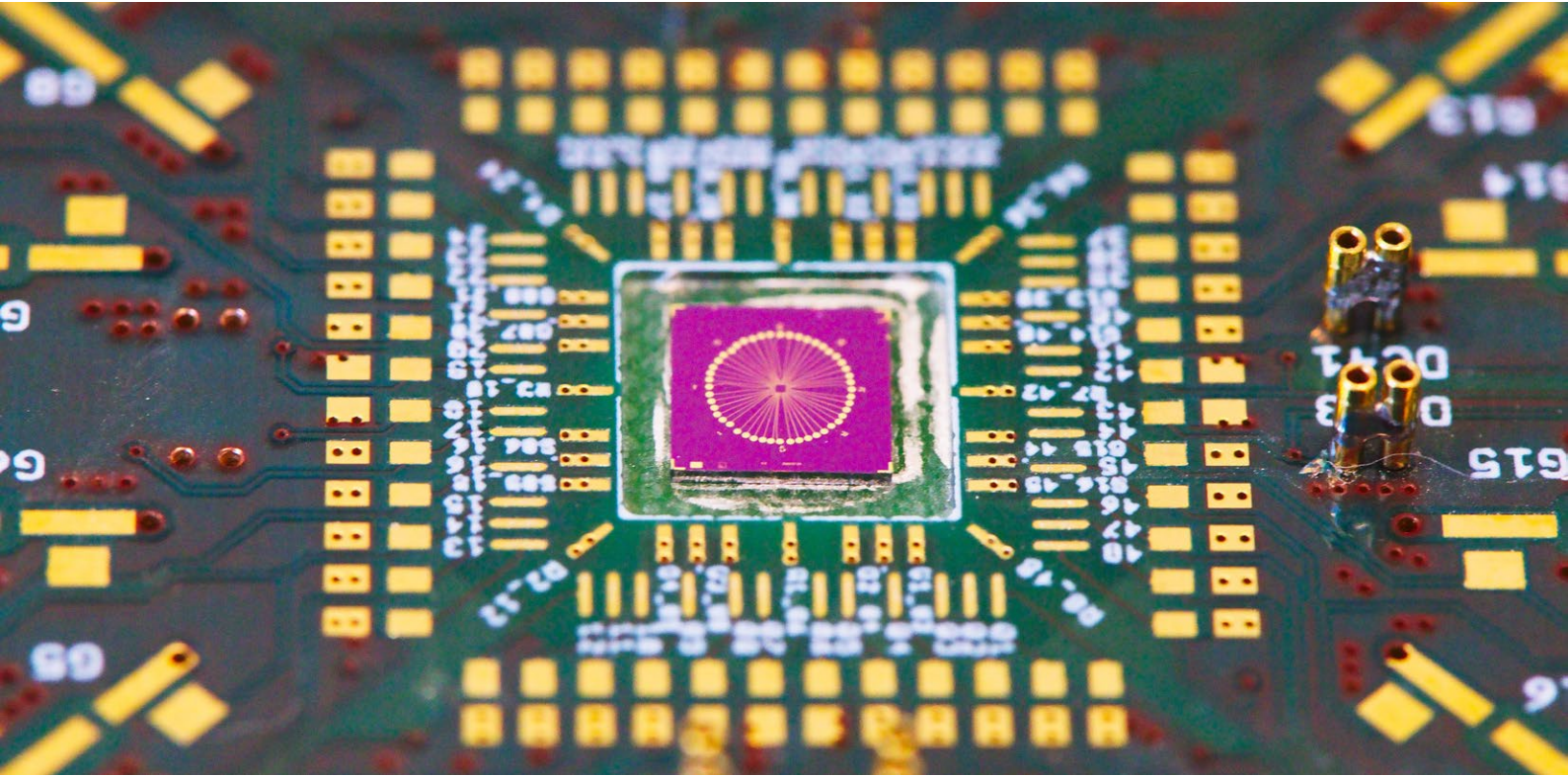


Dossier



# Quantencomputer

Oktober 2021

# Inhalt

<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
Von klassisch zu quantisiert	4
Superposition und Verschränkung	4
Quantenalgorithmen und Anwendungen	5
Fehlerkorrektur und Herausforderungen	6
<b>Qubitysteme</b>	<b>8</b>
Ionenfallen	8
Supraleiter	8
Optische Gitter	9
Stickstoff-Fehlstellen-Zentren	9
Topologische Qubits	10
Quanten-Annealing	10
<b>Quantencomputer am IST Austria</b>	<b>11</b>
Nanoelektronik	11
Integrierte Quantenmaschinen	12
Kondensierte Materie und Quantenschaltungen	13
Interview mit Georgios Katsaros	14
<b>Die Zukunft der Quantencomputer</b>	<b>16</b>
<b>Anhang</b>	<b>17</b>
Index	17
Weiterführende Links	17
Pressekontakt	17

## Impressum

Autor und Layoutdesign: Thomas Zauner, [thomas.zauner@ist.ac.at](mailto:thomas.zauner@ist.ac.at)

Herausgeber: Institute of Science and Technology Austria  
Am Campus 1, 3400 Klosterneuburg, Austria  
[www.ist.ac.at](http://www.ist.ac.at)

Coverbild © IST Austria.

Illustration S. 7 © Irene Sackmann / IST Austria.

Portrait Georgios Katsaros © Roland Ferrigato / IST Austria.

Portrait Johannes Fink © Anna Stöcher / IST Austria.

Portrait Andrew Higginbotham © Andrew Higginbotham.

Bild S. 14 © Roland Ferrigato / IST Austria.

Bild S. 16 © IST Austria.

# Einleitung

Quantencomputer waren in den letzten Jahren ein prominentes Thema in der Wissenschaft. Sie versprechen große Fortschritte in der Materialwissenschaft, der Medizin und unserem grundlegenden Verständnis der Welt. Derzeit befinden wir uns jedoch noch in einer sehr frühen Phase der Entwicklung, in der die Grundlagen für künftige Technologien gelegt werden. Dieses Dossier gibt eine kurze Einführung in die Physik von Quantencomputern, erklärt ihr Potential und gibt einen Überblick über den derzeitigen Entwicklungsstand.

Forscher\_innen am Institute of Science and Technology (IST) Austria wie Georgios Katsaros, Johannes Fink und Andrew Higginbotham arbeiten daran, die grundlegenden Rätsel der Quantencomputer zu lösen. Hier gewähren sie Einblicke in ihre Arbeit und ihre eigenen Perspektiven auf dieses Gebiet.

# Grundlagen

Es war in den frühen 1980ern, nachdem in den Jahrzehnten zuvor große Fortschritte in der Quantenmechanik gemacht worden waren, als der berühmte Physiker Richard Feynman und anderen Forscher\_innen eine Idee hatten: Man könnte neue Erkenntnisse gewinnen und neue Technologien kreieren, die weit über die derzeitigen Möglichkeiten hinausgehen, wenn man die Quantenwelt für Berechnungen nutzen könnte. Um diesen Vorschlag zu verstehen, muss man sich mit der Quantenmechanik etwas vertraut machen.

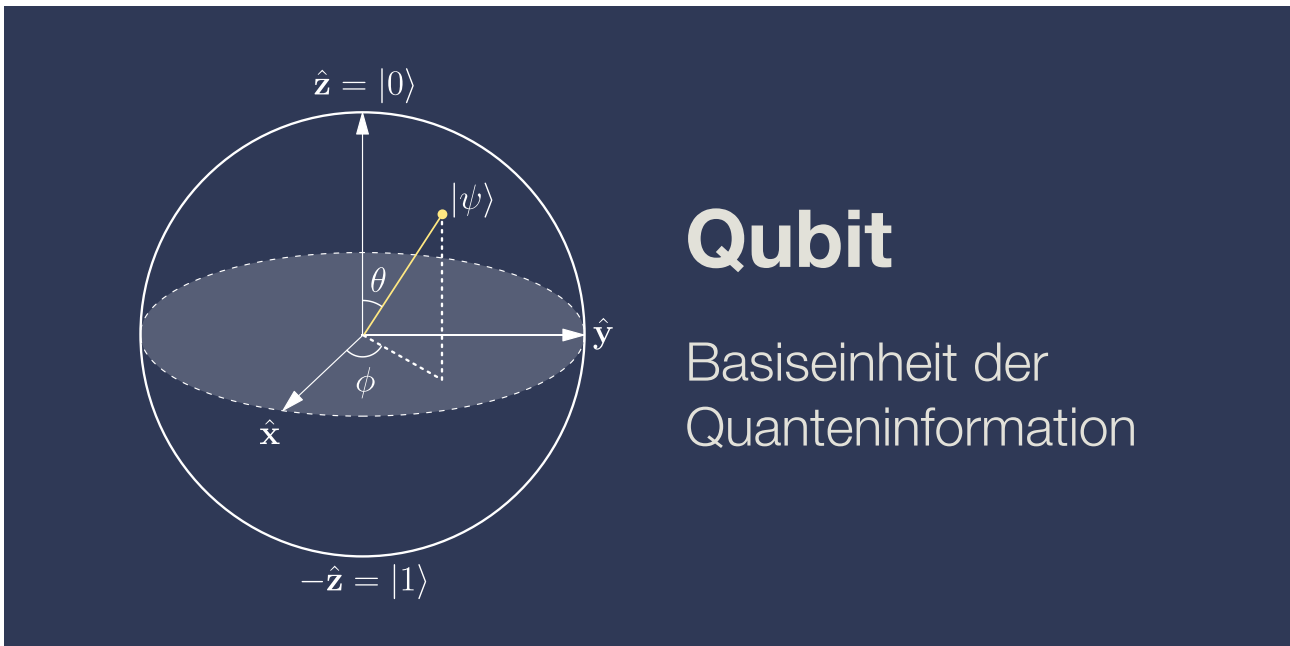
Einer der wichtigsten Grundsätze der Quantenmechanik ist, dass viele Größen auf kleinsten Skalen nur diskrete Werte annehmen können – sie sind quantisiert. Das bedeutet, dass Größen wie die Energie eines Teilchens nicht beliebige Werte annehmen können, sondern nur bestimmte diskrete Werte, die durch die Umgebung vorgegeben sind.

In einem Atom befinden sich beispielsweise die positiv geladenen Protonen und die neutralen Neutronen im winzigen Kern. Negativ geladene Elektronen befinden sich in einiger Entfernung um sie herum. Die

Elektronen können aber nicht beliebig um den Kern herumfliegen, sondern befinden sich auf sogenannten Orbitalen mit bestimmten Energien – ihren Quantenzuständen. Je weiter sie vom Kern entfernt sind, desto höher ist ihre Energie. Nimmt ein Elektron Energie auf oder gibt sie ab, kann es von einem Quantenzustand zum anderen springen.

In ähnlicher Weise ist auch Licht im kleinsten Maßstab quantisiert. Das heißt, es besteht aus kleinen Paketen, den Photonen. Ein Sonnenstrahl enthält Milliarden und Abermilliarden davon, aber in einem Experiment in einem Labor können sogar einzelne Photonen kontrolliert und manipuliert werden. Die Eigenschaften eines Photons können ebenfalls durch einen Quantenzustand beschrieben werden.

Quantensysteme wie diese werden durch eine andere Art von mathematischem Apparat beschrieben, als wir es aus unserem Alltag gewohnt sind. In einem Quantencomputer könnten die Wissenschaftler\_innen diesen nutzen, um unser Verständnis von Materie und Energie zu revolutionieren.



# Qubit

## Basiseinheit der Quanteninformation

Das Qubit kann mathematisch auf der sogenannten Bloch-Kugel dargestellt werden. In der obigen Abbildung stellt der gelbe Punkt mit dem griechischen Buchstaben psi ( $\psi$ ) den Zustand des Quantensystems dar. Er wird vollständig durch seine Winkel zur x-Achse ( $\phi$ ) und zur z-Achse ( $\theta$ ) sowie durch seinen Abstand zum Mittelpunkt der Kugel beschrieben. Ein Zustand am Nordpol der Kugel entspricht einer 0 und einer an ihrem Südpol einer 1. Jede andere Position auf der Bloch-Kugel entspricht einer Überlagerung der Zustände 0 und 1. © IST Austria

## Von klassisch zu quantisiert

In einem normalen – einem **klassischen** – Computer wird Information in Bits kodiert, welche die Werte 0 oder 1 annehmen können. Zum Beispiel können die sechs Bits „101010“ für die Zahl „42“ in binärer Schreibweise stehen, aber sie können auch den Buchstaben „a“ kodieren.

Die physikalische Umsetzung dieser Bits erfolgt im Computer durch das An- und Abschalten von Strom. Wenn kein Strom durch die Schaltkreise fließt, ist das eine 0, und wenn Strom fließt, dann eine 1. Eine beliebige Ansammlung von Bits, also eine Folge von 0 und 1, kann daher durch das Ein- und Ausschalten von Strom realisiert werden.

Ein Quantencomputer hingegen verwendet Quantensysteme wie einzelne Atome oder Photonen, um die Information zu kodieren, mit der er arbeitet. Darin liegt die zentrale Innovation des Quantencomputers. Anstatt nur zwei Zustände – Strom oder kein Strom – zur Darstellung von Informationen zu haben, verwenden diese Maschinen

Quantenzustände. Diese werden dann als **Quantenbits**, kurz **Qubits**, bezeichnet, die auf viele verschiedene Arten realisiert werden können. Zum Beispiel als einzelne Atome oder Photonen, oder als etwas völlig Anderes und noch Seltsameres.

## Superposition und Verschränkung

Bevor man sich eingehender mit Quantencomputern befassen kann, an denen derzeit in Laboren auf der ganzen Welt gearbeitet wird, muss man einige Grundprinzipien verstehen. Ähnlich wie klassische Bits hat ein Qubit zwei verschiedene Quantenzustände, die es einnehmen kann. Im Gegensatz zu klassischen Bits kann es sich auch in einer Überlagerung, einer sogenannten **Superposition**, aus beiden Zuständen befinden. Die Mathematik der Quantenmechanik erlaubt es dem Qubit, sich teilweise in dem einen und teilweise in dem anderen Zustand zu befinden.

Das ist so ähnlich wie bei [Schrödingers berühmter Katze](#). In einem

Gedankenexperiment entwarf der österreichische Nobelpreisträger Erwin Schrödinger einen Aufbau mit einer Katze in einer Kiste, die sowohl tot als auch lebendig wäre. Diese feline Überlagerung von Zuständen kann mit dem Qubit verglichen werden, das einen Zustand zwischen 0 und 1 einnehmen kann.

Der zweite große Vorteil der Quantenmechanik ist die **Verschränkung**. Diese Eigenschaft tritt zwischen zwei oder mehr Quantensystemen auf, deren kombinierter Quantenzustand Eigenschaften aufweist, die sich unserem Verständnis aus der Alltagswelt entziehen. Quantensysteme, die sich in einem verschränkten Zustand befinden, können sich gegenseitig in bestimmter Weise beeinflussen, unabhängig davon, wie weit sie voneinander entfernt sind.

Dies ermöglicht jedoch keine instantane Kommunikation schneller als mit Lichtgeschwindigkeit. Wissenschaftler\_innen können diese Eigenschaft nutzen, um Quantenalgorithmen zu entwickeln, die auf klassischen Computern nicht möglich wären.

Indem sie diese besonderen Effekte der Quantenmechanik nutzen, wollen Wissenschaftler\_innen Antworten auf bisher unlösbare Probleme finden. Quantencomputer sind allerdings kein Allheilmittel, und man wird den klassischen Heimcomputer nicht durch einen solchen ersetzen. Was Quantencomputer können und was nicht, wird abgesehen von unseren technischen Fähigkeiten auch durch die Programme, die sie ausführen können, begrenzt.

## Quantenalgorithmen und Anwendungen

In einem Computer ist ein Algorithmus eine Reihe von Anweisungen zur Ausführung einer Aufgabe. Das reicht von der Berechnung der Quadratwurzel aus 2 bis zur Darstellung eines virtuellen Waldes in einem Computerspiel. Alle diese Anweisungen

mussten entwickelt und verfeinert werden, um so leistungsfähig zu werden, wie sie es heute sind.

In ähnlicher Weise müssen die Wissenschaftler\_innen Quantenalgorithmen für Quantencomputer entwickeln. Aufgrund der ganz anderen Art der zugrundeliegenden Informationseinheiten – Qubits anstelle von klassischen Bits – unterscheiden sich diese Algorithmen stark von denen der klassischen Computer und sind bisher noch weniger gut verstanden. Die Verbesserung und die Entwicklung neuer Quantenalgorithmen für diverse Anwendungen ist ein aktives Forschungsgebiet. Viele Algorithmen wurden schon entwickelt, einige mit realen Anwendungen, andere nur zu Demonstrationszwecken ohne praktische Anwendung.

Mittels Quantenalgorithmen möchten Forscher\_innen Lösungen für Probleme zu berechnen, die selbst für die größten klassischen Supercomputer unerreichbar sind. Diese reichen vom Knacken digitaler Verschlüsselungen über die Simulation neuer Materialien und der Faltung von Proteinen bis hin zum quantengestütztem maschinellen Lernen.

Einer der ersten Algorithmen mit einer realen Anwendung war der **Shor-Algorithmus** Mitte der 1990er-Jahre. Mit ihm kann ein Quantencomputer eine große Zahl viel schneller in ihre Primfaktoren zerlegen als ein klassischer Supercomputer. Das bedeutet, er kann herausfinden, welche Primzahlen man multiplizieren muss, um die Ausgangszahl zu erhalten. Zum Beispiel die Zahl 15. Welche zwei Primzahlen multiplizieren sich zu 15? Offensichtlich drei und fünf. Sie sind die Primfaktoren. Bei Zahlen, die viele tausend Stellen lang sind, ist diese Aufgabe äußerst schwierig.

Da einige Formen digitaler Verschlüsselungen darauf beruhen, dass es für normale Computer sehr schwierig ist, die Primfaktoren großer Zahlen zu finden, könnte ein Quantencomputer unsere digitale Infrastruktur revolutionieren. Zwar gibt es in der

Realität noch keinen Quantencomputer, der dies in großem Maßstab leisten kann, doch arbeiten Kryptograf\_innen schon an neuen Verschlüsselungsstandards, um zu verhindern, dass ein künftiger Quantencomputer ihren Code knackt.

Ein weiteres Beispiel für eine Anwendung von Quantencomputern ist die **Simulation** anderer physikalischer Systeme. Ein sehr genau zu kontrollierender Quantencomputer und seine Algorithmen würden so konstruiert, sodass sie sich genau wie ein anderes quantenmechanisches System verhalten. Das könnte zum Beispiel dazu verwendet werden, nach einem neuen Material zu suchen, um die Effizienz von Solarzellen zu erhöhen, oder die Faltung von Proteinen zu simulieren, die Krankheiten verursachen oder bekämpfen.

Im Bereich des maschinellen Lernens haben Wissenschaftler\_innen mit enormen Datenmengen zu tun. Quantenalgorithmen könnten ihnen dabei helfen, die Daten zu durchsuchen oder komplexe Berechnungen viel schneller durchzuführen als auf jedem klassischen Computer.

Obwohl täglich neue Versprechungen gemacht und neue Anwendungen erdacht werden, sind viele Forscher\_innen vorsichtig mit ihren Vorhersagen zu Quantencomputern. Auf diesem Gebiet gibt es noch eine Vielzahl an Herausforderungen zu bewältigen und viele Grundlagen müssen erst noch geschaffen werden.

## Fehlerkorrektur und Herausforderungen

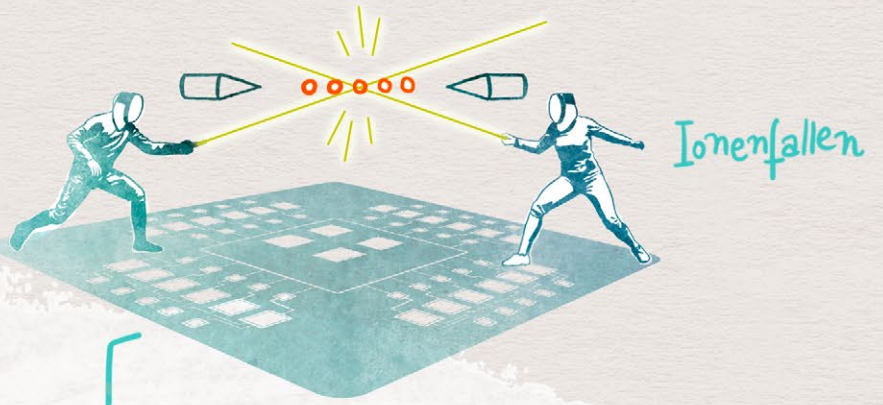
Wissenschaftler\_innen untersuchen viele verschiedene Quantensysteme auf ihr Potenzial, als Qubits in einem Quantencomputer zu dienen. Um die quantenmechanischen Effekte zu ermöglichen und aufrechtzuerhalten, die den Quantencomputern ihren Vorteil gegenüber klassischen Computern verleihen, müssen die Qubit-Systeme von allen äußeren Einflüssen isoliert werden.

Einzelne Atome müssen durch elektrische und magnetische Felder in einem Vakuum schwebend gehalten werden; supraleitende Schaltkreise müssen auf eine Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden; und Photonen müssen daran gehindert werden, auf jegliche Hindernisse in ihrem Weg zu treffen. Dennoch müssen die Forscher\_innen mit den Qubits auf sehr kontrollierte Weise interagieren, um Daten einzugeben, Berechnungen durchzuführen und Ergebnisse auszulesen.

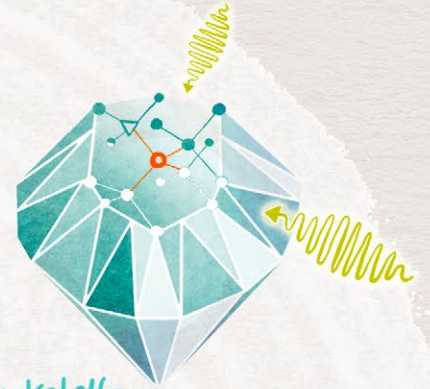
Jede Interaktion mit dem Quantensystem – sei sie beabsichtigt oder unbeabsichtigt – kann eine Störung verursachen und Fehler in die Berechnungen einbringen. Je mehr Qubits verwendet werden und je länger die Berechnungen mit ihnen dauern, desto mehr Fehler häufen sich an. Um ein Ergebnis mittels Quantenalgorithmen zu finden, sind je nach Problem 50 bis 100 oder noch mehr Qubits und viele Rechenoperationen erforderlich. Diese hohe Fehlerrate schränkt die derzeitigen Möglichkeiten und Einsatzgebiete von Quantencomputern ein.

Der renommierte Quantenphysiker John Preskill nennt den derzeitigen Stand der Quantencomputer die **Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) Ära**. Er geht davon aus, dass diese mindestens ein Jahrzehnt dauern wird, während die Grundlagenforschung an der Entdeckung neuer und der Verbesserung bestehender Qubit-Systeme arbeitet.

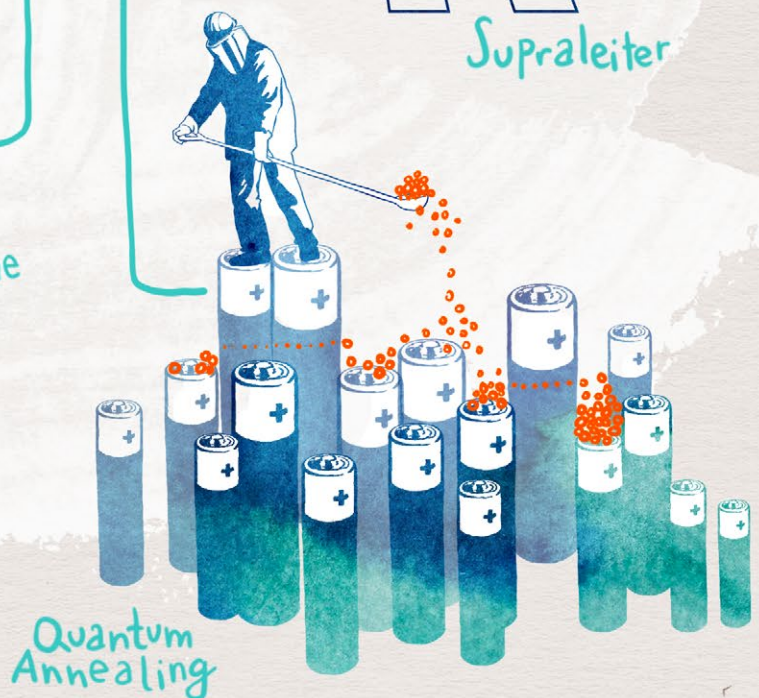
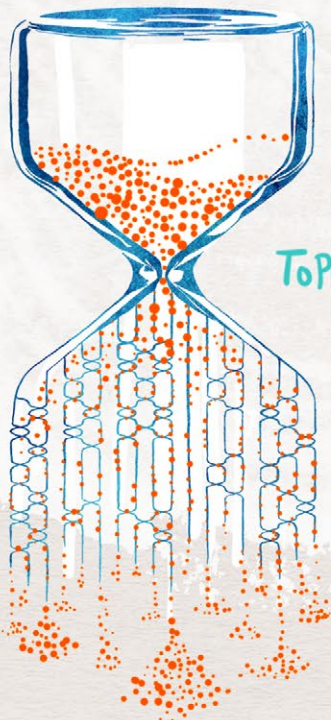
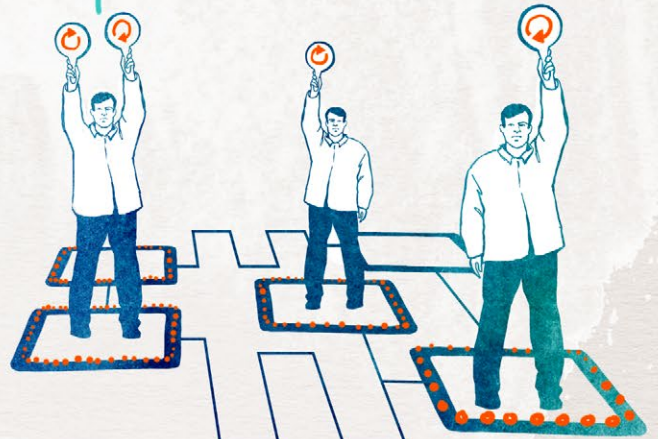
Der Plan zur Überwindung der Fehleranfälligkeit besteht nicht nur darin, die Qubits perfekt zu isolieren. Man könnte auch die Redundanz von hunderten oder tausenden **physischer** Qubits nutzen, die zusammen ein **virtuelles** Qubit simulieren. Treten Fehler in einigen physischen Qubits auf, können die vielen anderen den Fehler ausgleichen und korrigieren, sodass das simulierte virtuelle Qubit perfekt intakt bleibt. Diese Technik erfordert jedoch eine Anzahl physischer Qubits, die mit den gegenwärtigen Technologien nicht erreicht werden kann.



# Qubits



Optische Gitter



# Qubitsysteme

Es gibt viele Möglichkeiten, Qubits zu bauen, aber keine davon hat sich bisher als eindeutig überlegen erwiesen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über einige der vielversprechendsten Technologien.

## Ionenfallen

Ionen sind Atome mit einem kleinen Twist. Im Allgemeinen sind Atome nicht elektrisch geladen. Ionen besitzen jedoch mehr (oder weniger) negative Elektronen als neutralen Atome. Dadurch erhalten sie eine negative (oder positive) elektrische Ladung. Aufgrund ihrer Ladung sind Ionen sehr empfindlich gegenüber elektromagnetischen Feldern, die sie festhalten oder bewegen können.

In einer Ionenfalle schweben einzelne Ionen in einer Vakuumkammer. Sie werden durch elektromagnetische Felder fixiert. Sie sind in einer Reihe zwischen mehreren Metallstreben aufgereiht, welche die Felder erzeugen. Wissenschaftler\_innen verwenden Laser, um die Elektronen in den Ionen zu manipulieren. Die Elektronen stellen die Qubits dar. Sie speichern die Information in zwei ihrer Energiezustände, einem hohen und einem niedrigen Orbital. Die Quantenalgorithmen werden mittels Bestrahlung durch Laser und durch die Wechselwirkung benachbarter Ionen realisiert.

Die Technologie der Ionenfallen mit einer Reihe von Ionen wurde bereits für andere Anwendungen wie Atomuhren entwickelt. Einige Dutzend Ionen konnten schon erfolgreich auf einmal eingefangen werden. Um sie jedoch in einem leistungsfähigen Quantencomputer zu verwenden, müssten sie in einem zweidimensionalen Gitter aufgereiht werden. Außerdem müssten viel mehr davon miteinander interagieren können. Dadurch wären sie aber schwieriger zu kontrollieren und fehleranfälliger.

Unternehmen wie [IonQ](#) und [Honeywell](#) arbeiten an verschiedenen vielversprechenden Entwürfen für ihre Quantencomputer auf Basis von Ionenfallen, aber reale Anwendungen sind noch nicht in Sicht.

## Supraleiter

Ein Supraleiter ist ein spezielles Material, das keinen elektrischen Widerstand hat: Elektrischer Strom – eine Unzahl sich bewegendere Elektronen – kann ungehindert durch ihn fließen. Um zu funktionieren, muss der Supraleiter auf extrem niedrige Temperaturen heruntergekühlt werden.

Die Qubits können in Form von elektrischen Strömen konstruiert werden, die ohne Widerstand durch supraleitende Schaltkreise im Kreis fließen. Bei solch niedrigen Temperaturen bilden die Millionen von Elektronen im Leiter zusammen einen großen Quantenzustand. Eine Möglichkeit, die Information abzubilden, liegt in den beiden unterschiedlichen Zuständen, in denen der Strom im oder gegen den Uhrzeigersinn durch die Schaltkreise fließt. Eine Richtung steht für 0 und die andere für 1. Wenn eine Superposition der beiden Zustände entsteht, „fließt“ der Strom in beide Richtungen gleichzeitig.

Der Vorteil dieser Qubits besteht darin, dass sie in feste integrierte Schaltkreise eingebaut werden können, ähnlich wie herkömmliche Mikroelektronik. Sie werden durch elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich gesteuert und ausgelesen.





Derzeit arbeiten mehrere Unternehmen, darunter [Google](#), [IBM](#) und [Intel](#), mit supraleitenden Qubits, wobei die Zahl der Qubits im Laufe der letzten Jahre stetig zugenommen hat.

Am IST Austria arbeiten Johannes Fink und Andrew Higginbotham mit ihren Teams an den Grundlagen dieser Art von Qubits.

## Optische Gitter

Laser sind gebündelte Lichtstrahlen, also schlichtelektromagnetische Wellen. Richtet man zwei Laser so aufeinander, sodass der eine genau in die entgegengesetzte Richtung des anderen strahlt, können die beide so interagieren, dass einzelne Atome in ihnen schweben können.

Ihre elektromagnetischen Felder bilden eine Reihe von sogenannten Potentialtöpfen, in denen die Atome ruhen. Man kann sich diese Vertiefungen wie einen leeren Eierkarton vorstellen, in dem sich an jeder Stelle, an der ein Ei sitzt, eine Potentialtopf befindet. Dort liegen die Atome. Zwei gegenüberliegende Laser bilden eine einzige Reihe von Potentialtöpfen, aber Wissenschaftler\_innen möchten noch viel mehr Laser verwenden, um zwei- oder sogar dreidimensionale optische Gitter aus Potentialtöpfen mit je einem Atom darin zu erzeugen.

Jedes einzelne Atom würde als Qubit fungieren, bei dem die Information in den Energiezuständen seiner Elektronen gespeichert ist, ähnlich wie bei den Ionenfallen-Qubits. Da sie in den Laserstrahlen schweben, können sie durch den Laser, der sie festhält, mit anderen Atomen interagieren.

Forscher\_innen arbeiten an der Schaffung und Kontrolle immer größerer optischer Gitter, um viele Tausende von Qubits auf einem Bruchteil eines Quadratmillimeters unterzubringen, haben aber bisher noch nicht die gewünschten Ergebnisse erzielt.



## Stickstoff-Fehlstellen-Zentren

Diamanten sind Kristalle, die aus Kohlenstoffatomen bestehen. Entfernt man zwei benachbarte Kohlenstoffatome und ersetzt eines davon durch ein Stickstoffatom, entsteht eine Fehlstelle im dreidimensionalen Gitter des Diamanten. Dort sammeln sich einige der Elektronen der umliegenden Kohlenstoffatome und können als Qubit fungieren.

Die Information wird im Spin der Elektronen an der Fehlstelle gespeichert. In der Quantenmechanik ist der Spin eine Eigenschaft von Teilchen wie Elektronen und kann entweder nach „oben“ oder „unten“ zeigen – die eine Richtung steht für 0 und die andere für 1. Wie bei vielen anderen Qubits manipulieren Wissenschaftler\_innen diese Elektronen in den Fehlstellen mittels Lasern, um Informationen für die Berechnungen einzugeben und auszulesen. Der Vorteil der Stickstoff-Fehlstellen-Zentren besteht darin, dass sie bei Raumtemperatur funktionieren, während andere Systeme bis fast zum absoluten Nullpunkt gekühlt werden müssen.

Während für Stickstoff-Fehlstellen-Zentren viele vielversprechende Anwendungen in besonders empfindlichen Quantensensoren geplant sind, erfordert ihr Einsatz in Quantencomputern noch weitere Grundlagenforschung.

## Topologische Qubits

Topologische Qubits unterscheiden sich deutlich von anderen Qubit-Systemen. Sie verhalten sich ganz anders als Atome oder Photonen, denn sie könnten die Daten für die Quantenberechnungen auf eine besondere Weise kodieren, die für viele Arten von Fehlern unempfindlich wäre.

Topologische Qubits sind theoretisch vorhergesagte Phänomene in bestimmten Festkörpern bei sehr niedrigen Temperaturen und unter starken Magnetfeldern. Unter diesen Bedingungen verhält sich eine ganze Gruppe von Quantensystemen gemeinsam wie ein einziges Teilchen. Diese sogenannten Quasiteilchen können dann Informationen in ihren Quantenzuständen speichern und miteinander interagieren, um Berechnungen durchzuführen.

Der besondere Vorteil der topologischen Qubits bestünde darin, dass ihre Art der Interaktion und wie sie ihre Plätze tauschen nahezu vollkommen unempfindlich gegen die Art von Fehlern ist, die andere Realisierungen von Qubits plagen. Die Information ist nämlich in ihrer Anordnung im Raum und in der Art, wie sie sich durch den Raum bewegen, kodiert. Würde man ein Diagramm ihrer Positionen gegen eine Zeitachse zeichnen, so bildeten sie verdrehte Geflechte, welche die Information und die Berechnungen darstellen.

Topologische Quantencomputer klingen sehr vielversprechend und Unternehmen wie [Microsoft](#) arbeiten an ihrer kommerziellen Entwicklung. Allerdings müssen die Wissenschaftler\_innen erst noch ein Experiment finden, [das ihre Existenz zweifelsfrei nachweist](#).

Am IST Austria untersuchen Georgios Katsaros und sein Team, wie solche supraleitenden Qubits konstruiert werden könnten.

## Quanten-Annealing

Neben Quantencomputern, die auf Qubits basieren, gibt es eine weitere Form von Quantenrechnern, sogenannte Quanten-Annealer. Anstatt Berechnungen ähnlich wie bei klassischen Computern durchzuführen – mit Qubits anstelle von Bits – geht diese Technik die Probleme aus einem anderen Blickwinkel an.

Quanten-Annealing ist am besten geeignet, um die optimale Lösung für sehr komplexe Probleme zu finden. Zum Beispiel wie man maschinelles Lernen effektiver macht oder wie man den Internetverkehr so leitet, dass er schneller und effizienter wird.

Forscher\_innen verwenden supraleitende Schaltkreise, um ein solches Problem in einem physikalischen System darzustellen. Sie lassen diese Qubits dann gemäß den Gesetzen der Quantenmechanik interagieren und sich entwickeln. Wenn das System richtig konstruiert ist, erreicht es nach einiger Zeit von selbst einen Zustand, der mit der optimalen Lösung des Problems korrespondiert.

Man kann sich das konstruierte Quantensystem als eine imaginäre Landschaft mit sorgfältig gestalteten Tälern und Bergen vorstellen. Der sich verändernde Quantenzustand des Systems korrespondiert dann zu Regenwasser, das die Hänge der Landschaft hinunterläuft. Es wird sich am tiefsten Punkt der Landschaft sammeln, der die Lösung des gegebenen Problems anzeigt.

Dieser Ansatz kann nicht die gleichen Quantenalgorithmen wie andere Quantencomputer implementieren, aber könnte möglicherweise bestimmte Optimierungsprobleme effektiver lösen. Unternehmen wie [D-Wave](#) stellen Maschinen her, die Quanten-Annealing verwenden, konnten aber bisher noch keinen Vorteil gegenüber klassischen Supercomputern nachweisen.



# Quantencomputer am IST Austria

Unter der großen Vielfalt an Themen, die am IST Austria beforscht werden, arbeiten drei Professoren und ihre Forschungsgruppen an den Grundlagen für zukünftige Quantencomputer.

## Nanoelektronik

Inspiziert von der atemberaubenden Miniaturisierung der Elektronik seit den 1950er-Jahren forschen Georgios Katsaros und sein Team an den Grenzen der Nanotechnologie.

Eines ihrer Ziele ist es, ein Experiment zu konstruieren, um das schwer fassbare [Majorana-Fermion zu finden](#). Dieses Quasiteilchen wurde von Theorien vorhergesagt, aber bisher nicht beobachtet. Es könnte zum Bau von topologischen Quantencomputern verwendet werden, die einen großen Vorteil gegenüber anderen Quantencomputern hätten, da sie viel fehlerresistenter wären. Zu diesem Zweck verwenden die Wissenschaftler\_innen Nanodrähte aus Aluminium, Arsen und Indium. Diese sind nur einige Millionstel Millimeter lang und bilden Halbleiter und Supraleiter. Mithilfe eines ausgeklügelten Aufbaus hoffen sie, Majorana-Fermionen als „gespaltene“ Elektronen zu beobachten.

Neben der Suche nach Majorana-Fermionen ist die Forschungsgruppe daran interessiert, Qubits aus Spins zu konstruieren. Jedoch nicht aus dem Spin von Elektronen, sondern dem von Löchern. Löcher sind positiv geladene Bereiche in einem Kristall, in denen ein negatives Elektron fehlt und können ebenfalls einen Spin haben. Den Forscher\_innen ist es gelungen, die [Kontrolle über diese Löcher im Nanomaßstab zu erlangen](#) und sie nach Belieben zu verschieben.

Georgios Katsaros und sein Team wollen die physikalischen Grundlagen von Geräten im Nanomaßstab erforschen und damit den Grundstein für zukünftige technologische Revolutionen legen, wie es in den 1950er-Jahren für die heutigen Technologien geschah.



## Georgios Katsaros

Georgios Katsaros begann seine wissenschaftliche Laufbahn an der Universität Konstanz, wechselte dann an das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, dann nach Harvard und CEA-Grenoble. Er wurde Gruppenleiter am IFW-Dresden und später an der Johannes Kepler Universität Linz, bevor er 2016 als Assistenzprofessor an das IST Austria kam.

[Katsaros Forschungsgruppe](#)

[Group Website](#)

## Integrierte Quantenmaschinen

In ihrer experimentellen Forschung arbeiten Johannes Fink und seine Gruppe an supraleitenden Qubits und daran, wie man sie über große Entfernungen miteinander vernetzen kann.

Diese supraleitenden Qubits haben zwar den Vorteil, dass sie sehr schnell sind und auf bewährten Halbleitertechnologien aufbauen. Jedoch sind sie anfällig für Fehler. Um diese zu korrigieren, wären Tausende von physischen Qubits erforderlich, um ein stabiles virtuelles Qubit zu erzeugen (s. Abschnitt Fehlerkorrektur und Herausforderungen). Fink und sein Team arbeiten daran, die Stabilität supraleitender Qubits zu verbessern, um die Fehlerquote zu senken, [indem sie besser gegen äußere Fluktuationen abgeschirmt werden](#).

Das zweite zentrale Thema der Forschungsgruppe ist die [Entwicklung von Bauelementen](#), die Quanteninformation von supraleitenden Qubits auf Photonen in einem Laser – einem Lichtstrahl – übertragen können. Das ist besonders für Quantencomputer und deren Vernetzung interessant, da Photonen unglaublich schnell sind. Während supraleitende Qubits für Berechnungen von Vorteil sind, eignen sich die schnellen photonischen Qubits hervorragend für die Übertragung von Quanteninformationen zwischen Quantenrechnern. Doch die effiziente Umwandlung vom einem Qubit in ein anderes ist noch ein ungelöstes Problem.

Die supraleitenden Qubits können mit elektromagnetischen Feldern mit ähnlichen Frequenzen wie in einem Mikrowellenherd interagieren, während Laser mit Feldern mit einer viel höheren Frequenz arbeiten. Daher können die beiden nicht einfach miteinander „reden“ und Informationen austauschen. Die Wissenschaftler\_innen um Johannes Fink [arbeiten an einem Mechanismus](#), der die Information zwischen diesen Frequenzen übersetzt.

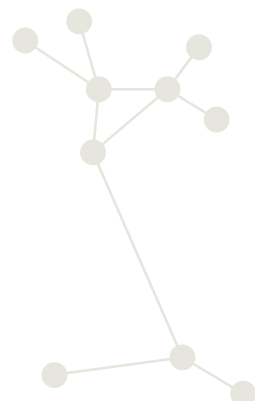


### Johannes Fink

Johannes Fink studierte zunächst Physik in Wien, promovierte an der ETH Zürich und arbeitete dann am California Institute of Technology. Im Jahr 2016 kehrte der Vorarlberger nach Österreich zurück, um am IST Austria zu arbeiten, zunächst als Assistenzprofessor und seit April 2021 mit einer vollen Professur.

[Fink Forschungsgruppe](#)

[Group Website](#)



## Kondensierte Materie und Quantenschaltungen

Zusammen mit seinem Team erforscht Andrew Higginbotham die Schnittstellen zwischen der Physik der kondensierten Materie und der Quanteninformatik.

Zu diesem Zweck verwenden sie die Nanolithographie, um winzige elektronische Schaltkreise im Nanometerbereich zu erzeugen. Die Wissenschaftler\_innen untersuchen deren Eigenschaften durch die Kombination von Supraleitern, Halbleitern und winzigen mechanischen Oszillatoren wie Membranen und Hebeln.

Der Grundgedanke ihrer Forschung ist, dass der Bau rudimentärer informationsverarbeitender Maschinen sowohl Einblicke in grundlegende physikalische Phänomene geben als auch Technologien für Quantencomputer voranbringen kann. Sie wollen herausfinden, wie genau Strom fließt, wenn sowohl ein Supraleiter als auch ein Halbleiter vorhanden sind, was eine wichtige Voraussetzung für viele Arten von Quantenelektronik und topologischer Supraleitung ist.

Andrew Higginbotham ist vorsichtig optimistisch für die Zukunft seines Feldes und begeistert von den Entwicklungen der Quantentechnologien in den letzten zehn Jahren. Er möchte zur Beantwortung grundlegender Fragen auf diesem Gebiet beitragen.

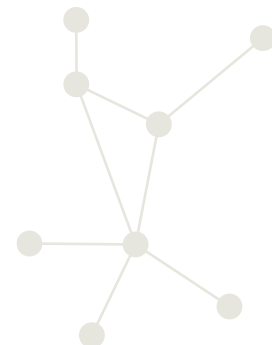


### Andrew Higginbotham

Nachdem er seine Karriere in den USA und im Vereinigten Königreich begonnen hatte, promovierte Andrew Higginbotham an der Universität Harvard und forschte anschließend an der CU Boulder und bei Microsoft Station Q in Kopenhagen. Im Jahr 2019 wurde er Assistenzprofessor am IST Austria, wo er ein eigenes Labor und ein neues Team aufbaute.

[Higginbotham Forschungsgruppe](#)

[Group Website](#)



## Interview mit Georgios Katsaros

In einem Interview mit IST Austria Wissenschaftsredakteur Thomas Zauner gibt Georgios Katsaros Einblicke in den Stand der Forschung und die Zukunft des Quantencomputers.

### Wie beurteilen Sie den aktuellen Stand der Grundlagenforschung zum Quantencomputing?

Ich bezeichne mich in der Regel als kurzfristigen Pessimisten und langfristigen Optimisten. Daher bin ich mit hochtrabenden Behauptungen und allgemeinen Vorhersagen sehr vorsichtig. Ich glaube, es gibt zurzeit eine Tendenz, sehr kühne Aussagen zu tätigen und ich halte das für sehr gefährlich.

Dennoch denke ich, dass wir auf jeden Fall in aufregenden Zeiten leben. Moderne Technologien haben es uns ermöglicht, mit Objekten zu spielen, von denen wir nie zu träumen gewagt hätten. Und sie lässt uns weiterträumen, dass wir eines Tages in der Lage sein könnten, einen echten Quantencomputer zu bauen.

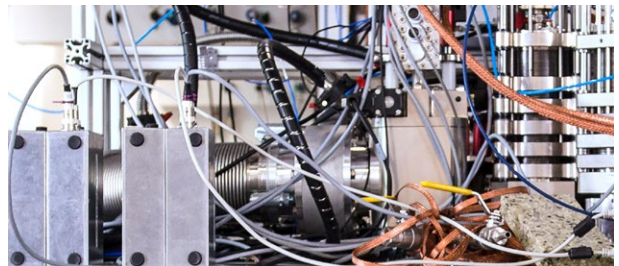
### Warum sind Sie trotz der großen Fortschritte, die in den letzten Jahren in der Quantentechnologie erzielt wurden, skeptisch, was die Entwicklung auf diesem Gebiet angeht?

Ja, es hat in den letzten Jahren erstaunliche Fortschritte gegeben! Allerdings muss man ein wenig vorsichtig sein, denn in letzter Zeit ist die Definition von Quantencomputern vage geworden. Auf die Frage „Was ist ein Quantencomputer?“ würde Ihnen wahrscheinlich jede Person in diesem Gebiet eine andere Antwort geben. Und einige werden Ihnen sagen, dass es bereits einen Quantencomputer gibt.

Was ich unter dem Begriff „Quantencomputer“ verstehe, ist ein universeller, fehlertoleranter Quantencomputer, den es einfach noch nicht gibt. Wir sind nicht

annähernd in der Lage, ihn zu realisieren. Trotz der großen Fortschritte, die bei den Qubits gemacht wurden, sprechen wir immer noch von physikalischen Qubits. Für nützliche Berechnungen in einem Quantencomputer bräuchte man jedoch logische Qubits.

In einem klassischen Computer arbeiten die Transistoren erstaunlich stabil und der Aufwand für die Fehlerkorrektur ist nicht allzu groß. Bei Qubits hingegen ist der Aufwand für die Fehlerkorrektur leider enorm. Viele Forscher\_innen in dem Feld sind sich einig, dass es da eine Redundanz von 1.000 bis 10.000 bräuchte. Das bedeutet, dass man für jedes logische Qubit 1.000 bis 10.000 physikalische Qubits benötigen würde.



Die Frage ist nun, wie viele Qubits man bräuchte, um etwas Sinnvolles zu tun. Einige Informatiker\_innen und Quantenphysiker\_innen, die Quantenalgorithmen entwickeln, schätzen diese Zahl auf etwa 100 logische Qubits. Dies würde optimistisch betrachtet 100.000 physikalische Qubits bedeuten. In einem kürzlich im Journal Science erschienenen Artikel haben Forscher\_innen ein Experiment mit 60 supraleitenden physikalischen Qubits vorgestellt. Ein erstaunliches Ergebnis! Aber das relativiert die Perspektive auf die Fortschritte in dem Feld.

Hieße das, wir sollten nicht daran arbeiten? Nein! Und natürlich sollten wir träumen. Ich bin mir ziemlich sicher, dass auch die Leute, die 1947 in den Bell Labs den ersten unansehnlichen Germanium-Transistor erfanden, davon träumten, dass sich dieses hässliche Ding eines Tages in ein großartiges Gerät verwandeln würde, das unser Leben revolutionieren würde. Aber

wir sollten auch sehr realistisch sehen, wo wir stehen und wie viel wir noch tun müssen, um dorthin zu gelangen.

**Was wäre Ihrer Meinung nach ein vielversprechender Weg, um das Problem zu lösen, dass so viele physikalische Qubits benötigt werden, um ein logisches Qubit zu konstruieren?**

Eine Möglichkeit besteht darin, mit experimentellen Plattformen zu arbeiten, die auf etablierten Siliziumtechnologien basieren und relativ einfach skalierbar sind. Ein Beispiel sind Loch-Spin-Qubits in Germanium. Eine andere Möglichkeit wären topologische Qubits, da sie sehr fehlerresistent sein sollten. Vielleicht bräuchte man nur 300 solcher physikalischen Qubits für jedes logische Qubit. Allerdings gibt es diese noch nicht. Es muss noch viel Grundlagenforschung betrieben werden, bevor wir das erste topologische Qubit realisieren können. Microsoft ist zentral an der Arbeit daran beteiligt. Jedoch bin ich mir nicht sicher, ob das wirklich funktionieren wird.

**Worauf beruhen Ihre Zweifel?**

In der wissenschaftlichen Gemeinschaft besteht keine Einigkeit darüber, ob die Existenz von Majorana-Nullmoden – den Bausteinen topologischer Qubits – überhaupt schon nachgewiesen wurde. Darüber hinaus besteht kein Konsens darüber, ob diese Qubits tatsächlich gegen Fehler immun wären.

Was Majorana-Nullmoden in Nanodrähten betrifft, so diskutiert die Wissenschaft fast zehn Jahre nach den ersten Berichten über Signale dieser Moden immer noch darüber, ob sie gesehen wurden oder nicht. Und wenn Sie mich fragen, bezweifle ich, dass man sie in Nanodrähten gefunden hat.

Um diese Phänomene zu verstehen, müssen wir noch viel tiefer in die Grundlagen der Physik eindringen. Vielleicht werden wir eines Tages etwas finden, einen neuen Mechanismus, der es uns ermöglicht, das

„perfekte“ Qubit oder zumindest ein viel besseres zu konstruieren.

**Was halten Sie von den Investitionen, die private Unternehmen in die Forschung an Quantencomputern stecken?**

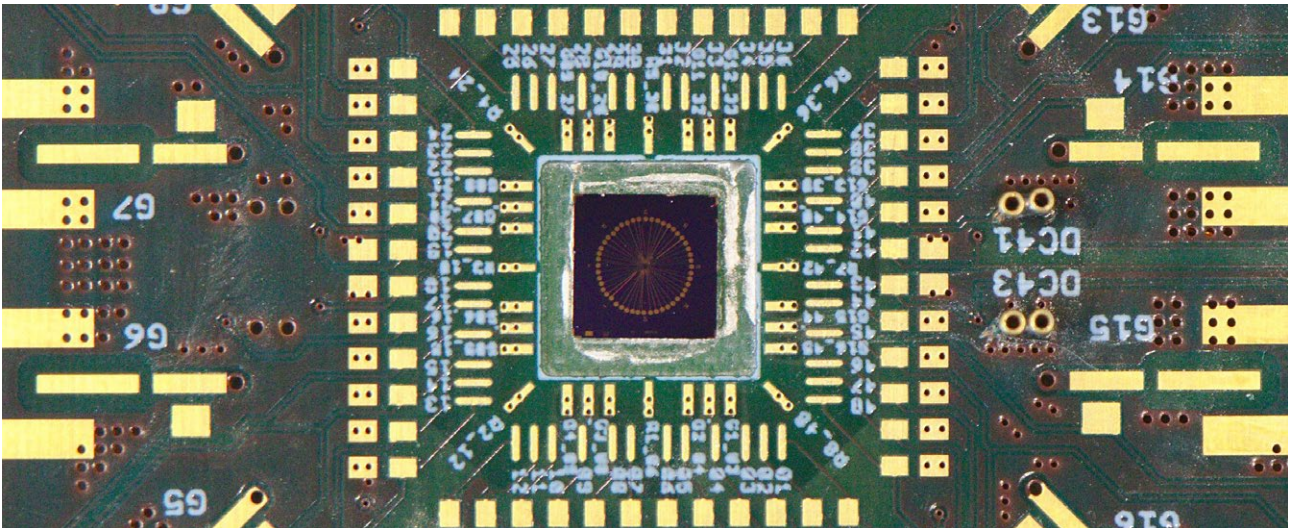
Man muss sehr vorsichtig sein mit dem Verhältnis von öffentlichen und privaten Geldern. Ich würde mir wünschen, dass der größte Teil der Finanzierung vom Staat kommt, aber private Unternehmen sind sehr wichtig und willkommen, einen Beitrag zu leisten.

Dennoch sollten sie nicht in der Lage sein, die Richtung der Forschung zu diktieren. Wenn ich mich für etwas interessiere, das vielleicht nichts mit Quantencomputern zu tun hat, möchte ich trotzdem in der Lage sein, daran zu forschen. Wenn man einen völlig anderen Weg einschlägt, kommt man vielleicht zu einer besseren Lösung.

**Und was halten Sie von den Versprechen dieser Unternehmen, was mit ihren Quantencomputern alles möglich sein sollte?**

Wenn Sie die Webseite eines Unternehmens öffnen, das an Quantencomputern arbeitet, sieht man Themen wie Gesundheit, Umwelt und Klimawandel – viele allgemeine Schlagworte. Wenn wir jedes Jahr große Fortschritte versprechen und diese nicht halten, werden die Leute nicht mehr an unsere Versprechen glauben und die Mittel werden versiegen. Wenn wir andererseits nichts versprechen, werden wir auch kein Geld bekommen.

Für mich ist dies das zentrale Problem unserer Zeit. Heutzutage ist Hype notwendig, um Aufmerksamkeit und Finanzierung zu erhalten. Ich halte das für gefährlich. Es ist viel besser, wenn wir uns auf das Wesentliche konzentrieren und versuchen, bestmögliche Forschung zu betreiben. Wissenschaftliche und technologische Fortschritte sind möglich, aber in viel kleineren Schritten als oft versprochen wird.



# Die Zukunft der Quantencomputer

Im Jahr 2019 gab Google einen Meilenstein in der Entwicklung von Quantencomputern bekannt. Ihre Forscher\_innen behaupteten, die „**Quantum Supremacy**“ erreicht zu haben. Das heißt, sie konnten mit ihrem Quantencomputer eine Berechnung viel schneller durchführen als mit einem klassischen Supercomputer.

In ihrem Experiment verwendeten sie einen Quantencomputer mit 54 supraleitenden Qubits, um in 200 Sekunden Berechnungen durchzuführen, für die ein klassischer Computer 10.000 Jahre bräuchte. Dieses Ergebnis wurde von Googles Konkurrente im Wettbewerb um den ersten Quantencomputer, IBM, sofort in Frage gestellt. IBM konnte die Gegenbehauptung jedoch nicht durch ein Experiment belegen, das zeigen sollte, dass die klassische Berechnung nicht so lange dauern würde.

Streitigkeiten wie diese über die Ergebnisse der neuesten Technologien verdeutlichen die offene Zukunft der Quantencomputer. Große Unternehmen wie [Google](#) und [IBM](#)

versprechen für die nächsten Jahre einen raschen Anstieg der Anzahl der Qubits in ihren Quantencomputern. Sie beschwören wundersame Anwendungsgebiete wie die Entwicklung neuer Medikamente durch Simulation von Proteinfaltung, effizientere Batterien durch neue Materialien und große Fortschritte beim maschinellen Lernen.

Ob solche Maschinen mit Tausenden und Millionen von Qubits tatsächlich gebaut werden können und einen beständigen Rechenvorteil gegenüber klassischen Supercomputern bieten, bleibt abzuwarten. Ähnlich wie bei der künstlichen Intelligenz, die in den letzten Jahrzehnten zwischen Hype und Flaute wechselte, könnten Versprechungen, die zu schön sind, um wahr zu sein, dem Feld letztendlich mehr schaden als nutzen. Wenn der Hype nachlässt und sich die Finanzierung abwendet, bevor die Technologie die Noisy Intermediate-Scale Quantum Ära hinter sich gelassen hat, wird es noch länger dauern, bis sie ihr volles Potenzial entfalten kann.



# Anhang

## Index

Klassischer Computer .....	4
Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) Ära .....	6
Physisches Qubit .....	6
Quantum Bits .....	4
Quantum Supremacy .....	16
Quantensimulation .....	6
Qubits .....	4
Shor-Algorithmus .....	5
Superposition .....	4
Verschränkung .....	5
Virtuelles Qubit .....	6

## Weiterführende Links

[Quantum Computation and Quantum Information. Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang, Massachusetts Institute of Technology, December 2010.](#)

[Here, there and everywhere. Quantum technology is beginning to come into its own. The Economist. Mar 11, 2017.](#)

[Beyond quantum supremacy: the hunt for useful quantum computers. Nature. Oct 2, 2019.](#)

[How to get started in quantum computing. Nature. Mar 1, 2021.](#)

[Google wants to build a useful quantum computer by 2029. May 19, 2021.](#)

[Quantencomputer: Zeitplan, Meilensteine, Herausforderungen, Hype. Science Media Center Germany. Jul 21, 2021.](#)

## Pressekontakt

**Michaela Klement**  
[michaela.klement@ist.ac.at](mailto:michaela.klement@ist.ac.at)  
+43 664 8832 6310

Die Illustration der Qubit-Systemen kann von Medien nach Rücksprache mit IST Austria verwendet werden. Weitere Materialien finden Sie auf der [Website des IST Austria](#).