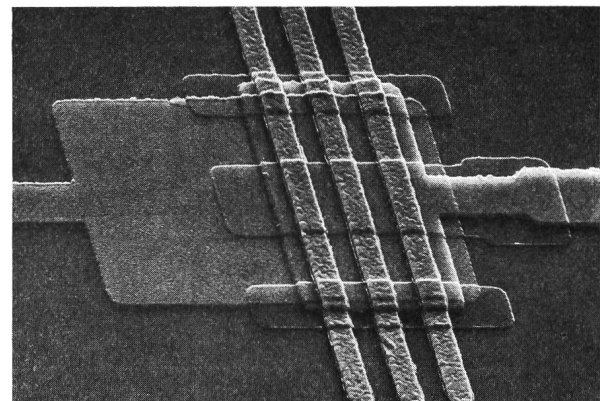


Fig. 7 Mikrophotographie einer experimentellen Einzelflussquanten-Zelle

Sie besteht aus zwei Josephson-Kontakten, die über eine induktive Brücke verbunden sind. Für die Adressierung sind drei Steuerleitungen vorgesehen. Die Fläche der Zelle beträgt etwa 1000 (μ m)²

einer Computer-Anwendung sind jedoch noch viele weitere Schritte nötig [23]. Wie erwähnt, kann die kurze Schaltzeit wohl nur in einem System mit sehr hoher Packungsdichte ausgenutzt werden. Dies wird einmal eine hohe Integrationsdichte auf den Chips erfordern und weiter ein Packungssystem mit höherer volumetrischer Dichte, als es heute bei Halbleiterschaltungen üblich ist. Die Widerstandslosigkeit der supraleitenden Verbindungsleitungen sollte dabei eine grosse Hilfe sein, da über sie breitbandige Impulse praktisch verlustfrei fortgeleitet werden können, selbst wenn die Leitungsquerschnitte sehr klein sind. Eine Herausforderung an die Technologie ist natürlich auch die reproduzierbare Herstellung der sehr dünnen Tunnel-Isolatoren, dies um so mehr, als die erwähnten Schaltungen eine ziemlich genaue Einhaltung der Josephson-Ströme erfordern.

Literatur

[1] *W. Buckel*: Supraleitung. Grundlagen und Anwendungen. Weinheim, Physik-Verlag, 1972.
 [2] *L. Solymar*: Superconductive tunnelling and applications. London, Chapman and Hall, 1972.
 [3] *J. Matisoo*: The tunneling cryotron - A superconductive logic element based on electron tunneling. Proc. IEEE 55(1967)2, p. 172...180.
 [4] *W. C. Stewart*: Measurement of transition speeds of Josephson junctions. Applied Physics Letters 14(1969)12, p. 392...394.
 [5] *H. H. Zappe* and *K. R. Grebe*: Dynamic behavior of Josephson tunnel junctions in the subnanosecond range. Journal of Applied Physics 44(1973)2, p. 865...874.
 [6] *W. Jutzi* a. o.: Josephson junctions with 1 μm dimensions and with picosecond switching times. Electronics Letters 8(1972)24, p. 589...591.
 [7] *J. H. Greiner*, *S. Basavaiah* and *I. Ames*: Fabrication of experimental Josephson tunneling circuits. Journal of Vacuum Science and Technology 11(1974)1, p. 81...84.
 [8] *J. H. Greiner*: Josephson Tunneling barriers by rf sputter etching in an oxygen plasma. Journal of Applied Physics 42(1971)12, p. 5151...5155.

[9] *P. Wolf*: Der Josephson-Kontakt. Ein neues elektronisches Bauelement. Neue Zürcher Zeitung, Beilage Forschung und Technik -(1974)141, p. 25...26.
 [10] *W. Anacker*: Josephson tunneling devices - A new technology with potential for high-performance computers. AFIPS Conference Proceedings 41(1972)Part 2, p. 1269...1278.
 [11] *W. H. Henkels*: An elementary logic circuit employing superconducting Josephson tunneling. Trans. IEEE Mag. 10(1974)3, p. 860...863.
 [12] *D. J. Herrell*: Femtojoule Josephson tunneling logic gates. IEEE Journal of Solid-State Circuits 9(1974)5, p. 277...282.
 [13] *D. J. Herrell*: An experimental multiplier circuit based on superconducting Josephson devices. IEEE Journal of Solid-State Circuits 10(1975)5, p. 360...368.
 [14] *W. Baechtold*: A flip-flop and logic gate with Josephson junctions. IEEE International Solid-State Circuits Conference, February 1975, Digest of Technical Papers 18(1975), p. 164...165.
 [15] *H. H. Zappe*: Quantum interference Josephson logic devices. Applied Physics Letters 27(1975)8, p. 432...434.
 [16] *W. Anacker*: Potential of superconductive Josephson tunneling technology for ultrahigh performance memories and processors. Trans. IEEE Mag. 5(1969)4, p. 968...975.
 [17] *H. H. Zappe*: A subnanosecond Josephson tunneling memory cell with nondestructive readout. IEEE Journal of Solid-State Circuits 10(1975)1, p. 12...19.
 [18] *R. F. Broom*, *W. Jutzi* and *T. O. Mohr*: A 1.4 mil^2 memory cell with Josephson junctions. Trans. IEEE Mag. 11(1975)2, p. 755...758.
 [19] *W. Jutzi*: An inductively coupled memory cell for NDRO with two Josephson junctions. Cryogenics 16(1976)2, p. 81...88.
 [20] *P. Guéret*: Experimental observations of switching transients resulting from single flux quantum transitions in superconducting Josephson devices. Applied Physics Letters 25(1974)7, p. 426...428.
 [21] *P. Guéret*: Storage and detection of a single flux quantum in Josephson junction devices. Trans. IEEE Mag. 11(1975)2, p. 751...754.
 [22] *H. H. Zappe*: A single flux quantum Josephson memory cell. Applied Physics Letters 25(1974)7, p. 424...425.
 [23] *W. Anacker*: Superconducting tunnel devices as an alternative to semiconductors for fast computer circuits. IEEE International Solid-State Circuits Conference, February 1975, Digest of Technical Papers 18(1975), p. 162...163.

Adresse des Autors

Dr. P. Wolf, dipl. Physiker, IBM Forschungslaboratorium Zürich, 8803 Rüschlikon.

«Moderne Technologien in der Elektronik»

Tabelle der in den Aufsätzen verwendeten Abkürzungen der Elektronik

BBD	Bucket Brigade Device	MECL	Motorola ECL
BCCCD	Buried Channel CCD	MESFET	Metalized Semiconductor Field-effect Transistor
CCD	Charge Coupled Device	MIS	Metal Insulator Silicon
CDI	Collector Diffused Isolation	MOS	Metal Oxide Semiconductor
CHIL	Current Hogging Injection Logic	MOST	MOS Transistor
CHL	Current Hogging Logic	MSI	Medium Scale Integration
CTD	Charge Transfer Device	RAM	Random-access Memory
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor	SCCCD	Surface Channel CCD
DCTL	Direct-coupled Transistor Logic	SFL	Substrate Fed Logic
EAR	Ein-/Ausgaberegister	SFQ	Single Flux Quantum (Cells)
ECL	Emitter-Coupled Logic	SOS	Silicon-on-Sapphire
FIR	Finite Impulse Response Filter	SR	Schieberegister
IC (CI)	Integrated Circuit - Circuit intégré	STTL	Schottky Transistor-Transistor Logic
I ² L	Integrated Injection Logic	TTL	Transistor-Transistor Logic
LSI	Large Scale Integration	VIL	Vertical Injection Logic
LSTTL	Low Power Schottky Transistor-Transistor Logic		