# Mehr als Moore

29/03/2021 Seit Jahrzehnten schrumpfen die Transistoren in integrierten Schaltungen, wodurch immer leistungsfähigere Chips entstanden sind. Porsche Engineering berichtet, wie Forscher und Industrie daran arbeiten, um Chips auch in Zukunft immer leistungsfähiger zu machen und wie davon langfristig die Automobilindustrie profitiert.

Die Geburtsstunde der modernen Elektronik schlug am 16. Dezember 1947 in den Bell Labs in Murray Hill (New Jersey). Damals gelang es dem Physiker Walter Brattain erstmals, mit einem improvisierten Halbleiter-Bauelement eine elektrische Spannung zu verstarken. Der Transistor war geboren. Mit ihm stand zum ersten Mal eine Alternative zu den klobigen, unzuverlassigen und energiehungrigen Vakuumrohren zur Verfugung. Brattains Laboraufbau aus einem Germanium-Plattchen, einem Plastik-Dreieck, einer Goldfolie und einer Buroklammer hatte zwar außerlich noch nichts mit modernen Chips zu tun – aber er lautete dennoch die Ara von Personal Computern, Smartphones und selbstfahrenden Autos ein.

Das neue elektronische Bauelement eignete sich als Verstarker und als Schalter – und es ließ sich mit seinesgleichen sowie anderen Komponenten wie Widerstanden und Kondensatoren als integrierte Schaltung (integrated circuit, IC) auf einem einzigen Halbleiterplattchen unterbringen. In den folgenden Jahrzehnten gelang es den Halbleiterunternehmen, die Bauelemente immer mehr zu verkleinern und eine immer großere Zahl von ihnen auf der gleichen Flache unterzubringen. Gordon Moore sagte bereits 1965 voraus, dass die Zahl der Transistoren pro Flacheneinheit exponentiell ansteigen werde.

## Einfache Skalierung kommt an ihr Ende

Moores Vorhersage hat sich uber Jahrzehnte im Wesentlichen als korrekt erwiesen. Jetzt stoßt sie aber endgultig an ihre Grenzen, weil die schrittweise Verkleinerung der bewahrten MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) als Schalter auf den Chips nicht mehr funktioniert: „Vor etwa 15 Jahren hat man erkannt, dass die einfache Skalierung an ihr Ende gekommen ist“, berichtet Dr. Heike Riel, IBM Fellow am IBM- Forschungszentrum im schweizerischen Ruschlikon. „Zuerst haben die Hersteller darum bei gleichbleiben- der MOSFET-Geometrie zum Beispiel Siliziumdioxid als Isoliermaterial in den Transistoren durch sogenannte High-K-Materialien ersetzt. So ließen sich Chips mit 45 Nm großen Strukturen herstellen.“

Aber auch dieser Trick konnte das Mooresche Gesetz nur einige Jahren am Leben halten. Darum setzten die Chiphersteller ab der ersten Halfte der 2010er-Jahre auf eine neue Transistor-Architektur fur noch kleinere Komponenten: den FinFET. Bei ihm ist der leitende Kanal zwischen Source- und Drain-Anschluss wie eine Flosse (englisch „fin“) geformt und wird von der Steuerelektrode (Gate) an mehreren Seiten umschlosen. „Dadurch lasst sich der Stromfluss im Transistor wesentlich besser kontrollieren“, so Riel. „FinFETs kamen ab 22 Nm Strukturgroße zum Einsatz und sind heute Standard in integrierten

Schaltungen."

## Der Gate-all-around-FET

Aber auch ihr Nachfolger steht schon bereit. Ab Strukturgroßen von funf Nanometern soll der GAA-FET (Gate-all-around-FET) die Arbeit in den Chips ubernehmen. „Bei ihm besteht der leitende Kanal zwischen Source und Drain aus mehreren parallelen Silizium-Nanodrahten, die jeweils komplett von der Gate-Elektrode umschlossen sind", erklart Riel. „Das ist die optimale Geometrie fur die Steuerung des Stromflusses. Außerdem spart man Flache auf den Chips, weil mehrere dieser Nanodrahtstrukturen, die den Kanal des Transistors bilden, ubereinander liegen." Von Entwicklungen wie dem GAAFET werden kunftig auch Automotive-Anwendungen profitieren – denn sowohl die neuen, leistungsstarken High Performance Computing Platforms (HCPs) als Nachfolger der vielen dezentralen Steuergerate als auch die Spezialprozessoren fur das autonome Fahren sind auf Chips mit hoher Rechenleistung angewiesen. Das Mooresche Gesetz wird aber auch der GAAFET auf Dauer nicht retten konnen: Jenseits von drei Nm Strukturgroße wird es eng. In drei bis vier Jahren konnte diese Grenze erreicht sein.

„Eine geniale Phase des Verbesserns kommt damit an ihr Ende", sagt Prof. Dr. Thomas Schimmel, Direktor am Institut fur Nanotechnologie des Karlsruher Instituts fur Technologie (KIT). „Bisher hat man immer eine technische Losung gefunden, die eine weitere Verkleinerung des klassischen Transistors ermoglichte – aber jetzt hat man in den Chips atomare Dimensionen erreicht. Durch den quantenmechanischen Tunneleffekt konnen Elektronen Isolierungen durchqueren, was die Bauelemente unbrauchbar machen wurde. Denn im Gegensatz zu den Vorstellungen der klassischen Physik konnen die Elektronen selbst dann Barrieren uberwinden, wenn sie eigentlich nicht genugend Energie dafur besitzen." Aber auch das gezielte Einbringen von Fremdatomen in das hochreine Silizium wahrend des Produktionsprozesses – „Dotieren" genannt – funktioniert bei immer kleineren Strukturen nicht mehr zuverlassig.

## Kein heißer Nachfolge-Kandidat in Sicht

Gesucht wird darum ein Nachfolger des Transistors, mit dem sich die Performance elektronischer Schaltungen in Zukunft weiter steigern lasst. IBM-Forscherin Riel zahlt eine ganze Reihe von MOSFET-Alternativen auf, darunter den Carbon Nanotube Field-Effect Transistor (CNFET) und den Tunnel-FET (TFET): Im CNFET fließt der Strom durch winzige Rohren aus Kohlenstoff. Forscher vom MIT haben dieses Jahr gezeigt, dass sich die schnellen und energieeffizienten Schalter in konventionellen Chip-Fabriken herstellen lassen. TFETs sind ahnlich aufgebaut wie konventionelle Transistoren, nutzen beim Schalten aber den quantenmechanischen Tunneleffekt zu ihrem Vorteil. Sie sind energiesparend und schnell. Ob CNFET, TFET oder ein anderer Ansatz das Rennen machen wird, ist aber vollig offen. „Es gibt derzeit viel Forschung, aber noch keinen heißen Kandidaten fur die Nachfolge des optimierten Silizium-MOSFET", so Riel.

KIT-Forscher Schimmel setzt dafur langfristig auf den Einzelatom-Transistor: Bei ihm verschiebt eine

Steuerelektrode ein Atom, das die winzige Lucke zwischen zwei Anschlussen schließen und so den Stromfluss ermoglichen kann. „Im Prinzip funktioniert das wie bei einem Relais mit zwei stabilen Zustanden", so Schimmel, der 2004 mit seinem Team den ersten Einzelatom-Transistor entwickelte. „Dadurch ist der Einzelatom-Transistor nicht nur ein Schalter, sondern auch ein nichtfluchtiger Speicher. Er konnte also zugleich auch herkommliche RAM-Chips als Arbeitsspeicher in Computern ersetzen. Da er auch ohne Strom seinen Zustand beibehalt, musste man Computer in Zukunft nicht mehr neu starten, sondern konnte nach einer Pause sofort weiterarbeiten."

Weiterer Vorteil: Der Einzelatom-Transistor benotigt deutlich weniger Spannung als der MOSFET und wurde dadurch im Vergleich pro Schaltvorgang nur etwa ein Zehntausendstel der Energie verbrauchen. Das Hitze-Problem heutiger Chips ware damit gelost, und Taktfrequenzen von bis zu 100 Gigahertz kamen in Reichweite. Einen ersten IC mit zwei seiner neuartigen Transistoren hat Schimmel schon gebaut, und fur eine spatere Serienfertigung konnte man einen Mix aus bewahrten Prozessen der Halbleiterindustrie und galvanischen Verfahren nutzen. „Das ist wie beim Verzinken einer Karosserie – nur eben im atomaren Maßstab", sagt der Karlsruher Wissenschaftler.

## Neue Chip- und Computer-Architekturen

Alternativ zur immer weiteren Verkleinerung der Bauelemente bieten sich auch neue Ansatze bei der Chip-Architektur an, zum Beispiel der Weg in die dritte Dimension: Um mehr Leistung in die Schaltkreise zu packen, ließen sich mehrere Elektronik-Schichten aufeinander stapeln – schon heute praktiziert bei Flash-Speichern. Dabei konnten die Hersteller auf eine Lage mit herkommlichen Silizium-Transistoren kunftig auch eine Ebene aus sogenannten Verbindungshalbleitern wie Indiumgalliumarsenid (InGaAs) aufbringen.

Sie eignen sich fur Spezialaufgaben wie besonders schnelle Verstarkung, zur Emission oder Detektion von Licht und auch als mogliche Quantenbauelemente. Viele Experten setzen auf die Integration solcher zusatzlicher Funktionen in die Chips, um das Ende des Mooreschen Gesetzes zu kompensieren. Ihre Devise lautet: Statt „More Moore" (weitere Miniaturisierung) lieber „More than Moore" (die Vereinigung von digitalen und nicht-digitalen Funktionen auf demselben Chip).

## Das In-Memory-Computing

Eine deutlich hohere Rechenleistung und mehr Energieeffizienz verspricht das In-Memory-Computing, das die raumliche Trennung von Recheneinheit und Speicher in gangigen Computern aufheben soll. Denn damit wurde der zeitraubende und energieintensive Transport der Bytes zwischen Mikroprozessor und RAM entfallen. So lassen sich beispielsweise die Vektor-Matrix- Berechnungen in einem neuronalen Netz mithilfe einer Crossbar-Architektur durchfuhren – analog statt digital. Bei diesem Ansatz kreuzen sich zwei Bundel von horizontalen und vertikalen Leitungen, die jeweils als Ein- und Ausgange des neuronalen Netzes fungieren. An ihren Kreuzungspunkten sind die Leitungen uber nichtfluchtige Speicherelemente miteinander verbunden, die die Gewichtungsfaktoren (das „Wissen")

des neuronalen Netzes reprasentieren. Die Eingangswerte des neuronalen Netzes werden als analoge Spannungswerte an die horizontalen Leitungen angelegt. Die Ergebnisse der Berechnungen stehen fast augenblicklich an den vertikalen Leitungen bereit, ebenfalls in analoger Form – und ohne jeden Datentransport.

Als nichtfluchtige Speicher an den Kreuzungspunkten der Leitungen kommen unter anderem Memristoren infrage, neuartige elektronische Bauelemente, deren Widerstand durch eine von außen angelegte Spannung dauerhaft verandert werden kann und die sich mit bestehenden Herstellungsprozessen der Halbleiterindustrie kombinieren lassen. Mit Memristoren kann man die Berechnungen in neuronalen Netzen je nach Anwendung zehn- bis hundertmal schneller durchfuhren, zudem lasst sich die Energieeffizienz um den Faktor zehn bis tausend verbessern. Von solchen Leistungs- und Effizienzsteigerungen konnten auch autonome Fahrzeuge profitieren, in denen neuronale Netze eine Hauptrolle spielen. Das Beispiel zeigt: Auch wenn das Mooresche Gesetz bald an Grenzen stoßt – die kontinuierliche Leistungssteigerung der Elektronik ist noch lange nicht am Ende.

## MOSFET, FinFET und GAAFET

Der MOSFET (links) ist seit Jahrzehnten das Arbeitspferd als Schalter fur die Digitaltechnik und hat durch seine permanente Verkleinerung das Mooresche Gesetz am Leben erhalten. Die Spannung zwischen Gate- und Source-Elektrode bestimmt bei ihm den Strom, der durch den Kanal von Source nach Drain fließt. Beim FinFET (Mitte) hat der Kanal die Form einer Flosse (englisch „fin"), sodass das Gate ihn an drei Seiten umschließen kann. Das verbessert die Steuerung des Stromflusses im Vergleich zum MOSFET, bei dem das Gate nur von oben auf den Kanal einwirken kann. Beim GAAFET (rechts) umschließt das Gate den Kanal aus Silizium-Nanodrahten vollstandig. Das ist die optimale Geometrie, um den Stromfluss zu kontrollieren.

## Kunftige Alternativen zum herkommlichen Transistor-Design

Beim TFET (links) sind Source und Drain im Gegensatz zum MOSFET unterschiedlich dotiert. Er nutzt den quantenmechanischen Tunneleffekt: Bei ihm bestimmt die Spannung zwischen Gate und Source, ob Ladungstrager die energetische Barriere zwischen Source und Drain „durchtunneln" konnen und ein Stromfluss moglich ist. Beim CNFET (mitte) besteht der Kanal zwischen Source und Drain aus Kohlenstoff-Nanorohrchen. Auch hier bestimmt die Gate-Source-Spannung den Stromfluss. Beim Einzelatom-Transistor (rechts) verschiebt die Spannung zwischen Source und Gate ein einzelnes Atom, das den Stromkreis zwischen Source und Drain entweder schließt oder offnet (grune/rote Position).

## Das Mooresche Gesetz

Vor 55 Jahren machte Gordon Moore eine bemerkenswerte Voraussage: Die Zahl der Transistoren pro Chip wird sich in Zukunft jedes Jahr verdoppeln, so der damalige Forschungsdirektor des US-

Halbleiterherstellers Fairchild Semiconductor und spatere Intel-Mitgrunder 1965 in der Zeitschrift „Electronics“. Bereits 1975 werde es darum moglich sein, rund 65.000 von ihnen auf einem winzigen Siliziumplattchen unterzubringen. Das „Mooresche Gesetz“ wurde immer wieder leicht angepasst, hat sich im Grundsatz aber als korrekt erwiesen und avancierte zur Richtschnur der Halbleiterhersteller: Bis heute gelingt es ihnen immer wieder, in kurzen Abstanden die Zahl der Transistoren pro Flacheneinheit zu verdoppeln. In Zukunft wird das aber nicht mehr moglich sein. Eine hohere Leistungsfahigkeit der Chips muss dann auf andere Weise erreicht werden.

## Zusammengefasst

Die weitere Verkleinerung des MOSFET-Transistors und seiner Varianten FinFET und GAAFET durfte in den kommenden Jahren an Grenzen stoßen. Um Chips auch in Zukunft immer leistungsfahiger zu machen, arbeiten Forschung und Industrie sowohl an neuen Transistor-Designs wie Tunnel-FETs als auch an neuen Architekturen wie In-Memory-Computing.

## Info

Text: Christian Buck

Text erstmalig erschienen im Porsche Engineering Magazin, Nr. 1/2021

Dieser Beitrag wurde vor dem Start des Porsche Newsroom Schweiz in Deutschland erstellt. Die genannten Verbrauchs- und Emissionsangaben richten sich daher nach dem Prüfverfahren NEFZ und wurden unverändert übernommen. Alle in der Schweiz gültigen Angaben nach WLTP-Messzyklus sind unter www.porsche.ch verfügbar.

## MEDIA ENQUIRIES



**Inga Konen**

Head of Communications Porsche Schweiz AG
+41 (0) 41 / 487 914 3
inga.konen@porsche.ch

## Image Sublines

Path: Mehr als Moore/Bilder/Bild_3.jpg
Title: b-16.9-S39-Dr.Heike Riel-7008000597.jpg
Subline: 3D-Chip: Die Lakefield-Prozessoren von Intel bestehen bereits aus mehreren Schichten (im Bild die Rechenschicht).

## Link Collection

Link to this article
https://newsroom.porsche.com/de_CH/2021/innovation/porsche-engineering-mooresches-gesetz-mikroelektronik-chips-23344.html

**Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft**
Porscheplatz 1
70435 Stuttgart