

KIK16

Aktuelle Nachrichten aus der Welt der
Künstlichen Intelligenz. Recherchiert
und geschrieben von Paulo Heitlinger.

Newsletter

6. Aug.
2025

Rechnen mit Licht

Erfahren Sie mehr über die
phänomenale Leistung von
Photonischen Chips.

Wahrscheinlich haben Sie bald
einen PC mit einem solchen
Hochleistungs-Prozessor...

KIK16 News letter

In dieser Ausgabe:

Impressum	2
Rechnen ...mit Licht !	3
Leibniz-Rechenzentrum rechnet jetzt auch mit Licht	6
Der Energieverbrauch von KI	9
Eine kollektive, andauernde Erfindung	12
Photonische Chips: Eine kollektive Innovation	13
Photonische Chips aus den USA	21
Photonische Chips aus dem MIT	22
John von Neumann – Ein mathematisches Genie	24
Von Neumanns Arbeiten zur Quantenmechanik	29
John von Neumanns Computer	30

Impressum

Die KI-Newsletter wird von Paulo Heitlinger verlegt, geschrieben und bebildert. Diese Publikation wird in Köln produziert. Sie wird per E-Mail und über die Website www.mein-ki.de kostenlos vertrieben.

Wenn Sie diese KI-Newsletter abonnieren wollen, senden Sie eine E-Mail an info@mein-ki.de mit dem Stichwort „Abo“.

**Die Inhalte unterliegen dem deutschen Urheberrecht.
Copyright: © 2025 by Paulo Heitlinger.**

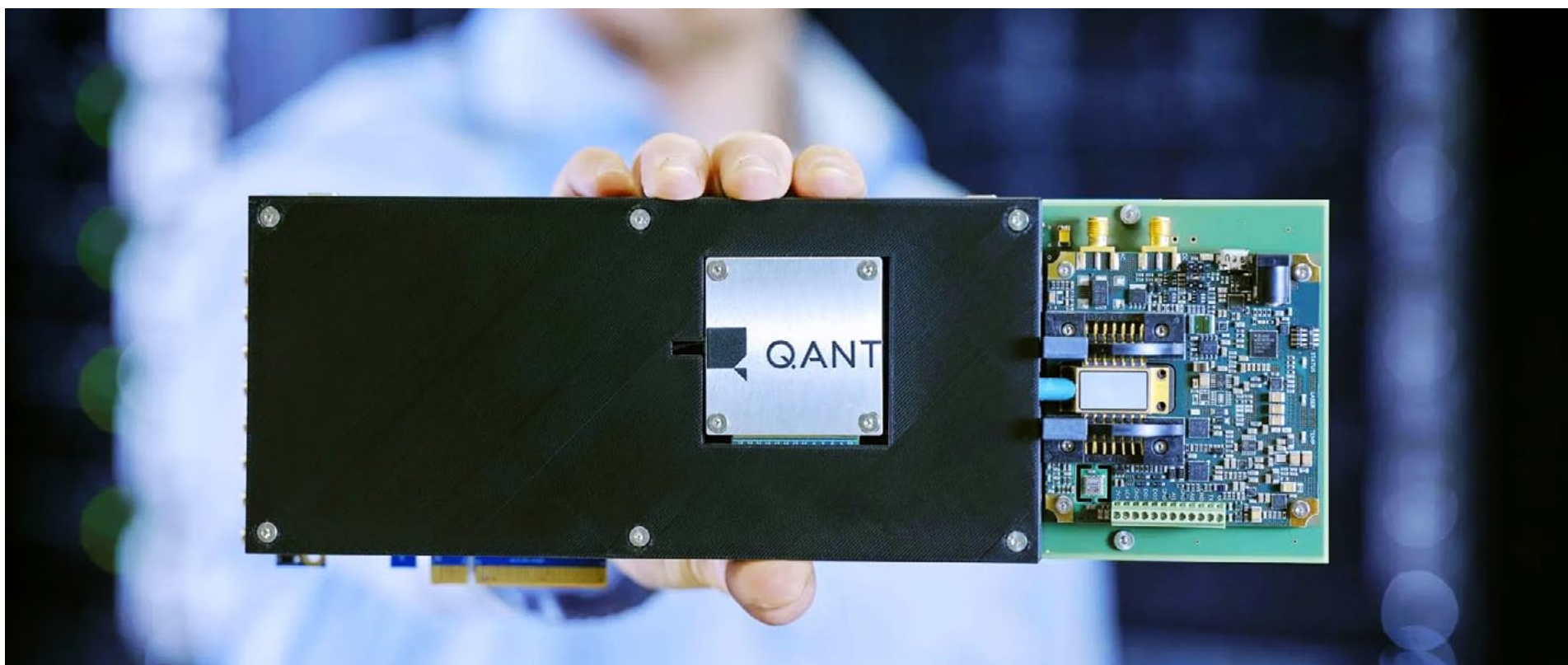
John von Neumanns Einfluss auf die Wissenschaft ist kaum zu überschätzen. Er gilt als Begründer der Informatik, war Mitbegründer der Spieltheorie. Seine mathematischen Methoden durchdringen heute viele Bereiche der Wissenschaften. Die von ihm entwickelten Konzepte bilden die Grundlage für Computer, KI und moderne Wirtschaftstheorie.

In dieser KI-Newsletter bin ich auch auf den neuartigen **Photonischen Chip** vom Unternehmen **Q.ant** eingegangen, der gerade Premiere in Deutschland feiert. Es handelt sich hier um eine wichtige Neuentwicklung im Bereich der Computer-Prozessoren. Wenn diese mit den konventionellen Elektronen-Mikroprozessoren verglichen wird, zeigt diese Licht-Chips eine Menge Vorteile...

Diese Newsletter ist mit Hilfe einiger KI-Chatbots getextet und mit KI-Tools bebildert worden. Diese haben mir geholfen, schneller die Übersicht zu bekommen, die Texte runder zu redigieren und klarer zu schreiben. So profitiere auch ich vom Einsatz der Künstlichen Intelligenz. Viel Spaß beim Lesen wünscht

Ihr Paulo Heitlinger





Rechnen ...mit Licht !

Das Unternehmen Q.ANT hat seinen **Native Processing Server (NPS)** an das Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) ausgeliefert. Es handelt sich dabei um die weltweit erste Inbetriebnahme eines **photonenischen Co-Prozessors** in einer Höchstleistungsrechnerumgebung (HPC).

Was ist das Besondere dabei? **Photonische Chips** arbeiten mit Licht, statt mit Strom, sind schneller als herkömmliche Prozessoren und verbrauchen weniger Energie. Gute Nachrichten, ohne Zweifel!

Bei Anwendungen in Zusammenhang mit Künstlicher Intelligenz wird ein dreißigfach reduzierter Stromverbrauch bei fünfzigfacher Rechenleistung im Vergleich zu üblichen Standardrechnern erhofft.

Die optische Datenverarbeitung könnte in den allernächsten Jahren neue Supercomputer-Standards setzen.

Lichtteilchen im Computer: Das Wichtigste in Kürze

Photonen (Griechisch: φῶς phōs = Licht), auch Lichtquanten oder Lichtteilchen genannt, sind vereinfacht gesagt die Energie-Pakete, aus denen **elektromagnetische Strahlung** besteht.

Photonische Prozessoren sind **Chips**, die Daten mit Licht (Photonen) statt mit elektrischen Signalen (Elektronen) verarbeiten. Im Gegensatz zu klassischen Halbleiternetzen, die auf Transistoren basieren, nutzen Photonische Prozessoren optische Wellenleiter, Laser und Detektoren zur Informationsübertragung.

Photonische Prozessoren bieten drastisch höhere Geschwindigkeiten und Energieeffizienz als herkömmliche Chips. Technologien wie Photonic Computing und optische Computer befinden sich in rasantem Wachstum. Sowohl Big Tech als auch Start-ups investieren massiv in lichtbasierte Chips.

Viel Potenzial für Anwendungen in KI: **Photonische Chips** sind vielversprechend für die Beschleunigung von KI-Anwendungen, da sie komplexe Berechnungen effizienter durchführen können. Und sie verbrauchen weniger Energie...

Vorteile von Photonischen Chips

Diese Prozessoren liefern eine zehnmals schnellere Datenübertragung als die Elektronen in den herkömmlichen Computerchips.

Im Gegensatz zu klassischen Halbleiternetzen, die auf Transistoren basieren, nutzen photonische Prozessoren optische Wellenleiter, Laserlicht und Detektoren zur Informationsübertragung.

Die Idee ist nicht neu, doch die Umsetzung war lange technisch schwierig. Heute markiert der technologische Fortschritt eine Wende, denn moderne Fertigungsprozesse machen diese Systeme alltagstauglich.

Die photonischen Chips gelten als Herzstück der sogenannten **optischen Computer**, die ihre Prozesse nicht mehr elektronisch, sondern mit Licht umsetzen.

Photonische Chips bieten Vorteile gegenüber herkömmlichen Siliziumchips, insbesondere in Bezug auf Energieeffizienz und Geschwindigkeit, zum Beispiel bei Anwendungen wie Künstlicher Intelligenz und Hochleistungsrechnen.

Funktionsweise der Photonischen Chips

Anstatt Elektronen zu verwenden, nutzen photonische Chips Licht, um Daten zu übertragen und zu verarbeiten. Dies geschieht durch den Einsatz – innerhalb des Chips – von optischen Komponenten wie Wellenleitern, Lasern, Polarisatoren und Phasenschiebern. Die Nutzung von Licht ermöglicht eine schnellere Datenübertragung und eine effizientere Verarbeitung, da Photonen weniger Widerstand als Elektronen erfahren und somit weniger Wärme erzeugen.

Verbesserte Datenübertragung:

Photonische Chips können auch in der optischen Hochgeschwindigkeitskommunikation eingesetzt werden und ermöglichen so eine schnellere Datenübertragung über größere Entfernungen.

Anwendungen:

– Künstliche Intelligenz

Photonische Chips können die Rechenleistung für KI-Anwendungen erheblich steigern und den Energieverbrauch senken.

– Hochleistungsrechnen

Photonische Chips eignen sich gut für Anwendungen, die hohe Rechenleistung erfordern, wie z.B. Simulationen und wissenschaftliche Berechnungen.

– Optische Datenübertragung

Photonische Chips spielen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Glasfasertechnologien und der schnellen Datenübertragung in Rechenzentren und Netzwerken.

– Medizintechnik

Photonische Chips können in der medizinischen Bilddiagnose und in der Echtzeitüberwachung eingesetzt werden.

– Biosensorik:

Photonische Chips können auch in der Biosensorik verwendet werden, um bestimmte Stoffe oder Biomarker zu erkennen und zu analysieren.

Herausforderungen:

Die Herstellung von photonischen Chips ist komplex und erfordert spezialisierte Fertigungstechnologien.

Photonische Chips arbeiten oft mit analogem Rechnen, was zu Ungenauigkeiten führen kann, die es zu beherrschen gilt.

Die Integration von photonischen Chips in bestehende IT-Infrastrukturen kann eine Herausforderung darstellen.

Zukunftsperspektiven:

Die Technologie der Photonischen Chips befindet sich zwar noch in der Entwicklung, aber sie birgt ein enormes Potenzial für die Zukunft der Datenverarbeitung und -übertragung.

Mit der weiteren Entwicklung können Photonische Chips eine Schlüsselrolle bei der Bewältigung der wachsenden Anforderungen an Rechenleistung und Energieeffizienz spielen, insbesondere in Bereichen wie KI und Hochleistungsrechnen.

Die Vorteile:

- **Erhöhte Geschwindigkeit:** Durch die Verwendung von Licht können photonische Chips Daten viel schneller übertragen und verarbeiten als elektronische Chips. Weitere Vorzüge:
- **Geringerer Energieverbrauch:** Da Photonen weniger Energie für die Bewegung benötigen und weniger Wärme erzeugen, verbrauchen photonische Chips deutlich weniger Energie, was zu einer Reduzierung des Energiebedarfs von Rechenzentren führen kann.
- **Verbesserte Kühlung:** Die geringere Wärmeentwicklung macht auch eine weniger aufwendige Kühlung der Chips erforderlich.

• • •

Quellen: Q.ant / Techobserver / Tagesschau / Perplexity / Gemini



Über Q.ant

Q.ant ist ein deutsches Deep-Tech-Unternehmen, welches photonische Prozessorlösungen entwickelt, die nativ mit Licht rechnen und eine skalierbare Alternative zu transistorbasierten Systemen bieten.

Die Light Empowered Native Arithmetics (LENA)-Architektur liefert analoge Co-Verarbeitungsleistung, die für komplexe Berechnungen optimiert ist und energieeffiziente Berechnungen für KI- und HPC-Anwendungen der nächsten Generation ermöglicht.

Q.ant betreibt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikroelektronik Stuttgart, IMS CHIPS eine eigene Pilotlinie für Thin-Film Lithium Niobate (TFLN)-Chips und liefert derzeit seine **Native Processing Server** an ausgewählte Partner aus.

Q.ant wurde 2018 von **Michael Förtsch** gegründet und hat seinen Hauptsitz in Stuttgart. www.qant.com.



Das Q.ant
Leitungsteam:
Andreas Abt (links)
Michael Förtsch,
Tim Stiegler



Leibniz-Rechenzentrum rechnet jetzt auch mit Licht

Photonische Chips arbeiten mit Licht statt mit Strom, sind schneller als herkömmliche Prozessoren und verbrauchen weniger Energie. Jetzt werden sie im **Leibniz-Rechenzentrum** in Garching bei München getestet.

Ende Juli 2025 / Aktuelle Nachrichten aus Stuttgart und Garching: Für KI und wissenschaftliche Anwendungen evaluiert das Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) die Leistungsfähigkeit der photonischen Beschleunigung auf dem **Native Processing Server** (NPS) von Q.ant.

Der erste Praxiseinsatz eines analogen photonischen Rechners bringt Deutschland in Führungsrolle bei energieeffizienten Post-CMOS-Technologien.

Das Stuttgarter Unternehmen Q.ant hat seinen Native Processing Server an das Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) ausgeliefert. Es handelt sich dabei um die erste Inbetriebnahme eines photonischen Co-Prozessors in einer Höchstleistungsrechnerumgebung (HPC).

Der erste photonischer Rechner von Q.ant geht in Betrieb. Dieser erster Einbau erfolgte im **Leibniz-Rechenzentrum** (LRZ) und ebnete den Weg zu einer neuen Klasse energieeffizienter Rechnersysteme.

Das LRZ zählt zu den größten Supercomputing-Zentren Europas und treibt mit seiner hochmodernen Infrastruktur Spitzenforschung voran. Die Zusammenarbeit zwischen Q.ant und dem LRZ setzt neue Maßstäbe dafür, wie Rechenzentren künftig Leistung, Platzbedarf, Energieeffizienz und Systemarchitektur in Einklang bringen können.

Sie markiert ein neues Kapitel in der Datenverarbeitung, bringt Antworten auf die Skalierungsprobleme heutiger KI-Infrastrukturen.

Rechnen mit Licht statt Strom – was lange nach Science-Fiction klang, wurde Wirklichkeit. In Garching ist erstmals ein photonischer Server im Rechenzentrum im Einsatz: 90% weniger Energieverbrauch bei 100-facher Leistung. Das zeigt, was möglich ist, wenn Wissenschaft, Wirtschaft und Staat gemeinsam anpacken...

Diese technologisch richtungsweisende Implementierung ermöglicht es dem LRZ, die photonische Beschleunigung für KI und Simulationen zu evaluieren. Das ebnet den Weg zu deutlich höherer Rechenleistung bei erheblich reduziertem Energieverbrauch.

Im Leibniz-Rechenzentrum soll nun getestet werden, wie der "Licht-Computer" mit herkömmlichen Rechnern und mit Quanten-Computern zusammenarbeiten kann und für welche Anwendung welches System am besten geeignet ist. Diese Tests sind ein wichtiger Schritt für den Forschungsstandort Deutschland. Denn bei der Entwicklung Künstlicher Intelligenz beispielsweise gibt es in vielen Bereichen noch einigen Nachholbedarf.

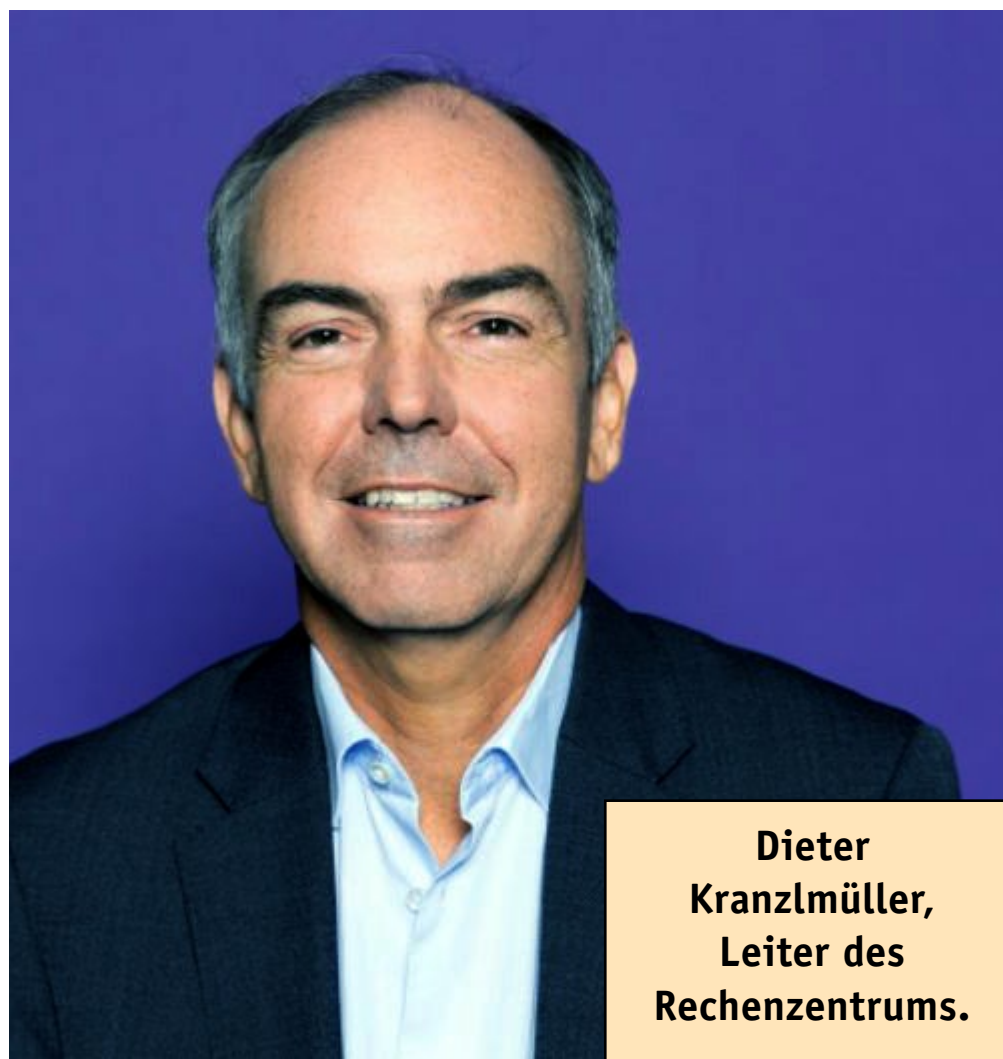
Im Leibniz-Rechenzentrum in Garching bei München sollen Rechner mit Photonenchips nun erstmals in ein großes Computernetzwerk integriert werden.

"Wir wollen schauen, wie so eine Technologie außerhalb des Labors, der Entwicklungszentren, genutzt werden kann", sagt **Dieter Kranzlmüller**, Leiter des Rechenzentrums. "Da ist ein Rechenzentrum eine gute Umgebung, da wir viele verschiedene Systeme haben und das unseren 'Zoo' an Systemen erweitert."

Das Projekt wurde durch Fördermittel des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) ermöglicht. An der Inbetriebnahme der Q.ant NPS nahmen Gäste aus Politik, Wissenschaft und Industrie teil.

In ihrer Begrüßungsrede würdigte Dorothee Bär, Bundesministerin für Forschung, Technologie und Raumfahrt, die Bedeutung dieses Meilensteins für Deutschland und Europa.

„Die Integration des photonischen Prozessors von Q.ant in das Leibniz-Rechenzentrum ist ein beeindruckender Beweis für deutsche Spitzentechnologie und eine Erfolgsgeschichte der deutschen Forschungsförderung. Wir unterstützen bahnbrechende Innovationen, die unsere wissenschaftliche Führungsrolle in der Welt und technologische Souveränität stärken.



**Dieter
Kranzlmüller,
Leiter des
Rechenzentrums.**

Mit unserer *Hightech Agenda Deutschland* werden wir uns künftig noch deutlich stärker für Forschung und Innovation in unseren wichtigen Schlüsseltechnologien einsetzen. Wie hier in Garching setzen wir dabei auch auf die enge Zusammenarbeit von Forschung und Unternehmen".

„Photonische Prozessoren bieten einen neuartigen und vielversprechenden Weg, um KI- und Simulations-Workloads zu beschleunigen und gleichzeitig unseren ökologischen Fußabdruck deutlich zu verringern. Mit diesem Praxiseinsatz kommen wir unserem Ziel entscheidend näher, energieeffiziente Infrastrukturen für Supercomputing und KI zu etablieren“, sagte Prof. Dr. **Dieter Kranzlmüller**, Vorsitzender des Direktoriums des LRZ.

„Der NPS von Q.ant lässt sich leicht in unsere bestehende Infrastruktur integrieren, wir können ihn sofort in praktischen Szenarien bewerten. Die Erforschung von Rechenarchitekturen der Zukunft zusammen mit Partnern wie Q.ant wäre jedoch ohne die kontinuierliche politische Unterstützung, die wir seit Jahren sowohl auf nationaler als auch auf bayerischer Ebene erhalten, nicht möglich.“ ● ● ●

Michael Förtsch und sein Team können nun im Leibniz-Rechenzentrum in Garching testen, ob ihr Rechner die extrem hohen Erwartungen besonders im Bereich der KI erfüllt.

Für **Dieter Kranzmüller**, Leiter des Rechenzentrums, kommt dieser Schritt genau zur rechten Zeit. “Wir haben jetzt diese Technologie als sehr wertvoll für alle Anstrengungen in der künstlichen Intelligenz erkannt”, sagt Kranzmüller. “Das passt sehr gut zu dem Bedarf, den wir momentan für die Künstliche Intelligenz sehen und das gibt uns hoffentlich die Rechenleistung, die wir hier erwarten, bei möglichst geringem Energiebedarf.”

Das LRZ wird den NPS von Q.ant nutzen, um neue Benchmarks und praxisnahe Anwendungsfälle für Anwendungen wie Klimamodellierung, medizinische Echtzeitbildgebung oder Materialsimulation für die Fusionsforschung zu etablieren.

Mit seiner Integration stärkt das LRZ seine Rolle als Vorreiter in der Entwicklung energieeffizienter Hochleistungsrechner.

In der ersten Evaluierungsphase im LRZ werden mehrere Einheiten der neuesten Generation des Q.ant NPS installiert, geeignete Benchmark-Workloads ausgewählt und reale Anwendungsszenarien getestet – insbesondere in den Bereichen KI-Inferenz, Computer Vision und Physiksimulationen.

In späteren Phasen kommen NPS-Einheiten der zweiten und dritten Generation für eine vertiefende Bewertung zum Einsatz.

Über das Leibniz-Rechenzentrum (LRZ)

Das Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften ist seit über 60 Jahren der kompetente IT-Partner der Münchner Universitäten und Hochschulen sowie wissenschaftlicher Einrichtungen in Bayern, Deutschland und Europa.

Es bietet die komplette Bandbreite an IT-Dienstleistungen und -Technologie sowie Beratung und Support – von E-Mail, Webserver, bis hin zu Internetzugang, virtuellen Maschinen, Cloud-Lösungen und dem Münchner Wissenschaftsnetz (MWN).

Mit dem Höchstleistungsrechner SuperMUC-NG gehört das LRZ zu den international führenden Supercomputing-Zentren und widmet sich im Bereich *Future Computing* schwerpunktmäßig neu aufkommenden Technologien, Künstlicher Intelligenz und Machine Learning sowie Quantencomputing.

Adresse:

Leibniz-Rechenzentrum der
Bayerischen Akademie der
Wissenschaften
Boltzmannstraße, 1
85748 – Garching

Der Energieverbrauch von KI

Weltweit steigt der Energiebedarf für Rechenzentren. Dann kommt die Anwendung von KI hinzu; diese verbraucht ebenfalls gigantische Mengen Energie.

Bis 2030 wird voraussichtlich allein für KI weltweit mehr Strom zusätzlich benötigt, als aktuell ganz Deutschland braucht...

Große Hoffnungen setzen jetzt Wissenschaftler auf den neuen, vom Stuttgarter Startup-Unternehmen **Q.ant** entwickelten Photonen-Chip: ein Prozessor, der mit Licht statt mit Strom arbeitet und deutlich weniger Energie verbraucht als herkömmliche Chips.

Man erhofft sich bei Anwendungen in Zusammenhang mit Künstlicher Intelligenz einen dreißigfach reduzierten Stromverbrauch – bei fünfzigfacher Rechenleistung im Vergleich zu Standardrechnern.

Das Rechenzentrum ist ein großer, fensterloser Raum. Hier werden konventionelle Hochleistungsrechner, aber auch ein Quantencomputer betrieben. Nun kommt auch der neuentwickelte Optische Computer mit den Photonenchips hinzu.

Die Vorteile der Photonen-Technologie: Photonen liefern eine zehnmal schnellere Daten-Übertragung als Elektronen in den herkömmlichen Computerchips.

Photonen bestehen aus Licht, und weil Licht unterschiedliche Wellenlängen (Farben) hat, können im Photonenchip **mehrere Prozesse parallel laufen**. Das spart enorm viel Energie und vervielfacht gleichzeitig die Leistung.

Außerdem erhitzt sich der Photonenchip kaum. Auch das ist ein großer Vorteil gegenüber herkömmlichen Chips. Der enorme Kühlwasserverbrauch von Großrechenzentren könnte in Zukunft mit dem Einsatz von Photonenchips verringert



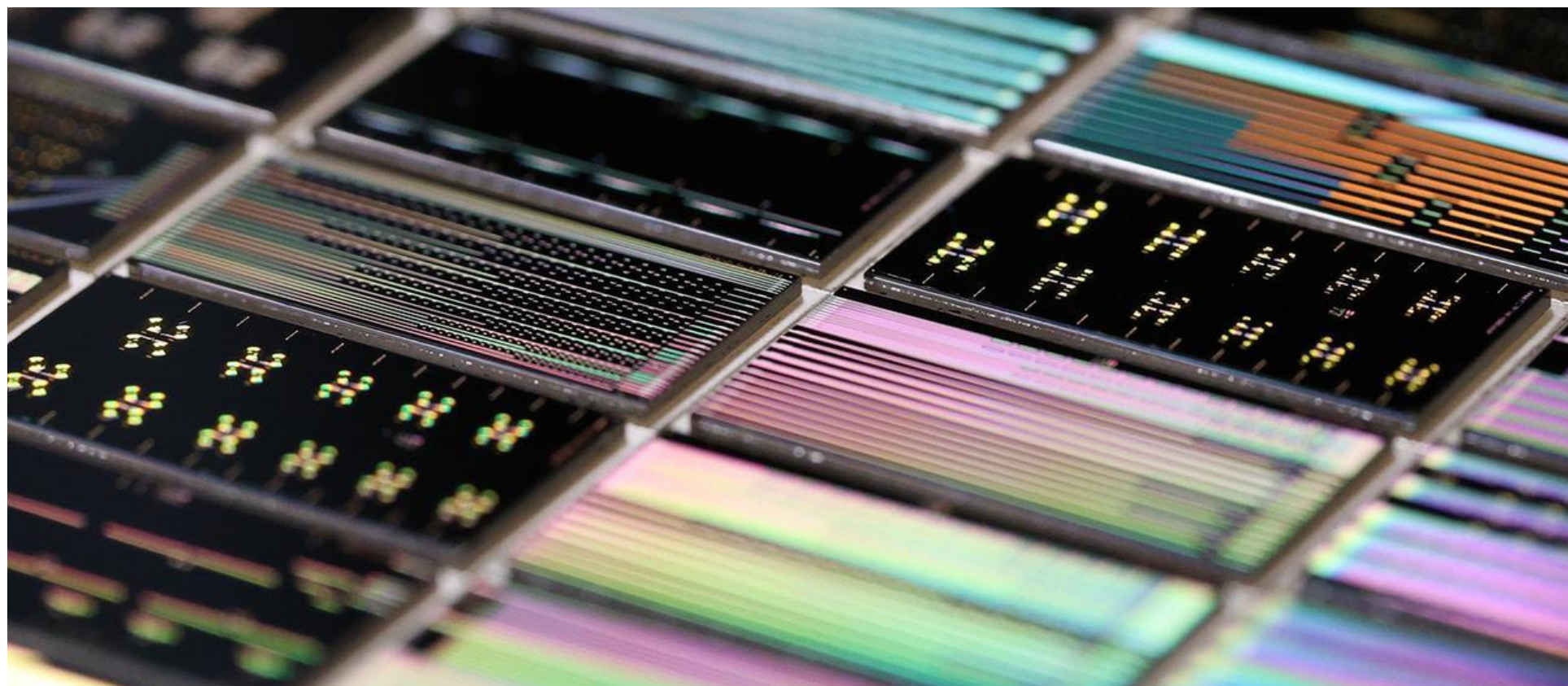
Dr. Michael Förtsch

werden. Dass Photonen-Chips bisher trotz der vielen Vorteile kaum in Anwendungen zu finden sind, hat vor allem einen Grund: Sie gelten als fehleranfällig und als ungenau. Das lag wohl am Material, das in den Chips verarbeitet wird: Silizium. Das Startup **Q.ant** geht daher andere Wege, sagt Gründer **Michael Förtsch**:

“Wir haben entgegen dem internationalen Wettbewerb auf unser eigenes Chipmaterial gesetzt, immer mit der Überzeugung, dass es nicht Silizium sein wird, was die Photonik nach oben bringt.”

Q.ant setzt auf ein spezielles Materialsystem, Dünnschicht-Lithiumniobat, “was fundamentale Vorteile über die Kontrolle des Lichts hat”, erklärt Förtsch. “Unser Material erlaubt uns, die für den Rechenprozess notwendige Genauigkeit zu zeigen.”

Der KI-Boom treibt die Nachfrage nach Rechenzentren in die Höhe – doch Deutschland investiert hier zu langsam. So viele Vorteile die Photonen-Chips auch haben, die damit arbeitenden Computer sind anderen Rechnern nicht in allen Bereichen überlegen. • • •



Weniger Strom, mehr Leistung – mit Licht

Photonische integrierte Schaltkreise (PICs), oder Photonische Chips, stellen eine Technologie dar, die die Datenverarbeitung und -kommunikation durch die Nutzung von Licht (Photonen) anstelle von Elektrizität (Elektronen) revolutionieren soll.

Diese Chips bieten höhere Geschwindigkeiten, eine stark verbesserte Energieeffizienz, erhöhte Bandbreite und reduzierte Wärmeentwicklung.

So begegnen sie den grundlegenden Einschränkungen, denen traditionelle elektronische Schaltkreise haben. Schlüsselanwendungen für PICs umfassen Hochgeschwindigkeits-Datenkommunikation, KI, fortschrittliche Sensorik für autonome Systeme und Quantencomputing.

Momentan treibt Künstliche Intelligenz den Rechenbedarf in die Höhe – und bringt Höchstleistungs-Rechenzentren ans Limit: Stromverbrauch, Hitze und Platz werden zu einem großen Problem.

Da auf dem Photonischen Chip von **Q.ant** (**Bild oben**) keine Wärme entsteht, entfallen kostspielige Kühlmaßnahmen. Und dank der Eigenschaften des Lichts lassen sich komplexe Berechnungen auf dem photonischen Prozessor schneller und energieeffizienter erledigen.

Ein Vorteil der Photonischen Chips besteht darin, dass sie eine große Zahl von Rechenoperationen **gleichzeitig** durchführen können. Denn die Chips können auf derselben Infrastruktur mit unterschiedlichen Wellenlängen – also mit verschiedenen Farben – verschiedene Rechnungen parallel durchführen.

Ein weiterer Vorteil: Die Chips rechnen nicht digital – also nicht mit Einsen und Nullen, sondern analog. Dabei verändern sich Größen kontinuierlich und machen keine digitalen Sprünge. Solche Vorgänge lassen sich am besten analog berechnen – ohne Umweg über das binäre System.

Die photonische Technologie von **Q.ant** ermöglicht eine neue Klasse von hochleistungsfähigen, energieeffizienten Server-Rack-Lösungen, mit:

- 90-fach geringerem Stromverbrauch pro Anwendung – durch den geringeren Kühlbedarf der Prozessoren von **Q.ant**.
- 100-facher Steigerung der Rechenzentrums-kapazität durch höhere Rechendichte und erhöhte Rechengeschwindigkeit.
- 16-Bit-Gleitkommagenauigkeit mit nahezu 100-prozentiger Genauigkeit für alle Rechenoperationen auf dem Chip.
- nahtloser Integration durch PCIe-Schnittstelle, x86-Kompatibilität sowie Unterstützung von PyTorch, TensorFlow und Keras.



OPTİK



Eine kollektive, andauernde Erfindung

Die Erfindung **Photonischer Chips** ist kein singuläres Verdienst einer einzelnen Person. Sie ist vielmehr ein Zeugnis jahrzehntelanger kumulativer wissenschaftlicher Forschung, technischer Genialität und industrieller Investitionen, an denen zahlreiche Forscher und Institutionen beteiligt waren.

Die Beiträge, die in den folgenden Seiten detailliert beschrieben werden, sind zwar eigenständig, aber eng miteinander verknüpft:

Stewart E. Miller lieferte 1969 die grundlegende konzeptionelle Vision der “integrierten Optik”, indem er die Miniaturisierung und Integration optischer Funktionen imaginierte.

Richard A. Soref erzielte Mitte der 1980er Jahre den entscheidenden Material- und Fertigungsdurchbruch, indem er Silizium als ideale Plattform für die “Siliziumphotonik” identifizierte. Dies basierte auf dessen optischen Eigen-

schaften und, entscheidend, seiner Kompatibilität mit der etablierten CMOS-Fertigung.

Der anschließende industrielle Aufschwung ab Mitte der 2000er Jahre, angetrieben von großen Unternehmen wie Intel und IBM, verwandelte diese grundlegenden Ideen in praktische Technologien, indem zuvor bestehende Fertigungsbeschränkungen überwunden wurden.

H heute entwickelt ein riesiges System aus Forschern, Ingenieuren und Unternehmen weiterhin Innovationen, verschiebt die Grenzen der Integration, entwickelt neue Materialien und erweitert die Anwendungen in Bereiche wie KI-Computing und Quantentechnologien. Dies zeigt, dass die Erfindung ein fortlaufender Prozess der Verfeinerung und Anwendung ist.

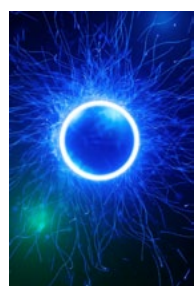
.....

Die Entwicklung photonischer Chips wurde stets von der unerbittlichen Nachfrage nach schnelleren, energieeffizienteren und bandbreitenstärkeren Informationsverarbeitung angetrieben, insbesondere da die physikalischen Grenzen traditioneller elektronischer Schaltkreise immer deutlicher werden.

Die Fähigkeit, die bestehende Halbleiterfertigungsinfrastruktur zu nutzen, war ein entscheidender Wegbereiter für die weitreichende Akzeptanz der **Siliziumphotonik**.

Die Geschichte der photonischen Chips offenbart ein starkes Zusammenspiel zwischen grundlegender wissenschaftlicher Entdeckung (Einsteins Photon, Millers Konzept der integrierten Optik), strategischem Ingenieurwissen (Sorefs CMOS-Kompatibilität) und Marktkräften (Industrienachfrage nach schnellerem, effizienterem Computing).

Jede Phase baute auf der vorhergehenden auf. Dies zeigt, dass **technologische Erfindung** ein dynamischer, kollaborativer und iterativer Prozess ist, der über einen statischen Zeitpunkt einer einzelnen Erfindung hinausgeht.



Photonische Chips: Eine kollektive Innovation

Die Erfindung Photonischer Chips, auch als **Photonische Integrierte Schaltungen (PICs)** bekannt, lässt sich nicht einer einzelnen Person oder einem einzigen Zeitpunkt zuschreiben. Vielmehr ist sie das Ergebnis eines jahrzehntelangen Entwicklungsprozesses, der grundlegende Konzeptualisierung, Durchbrüche in der Materialwissenschaft und kontinuierliche technische Innovation umfasst.

Das Konzept der “integrierten Optik” wurde erstmals 1969 von **Stewart E. Miller** visionär beschrieben, womit er die theoretischen Grundlagen für miniaturisierte optische Schaltkreise legte.

Jahrzehnte später, Mitte der 1980er Jahre, trat **Richard A. Soref** als “Gründervater der Siliziumphotonik” hervor. Er leistete Pionierarbeit bei der Nutzung von **Silizium** als praktikable und skalierbare Plattform, indem er dessen Kompatibilität mit bestehenden Halbleiterfertigungsprozessen nutzte.

Nach Sorefs bahnbrechender Arbeit setzte ab Mitte der 2000er Jahre ein signifikanter Aufschwung in der Forschung und industriellen Anwendung der Siliziumphotonik ein, angetrieben durch Fortschritte in der Nanofabrikation und erhebliche Investitionen der Industrie.

Heute entwickelt sich das Feld mit fortlaufenden Innovationen bei Materialien, Integrations-techniken und vielfältigen Anwendungen – von der Hochgeschwindigkeitsdatenkommunikation über die KI-Berechnung bis hin zu Quantentechnologien – rasant weiter.

Was ist Integrierte Photonik?

Photonische Chips stellen eine Technologie dar, die das Potenzial hat, die Art und Weise, wie Informationen verarbeitet und übertragen werden, grundlegend zu verändern. Um ihre Bedeutung zu verstehen, ist es unerlässlich, die zugrundeliegenden Konzepte klar zu definieren.

Photonik ist die Wissenschaft und Technologie, die sich mit der Erzeugung, Bewegung und Detektion von Photonen, den Lichtteilchen, befasst.

Dieses Feld wurzelt in der fundamentalen Quantenphysik, wobei Albert Einsteins Vorschlag aus dem Jahr 1905, dass Licht sowohl als Welle als auch als Teilchen agieren kann, ein Schlüsselparadigma darstellt.

Die **Photonik** umfasst Technologien wie Laser, LEDs, Glasfasern und optoelektronische Bauelemente, die in modernen Anwendungen wie CT-Scans, Barcodes, Flachbildfernsehern und Glasfaserkommunikation integraler Bestandteil sind.

Die integrierte Photonik, oder Photonische Integrierte Schaltungen (PICs), ist ein fortgeschrittener Zweig der Photonik. Hier werden optische Komponenten, wie Wellenleiter, Modulatoren und Detektoren, als eine integrierte Struktur auf der Oberfläche eines einzigen flachen Substrats, typischerweise Silizium oder Glas, gefertigt.

Diese Integration ermöglicht die Steuerung von Licht auf mikroskopischer Ebene, analog zur Funktionsweise elektronischer integrierter Schaltkreise, die elektrische Signale verarbeiten...

Grundlegende Vorteile gegenüber Elektronischen Schaltkreisen

Der fundamentale Wandel von Elektronen zu Photonen als Informationsträger ist die Kerninnovation und wird durch inhärente physikalische Vorteile vorangetrieben, die die Grenzen traditioneller Elektronik überwinden.

Photonische Chips bieten gegenüber ihren elektronischen Pendants signifikante Vorteile:

- **Geschwindigkeit:** Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und erfahren dabei minimale Interferenzen. Dies ermöglicht eine erheblich schnellere Informationsübertragung und eine höhere Bandbreite im Vergleich zu Elektronen, die langsamer sind und mit Kupferleitungen interagieren.
- **Höhere Bandbreite:** PICs bieten eine erhöhte Bandbreite und erweiterte Frequenz- bzw. Wellenlängenmultiplexing-Fähigkeiten.
- **Energieeffizienz:** Im Gegensatz zu elektrischen Strömen, die beträchtliche Wärme erzeugen, können Photonen große Informationsmengen übertragen, während sie nur einen Bruchteil der Energie freisetzen, was zu einem reduzierten Stromverbrauch führt.
- **Integrationsdichte und Skalierbarkeit:** Die Integration weiterer photonischer Bauelemente in mikrometergroßer Nähe auf einem einzigen Chip ermöglicht ein nahtloses Zusammenwirken von Komponenten wie Transistoren, Speicher, Modulatoren und Detektoren. Diese Miniaturisierung reduziert Größe, Gewicht und Stromverbrauch und verbessert gleichzeitig Leistung und Zuverlässigkeit.

Die zunehmenden Anforderungen an höhere Geschwindigkeit, größere Bandbreite und geringeren Stromverbrauch in der Informationsverarbeitung und -übertragung – beispiels-

Elektronische Chips am Ende?

Elektronische Chips stehen aufgrund erhöhter Kosten, Komplexität und physikalischer Gesetze (wie Widerstand und Wärmeverlust) vor Leistungsgrenzen.

Der historische Trend, die Anzahl der Transistoren auf Chips etwa alle zwei Jahre zu verdoppeln, verlangsamt sich, da die Physik die weitere Miniaturisierung von Transistoren behindert.

Diese Entwicklung schafft einen Engpass für fortschrittliche Computeranforderungen, insbesondere für komplexe KI-Modelle, die an Größe und Komplexität zunehmen.

Photonische Chips bieten hier inhärente Vorteile wie Geschwindigkeit, geringe Interferenz und Energieeffizienz, wodurch sie zu einem natürlichen Kandidaten werden, um diese elektronischen Einschränkungen zu überwinden. Die Entwicklung **Photonischer Chips** ist somit nicht nur eine inkrementelle Verbesserung, sondern ein grundlegender Wandel, der durch die physikalischen Grenzen der Elektronik notwendig wird, was die Photonik als entscheidende Zukunftstechnologie für Hochleistungsrechnen und Kommunikation positioniert.

weise für KI-Anwendungen und Rechenzentren – haben die Notwendigkeit von Alternativen zu elektronischen Schaltkreisen direkt verstärkt. Dies ist besonders relevant, da der Fortschritt traditioneller elektronischer Chips, der durch das Moore'sche Gesetz beschrieben wird, an seine physikalischen Grenzen stößt.

Der konzeptionelle Beginn: Integrierte Optik und Stewart E. Millers Vision

Der Grundstein für die Idee der integrierten Photonik wurde im Jahr 1969 gelegt, als Stewart E. Miller das Konzept der “integrierten Optik” einführte. Seine wegweisende Arbeit mit dem Titel *Integrated Optics: An Introduction*, die im *Bell System Technical Journal* veröffentlicht wurde, war die Geburtsstunde dieses Forschungsfeldes.

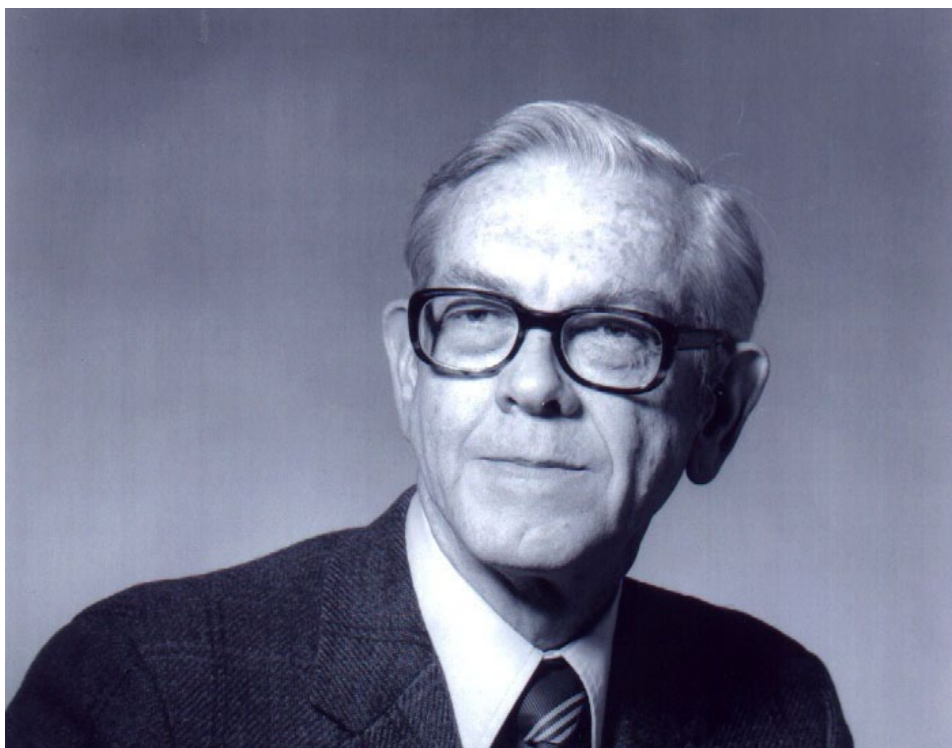
Millers Vision umfasste die Integration optischer Schaltkreise, um komplexe Funktionen in einem kompakten und effizienten Rahmen zu realisieren.

Er stellte fest, dass die damaligen typischen optischen Telefonverstärker, die aus diskreten Komponenten wie Lasern, Modulatoren, Detektoren und Linsen bestanden und auf einer optischen Bank verteilt waren, umständlich waren und eher einer “extrem kurzreichweitigen Funkkommunikation” glichen, die mit inhärenten Schwierigkeiten behaftet war.

Seine elegante Lösung bestand darin, diese separaten Komponenten auf einem einzigen Substrat oder Chip zu kombinieren und sie über miniaturisierte Übertragungsleitungen oder Wellenleiter zu verbinden. Dabei zog er eine direkte Analogie zu elektrischen integrierten Schaltkreisen.

Die Entwicklung der **integrierten Optik** wurde primär durch den Bedarf an Miniaturisierung und verbesserter Leistung in optischen Kommunikationssystemen vorangetrieben.

Die Entwicklung des Lasers in den frühen 1960er Jahren, der eine stabile Quelle kohärenten Lichts lieferte, war eine entscheidende Vorläufertechnologie für diese Vision. Frühe integrierte optische Bauelemente eigneten sich gut für kohärente Lichtwellensysteme und fanden Anwendung



Stewart E. Miller...

...ist der unbestrittene konzeptionelle Pionier der integrierten Optik, der die theoretischen Grundlagen für die Kombination optischer Funktionen auf einem Chip legte.

Stewart E. Millers Bezeichnung seiner vorgeschlagenen Anordnung als “integrierter optischer Schaltkreis” in Analogie zur “Anordnung elektrischer Komponenten auf einem integrierten Schaltkreis-Chip” war ein entscheidender Schritt.

So entstand das Konzept der “integrierten Optik”, um herkömmliche elektrische integrierte Schaltkreise zu ersetzen.

Indem er eine Parallele zum bereits erfolgreichen und sich schnell entwickelnden Bereich der elektronischen ICs zog, lieferte Miller eine überzeugende Vision für die Zukunft der Optik.

Es ging nicht nur darum, optische Komponenten kleiner zu machen; es ging auch darum, ein bewährtes Integrationsparadigma zu übernehmen. Diese Analogie machte das Konzept für Ingenieure und Forscher zugänglicher und verständlicher. Dies dürfte die frühe Forschung und Entwicklung beschleunigt haben, indem es einen konzeptionellen Fahrplan lieferte und das Potenzial für ähnliche Vorteile (Miniaturisierung, Leistungssteigerung, Batch-Fertigung) aufzeigte.

in externen Modulatoren, elektrooptischen Polarisationsreglern und Frequenzverschiebern.

Die Silizium-Revolution: Richard A. Soref und die Geburt der Siliziumphotonik

Während **Stewart E. Miller** die konzeptionellen Grundlagen für die integrierte Optik schuf, wird **Richard A. Soref** als “Gründervater der Siliziumphotonik” bezeichnet. Seine Arbeit um die Mitte der 1980er Jahre war entscheidend, um **Silizium** als praktikables Material für photonische integrierte Schaltkreise zu etablieren. Richard A. Sorefs bahnbrechende Erkenntnisse basierten auf zwei Fundamente:

- **Optische Transparenz von Silizium:** Soref erkannte, dass Silizium, ein Material, das bereits im Zentrum der Mikroelektronikindustrie stand, bei der entscheidenden faseroptischen Telekommunikationswellenlänge von 1.550 Nanometern hochtransparent ist. Dies war eine kritische Beobachtung, da sie die Möglichkeit eröffnete, Silizium in optischen Anwendungen zu nutzen.
- **CMOS-Kompatibilität:** Ein visionärer Aspekt von Sorefs Vorschlag war die Kompatibilität der Fertigung von Siliziumphotonik mit bestehenden Mikroelektronik-Fertigungsprozessen (CMOS¹-Technologie). Er sah die *großartige Ehe zweier Technologien* – Elektronik und Photonik – auf einer einzigen Wafer-Skala voraus. Diese Kompatibilität versprach Kosteneffizienz und ermöglichte die Massenproduktion, indem sie eine bereits gut etablierte Fertigungsinfrastruktur nutzte.

Richard A. Soref schlug ein Bild des “archetypischen gerätebestückten optoelektronischen integrierten Schaltkreises” vor, den manche als **Elektronisch-Photonische Integrierte Schaltkreise**

¹ CMOS = Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.

Richard A. Soref, Gründer- vater der Siliziumphotonik



Soref promovierte 1964 in Elektrotechnik an der Stanford University und arbeitete an Institutionen wie dem **Lincoln Lab des MIT** und dem **US Air Force Research Laboratory (AFRL)**.

Er ist weiterhin als Forschungsprofessor an der University of Massachusetts, Boston, tätig.

Seine Einschätzung für die Siliziumphotonik ist, dass sie einen starken Beitrag zu zukünftigen VLSI-photonischen Quantencomputern und photonischen neuromorphen Computern leisten wird.

Richard A. Soref identifizierte Silizium als das ideale Material für die integrierte Photonik aufgrund seiner optischen Eigenschaften und, entscheidend, seiner Kompatibilität mit der bestehenden Mikroelektronikfertigung.

Dies ermöglichte die praktische Realisierung und Skalierbarkeit photonischer Chips. Sorefs Voraussicht bezüglich der CMOS-Kompatibilität war der wichtigste Faktor für den späteren weitreichenden Erfolg und die kommerzielle Verbreitung der Siliziumphotonik.

Ohne die Möglichkeit, die bereits etablierte und hochoptimierte Halbleiterfertigungsinfrastruktur zu nutzen, wäre die Technologie aufgrund der prohibitiv hohen Kosten für die Entwicklung völlig neuer Fertigungsinfrastrukturen möglicherweise eine Nische in der akademischen Forschung geblieben.

Soref hob explizit die “gut etablierte Fertigungsinfrastruktur” von Silizium und die Kompatibilität der Siliziumphotonik-Fertigung mit der Mikroelektronik hervor.

(EPIC) bezeichnen. Seine frühe Forschung etablierte Silizium als praktikable Plattform für PICs.

Wegweisende Veröffentlichungen

Richard Sorefs Ansehen begann mit einer Reihe von Veröffentlichungen ab Mitte der 1980er Jahre. Seine erste Arbeit erschien 1985 in *Electronics Letters* und trug den Titel *Single-crystal silicon: a new material for 1.3 and 1.6 μm* . Diese Arbeit demonstrierte zusammen mit späteren Berichten wie kanten-gekoppelte Wellenleiter und optische Leistungsverteiler arbeiteten.

Dies war nicht nur ein technisches Detail, sondern eine tiefgreifende strategische Erkenntnis. Der Bau neuer, spezialisierter Fabriken für die Photonik wäre immens teuer und langsam gewesen.

Die Nutzung bestehender, hochoptimierter CMOS-Fabs reduzierte die Eintrittsbarriere für die Massenproduktion drastisch. Diese Kompatibilität ermöglichte direkt die Kostenwirksamkeit und Skalierbarkeit, die für den Übergang der Siliziumphotonik von Labordemonstrationen zu Industrieprodukten erforderlich waren.

Sie erklärt auch, warum die Siliziumphotonik trotz Millers früherer konzeptioneller Arbeit erst dann wirklich Fahrt aufnahm, als diese Fertigungssynergie praktikabel wurde.

Sorefs Beitrag bestand somit nicht nur darin, woraus photonische Chips gebaut werden sollten, sondern auch wie sie **wirtschaftlich** für die Massenproduktion realisierbar gemacht werden konnten, was die Grundlage für das Wachstum der Industrie legte.

Von der Vision zur Realität: Der Aufschwung der Siliziumphotonik nach 2000

Trotz Sorefs Pionierarbeit Mitte der 1980er Jahre gab es fast zwei Jahrzehnte lang nur begrenzte Fortschritte in der Forschung zur Siliziumphotonik. Diese Verzögerung war hauptsächlich auf die erheblichen Fertigungsherausfor-

derungen zurückzuführen, die mit der Herstellung von Siliziumwellenleitern im erforderlichen Nanometerbereich verbunden waren. Die damaligen Fertigungstechnologien waren noch nicht in der Lage, diese Präzision kosteneffizient zu liefern.

Aufschwung durch Nanofabrikation und Industrieinteresse

Die Situation änderte sich dramatisch um das Jahr 2005. Schnelle Fortschritte in den Nanofabrikationstechnologien innerhalb der Mikroelektronikindustrie, wo die Strukturbreiten bereits in den frühen 2000er Jahren etwa 100 nm erreichten, überwand schließlich die Fertigungshürden für Silizium-Photonik-Bauelemente. Dies ermöglichte die präzise Herstellung der winzigen Abmessungen, die für Siliziumwellenleiter erforderlich sind.

Dieser technologische Durchbruch fiel mit einem intensiven Interesse und erheblichen Investitionen großer Industrieunternehmen wie Intel, IBM, Luxtera und Kotura zusammen. Diese Unternehmen erkannten das Potenzial der Siliziumphotonik, die wachsenden Anforderungen an Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung und -verarbeitung zu erfüllen.

Wichtige Demonstrationen (ab 2005)

Ab 2005 kam es zu entscheidenden Durchbrüchen bei Silizium-Photonik-Bauelementen. Im Jahr 2005 demonstrierte **Intel** einen Silizium-Mach-Zehnder-Modulator, der auf dem Freie-Ladungsträger-Plasma-Dispersions-Effekt basierte und eine Modulationsrate von 10 Gbit/s erreichte.

Gleichzeitig berichtete **Cornell** über einen Silizium-Mikroringmodulator, der Trägerinjektion über einen PN-Übergang nutzte.

Intel erzielte auch aufeinanderfolgende Fortschritte bei Raman-Lasern auf Silizium, die sowohl

im gepulsten als auch im kontinuierlichen Wellenbetrieb arbeiteten, was das Feld erheblich in Richtung Kommerzialisierung voranbrachte.

Die Entwicklung von Ge-Photodetektoren machte ebenfalls Fortschritte, mit Verbesserungen bei Geschwindigkeit, Empfindlichkeit und Dunkelstrom.

Evolution der Anwendungen

Siliziumbasierte Photonische Integrierte Schaltkreise (Si-PICs) haben sich in den letzten vier Jahrzehnten weiterentwickelt und die optische Kommunikation, Sensorik, das Training künstlicher Intelligenz und Quantentechnologien revolutioniert.

Die erfolgreiche Integration von On-Chip-Laserquellen stellte einen großen Durchbruch dar, der das volle Potenzial der Siliziumphotonik weiter erschloss. Das Feld hat eine "Konvergenz" von Mikro-, Nano- und Plasmaphotonik-Techniken erlebt, die immer kleinere Bauelemente und verbesserte Funktionalität vorantreibt.

Die weitreichende praktische Akzeptanz und der schnelle Fortschritt der Siliziumphotonik waren abhängig von der Reifung der Nanofabrikationstechnologien und erheblichen industriellen Investitionen, die etwa zwei Jahrzehnte nach den ersten konzeptionellen und materialspezifischen Vorschlägen stattfanden.

Der Aufschwung in der Siliziumphotonik ab Mitte der 2000er Jahre veranschaulicht ein häufiges Muster in der technologischen Innovation:

Eine bahnbrechende Erfindung (Sorefs Siliziumphotonik) geht oft einer langen Phase der Stagnation oder langsamen Fortschritts voraus, bis unterstützende Technologien (Nanofabrikation) reifen und die Marktnachfrage (Industrieinteresse) ausreichend stark wird.

Sorefs Arbeit stammt aus der Mitte der 1980er Jahre, doch bis 2005 gab es wenig Fortschritt. Der Hauptgrund hierfür waren die Fertigungsherausforderungen bei Siliziumwellenleiter-Dimensionen, die fortschrittliche Nanofabrikationsfähigkeiten

erforderten, die bis in die frühen 2000er Jahre nicht weit verbreitet oder kostengünstig waren.

Der Aufschwung in Forschung und Industrieinteresse (Intel, IBM usw.) folgte direkt auf die Fortschritte in der Nanofabrikation.

Dies zeigt, dass selbst eine brillante grundlegende Erfindung ein unterstützendes technologisches Ökosystem (z. B. Fertigungsfähigkeiten) und einen Marktanreiz (Industrienachfrage) benötigt, um wirklich zu florieren.

Die Erfindung des praktischen, skalierbaren photonischen Chips war daher ein kollaborativer und mehrstufiger Prozess, der nicht allein den ursprünglichen Konzeptualisierern zugeschrieben werden kann.

Die Tabelle 2 fasst die wichtigsten Meilensteine in der Entwicklung photonischer Chips zusammen, die den Übergang von der Vision zur Realität verdeutlichen:

Moderne Innovationen und Fortgesetzte Entwicklung

Heute transformieren photonische integrierte Schaltkreise (PICs) verschiedene Sektoren, darunter Hochgeschwindigkeitskommunikation, optisches Rechnen, KI-Training, Quantentechnologien, Sensorik und 3D-Bildgebung.

Ihre Fähigkeit, Kupferverdrahtungen in Schaltkreisen durch Licht zu ersetzen, ist entscheidend, um die Informationsübertragung zu beschleunigen und E/A-Engpässe zu reduzieren, insbesondere im Bereich des KI-Computings.

Fortschritte bei Integration und Materialien

Es wurden bedeutende Fortschritte bei der Integration verschiedener Materialien erzielt, wie z.B. III-V-Verbindungshalbleiter (für Laser) mit Silizium- und Siliziumnitrid (SiN)-PICs, was die Realisierung von Chip-integrierten Lasern ermöglichte. Siliziumnitrid wird aufgrund

seiner günstigen optischen Eigenschaften neben Silizium häufig verwendet.³ Der Trend zu dichteren On-Chip-Photonik-Netzwerken setzt sich fort, mit Bemühungen, den Platzbedarf der Bauelemente und den elektrischen Stromverbrauch zu reduzieren. Dies umfasst die Erforschung neuartiger CMOS-kompatibler photonischer Strukturen und die Nutzung von Techniken wie der Plasmonik.

Neue Anwendungen und Kommerzialisierung

Photonische Prozessoren führen Berechnungen mit Licht statt Elektronen durch und zeigen besonderes Potenzial für Matrixmultiplikationsoperationen, die für KI grundlegend sind.

Unternehmen wie **Lightelligence** haben optische Rechensysteme (z.B. PACE im Jahr 2021) demonstriert, die photonische und elektronische integrierte Chips zusammenführen und erhebliche Geschwindigkeitsvorteile bei bestimmten rechenintensiven KI-Anwendungen erzielen.

Drahtlose optische Kommunikation: Taara (Alphabet's X Moonshot Factory) stellte 2025 einen Silizium-Photonik-Chip für die drahtlose Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung mittels softwaregesteuerter Lichtstrahlen vor, wodurch traditionelle Glasfaserkabel überflüssig werden.

Fortgeschrittene Sensorik: PICs werden als umfassende Sensoren für Anwendungen wie die Erkennung von Anomalien im Blut (z. B. niedrige Glukosespiegel) und die Messung von Biometrie (z. B. Puls) entwickelt.

Wichtige Patente

Die kontinuierliche Innovation im Bereich der photonischen Chips spiegelt sich in umfangreichen Patentaktivitäten wider:

Kartik Srinivasan und seine Mitarbeiter am NIST halten Patente für fortschrittliche photonische Chipkomponenten, darunter Chips mit Barcode-Endflächen, nanophotonische optische para-

metrische Oszillatoren und Methoden für Tantal-integrierte nichtlineare Photonik.

Die jüngsten Innovationen von **Taara** sind durch Patente geschützt, die Erfinder wie Baris Erkmen, Devin Brinkley, Eric "Astro" Teller, Thomas Moore, Jean-Laurent Plateau, Paul Epp und John Moody nennen.

Unternehmen wie **OpenLight Photonics** verfügen über umfangreiche Patentportfolios (über 360 Patente seit 2010), die modulare, skalierbare Silizium-Photonik-Technologie abdecken, einschließlich detaillierter Designs aktiver Halbleiterkomponenten und heterogener Integration.

Bewältigung von Herausforderungen

Die Verlagerung hin zu optischen Verbindungen und optischem Rechnen, die durch die Grenzen elektronischer Chips angetrieben wird, positioniert die Siliziumphotonik als strategisch entscheidende Technologie für zukünftige Hochleistungsrechen- und KI-Infrastrukturen.

Elektronische Chips stoßen an physikalische Grenzen, was die Suche nach Alternativen vorantreibt. Photonische Chips eignen sich besonders gut für Matrixmultiplikationen, die für KI grundlegend sind. Es gibt einen klaren Trend zur Integration photonischer Komponenten in KI-Beschleuniger und Rechenzentrumsverbindungen.

Unternehmen wie Lightelligence und Taara bringen kommerzielle Produkte auf dieser Basis auf den Markt. Die Erfindung des photonischen Chips ist also kein historisches Artefakt, sondern ein fortlaufender, dynamischer Prozess der Problemlösung und Optimierung für neue Rechenparadigmen.

Die Zukunft des Computings, insbesondere der KI, wird zunehmend auf diesen lichtbasierten Lösungen basieren, was die Technologie zu einem Schlüsselbereich des strategischen Wettbewerbs macht. Der kontinuierliche Fluss von Patenten unterstreicht diese fortlaufende Innovation.

Referenzen

1. What is Integrated Photonics — AIM Photonics, Zugriff am August 4, 2025, <https://www.aimphotonics.com/what-is-integrated-photonics>
2. Timeline of key demonstrations of integrated quantum photonics. Thees... - ResearchGate, https://www.researchgate.net/figure/Timeline-of-key-demonstrations-of-integrated-quantum-photonics-Thees-technologies_fig4_378123375
3. Photonic Integrated Circuits | Speed, Bandwidth & Optical Design - McKinsey Electronics, <https://www.mckinsey-electronics.com/post/the-evolution-of-photonic-integrated-circuits-pics-are-we-ready-for-an-optical-semiconductor-futu>
4. INTEGRATED OPTICS: TECHNOLOGY, DEVICES AND <https://pp.bme.hu/ch/article/download/2723/1828/6481>
5. Scientists clear major roadblocks in mission to build powerful AI photonic chips, <https://www.livescience.com/technology/computing/scientists-clear-major-roadblocks-in-mission-to-build-powerful-ai-photonic-chips>
6. Strategic Insights into Integrated Photonics: Core Concepts ... - MDPI, <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/14/6365>
7. New computer chips do math with light - Science News, <https://www.sciencenews.org/article/computer-chips-math-light-photonic>
8. Integrated optics - AIP Publishing, https://pubs.aip.org/physicstoday/article-pdf/29/5/48/7446448/48_1_online.pdf
9. Light People: Professor Xianfeng Chen spoke about integrated photonics - PubMed, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35821200/>
10. Richard A. Soref: On pioneering silicon photonics - SPIE, Zugriff am August 4, 2025, <https://spie.org/news/photonics-focus/marchapril-2025/pioneering-silicon-photonics>
11. History and Current Status | Passive Silicon Photonic, <https://pubs.aip.org/books/monograph/51/chapter/20660965/History-and-Current-Status>
12. Controlling Light: Is Silicon Photonics an Emerging Front in U.S.-China Tech Competition?, <https://www.csis.org/analysis/controlling-light-silicon-photonics-emerging-front-us-china-tech-competition>
13. 40 Gbit/s silicon optical modulator for high-speed applications, <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaror.html?task=detalhes&id=W2062375619>
14. Richard A. Soref - Google Scholar, <https://scholar.google.fr/citations?user=IoPkLrYAAAJ&hl=th>
15. The evolution of PIC bandwidth, power efficiency, and total power consumption., https://www.researchgate.net/figure/The-evolution-of-PIC-bandwidth-power-efficiency-and-total-power-consumption_fig2_352027804
16. Silicon photonics technology: Past, present and future - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/228346852_Silicon_photonics_technology_Past_present_and_future
17. OpenLight Patent Portfolio, <https://openlightphotonics.com/openlight-patent-portfolio>
18. Connected by light: The patents behind Taara's photonic chip - Parola Analytics, <https://parolaanalytics.com/blog/taara-chip-patents/>
19. Patents | NIST, <https://www.nist.gov/patents/inventors/1156666>
20. First Demonstration of Monolithic Silicon Photonic Integrated Circuit 32×32 Thin-CLOS AWGR for All-to-All Interconnections | Request PDF - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/356452496_First_Demonstration_of_Monolithic_Silicon_Photonic_Integrated_Circuit_3232_Thin-CLOS_AWGR_for_All-to-All_Interconnections
21. Patents Assigned to Photonic Inc., <https://patents.justia.com/assignee/photonic-inc?page=10>

Photonische Chips aus den USA

Insgesamt sind die USA führend bei der Entwicklung und (Groß-)Serienfertigung Photonischer Chips - und bauen diese Position aktuell mit erheblichen Investitionen weiter aus...

Photonische Chips werden in den USA entwickelt und hergestellt, insbesondere angetrieben durch Programme wie den **Chips and Science Act** und die Bestrebungen zur Reindustrialisierung und Unabhängigkeit von internationalen Lieferketten.

Ein wesentliches Innovationsfeld ist hierbei die **Silizium-Photonik**, bei der optische Bauteile wie Laserdioden und Wellenleiter direkt in **Mikrochips aus Silizium** integriert werden, was den Grundstein für einen rasant wachsenden US-Wachstumsmarkt legt.

Engagierte US-Unternehmen

Mehrere große US-Technologieunternehmen sind in der Entwicklung und Produktion photonischer Chips aktiv, darunter:

- Intel,
- Cisco Systems,
- Marvell Technology,
- Broadcom
- und Infinera.

Zum Beispiel hat Intel schon 2023 eine neue Generation Photonischer Chips für leistungsfähigere Rechenzentren vorgestellt.

Der US-Markt für photonische Chips ist **sehr wachstumsstark**: Analysten gehen von einem jährlichen Zuwachs von rund 25 Prozent bis 2030 aus.

Auch auf Infrastrukturebene investiert die USA: Das Unternehmen GlobalFoundries eröffnete Anfang 2025 in New York ein neues **Advanced Packaging and Photonics Center**, das Chipentwicklung und -tests für photonische Bauteile mit fortschrittlichen Verpackungstechnologien vereint, um die heimische Produktion photonischer (und anderer) Halbleiter zu stärken.

Konkurrenz für die USA kommt vor allem aus Europa und Asien. Während Unternehmen wie das deutsche Startup **Q.ant** gerade mit eigenen Fertigungslinien am Markt für photonische KI-Prozessoren auftreten, versuchen die USA, durch heimische Fertigung die technologische Vorherrschaft in der Photonik zu behaupten.

Markttrend

Photonic Chips gelten als Schlüsseltechnologie für KI, Quantencomputing und Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung – wegen ihrer hohen Effizienz und Geschwindigkeit.

Staatliche Förderung

Der **Chips and Science Act** bietet Subventionen und Forschungsanreize für Halbleiter und Photonik.

Photonische Chips aus dem MIT

Das Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt derzeit Photonische Chips, also Prozessoren, die KI-Berechnungen nicht elektronisch, sondern größtenteils mit Licht durchführen.

Im Vergleich mit klassischen Chips verspricht diese Technologie deutlich schnellere und gleichzeitig energieeffizientere Trainings- und Inferenzvorgänge für, zum Beispiel, Neuronale Netze.

Kernpunkte der MIT-Entwicklung:

Licht statt Elektronen: **Photonische Chips** verarbeiten Informationen mit Lichtwellen und nicht über Strom (Elektronen). Matrixmultiplikationen, essentiell für KI, werden mittels Nano-Wellenleitern und optischen Interferenzbausteinen realisiert und können somit sehr viele Berechnungen gleichzeitig durchführen.

- **Leistung:** Der aktuelle MIT-Prototyp absolviert die für Deep-Learning notwendigen Kernoperationen in weniger als einer halben Nanosekunde, bei einer Genauigkeit von 92–96 % – vergleichbar mit modernen GPUs, aber mit enorm niedrigerem Energieverbrauch und praktisch ohne Wärmeentwicklung.
- **Kompatibilität:** Die Chips sind mit heutigen CMOS-Prozessen kompatibel und deshalb theoretisch für eine industrielle Skalierung bereit.
- **Einsatzgebiete:** Besonders profitieren Anwendungen, bei denen extrem niedrige Latenz und Energieeffizienz zählen, zum Beispiel 6G-Netzwerke, autonome Systeme, Medizingeräte und wissenschaftliche Simulationen. Sogenannte **Edge-Anwendungen** – also intelligente Verarbeitung direkt am Gerät – werden gezielt adressiert.

- **Kooperation:** MIT arbeitet mit Halbleiterherstellern wie **GlobalFoundries** zusammen, um die Forschung in der Siliziumphotonik für KI-Anwendungen industriell nutzbar zu machen.

Technische Besonderheiten

Die Photonic-Chips bestehen oft aus mehreren Schichten, in denen sowohl lineare als auch nichtlineare optische Funktionen ausgeführt werden. Eine besondere Rolle spielen sogenannte “nonlinear optical function units” (NOFUs), die optische Signale mit minimalem elektrischem Aufwand in die gewünschte Form überführen.

Speicher und komplexere Steuerungslogik verbleiben vorerst oft noch im elektronischen Bereich, aber mittelfristig ist angedacht, auch Photonen-basierten Speicher direkt auf dem Chip zu integrieren.

Forschungsaussichten und Vision:

Die neuesten Chips können Aufgaben in Echtzeit erledigen und ermöglichen bisher undenkbare Anwendungen – etwa die Ausführung großer Sprachmodelle direkt am Edge-Device, ohne Cloud- oder Serverabhängigkeit.

Ziel der Forschung ist es, digitale Engpässe vollständig zu überwinden. Denkbar sind damit völlig neue Formen von KI, etwa für kontinuierliches Lernen direkt vor Ort – alles “at the speed of light”.

Diese Arbeiten machen MIT derzeit zu einem der **weltweit führenden Institute** in der Erforschung und Entwicklung photonischer KI-Hardware.

Fortsetzung dieser Thematik in der nächsten KI-Newsletter, Nr. 17

John von Neumanns Einfluss auf die Wissenschaft ist kaum zu überschätzen. Er gilt als Begründer der Informatik, Mitbegründer der Spieltheorie, und seine mathematischen Methoden durchdringen heute praktisch alle Bereiche der Wissenschaft. Die von ihm entwickelten Konzepte bilden die Grundlage für Computer, Künstliche Intelligenz und moderne Wirtschaftstheorie.



John von Neumann – Ein mathematisches Genie



Von Neumanns Einfluss auf die Wissenschaft ist kaum zu überschätzen. Er gilt als Begründer der Informatik, Mitbegründer der Spieltheorie, und seine mathematischen Methoden durchdringen heute praktisch alle Bereiche der Wissenschaft. Die von ihm entwickelten Konzepte bilden die Grundlage für Computer, Künstliche Intelligenz und moderne Wirtschaftstheorie.

Er leistete bedeutende Beiträge zur mathematischen Logik, Funktionalanalysis, Quantenmechanik und Spieltheorie und gilt als einer der Väter der Informatik.

Später veröffentlichte er als *Johann von Neumann*; heutzutage ist er vor allem unter seinem in den USA gewählten Namen *John von Neumann*

Johann von Neumann wurde 1903 in Budapest als **János Lajos Neumann** geboren. Seine Familie gehörte zur wohlhabenden jüdischen Oberschicht Ungarns – sein Vater Max Neumann war ein erfolgreicher Bankier, der 1913 geadelt wurde, wodurch die Familie den Zusatz “von” erhielt.

Persönlichkeit und Arbeitsweise

Von Neumann war berühmt für sein phänomenales Gedächtnis und seine Fähigkeit, komplexe Berechnungen im Kopf durchzuführen.

Kollegen berichteten, dass er ganze Bücher nach einmaligem Lesen wörtlich wiedergeben konnte. Er arbeitete oft an mehreren Problemen gleichzeitig und konnte auch in lauter Umgebung konzentriert arbeiten. ● ● ●

bekannt. Seine Arbeiten zeigen eine einzigartige Verbindung zwischen reiner Mathematik und praktischen Anwendungen – ein Charakteristikum, das ihn von vielen seiner Zeitgenossen unterschied und ihn zu einem der einflussreichsten Wissenschaftler des 20. Jahrhunderts machte...

Von Neumann (1903 – 1957) zeigte bereits als Kind eine ungewöhnliche mathematische Begabung. Mit sechs Jahren konnte er bereits achtstellige Zahlen im Kopf dividieren und unterhielt sich mit seinem Vater auf Altgriechisch. Seine Eltern erkannten sein Talent früh und stellten ihm Privatlehrer zur Seite. Mit acht Jahren beherrschte er bereits die Differential- und Integralrechnung.

Am Gymnasium in Budapest war er Klassenkamerad des späteren Nobelpreisträgers Eugene Wigner. Sein Mathematiklehrer László Rátz erkannte von Neumanns außergewöhnliche Fähigkeiten und vermittelte ihm Kontakt zu Gábor Szegő, der ihm Privatunterricht gab.

John von Neumann, der in Kurzform in Ungarn Jancsi genannt wurde, hatte noch zwei jüngere Brüder, den 1907 geborenen Mihály und den 1911 geborenen Miklós.

Schon als Kind zeigte John Neumann jene überdurchschnittliche Intelligenz, die später selbst Nobelpreisträger – zum Beispiel Eugene Paul Wigner – zum Staunen brachte.

Als Sechsjähriger konnte er wie Rechenkünstler mit hoher Geschwindigkeit achtstellige Zahlen im Kopf dividieren. Er besaß ein außergewöhnliches Gedächtnis, das ihm beispielsweise erlaubte, den Inhalt einer Buchseite nach einem kurzen Blick darauf präzise wiederzugeben.

Später konnte er ganze Bücher wie Goethes *Faust* auswendig und so zum Beispiel auch durch detailliertes historisches Wissen glänzen. Er besuchte in Budapest das humanistische deutschsprachige Lutheraner-Gymnasium und schloss, wie auch gleichzeitig **Eugene Paul Wigner**, 1921 mit dem Abitur ab.



John von Neumanns Vater, der königlich ungarische Regierungsrat **Max Neumann**, wurde 1913 in den ungarischen Adelsstand erhoben und erhielt den Adelsnamen **Margittai Neumann**, wobei Margittai im Ungarischen für „von Margitta“ steht. (John von Neumann trug danach auch den Namenszusatz von Margitta.)

Die Familie war jüdisch. Der Vater war Anwalt und Direktor einer der größten ungarischen Banken, der **Magyar Jelzáloghitel Bank** (Ungarische Hypothekenbank). Der Vater behielt sein Bekenntnis auch bei, als er eine Karriere im österreichisch-ungarischen Kaiserreich verfolgte, befolgte aber die jüdischen religiösen Regeln nicht streng.

Die Familie Neumann hatte französische Gouvernanten. Die Mutter Margit kam aus einer gutsituierten Familie, ihr Vater Jakab Kann kam aus einfachen Verhältnissen, machte aber ein Vermögen im Handel mit landwirtschaftlichen Geräten. • • •

Die politische Situation in Ungarn war damals sehr unsicher, da auf das Regime der Räterepublik von Béla Kun, in denen die von Neumanns als Kapitalisten von Verfolgung bedroht waren, 1919 das reaktionäre antisemitische Regime von Miklós Horthy folgte.

Schon als Gymnasiast glänzte Johann von Neumann durch mathematische Leistungen und veröffentlichte mit seinem Lehrer Michael Fekete seinen ersten mathematischen Artikel, den er konzipierte, als er noch nicht ganz 18 Jahre alt war.

Studium und akademische Laufbahn

Von Neumann studierte gleichzeitig Mathematik an der Universität Budapest und Chemieingenieurwesen an der ETH Zürich – ein Kompromiss mit seinem Vater, der eine praktische Ausbildung wünschte. 1926 promovierte er in Mathematik in Budapest mit einer Arbeit über Mengenlehre.

Dem Wunsch seiner Eltern folgend, studierte er zunächst von 1921 bis 1923 Chemieingenieurwesen in Berlin und dann bis zu seinem Diplom 1926 an der ETH Zürich.

Gleichzeitig war er an der Universität Budapest eingeschrieben, absolvierte dort aber nur die Examina und promovierte dort 1926 mit einer Dissertation über axiomatische Mengenlehre.

Sein eigentliches Interesse galt immer der Mathematik, der er sich gewissermaßen als „Hobby“ widmete. Er besuchte Mathematikurse in Berlin und die von Hermann Weyl und George Pólya an der ETH Zürich und machte schon bald auf sich aufmerksam.

1926/27 studierte er in Göttingen bei David Hilbert, hörte Vorlesungen über mathematische Grundlagen der Quantenmechanik bei Hilbert und besuchte das Seminar von Max Born.

Noch 1927 erfolgten erste Veröffentlichungen auf diesem Gebiet. 1927 habilitierte er sich in Berlin mit zwei Arbeiten, einer über die axiomatischen

Grundlagen der Mengenlehre und einer über Funktionalanalysis.

Von Neumann war von 1928 bis 1933 (jüngster) Privatdozent der Berliner Universität und im Sommersemester 1929 Privatdozent an der Universität Hamburg.

Nach Stationen in Berlin und Hamburg ging er 1930 in die USA, zunächst als Gastdozent in **Princeton**, dann als einer der ersten Professoren am neu gegründeten **Institute for Advanced Study** (1933), wo er bis zu seinem Tod blieb.

Mathematische Revolutionen

Mengenlehre und Grundlagen der Mathematik: Von Neumann löste wichtige Paradoxien in der Mengenlehre und entwickelte eine axiomatische Mengenlehre, die heute als *von-Neumann-Bernays-Gödel-Mengenlehre* bekannt ist.

- Funktionalanalysis: Neumann legte die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik und entwickelte die Theorie der Operatoralgebren, die heute als von-Neumann-Algebren bezeichnet werden.
- Spieltheorie: Zusammen mit dem Ökonomen Oskar Morgenstern schrieb er 1944 das bahnbrechende Werk *Theory of Games and Economic Behavior*, das die Spieltheorie begründete und später Anwendungen in Wirtschaft, Politik und Biologie fand.
- Ergodische Theorie: Seine Arbeiten zur Ergodentheorie revolutionierten die statistische Mechanik und die Wahrscheinlichkeitstheorie.

Beiträge zur Quantenmechanik

Von Neumann formalisierte die Quantenmechanik mathematisch streng und löste damit die konzeptionellen Probleme der frühen Quantentheorie.

Sein 1932 erschienenes Buch *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* gilt als Stan-

dardwerk. Er bewies wichtige Theoreme über die Unmöglichkeit verborgener Variablen in der Quantenmechanik und entwickelte die mathematische Beschreibung der Quantenmessung. Mehr dazu: [\(Seite 29\)](#)

Arbeiten zur Selbstreproduktion

Von Neumann beschäftigte sich auch mit *selbstreplizierenden Automaten* und entwickelte theoretische Modelle für Maschinen, die sich selbst reproduzieren können.

Diese Arbeiten legten Grundlagen für die spätere Entwicklung der Nanotechnologie und des Verständnisses biologischer Reproduktion.

1953 entwickelte er die Theorie der selbstreplizierenden Automaten, bzw. der Selbstreplikation, für die er ein kompliziertes Beispiel angab.

Heute ergeben sich viel einfachere aus der *Theorie der zellulären Automaten* (zum Beispiel John Horton Conways *Spiel des Lebens*). Ideen dafür soll er auch beim Spielen mit einem Bauklötzchen-Spiel (Tinkertoy) ausprobiert haben.

Science-Fiction-Autoren stellten sich die Besiedlung unserer Galaxie mit solchen Automaten vor und prägten dafür den Namen *Von-Neumann-Sonden*.

Von Neumanns zellulare Automaten bilden eine wichtige Grundlage für die Forschungsdisziplin *Artificial life* und ermöglicht die Simulation biologischer Organisation, Selbstreproduktion und Evolution von Komplexität.

Wettervorhersage und Fluiddynamik

Von Neumann erkannte früh das Potential von Computern für die Wettervorhersage und entwickelte numerische Methoden zur Lösung der Gleichungen der Atmosphärendynamik. Seine Arbeiten zur Fluiddynamik, insbesondere zu Schockwellen und Turbulenz, waren wegweisend.

Politische und militärische Beratung

Nach dem Krieg war von Neumann ein einflussreicher Berater der US-Regierung in Fragen der Atomwaffen und der Computertechnologie. Er unterstützte die Entwicklung der **Wasserstoffbombe** und war Mitglied der Atomic Energy Commission.

Sein Vermächtnis

Trotz seiner intellektuellen Strenge war von Neumann gesellig und gastfreundlich. Er liebte Partys, Witze und historische Anekdoten. Seine Ehen mit Mariette Kövesi (1930 – 1937) und Klara Dan (1938 – 1957) spiegelten seine Verbindung zur ungarischen Oberschicht wider.

1955 wurde bei von Neumann Knochenkrebs diagnostiziert, möglicherweise verursacht durch Strahlenexposition bei Atomtests. Von Neumann starb nach einem qualvollen Krebsleiden, das möglicherweise durch seine Teilnahme an Nuklear-tests verursacht worden war, im Washingtoner Walter-Reed-Militärkrankenhaus.

Ein Soldat hielt vor dem Zimmer Wache, damit er im Delirium – der Krebs griff am Ende auch sein Gehirn an – keine Staatsgeheimnisse preisgab. Noch auf dem Totenbett schrieb er an seinem Buch *Die Rechenmaschine und das Gehirn*, in dem er den Besonderheiten des „Computers“ im menschlichen Kopf nachging.

Zuletzt bekannte er sich erneut zum katholischen Glauben und pflegte am Ende seines Lebens einen intensiven Gedankenaustausch mit einem Priester.

Er starb im Februar 1957, nur 53 Jahre alt. Er ist auf dem Princeton Cemetery in Princeton begraben, neben seiner Mutter, seiner zweiten Ehefrau Klára (die 1963 im Meer ertrank, wahrscheinlich ein Suizid) und Karl Dán, dem Vater von Klára, der 1939 nach Übersiedlung aus Ungarn in die USA Suizid beging. • • •

Schriften

Collected works. Pergamon Press, ab 1961

Brody, Vamos (Hrsg.): The von Neumann compendium. World Scientific (Reprint von wichtigen Aufsätzen von Neumanns)

The computer and the brain (Silliman Lectures). Yale University Press, 2000 (deutsch *Der Computer und das Gehirn*, 1958)

The mathematician. In: Heywood (Hrsg.): The works of the mind. 1948.

Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. 2. Auflage. Springer Verlag, 1996.

Theory of games and economic behavior, zusammen mit Oskar Morgenstern. Princeton Univ. Press, 1944, Theory of games and economic behavior. (PDF; 57 MB). Deutsche Übersetzung: Spieltheorie und wirtschaftliches Verhalten.

Einige Aufsätze und Bücher online:

Eine Axiomatisierung der Mengenlehre. In: Journal für die reine und angewandte Mathematik. Band 154, 1925, S. 219–240.

Die Axiomatisierung der Mengenlehre, Mathematische Zeitschrift, Band 27, 1928 (entspricht größtenteils der Dissertation, Der axiomatische Aufbau der allg. Mengenlehre, Budapest 1925)

Über eine Widerspruchsfreiheitsfrage in der axiomatischen Mengenlehre In: Journal für die reine und angewandte Mathematik. Band 160, 1929.

Zur Hilbertschen Beweistheorie, Mathematische Zeitschrift, Band 26, 1927, S. 1–46.

Zur Theorie der Gesellschaftsspiele. In: Mathematische Annalen. Band 100, 1928, S. 295–320.

Mathematische Begründung der Quantenmechanik. In: Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, 1927.

Thermodynamik quantenmechanischer Gesamtheiten. In: Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, 1927.

Wahrscheinlichkeitstheoretischer Aufbau der Quantenmechanik, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, 1927, S. 245–272.

mit David Hilbert, Lothar Nordheim: Über die Grundlagen der Quantenmechanik, Mathematische Annalen, Band 98, 1927.



Über die Definition der transfiniten Induktion und verwandte Fragen der allgemeinen Mengenlehre, Mathematische Annalen, Band 99, 1928, S. 373–391.

Die Eindeutigkeit der Schrödingerschen Operatoren. In: Mathematische Annalen. Band 104, 1931, S. 570–578.

Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Berlin 1932

Allgemeine Eigenwerttheorie hermitescher Funktionaloperatoren. In: Mathematische Annalen. Band 102, 1930, S. 49–131.

Zur Algebra der Funktionaloperatoren und Theorie der normalen Operatoren. In: Mathematische Annalen. Band 102, 1930, S. 370–427.

First Draft of a Report on the EDVAC. (Archivversion) (PDF; 411 kB) 1945 (englisch)

mit Burks, Goldstine. Preliminary discussion of the logical design of an electronic computing instrument, US Army Ordnance Department Report 1946.

Einige der in Los Alamos entstandene Arbeiten von Neumann (zum Beispiel über Schockwellen, Detonationswellen) sind bei der Federation of American Scientists online verfügbar.

Einige weitere Arbeiten, zum Beispiel zu kontinuierlichen Geometrien, Operatorenringen oder zur Ergodentheorie sind bei der National Academy of Sciences online verfügbar. ☺

Von Neumanns Arbeiten zur Quantenmechanik

Von Neumann war Verfasser des ersten umfassenden mathematisch durchdachten Buches zur Quantenmechanik, das 1932 als „Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik**“ bei Julius Springer in Berlin erschien.**

Hierin behandelte er den Messprozess und die Thermodynamik der Quantenmechanik. Das damals heiße Thema der sich stürmisch entwickelnden Quantenmechanik war auch der Hauptgrund, warum er sich der Funktionalanalysis zuwandte und die *Theorie linearer Operatoren in Hilberträumen* entwickelte.

Die Mathematiker in Göttingen wandten gegen die Quantenmechanik ein, dass mit den bis dahin untersuchten linearen beschränkten Operatoren die kanonischen Vertauschungsrelationen nicht zu erfüllen waren. Von Neumann klärte das und lieferte gleichzeitig weitere Beiträge zu diesem Gebiet.

Als man später Werner Heisenberg fragte, ob er von Neumann deswegen nicht dankbar sei, stellte er nur die Gegenfrage, wo denn der Unterschied zwischen beschränkt und unbeschränkt liege.

Von Neumanns Buch über Quantenmechanik genoss einen derartigen Ruf, dass selbst sein vermeintlicher Beweis der Unmöglichkeit von Hidden-Variable-Theorien, der für sich genommen zwar korrekt war, aber von falschen Voraussetzungen ausging, lange nicht hinterfragt wurde.

Die Physiker bevorzugten jedoch zu von Neumanns Leidwesen die fast gleichzeitig veröffentlichten *Principles of Quantum mechanics* von Paul Dirac, in der das angesprochene mathematische Problem durch Einführung von Distributio-

nen umgangen wurde, die unter den Mathematikern zunächst verpönt waren, ehe sie auch in ihren Kreisen Ende der 1940er Jahre ihren Siegeszug antraten.

Mit Eugene Wigner veröffentlichte von Neumann 1928/29 Arbeiten über die Anwendung der Gruppentheorie in den Atomspektren. Auch hier war die Begeisterung der Physiker gedämpft, es wurde von „Gruppenpest“ gesprochen, die sich von Seiten der Mathematiker in der Quantenmechanik breitzumachen versuchte.

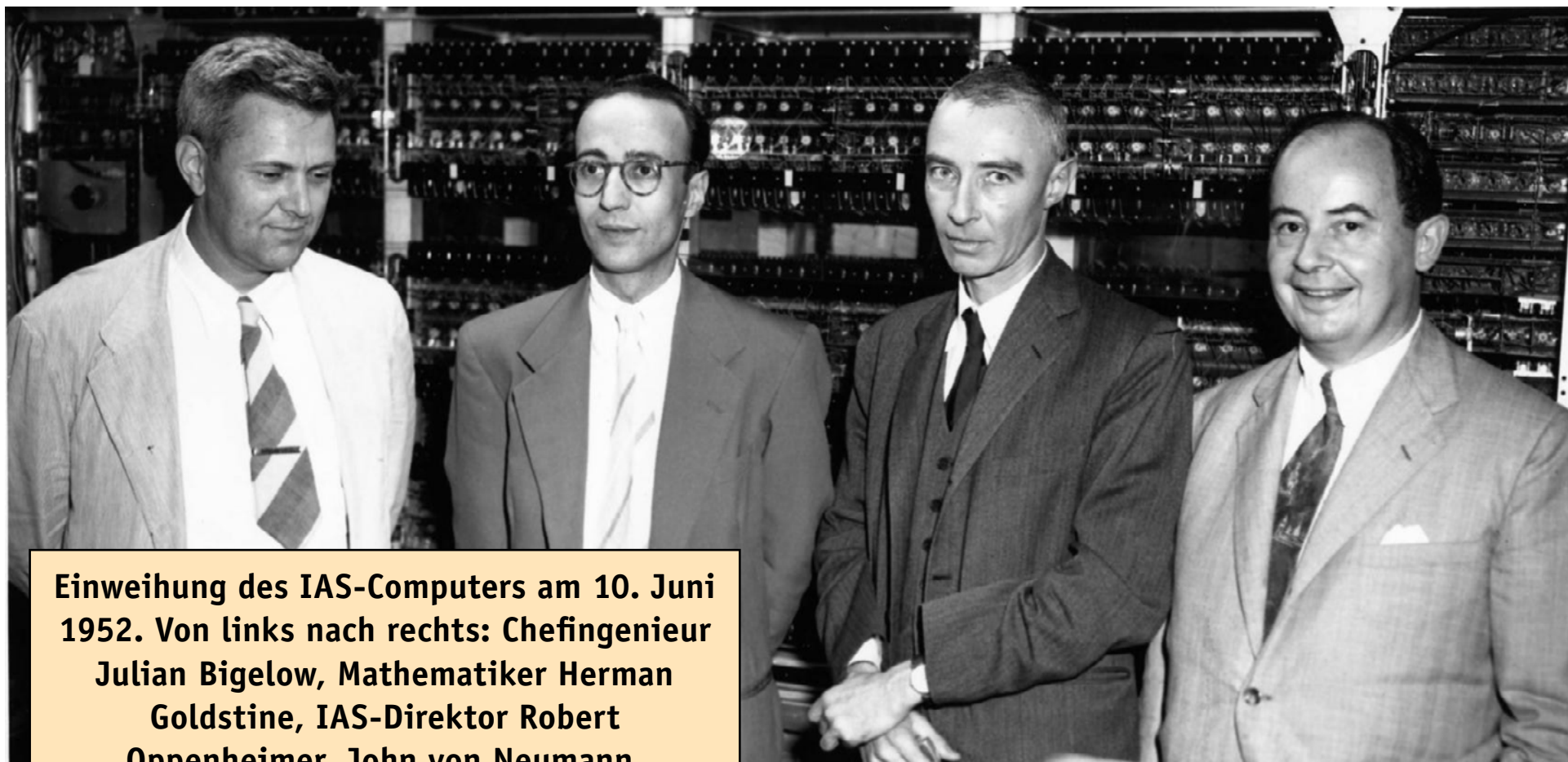
Das **Stone-von-Neumann-Theorem** drückt die Eindeutigkeit der kanonischen Kommutatoren von zum Beispiel Orts- und Impulsoperatoren in der Quantenmechanik aus und zeigt die Äquivalenz von deren beiden grundlegenden Formulierungen von Schrödinger (Wellenfunktion) und Heisenberg (Matrizen).

Seine Arbeiten über Quantenmechanik begründeten seinen Ruf in Amerika. In Deutschland war der Wettbewerb um Professorenstellen hart und John von Neumann hatte sich nach dem Tod des Vaters 1929 als Ältester um seine Familie zu kümmern.

Im Herbst 1929 wurde er von Oswald Veblen eingeladen, an die Princeton University in New Jersey zu kommen und Vorträge darüber zu halten, und er wechselte auch in den folgenden Jahren zwischen Princeton und Deutschland.

Ab 1933 wirkte er am neu gegründeten, anspruchsvollen *Institute for Advanced Study* in Princeton als Professor für Mathematik. Unter seinen Kollegen dort waren Albert Einstein und Hermann Weyl. Wie diese emigrierte auch von Neumann nach der Machtergreifung Hitlers dauerhaft in die USA. 🐣

John von Neumanns Computer



Einweihung des IAS-Computers am 10. Juni 1952. Von links nach rechts: Chefsingenieur Julian Bigelow, Mathematiker Herman Goldstine, IAS-Direktor Robert Oppenheimer, John von Neumann.

John von Neumann erdachte im Jahr 1945 die nach ihm benannte Computerarchitektur, und schuf damit einen einflussreichen Computer, den IAS-Computer...

Während des Zweiten Weltkriegs arbeitete von Neumann am **Manhattan-Projekt**¹ und erkannte die Notwendigkeit schnel-

ler Berechnungen für komplexe physikalische Probleme. Dies führte ihn zur Computerentwicklung.

Im Jahr 1945 begann John von Neumann im *Institute for Advanced Study (IAS)* im amerikanischen Princeton mit der Entwicklung des *IAS-Computers*.

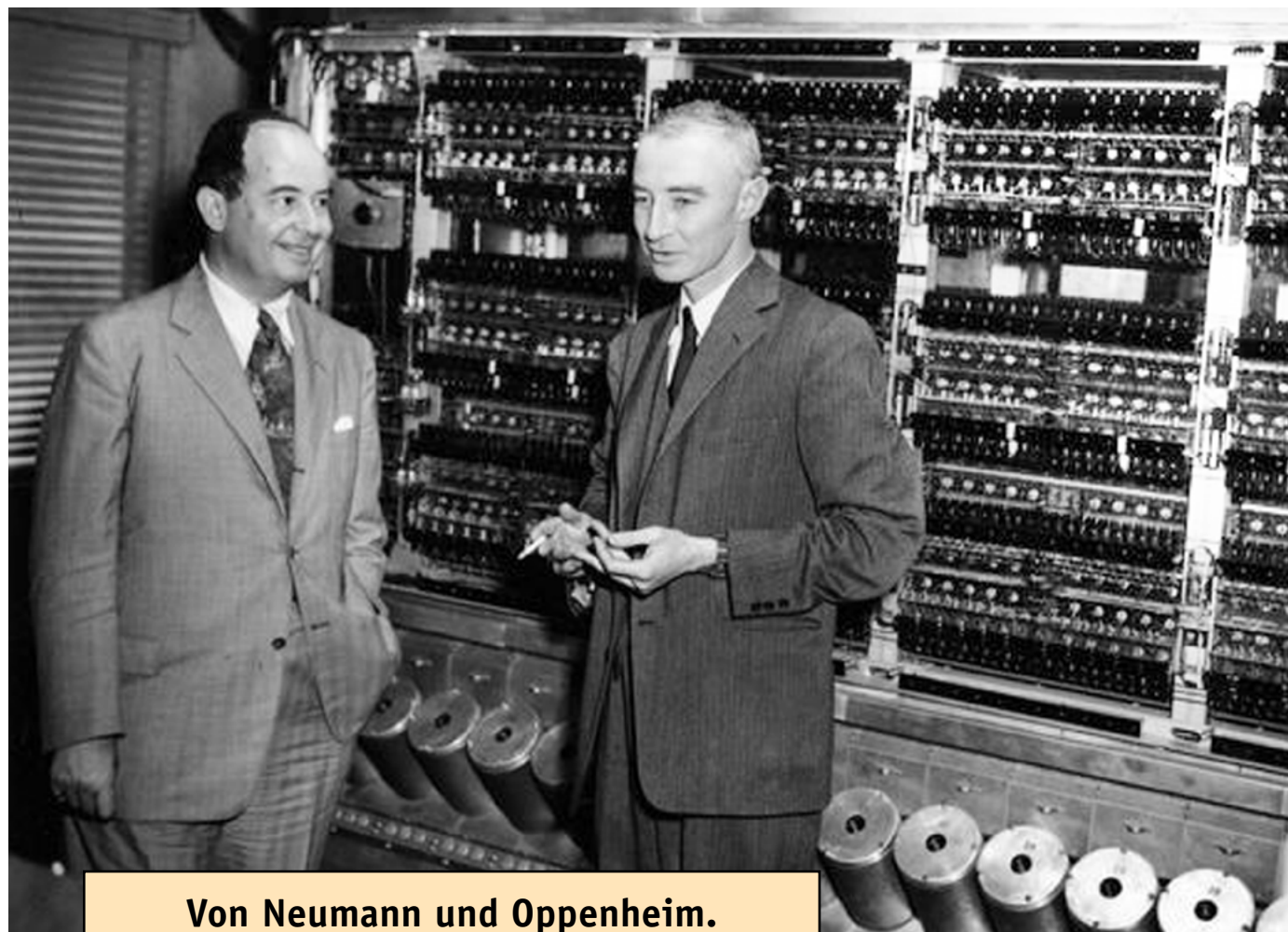
- 1951 rechnete er die ersten Programme,
- am 10. Juni 1952 nahm er den regulären Betrieb auf.
- Blieb bis 1958 in Betrieb.
- 1960 kam er in ein Museum.

¹ Das Manhattan-Projekt war ein militärisches Forschungsprojekt, in dem ab 1942 alle Tätigkeiten der Vereinigten Staaten während des II. Weltkrieges zur Entwicklung und zum Bau einer Atombombe – also der militärischen Nutzbarmachung der 1938 von Otto Hahn und Fritz Straßmann entdeckten Kernspaltung – unter der militärischen Leitung von General Leslie R. Groves ausgeführt wurden. Die Forschungsarbeiten im Rahmen des Manhattan-Projekts wurden von dem Physiker J. Robert Oppenheimer geleitet. Mehr als 150.000 Menschen arbeiteten unter höchster Geheimhaltung direkt oder indirekt für das Projekt. Bis Ende 1945 beliefen sich die Kosten auf 1,9 Mrd. US-Dollar.

John von Neumann war einer der Großen der Informatik. Sein Büro befand sich nahe der Universität Princeton im *Institute for Advanced Study (IAS)*. Im Juni 1945 erschien sein *First Draft of a Report on the EDVAC*.

Dieser Entwurf beschrieb einen Rechner mit Ein- und Ausgabe, Rechen- und Leitwerk sowie einem Speicher für Daten und Programme – kurz, mit einer **Von-Neumann-Architektur**.

1945 ging das erste Elektronenhirn ENIAC in Philadelphia der Vollendung entgegen. Von Neu-



Von Neumann und Oppenheim.
Zylinder für die Speicherröhren im
unteren Teil des Rechners; jede Röhre
fasste 1.024 Bit. (Foto: National
Museum of American History,
Smithsonian Institution)

mann überlegte, wie man die neue Technik am besten weiterführen könnte, und er beschloss, selbst aktiv zu werden.

Im November 1945 brachte er ein Projekt des *IAS* für einen weiteren Elektronenrechner auf den Weg. An dessen Finanzierung beteiligten sich

- die US-Streitkräfte,
- die Atomenergie-Kommission
- der Radio- und TV-Geräte-Hersteller RCA.

John von Neumann schätzte die Gesamtkosten auf 300.000 Dollar.

Die Projektarbeit begann am 1. Januar 1946 im Keller der *Fuld Hall* (das Hauptgebäude des IAS); später bezogen die Mitarbeiter freundlichere Räume.

An der Spitze des Unternehmens stand John von Neumann; die Nummer Zwei war der Mathematiker **Herman Goldstine**. Er hatte vorher bereits an der Entwicklung des ENIAC mitgewirkt.

Chefingenieur wurde der gleichaltrige Julian Bigelow. Weitere wichtige Mitarbeiter waren der

Ingenieur James Pomerene, der Physiker Ralph Slutz und der Mathematiker Arthur Burks.

In den nächsten Jahren wuchs die IAS-Maschine auf eine Breite und Höhe von drei Metern heran; das Gewicht betrug eine halbe Tonne.

Im Inneren steckten 1.700 Elektronen- und vierzig Fernsehröhren: sie dienten als Datenspeicher. Zur Verfügung standen 1.024 Worte von vierzig Bit, umgerechnet 5,1

Kilobyte; ein Wort nahm – man denke an die Von-Neumann-Architektur – eine Zahl oder zwei Befehle auf.

Der IAS-Computer arbeitete asynchron; die Anweisungen des Programms wurden einfach nacheinander ausgeführt. Eine Addition dauerte 62 Mikrosekunden, eine Multiplikation 713 Mikrosekunden.

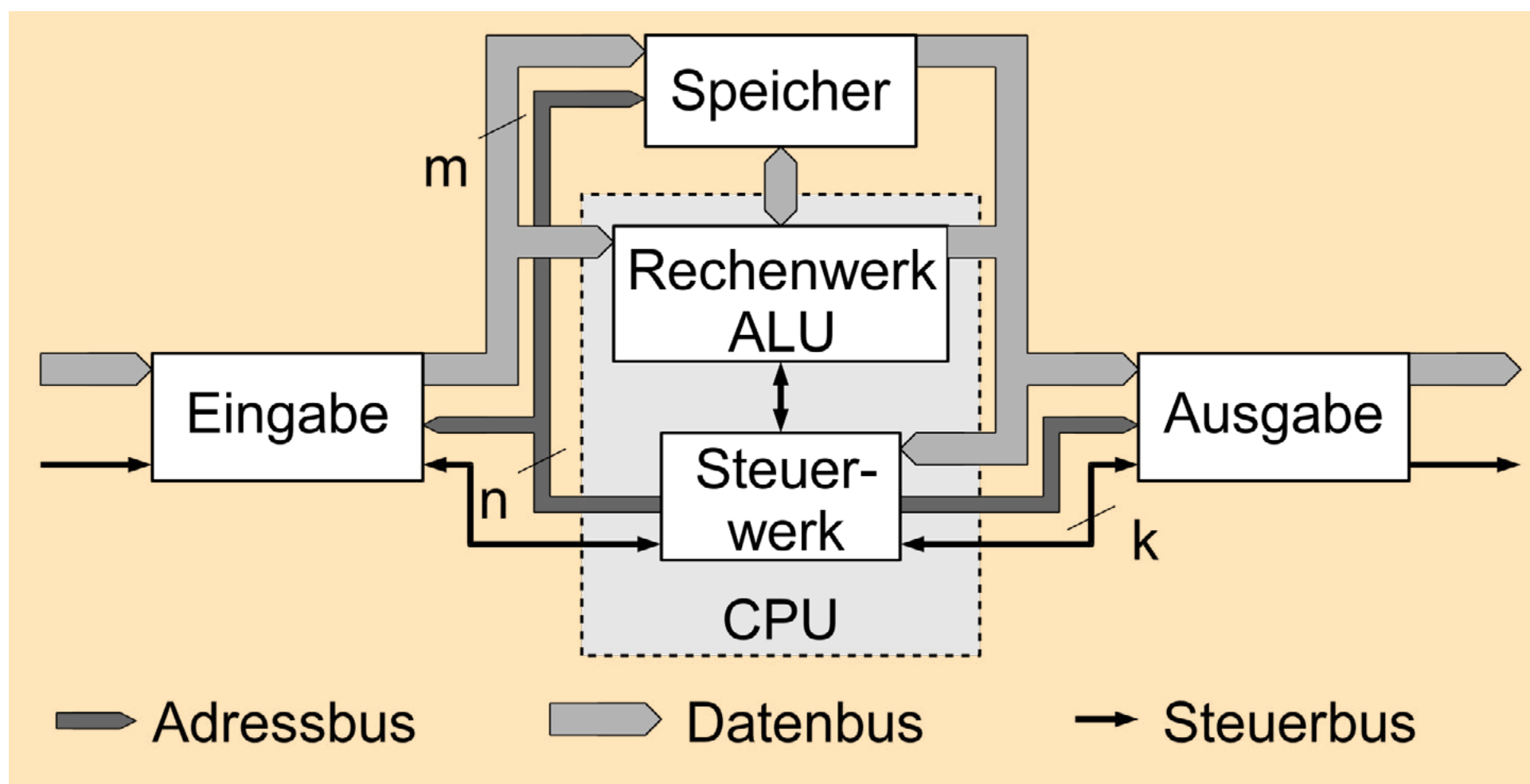
Im Frühjahr 1951 bearbeitete der IAS-Computer die ersten Aufgaben; im Sommer wurde er zwei Monate lang rund um die Uhr für Rechnungen zur Wasserstoffbombe benutzt.

Am 10. Juni 1952 erfolgte die offizielle Einweihung des IAS-Computers.

Die Pressemitteilung

Die Kalkulationen zur H-Bombe kamen im Presstext nicht vor, dafür aber solche zur Wettervorhersage. Diese Anwendung des Computers lag John von Neumann besonders am Herzen.

Während der Konstruktion und des Betriebs der IAS-Maschine hielt John von Neumann nichts geheim. Er und seine Kollegen veröffentlichten alle Unterlagen, die ab 1946 zur Hardware und Software erstellt wurden.



Von 1952 an erschienen in den USA und in anderen Ländern 19 Nachbauten vom IAS-Computer, von denen einige in Serie gingen:

- den dänischen DASK,
- den WEIZAC in Israel
- und die IBM 701.

Der IAS-Rechner ist neben der Von-Neumann-Architektur der wichtigste Beitrag des Mathematikers Neumann zur Informatik.

John von Neumann starb im Februar 1957; die IAS-Maschine wurde 1958 an die Universität Princeton abgegeben. Im Jahr 1960 gelangte sie in die amerikanische Bundeshauptstadt und in ein Depot der *Smithsonian Institution*.

Hier entstand 1966 ein Film mit dem Computer und mit Herman Goldstine; seine Begleiterin war die in Berlin geborene Kuratorin Uta Merzbach. 🐼

Die Von-Neumann-Architektur

John von Neumann entwickelte die nach ihm benannte **von-Neumann-Architektur**, die bis heute die Grundlage moderner Computer bildet.

Ihre Kernprinzipien sind:

- Programme und Daten werden im selben Speicher abgelegt
- Sequenzielle Programmabarbeitung
- Binäre Kodierung aller Informationen

Am Institute for Advanced Study leitete er den Bau des IAS-Computers, eines der ersten elektronischen Digitalrechner.