

NMWP

Magazin für Nanotechnologie, Mikrosystemtechnik, Neue Werkstoffe, Photonik und Quantentechnologien



Future of Computing

News aus dem Cluster NMWP.NRW und dem Verein NMWP E.V.



Zukunftstechnologien aus Nordrhein-Westfalen haben eine Strahlkraft weit über Deutschland und Europa hinaus
Drei Fragen an Ina Brandes, Ministerin für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen.

Seite 14



Bit by Qubit in die Zukunft von Computing
Künstliche Intelligenz boomt. Sie verspricht bahnbrechende Anwendungen. Aber KI muss grüner werden.

Seite 20

Wir ermöglichen Innovation. Überall.

Technologien sind in einem hochindustrialisierten Land wie Deutschland nicht nur Grundlage für Wohlstand, sie verändern die Gesellschaft. Sie bringen in wichtigen Bereichen unseres Lebens Innovationen hervor, aus denen sich neue Lösungsansätze für die großen Herausforderungen unserer Zeit, wie zum Beispiel den Klimaschutz und die Energieversorgung, ergeben.

Der **Landescluster NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW (NMWP.NRW)** ist anerkannter Partner von Wirtschaft, Wissenschaft und öffentlicher Hand für innovationsfördernde Dienstleistungen im Bereich High-Tech sowie den Schlüsseltechnologien Nanotechnologie, Mikrosystemtechnik, Neue Werkstoffe, Photonik und den Quantentechnologien.

NRW ist im Hinblick auf diese fünf Schlüsseltechnologien sehr stark aufgestellt. Sein bundesweiter Spitzenplatz stützt sich unter anderem auf eine sehr hohe Dichte an Unternehmen und Instituten – einen erfolgreichen Mix aus Mittelstand, Großunternehmen und Forschung – eine hohe Innovationsgeschwindigkeit, die durch eine gute Vernetzung begünstigt wird.

Da alle fünf Schlüsseltechnologien auch Querschnittstechnologien sind, unterstützt und vernetzt der Cluster NMWP.NRW Akteure entlang der kompletten Wertschöpfungskette aus sämtlichen Leitmärkten. Die Vernetzung entsteht zum Beispiel über die gemeinsame Teilnahme an Messen und die Durchführung verschiedener Veranstaltungen.

Ergänzt wird der Cluster in seiner Arbeit vom **Verein NanoMikroWerkstoffePhotonik (NMWP e.V.)**. Im April 2012 gegründet, unterstützt er seitdem seine Mitglieder aktiv in der Entwicklung neuer Ideen, Projekte und Partnerschaften in den Bereichen Nanotechnologie, Mikrosystemtechnik, Neue Werkstoffe und Materialien, Photonik und Quantentechnologien. Zu den Mitgliedern zählen Universitäten, Großunternehmen sowie auch Vertreter von KMU.

NMWP.NRW und NMWP e.V. agieren als Innovationstreiber und leisten einen elementaren Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus NRW im internationalen Umfeld und präsentieren Nordrhein-Westfalen als attraktiven, nachhaltigen und effizienten Wirtschaftsstandort. ■

Impressum

Herausgeber

Cluster NMWP.NRW
c/o NMWP Management GmbH
Merowingerplatz 1
40225 Düsseldorf

Telefon: 0211 385459-0
Telefax: 0211 385459-19
Internet: www.nmwp.nrw
www.portal.nmwp.de
www.verein.nmwp.nrw

Redaktion

Dr.-Ing. Harald Cremer
Hendrik Köster (v.i.S.d.P.)
André Sarin

Umsetzung

NMWP. The Innovation Engineers.

Unentgeltliches Abonnement des Magazins
oder Informationen zu Adressänderungen:
hendrik.koester@nmwp.de

Alle Ausgaben des NMWP-Magazins können auch als PDF-Datei auf der Internetseite www.nmwp.nrw.de gelesen und heruntergeladen werden.

Namentlich gekennzeichnete Beiträge geben nicht unbedingt die Meinung des Herausgebers wieder. Der Nach- bzw. teilweise Abdruck ist nur mit ausdrücklicher Erlaubnis des Herausgebers gestattet.

Liebe Leserinnen und Leser,

in unserer immer komplexer werdenden Welt ist es die Digitalisierung, die uns wichtige Unterstützung bietet – von den zahllosen Helferlein im täglichen Leben bis hin zu hochkomplexen Recheninfrastrukturen. Betrachtet man die Digitalisierung genau, muss zwischen der Software und der Hardware unterschieden werden. So spielt innovative Hardware eine zentrale Rolle, denn durch sie werden viele Anwendungen wie Künstliche Intelligenz und Machine Learning überhaupt erst möglich. Mittels disruptiver Ansätze in der Computerhardware stärken wir unsere internationale Position als Innovationsstandort und heben so Marktpotentiale auf nationaler, europäischer oder globaler Ebene. Denn: Wenn man Daten und Software als Öl betrachten würde, sind innovative Computerarchitekturen die Fördertürme.



Bei innovativen Computerarchitekturen sind Schlüsseltechnologien wie die Nanotechnologie, die Nano- und Mikrosystemtechnik, die innovativen Materialien und die Photonik von zentraler Bedeutung. Diese liefern wichtige Impulse entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von neuen 2D-Materialien und photonischen Komponenten über entsprechende Produktionsprozesse wie der Elektronenstrahl-Lithografie bis hin zu kompletten Systemen wie Neuromorphe Chips. Insbesondere Schlüsseltechnologien aus Nordrhein-Westfalen leisten gleich auf verschiedensten Ebenen im Bereich der Nano- und Mikrosystemtechnik einen elementaren Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz, der Energieeinsparung sowie der Defossilisierung und der Resilienz. Hardware und Software sind so gemeinsam die treibenden Kräfte hinter den Fortschritten, die wir beispielsweise in Bereichen wie Gesundheitswesen, Bildung, Energie, Transport, Logistik, aber auch der Steigerung der Widerstandsfähigkeit kritischer Bereiche unserer Wirtschaft und Infrastrukturen sehen.

In Nordrhein-Westfalen gibt es bemerkenswerte wirtschaftliche und wissenschaftliche Aktivitäten in den Bereichen Neuromorphes Computing, High-Performance Computing und Modulares Supercomputing sowie Edge-Computing und Quantencomputing. Diese innovativen Technologien und Hardwareinnovationen entstehen – neben der Ausbildung von hochqualifizierten Fachkräften – in einem gut funktionierenden und gut vernetzten Ökosystem aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

Im Gespräch mit NMWP.NRW hat Frau Ina Brandes, Ministerin für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen unserer Wirtschafts- und Wissenschaftslandschaft ein hohes Innovationspotential attestiert. Gerade die hohe Dichte an exzellenter Forschung liefert mit wissenschaftlichen Erkenntnissen und wirtschaftlich erfolgreichen Spin-offs international wichtige Impulse.

Sie sehen – für „Future of Computing“ sind Schlüsseltechnologien wie die Nano- und Mikrosystemtechnik, die innovativen Materialien und die Photonik wichtige Enabler. Die Querschnittstechnologien sind unsere täglichen Begleiter und Unterstützer. Sie werden in der Öffentlichkeit kaum wahrgenommen, leisten aber unverzichtbare Beiträge, um unser Leben zu verbessern und die Wirtschaft nachhaltig zu stärken. Wir möchten Ihnen mit diesem Magazin Einblicke in einige Aktivitäten und innovative Impulse aus NRW bieten.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß bei der Lektüre, bleiben Sie weiter gespannt – auf Innovationen und eine gute Zukunft!

Dr.-Ing. Harald Cremer, Clustermanager NMWP.NRW

Zukunftstechnologien aus Nordrhein-Westfalen haben eine Strahlkraft weit über Deutsch- land und Europa hinaus

**Computerhardware aus NRW
als wichtiger Wegbereiter in
vielen Forschungs- und
Industriezweigen.**



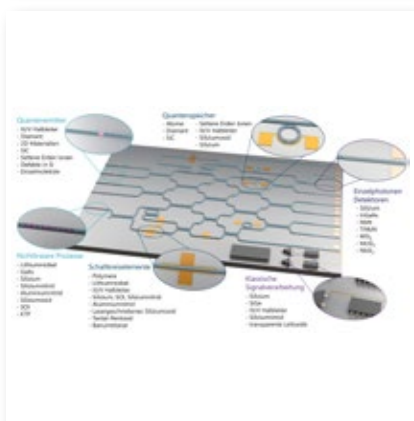
Bit by Qubit in die Zukunft von Computing

Skalierbare Halbleiter-Quantencomputer durch Elektronen-Shuttling



Quantentechnologie: Revolutioniert Elektromobilität und sichert die digitale Zukunft

Energieeffiziente Hardware
für KI aus Aachen



Die Zukunft erstrahlt mit neuem Licht: Fortschritte im photonischen Quantencomputing

Vom Datacenter ins Smartphone: Die Zukunft der KI-Hardware



NMWP im Gespräch

Zukunftstechnologien aus Nordrhein-Westfalen haben eine Strahlkraft weit über Deutschland und Europa hinaus

Nordrhein-Westfalen geht mit reichlich Innovationskraft voran auf den Weg von Kohle zur KI. Eine Schlüsselrolle dabei nimmt die exzellente Forschungslandschaft ein. Drei Fragen an Ina Brandes, Ministerin für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, zur Zukunft des Computings.

14

Computerhardware aus Nordrhein-Westfalen als wichtiger Wegbereiter in vielen Forschungs- und Industriezweigen

NMWP.NRW im Gespräch mit Professorin Dr. Astrid Lambrecht, Vorstandsvorsitzende am Forschungszentrum Jülich, über die Zukunft des Computings und den hohen Stellenwert von Fachkräften und Kooperationen für unsere Zukunft.

16

Highlight-Thema

Bit by Qubit in die Zukunft von Computing

Künstliche Intelligenz boomt. Sie verspricht bahnbrechende Anwendungen, z. B. bei der Vorhersage dramatischer Wetterereignisse oder Früherkennung von Hirntumoren. Allerdings sind diese Systeme äußerst rechen- und energieintensiv. KI muss grüner werden.

20

Future of Computing

Skalierbare Halbleiter-Quantencomputer durch Elektronen-Shuttling

24

Quantentechnologie: Revolutioniert Elektromobilität und sichert die digitale Zukunft

26

Quantenzufallszahlen: Die Zukunft der Datensicherheit

28

Rechnen mit Widerständen

30

Graphen: Wende in der Chip-Technologie

32

Nanotechnologie: Die digitale Zukunft im „Kleinen“

34

Energieeffiziente Hardware für KI aus Aachen

36

Think big wäre zu klein für Quantencomputing

38

Die Zukunft erstrahlt mit neuem Licht: Fortschritte im photonischen Quantencomputing

40

Vom Datacenter ins Smartphone: Die Zukunft der KI-Hardware

42

Forschungsspitzen in NRW: ML4Q bringt kluge Köpfe zusammen

44

Wie werden Quantencomputer die Gesellschaft verändern?

48

Neues aus Cluster, Verein und Branche

Zu guter Letzt

EPIQ: Ein Quanten-Supercomputer made in NRW

50

Durchblick im Lieferanten-Dschungel: Die KI-Revolution von heute

52

11. MikroSystemTechnik Kongress 2025: Wandel durch Fortschritt

54

Termine

55





N

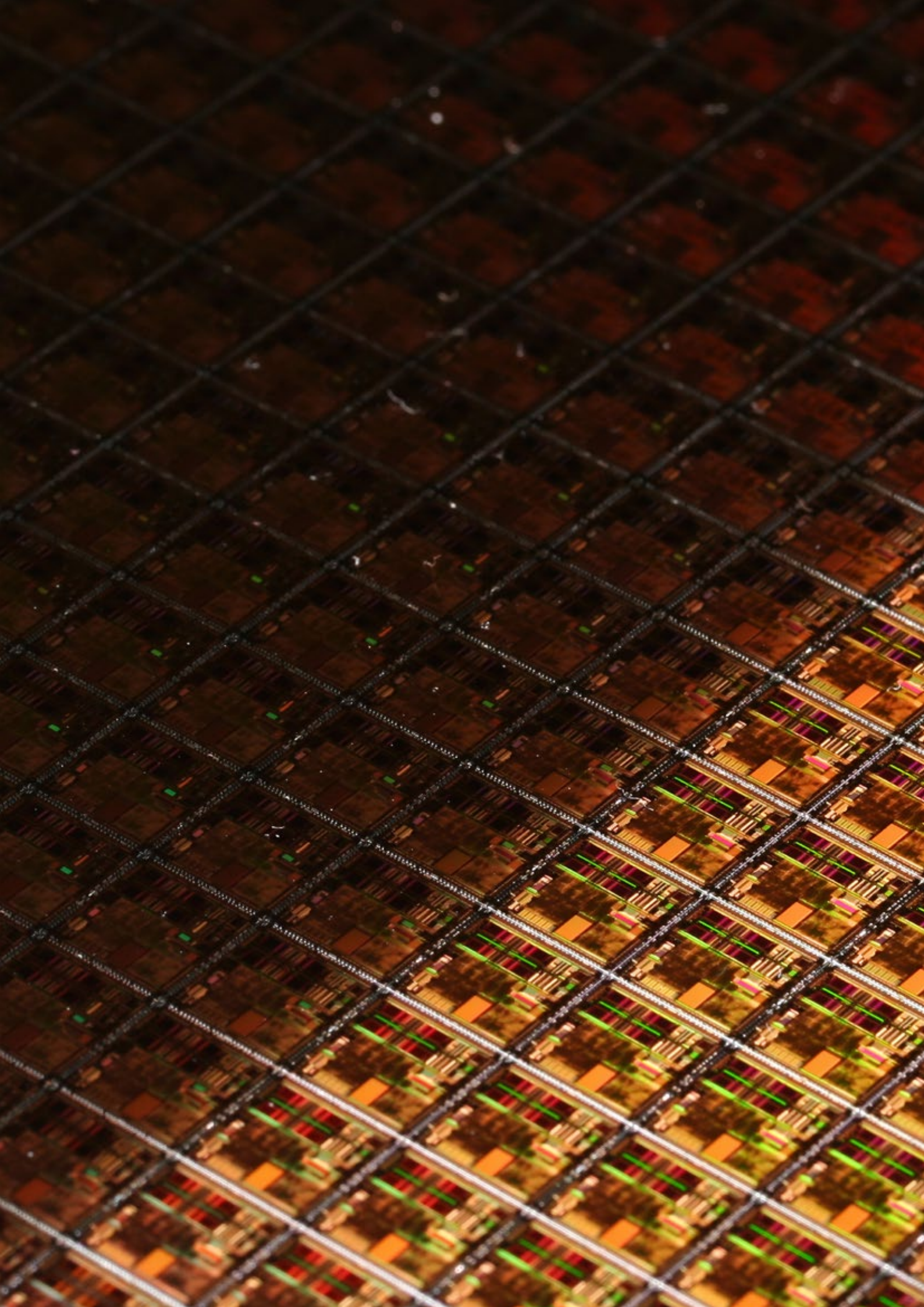
Die Nanotechnologie beschäftigt sich mit der Analyse, Herstellung und Manipulation von nanoskaligen Objekten. Sie findet heute in vielen alltäglichen Bereichen Anwendung und ist ein ebenso unsichtbarer wie alltäglicher Begleiter.

Auch für Future of Computing spielt die Nanotechnologie eine bedeutende Rolle. Hier profitiert die moderne Elektronik, speziell die Computerchips, von der fortschreitenden Miniaturisierung ihrer einzelnen Bauelemente von der „Mikrosystemtechnik“ hin zur „Nanosystemtechnik“ und dem tiefergehenden Verständnis von Effekten auf der Nanoebene. Denn der Weg der Miniaturisierung endet für siliziumbasierte im Bereich weniger Nanometer, da bei so kleinen Strukturgrößen quantenmechanische Effekte die Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz negativ beeinflussen: Materialien, deren makroskopische Eigenschaften wir kennen und verstehen, können auf der nanoskaligen Ebene neue, veränderte Eigenschaften haben. So ist die effiziente Herstellung von Schichten mit wenigen Nanometern Dicke für die Zukunft des Computing eine Schlüsseltechnologie. Ein Mikrochip besteht aus mehreren hundert dieser Schichten, ein umfassendes Verständnis der Materialien auf nanoebene sowie die präzise Herstellung jeder dieser Schichten ist daher wichtig.

Die Nanoskala spielt aber nicht nur bei den Materialien und deren Eigenschaften eine wichtige Rolle, sondern auch bei der Verarbeitung dieser zu Bauteilen. So stellen wachsende Anforderungen an immer kleinere und komplexere Bauteile bestehende Produktionsprozesse vor Herausforderungen beziehungsweise machen die Entwicklung neuer Prozesse notwendig.

Für einen modernen Computerchip benötigt es viele Transistoren auf einer möglichst kleinen Fläche. Durch die Miniaturisierung hin zu wenigen Nanometern sind mittlerweile mehrere Milliarden Transistoren auf einer Fläche von einige Quadratmillimetern möglich. Die dieses Jahr präsentierten neuen Chips verfügen beispielsweise über 28 Milliarden (Apple M4) oder sogar 208 Milliarden (Nvidia Blackwell GPU).

Sowohl in der Forschung und Entwicklung als auch in der Industrie, ist Nordrhein-Westfalen stark und vor allem vielfältig im Bereich der Nanotechnologien für Chiptechnologien aufgestellt.



A detailed, high-magnification photograph of a microchip, showing a complex grid of circuitry with various colored components (red, orange, yellow, green) and intricate patterns of lines and dots. The image is slightly blurred, giving it a sense of depth and focus on the intricate details of the chip's architecture.

M

Für die Zukunft des Computing ist es notwendig, bestehende Systeme und ihre Strukturierung neu zu denken. Geschwindigkeitsanforderungen, Datenmengen und Energieeffizienz stellen neue Anforderungen an Computingsysteme. Ohne radikale Verbesserungen bei der Entwicklung von Computern wird 2040 mehr Strom für Computerchips benötigt, als unsere weltweite Energieproduktion liefern kann. Durch innovative Konzepte der Mikrosystemtechnik wird dieser Herausforderung begegnet.

Während der ersten Jahrzehnte der Chipentwicklung war ein leistungsfähiger Universalprozessor das priorisierte System. Vor ein paar Jahrzehnten kamen dann auf Grafik spezialisierte Einheiten hinzu (GPU). Im Laufe der letzten fünf bis zehn Jahre hat sich dann die Entwicklung kleinerer aufgabenspezifischer Systeme in Form von Chiplets, welche als Untereinheit auf einem größeren Chip fungieren, in den Vordergrund geschoben. Zudem werden Beschleuniger für KI-Anwendungen besonders stark nachgefragt und weiterentwickelt.

Mit dem Ansatz des neuromorphen Computings wird der Von-Neumann-Flaschenhals umgangen, der beschreibt, dass der Austausch von Recheneinheit (CPU) und Speicher (Memory) bei speicherintensiven Aufgaben der limitierende Faktor wird. Er stellt nicht nur ein Limit in der Leistung dar, vor allem kostet jeder Transport von Speicher zu Recheneinheit Energie. Beim neuromorphen Computing werden Berechnung im Speicher durchgeführt, ähnlich wie im menschlichen Gehirn. Hierfür werden neuartige Materialkonzepte erforscht.

Ein weiterer Ansatz für Future of Computing ist das Quantencomputing, welches mittels sogenannter Qubits rechnet. Qubits sind aus den Zuständen einzelner Atome, Elektronen oder Photonen aufgebaut und ermöglichen das nicht-binäre Rechnen komplexer Algorithmen. Die Herstellung und Skalierung von Quantencomputingsystemen mit fehlerresistenten und langlebigen Qubits stellt noch eine technische Herausforderung dar, welche mittels verschiedener Systemansätze gelöst werden soll.

Mit seiner starken Forschungslandschaft, aus der im Bereich der Computertechnologien zahlreiche Spin-offs und Start-ups hervorgehen und einer hochinnovativen Industrie als Partner sowohl in der (weiter-)Entwicklung dieser Konzepte als auch als frühe Anwendung liefert Nordrhein-Westfalen wichtige Impulse.



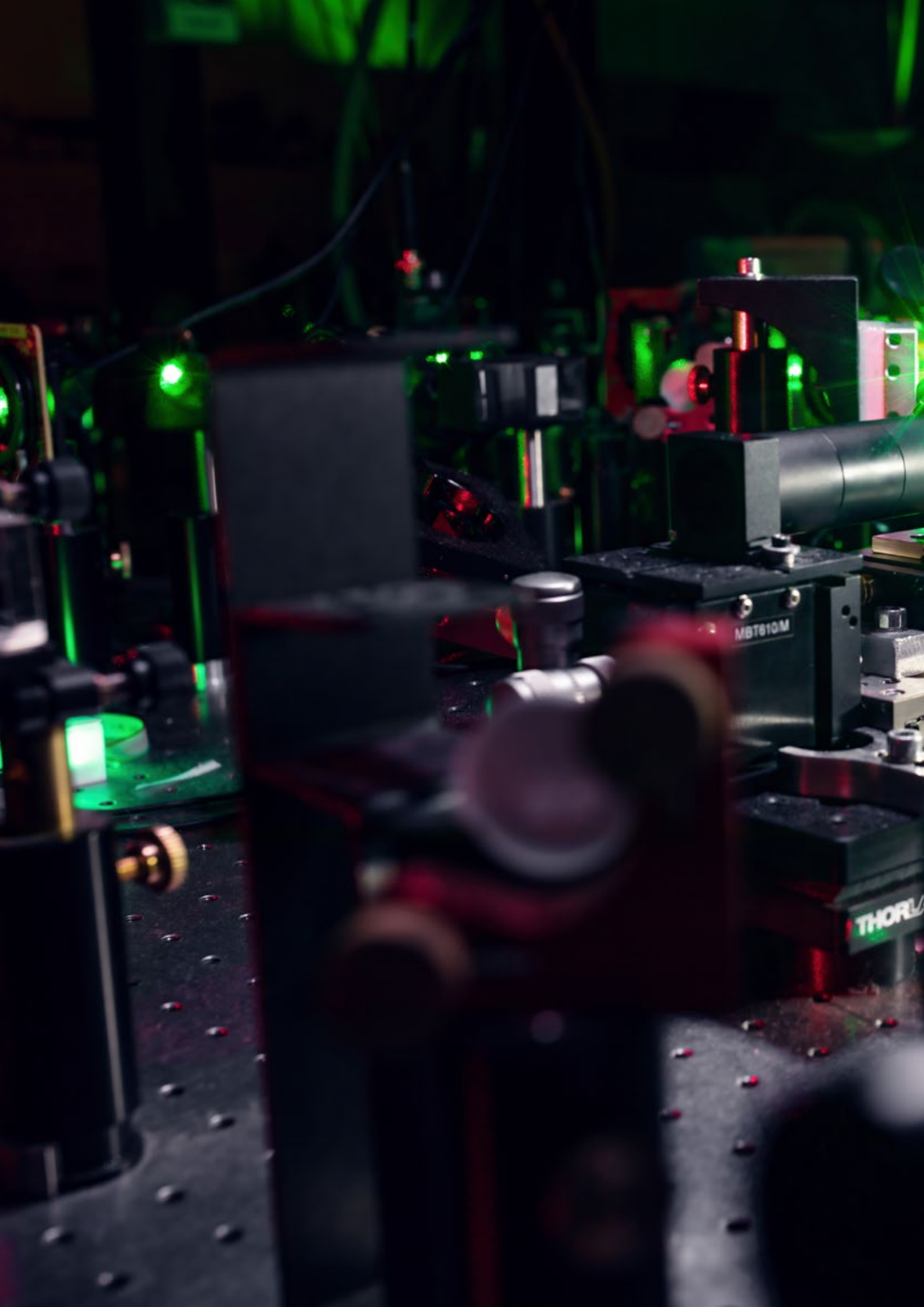
W

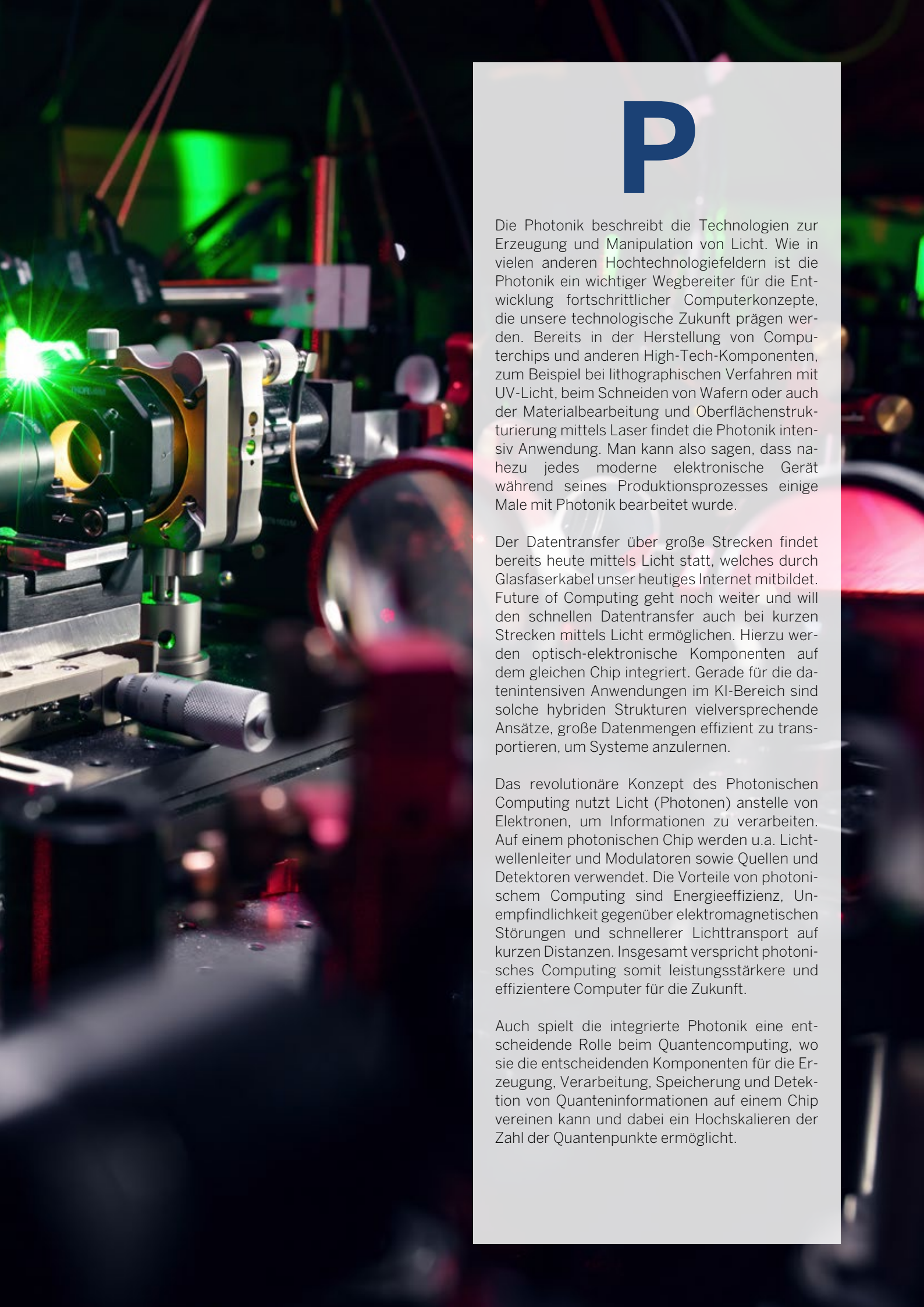
Das Material schlechthin im Computingbereich ist sicher Silizium. Alle modernen Computerchips basieren auf dotiertem Silizium, welches als Halbleiter die wichtige feldabhängige schaltbare Leitfähigkeit besitzt. In der sogenannten CMOS-Technik (engl. complementary metal oxide semiconductor, komplementäre Metalloxid Halbleiter) werden auf Siliziumwafern unzählige Transistoren hergestellt.

Moore's Law besagt, dass sich die Anzahl der Transistoren auf einem Chip etwa alle zwei Jahre verdoppelt, wodurch die Rechenleistung kontinuierlich exponentiell gesteigert wird. Allerdings stößt Silizium durch die zunehmende Miniaturisierung etwas oberhalb der atomaren Auflösung im Bereich weniger Nanometer an seine physikalischen Grenzen, da bei diesen Strukturgrößen quantenmechanische Effekte die Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz negativ beeinflussen. Je dünner der Leiterkanal im Transistor, desto höher ist der elektrische Widerstand. Aus diesem Grund sind es wieder einmal die innovativen Materialien, die neue Ansätze ermöglichen und so die Grenzen des Computings weiter verschieben. Neue Materialien ermöglichen aber auch die Entwicklung nicht-binärer Systeme wie beim neuromorphen Computing, welche stufenweise schaltbare Materialsysteme benötigen. Gegenüber konventioneller Binärlogik erhöhen sich bei dreiwertigen Logiken die möglichen Zustände exponentiell.

Die klassische Schalteinheit ist der Transistor, welcher zwischen den Zuständen ein und aus, Strom an und Strom aus, 0 und 1, wechselt. Neuartige Memristoren können mehrere Abstufungen zwischen An und Aus erreichen, indem sich ihr Materialsystem durch das Einschalten höherer Ströme reversibel verändern lässt.

Eine weitere Klasse, die bereits mit ihrem Namen Miniaturisierung verspricht, sind die 2D-Materialien. Diese Materialien können in Schichten von wenigen Atomen Dicke erhalten werden und besitzen passende elektrische Eigenschaften für die Verwendung in Transistoren. Diese Materialien in Zusammenspiel mit bekannter CMOS-Technik können eine große Effizienzsteigerung liefern.





P

Die Photonik beschreibt die Technologien zur Erzeugung und Manipulation von Licht. Wie in vielen anderen Hochtechnologiefeldern ist die Photonik ein wichtiger Wegbereiter für die Entwicklung fortschrittlicher Computerkonzepte, die unsere technologische Zukunft prägen werden. Bereits in der Herstellung von Computerchips und anderen High-Tech-Komponenten, zum Beispiel bei lithographischen Verfahren mit UV-Licht, beim Schneiden von Wafern oder auch der Materialbearbeitung und Oberflächenstrukturierung mittels Laser findet die Photonik intensiv Anwendung. Man kann also sagen, dass nahezu jedes moderne elektronische Gerät während seines Produktionsprozesses einige Male mit Photonik bearbeitet wurde.

Der Datentransfer über große Strecken findet bereits heute mittels Licht statt, welches durch Glasfaserkabel unser heutiges Internet mitbildet. Future of Computing geht noch weiter und will den schnellen Datentransfer auch bei kurzen Strecken mittels Licht ermöglichen. Hierzu werden optisch-elektronische Komponenten auf dem gleichen Chip integriert. Gerade für die datenintensiven Anwendungen im KI-Bereich sind solche hybriden Strukturen vielversprechende Ansätze, große Datenmengen effizient zu transportieren, um Systeme anzulernen.

Das revolutionäre Konzept des Photonischen Computing nutzt Licht (Photonen) anstelle von Elektronen, um Informationen zu verarbeiten. Auf einem photonischen Chip werden u.a. Lichtwellenleiter und Modulatoren sowie Quellen und Detektoren verwendet. Die Vorteile von photonischem Computing sind Energieeffizienz, Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen und schnellerer Lichttransport auf kurzen Distanzen. Insgesamt verspricht photonisches Computing somit leistungsstärkere und effizientere Computer für die Zukunft.

Auch spielt die integrierte Photonik eine entscheidende Rolle beim Quantencomputing, wo sie die entscheidenden Komponenten für die Erzeugung, Verarbeitung, Speicherung und Detektion von Quanteninformationen auf einem Chip vereinen kann und dabei ein Hochskalieren der Zahl der Quantenpunkte ermöglicht.

Zukunftstechnologien aus Nordrhein-Westfalen haben eine Strahlkraft weit über Deutschland und Europa hinaus

Nordrhein-Westfalen geht mit reichlich Innovationskraft voran auf dem Weg von Kohle zur KI. Eine Schlüsselrolle dabei nimmt die exzellente Forschungslandschaft ein. Drei Fragen an Ina Brandes, Ministerin für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, zur Zukunft des Computings.

Frau Ministerin Brandes, Computer begleiten uns in allen Lebensbereichen. Moderne Chips – von der Steuerung der Kaffeemaschine über smarte Fitness-Tracker oder Sprachassistenten im Auto bis hin zu Hochleistungs-Rechenzentren – treiben die Digitalisierung im Leben der Menschen voran. Welche Chancen und Herausforderungen sehen Sie?

Die Entwicklung der Rechenleistung ist rasant. Computer, die vor wenigen Jahren noch ganze Hallen füllten, tragen wir heute als Smartwatch und Mobiltelefon am Handgelenk und in der Hosentasche. Diese Fortschritte bei der Rechenleistung werden in Zukunft einer der entscheidenden Schlüssel sein, die großen Herausforderungen der Menschheit zu meistern:

- In der Medizin werden noch präzisere Diagnosemöglichkeiten und individuell auf jede Patientin und jeden Patienten zugeschnittene Therapien eingeführt, die mit deutlich geringeren Nebenwirkungen einhergehen.
- Im Verkehr werden intelligente Mobilitätskonzepte möglich, die unsere Ballungsräume sauberer und lebenswerter und den Bus- und Bahnverkehr in ländlichen Regionen besser machen werden.
- Unsere Energieversorgung wird ressourcen- und umweltschonender mit dem Einsatz smarterer Batterielösungen, die auch dann Strom liefern, wenn die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht.
- Unsere Studentinnen und Studenten werden profitieren von effizienten Lehr- und Lernmethoden mit Hilfen, die auf die Stärken und Schwächen einer jeden Studentin und eines jeden Studenten zugeschnitten sind.

Bei allem Optimismus, dass Quantenrechner, Supercomputer und KI das Leben der Menschen leichter und angenehmer machen werden, gehen solche einschneidenden Umbrüche immer mit Skepsis und Vorbehalten einher. Diese Sorgen der Menschen müssen wir ernst nehmen. Es ist die Aufgabe der Politik dafür zu sorgen, dass die Entwicklung von KI-Anwendungen begleitet wird von Fragen der Ethik und der Datensicherheit. Auch deshalb investieren wir als Land Nordrhein-Westfalen in die KI-Forschung, um ein Gegengewicht zu den amerikanischen Großkonzernen zu schaffen, für die Erwägungen der wirtschaftlichen Verwertbarkeit deutlich im Vordergrund stehen.

Wie entwickelt sich Nordrhein-Westfalen aus Ihrer Sicht als Standort für diese Zukunftstechnologien?

Die Dichte und Qualität von herausragender KI-Forschung an zahlreichen Hochschulstandorten bei uns sind einzigartig in Europa: 14 Universitäten, 16 Hochschulen für angewandte Wissenschaften, 14 Exzellenzcluster, mehr als 50 außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und die Johannes-Rau-Forschungsgemeinschaft. Dazu das Lamarr-Institut für Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz als eines der bundesweit führenden Spitzenzentren, zu dem wir ein Fellowship-Programm aufgelegt haben. Und CAIS, ein eigenes Institut für Digitalisierungsforschung auch unter ethischen und sozialwissenschaftlichen Gesichtspunkten. Nordrhein-Westfalen ist mit seiner Forschungslandschaft für die Zukunft sehr gut aufgestellt. Quantencomputing ,made



»Die Fachkräftefrage ist DIE entscheidende Zukunftsfrage, ob wir unseren Wohlstand und unsere soziale Sicherheit werden halten und mehreren können.«

Ina Brandes, Ministerin für Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen

in NRW' gehört international zur Spitze, und bald bekommen wir im Forschungszentrum Jülich den Exascale-Rechner JUPITER, der einer der stärksten KI-Supercomputer weltweit und der erste in Europa dieser Klasse sein wird.

Hier ist eine Forschungslandschaft entstanden, die Strahlkraft weit über Deutschland und Europa hinaus entwickelt hat und zugleich mit einer Sogwirkung für exzellente Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler einhergeht. Jahr für Jahr kommen im Zuge unseres Rückkehrprogramms Forscherinnen und Forscher ganz bewusst aus dem Ausland nach Nordrhein-Westfalen, weil sie hier das Umfeld vorfinden, das sie für ihre Arbeit brauchen. Sie haben erkannt, dass Nordrhein-Westfalen in Sachen Zukunftstechnologien in vielen Bereichen zur Weltspitze gehört. So verstärken jetzt die beiden Quanten-Spitzenforscher Dr. Ramona Wolf und Dr. Giovanni Cerchiari das Siegener Physik-Department.

Was erhoffen Sie sich von der „Future of Computing“ in Nordrhein-Westfalen?

Noch nie war so viel Wissen für so viele Menschen verfügbar wie heute. Wir haben also alle Voraussetzungen dafür, die großen Herausforderungen in Medizin, Mobilität, Energieversorgung, Klimaschutz und Bildung zu meistern. Entscheidend wird sein, dass es uns gelingt, junge Men-

schen für Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik zu begeistern. Die Fachkräftefrage ist DIE entscheidende Zukunftsfrage, ob wir unseren Wohlstand und unsere soziale Sicherheit werden halten und mehreren können.

Als Geschäftsführerin eines technischen Unternehmens habe ich selbst erfahren, dass der effizienteste Weg, Fachkräfte zu gewinnen, ist, sie selbst auszubilden. Und damit können wir gar nicht früh genug beginnen. Deshalb sprechen wir zum Beispiel mit unserer Initiative zdi und ihren Schülerlaboren ganz bewusst Schülerinnen und Schüler an, um ihnen schon früh Lust auf MINT-Fächer zu machen. Über 100.000 junge Menschen erreichen wir inzwischen jedes Jahr mit dem Programm.

Mit einem exzellenten Umfeld für Forschung und Lehre und jungen Menschen, die Freude an MINT-Fächern haben, haben wir die besten Chancen, Innovationen sowohl zu erforschen als auch zur Marktreife zu entwickeln. Gut ausgebildete Fachkräfte werden uns helfen, die Lücke zwischen der Grundlagenforschung und der Anwendung zu schließen. Ich bin sicher, dass uns die Zukunft des Computings entscheidend dabei helfen wird, den Sprung von der Kohle zur KI erfolgreich zu schaffen.

Frau Ministerin Brandes, vielen Dank für das Gespräch.

Computerhardware aus Nordrhein-Westfalen als wichtiger Wegbereiter in vielen Forschungs- und Industriezweigen

NMWP.NRW im Gespräch mit Professorin Dr. Astrid Lambrecht, Vorstandsvorsitzende am Forschungszentrum Jülich, über die Zukunft des Computings und den hohen Stellenwert von Fachkräften und Kooperationen für unsere Zukunft.

Frau Professor Lambrecht, das Forschungszentrum Jülich ist eine feste Größe in vielen Forschungsbereichen mit international hohem Ansehen. Bezogen auf das Feld „Future of Computing“ – mit welchen technologischen Schwerpunkten wird am FZJ geforscht?

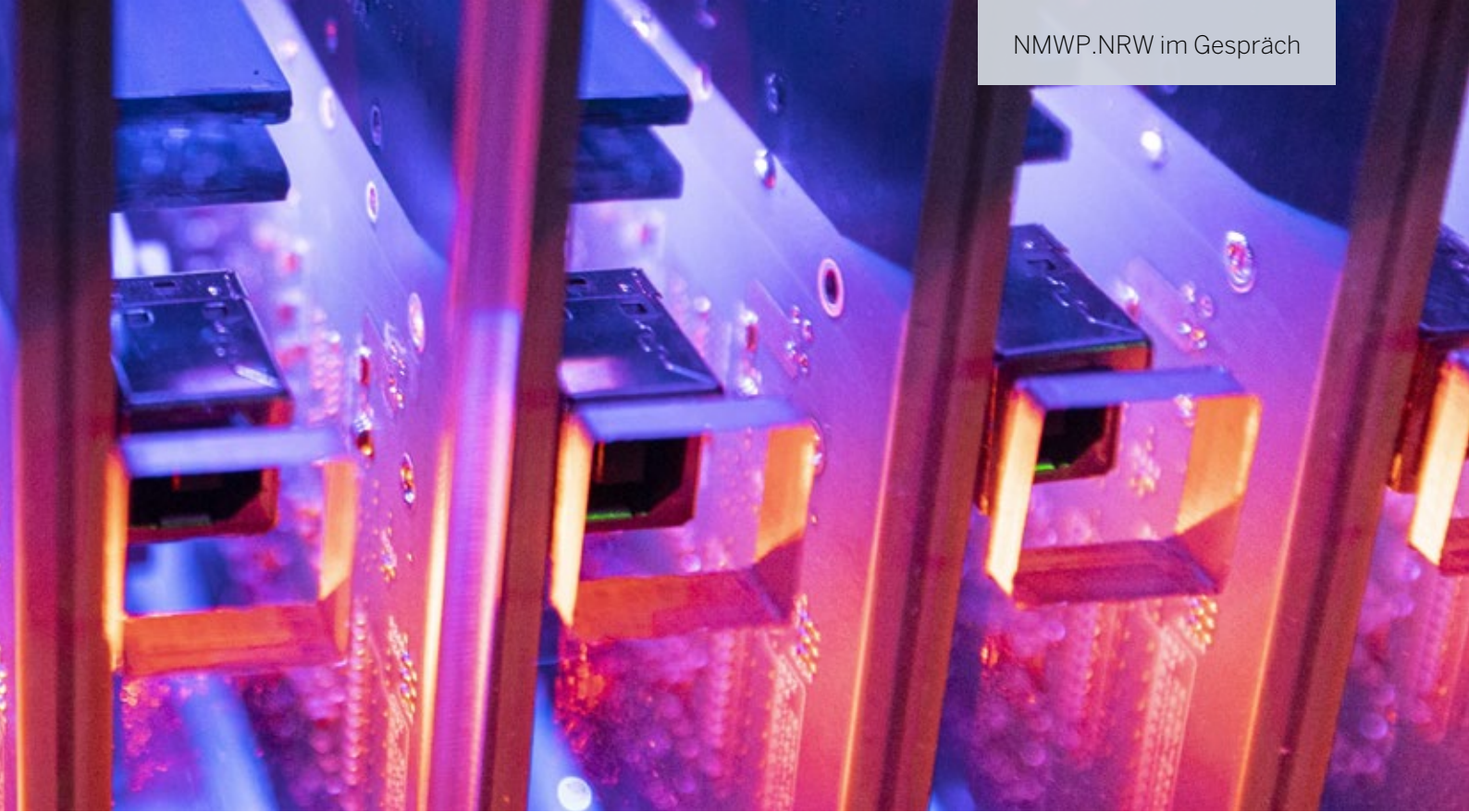
Das Forschungszentrum Jülich ist spezialisiert auf die Bereiche Supercomputing, Quantencomputing, Neuromorphes Computing sowie KI und Deep Learning. Wir sind davon überzeugt, dass die Zukunft des Computing eine geschickte, anpassbare Kombination aus verschiedenen Computing-Technologien erfordert, die auf bestimmte Anwendungsbereiche spezialisiert sind. So können sie sowohl einzeln als auch in Kombination miteinander ihr volles Potenzial entfalten. Wir haben in Jülich eine modulare Architektur errichtet, die ein enormes Potenzial für interdisziplinäre Forschungsprojekte und Anwendungen für Wissenschaft und Industrie bietet. Dabei arbeiten Materialwissenschaftler, Mathematikerinnen, Physiker, Softwarespezialistinnen aber auch Neurologen Hand in Hand. Im Bereich des High Performance Computing steht das Jülich Supercomputing Centre (JSC) weltweit an der Spitze der Forschung.

Bei der Entwicklung eines neuen Computing-Ansatzes – wie ist hier die Entwicklungskette zu sehen?

Unser Ziel ist es, neue Systeme oder Teile davon bis kurz vor der Ausgründung zu entwickeln. Das heißt, wir wollen einen Übergang von der Forschung in die Anwendung ermöglichen. Hierfür erforschen wir zum einen grundlegende physikalische und quantenmechanische Effekte und überführen die Erkenntnisse in mögliche Computing-Anwendungen. Zum anderen forschen wir auch angewandt im Bereich Materialien und Schaltkreis-Design, um Chips für Neuromorphe und Quantencomputer herzustellen. Am Ende der Wertschöpfungskette steht ein integriertes System, für das wir Algorithmen und Software entwickeln. Dieses System steht den Anwendern, zum Beispiel modular auf unseren Supercomputern, zur Verfügung.

Welche Rolle spielt die Materialforschung bei der Entwicklung von Komponenten für Next Generation Computing-Plattformen, insbesondere im Hinblick auf fortschrittliche Halbleitermaterialien?

Eine entscheidende. Auch hier schlagen wir die Brücke von der Grundlagenforschung hin zum Transfer in angewandte Systeme. Mit Simulationen ergründen wir beispielsweise neue Materialsysteme und -kombinationen und ermitteln vielversprechende Kandidaten für die gewünschten Anwendungen. Unser Ziel sind Materialien, die funktionell, aber auch kostengünstig und ressourcen-



schonend in der Herstellung sind. Wir können in der Helmholtz Nano Facility auf unserem Campus selbst Materialien synthetisieren und diese mit verschiedenen Verfahren wie hochauflösender Elektronenmikroskopie oder Neutronenstrahlung analysieren. Beispiele für neue Materialien „made in Jülich“ sind etwa topologische Materialien, die die Basis für besonders fehlerresistente Qubits, also die Recheneinheiten von Quantencomputern, sein könnten. Wir untersuchen aber auch spezielle Quantenzustände in Halbleitern, die zukünftig für die Speicherung von Daten genutzt werden könnten und forschen an Alternativen zu Silizium-basierten Halbleitern.

Welche Vorteile bieten die neuen Formen der Informationsverarbeitung?

Es geht darum, für die immer komplexeren Anwendungen und Problemstellungen, die Computer lösen sollen, optimal passende Systeme zur Verfügung zu haben, die besonders effizient, energiesparend und nachhaltig arbeiten. Durch die Entwicklung von Neuromorphen und Quantencomputern erschließen wir neuartige Anwendungsfelder, die außerhalb des Potenzials von klassischen Computern liegen. Diese neuen Computing-Systeme sollen bestimmte Fragestellungen schneller, präziser und energieeffizienter lösen.

Wie kann die Integration von Neuromorphem Computing die Effizienz und Leistung von künstlicher Intelligenz verbessern?

Neuromorphe Computer haben das menschliche Gehirn als Vorbild. Das Gehirn ist in der Lage, komplexe Fragestellungen zu lösen, die klassische Computer vor große Herausforderungen stellen – und dabei arbeitet es sehr energieeffizient. Das liegt daran, dass unser Gehirn an der gleichen Stelle rechnet und speichert. Bei herkömmlichen

Rechnern findet ein ständiger Datentransfer zwischen Prozessor und Speicher statt, der viel Energie verbraucht und die Berechnungen verlangsamt. In neuromorphen Chips mit künstlichen Synapsen sind Rechenprozesse und Informationsspeicher ebenfalls am gleichen Ort, so dass das Rechnen um ein Vielfaches energieeffizienter wird. Das Training großer Modelle für die Künstliche Intelligenz verbraucht heute so viel Strom wie eine kleine Stadt. Wenn wir zukünftig stärker auf das Potenzial Künstlicher Intelligenz setzen, muss der Energieverbrauch deutlich kleiner werden. Und um das zu ermöglichen, entwickeln wir Hardware und Software, basierend auf dem Funktionsprinzip des Gehirns. So wird die Energieeffizienz der Supercomputer verbessert.

Auch im Bereich des Quantencomputing gab es in NRW aber auch international in den letzten Jahren große Fortschritte. Wo liegt der Vorteil von Quantencomputern im Vergleich zu Supercomputern mit klassischer, binärer Architektur?

Stark vereinfacht ausgedrückt bieten Quantencomputer die Möglichkeit, sehr schnell und effizient aus einer großen Anzahl von möglichen Lösungen eines Problems die optimale herauszufinden – dank der speziellen Eigenschaften ihrer Qubits. Quantencomputer können Multi-Tasking: Während klassische, binäre Computer lediglich zwischen zwei Zuständen wechseln können, der berühmten 0 oder 1, können Qubits beide Zustände und alle Zwischenzustände gleichzeitig annehmen. Ein Beispiel: Den besten Wirkstoff für ein Medikament unter Tausenden von Möglichkeiten sucht ein klassischer Supercomputer, indem er nacheinander alle ausprobiert. Ein Quantencomputer würde alle gleichzeitig testen. Das ist der so genannte Quantenvorteil, den Quantencomputer gegenüber klassischen Computern haben, weil sie den komplexen Regeln der Quantenphysik gehorchen. Ich will nicht zu

sehr ins Detail gehen. Stand jetzt sind wir noch weit davon entfernt, diesen Rechenvorteil von Quantencomputern gegenüber binären Computern nutzen zu können. In Jülich arbeiten wir jedoch daran, weitere Quantensysteme zu entwickeln, die nur in bestimmten Bereichen diesen Quantenvorteil bieten. Quantenannealer beispielsweise können Optimierungsprobleme effizient lösen und so Verkehrsflüsse oder Produktionsabläufe verbessern. Ein weiteres Beispiel sind Quantensimulatoren, die Eigenschaften und Wechselwirkungen einer großen Anzahl von Teilchen untersuchen. Mögliche Anwendungen sind die Entwicklung neuer Batterien oder Arzneiwirkstoffe.

Welche Möglichkeiten gibt es, bestehende und neue Computing-Konzepte zu kombinieren, um synergistische Effekte zu erzielen?

In Jülich sind wir der Ansicht, dass nicht ein einziger Ansatz oder ein einziges System in allen Bereichen den heutigen Computern überlegen sein wird. Wir werden zukünftig vor allem auf Systeme setzen, die die Vorteile unterschiedlicher Ansätze verbinden. Wir haben die modulare Supercomputing Architektur entwickelt um klassische Höchstleistungsrechner, Quantencomputer, neuromorphe Systeme und weitere Ansätze, wie Cryocomputing, in einem modularen System miteinander verknüpfen zu können. Bei der Lösung eines komplexen Problems können so verschiedenen Module für Teilaufgaben aufgerufen werden, die sie besonders gut lösen können. Wenn die verschiedenen

aktuell leistungsstärksten Superrechnern in Europa. Sie werden beispielsweise in der Forschung für die Weiterentwicklung von Medikamenten genutzt, indem Reaktionen beim Aufeinandertreffen von potenziellen Wirkstoffen auf ein Protein simuliert werden. JUWELS ist zudem einer der leistungsfähigsten KI-Rechner Deutschlands auf dem große Basismodelle wie OpenGPT-X und TrustLLM trainiert werden. Mit dem ersten Europäischen Exascale-Rechner JUPITER, welcher derzeit in Jülich aufgebaut wird, werden wir einen der leistungsstärksten KI-Rechner weltweit betreiben. JUPITER wird die Möglichkeiten zum Training großer KI-Modelle erheblich vergrößern und damit auch die Grenzen wissenschaftlicher Simulationen maßgeblich erweitern. Zukünftig wird JUPITER zur Entwicklung von besseren Klima- und Wettermodellen genutzt werden, um z.B. deren Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen oder den Einfluss von Klimagasen und Kohlenstoff auf das Klima besser zu bewerten. Wir wollen diese Technologie auch nutzen, um Materialeigenschaften zu ergründen und neue Materialien zu entwickeln, die zum Beispiel die Effizienz von Solarzellen steigern oder Batterien leistungsfähiger und langlebiger machen. Auch Molekulardynamik-Simulationen zur Wirkstoffentwicklung werden deutlich durch den Einsatz von Jupiter beschleunigt und verbessert werden. Quantencomputer können uns dabei unterstützen, Energieversorgungssysteme zu gestalten und diese für neue Anforderungen, zum Beispiel durch die verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien, auszuliegen. Mit Neuromorphen Computern wollen wir



»Für das Next Generation Computing brauchen wir eine Generation von gut ausgebildeten und spezialisierten Fachkräften. Dies betrifft die Erforschung und Entwicklung neuer Computing-Konzepte ebenso wie die Integration der Bauteile und Programmierung der neuartigen Computing-Systeme.«

Prof. Dr. Astrid Lambrecht, Vorstandsvorsitzende Forschungszentrum Jülich

Module weit genug entwickelt sind, werden sie am Jülich Supercomputing Centre zentralisiert Nutzenden aus Forschung und Industrie zur Verfügung gestellt. Deep Learning könnte von der Kombination aus Quanten- und Neuromorphen Computern mit klassischen Computern profitieren. Die Analyse großer Datensätze könnte durch die Kombination von schnellen Datenspeichern, Quantencomputern und speziellen Modulen für Datenanalyse auf Basis von klassischen Computern beschleunigt werden.

Computer stehen immer auch für Simulation. Neue Konzepte erlauben uns, immer komplexere Simulationen auszuführen. In welchen Forschungsfeldern nutzt das FZJ selbst die neuen Technologien?

Das Jülich Supercomputing Centre betreibt und entwickelt Superrechner der höchsten Leistungsklasse. Die Supercomputer JUWELS und JURECA gehören zu den

den Energieverbrauch von aktuellen Höchstleistungsrechnern senken, indem wir uns der Funktionsweise des Gehirns annähern.

Stichwort Technologietransfer: Um die Zukunft eines Unternehmens zu sichern, kann es erforderlich sein, sich mit diesen innovativen und für viele Menschen sehr abstrakten wie komplexen Themen zu befassen. Gibt es Möglichkeiten für Unternehmen, aber auch für Forschungseinrichtungen, auf die am Forschungszentrum Jülich vorhandene Infrastruktur und die Expertise zuzugreifen? Wie kann eine solche Kooperation aussehen?

Wir sind hervorragend mit Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen vernetzt – in Nordrhein-Westfalen, national und international. Und wir haben starke Kooperationspartner in der Helmholtz Gemeinschaft. Unser Ziel muss es sein, eine starke deutsche und euro-

päische Community aufzubauen. Moderne Supercomputer sind unerlässliche Instrumente der heutigen Forschung, insbesondere für KI, Simulationen und Datenanalyse. Wir ermöglichen externen Anwendern den Zugang zu den von uns entwickelten Computing-Systemen. Hierzu haben wir zwei dedizierte Programme aufgesetzt, die sowohl Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler als auch Nutzende aus Unternehmen vom Anfang ihrer Projekte bis zu deren erfolgreichem Abschluss begleiten.

Mit JUNIQ, der JÜelicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing, stellen wir die erste europäische Infrastruktur für Quantencomputing zur Verfügung. JUNIQ unterstützt Nutzerinnen und Nutzer bei der Entwicklung von Algorithmen und ihren individuellen Anwendungen fürs Quantencomputing. Hier möchte ich auf eine besondere Kooperation im Bereich des Quantencomputings verweisen, die exemplarisch für unsere Kooperationen steht: Zusammen mit dem Siegener Startup eleQtron entwickeln wir einen Quantencomputer auf Ionenfallenbasis mit dem Ziel, diesen Quantencomputer in die modularen Computing-Systeme unseres Supercomputing Centre einzubinden und externen Nutzenden über JUNIQ zugänglich zu machen. Diese einzigartige Kooperation zeigt die Leistungsfähigkeit des Technologiestandorts Nordrhein-Westfalen und wird vom Ministerium für Kultur und Wissenschaft NRW gefördert.

Der zukünftige Exascale Rechner JUPITER wird nach seiner Installation wissenschaftlichen Anwenderinnen und Anwendern zunächst im Rahmen des JUPITER Research and Early Access Program (JUREAP) zugänglich gemacht, bevor er in den allgemeinen Nutzerbetrieb übergeht. Auch hier streben wir an, Unternehmen insbesondere auch aus NRW die Möglichkeiten zum Training und der Nutzung von KI-Basismodellen zur Verfügung zu stellen.

Welche Auswirkungen hat die Entwicklung von Next Generation Computing auf die Ausbildung und Qualifikation von Fachkräften in der IT-Branche?

Für das Next Generation Computing brauchen wir eine Generation von gut ausgebildeten und spezialisierten Fachkräften. Dies betrifft die Erforschung und Entwicklung neuer Computing-Konzepte ebenso wie die Integration der Bauteile und Programmierung der neuartigen Computing-Systeme. Es werden Fachkräfte in Ausbildungsberufen, Informatik- und IT-Spezialistinnen, aber auch Physikerinnen, Softwareingenieure und Elektrotechnikerinnen benötigt. Am Forschungszentrum Jülich bieten wir mit dem Dualen Studiengang zur/zum mathematisch-technischen Softwareentwicklerin in eine Fachausbildung an, in der wir auch die Programmierung von Quanten- oder Neuromorphen Computern immer weiter integrieren werden. Wichtig ist aber auch die Befähigung der Gesellschaft zu einem bewussten Umgang mit neuen Computingtechnologien zum Beispiel im Bereich künstlicher Intelligenz, um deren Chancen bestmöglich nutzen zu können.

Frau Professor Lambrecht, vielen Dank für das Gespräch.





Bit by Qubit in die Zukunft von Computing

Künstliche Intelligenz boomt. Sie verspricht bahnbrechende Anwendungen, z. B. bei der Vorhersage dramatischer Wetterereignisse oder Früherkennung von Hirntumoren. Allerdings sind diese Systeme äußerst rechen- und energieintensiv. KI muss grüner werden.

Innovationen wie Autonomes Fahren, die Entwicklung neuer Therapien für Krankheiten wie Alzheimer oder Krebs, präzise Wettervorhersagen und die Optimierung von Materialien für Batterien, Magnete oder Solarmodule – all diese Entwicklungen stellen besondere Anforderungen an die dafür nötigen Computersysteme. Und die erfordern für die immense Rechenleistung auch viel Energie. Die deutschen Rechenzentren haben mittlerweile einen Anteil von knapp vier Prozent am deutschen Stromverbrauch – Tendenz steigend. Effizientes Rechnen hat dadurch in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Um das Höchstleistungsrechnen zukunftsfähig zu machen, werden am Forschungszentrum Jülich Computing-Systeme entlang der gesamten Bandbreite der Forschung entwickelt. So ist mit der Zeit ein Computer-Ökosystem entstanden, das aus einer modularen Supercomputer-Architektur und Future-IT wie Quanten- und Neuromorphes Computing besteht. Eine solche einzigartige Recheninfrastruktur bietet enormes Potenzial für interdisziplinäre Forschungsprojekte und Anwendungen für Wissenschaft und Industrie.

Was können diese Computersysteme und wo kommen sie zum Einsatz?

Energieeffizientes Supercomputing

Moderne Supercomputer sind unerlässliche Instrumente der heutigen Forschung, insbesondere für KI, Simulationen und Datenanalyse. Das Jülich Supercomputing Centre (JSC) im Forschungszentrum Jülich betreibt und entwickelt Superrechner der höchsten Leistungsklasse. Die Supercomputer JUWELS und JURECA gehören zu den aktuell leistungsstärksten Superrechnern der Welt. Sie werden beispielsweise in der Forschung genutzt, um Medikamente weiterzuentwickeln, indem Reaktionen beim Aufeinandertreffen von potenziellen Wirkstoffen auf ein Protein simuliert werden. Möglich ist das durch die Rechenpower und die Feinauflösung der Supercomputer. Im JSC verfolgen die Forschenden zur Lösung komplexer Fragestellungen einen besonderen Ansatz bei der Zusammenstellung der Rechnersys-

teme. Während andere Hoch- und Höchstleistungsrechner vorwiegend auf einer großen Anzahl von universellen Prozessoren (CPUs) rechnen, sind die Systeme des JSC modular aufgebaut. Hier werden, neben CPU-Clustern Grafikprozessoren (GPU-Booster) in die Systeme integriert. Die sind insbesondere bei der Verarbeitung großer Datenmengen, zum Beispiel beim Maschinellen Lernen, effizienter als CPUs.

Jülichs neuester Rechner, das Exascale-System JUPITER, wird neben einem CPU-Cluster zusätzlich mit einem GPU-Booster aus 24.000 Grafikprozessoren ausgestattet sein. JUPITER soll als erster Supercomputer in Europa die Marke von einem Exaflop durchbrechen, was einer Trillion Rechenoperationen pro Sekunde entspricht. Das System wird damit eines der weltweit leistungsstärksten Rechner für Anwendungen im KI-Bereich sein. Bei Berechnungen mit acht Bit, wie sie für das Trainieren von KI-Modellen üblich sind, soll die Rechenleistung auf deutlich über 70 Exaflops steigen. Die enorme Rechenleistung von JUPITER soll dazu beitragen, die Grenzen wissenschaftlicher Simulationen zu erweitern und große KI-Modelle zu trainieren – zum Beispiel Klimasimulationen, Strömungsmechanik-Simulationen, oder Molekulardynamik-Simulationen. Das finale System wird im zweiten Halbjahr dieses Jahres schrittweise installiert und wissenschaftlichen Anwenderinnen und Anwendern zunächst im Rahmen des JUPITER Research and Early Access Program (JUREAP) zugänglich gemacht, bevor es Anfang 2025 in den allgemeinen Nutzerbetrieb übergeht.

Wie steht es um den Energiebedarf von JUPITER? Erfreulich gut. Ein erster Baustein des Exascale-Systems belegte den ersten Platz der Green500-Liste der energieeffizientesten Supercomputer, die im Mai auf der Internationalen Supercomputing-Konferenz ISC veröffentlicht wurde. Entscheidend für die Effizienz ist auch hier der Einsatz von Grafikprozessoren und die Tatsache, dass es gelungen ist, wissenschaftliche Anwendungen für die Berechnung auf Grafikprozessoren zu

optimieren. Außerdem ist das modulare Rechenzentrum, in dem JUPITER untergebracht wird, darauf ausgelegt, die beim Kühlen anfallende Wärme auszukoppeln und zum Heizen der Gebäude auf dem Campus des Forschungszentrums Jülich zu nutzen.

Quantencomputer: Effizienz durch Gleichzeitigkeit

Effizient sind auch Quantencomputer, denn sie sind die Meister der Gleichzeitigkeit. Während Bits, die kleinsten Bausteine eines herkömmlichen Computers, entweder 0 oder 1 darstellen, können die Recheneinheiten von Quantencomputern, die Qubits, diverse Zustände gleichzeitig repräsentieren. Das hat den entscheidenden Vorteil, dass Quantencomputer zum Beispiel bei der Durchsuchung von Datenbanken eine massive Anzahl von Suchoperationen gleichzeitig durchführen können, während klassische Computer jeden Eintrag in der Datenbank einzeln durchsuchen müssen. Quantencomputer sind daher besonders vielversprechend, um Optimierungsaufgaben für Verkehrsnetze oder Produktionsabläufe in Fabriken zu lösen oder beispielsweise chemische Reaktionen von Wirkstoffen vorherzusagen, damit Forschende neue Medikamente schneller entwickeln können.

Darin steckt eine große Chance für Wissenschaft und Wirtschaft, aber auch noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Welche Technologie sich am Ende durchsetzt, ist noch offen. Jülich deckt das gesamte Spektrum der Forschung ab – von der Suche nach geeigneten Quantenmaterialien über das Entwerfen von Schaltkreisen und passender Kryo-Elektronik, die für die Steuerung von Qubits in Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt von minus 273 Grad Celsius notwendig ist – der Betriebstemperatur von vielen Qubittypen.



Um Quantenmaschinen, die auf unterschiedlichen Ansätzen beruhen, für Wissenschaft und Wirtschaft zugänglich zu machen, baut das Forschungszentrum Schritt für Schritt eine Nutzerplattform als Testfeld auf: JUNIQ, die

„Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing“. JUNIQ bietet die Möglichkeit, verschiedene Quantencomputersysteme und Konzepte auf einer Plattform miteinander zu vergleichen. Teil dieser Infrastruktur sind auch die Jülicher Supercomputer, die hier mit Quantensystemen verknüpft werden. JUNIQ unterstützt Nutzerinnen und Nutzer bei der Entwicklung von Algorithmen und ihren individuellen Anwendungen fürs Quantencomputing. Bewerbungen sind jederzeit möglich, es werden aber auch Projekte ausgeschrieben.

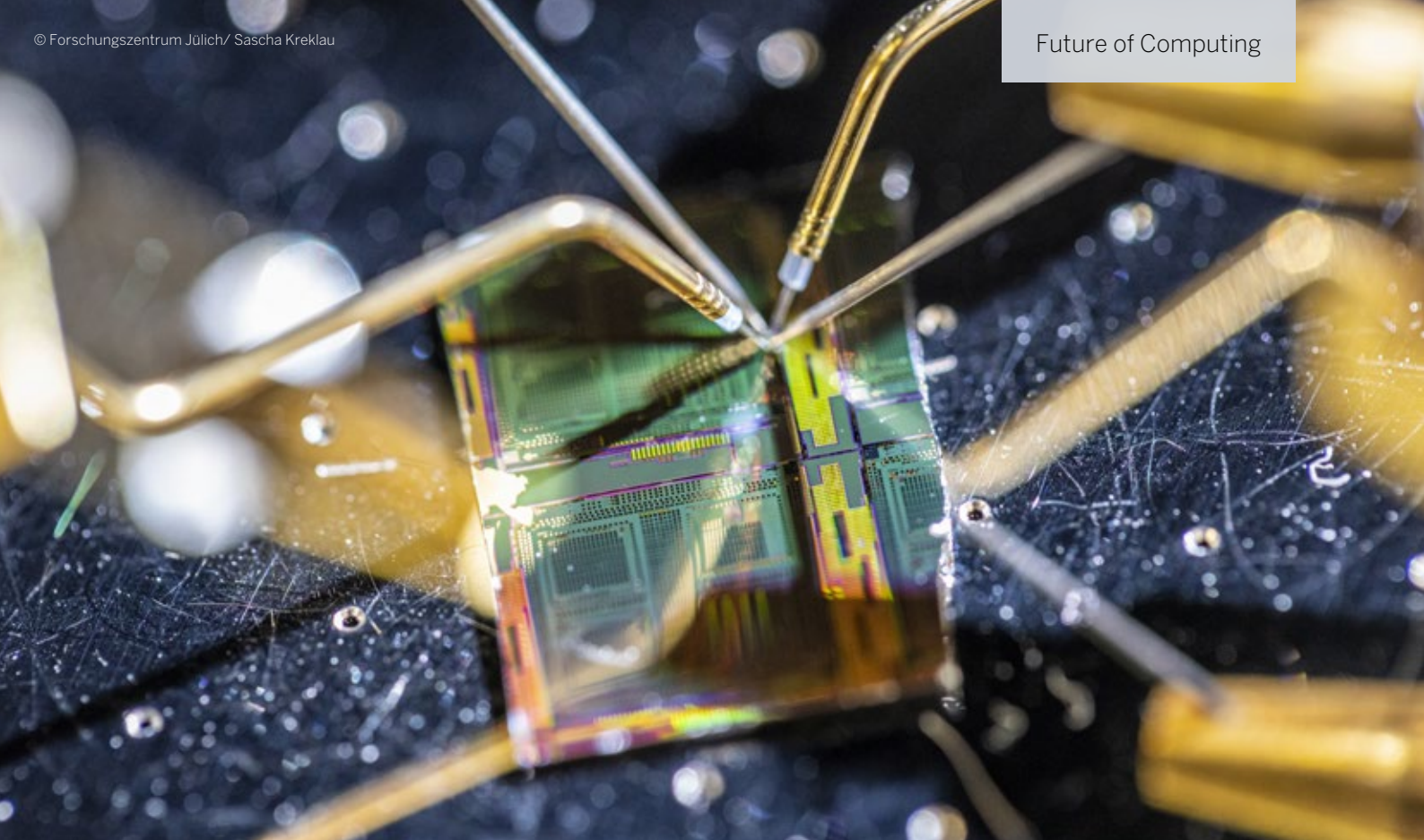
Demnächst neu im Angebot von JUNIQ ist ein weltweit einzigartiger modularer Superrechner, der aus einem Quantenmodul und einem klassischen digitalen Modul besteht. Das Jülich Supercomputing Centre und das Siegener Startup eleQtron bauen ihn gemeinsam. Die Siegener Partner entwickeln dafür einen Ionenfallen-Quantencomputer. Der Vorteil ist, anders als andere Qubits müssen Ionenfallen nicht so stark gekühlt werden. Ende 2024 soll das eleQtron-Quantencomputer-Pilotsystem mit bis zu 30 Ionenfallen-Qubits aufgebaut und anschließend in JUNIQ integriert werden. Planmäßig steht es Anwender:innen ab 2025 zur Verfügung. Für Maschinelles Lernen und das Trainieren von KI-Modellen bietet der modulare Superrechner viel Potenzial, ebenso für Optimierungsaufgaben der Industrie.

Neuromorphes Computing: Auf den Spuren des Gehirns

Beim Neuromorphen Computing orientieren sich Forschende an einem sehr energieeffizienten Vorbild: dem Gehirn. Obwohl es nur circa 1,5 Kilogramm schwer ist, kann das menschliche Gehirn komplexe Fragestellungen und Probleme lösen, die selbst die besten Rechner der Welt vor große Herausforderungen stellen. Dabei verbraucht es nur so viel wie eine Glühbirne – 20 Watt.

Das liegt daran, dass das Gehirn Daten am gleichen Ort verarbeiten und speichern kann. Bei heutigen Computersystemen hingegen sind Rechen- und Speichereinheiten getrennt, was sehr energieaufwendig ist und die Rechnungen ausbremst, weil Daten zwischen Prozessor und Speicher kontinuierlich hin und her fließen müssen. Beim sogenannten „Computing-in-Memory“-Ansatz, der sich am Gehirn orientiert, finden Rechen- und Speicheroperation auf derselben Architektur statt. Auf diese Weise können Informationen hochgradig parallel verarbeitet werden. Dadurch wurden bereits erhebliche Leistungssteigerungen bei der Bildverarbeitung, Mustererkennung und beim Maschinellen Lernen erzielt – mit weniger Energie.

Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen könnten ganz besonders von neuromorphen Systemen profitieren, da sie ähnlich konstruiert sind wie die biologischen Netzwerke, die sie nachbilden. Langfristig sind eine Vielzahl von Anwendungen denkbar, insbesondere da, wo Datenmengen in Echtzeit verarbeitet werden, beispielsweise in der fahrzeugsbasierten KI-Elektronik für Autonomes Fahren oder bei online-trainierbaren Steuerungen in der Industrie 4.0.



Neuromorphes Computing ist ein sehr interdisziplinäres Forschungsfeld: Am Forschungszentrum Jülich arbeiten Hirnforschung, Informatik, Elektronik, Chemie, Physik und Materialforschung Hand in Hand, um Computer-Chips zu entwickeln, die wie das Gehirn arbeiten. Konventionelle Computerchips basieren auf Transistoren. Im Neuromorphen Computing arbeiten Forschende an memristiven Bauelementen, die gleichzeitig Daten verarbeiten und speichern können. Ein solcher „Widerstand mit Gedächtnis“ ähnelt den Synapsen in natürlichen Nervenzellen und imitiert ihr Verhalten. Die Elemente sind somit lernfähig, wenn sie immer wieder vor vergleichbare Herausforderungen gestellt werden.

Future Computing: Innovations-Booster für NRW

Große Superrechner-Infrastrukturen sind unverzichtbare Instrumente der modernen Forschung und notwendig, um Künstliche Intelligenz als starken Motor der Entwicklung für alle Bereiche der Gesellschaft zu nutzen. Das Forschungszentrum Jülich ist auf dem besten Weg, das KI-Zentrum Deutschlands und ein europäischer Magnet zu werden: Es hat die Rechenpower für die Entwicklung und das Training großer KI-Modelle, kluge Köpfe, die sowohl KI entwickeln als auch anwenden, und die Daten aus den verschiedenen Forschungsdomänen. Diese besondere Verbindung nutzt es für den Aufbau einer starken europäischen KI-Community. Das Forschungszentrum unterstützt damit die Vision des Landes Nordrhein-Westfalen, das Silicon Valley Deutschlands zu werden und arbeitet zu diesem Zweck eng mit Partnern in Wissenschaft und Wirtschaft zusammen, etwa in EIN Quantum NRW, dem Quantencomputing-Netzwerk in Nordrhein-Westfalen. Die Leitidee dabei: Nur wenn alle Stakeholder zusammenwirken, kann Future IT ein echter Innovations-Booster für das

Land werden und helfen, globalen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen. ■



Ansprechpartner:

Anna Tipping

Forschungszentrum
Jülich



Können Sie den QR-Code nicht lesen?

Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

Forschungszentrum Jülich

Als Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft erforschen wir mit 7200 Beschäftigten interdisziplinär die digitalisierte Gesellschaft, ein klimaschonendes Energiesystem und nachhaltiges Wirtschaften. Wir konzentrieren natur-, lebens- und technikwissenschaftliche Forschung auf die Bereiche Information, Energie und Bioökonomie. Diese verknüpfen wir mit Expertise im Höchstleistungsrechnen sowie Künstlicher Intelligenz unter Einsatz einzigartiger wissenschaftlicher Infrastrukturen.

www.fz-juelich.de

Skalierbare Halbleiter-Quantencomputer durch Elektronen-Shuttling

Die Erschließung der Potentiale von Quantencomputing benötigt um Größenordnungen mehr Quantenbits, als heutige Systeme absehbar erzielen können. ARQUE Systems nutzt Elektronen-Shuttling zur Realisierung einer skalierbaren Quantencomputerarchitektur.

Quantencomputing stellt durch Ausnutzung von quantenmechanischen Phänomenen einen grundlegenden Paradigmenwechsel für die Informationsverarbeitung dar und kann die Lösung zahlreicher hochgradig industrie-relevanter, derzeit in der Praxis unlösbarer Rechenprobleme ermöglichen. Die ausgenutzten Quanteneffekte entziehen sich nicht nur der Alltagserfahrung, sondern treten zudem nur auf kleinsten Größenskalen in Erscheinung und sind gleichzeitig empfindlich gegenüber äußeren Störungen. Daher ist die Entwicklung eines Quantenprozessors mit besonderen Anforderungen an u.a. Herstellungsprozesse und Materialgüte sowie Kontrollelektronik und Betriebsbedingungen verbunden. Quantenbits (Qubits), die elementaren Bauelemente eines Quantencomputers, sind daher unweigerlich mit Fehlern behaftet, die durch Quantenfehlerkorrekturverfahren ausgeglichen werden können, indem logische Qubits für die Implementierung von Algorithmen mittels eines Vielfachen an physikalischen Qubits kodiert werden. Daraus resultiert die Notwendigkeit von Quantenprozessoren mit mehreren Millionen von Qubits, was die Potentiale heutiger Qubit-Plattformen um viele Größenordnungen übersteigt.

Zur Lösung dieses Problems erforschen das Spin-off ARQUE Systems und dessen Heimatinstitution, das JARA-Institut für Quanteninformation der RWTH Aachen und des Forschungszentrum Jülich, gemeinsam mit Infineon Technologies sogenannte Halbleiter-Spin-Qubits, bei denen einzelne Elektronen elektrostatisch eingefangen und Elektronenspins für Rechenoperationen ausgenutzt werden. Die Qubits haben typischerweise einen Durchmesser von 100-200 nm und werden in einer Halbleiterstruktur eingefangen, indem Elektroden (≈ 50 nm Breite) auf der Oberfläche in jeweils 50 nm Abstand aufgebracht und anschließend geeignete Spannungen angelegt werden. Halbleiter-Spin-Qubits bieten den einzigartigen Vorteil, dass sie direkt mit in Deutschland verfügbarer industrieller CMOS-Technologie (Abbildung 1) kompatibel sind: der einzigen Technologie, die es erlaubt, viele Millionen identischer Kopien nanoskaliger Grundbausteine, den Transistoren, auf kleinster Fläche herzustellen.



Abbildung 1: Reinraum von Infineon Technologies, in dem mittels industrieller CMOS-Fabrikationsprozesse Halbleiter-Spin-Qubits hergestellt werden können.
© Infineon Technologies AG

Der erfolgreiche Nachweis der für Quantenfehlerkorrektur erforderlichen Ein- und Zwei-Qubit-Operationen ist für Halbleiter-Spin-Qubits bereits erfolgt. Die nächste Aufgabenstellung ist nun die Skalierung zu einer für erste Anwendungen benötigten Anzahl von mindestens 100 Qubits. Eine zentrale Herausforderung ist dabei die kurze Reichweite (≈ 100 nm) der sogenannten Austauschwechselwirkung, eines physikalischen Effekts mittels dessen typischerweise Zwei-Qubit-Operationen implementiert werden. Dadurch erhöht sich die Dichte an notwendigen Kontakten von der Qubit-Ebene zur Kontrollelektronik bereits bei einstelligen Anzahlen von Qubits derart, dass selbst mit modernster CMOS-Technologie eine Kontaktierung der Elektroden äußerst schwierig wird. Zudem müssen Halbleiter-Spin-Qubits bei Temperaturen knapp oberhalb des absoluten Nullpunkts betrieben werden, sodass die maximale Anzahl von individuellen Spannungssignalen durch die Kühlleistung limitiert ist.

ARQUE Systems löst dieses Problem durch den Einsatz von Elektronen-Shuttling: Elektronen werden zwischen Orten bewegt, an denen Qubits manipuliert werden, um lokale Zwei-Qubit-Operationen zu ermöglichen. Realisiert wird das Elektronen-Shuttling durch das Bauelement Quantum Bus (QuBus), das – wie ein Förderband in der Nanowelt – durch Zusammenschaltung von Elektroden auf Ebene des Quantenprozessors mittels lediglich vier Spannungssignalen beliebige Distanzen überbrücken kann und somit die Dichte der notwendigen Kontakte

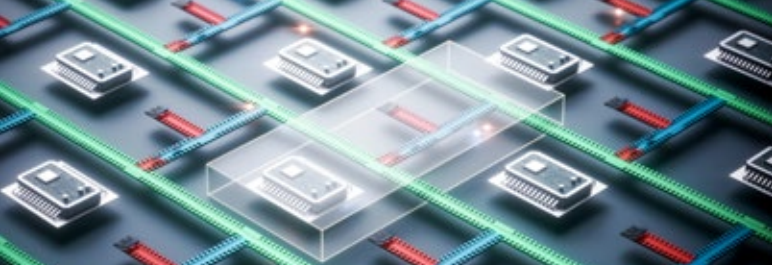


Abbildung 2: SpinBus-Architektur basierend auf Einheitszellen (transparente Box), die zur Integration von Kontrollelektronik in der Größe beliebig skaliert werden können. Grüne QuBus-Elemente werden zur Kopplung von Einheitszellen verwendet, rote und blaue QuBus-Elemente für jede Einheitszelle separat zur Implementierung aller Qubit-Operationen. © JARA-Institut für Quanteninformation (PGI-11), Forschungszentrum Jülich GmbH

signifikant reduziert. In kürzlich durchgeführten und in Nature Communications publizierten Demonstrationsversuchen konnten als zentrale Meilensteine der Transfer eines Spin-Quantenzustands über eine Shuttling-Distanz von 560 nm mit mehr als 99 % Erfolgswahrscheinlichkeit sowie der Transfer und die Speicherung von bis zu 34 einzelnen Elektronen über eine Strecke von 19 µm nachgewiesen werden.

Um echte Skalierbarkeit zu ermöglichen, hat ARQUE Systems basierend auf dem QuBus-Shuttling-Element die SpinBus-Architektur (Abbildung 2) für einen Quantenprozessorchip (Abbildung 3) entwickelt^[1]. Den Grundbaustein bildet die Einheitszelle, die alle wichtigen Qubit-Funktionalitäten bereitstellt, mindestens mit einem Qubit besetzt wird und beliebig in der Größe skaliert werden kann. Der Quantenprozessorchip besteht anschließend aus modular aneinander gefügten Einheitszellen. Kurzfristig können in der SpinBus-Architektur basierend auf heute verfügbarer CMOS-Technologie, den erzielbaren Qubit-Eigenschaften und der vorhandenen Kühlkapazität bis zu 144 Qubits mittels Raumtemperatur-Kontrollelektronik realisiert und somit erste wirtschaftlich relevante Umsätze erzielt werden. Einheitszellen können zudem flexibel in ihrer Größe dimensioniert werden, so dass sie perspektivisch über ausreichend Platz für integrierte Kontrollelektronik bei kryogenen Temperaturen verfügen. Durch die unmittelbare Integration der Kontrollelektronik können relevante Skalierungsgrenzen, z.B. die begrenzte Anzahl an Kontrollleitungen von Raumtemperatur-Kontrollelektronik zu den Qubits, überwunden werden, um Quantencomputer mit Millionen von Qubits zum Einsatz zu bringen und vielfältige Anwendungen mit signifikantem wirtschaftlichen Wachstumspotential ermöglichen zu können.

Die Verwertung der Forschungsaktivitäten des JARA-Instituts für Quanteninformation und des mehr als 20 Patentfamilien umfassenden Patentportfolios erfolgt durch ARQUE Systems. Als einziges Bootstrapped Start-up im Bereich Quantencomputing wird ARQUE Systems mit Infineon Technologies die Kommerzialisierung des Gesamtsystems vom Quantenprozessor bis zur Kontrollelektronik vorantreiben und plant bis zum Jahr 2027 ein 25-Qubit-System auf den Markt zu bringen. ■

Referenzen

- [1] Künne, Willmes *et al.*, „The SpinBus architecture for scaling spin qubits with electron shuttling.“ *Nat. Commun.* **15**, 4977 (2024).
 [2] Langione *et al.*, „Where will Quantum Computers create value and when?“, Boston Consulting Group (2019).



Abbildung 3: Quantenprozessor-Prototyp auf spezifisch entwickelter gedruckter Leiterplatte wie zur Demonstration des Transfers eines Spin-Quantenzustands über eine Distanz von 560 nm mit 99 % Erfolgswahrscheinlichkeit verwendet. © ARQUE Systems GmbH

Autoren: Dr. Markus Beckers und Matthias Künne – ARQUE Systems GmbH



Ansprechpartner:
Dr. Markus Beckers
 ARQUE Systems GmbH



Können Sie den QR-Code nicht lesen?
 Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

ARQUE Systems GmbH

Technologische Basis

- Halbleiter-Spin-Qubits kompatibel mit etablierter CMOS-Technologie aus Deutschland
- Nachgewiesene Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konkurrierenden Qubit-Plattformen und ausgezeichnete Eignung für Quantenfehlerkorrektur

Innovation

- Qubit-Kopplung über beliebige Distanzen mittels Elektronen-Shuttling im QuBus
- Erschließung des Skalierungspotentials von Halbleiter-Spin-Qubits durch die SpinBus-Architektur basierend auf modularen Einheitszellen

Primäre Anwendungsfelder

- Konkurrenzfähige Demonstratoren auf Basis heutiger Technologie...
- ... sowie die flexible Integration von kryogener Kontrollelektronik für perspektivisch Millionen von Qubits

Impact

- Erschließung von industrierelevanten Anwendungen mit geschätztem Marktvolumen von 450-850 Mrd. USD ^[2]

www.arque.systems

Quantentechnologie: Revolutioniert Elektromobilität und sichert die digitale Zukunft

Erfahren Sie, wie die Quantentechnologie die Zukunft gestaltet: Von revolutionärem Quantumsensing in der Elektromobilität bis hin zu neuen Perspektiven in der Datenverarbeitung und digitalen Sicherheit.

Die rasante Entwicklung in der Quantenphysik verändert unsere technologische Landschaft grundlegend. Dieser Artikel widmet sich den revolutionären Bereichen des Quantumsensings und Quantencomputings, illustriert durch die innovativen Projekte RaQuEI und OCQNV. Wir beleuchten, wie diese Technologien die Elektromobilität und Datenverarbeitung beeinflussen und gleichzeitig die digitale Sicherheitslandschaft neu gestalten.

Quantumsensing im RaQuEI-Projekt – Ein neues Kapitel in der Magnetfeldsensorik: Das RaQuEI-Projekt bringt in der Magnetfeldsensorik durch ein neues, rein-optisches Ausleseverfahren, basierend auf der Photolumineszenz von NV-Zentren in Diamanten, einen Durchbruch. Diese Methode, die magnetfeldabhängige Fluoreszenz nutzt und Mikrowellenstrahlung vermeidet, macht Sensoren günstiger und effizienter. Zudem ermöglicht die optische Ansteuerung den Einsatz eines fasergekoppelten, robusten Sensorkopfes aus nicht-magnetischen Materialien, der präzise Magnetfeldmessungen auch unter schwierigen Bedingungen ermöglicht.

Quantumsensing im Dienste der Elektromobilität: Das RaQuEI-Projekt entwickelt präzise, shunt-lose Stromsensoren für E-Fahrzeuge und steigert deren Effizienz/Sicherheit durch genaue Lade-/Alterungsstand-Messungen.

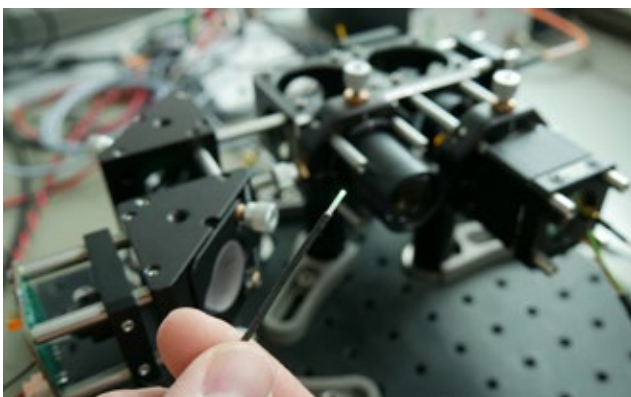


Abbildung 1: Glasfaser im Einsatz: Kernstück der innovativen, optischen Messung für präzise und störungsresistente Erfassung in anspruchsvollen Umgebungen.
© Ludwig Horsthemke, M.Sc., FH Münster

Diese Sensoren, einsetzbar über verschiedene Spannungsbereiche, sind durch ihre galvanische Isolation vielseitig nutzbar. Unter Leitung von Elmos Semiconductor SE und in Zusammenarbeit mit Institutionen wie der FH Münster sowie Partnern wie duotec GmbH und Quantum Technologies GmbH, die bereits marktreife Produkte bieten, fördert RaQuEI die Anwendung von Quantentechnologien in der Elektromobilität. „Der weltweit erste Quantensensor-Chip, entwickelt für hohe Automobilstandards, entstand in diesem Projekt“, sagt Dr.-Ing. Bernd Burchard von Elmos.

Das OCQNV-Projekt: Brückenbau zwischen Quantencomputing und konventioneller Technologie: In Kooperation mit Prof. Dr. Markus Gregor (FH Münster) erforscht dieses Projekt Quantumsensing und die Verbindung von CMOS mit optischen Technologien. Alternativen zu Laseranregungen werden untersucht; ein LED-basierter Sensor bietet hohe Kosteneffizienz und niedrigen Verbrauch (0,1 W), was ihn vielseitig macht. Mit Sensitivitäten von 28 nT/√Hz und theoretisch 3 nT/√Hz verbessert er die Zugänglichkeit von Quantenmagnetometern. Das OCQNV-Projekt entwickelt Schlüsselschnittstellen zwischen Optik und CMOS, nutzt 3D-Druck (Nano Scribe) für optische Komponenten (Featuresize 100 nm), um die Integration in photonische Strukturen zu erleichtern.

Quantenzufallszahlengeneratoren: Ein Schlüssel zu digitaler Sicherheit: Ein weiterer, zukunftsweisender Forschungsbereich in unserem Labor, der sich nahtlos in die zuvor genannten Projekte einfügt, ist die Erforschung und Entwicklung von Quantenzufallszahlengeneratoren (QRNGs). Diese Technologie nutzt die Prinzipien der Quantenmechanik zur Erzeugung echter Zufallszahlen, die eine entscheidende Rolle in der IT-Sicherheit spielen. Im Vergleich zu herkömmlichen Pseudozufallszahlengeneratoren, die auf deterministischen Algorithmen basieren und somit potenziell vorhersagbare Zufallszahlen generieren, bieten QRNGs durch die Nutzung quantenmechanischer Effekte eine echte Zufälligkeit. Dies ist insbesondere für die Verschlüsselung und Sicherheit von Datenübertragungen von unschätzbarem Wert.



Abbildung 2: Innovationsmoment mit den Teams aus HLB (Prof. Glösekötter), QuTe (Prof. Gregor) und LEEF (Prof. Sanders), die unseren interdisziplinären Ansatz und das Engagement für die technologische Zukunft verkörpern. © Jana Bade, FH Münster

In mehreren Abschlussarbeiten, die in Kooperation mit der Elmos Semiconductor SE in unserem Labor angefertigt wurden, konnten wir demonstrieren, wie QRNGs zu einer sicheren Kommunikation beitragen können. Dabei wurde ein Konzept für einen monolithischen, siliziumbasierten QRNG entwickelt und ein entsprechender Demonstrator umgesetzt. Das entwickelte Konzept eröffnet die Möglichkeit der Integration von QRNGs in Application-Specific Integrated Circuits (ASICs) für die Automobilindustrie und stellt somit einen weiteren Meilenstein unserer Forschungsarbeit dar. Eine Integration verspricht nicht nur eine Steigerung der Systemeffizienz und -sicherheit, sondern auch eine kosteneffiziente Implementierung, die die breite Anwendbarkeit beispielsweise in modernen Fahrzeugen ermöglicht.

Fazit: Die Realisierung einer visionären Zukunft durch Quantentechnologie. Die vorgestellten Durchbrüche in den Bereichen Quantumsensing, Quantencomputing und Quantenkryptographie sind nicht nur beeindruckende wissenschaftliche Errungenschaften; sie markieren den Auftakt zu einer Ära, in der Technologie unsere Welt auf bisher unvorstellbare Weise prägen wird. Die Projekte RaQuEI, OCQNV und die bahnbrechende Entwicklung von Quantenzufallszahlengeneratoren (QRNGs) illustrieren eindrücklich, wie die enge Zusammenarbeit zwischen akademischer Forschung und Industriepartnern innovative Lösungen hervorbringt, die sowohl die Effizienz und Sicherheit unserer Fahrzeuge als auch die Integrität unserer digitalen Infrastrukturen grundlegend verbessern.

Die hier vorgestellten Technologien haben das Potenzial, nicht nur die technische Landschaft zu revolutionieren, sondern auch gesellschaftliche Auswirkungen mit sich zu bringen – von der Erhöhung der Verkehrssicherheit durch zuverlässigere Sensoren in Elektrofahrzeugen bis hin zum Schutz unserer persönlichen Daten durch zukunftsfähige Verschlüsselungsmethoden.

Die Quantentechnologie stellt somit einen Schlüssel zu einer sichereren, effizienteren und vernetzten Welt dar. Ihre Anwendungsbereiche reichen weit über die heutigen Konzepte hinaus und öffnen Türen zu neuen Möglichkeiten. Die Erfolge in den Projekten RaQuEI und OCQNV zeigen, dass die Zukunft näher ist, als wir denken.

Danksagung: Die Projekte RaQuEI (FZK: 13N15498) und OCQNV (FZK: 13N15971) wurden durch das BMBF im Rahmen der Programme „Quantensensorik, -metrologie, -bildung“ und „Forschungsförderung an Hochschulen/Forschungseinrichtungen mit innovativen Laboren“ unterstützt. ■

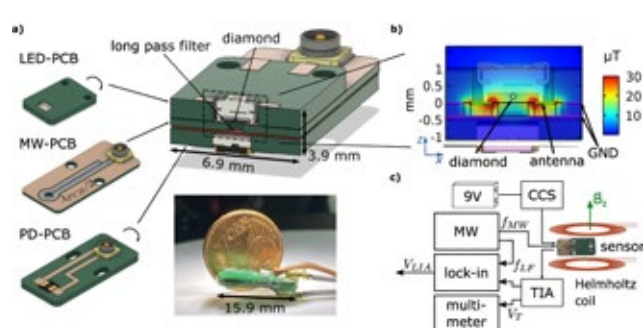


Abbildung 3: ((a) Sensoraufbau mit LED-, MW- und PD-Platine, separiert durch eine 100 μm Filterfolie, Größe: $6,9 \times 3,65 \times 15,9 \text{ mm}^3$. (b) Feldsimulation bei 10 dBm MW. (c) Schaltung: 9V für LED-Strom und MW-Demodulation im LIA, unterstützt durch TIA. © Jens Pogorzelski, M.Sc., FH Münster



Ansprechpartner:
Prof. Dr.-Ing.
Peter Glösekötter
Fachhochschule
Münster



Können Sie den QR-Code nicht lesen?
Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

FH Münster, Labor für Halbleiterbauelemente und Bussysteme

Technologische Basis

- Optisch basierte Quantensensorik und Quantencomputing-Infrastruktur
- Glasfaserbasierte Quantensensoren für extreme Umgebungsbedingungen
- Integration und Anwendung von QRNGs für echte Zufälligkeit

Innovation

- Shuntlose Strommessung mittels Quantentechnologie
- Einsatz in widrigen Umgebungen durch fortschrittliche Sensorik
- QRNG-basierte Innovationen für verbesserte Datensicherheit und Quantencomputing

Primäre Anwendungsfelder

- Industrielle Automation und Prozesskontrolle durch Quantensensorik
- Überwachung der Elektromobilität mit präzisen Stromsensoren
- Verbesserung der digitalen Sicherheit mittels QRNG in der Kryptographie

Impact

- Revolution in der Strommessung und Sicherheitsverbesserung durch QRNGs
- Erhöhung der Sicherheit und Effizienz in kritischen Anwendungen
- Beschleunigung des Fortschritts in Quantentechnologien und deren Anwendungen

https://www.fh-muenster.de/eti/labore_forschung/be/

Quantenzufallszahlen: Die Zukunft der Daten- sicherheit



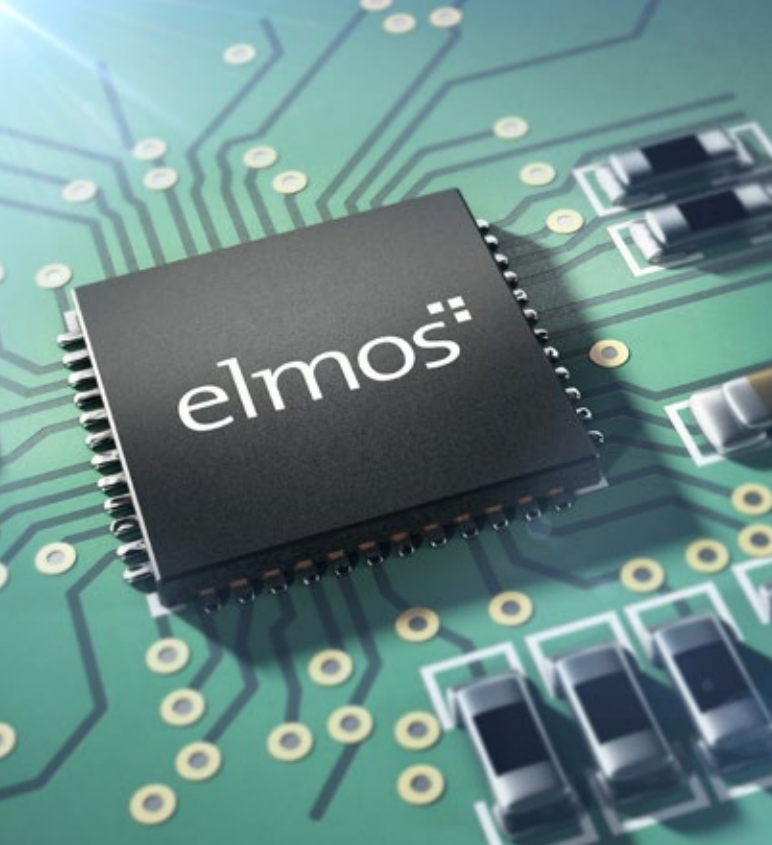
Quantencomputer eröffnen neue Möglichkeiten – aber sie identifizieren auch neue Sicherheitslücken, denn bisherige Verschlüsselungstechnologien genügen nicht mehr. Die Elmos Semiconductor SE entwickelt daher robuste Lösungen mit echten Quantenzufallszahlen.

Ob beim Senden einer WhatsApp-Nachricht, Übermitteln der digitalen Patientenakte oder beim Over-the-Air-Update der Software für Smartphone und Auto – der Austausch von Daten wird mithilfe von digitalen Schlüsseln gesichert. Digitale Schlüssel sind zufällige Zeichenketten, also Folgen von 0 und 1. Wer den Schlüssel kennt, kann sensible Daten abfangen oder sogar schädliche Software installieren. Daher darf der Schlüssel zum einen nicht vorhersagbar sein, sodass nicht bereits im Vorfeld der nächste Schlüssel für einen Angriff bereitgestellt werden kann und zum anderen muss er komplex, also lang genug, sein, damit er nicht durch einfaches Probieren erraten werden kann.

Es gibt verschiedene Methoden, solche Folgen von 0 und 1, auch Zufallszahl genannt, zu generieren. In vielen Programmiersprachen und Tabellenkalkulationsprogrammen gibt es Funktionen, die über einen Algorithmus eine Zufallszahl erzeugen. Diese ist allerdings nur augenscheinlich zufällig und wird daher auch als Pseudozufallszahl bezeichnet. Generatoren für Pseudozufallszahlen (engl. Pseudo-Random Number Generators, PRNGs) erzeugen Zahlen mit einer Periodizität und müssen mit einem Startwert (engl. Seed) initialisiert werden. Dabei liefern PRNGs bei gleichem Startwert immer dieselbe Zahl, sind daher deterministisch bzw. vorhersagbar. Ist ein Teil der Zufallszahl oder sogar das Seed bekannt, kann ein Angreifer demnach den gesamten Schlüssel rekonstruieren.

Für eine erhöhte Zufälligkeit und damit einhergehende erhöhte Sicherheit werden Generatoren für sogenannte echte Zufallszahlen (engl. True Random Number Generators, TRNGs) benötigt. TRNGs basieren auf klassischen physikalischen Effekten und extrahieren Zufallszahlen aus chaotischen Systemen, beispielsweise aus thermischem Rauschen oder aus einem Jitter in elektrischen Schaltungen. Ein weiteres, geläufigeres Beispiel ist der Münzwurf. Diese Systeme sind komplex und unterliegen keiner Periodizität. Jedoch kann ein Angreifer, wenn er Zugriff auf den TRNG hat, den entsprechenden Parameter ebenfalls messen und so die Zufallszahl abgreifen oder bei bekannten Systembedingungen sogar das Ergebnis vorhersagen. Mit der Entwicklung von Quantencomputern wird dieses Szenario immer wahrscheinlicher.

Um wirklich sichere Zufallszahlen zu erzeugen, muss daher gewährleistet werden, dass das Ergebnis nicht vorhersagbar ist und nicht ohne eine Störung des Systems von außen gemessen werden kann. Dieses Ziel ist nach aktuellem Verständnis nur durch die Nutzung quantenmechanischer Effekte zu erreichen. Auch Quantencomputer können das Ergebnis dieser Prozesse nicht prognostizieren. Radioaktiver Zerfall ist ein Beispiel für so einen quantenmechanischen Prozess, bei dem Strahlung spontan und zufällig emittiert wird. Eine Nutzung über den experimentellen Laboraufbau hinaus ist jedoch aus offensichtlichen Gründen nicht praktikabel.



Moderne Quantenzufallszahlengeneratoren (engl. Quantum Random Number Generators, QRNGs) nutzen die quantenmechanischen Eigenschaften von Lichtteilchen, auch Photonen genannt. Die Grundbausteine für so einen QRNG bilden ein Emittierer, welcher nur wenige oder sogar einzelne Photonen entsendet, und ein hochsensitiver Sensor, der diese wenigen Lichtteilchen detektieren kann. Gemeinsam bilden sie die Entropiequelle des QRNGs. Die Photonen werden beispielsweise über einen Strahlteiler auf zwei Detektoren gelenkt. Je nachdem welcher Detektor auslöst wird eine 0 oder eine 1 registriert. Dabei führen Abweichungen im Teilungsverhältnis des Strahlteilers oder der Detektionseffizienz der Detektoren zu einer Verzerrung. Um dieses Problem zu umgehen, gibt es Systeme mit nur einem Detektor. Hier entscheidet der Zeitpunkt, zu dem das Photon auf den Detektor trifft, über 0 und 1. Auf der Detektor-Seite haben sich CMOS (engl. Complementary Metal Oxide Semiconductor) basierte Sensoren aus Silizium etabliert. Wegen ihrer hohen Sensitivität und der Möglichkeit, auch einzelne Photonen zu detektieren sind hier insbesondere Einzelphotonen-Avalanche Dioden (engl. Single Photon Avalanche Diodes, SPADs) zu nennen. Auf der Emittierer Seite können neben echten Einzelphotonenquellen auch herkömmliche LEDs mit geringer Anregungsleistung verwendet werden. Der in vielen Fällen makroskopische Aufbau der Entropiequelle aus mehreren Bauteilen und Mikrochips bietet jedoch an den Verbindungsstellen verschiedene Angriffspunkte für einen externen Zuhörer oder Störer. Zudem wird meist eine komplexe Verbindungstechnik oder ein sperriges Gehäuse benötigt, was Kosten verursacht und die Anwendungsmöglichkeiten beschränkt.

Daher hat die Elmos Semiconductor SE eine innovative Lösung entwickelt, welche die Integration der Entropiequelle auf einem einzigen CMOS Chip ermöglicht. Das vollständig Silizium-basierte QRNG Konzept wurde bereits in verschiedenen Abschlussarbeiten in Kooperation

mit dem Labor für Halbleiter-Bauelemente und Bussysteme der FH Münster beleuchtet. Es wurde ein Demonstrator entwickelt, der in verschiedenen Testszenarien die Zufälligkeit der generierten Zahlen bestätigt. Auch eine Erhöhung der Integrationsstufe wurde untersucht. Durch das besondere Design der Entropiequelle, ist diese leicht skalierbar, sodass eine Parallelisierung der Zufallszahlgeneration und Steigerung der Ausgabegeschwindigkeit möglich ist. Die Auswerteelektronik zur Erzeugung der Zufallszahl kann ebenso direkt on-Chip realisiert werden. Dabei kann die Elmos Semiconductor SE auf ihre Erfahrung als Anbieter von Mixed-Signal Halbleiterprodukten zurückgreifen. Der resultierende QRNG ist effizient und sicher und hat zudem ein kompaktes Mikrochip-Format.

Danksagung: Teile der Arbeiten werden gefördert im Rahmen des IPCEI MEKT durch das BMWK, der EU im Rahmen von „NextGenerationEU“, durch MWIKE (NRW), SenWiEnBe (Berlin), WM BW (Baden-Württemberg) MWAE (Brandenburg) sowie durch das BMBF im Rahmen des Projektes VE-DIVA-IC.



Ansprechpartner:

Julia Kölbl

Elmos Semiconductor
SE



Können Sie den QR-Code nicht lesen?

Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

Elmos Semiconductor SE

Technologische Basis

- CMOS Technologie
- Mixed-Signal Halbleiter

Innovation

- Miniaturisierung
- Integrationsdichte

Primäre Anwendungsfelder

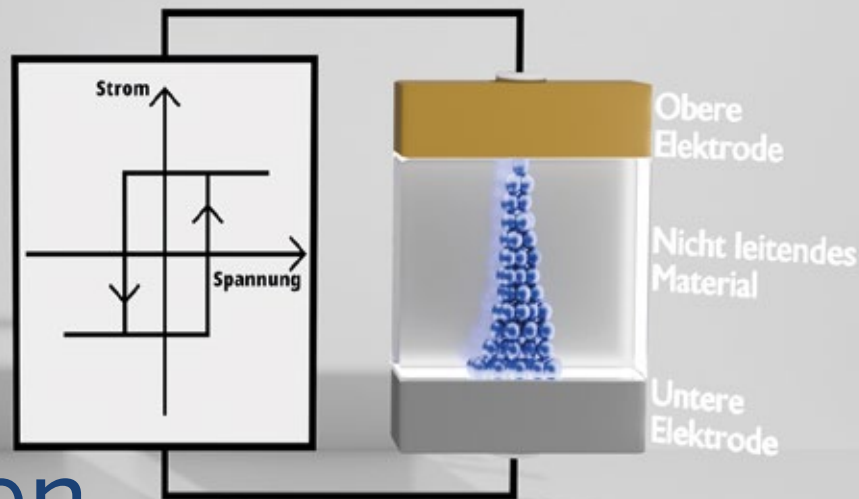
- Automotive
- Verschlüsselung

Impact

- Höhere Sicherheit
- Effizienzsteigerung

www.elmos.com

Rechnen mit Widerständen



Hardwarebasierte KI-Anwendungen der Zukunft benötigen neuartige Rechnerarchitekturen, um den Anforderungen des parallelen Rechnens gerecht zu werden. An der Universität Siegen entwickelte, memristive Bauteile und Rechennetzwerke können dabei helfen.

Durch die immer weiter fortschreitende Entwicklung komplexer Rechnerarchitekturen ergibt sich ein immenser Bedarf für fundamental neuartige Hardware zur effizienten Realisierung.

In den klassischen Computerarchitekturen gibt es eine klare Trennung zwischen Recheneinheit und Speicher. Um aktuelle und zukünftige KI-Anwendungen effizient ausführen zu können, wird hingegen Hardware benötigt, die eine Kombination aus Speicher und Recheneinheit darstellt. Die Universität Siegen entwickelt Bauelemente, sogenannte Memristoren, auf Basis amorpher Materialien, um leistungsstarke und energieeffiziente Hardware für diese Anwendungsfelder zu ermöglichen. Der Memristor stellt dabei eine Mischung aus elektrischem Widerstand und Speichereinheit dar, wobei sich der elektrische Widerstand in Abhängigkeit des vorher angelegten Signals um Größenordnungen ändert.

Forschern der Universität Siegen gelang es bereits erfolgreich, entwickelte Memristorprototypen in einer dreiwertigen Logik zu verschalten und so ternäre UND (TAND) sowie ODER (TOR) Logiken zu demonstrieren. Gegenüber konventioneller Binärlogik erhöhen sich bei dreiwertigen Logiken die möglichen Zustände exponentiell. Somit wird eine starke Vereinfachung der Recheneinheit bei gleichzeitiger Leistungssteigerung ermöglicht^[1]. Ein weiterer Vorteil der Memristoren ergibt sich dadurch, dass diese Bauteile auf klassischen Silizium-Halbleiterschips in Niedertemperaturverfahren aufgebracht und mit dieser Technologie effizient kombiniert werden können.

Die Universität Siegen erforscht weiterhin den Einsatz von Memristoren für Neuromorphe Computing Anwendungen sowie Sensorintegrationspotentiale.

Neuromorphes Computing bezeichnet dabei die Entwicklung von Computersystemen, die Aufgaben unter

Nutzung von Synapsen und Neuronen, ähnlich der Funktion des menschlichen Gehirns, lösen.

Sogenannte Generative Adversarial Networks (kurz: „GAN“), welche aktuell für das Erzeugen von KI-Bildern eingesetzt werden, könnten so zukünftig durch den Einsatz von Memristoren als rein analoge „Neuronale Netzwerke“ realisiert werden, wodurch KI-Berechnungen wesentlich effizienter durchgeführt werden könnten^[2]. Forschungsaktivitäten der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Universität Siegen zielen weiterhin darauf ab, Recheneinheiten und Sensoren in Hardware zu kombinieren, um neuartige Kamerasysteme zu entwickeln die zeitgleich Bilder aufnehmen, analysieren und bewerten. Um die aufgezeigten Anwendungen effizient umzusetzen und tiefgehend zu erforschen, werden geeignete Memristorstrukturen von den Forschenden untersucht und gefertigt. Innerhalb des aktuellen Reinraums am Lehrstuhl für Graphen-basierte Nanotechnologie unter Leitung von Prof. Haring Bolívar, werden mittels physikalischer und chemischer Gasphasenabscheidung Memristor-Mehrschichtstrukturen bestehend aus elektrisch leitenden und nichtleitenden Materialien hergestellt.

Der Universität Siegen steht ab Anfang 2025 eine hochmoderne Forschungsinfrastruktur in Form des neuen Forschungsneubaus INCYTE, das Interdisziplinäre Forschungszentrum für Nanoanalytik, Nanochemie und Cyber-physische Sensortechnologie, zur Verfügung. INCYTE umfasst 5200 m² Nutzfläche und führt drei zentrale nanotechnologische Bereiche der Universität Siegen zusammen: i.) die skalenübergreifende Materialforschung, ii.) die Sensorentwicklung und iii.) die Mikro- und Nanochemie und Technologie. Das Forschungszentrum wird einen 600 m² großen Reinraum der Klasse ISO-4 für die Nanostrukturierung und Bauelementeentwicklung umfassen.

Abb. 1 (linke Seite): Computergenerierte Darstellung einer Memristorstruktur mit einem leitfähigen Filament innerhalb eines nicht-leitenden Materials. Auf der linken Seite des Memristors wird eine Messung mit einer typischen Hysteresekurve dargestellt.

Derzeit werden für die Memristorherstellung Metalle wie Silber, Kupfer oder Platin als aktive Elektrode und amorphes Silizium, Siliziumdioxid oder Hafniumoxid als nichtleitendes Material untersucht. Je nach verwendeten Materialien, ergeben sich unterschiedliche Wirkmechanismen des Memristors. In einer der entwickelten Klassen werden durch ein elektrisches Signal, leitende Nanofilamente innerhalb des Nichtleiters ausgebildet, wodurch sich der Widerstand verändert. Diese Filamente und damit der Zustand des Memristors bleiben ohne äußere Einwirkungen bestehen und benötigen zum Halten des Zustandes keinerlei äußere elektrische Versorgung. Mit einem nachfolgend aufgetragenen elektrischen Signal umgekehrter Polarisierung werden die Nanofilamente wieder aufgelöst. Idealerweise kann in Memristoren die Bildung und das nachfolgende Auflösen der Nanofilamente beliebig oft wiederholt werden, sodass die Transition zwischen Zuständen ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit aufweist^[3].

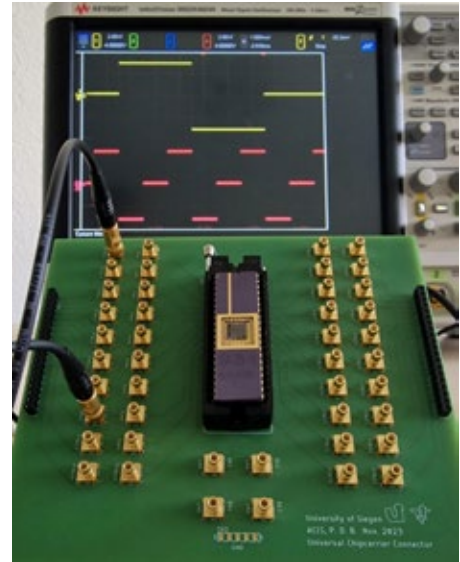
Durch die eigene Herstellung und Charakterisierung der Bauelemente in Siegen konnten bereits neue Schalteigenschaften, wie das Umschalten in verschiedene Betriebszustände von Memristoren entdeckt werden^[4]. Darüber hinaus ermöglicht die Inhouse Herstellung die unabhängige und freie Entwicklung der Memristoren für die verschiedenen Anwendungen. Um das anwendungsspezifische Zusammenspiel zwischen entwickelten Memristoren und der darunter befindlichen Auswerteelektronik zu testen und zu etablieren, wird die „TFA“ Integration genutzt. Dabei handelt es sich um die Integration und Einbettung der Memristoren auf der Oberfläche von CMOS Halbleiterchips in sogenannter Thin-Film on ASIC Technologie, einer Integrationstechnologie von Dünnschichtbauelementen, die an der Universität Siegen entwickelt und patentiert wurde^[5].

Das Design der Halbleiterchips für die Auswertung erfolgt am Lehrstuhl für Analoge Schaltungstechnik und Bildgebende Sensorsysteme unter Leitung von Prof. Choubey an der Universität Siegen und wird spezifisch auf die jeweilige Anwendung angepasst. Entwicklungen umfassen das Design für Versorgungseinheiten, Signallauf- und Weiterverarbeitungen on-chip, aber auch Verschaltungen der Memristoren selbst. Die Kombination aus Design, Simulation, Herstellung und Charakterisierung der Memristoren und Halbleiterchips unter einem Dach, ermöglicht die gezielte Optimierung und Entwicklung gänzlich neuartiger Rechnerkonzepte und -architekturen für zukünftige Anwendungen. ■

Referenzen

- [1] M. Diwan, Z. Li, G. Schiele, und B. Choubey, „Balanced Ternary Logic Gates with Memristors“, in 2022 29th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Okt. 2022, S. 1–4. doi: 10.1109/ICECS202256217.2022.9971115.
- [2] O. Krestinskaya, B. Choubey, und A. P. James, „Memristive GAN in Analog“, Sci. Rep., Bd. 10, Nr. 1, S. 5838, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-62676-7.
- [3] Z. Wang et al., „Resistive switching materials for information processing,“ Nature Reviews. Materials, vol. 5, no. 3, pp. 173–195, Jan. 2020, doi: 10.1038/s41578-019-0159-3.

Abb. 2 (rechts): Fotografie einer Memristorprobe verbunden mit einem Messaufbau. Funktionsgeneratoren liefern passende Eingangssignale, um die mit Memristoren aufgebaute ternäre Logik zu testen.



- [4] Z. Li, P. D. Börner, H. Schmidt, P. H. Bolívar, und B. Choubey, „Bidirectional Transition between Threshold and Bipolar Switching in Ag/SiO₂/ITO Memristors“, in 2022 IEEE 22nd International Conference on Nanotechnology (NANO), Juli 2022, S. 547–550. doi: 10.1109/NANO54668.2022.9928635.
- [5] „Digitale Bildsensoren Prof. Dr. Markus Böhm – Philip Morris.“ <https://www.philipmorris-stiftung.de/digitale-bildsensoren-prof-dr-markus-bohm/>

Autoren: Phil-David Börner (Hauptautor), Maurice Müller, Andreas Bablich



Ansprechpartner:
Univ. Prof. Dr.
Bhaskar Choubey
Universität Siegen



Können Sie den QR-Code nicht lesen?
Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

Universität Siegen, Lehrstuhl für Analoge Schaltungstechnik und Bildgebende Sensorsysteme

Technologische Basis

- Mikro-, Nanotechnologie
- CMOS Halbleiterchips

Innovation

- Intelligente Kamerasensoren
- Memristoren integriert im Back-End auf CMOS Elektronik

Primäre Anwendungsfelder

- KI-Hardware/Neuromorphes Computing
- Kamerasensoren

Impact

- Effizientere Berechnungen
- Höhere Integrationsdichten

<https://www.eti.uni-siegen.de/acis>

Graphen: Wende in der Chip-Technologie

Neue Möglichkeiten in der Datenkommunikation: Graphen-Photonik für Chipnetzwerke öffnet Türen zu einer effizienteren und schnelleren Verarbeitung von Informationen.

Lange Zeit nur ein Thema für Fachkreise, hat die Debatte um Energiebeschränkungen als Engpass für die Weiterentwicklung von KI-Rechenzentren nun auch öffentliche Bühnen erreicht. Tech-Giganten aus dem Silicon Valley thematisierten erst kürzlich neben dem hohen Kapitalaufwand den exponentiell steigenden Energiebedarf, der die Kapazitäten moderner Rechenzentren vor ernsthafte Herausforderungen stellt. Doch was, wenn die Limitierungen, die wir kennen, nicht das Ende, sondern der Anfang innovativer Lösungen wären?

Die Grenzen herkömmlicher, rein elektronischer Computerarchitekturen werden durch die physikalischen Eigenschaften der Materialien bestimmt. Um den wachsenden Anforderungen der Datenkommunikation ge-

recht zu werden, braucht es einen Paradigmenwechsel in der Halbleitertechnologie. Die elektronischen Verbindungen aktueller Systeme, die auf wenige Zentimeter begrenzt sind, bringen zahlreiche Herausforderungen mit sich, welche die Leistung und Effizienz beeinträchtigen.

Anstatt sich ausschließlich darauf zu konzentrieren, eine bereits an ihre Grenzen stoßende Integrationsdichte weiter zu erhöhen, liegt die Antwort in einem systematischen Umdenken: Der Schlüssel zur Erfüllung des Bedarfs an höherer Leistung liegt nicht allein in der Dichte, sondern in der Ausweitung der Netzwerke und somit in der Konnektivität zwischen den Chips – mit geringen Verlusten und hoher Bandbreite.

Abbildung 1 (linke Seite): Mitarbeiter des Graphen Teams von Black Semiconductor im neu errichteten Reinraum des Unternehmens. (Fotograf: Martin Braun)

Abbildung 2 (rechts): Die Abbildung zeigt den ersten Wafer für die Graphen-Integration während der Prüfung in der neuen Reinraumanlage von Black Semiconductor.

Licht, als Träger von Informationen, hat sich gegenüber elektronischen Verbindungen als überlegen erwiesen, um die Distanz zwischen Chips von wenigen Zentimetern auf mehrere Kilometer zu erweitern. Die Integration von Photonik in die Datenübertragung und die Ausschöpfung der vollen Leistung von Chipnetzwerken ist eine bekannte, aber bisher nicht umfassend implementierte Strategie zur Deckung des Energiebedarfs.

Silizium-Photonik ist ein vielversprechender Ansatz für die optische Datenübertragung, doch sie ist kostspielig, schwer zu integrieren und stößt bei der Leistungssteigerung an Grenzen. Die Kombination der Vorteile des Computings mit Elektronen und der Kommunikation mit Photonen bietet eine neue Perspektive. Die Integration von Optik und Elektronik ermöglicht massive parallele Chip-Konnektivität über weite Distanzen und eröffnet damit völlig neue Möglichkeiten in der Datenkommunikation.

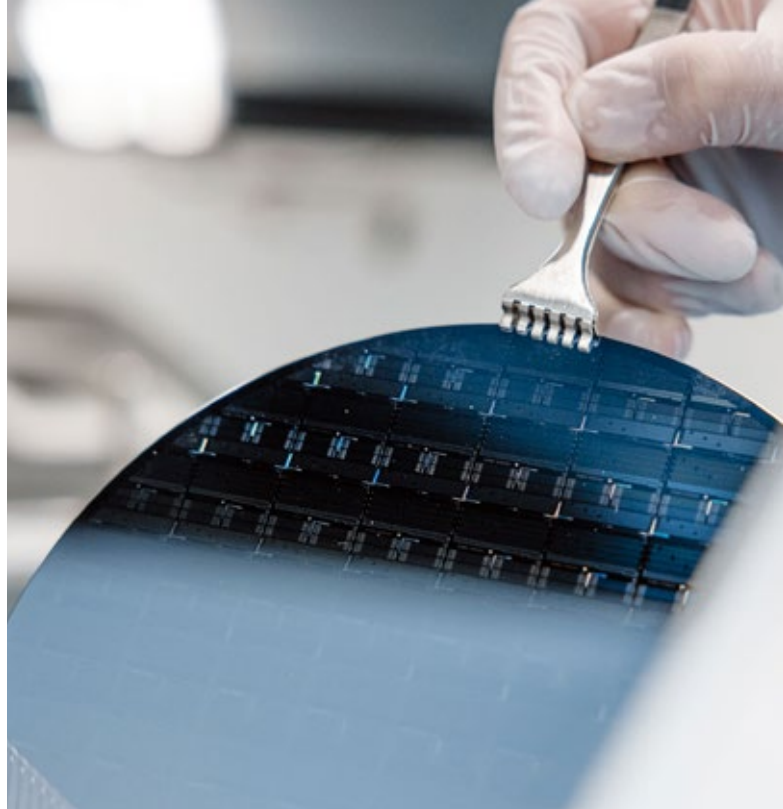
Im Zentrum dieser hochleistungsfähigen Chipnetzwerke mit geringer Latenz steht Graphen. Bekannt für seine exzellenten elektrischen und thermischen Eigenschaften, hat sich Graphen durch seine optischen Qualitäten als Schlüsselmaterial herausgestellt. Es dient als Übersetzer zwischen der optischen und elektronischen Welt und ermöglicht ultraschnelle, energieeffiziente und skalierbare Netzwerke, die Rechenleistung und Energieeffizienz auf ein neues Level heben.

Die Herausforderungen, diese Technologie von der Konzeptphase zur Massenfertigung zu bringen, sind nicht zu unterschätzen. Designkomplexität und Präzision in der Fertigung von Graphen-basierten Photonen-Chipverbindungen erfordern ein Höchstmaß an technischem Know-how.

Bei der Einführung dieser neuen Technologie in den Halbleitermarkt stehen wir vor der Aufgabe, sie in bestehende Industriestandards zu integrieren. Graphen-Photonik bietet hierbei den entscheidenden Vorteil der Kompatibilität mit aktuellen Fertigungsprozessen und schlägt so eine Brücke zwischen herkömmlicher Silizium-technologie und der innovativen Welt des Graphens.

Black Semiconductor verfolgt die Vision, zu beweisen, dass fundamentale Veränderungen machbar sind. Unsere Technologie hat das Potenzial, die Art und Weise, wie Daten verarbeitet und gespeichert werden, grundlegend zu verändern. Wir sind überzeugt, dass unsere Graphen-basierten Photonik-Chipnetzwerke nicht nur die Leistung und Effizienz von Rechenzentren, sondern die Computertechnologie insgesamt revolutionieren werden.

Wir haben es uns zum Ziel gesetzt, nicht nur die Branche zu bereichern, sondern sie mit unseren Graphen-basierten Technologien nachhaltig zu transformieren. ■



Autorin: Linda Wetzel, Team Lead Communications,
Black Semiconductor GmbH



Fotograf: Martin Braun

Ansprechpartner:

**Dr.-Ing.
Daniel Schall**
Black Semiconductor
GmbH



Können Sie den QR-Code nicht lesen?
Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

Black Semiconductor GmbH

Technologische Basis

- Graphen-Photonik
- Co-integrated Optics
- Chip-to-chip Communication

Innovation

- Neue Materialien, Graphen
- Co-integrated Optics

Primäre Anwendungsfelder

- Effiziente Datenzentren
- Generative KI
- Integrierte KI

Impact

- Energieeffizienz in der Datenkommunikation

www.blacksemi.com

Nanotechnologie: Die digitale Zukunft im „Kleinen“

Schnellere Rechner und neue Konzepte wie Quantencomputer, künstliche Intelligenz (KI), photonisches und neuromorphisches Computing erfordern Technologien und Prozesse, mit denen die Strukturierung von Komponenten im Bereich weniger Nanometer möglich ist.

Die Dortmunder RAITH Group als weltweiter Markt- und Technologieführer von maskenlosen Nanofabrikationssystemen und Charakterisierungslösungen befähigt weltweit Kunden in Forschung und Industrie, Strukturierungen im Nanometerbereich vorzunehmen.

Lange Zeit war die Zukunft der Computertechnologie so vorhersehbar, als wäre sie mit einem Computer selbst berechnet worden. Moore's Law, benannt nach dem Mitbegründer von Intel, Gordon Moore, sagte über Jahrzehnte erstaunlich präzise voraus, dass sich die Anzahl der Transistoren auf einem integrierten Schaltkreis etwa alle zwei Jahre verdoppelt, wodurch die Rechenleistung kontinuierlich exponentiell gesteigert wurde. Der Weg für diese Verdoppelung war die stetige Verkleinerung von Transistoren und Schaltungen, was unweigerlich von der Mikrotechnologie zur Nanotechnologie führte. Dieser Weg endet jedoch für herkömmliche Siliziumtransistoren an den physikalischen Grenzen etwas oberhalb der atomaren Auflösung im Bereich einiger Nanometer, da quantenmechanische Effekte, wie Tunnel, die Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz durch Leckströme beeinträchtigen. Moore's Law gilt heute so nicht mehr.

Ein Ansatz für neue, leistungsstärkere Rechner besteht aktuell darin, die Planartechnologie in die dritte Dimension zu entwickeln: Statt nur in zwei Dimensionen auf einem Chip zu arbeiten, werden Transistoren und Schaltkreise in vertikaler Richtung gestapelt, was die Integration und Leistungsfähigkeit erhöht, ohne die Transistordichte weiter zu steigern. Ein weiterer Ansatz auf der nächsthöheren Ebene ist die Integration verschiedener Technologien und Funktionen auf einem einzigen Chip, wie zum Beispiel Prozessoren und Speicher. Am unteren Ende wird die Nanotechnologie eingesetzt, um neuartige Feld-Effekt-Transistoren mit einzigartigen Eigenschaften zu entwickeln. Beispielsweise werden Kohlenstoffnanoröhrchen oder Halbleiternanodrähte mit Durchmessern im Bereich von 10 nm als Kanal eingesetzt, um das Schalten der Transistoren mit weniger Leistung durch umschließende Gates und die besonderen Mate-

rialeigenschaften zu realisieren. Im Bereich Forschung und Entwicklung stellt man hierzu erst die Nanoröhrchen her, lokalisiert sie und strukturiert den restlichen Transistor mit Methoden der Nanostrukturierung, wie der Elektronenstrahlolithografie, um sie herum.

Dieselben Methoden der Nanotechnologie sind erforderlich, wenn Komponenten für die Quantentechnologie entwickelt werden. Da Quanteneffekte erst bei einzelnen Atomen oder Elektronen auftreten, führt für die meisten Ansätze zur Realisierung von Qubits kein Weg an der präzisen Herstellung von Nanostrukturen vorbei. Die Ansätze sind dabei vielfältig: Die Schaltkreise von supraleitenden Quantencomputern, deren Entwicklung von großen Unternehmen wie IBM und Alphabet vorangetrieben wird, werden genauso mit der flexiblen, hochauflösenden Elektronenstrahlolithografie, zum Beispiel von RAITH, strukturiert, wie Schaltungen zur Steuerung einzelner Elektronenspins oder Wellenleiter in photonischen Quantencomputern, die derzeit von Forschungseinrichtungen und Universitäten weltweit entwickelt werden. Die Nanostrukturierung wird hierbei für Fertigung zahlreicher Komponenten benötigt, beispielsweise bei photonischen Quantencomputern für die Quantengatter^[1] genauso wie für die Einzelphotonquellen und die Einzelphotondetektoren. Das Ziel ist hierbei nicht konventionelle Rechner zu ersetzen, sondern durch Quantencomputer zu ergänzen, die bestimmte, aktuell nicht lösbare Aufgaben durch paralleles Rechnen auf Quantenebene berechnen, zum Beispiel bei der Entwicklung neuer Medikamente.

Weitere wesentliche Ergänzungen erfolgen derzeit im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) und maschinellen Lernens. Da neuronale Netze, wie das menschliche Gehirn, Vorteile bei Aufgaben, wie der Mustererkennung haben, besteht ein Lösungsansatz in der Entwicklung des sogenannten Neuromorphic Computing, bei dem die selbstorganisierende und selbstlernende Natur des Gehirns nachgebildet werden soll. Forscher der Universität Münster setzen hier auf integrierte photonische Schaltkreise. Hierbei werden Phase Change Materials (PCM) als

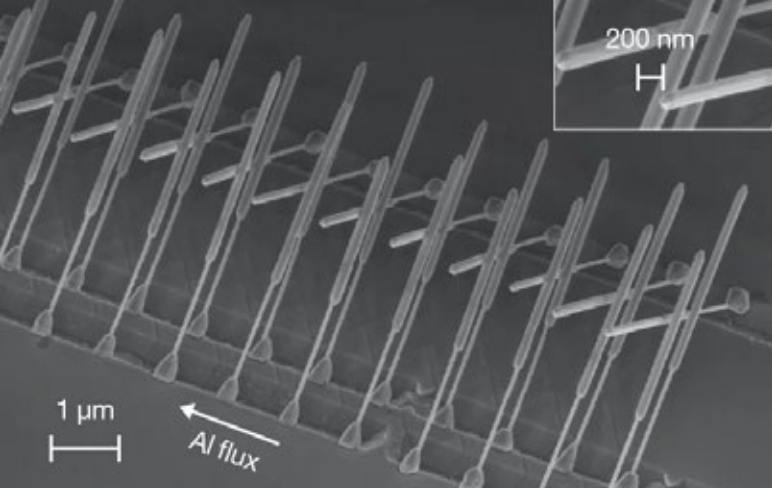


Abbildung 1: InSb-Nanodrähte für topologische Quantencomputer, Sasa Gazibegovic, Technische Universität Delft

sogenannte „photonische Speicherzellen“ eingesetzt, in denen die Änderung der Amplitude oder der Phase des Lichts im Schaltkreis optisch oder elektrisch „programmiert“ werden kann. Die Wellenleiter der Schaltkreise und weitere Elemente wie Ringresonatoren als optische Filter werden auch hierbei mit Elektronenstrahlolithographiesystemen von RAITH geschrieben. Darüber hinaus setzen die Forscher die lokale Implantation von Si Ionen ein, um durch Brechzahländerungen die Resonanzwellenlängen in den photonischen Schaltkreisen abzustimmen^[2].

Grundlegendere physikalische Untersuchungen zu möglicher Hardware für neuromorphisches Computing finden zurzeit an der TU Dortmund statt. Für das sogenannte Reservoir Computing benötigt man ein hochdimensionales, dynamisches System, auf das Signale für die spätere Erkennung im neuronalen Netzwerk gemappt werden können. Die Forscher entwickeln hierzu ein physikalisches System, in dem gemischte Zustände aus magnetischen Zuständen und Kristallgitterschwingungen durch Laserpulse charakteristisch angeregt werden können. Die Kopplung zwischen Licht und Anregungen im Festkörper erfolgt über ein Nanogitter mit 200 nm Periode, das mit Ga⁺ Ionen direkt strukturiert wird^[3].

Die RAITH Group mit Hauptsitz in Dortmund, Deutschland, bietet ihren Kunden ein einzigartiges Produktportfolio an Nanofabrikationssystemen und -lösungen aller drei Strahlen-Technologien: Elektronen-, Ionen- und Laserstrahlen. Dieses Portfolio umfasst den gesamten Bereich von μm-Strukturen bis hin zur Fertigung von kritischen Bauelementen im Sub-10-nm-Bereich. Prozesssteuerungs- und nanoanalytische Systemlösungen zur Charakterisierung kleinster Strukturen runden das Angebot ab. Auch die mehr als 50-jährige Erfahrung sowie globale Vertriebs- und Servicestrukturen zeichnen das Unternehmen aus, unterstützt durch engagierte Experten in RAITHs internationalen Anwendungs- und Entwicklungszentren.

RAITH ermöglicht Kunden in Industrie und Wissenschaft, Nano-Innovation und -produktion allumfassend zu beschleunigen. Durch die Technologie zum Erstellen, Modifizieren, Charakterisieren und Visualisieren kleinster Strukturen wird die digitale Zukunft weltweit vorangetrieben. ■

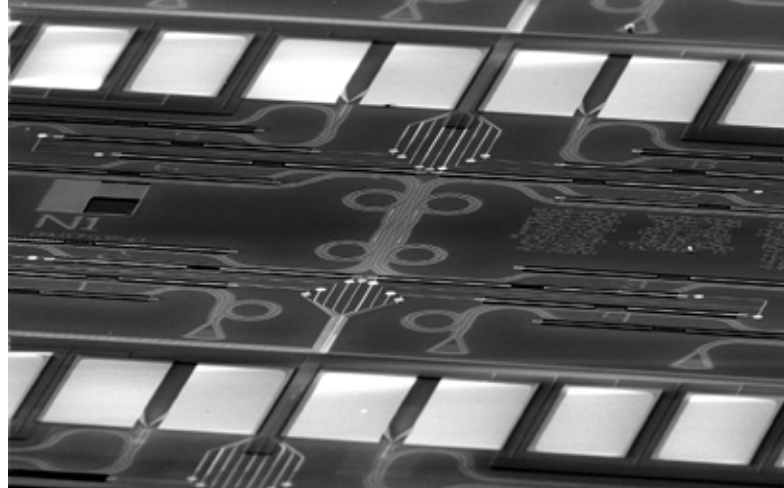


Abbildung 2: Photonisches CNOT Quantengatter, Menno Poot, Yale University, New Haven

Referenzen

- [1] M. Poot, Photonic circuits for on-chip quantum optics, Raith Application Note, <https://raith.com/downloads/application-notes/>
- [2] A. Varri et al., Scalable Non-Volatile Tuning of Photonic Computational Memories by Automated Silicon Ion Implantation (2024), in: Advanced Materials, 36:8(2310596)
- [3] D. D. Yaremkevich et al., On-chip phonon-magnon reservoir for neuromorphic computing (2023), in: Nature Communications, 14:1(8296)



Ansprechpartner:

**Dr.
Michael Kahl**
RAITH Group



Können Sie den QR-Code nicht lesen?
Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

RAITH Group

Technologische Basis

- Elektronen-, Ionen, und Laserstrahlssysteme
- Präzise Positionierung auf Nanometerebene
- Vakuumtechnologie

Innovation

- Entwicklung von Elektronen- und Ionensäulen und -quellen
- Anwendungsoptimierte Nanostrukturierung mit Auflösung unter 10 nm
- Single- und Multibeamlaserlithografie mit Substratgrößen bis zu 1,5 m
- Speziallösungen für Prozesskontrolle und Charakterisierung von Oberflächen

Primäre Anwendungsfelder

- Halbleiter
- Quantentechnologie
- Optische Telekommunikation

Impact

- Konnektivität / schneller Datentransfer
- Augmented / Virtual Reality
- Grüne Energie

raith.com

Energieeffiziente Hardware für KI aus Aachen

Die Art wie Computerchips arbeiten, neuzudenken, dieser Aufgabe stellt sich der Zukunftscluster NeuroSys – ein Zusammenschluss aus Wissenschaft, Wirtschaft und öffentlichen Akteuren in der Region Aachen.

Datenintensive Anwendungen des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz (KI) verbrauchen enorme Energiemengen, solange herkömmliche Rechner verwendet werden, die in der sogenannten „von Neumann Architektur“ entworfen sind. Hier sind die Recheneinheiten und die Speicher voneinander getrennt, so dass die riesigen Datenmengen ständig hin- und hertransportiert werden müssen. Das benötigt, insbesondere beim Trainieren von KI-Systemen, viel Energie. Zusätzlich steigt die Anzahl von Nutzern dieser Anwendungen explosionsartig und verstärkt den Energiebedarf so drastisch. Die Semiconductor Research Corporation, eine Vereinigung globaler Halbleiterhersteller und Forschungsinstitute, extrapoliert, dass in ca. 20 Jahren die gesamte auf dem Planeten erzeugte Energie für Computing ausgegeben würde, wenn sich an der Computerhardware nichts änderte.

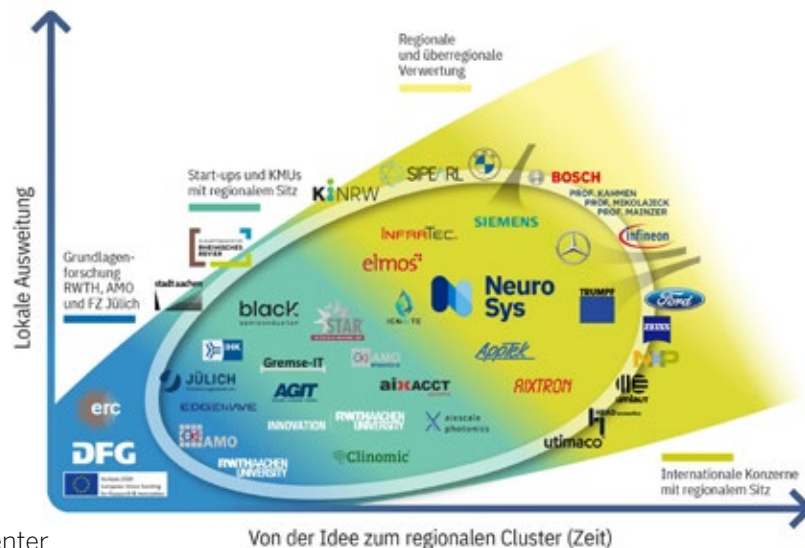
Computer der nächsten Generation müssen dementsprechend komplexe Daten mit hoher Effizienz, hoher Geschwindigkeit, geringem Stromverbrauch und somit mit deutlich reduziertem Energieaufwand verarbeiten können. Diese Eigenschaften vereint neuromorphes Rechnen – eine Technologie, die durch die Struktur und die Funktionsweise des Gehirns inspiriert ist. Neuromorphe Computer verwenden künstliche Neuronen zur Durchführung von Berechnungen, aber auch analoge und digitale Systeme, die Modelle neuronaler Systeme implementieren, werden

dazugezählt. Mit ihnen ließe sich die Energieeffizienz für KI-Anwendungen entscheidend verbessern.

Schon heute werden erste „Hardwarebeschleuniger“ eingesetzt, zum Beispiel in Smartphones, wo die Batterielaufzeit ein wichtiger Faktor ist. Aber auch Zukunftstechnologien, wie das autonome Fahren, brauchen neuromorphe Hardware. Grob geschätzt bräuchten autonome Fahrzeuge mit klassischen Computern derzeit ähnlich viel Energie zum „Sehen, Hören und Denken“ wie zum Fahren, welche auf Kosten der Reichweite fehlt. Cloud-Lösungen sind in Echtzeit für die Automobilindustrie kaum realisierbar und wegen der Netzzuverlässigkeit ein großes Risiko. Ein weiteres Beispiel ist die individuelle Patientenversorgung am Krankenhausbett. Hier können KI-Systeme die Medizin massiv unterstützen, wenn die höchst vertraulichen Daten sicher verarbeitet werden. Dies sollte nicht in einer herkömmlichen Cloud geschehen, sondern dezentral und energieeffizient mit neuromorpher Hardware. Ein weiteres Anwendungsszenario ergibt sich aus der Entwicklung im Bereich der vernetzten Industrieproduktion, der Smart Homes und der Smart Cities. Hier werden zukünftig Milliarden von Sensoren Daten erfassen und mit Hilfe der KI zu produktiveren, sichereren und umweltfreundlicheren Abläufen führen. Die neue Hardware muss diese extrem hohen Datenmengen effizient verarbeiten können; mit neuromorphem Rechnen.

Abbildung 1 (linke Seite): Arbeiten im Reinraum - Beladung einer Herstellungsanlage mit Siliziumchips, Quelle: AMO GmbH/Martin Braun

Abbildung 2 (rechts): Ausstrahlungs- und Entfaltungspotenzial des NeuroSys-Clusters von exzellenter Grundlagenforschung bis zu einem wettbewerbsfähigen, wirtschaftlichen und technologischen Ökosystem
Quelle: NeuroSys



Der Erforschung und Entwicklung von energieeffizienter neuromorpher Hardware für KI-Anwendungen widmet sich der Zukunftscluster NeuroSys aus der Region Aachen, gefördert durch das BMBF. NeuroSys bündelt die Kräfte der Forschungseinrichtungen RWTH Aachen University, AMO GmbH, Forschungszentrum Jülich und der regionalen Industrie und führt Forschungsarbeiten entlang der gesamten Wertschöpfungskette durch: von der Materialforschung über die Bauelemententwicklung, den Schaltungsentwurf, die Algorithmenentwicklung bis hin zu anwendungsgetriebenen Fallstudien und der Entwicklung von sozioökonomischen Wirkungsszenarien neuromorpher Hardware. Die gesellschaftlichen Herausforderungen im Umgang mit KI erfordern ethische und soziologische Reflexionen, die ein integraler Bestandteil der Forschung im Cluster sind. Es gilt eine KI zu entwickeln, die den Bürgern nutzt, Europa unabhängiger macht und den europäischen Werten entspricht.

Die zahlreichen Schnittstellen mit den regionalen Unternehmen, die sich entlang der Wertschöpfungskette ergeben, erlauben trotz der langen Zeitschienen in der Forschung auch kurzfristig Transfer und Innovation. Der NeuroSys Cluster sieht sich damit als logischen Teil des Transformationsprozesses im Rheinischen Revier. Die Vernetzung in der Region ist essenziell, denn die Arbeiten im Cluster haben ein langfristiges, großes Ziel vor Augen: die Errichtung und Etablierung von Herstellungskapazitäten für neuromorphe Hardware. Den Aufbau des dazu notwendigen lokalen Innovations-Ökosystems in der Region Aachen fasst die Abbildung 2 zusammen. Aufbauend auf der exzellenten Spitzenforschung, die aus zahlreichen nationalen und europäischen Forschungsinitiativen hervorgegangen ist, bildet NeuroSys ein breites Netzwerk von regionalen und nationalen Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Die beeindruckende Anzahl von 22 aktiven interdisziplinären Forschungspartnern ist in der Abbildung durch die entsprechenden Logos innerhalb der grauen Ellipse aufgeführt. Das NeuroSys Konsortium wird durch 16 Beiratsmitglieder komplettiert, die auf der Umrisslinie der Ellipse dargestellt sind. NeuroSys mit seinen knapp 40 Partnern transportiert die grundlagenorientierte Forschung in die Anwendung und strebt durch zeitliche und räumliche Entwicklung eine regionale und überregionale Verwertung der Forschungsergebnisse an. ■

Autoren: Dr. rer. nat. Julia Floehr und Dr. rer. nat. Thorsten Wahlbrink, Cluster4future NeuroSys



Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing.

Max C. Lemme

RWTH Aachen University, Lehrstuhl für elektronische Bauelemente (ELD)



Können Sie den QR-Code nicht lesen?

Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

Zukunftscluster NeuroSys

Technologische Basis

- Mikro- und Nanotechnologie
- Mikroelektronik
- Neuromorphes Computing
- Integrierte photonische Systeme

Innovation

- Neue Materialien
- Neue Bauelement- und Systemarchitekturen
- Hardware-Software Co-Design

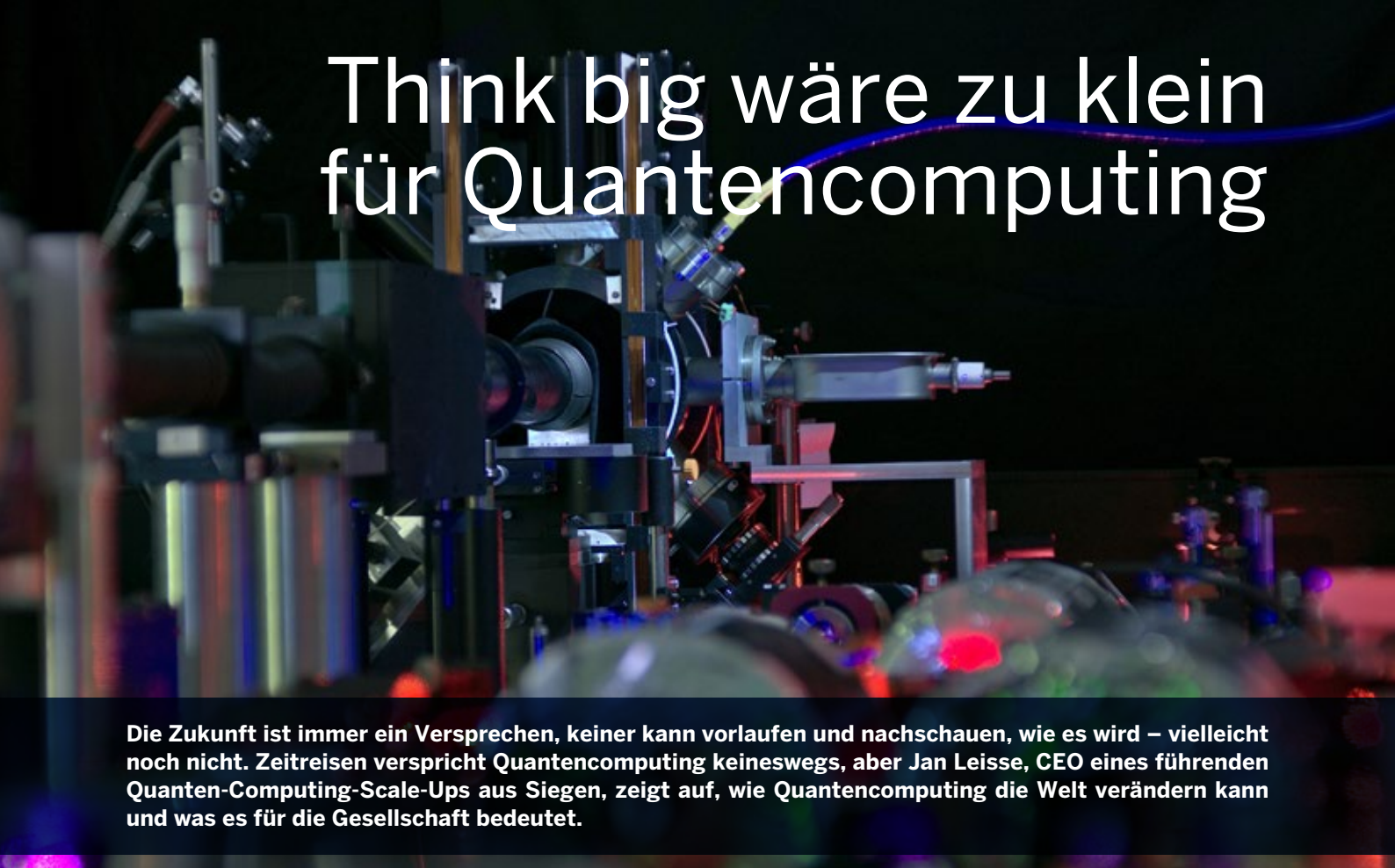
Primäre Anwendungsfelder

- KI in der personalisierten Medizintechnik
- KI in der Sprach- und Objekterkennung
- KI in der Automobilindustrie

Impact

- Strukturwandel gestalten
- Europäische Werte für KI
- Technologische Unabhängigkeit in Europa

www.neurosys.info



Think big wäre zu klein für Quantencomputing

Die Zukunft ist immer ein Versprechen, keiner kann vorlaufen und nachschauen, wie es wird – vielleicht noch nicht. Zeitreisen verspricht Quantencomputing keineswegs, aber Jan Leisse, CEO eines führenden Quanten-Computing-Scale-Ups aus Siegen, zeigt auf, wie Quantencomputing die Welt verändern kann und was es für die Gesellschaft bedeutet.

In einer Welt, die zunehmend durch technologischen Fortschritt definiert wird, steht das Quantencomputing bereit, nicht nur die Landschaft der Informatik, sondern auch die technisch herausforderndsten Bereiche unserer Wirtschaft und Gesellschaft angehen. Die Zukunft unterscheidet nicht mehr zwischen 1 oder 0, sondern nutzt den umfangreichen und kontinuierlichen Rechenraum der Quantenwelt. Was so schön divers klingt, ist die Schönheit der Quantenmechanik. Aber der Weg muss noch gelaufen werden, bis Quantencomputing aus dem Labor in die praktische Anwendung kommt.

Quantencomputing repräsentiert einen Paradigmenwechsel im Computing, der weit über das hinausgeht, was mit klassischem Computing möglich ist. Während klassische Computer mit Bits arbeiten, die entweder den Zustand 0 oder 1 annehmen können, operieren Quantencomputer mit Qubits, die dank der Prinzipien der Quantenmechanik in einem Zustand der Überlagerung existieren können. Diese Fähigkeit ermöglicht Quantencomputern, eine Vielzahl von Berechnungen extrem zu verkürzen, was ihre potenzielle Rechenleistung exponentiell steigern wird. Unsere Mission ist dabei, wissenschaftliche Theorie in die Praxis zu übersetzen.

Quantencomputing kann KI explodieren lassen

Quantencomputing ist nicht einfach nur ein weiterer Schritt in der Evolution der Rechentechnik; es ist ein gewaltiger Sprung, der die Landschaft der künstlichen Intelligenz (KI) auf ein komplett neues Level bringen könnte. Stellen Sie sich vor, KI-Systeme, die heute noch mit der Verarbeitung komplexer Datenmengen oder der Lösung fortgeschrittener Optimierungsprobleme kämpfen, erhalten plötzlich einen Turbo. Das ist ein weiteres Versprechen

von Quantencomputern: Sie können potenziell Berechnungen durchführen, für die selbst die mächtigsten Supercomputer der heutigen Zeit Jahre benötigen würden – und das in Sekunden.

Mit ihrer Fähigkeit, eine enorme Anzahl von Möglichkeiten gleichzeitig zu analysieren, könnten Quantencomputer die Art und Weise, wie wir über maschinelles Lernen und tiefe neuronale Netze denken, radikal verändern. Stellen Sie sich KI-Systeme vor, die in der Lage sind, aus Datenmengen zu lernen, die so umfangreich sind, dass sie heute praktisch unzugänglich sind. Oder Algorithmen, die so komplex sind, dass sie menschenähnliche Flexibilität und Intuition in der Problemlösung erreichen können.

Diese Technologie hat das Potenzial, die Entwicklung von KI zu beschleunigen, indem sie Barrieren in der Datenverarbeitung und Algorithmik niederreißt. Von der medizinischen Forschung über die Finanzmärkte bis hin zur Klimamodellierung – die Bereiche, in denen KI durch Quantencomputing verstärkt werden könnte, sind grenzenlos. Die Synergie zwischen Quantencomputing und KI könnte uns in eine Zukunft führen, in der KI nicht nur menschliche Aufgaben nachahmt, sondern sie in einer Weise erweitert und verbessert, die wir uns heute kaum vorstellen können.

Kurz gesagt, Quantencomputing zielt auf das Versprechen ab, die Grenzen der KI nicht nur zu erweitern, sondern komplett neu zu definieren. Es ist die Art von Technologie, die man als Gamechanger bezeichnen kann.

Wirtschaftliche und gesellschaftliche Revolution

Die Auswirkungen des Quantencomputings werden weit-

reichend sein, von der Wissenschaft über die Medizin bis hin zur Cybersicherheit. Besonders im Bereich des Bankings sehen Marktanalysen beispielloses Transformationspotenzial. Quantencomputing habe das Potenzial, Finanzmärkte zu optimieren, Risikoanalysen zu revolutionieren. Doch mit großer (Rechen-)Macht kommt auch große Verantwortung. Durch die Fähigkeit von Quantencomputern entstehen Sicherheitsrisiken, da bestehende Verschlüsselungsmethoden ihre Wirkung komplett verlieren. Der Tag, wenn Quantencomputing in der Lage sein wird, alle gängigen Verschlüsselungen zu knacken, wird „Q-Day“ genannt und erfordert ein ganz neues Denken in der Cyber-Security.

Wir müssen global zusammenarbeiten; Quantencomputing darf keine Insel-Wissenschaft werden, sonst wird es wild: Die Entwicklung und Implementierung von Quantentechnologien kann nicht im Alleingang erfolgen. Sie erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern, Technologieunternehmen, Regierungen und der Industrie. Bei eleQtron sind wir überzeugt, dass durch gemeinsame Anstrengungen das volle Potenzial des Quantencomputings realisiert werden kann, zum Wohle der Menschheit und zur Lösung der drängendsten Probleme unserer Zeit. Dabei bleibt Quantencomputing aber nur das Tool. Die Ideen, die Umsetzung, das Genie bleibt dabei selbstverständlich in den Experten-Feldern.

Wir brauchen die Einfachheit von Apple

Aber da sind wir noch nicht: Zunächst ist unbestreitbar, dass Quantencomputing – zumindest in seinen frühen Phasen – hochspezialisiertes Wissen erfordert. Die Grundprinzipien der Quantenmechanik und die Art und Weise, wie Quantencomputer Informationen verarbeiten, unterscheiden sich grundlegend von allem, was wir in der klassischen Computertechnologie kennen. Die Entwicklung von Quantenalgorithmen, das Verständnis der Quantenverschränkung und die Fähigkeit, Quantenzustände zu manipulieren, erfordern ein tiefes Verständnis der zugrundeliegenden Physik sowie fortgeschrittene mathematische Kenntnisse.

Das bedeutet nicht, dass Quantencomputing für immer nur einer Elite von Wissenschaftlern und Technikern vorbehalten sein wird. Im Gegenteil: Wir bei eleQtron sind überzeugt, dass die Demokratisierung der Quantentechnologie sowohl möglich als auch erstrebenswert ist. Durch die Entwicklung benutzerfreundlicher Schnittstellen, die Komplexität abstrahieren, und durch die Bereitstellung von Tools, die es Entwicklerinnen und Entwicklern ermöglichen, Quantenalgorithmen zu nutzen, ohne Experten in Quantenphysik zu sein, werden wir Quantencomputing einem breiteren Publikum zugänglich machen können.

Wie kommen wir dahin? Ein Schlüssel zur Demokratisierung des Quantencomputings ist die Bildung. Wie bei jeder neuen Technologie müssen wir in Ausbildung und Weiterbildung investieren, um eine breite Basis von Nutzern aufzubauen. Langfristig muss das Ziel sein, dass Quantencomputing nicht nur ein Werkzeug für Spezialisten bleibt, sondern dass seine Vorteile von einer Vielzahl von Menschen genutzt werden können – von Forschern,

die komplexe Probleme lösen, über Unternehmen, die ihre Datenverarbeitung optimieren wollen, bis hin zu Einzelpersonen, die an der Spitze der technologischen Entwicklung teilhaben möchten. Dabei wird die Quantentechnologie sicherlich ihre Komplexität behalten, aber die Art und Weise, wie wir mit ihr interagieren, wird sich weiterentwickeln und vereinfachen. Am Beispiel Apple haben wir gesehen, wie einfach das Komplizierte sein kann. Keiner muss Halbleiter oder Transistoren verstehen oder weiß, was das Betriebssystem auf einem Smartphone macht, Hauptsache es funktioniert. Und da lohnt es sich doch, ein Stück Apfel abzubeißen und Technologie zu abstrahieren. Denn von den Besten zu lernen hat noch keiner Technologie geschadet. ■

Photo by sichtplan.de | techdigital.com



Ansprechpartner:

Jan Leisse
eleQtron GmbH



Können Sie den QR-Code nicht lesen?

Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

eleQtron GmbH

Technologische Basis

- Ionenfallen
- Mikrowellensteuerung
- Quanteninformation
- Mikro- und Nanotechnologie
- Integrierte Photonische Systeme

Innovation

- MAGIC-Technologie (MAGnetic Gradient Induced Coupling)
- Skalierbare Quantencomputing Architektur

Primäre Anwendungsfelder

- Künstliche Intelligenz
- Quantensimulation
- Optimierungsprobleme
- Materialwissenschaften
- Pharmaindustrie

Impact

- Neues Paradigma der Informationsverarbeitung
- Energieeffizientes Rechnen
- komplexe Berechnungen in Sekundenschnelle
- Erschließung neuer algorithmischer Problemfelder

eleqtron.com

Die Zukunft erstrahlt mit neuem Licht: Fortschritte im photonischen Quantencomputing

Auf der Suche nach einer Rechenleistung, die über die klassischen Grenzen hinausgeht, bringt der photonische Quantencomputingansatz Licht ins Dunkel – ein Paradigmenwechsel, der die einzigartigen Eigenschaften von Photonen für die Quanteninformationsverarbeitung nutzbar macht.

Photonisches Quantencomputing ist facettenreich und unterschiedlichste Ansätze werden verfolgt, um sich die Eigenschaften der einzelnen Lichtteilchen für Quantenoperationen zu Nutze zu machen. In diesem Artikel beleuchten wir die technischen Feinheiten der verschiedenen Ansätze für das photonische Quantencomputing, ihre Vorteile und Herausforderungen, die erforderlichen Grundbausteine und deren verwendete Materialplattformen.

Kurz nach der Jahrtausendwende kamen die ersten Ideen auf, wie Photonen für das Quantencomputing verwendet werden können.¹ Die Grundidee ist in allen folgenden Ansätzen ähnlich geblieben: Quanteninterferenz zwischen Lichtteilchen.² Normalerweise wechselwirken Lichtteilchen nicht miteinander, aber dank spezieller bosonischer Quanteneigenschaften kann ein einzelnes Photon ein anderes Photon „schalten“ – ähnlich zu einem Transistor, in dem Elektronen andere Elektronen schalten. Hierfür verwenden photonische Qubits Eigenschaften wie Polarisierung, Ankunftszeiten und Pfadkodierung für die Quanteninformationsverarbeitung. Ein weiterer explorativer Ansatz zur Realisierung von photonischen Quantengattern verwendet nichtlineare optische Materialien zur Erleichterung von Quantenlogik-Operationen. In den letzten Jahren sind zwei Ansätze in den Fokus gerückt: Gaussian Boson Sampling³⁻⁵ und Measurement-based photonic quantum computing^{6,7}. Beide Ansätze werden am neuen Institut für Photonische Quantensysteme an der Universität Paderborn erfolgreich verfolgt.

Photonenbasiertes Quantencomputing bietet einige entscheidende Vorteile gegenüber anderen Ansätzen, zum Beispiel eine hohe Geschwindigkeit und die Abwesenheit von Qubit Dephasierungsprozessen mit Ausnahme von Photonenverlusten. Dies macht es ideal für Quanteninternetanwendungen und Quanteninformationsverarbeitung. Es ist jedoch schwierig, eine robuste Spei-

cherung und Manipulation von photonischen Qubits zu erreichen. Viele Gatter sind probabilistisch oder benötigen eine sehr große Anzahl an Unterstützungsphotonen, was ressourcenintensiv ist. Photonische Quantengatter bieten Skalierbarkeit mittels integrierter photonischer Schaltkreise, erfordern aber eine präzise optische Steuerung und effiziente Photonenquellen, -detektoren und Faserkopplungen. Nichtsdestotrotz ist die wichtigste Kenngröße für alle photonischen Quantentechnologien ein extrem niedriger Photonenverlust.

Zu den kritischen Bausteinen für skalierbares photonisches Quantencomputing gehören zuverlässige integrierte Quantenlichtquellen, hocheffiziente Photonendetektoren, präzise Photonenmanipulations- und -kontrollmechanismen, robuste Quantenspeicher und klassische photonische Bauteile wie Wellenleiter, Resonatoren, Filter und Laser sowie Module für die optoelektronische Signalkontrolle. Die Integration dieser Bausteine ist entscheidend für die Konstruktion skalier- und anwendbarer photonischer Quantenprozessoren. Eine schematische Darstellung eines möglichen quantenphotonischen Schaltkreises ist in Abbildung 1 zu sehen.

Verschiedene Materialplattformen werden eingesetzt, um wesentliche Bausteine für das photonische Quantencomputing zu realisieren. Halbleiter-Quantenpunkte, Defektzentren und nichtlineare periodisch gepolte Kristalle dienen als Quellen für einzelne und verschränkte Photonen. Nichtlineare optische Materialien, wie Lithiumniobat und klassische Silizium-Photonik, ermöglichen eine effiziente Photonenmanipulation auf integrierten photonischen Schaltkreisen. Wellenleiterintegrierte, supraleitende Einzelphotonendetektoren erreichen Detektionseffizienzen nahe 100 % und diamantbasierte Quantenspeicher ermöglichen eine effiziente Speicherung von Qubits. Zur Zeit gibt es aber noch keine Materialplattform (siehe

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines integrierten quantenphotonischen Schaltkreises. Die Schaltkreisfunktionalitäten sind: 1) Erzeugung von Quantenlichtzuständen (türkis), 2) Manipulation und Schalten der Photonen (blau), 3) Detektion der Lichtzustände (dunkelblau) und klassische opto-elektronische Signalkontrolle (lila). Beispiele für die benötigten Bauteile sind vergrößert dargestellt. Das Bild wurde adaptiert aus Ref [8].

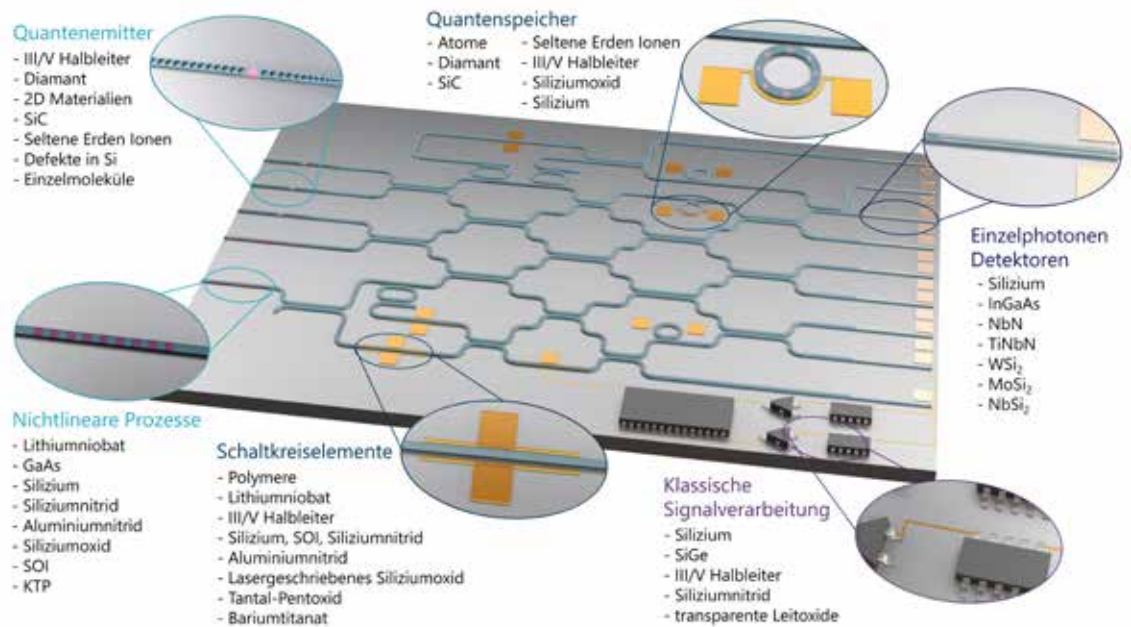


Abbildung 1), welche die monolithische Integration aller Bausteine ermöglicht. In Paderborn haben wir uns daher darauf spezialisiert, die besten Plattformen mittels heterogener und hybrider Integrationsmethoden zu kombinieren.

Trotz des Fortschritts bleiben Herausforderungen bei der Entwicklung photonischer Quantencomputersysteme bestehen. Dazu gehören die Verbesserung der Photonen-güte und Effizienz, die Verringerung von Photonenverlusten, die Verbesserung der Integration und Skalierbarkeit photonischer Komponenten, sowie die Implementierung robuster Fehlerkorrekturverfahren.

Die photonische Quanteninformatik verspricht, die Rechen- und Kommunikationstechnologien zu revolutionieren. Es wird erwartet, dass die laufenden Fortschritte in der Materialwissenschaft, der Quantenoptik, der Quantenalgorithmienentwicklung und der integrierten Photonik dazu beitragen werden, die bestehenden Herausforderungen zu überwinden und das volle Potenzial dieser transformativen Technologie zu erschließen. Hierfür wird eine interdisziplinäre Forschung benötigt, in der Mathematiker, Informatiker, Physiker und Elektrotechniker gemeinsam sich den Herausforderungen annehmen.

In unserem Institut für Photonische Quantensysteme forschen wir gemeinsam daran, die technischen Nuancen der verschiedenen Ansätze zu verstehen, die wichtigsten Herausforderungen zu identifizieren und Lösungsansätze zu entwickeln. Nur gemeinsam können wir den Weg für die Realisierung praktischer und skalierbarer photonischer Quantenprozessoren ebnen. ■

Referenzen

- [1] Knill, E., Laflamme, R. & Milburn, G. A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *Nature* 409, 46–52 (2001).
- [2] P. Kok, W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. P. Dowling, and G. J. Milburn. Linear optical quantum computing with photonic qubits. *Rev. Mod. Phys.* 79, 135 (2007).
- [3] C. S. Hamilton, R. Kruse, L. Sansoni, S. Barkhofen, C. Silberhorn, and I. Jex. Gaussian Boson Sampling. *Phys. Rev. Lett.* 119, 170501 (2017).
- [4] H.-S. Zhong et al., Quantum computational advantage using photons. *Science* 370, 1460–1463 (2020).
- [5] Madsen, L.S., Laudenbach, F., Askarani, M.F. et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. *Nature* 606, 75–81 (2022).
- [6] Walther, P., Resch, K., Rudolph, T. et al. Experimental one-way quantum computing. *Nature* 434, 169–176 (2005).

- [7] Briegel, H. J., Browne, D. E., Dür, W., Raussendorf, R., & Van den Nest, M. Measurement-based quantum computation. *Nature Physics*, 5(1), 19–26 (2009).
- [8] Pelucchi, E., Fagas, G., Aharonovich, I. et al. The potential and global outlook of integrated photonics for quantum technologies. *Nat Rev Phys* 4, 194–208 (2022).



Ansprechpartner:

Prof. Dr.

Klaus Jöns

Universität Paderborn,
Institut für Photonische
Quantensysteme
(PhoQS)



Können Sie den QR-Code nicht lesen?

Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

PhoQS, CeOPP, and Department Physik,
Universität Paderborn

Technologische Basis

- Mikro- und Nanotechnologie
- Quantenoptik
- Integrierte Photonische Systeme

Innovation

- Neue Materialien
- Hardware-Software Co-Design

Primäre Anwendungsfelder

- Quantenrechner und Quantensimulation
- Quantennetzwerke

Impact

- Exponentielle Geschwindigkeitssteigerung
- Sichere Datenübertragung
- Effiziente Berechnung

physik.uni-paderborn.de/en/joens

Vom Datacenter ins Smartphone: Die Zukunft der KI-Hardware

Künstliche Intelligenz hat dank spezialisierter Hardware enorme Fortschritte gemacht. Doch digitale Architekturen stoßen an physikalische Grenzen: Zu energieintensiv, zu langsam, zu viel Platzbedarf – erleben analoge Architekturen eine Renaissance?

Künstliche Intelligenz (KI) hat in den letzten Jahren beeindruckende Fortschritte gemacht, vor allem dank spezialisierter Hardware wie NVIDIAs Graphic Processing Unit (GPU) oder Googles Tensor Processing Unit (TPU). Diese Hardware stellt immense Rechenleistung für komplexe Modelle bereit. Trotz dieser Fortschritte gibt es bedeutende Probleme: hoher Energieverbrauch, immense Datenmengen, lange Trainingszyklen und hoher Platzbedarf.

Diese Herausforderungen haben zur Zentralisierung des KI-Trainings geführt, wobei große Rechenzentren den Großteil der Arbeit übernehmen. Daten werden durch mobile Geräte und Sensoren gesammelt und in Rechenzentren verarbeitet. Der Trend zu immer größeren Modellen erfordert immer mehr Daten und leistungsfähigere Hardware. Prognosen sagen voraus, dass die Kosten für das Training eines einzelnen neuronalen Netzes bald das Bruttoinlandsprodukt führender Länder übersteigen werden. Neben diesen Problemen gibt es weitere Herausforderungen zentralisierter KI-Systeme: hohe Bandbreitenanforderungen, Datenschutzrisiken und Latenz. Zudem erfordert die Skalierung von Rechenzentren erhebliche Investitionen und verursacht eine enorme Umweltbelastung.

In diesem Kontext bietet Edge AI eine vielversprechende Lösung. Hier wird KI teilweise oder sogar ganz auf Endgeräten und Sensoren berechnet, anstatt zentral auf einem Server. Dies reduziert die Notwendigkeit umfangreicher Datenübertragungen und ermöglicht schnellere und sicherere Entscheidungen direkt vor Ort. Hieraus ergeben sich aber schärfere Anforderungen an die Hardware in diesen Endgeräten und Sensoren, was unweigerlich zur Suche nach fundamental neuen Hardwarearchitekturen führt. Diese müssen energieeffizient und integrierbar sein, um auf batteriebetriebenen Geräten eingebaut und eingesetzt werden zu können. Zudem müssen sie eine hohe Dateneffizienz aufweisen, um mit den erheblich geringeren Datenmengen auf Endgeräten dennoch nutzbare Modelle erzeugen zu können.

Zur Realisierung dieser Anforderungen wird derzeit intensiv geforscht und entwickelt. Die Industrie, unterstützt von vielen Startups, versucht zunehmend, den Inferenzbetrieb auf Endgeräte auszulagern. Dies ist beispielsweise für das autonome Fahren essenziell, da die Erkennung sicherheitskritisch in Echtzeit erfolgen muss. Viele Unternehmen haben sich daher darauf spezialisiert, Edge KI auszuführen.

Es gibt verschiedene Wege, dies zu erreichen. Einer der vielversprechendsten ist die Nutzung von Memristoren. Ein Memristor ist ein Bauteil, das seinen Widerstand ändert, abhängig davon, wie viel elektrische Ladung durch es hindurchgeflossen ist. Quasi ein Widerstand mit Gedächtnis. Das macht Memristoren ideal für „In-Memory Computing“, eine Technik, die den Engpass in traditionellen Computern mit digitalen Architekturen überwindet. Das Verhalten eines Memristors erinnert stark an das Verhalten einer menschlichen Synapse, weshalb es ein vielversprechendes Bauteil für zukünftige KI-Hardwarearchitekturen darstellt. Zum Beispiel können in einem sogenannten Memristor-Crossbar-Array die wichtigsten Berechnungen für KI stark beschleunigt werden, nämlich die Multiply-Accumulate-Funktion, die bei der Berechnung von Matrix-Vektor Multiplikationen zum Tragen kommt. Hierbei wird das natürliche Zusammenspiel von Strömen und Spannungen ausgenutzt, um diese Berechnungen massiv parallel auszuführen – man überlässt also der Physik den schwierigen Teil. So wird zum Beispiel bei der Erkennung von Bildern das Eingangssignal in einen Vektor umgewandelt, während das Memristor-Crossbar-Array die zugrunde liegenden Gewichte als Matrix darstellt. Durch die analoge Verarbeitung kann das Ergebnis in Echtzeit berechnet werden. Die Nutzung von Memristoren in analogen integrierten Schaltkreisen kann effizienzgewinne bis zum Faktor 10.000 hervorrufen, weshalb sie ideal für den Einsatz in Endgeräten geeignet sind.

Bisher wird jedoch hauptsächlich die KI-Inferenz auf Endgeräte ausgelagert. Das Training von KI findet immer noch in zentralisierter Form statt. Damit aber der Einsatz von KI sich weiterentwickeln kann, muss auch das Training auf Endgeräten stattfinden können. Warum ist das KI-Training auf Endgeräten schwer möglich, obwohl es vielversprechende Technologien wie Memristoren gibt? Der Hauptgrund ist, dass Memristoren nur eine begrenzte Anzahl von Schreibzyklen haben. Während dies bei der Inferenz verkraftbar ist, müssen Memristoren im Training viel häufiger beschreiben werden, was die Lebensdauer der Memristoren schnell erschöpft. Ohne signifikante Sprünge im Reifegrad von Memristoren werden diese noch für eine lange Zeit nicht für KI-Training einsetzbar sein.

Das in Bochum, NRW, ansässige Startup GEMESYS hat dieses Problem nun gelöst. GEMESYS hat eine Architektur entwickelt, die die Anforderungen an memristive Bauelemente minimal hält und mit Schwellwertverfahren ar-



Abbildung 01: Abstrakte Visualisierung eines Memristors © GEMESYS GmbH

beitet. Dadurch ist nur noch die Information nötig, ob ein Bauelement einen gewissen Schwellwert überschreitet oder unterschreitet, um ihm eine 1 oder 0 zuzuordnen. Durch die minimalen Anforderungen kann GEMESYS Hardware-Emulatoren, sogenannte Pseudomemristoren, nutzen, um das benötigte Verhalten von neuartigen Memristoren mit ausgereiften Bauelementen zu imitieren. Somit wird das grundlegende Problem gelöst, und memristive Technologie kann für das Training und Inferenz gleichermaßen eingesetzt werden.

Durch Training und Inferenz auf Endgeräten kann nun eine neue Ära der künstlichen Intelligenz starten, da gänzlich neue Möglichkeiten entstehen. KI kann jetzt am Entstehungsort der Daten an die Umwelt angepasst, personalisiert und individualisiert werden. Durch die Verarbeitung der Daten direkt auf dem Endgerät werden autonome Systeme geschaffen. Daten, die bisher kaum bis gar nicht aufgrund von DSGVO-Richtlinien verwendet werden konnten, können nun dazu beitragen, neuartige Geschäftsmodelle und Anwendungen zu ermöglichen. Use Cases, die aufgrund von schlechter Internetverbindungen Schwierigkeiten hatten, KI effizient zu nutzen, haben nun die Möglichkeit, diese Technologie für ihre Prozesse und Geschäftsmodelle zu verwenden. Auch gesamtheitliche Systeme können nun überdacht werden.

Ein Beispiel: Ein Energienetzbetreiber möchte wissen, wo und wann im Netz Ausreißer (Outlier) auftreten, die sich in Form von Stromausfällen bemerkbar machen. An jedem der 50.000 Energieknoten sind verschiedene Daten vorhanden, da dort unterschiedliche Industrien, Häuser, PV-Anlagen etc. angeschlossen sind. Außerdem ändern sich die Daten an jedem Knoten ständig, z. B. durch den Wechsel der Jahreszeiten. Zentralisierte Systeme kommen hier an ihre Grenzen, weil sie 50.000 verschiedene KI-Modelle trainieren und regelmäßig aktualisieren müssten. Mit einem selbstlernenden Chip und verteiltem Ansatz wird dieses komplexe Problem einfach gelöst. Der Chip kann vor Ort die Datenstruktur lernen und sich durch kontinuierliches Training an Veränderungen anpassen. So lässt sich ein komplexes Problem schnell, effizient und kostengünstig lösen.

Die Fortschritte in der dezentralen KI-Technologie, insbesondere durch Innovationen von Startups wie GEMESYS, können die Nutzung von KI grundlegend verändern. Dies ermöglicht sicherere, effizientere und anpassungsfähigere KI-Anwendungen. Die nächste Herausforderung

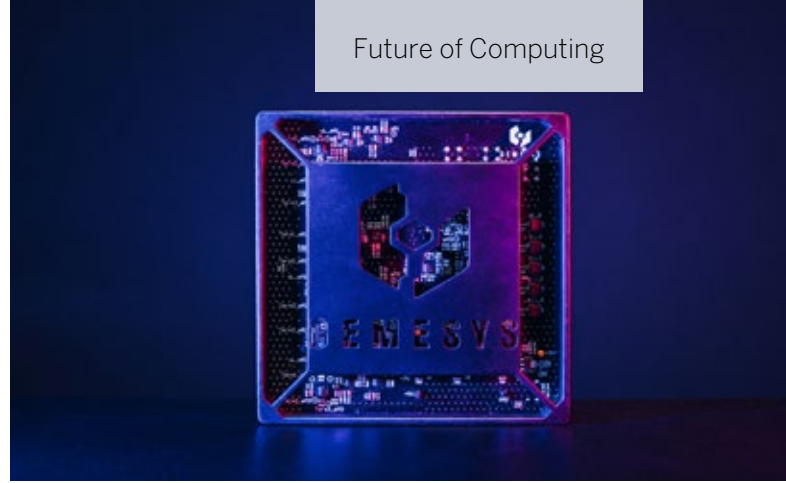
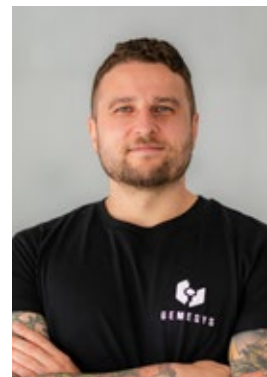


Abbildung 02: Demonstrator der Memristive Processing Unit des Startups GEMESYS, © GEMESYS GmbH

besteht darin, neue Anwendungen zu finden, bei denen dezentrale KI und das Training auf Endgeräten den größten Nutzen bringen. Da Edge AI Training nun möglich ist, muss der Markt in diese Richtung entwickelt werden, denn eins steht fest: in der deutschen und europäischen Industrie steckt viel Potenzial, das mit dieser neuen Hardware gehoben werden kann. ■



Ansprechpartner:
Dr.-Ing.
Dennis Michaelis
GEMESYS
Technologies



Können Sie den QR-Code nicht lesen?
Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

GEMESYS Technologies

Technologische Basis

- Neuromorphes Computing
- Memristoren
- Analoges Schaltungsdesign

Innovation

- Umgehung des Von-Neumann Bottlenecks für KI-Training
- Paradigmenwechsel im Schaltungsdesign für KI-Chips

Primäre Anwendungsfelder

- Künstliche Intelligenz
- Cloud Computing (Zentralisiertes KI Training)
- On the Edge Learning (Dezentralisiertes KI Training, IoT Devices)

Impact

- Energieeinsparung
- Erhöhte Effizienz bei Neuronalen Netzen
- Ermöglichen von On-The-Edge KI (KI-Training auf IoT Geräten)
- Essentieller Baustein zur Realisierung der Zukunftsvision von KI

www.gemesys.tech

Forschungsspitzen in NRW: ML4Q bringt kluge Köpfe zusammen

Der Exzellenzcluster „Materie und Licht für Quanteninformation“ (ML4Q) lockt talentierte Köpfe aus der ganzen Welt nach NRW und stärkt die Region als Innovationszentrum für Quantencomputing.

Die Revolution in der Quantencomputing-Forschung ist voll im Gange, und der Exzellenzcluster ML4Q (Materie und Licht für Quanteninformation) spielt eine Schlüsselrolle bei dieser spannenden Entwicklung. Bestehend aus drei renommierten Universitäten – Köln, Bonn und Aachen – sowie dem Forschungszentrum Jülich, vereint ML4Q eine beeindruckende Expertise in Festkörperphysik, Quantenoptik und Quanteninformationstheorie.

Quantencomputing hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht, mit Prozessoren, die bereits einige hundert Qubits umfassen und das Potenzial einer disruptiven Technologie in ihrer Anfangsphase zeigen. Doch der Sprung zu Zehntausenden oder Millionen von Qubits für wirklich bahnbrechende Anwendungen bleibt eine Herausforderung. Genau hier setzt das wissenschaftliche Programm von ML4Q an: Wir entwickeln innovative

Quantenalgorithmen, arbeiten an neuartigen Fehlerkorrekturkonzepten und verbessern die Hardware-Widerstandsfähigkeit, um den entscheidenden nächsten Schritt zu ermöglichen.

Der Cluster geht jedoch über reine Forschung hinaus und spielt eine entscheidende Rolle bei der Schaffung eines fruchtbaren, regionalen Forschungsumfelds. Die Schaffung von sechs neuen ML4Q-Professuren hat kluge Köpfe aus der ganzen Welt angezogen, darunter Experten von Branchenriesen wie Google und Amazon.

Hier sind Kurzprofile dieser herausragenden Neuankömmlinge, die mit ihrer Grundlagenforschung NRW zu einem bedeutenden Zentrum für Quantenforschung und -technologie entwickeln.



Prof. Dr. Erwann Bocquillon

Professor für Experimentalphysik, Universität zu Köln

Frühere Position: CNRS-Forscher (« Chargé de recherche »), Laboratoire de Physique de l'ENS, Paris

Fachgebiet: Quantentransport, Quantenelektronik, topologische Isolatoren

Warum Köln? Um zu einem ehrgeizigen Forschungsprogramm in einer ausgezeichneten Umgebung beizutragen, aber auch bessere Arbeits- und Lebensbedingungen sowie eine bessere Work-Life-Balance zu finden.

Beitrag zu ML4Q: Die Topologie in der kondensierten Materie hat einen neuen Ansatz für das Rechnen hervorgebracht, der natürlicherweise widerstandsfähiger gegenüber störenden Einflüssen ist, die Quanteninformationen beeinträchtigen können. Doch die Umsetzung dieser faszinierenden Konzepte in praktische Systeme ist äußerst herausfordernd. Wir erforschen eine vielversprechende Möglichkeit: die Erzeugung fliegender Majorana-Anregungen in speziellen Materialien namens quanten-anomale Hall-Isolatoren.

Größte Herausforderung in der Zukunft des Quantencomputing: Die Kontrolle der quantenbedingten Dekohärenz ist eine der größten Herausforderungen beim Quantencomputing. Dabei könnte Topologie eine Lösung bieten. Als Experimentalphysiker interessiert mich auch, wie experimentelle Systeme wie Kryostate, Elektronik und Komponenten für Tausende und Abertausende von Qubits skaliert werden können.

Januar 2022


Prof. Dr. David Luitz

Professor für Theoretische Quanten-Vielteilchenphysik, Universität Bonn

Frühere Position: Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden

Fachgebiet: Quanten-Vielteilchenphysik, Nichtgleichgewichts-Quantenmechanik, Verschränkung und Quanteninformation

Warum Bonn? Bonn ist ein ausgezeichnete Ort für meine Forschung. Als Exzellenzuniversität beherbergt sie viele herausragende Forschungsgruppen, mit denen ich gerne interagiere. Die Einbindung in die regionale Umgebung (insbesondere die anderen Standorte von ML4Q) bietet eine einzigartige Gelegenheit, neue Ideen zu generieren.

Beitrag zu ML4Q: Ich möchte einerseits ein echtes Verständnis für Vielteilchensysteme von Quantencomputern vorantreiben, insbesondere deren Rauschprozesse, die ein wesentliches Hindernis für allgemeine Quantencomputing-Anwendungen darstellen. Andererseits interessiere ich mich sehr für die Anwendung von in naher Zukunft verfügbaren Quantencomputern für die Grundlagenforschung, insbesondere für die Untersuchung von quanten-vielteilchenphysikalischen Phänomenen, die beispielsweise in der kondensierten Materie, Licht-Materie-Systemen und der Quantenchemie relevant sind. Die Durchführung sogenannter digitaler Quantensimulationen ist ein Paradigmenwechsel in der Berechnungsphysik, den wir in Zukunft erreichen wollen.

Größte Herausforderung: Den Beginn einer Professur nach vielen Jahren reiner Forschung zu erleben, ist aufregend und sicherlich eine echte Herausforderung. Im Wesentlichen muss man lernen, mit drei Jobs umzugehen, und alle Bälle in der Luft zu halten. Das ist nicht einfach, aber ich finde die Erfahrung auch sehr lohnend.

November 2022


Prof. Dr. Mario Berta

Professor für Quantenalgorithmen, RWTH Aachen Universität

Frühere Position: Dozent am Department of Computing der Imperial College London und Senior Research Scientist am Amazon Web Services Center for Quantum Computing an der Caltech

Fachgebiet: Quanteninformationstheorie und Quantenalgorithmen

Warum Aachen? Weil mich das exzellente deutsche Hochschulsystem angezogen hat und ich die breite Expertise in Quantentechnologien an der RWTH Aachen zusammen mit dem ML4Q-Netzwerk als einzigartige Gelegenheit ansehe.

Beitrag zu ML4Q: Ich freue mich darauf, meine Expertise aus der Informationstheorie und theoretischen Informatik einzubringen, um gemeinsam mit einer ausgezeichneten interdisziplinären Gruppe den Anwendungsbereich von Quantentechnologien zu erkunden.

Größte Herausforderung in der Zukunft des Quantencomputing: Meines Erachtens besteht eine der größten Herausforderungen in der Skalierung von Architekturen zur Quantenfehlerkorrektur. Dies ist nämlich mit zusätzlichen Kosten für physische Qubits und einer verlangsamten Quantentaktgeschwindigkeit verbunden.



April 2023



Prof. Dr. Silvia Pappalardi

Professorin für Theoretische Physik, Universität zu Köln

Frühere Position: Marie-Curie-Postdoc an der Ecole Normale Supérieure in Paris

Fachgebiet: Dynamik von Vielteilchen-Quantensystemen, Quantenchaos und Verschränkungsdynamik

Warum Köln? Köln ist einer der besten Orte der Welt für kondensierte Materie und Quantenphysik im Nichtgleichgewicht. Und ich liebe die Ironie der Stadtbewohner.

Beitrag zu ML4Q: Quantenprozessoren sind Vielteilchensysteme und Quantenberechnungen können als nichtgleichgewichtige Quantenevolutionen betrachtet werden. Ich bringe meine Expertise im Bereich des Quantenchaos ein, um dazu beizutragen, das Potenzial und die Herausforderungen in der Physik von Quantencomputern zu verstehen.

Größte Herausforderung in der Zukunft des Quantencomputing: Wissen, was man mit Quantencomputern anfangen soll.

August 2023



Prof. Dr. Annika Kurzmann

Professorin für Experimentalphysik, Universität zu Köln

Frühere Position: Junior Principal Investigator, RWTH Aachen Universität

Fachgebiet: 2D-Materialien, Quantenpunkte in Bilayer-Graphen, Einzelphotonen-Emitter, Quantenoptik

Warum Köln? Die Universität zu Köln bietet mir die Möglichkeit, eine unabhängige Forschungsgruppe aufzubauen, mit starkem Rückhalt von Initiativen wie ML4Q und dem SFB1238.

Beitrag zu ML4Q: Untersuchung der Kopplung von stationären und fliegenden Qubits für Quantennetzwerke in zweidimensionalen Materialien. Quantenpunkte in Bilayer-Graphen sind vielversprechende Bausteine als stationäre Qubits, bei denen kürzlich ultralange Spin-Valley-Lebensdauern an der ETH Zürich nachgewiesen wurden. Um verschiedene Qubits in einem Quantennetzwerk zu verbinden, werden wir Quantenpunkte in Bilayer-Graphen mit Einzelphotonen-Emittern in anderen zweidimensionalen Materialien koppeln.

Größte Herausforderung in der Zukunft des Quantencomputing: Die Entdeckung eines Materialsystems, das alle erforderlichen Eigenschaften sowohl für einen Quantencomputer als auch für ein Netzwerk umfasst.

Oktober 2023

**Prof. Dr. Daqing Wang**

Professor für Experimentalphysik, Universität Bonn

Frühere Position: Professor für Experimentalphysik, Universität Kassel**Fachgebiet:** Quantenoptik, Licht-Materie-Schnittstellen, Molekülphysik

Warum Bonn? Bonn ist eine ausgezeichnete Universität mit einer starken Tradition in der Quantenoptik. Die Physik in Bonn hat kürzlich auch eine neue Generation junger Fakultätsmitglieder angezogen. Wir sehen, dass die Forschung unseres Teams gut in die lokalen und regionalen Forschungsinitiativen integriert werden kann.

Beitrag zu ML4Q: Wir arbeiten an der Schnittstelle zwischen Quantenoptik, Festkörperphysik und Molekülphysik. Wir hoffen, molekulare Systeme so zu gestalten, dass sie zukünftige Komponenten für Quantencomputing werden.

**Ansprechpartner:
Dr.****Marian Barsoum**Cluster of Excellence
ML4Q (Matter and
Light for Quantum
Computing)

Können Sie den QR-Code nicht lesen?
Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

Cluster of Excellence ML4Q
(Matter and Light for Quantum Computing)**Forschungsexpertise**

- Festkörperphysik (Quantenmaterialien)
- Quantenoptik
- Device-Technologie
- Quanteninformation

Erforschte Computing-Plattformen

- supraleitende Qubits
- Rydberg-Qubits
- Spin-Qubits
- topologische Qubits

Innovation

- neuartige Fehlerkorrekturprotokolle
- verbesserte Hardware-Robustheit
- optische und elektronische Qubit-Connectivity

ml4q.de



Wie werden Quantencomputer die Gesellschaft verändern?

Die Quantentechnologie ist keine rein technische Entwicklung und wird nicht spurlos an der Gesellschaft vorbeigehen, weil sie letztlich das deterministische Denken, das heute noch unsere Gesellschaft seit der Aufklärung durchzieht, in Frage stellt. Die Konsequenzen werden so wie die Aufklärung letztlich alle Bereiche der Gesellschaft betreffen. Es besteht die Möglichkeit einer neu-mittelalterlichen Gesellschaft durch eine teilweise Rückabwicklung der Aufklärung.

Die Quantentechnologie rüttelt an den Grundfesten der Logik. Bereits der Philosoph Zenon von Elea (5. Jh. v. Chr.) stieß auf das zugrundeliegende Phänomen in Form verschiedener Paradoxien der Punktmechanik. Die Quantenmechanik löst diese Paradoxien auf, indem sie sich von der Punktmechanik löst und eine Mechanik beschreibt, die in Raum und Zeit nicht genau lokalisiert ist. Das Wesen der Quantenmechanik besteht darin, dass ein Quantenzustand z.B. in Raum und Zeit erst durch die Messung dieses Quantenzustandes genau bestimmt wird. Diese Unbestimmtheit eines Quantenzustandes schränkt das logische Gesetz des „non tertium datum“ ein, da die Folgerung „a=b“ und „b=c“ nicht mehr streng gilt. Diese Unbestimmtheit der Quantenergebnisse wird zu einer veränderten gesellschaftlichen Wahrnehmung der Logik führen. Ein einfaches Beispiel für ein Quantenbit ist ein Atom mit einem Elektron. Das Elektron kann sich auf einem energetisch angeregten Energieniveau oder auf einem energetischen Grundniveau befinden. Das Elektron kann ein erstes Photon (Lichtteilchen) eines Lichtpulses in einem ersten Quantenprozess mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit absorbieren. Die Wahrscheinlichkeit dieser Absorption steigt mit der zeitlichen Dauer des Lichtpulses. Befindet sich das Elektron auf dem angeregten Energieniveau, so kann in einem gegenläufigen Prozess der stimulierten Emission ein zweites Photon das Elektron mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit dazu veranlassen, ein drittes Photon zu emittieren und wieder auf das Grundenergieniveau zurückzufallen. Mit zuneh-

mender Dauer eines Lichtpulses durchläuft die Wahrscheinlichkeit des angeregten Elektronenzustands ein Maximum, dann ein Minimum, dann wieder ein Maximum und so weiter. Diese Schwingung wird Rabi-Oszillation genannt. Sie ist ein wichtiger Mechanismus für Quantenoperationen. Die Wahrscheinlichkeit des angeregten Elektronenzustands schwankt dabei sinusförmig mit der Lichtpulsdauer des eingestrahnten Lichtpulses. Mit einer bestimmten Lichtpulsdauer kann die Wahrscheinlichkeit des angeregten Elektronenzustands auf jeweils 50 % mit einem $\pi/2$ Puls ($= 1/4 = 90^\circ$ der Schwingungsperiode der Rabi-Oszillation) eingestellt werden. Erst die anschließende Messung des Elektronenzustandes bestimmt diesen. Somit kollabiert erst bei der Messung die Wellenfunktion des Elektrons zum konkreten Elektronenzustand, der im 50%-Zustand der Rabi-Oszillation völlig zufällig ist. Lange Zeit gab es eine deterministische Hidden-Parameter-Theorie, die davon ausging, dass es unbekannte, verborgene Ursachen dafür gibt, welcher der beiden Zustände durch die Messung eingenommen wird. Mit der Bellschen Ungleichung des Physikers John Stewart Bell und ihrem experimentellen Nachweis (Nobelpreis für Alain Aspect, John Clauser und Anton Zeilinger im Jahr 2022) ist jedoch klar, dass die Theorie der verborgenen Parameter vermutlich falsch oder zumindest in wesentlichen Bereichen ungültig ist.

Zum Verständnis der gesellschaftlichen Relevanz betrachten wir rückblickend die Wirkung der Newtonschen



Mechanik auf die Gesellschaft seit dem 18. Jahrhundert. Vor Newton erforderte eine Bewegung eine Bewegung durch ein Lebewesen (z.B. Gott). Nach Newton gab es stattdessen die Erhaltungssätze für Impuls und Energie. Dies führte zur Herausbildung atheistischer Weltbilder, die unter anderem in den Kriegen der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts (Hitler, Mao, Stalin) und im Kalten Krieg mündeten. Der Determinismus führte zu mechanistischen Gesellschaftstheorien wie dem Marxismus und dem Sozialdarwinismus. Aus der Perspektive der menschlichen Wahrnehmung gibt es heute zwei Arten von Zufall: erstens den Zufall, der kein wirklicher Zufall ist und bei dem der Beobachter die Ursachen nicht vollständig erkennen kann, und zweitens den ursachenlosen quantenmechanischen Zufall. Das mittelalterliche philosophisch-theologische Konzept Spiritus, Anima, Corpus (lat. f. „Geist, Seele, Leib“) definiert in der christlichen Philosophie die drei wesentlichen Bestandteile des Menschen. Das Prinzip „Natura non facit saltus“ (Die Natur macht keine Sprünge) wurde in der Aufklärung auf Logik und Körper (Hard- und Software) reduziert. Dieses Prinzip wurde jedoch bereits 1913 mit dem Bohrschen Atommodell durchbrochen. Die Kombination von normalen Von-Neumann-Rechnern und Quantencomputern führt nun das wirklich Sprunghafte auch in die KI ein. Die Quantenbits werden der Hard- und Software von KI-Systemen durch diesen Zufall so etwas wie eine „Seele“ einhauchen. Damit sind wir letztlich wieder auf dem Weg in eine neo-mittelalterliche Gesellschaft, die wieder vom Dreiklang Logos, Anima, Corpus – oder anders: Quantenbits (Anima), Software (Logos), Hardware (Logik) – ausgeht und das Prinzip „natura non facit saltus“ endgültig fallen lässt. Das wird die Aufklärung zurückwerfen. Wenn in einer solchen neo-mittelalterlichen Gesellschaft das Prinzip „natura non facit saltus“ grundsätzlich nicht mehr gilt, hat das nicht nur Implikationen für die Naturwissenschaften, sondern auch für die Geisteswissenschaften. Die Aufgabe des Prinzips „Natura non facit saltus“ zwingt Philosophen und Wissenschaftler, ihre Theorien über das Verhalten natürlicher und sozialer Systeme sowie religiöse Konzepte zu überdenken. Da die Realität abrupte, akausale Veränderungen zeigt, müssen bestehende Modelle der graduellen Entwicklung,

wie der Marxismus oder der Sozialdarwinismus, ggf. neu bewertet werden. In der Mathematik kann dies zu einer Diskussion über die konstruktivistische Mathematik führen. Auch in den Geistes- und Sozialwissenschaften wird dies zu einem Paradigmenwechsel führen und die Vorstellungen von Kausalität und Determinismus in Frage stellen. Die Cantorsche Mengenlehre wird ggf. auf den Prüfstand gestellt. In der Ethik wird die Vorstellung eines kontinuierlichen, moralischen Fortschritts ggf. in Frage gestellt, was zu einer Neubewertung ethischer Prinzipien führen wird. Die soziale Unsicherheit wird ggf. zunehmen, was zu Destabilisierung, wachsender sozialer Ungleichheit, einer Renaissance monarchieähnlicher Staatsformen und politischen und militärischen Spannungen führen kann. Dies erfordert von Politik und Gesellschaft die Entwicklung robuster demokratischer Systeme, um auf plötzlich auftretende Krisen effektiv reagieren zu können, Stabilität zu bewahren und die Demokratie zu verteidigen. ■

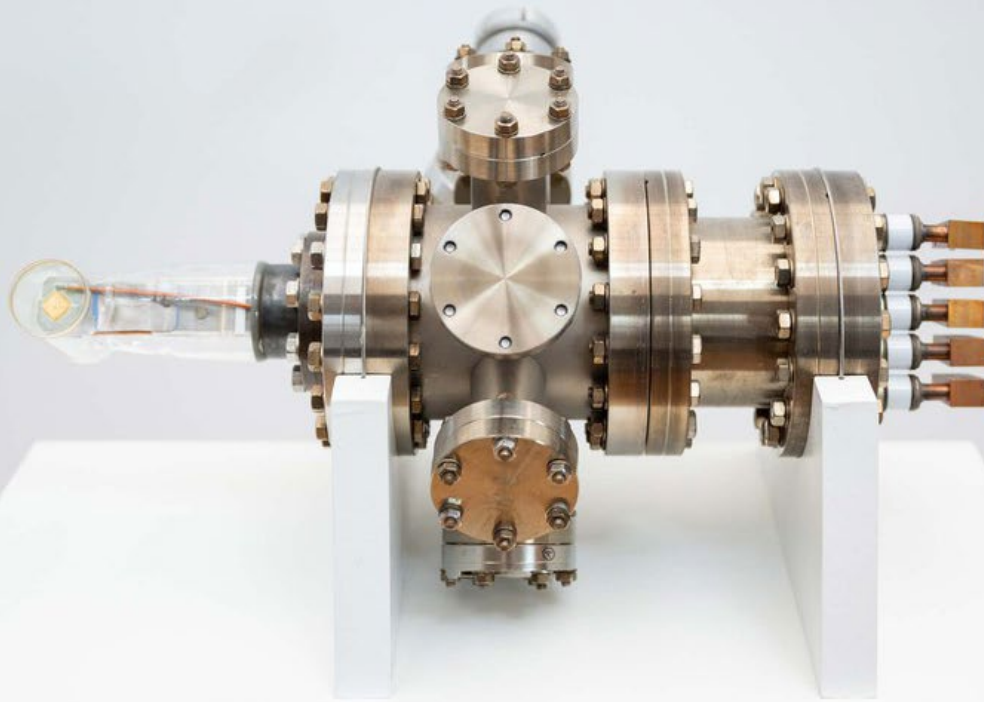


Ansprechpartner:
Dr.
Bernd Burchard



Können Sie den QR-Code nicht lesen?
Treten Sie mit mir unter www.portal.nmwp.de in Kontakt.

Dr. Bernd Burchard, Leiter IP-Management Elmos Semiconductor SE, Mitgründer der SaxonQ GmbH (mobile Raumtemperaturquantencomputer, www.saxonq.com) und der Quantum Technologies GmbH (Raumtemperaturquantensensorik, www.quantumtechnologies.de). Dr. Burchard ist Miterfinder der Smart-Home-Steuerung mit dem Mobiltelefon.



EPIQ: Ein Quanten-Supercomputer made in NRW

Das Jülich Supercomputing Centre (JSC) am Forschungszentrum Jülich und das Siegener Start-up eleQtron bauen gemeinsam einen weltweit einzigartigen modularen Superrechner, der aus einem Quantenmodul und einem klassischen digitalen Modul besteht. Der Name des Projekts ist „Entwicklungspartnerschaft Ionenfallen-Quantencomputer in NRW“, oder kurz EPIQ. eleQtron entwickelt dafür einen Ionenfallen-Quantencomputer, dessen Qubits mit Hilfe einer revolutionären Mikrowellen-Steuerung rechnen, welche an der Universität Siegen erfunden wurde. Ermöglicht wird das Projekt durch die am Forschungszentrum entwickelte dynamische modulare Integrationstechnologie. Das Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen fördert EPIQ, das aus dem Netzwerk „EIN Quantum NRW“ entstanden ist, für eine Laufzeit von 4,5 Jahren mit etwa 21 Millionen Euro.

In der EPIQ Entwicklungspartnerschaft soll ab Ende 2024 das eleQtron Quantencomputer-Pilotsystem mit bis zu 30 Ionenfallen-Qubits aufgebaut werden, das anschließend in die Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing JUNIQ integriert wird. Ab 2025 steht es laut Plan dann Anwenderinnen und Anwendern zur Verfügung – im hybriden High-Performance- und Quantencomputing (HPC-QC) Modus.

Hendrik Wüst, Ministerpräsident des Landes Nordrhein-Westfalen: „Nordrhein-Westfalen bietet mit seiner starken Wirtschaft die besten Voraussetzungen für die Erforschung von technologischen Innovationen. Wir wollen die bedeutende Stellung beim Quantencomputing weiter ausbauen und unser Land zum Technologieführer bei Quantentechnologien machen. Die Entwicklungspartnerschaft zwischen eleQtron und dem Forschungszentrum Jülich ist hierfür ein wichtiger Schritt. Mit ihr soll bis 2027 ein Quantencomputer – entwickelt und hergestellt von Forscherinnen und Forschern aus unserem Land – zur Serienreife weiterentwickelt werden. Dieses zukunftsweisende Projekt wird maßgeblich dazu beitragen, dass unser Land weiterhin an der Spitze von Forschung und Innovation steht. Nordrhein-Westfalen ist die deutsche Zukunftsregion für die Digitalisierung.“

Ina Brandes, Ministerin für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MKW NRW): „Rechenleistung wird in Zukunft der entscheidende Schlüssel sein, die großen Herausforderungen der Menschheit zu meistern. Das gilt für den Kampf gegen die Volkskrankheiten genauso wie für intelligente Mobilität und ressourcenschonende Nutzung von Energie. Quantencomputing ‚made in NRW‘ gehört international zur Spitze. Das verdanken wir der beispielhaften Erfolgsgeschichte der

Abbildung 01 (linke Seite): eleQtron GmbH
(© Land NRW, Mark Hermenau)

Abbildung 02 (rechts): V.l.n.r.: Prof. Dr. Christof Wunderlich, Universität Siegen & eleQtron GmbH; Ina Brandes, Ministerin für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MKW NRW); Prof. Dr. Astrid Lambrecht, Vorstandsvorsitzende des Forschungszentrums Jülich; Hendrik Wüst, Ministerpräsident des Landes Nordrhein-Westfalen. (© Land NRW, Mark Hermenau)



Universität Siegen, ihrer Ausgründung mit eleQtron und der engen Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich: ein echtes Leuchtturm-Projekt für den Wissenschaftsstandort Nordrhein-Westfalen.“

Prof. Astrid Lambrecht, Vorstandsvorsitzende des Forschungszentrums Jülich: „Gemeinsam mit einem Start-up aus der Region einen Quantencomputer zu entwickeln und zur Anwendung zu bringen, zeigt die Leistungsfähigkeit des Hochtechnologiestandorts NRW in Europa und die Effektivität des Netzwerks ‚EIN Quantum NRW‘. Über die Jülicher Nutzerinfrastruktur für Quantencomputing ist das System offen zugänglich für Nutzer aus Wissenschaft und Industrie. Davon profitieren Hochschulen, und wir fördern den Transfer von Quantentechnologien in die Industrie in NRW. Neben dem Zugang zu Quantencomputing ist auch die fachliche Unterstützung ein entscheidender Baustein. Damit tragen wir dazu bei, die agile Quantencomputing Community in Nordrhein-Westfalen zu stärken.“

„Die Integration des eleQtron-Systems kann bereits heute vom breiten Nutzerportfolio der JUNIQ-Plattform profitieren“, erklärt Projektleiterin Kristel Michielsens. „JUNIQ bietet dabei die einzigartige Möglichkeit, verschiedene Quantencomputersysteme und Konzepte auf einer Plattform miteinander zu vergleichen. Der eleQtron-Quantencomputer wird als Referenz für die Einordnung anderer Systeme dienen.“

In einem zweiten Schritt wird das Pilotsystem zum serienreifen gatterbasierten Quantencomputer mit bis zu 60 Qubits entwickelt, in die HPC-Systeme des JSC integriert, und wird ab 2026 in JUNIQ im hybriden Modus eingesetzt. Gatterbasierte Quantencomputer verwenden – daher der Name – eine Folge von Quantengattern, um den Zustand von Qubits zu manipulieren und so Quantenberechnungen durchzuführen. Sie lassen sich für ein breiteres Spektrum an Problemen einsetzen als Quanten-Annealer und sind somit vielseitiger. Das System ist der erste gatterbasierte Quantencomputer, der am Standort

Forschungszentrum Jülich in den wissenschaftlichen Anwendungsbetrieb gehen wird.

Anwendungsfelder des Systems werden zum einen Optimierungsaufgaben sein, in unterschiedlichen industriellen Bereichen wie Logistik, Verkehrsoptimierung und Verfahrenstechnik. In den Grundlagenwissenschaften Physik und Chemie, Biologie und Medizin sowie Materialforschung findet der Quantenrechner ebenfalls Anwendung. Vielversprechende Einsatzfelder sind darüber hinaus auch Maschinelles Lernen und Training von Modellen der Künstlichen Intelligenz.

Ionen wie an einer Perlenkette

Im Zusammenspiel zwischen den traditionellen digitalen Hochleistungsrechnern und den aufkommenden Quantencomputern wird global ein erhebliches Innovationspotenzial gesehen. „Das Jülich Supercomputing Centre ist zusammen mit dem Münchner Unternehmen ParTec Vorreiter im vernetzten Betrieb unterschiedlicher Höchstleistungs-Rechensysteme“, erklärt Thomas Lippert, Leiter des JSC. „Wir sind führend in der Entwicklung von modularen Integrationstechnologien, die für die Kopplung zukünftiger Quantencomputer benötigt werden, und wir entwickeln hybride Quanten-HPC-Algorithmen.“

Partner von Jülich ist das Start-up eleQtron. Die Siegener Firma ist weltweit führend im Design von Quantencomputern auf Ionenfallen-Basis. Bei dieser Art von Quantenrechnern bestehen die Qubits aus Ionen in Ionenfallen. „Dabei werden einzelne Ionen durch elektromagnetische Felder im Vakuum wie an einer Perlenkette aufgereiht“, erklärt Jan Leisse, Mitgründer und CEO von eleQtron. „Sie sind vollständig gekoppelt – also wechselwirken alle miteinander – und können über unsere einzigartige Mikrowellensteuerung kontrolliert werden.“ Anders als supraleitende Qubits müssen Ionenfallen nicht so stark gekühlt werden. Das macht es einfacher, auch größere Quantenprozessoren mit sehr vielen Qubits auf der nötigen Temperatur zu halten.

Durchblick im Lieferanten-Dschungel: Die KI-Revolution von ensun



Wie ein Start-up aus Siegen die B2B-Lieferantensuche revolutioniert

Mit dem klaren Ziel vor Augen, die größte globale B2B-Suchmaschine zu werden, setzt das junge Unternehmen ensun neue Standards im Lieferantenmanagement. Ihre KI-basierte Technologie sorgt für Durchblick in einem unübersichtlichen Markt und bietet Unternehmen entscheidende Wettbewerbsvorteile.

„Herkömmliche Suchmethoden sind zu teuer und limitiert“

Kennen Sie folgende Situation aus Ihrem Arbeitsalltag? Montagmorgen, Ihr Chef bittet Sie, „kurz ein paar neue Lieferanten zu recherchieren“. Fakt ist: Aus „kurz“ werden oft Stunden. Stunden, die in einem Labyrinth aus Informationen enden – zu viele Daten, zu wenig Überblick. Das Ergebnis: enttäuschend! Genau hier setzt das Tech-Start-up ensun an: eine globale B2B-Suchmaschine, die durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) den Markt transparenter und zugänglicher macht.

Das Start-up aus Siegen, 2020 von den Brüdern Benjamin und Christopher Hill gegründet, hat es sich zur Mission gemacht, die Suche nach Lieferanten und bahnbrechenden Technologien zu vereinfachen und die DNA eines traditionellen B2B-Marktplatzes völlig neu zu definieren.

„Wir haben festgestellt, dass die herkömmlichen Suchmethoden zu teuer oder zu limitiert sind.“, erklärt Christopher Hill, der selbst von Endlos-Recherchen frustriert war. Er weiß: Zeit ist Geld! Schnell erkannten sein Bruder Benjamin und er das erfolgsversprechende Potential einer automatisierten Lösung.

„10 Millionen internationale Unternehmensprofile, 30 Millionen Produkte“

Eine haus eigene KI bildet das Herzstück von ensun. Durch den Einsatz fortschrittlichster Webcrawler und KI-gestützten Algorithmen kann das mittlerweile 17-köpfige Start-up umfassende Unternehmensprofile automatisch generieren und aktualisieren. Diese Technologie ermöglicht es, in Echtzeit weltweit passende Anbieter für spezifische Anfragen auf der Plattform zu finden.

„Wir sind nicht auf proaktiv registrierte Anbieter beschränkt“, so Christopher Hill. Diese Unabhängigkeit erlaubt es ensun, eine deutlich breitere und aktuellere Datenbasis bereitzustellen, als es traditionelle Marktplatzmodelle bisher anbieten. Allein heute verfügt ensun über 10 Millionen internationale Unternehmen und 30 Millionen Produkte, die allen Nutzern kostenlos zur Verfügung stehen. Ein signifikanter Vorteil in einem schnelllebigen Marktumfeld.

„Fail fast, adapt faster“ brachte das Produkt zum Erfolg

Wie jedes Start-up hatte auch ensun mit anfänglichen Stolpersteinen zu kämpfen – von Entwicklungszeiten bis hin zur Finanzierung. Doch die Vision der Brüder Hill überzeugte schnell erste Investoren. Der Leitgedanke „Fail fast, adapt faster“ half dem Team, Hindernisse als Lernchancen zu begreifen und das Produkt kontinuierlich zu verbessern und an die Bedürfnisse seiner Nutzer zu adaptieren.

Von Stunde eins an strebt das Unternehmen danach, die größte globale B2B-Suchmaschine zu werden. Zu den Einnahmequellen zählen erweiterte Suchfunktionen und gezielte Werbemöglichkeiten auf der Plattform, die sowohl Anwendern als auch dem Geschäftsmodell Mehrwerte bieten. Bereits heute setzten mehr als 100 Marktführer auf das revolutionäre Recherche-Tool aus NRW.

„Die Plattform ist ein Katalysator für wirtschaftlichen Fortschritt“

Umsätze und Gewinne sind aber nicht alles. Christopher und Benjamin Hill legen großen Wert darauf, dass ensun neben wirtschaftlichem Erfolg vor allem einen echten Mehrwert für die Gesellschaft und B2B-Welt bietet.

Die Plattform sieht sich als Wegbereiter für nachhaltige und innovative Geschäftsbeziehungen. Mit der klaren Absicht, jedem Unternehmen weltweit den Zugang zu den besten Technologien und Lieferanten zu ermöglichen, geht ensun weit über die Grenzen eines traditionellen B2B-Marktplatzes hinaus. Die Plattform dient als Katalysator für innovativen und wirtschaftlichen Fortschritt, getrieben von der festen Überzeugung, dass die globalen Herausforderungen unserer Zeit nur gemeinschaftlich und durch technologische Innovation gelöst werden können.

In einer Zeit, in der Digitalisierung und Nachhaltigkeit tragende Rollen spielen, befindet sich ensun in einer starken Position, seine Marktführerschaft kontinuierlich auszubauen. Das familiengeführte Start-up verändert nicht nur die Art und Weise, wie Unternehmen Lieferanten finden, sondern auch die Dynamik des globalen Handelsnetzwerks.



Nutzen Sie die Plattform und verschaffen Sie sich den KI-Durchblick im Lieferanten-Dschungel:
<https://ensun.io/>



2020 von den Brüdern Benjamin und Christopher Hill gegründet hat das Start-up ensun mittlerweile ein 17-köpfiges Team.

11. MikroSystemTechnik Kongress 2025

Wandel durch Fortschritt

„Nichts ist so beständig wie der Wandel“, diese Aussage von Heraklit gilt bis heute unverändert. Wandel findet in vielen Bereichen des Lebens und mit immer höherer Geschwindigkeit statt. Es fällt vielen Menschen zunehmend schwer, dem noch zu folgen.

Fortschritt in der Technik begleitet den Wandel in vielen Themen, etwa bei der Digitalisierung, den erneuerbaren Energien oder der Mobilität. Sie helfen uns, auch die globalen Veränderungen durch neue Herausforderungen wie sich ändernde geopolitische Randbedingungen oder den Klimawandel zu bewältigen oder sie zu gestalten.

Mikroelektronik und **Mikrosystemtechnik** sind Treiber dieses Fortschritts. Ohne **Mikroelektronik** und **Mikrosystemtechnik** kommt keine andere industrielle Branche aus. Die Krisen der letzten Jahre haben gezeigt, dass ein sicherer Zugang zu Hardware in der erforderlichen Qualität und Quantität notwendig ist, von der Standard-Elektronik bis hin zu innovativen Ansätzen. In Deutschland und Europa entstehen neue Fertigungskapazitäten und führen auch zu neuen Herausforderungen im Bereich der Fachkräfte-Gewinnung. Leider werden – wie Studien des VDE zeigen – Innovationen eher mit Informatik in Verbindung gebracht, Elektrotechnik gilt bei Schülern und Lehrern als wenig innovativ und wird mit „Strippen ziehen“ in Verbindung gebracht. Hier braucht es unser Engagement, um diesen Vorbehalt mit Beispielen zu widerlegen. Wir hoffen, dass der Mikrosystemtechnik-Kongress hierzu einen Beitrag leisten kann und neue Anstöße gibt.

Wir laden Sie herzlich nach Duisburg, den Industriestandort mit den letzten Hochöfen in der Metropole Ruhr ein, in der viele Zukunftstechnologien behei-

matet sind. Hier findet nicht zuletzt der Wandel von der durch Kohle geprägten zur nachhaltigen Industrie statt.

Die Metropole Ruhr, einer der größten Ballungsräume in Europa, hat mit dem Kohleausstieg 2018 einen tiefgreifenden Wandel vollzogen, der bereits in den 60er Jahren eingeleitet wurde, unter anderem durch die Gründung von Universitäten (als erste 1961 die Ruhr-Universität Bochum) und außeruniversitären Forschungseinrichtungen in Zukunftsfeldern, die den Wandel durch Fortschritt begleiten und neue Arbeitsplätze schaffen. Über viele Jahre wurden Bergleute erfolgreich u.a. zu Mikrotechnologen umgeschult.

Die Besucher des Mikrosystemtechnik-Kongresses freuen sich auf Ihre Beiträge, die den Wandel durch Fortschritt heute und in Zukunft aufzeigen. Der Kongress ist eine gute Gelegenheit, um mit Kolleginnen und Kollegen ins Gespräch zu kommen, die eigenen Ergebnisse zu präsentieren und neue Impulse mitzunehmen.

Ausgerichtet wird der Mikrosystemtechnik-Kongress vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem VDE alle zwei Jahre an unterschiedlichen High-Tech-Standorten. Die Tagungsleitung im Jahr 2025 teilen sich Prof. Anton Grabmaier (FhG IMS / Universität Duisburg-Essen) und Prof. Martin Hoffmann (Ruhr-Universität Bochum), die sich auf eine rege Beteiligung aus der Region sowohl bei den Fachvorträgen als auch im Rahmen der begleitenden Ausstellung freuen.

Weitere Informationen werden kontinuierlich auf www.mikrosystemtechnik-kongress.de zur Verfügung gestellt.

Juli 2024

03.07.2024 | VANGUARD: Relaunch-Event „Nano-/ Microsystems & High-Tech Material for Industrial Transformation“ | Düsseldorf

<https://portal.nmwp.de/event/event/view/manage/133895>

September 2024

24. - 27.09.2024 | WindEnergy Hamburg | Hamburg

Die WindEnergy Hamburg ist die weltweit größte und wichtigste Business-Plattform in der Windbranche für intensiven Austausch, wertvolle Kontakte und erfolgreiche Geschäftsabschlüsse.

<https://www.windenergyhamburg.com/>

November 2024

13. - 14.11.2024 | Precision Fair 2024 | 's-Hertogenbosch

Von Ihrem Smartphone bis zu Weltraumteleskopen, medizinischen Geräten und Chipmaschinen... unsere Maschinen und Geräte werden immer schneller, intelligenter und fortschrittlicher.

<https://w3-fair.com/wetzlar>

27. - 28.11.2024 | SOLAR SOLUTIONS | Düsseldorf

Entdecken Sie über 200 Aussteller, unzählige Innovationen und eine ganze Reihe hochwertiger Seminare.

<https://www.solarsolutionsduesseldorf.de/>

Februar 2025

18. - 20.02.2025 | XPONENTIAL EUROPE | Düsseldorf

Die XPONENTIAL Europe wird das neue führende Forum für unbemannte Systeme und Robotik in allen Bereichen der autonomen Technologie sein.

<https://www.xponential-europe.com/>

März 2025

19. - 20.03.2025 | W3+ Fair Wetzlar 2025 | Wetzlar

Nicht nur die weltberühmte Leica-Kamera wurde hier erfunden – auch die W3+ Fair ist „Made in Wetzlar“.

<https://w3-fair.com/wetzlar>

NMWP.

The Innovation Engineers.

Perspektiven.
Innovation.
Erfolg.



nmwp.eu

Cluster**NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW**

Merowingerplatz 1
40225 Düsseldorf
www.nmwp.nrw.de
portal.nmwp.de

Verein**NanoMikroWerkstoffePhotonik e.V.**

Merowingerplatz 1
40225 Düsseldorf
verein.nmwp.de

**Ministerium für Wirtschaft,
Industrie, Klimaschutz und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen**

Berger Allee 25
40213 Düsseldorf
www.wirtschaft.nrw.de

Beauftragt durch:

Ministerium für Wirtschaft,
Industrie, Klimaschutz und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung