

Press release

Forschungszentrum Jülich

Dipl.-Biologin Annette Stettien

05/27/2025

<http://idw-online.de/en/news852869>

Research results, Scientific Publications
Electrical engineering, Information technology, Materials sciences, Physics / astronomy
transregional, national



Cool Computing – warum die Zukunft der Elektronik in der Kälte liegen könnte

Moderne Computerchips erzeugen viel Wärme – und verbrauchen entsprechend große Mengen Energie. Ein vielversprechender Ansatz zum Stromsparen könnte dagegen in der Kälte liegen. Einsparungen von bis zu 80 Prozent scheinen möglich, wie eine Analyse eines internationalen Forschungsteams um Prof. Qing-Tai Zhao vom Forschungszentrum Jülich zeigt.

Die Arbeit entstand in enger Kooperation mit Prof. Joachim Knoch von der RWTH Aachen und weiteren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der EPFL in der Schweiz, TSMC und National Yang Ming Chiao Tung Universität (NYCU) in Taiwan sowie der Universität Tokio. Die Forscherinnen und Forscher skizzieren darin, wie sich die klassische CMOS-Technologie für den Betrieb bei tiefen Temperaturen optimieren lässt.

Rechenzentren verbrauchen schon heute enorme Mengen Energie – und ihr Strombedarf dürfte sich bis 2030 durch den wachsenden Energiehunger der Künstlichen Intelligenz noch verdoppeln, prognostiziert die Internationale Energieagentur (IEA). Die Computerchips, die rund um die Uhr Daten verarbeiten, erzeugen dabei große Mengen Wärme – und benötigen entsprechend viel Energie für die Kühlung. Doch was, wenn man das Prinzip umkehrt? Was, wenn der Schlüssel zur Energieeffizienz nicht im Wärmemanagement, sondern in der Kälte selbst liegt?

Diese Idee steckt hinter dem Konzept des cryogenic computing – also des Rechnens bei sehr tiefen Temperaturen. Denn dort könnten Computerchips in Zukunft nicht nur schneller, sondern auch deutlich sparsamer arbeiten – zumindest, wenn sie entsprechend angepasst werden. Der Ansatz ist zudem für zahlreiche Anwendungen wie Quantencomputer, Weltraumsonden und die medizinische Bildgebung interessant, bei denen oftmals ebenfalls sehr tiefe Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt herrschen. Auch konventionelle Chips können von einer starken Kühlung profitieren. Für einen wirklich kryogenen Betrieb sind sie allerdings nur bedingt geeignet.

Transistoren mögen es kalt – eigentlich

„Ein Großteil des Stromverbrauchs in Computern geht auf das Konto der Transistoren“, sagt Prof. Qing-Tai Zhao vom Forschungszentrum Jülich. Diese winzigen Schalter – auf modernen Chips sind es oft mehrere Milliarden pro Quadratmillimeter – benötigen eine bestimmte Spannung, um zwischen Ein und Aus zu wechseln. Etwa 60 Millivolt sind bei Raumtemperatur erforderlich, um den Stromfluss um den Faktor 10 zu reduzieren. Dieser Wert, der sogenannte „Subthreshold Swing“, ist ein Maß für die Schalteffizienz eines Transistors – und stark temperaturabhängig.

„Klassischerweise sinkt diese Schaltspannung mit abnehmender Temperatur. Das hängt vor allem damit zusammen, dass die Elektronen weniger thermische Energie haben. Sie ‚springen‘ nicht so leicht über Barrieren und verhalten sich insgesamt ‚disziplinierter‘. In der Nähe des absoluten Nullpunkts wären theoretisch nur noch 1 Millivolt nötig“, erklärt Zhao. Weniger Spannung bedeutet: weniger Energie, weniger Hitze, mehr Effizienz.

Tatsächlich zeigen Studien, dass bei 77 Kelvin oder $-196,15$ Grad Celsius, diese Temperatur lässt sich mit Flüssigstickstoff-Kühlung erreichen, Einsparungen von bis zu 70 Prozent möglich sind. Dies gilt auch dann, wenn man den Aufwand für die Kühlung mit einrechnet. Mit Heliumkühlung bei 4 Kelvin seien es sogar 80 Prozent, schreiben die Forschenden.

Unterschied zwischen Theorie und Praxis

Doch in der Praxis sieht es bislang anders aus. Denn bei sehr tiefen Temperaturen machen sich physikalische Phänomene bemerkbar, die bei höheren Temperaturen im „thermischen Rauschen“ untergehen. Allen voran die sogenannten Band-Tail-Effekte: energetische Störungen, die auf kleine Materialunordnung oder Defekte, zurückgehen. Denn kein Halbleiter ist perfekt. „Diese Defekte verhindern, dass Transistoren richtig abschalten“, sagt Zhao. Der Strom „leckt“ weiter, obwohl das Bauelement eigentlich blockieren sollte.

Hinzu kommt das sogenannte Source-Drain-Tunneling – ein Quantenmechanismus, bei dem Elektronen die Sperrschicht einfach unterwandern. Beides zusammen führt dazu, dass sich der erwartete Subthreshold Swing – also die Steilheit des Schaltverhaltens, ein Wert für die Schalteffizienz eines Transistors – unterhalb von 20 Kelvin bei 5 bis 10 Millivolt pro Dekade einpendelt. Viel zu hoch, um die versprochene Energieeffizienz zu erreichen.

Neue Materialien, neue Perspektiven

Die gute Nachricht: Es gibt Lösungen. Zum Beispiel birgt der Einsatz von Materialien, die bei Raumtemperatur nicht verwendbar sind, bei sehr kalten Temperaturen große Vorteile. Der Grund dafür ist der durch die sehr niedrigen Temperaturen eingeschränkte energetische Bereich, der für das Schaltverhalten wesentlich ist.

Letztlich verlangt die Realisierung von cryogenic computing „den Austausch von in der kommerziellen CMOS-Technologie etablierten Materialien durch neuartige Materialien bzw. durch die Integration neubewerteter bekannter Materialien“, wie Prof. Joachim Knoch von der RWTH Aachen erklärt. In der Studie, die in Nature Reviews Electrical Engineering veröffentlicht wurde, schlagen die Forscherinnen und Forscher eine ganze Reihe von Technologien vor, die in Kombination eine Art „Super-Transistor für die Kälte“ ermöglichen könnten. Dazu zählen:

- Gate-all-around-Nanodrähte und vollständig verarmte Silicon-On-Insulator-(SOI)-Strukturen, die eine besonders präzise Steuerung ermöglichen
- High-k-Dielektrika mit sehr hoher Dielektrizitätszahl in Kombination mit sub-Nanometer dünnen Zwischenschichten, die die energetische Unordnung reduzieren und das elektrische Feld effizient bündeln
- Source/Drain-Engineering, das die Ausbildung steiler Übergänge ermöglicht und weniger Defekte verursacht
- der Einsatz neuartiger Materialien wie Halbleiter mit kleiner Bandlücke, die ein Schalten bei niedrigeren Spannungen erlauben
- sowie sogenanntes Back-Gating, bei dem sich die Schwellspannung dynamisch anpassen lässt.

Vom Labor in die Anwendung

„Kälteoptimierte Chips könnten dazu beitragen, jede Menge Energie zu sparen, speziell in Hoch- und Höchstleistungsrechenzentren, wo Tausende bis Hunderttausende Chips zum Einsatz kommen“, erklärt Hung-Li Chiang, Wissenschaftler bei TSMC, dem weltweit größten Halbleiterhersteller mit Sitz in Taiwan, der unter anderem Hochleistungs-Chips für Unternehmen wie Apple, Nvidia und AMD produziert.

Die „Kälte-Chips“ sind zudem für die Elektronik von Quantencomputern relevant. Denn die empfindlichen Quantenzustände in Quantencomputern sind höchst empfindlich. Wärme ist praktisch Gift für Quantencomputer, die mittels spezieller Kühlvorrichtungen – Kryostaten – in der Regel auf Temperaturen nahe des absoluten Nullpunkts gekühlt werden.

Diese extrem anspruchsvollen Anwendungen stehen auch im Fokus der Jülicher Forschungsgruppe um Qing-Tai Zhao. „Die Anforderungen für Quantenelektronik sind besonders hoch. Doch damit zusammenhängende Entwicklungen könnten neue Wege eröffnen für Hochleistungsrechner bei kryogenen Temperaturen und universelle kryogene Computer mit extrem niedrigem Stromverbrauch, die von Neumann-, Quanten- und neuromorphe Prozessoren integrieren“, erklärt Zhao.

Auch große Chiphersteller verfolgen den Ansatz. An der aktuellen Studie war TSMC beteiligt: der weltweit größte Halbleiterhersteller mit Sitz in Taiwan, der unter anderem Hochleistungs-Chips für Unternehmen wie Apple, Nvidia und AMD produziert.

Original publication:

Zhao, QT., Han, Y., Han, HC. et al.

Ultra-low-power cryogenic complementary metal oxide semiconductor technology

Nat Rev Electr Eng (2025), DOI: <https://doi.org/10.1038/s44287-025-00157-7>

URL for press release: <https://www.fz-juelich.de/de/aktuelles/news/pressemitteilungen/2025/cool-computing-warum-die-zukunft-der-elektronik-in-der-kaelte-liegen-koennte> Pressemitteilung auf der Website des Forschungszentrums Jülich



Prof. Qing-Tai Zhao leitet die Arbeitsgruppe Nanoelektronische Bauelemente am Peter Grünberg Institut (PGI-9) des Forschungszentrums Jülich.

Bernd Nörig
Forschungszentrum Jülich / Bernd Nörig



Blick in ein Quantencomputer-Labor des Forschungszentrums Jülich.
Sascha Kreklau
Forschungszentrum Jülich / Sascha Kreklau