

# QUANTENCOMPUTING

**Quantencomputer versprechen Lösungen für eine Vielzahl gesellschaftlich relevanter Probleme.**

**Das Forschungszentrum Jülich verbindet Grundlagenforschung, den Aufbau eines universellen Quantencomputers und dessen Integration in eine Hochleistungsrechner-Umgebung.**



# WEGWEISER

**Klassische Computer  
& Quantencomputer**

S. 04-05

**Quantenbasierte  
Rechnersysteme**

S. 06-07

**Quantencampus  
Jülich**

S. 08

**Projekte, Kooperationen  
& Spin-Offs**

S. 10-11

**Ausblick**

S. 15

**Talentförderung  
& Wissenstransfer**

S. 14

**JUNIQ**

S. 12-13

## Impressum

Quantencomputing · Herausgeber: Forschungszentrum Jülich GmbH · 52425 Jülich · Konzeption und Redaktion: Dr. Irina Heese · Autorin: Dr. Irina Heese · Grafik und Layout: Ivonne Pajunk · Bildnachweise: eleQtron (13 re. o.) Forschungszentrum Jülich / Michael Bresser (12), Forschungszentrum Jülich / Sascha Kreklau (6 li., 13 Mitte u., 15 u.), Forschungszentrum Jülich / Ralf-Uwe Limbach (7 li., 9, 13 Mitte, 13 Mitte o., 13 li. u., 15 o.), IQM (13 re. o.), PASQAL (7 re., 13 re. u.), Patrick Vliex / PGI-4 (6 re.), Hintergrundgrafiken: metamorworks, Olena, Vadym, vegefox.com, WC Studio, Yucel Yilmaz - stock.adobe.com · Kontakt: JUQCA-Büro · Tel.: 02461 61 - 85847 · E-Mail: juqca@fz-juelich.de · Auszüge aus diesem Heft dürfen ohne weitere Genehmigung wiedergegeben werden, vorausgesetzt, dass bei der Veröffentlichung das Forschungszentrum Jülich genannt wird. Um ein Belegexemplar wird gebeten. Alle übrigen Rechte bleiben vorbehalten. · Auflage: 500



# WAS VERBINDEN SIE MIT QUANTENCOMPUTERN?



Quantencomputer sind keine Weiterentwicklung klassischer Computer, sondern eine neue Art von Rechnern, welche die Prinzipien der Quantenphysik nutzen.

Sie haben das Potential, viele Bereiche der Wissenschaft und Wirtschaft grundlegend zu transformieren.

Diese Broschüre enthält Informationen darüber, was Quantencomputer von

klassischen Computern und quantenbasierten Rechnersystemen unterscheidet. Sie beschreibt das Ökosystem Quantencomputing am Forschungszentrum Jülich mit allen wichtigen Projekten und Netzwerken.

Wenn Sie Wissenschaftler:in sind und im Bereich Quantencomputing arbeiten möchten, finden Sie weitere Informationen am Ende dieser Broschüre.

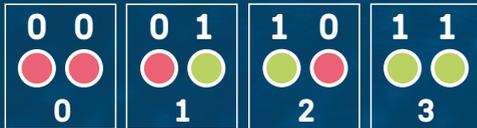


# KLASSISCHE COMPUTER

Der grundlegende Baustein im klassischen Computer ist das Bit: Strom fließt (1) oder Strom fließt nicht (0).

In der Informationstechnologie werden Bits verwendet, um Daten zu speichern und zu übertragen.

## Computer Bit



Durch die Kombination von Bits lassen sich Ziffern, Buchstaben und andere Zeichen kodieren.

Beispielsweise können die Zahlen 0 bis 3 mit zwei Bits dargestellt werden, während die Zahl 13 schon vier Bits erfordert.



# QUANTENCOMPUTER

## Qubit



Ein Quantencomputer verwendet Quantenbits, kurz Qubits, anstelle von herkömmlichen Bits.

Ein Qubit wird oft als Pfeil dargestellt, der auf die Oberfläche einer Kugel zeigt. Der Pfeil selbst stellt dabei einen Quantenzustand dar.

Rechenoperationen entsprechen den Bewegungen dieses Pfeils, der beliebig viele Quantenzustände einnehmen kann. Bei einer Messung jedoch stoppt die Bewegung und das Qubit nimmt den Zustand 0 oder 1 ein.

Zwei Qubits können vier verschiedene Bitfolgen erzeugen. Das Ergebnis ist zufällig.



## NICHT-Gatter



Elektronische Schaltungen, auch logische Gatter genannt, verbinden Bits nach Regeln wie UND, ODER, NICHT - ähnlich wie bei einer Entscheidungsfrage.

Diese Verknüpfungen ermöglichen eine Datenverarbeitung und bilden die Grundlage für Mikroprozessoren.



## Warum rechnet ein Quantencomputer schneller?

Wenn in einer Bibliothek mit Tausenden von Büchern ein bestimmtes Buch gesucht wird, würde ein klassischer Computer jedes Buch nacheinander herausnehmen.

**Ein Quantencomputer könnte alle Bücher gleichzeitig anschauen.**

## Quantengatter



Mit Hilfe von Quantengattern können die Qubits jedoch so manipuliert werden, dass das gesuchte Ergebnis am wahrscheinlichsten gemessen wird.

Ein Beispiel ist das Pauli-X-Gatter, das den Spin-0-Zustand in den Spin-1-Zustand umwandelt und umgekehrt. Die Wahl des Gatters hängt von der Anwendung ab.



# UNIVERSELLE QUANTENCOMPUTER

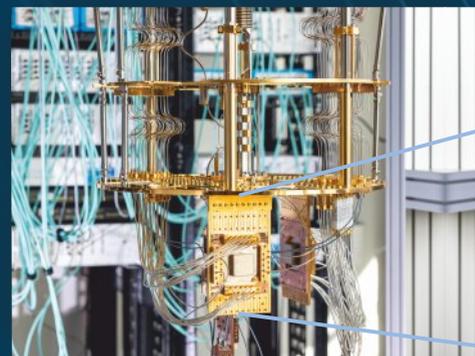
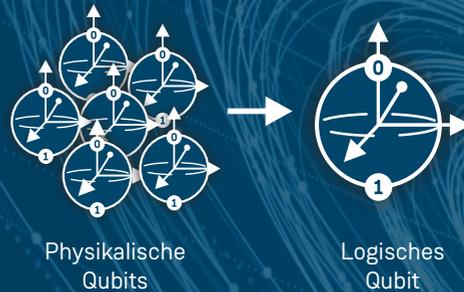
Universelle Quantencomputer werden auch als gatterbasierte Quantencomputer bezeichnet und sind frei programmierbar. Sie nutzen Qubits, die beispielsweise mit supraleitenden Schaltkreisen, Halbleitermaterialien, Neutralatomen, Ionenfallen oder Photonen realisiert werden können.

Quantencomputer reagieren sehr empfindlich auf äußere Störungen. Eine Möglichkeit, die Auswirkungen von Störungen zu minimieren, ist die Anwendung der Quantenfehlerkorrektur.

Dabei werden mehrere physikalische Qubits zu einem logischen Qubit zusammengefasst, um Berechnungen mit minimalen Fehlern zu ermöglichen.

**Die Anzahl der physikalischen Qubits ist also nicht das einzige Kriterium für die Effizienz eines Quantencomputers!**

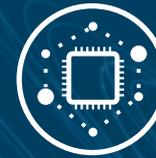
Eine weitere Herausforderung besteht darin, die Qubits miteinander zu verbinden, da heutige Systeme nicht in der Lage sind, mehrere hunderttausend Qubits miteinander zu koppeln.



Geöffneter Quantencomputer-Kryostat am Forschungszentrum Jülich



Prototyp eines Versuchsaufbaus zur Integration des Qubit-Chips und des Halbleiterschaltkreises



# QUANTENBASIERTE RECHNERSYSTEME

**Neben dem vorgestellten universellen Quantencomputer, gibt es weitere Systeme, die Quanteneffekte für Berechnungen nutzen.**

## Quantenannealer

Ein Quantenannealer löst Optimierungsprobleme effizient. Hierfür sucht er die beste Kombination aus vielen Möglichkeiten, um beispielsweise den Verkehrsfluss zu verbessern. Dabei wird das Energieminimum als Lösung des Problems bestimmt.



## Quantensimulator

Mit einem Quantensimulator können Probleme gelöst werden, bei denen die Eigenschaften und Wechselwirkungen einer großen Anzahl von Teilchen untersucht werden.

Die Idee: Es wird ein künstliches, kontrollierbares Quantensystem verwendet, dessen Eigenschaften aber auf Teilaspekte des zu untersuchenden Systems übertragen werden können. Ein Beispiel für die Anwendung ist die Erforschung von Materialeigenschaften.



Februar 2025: Das Forschungszentrum Jülich übernimmt den D-Wave Quantenannealer dauerhaft in seine Quantencomputing-Infrastruktur.



Frühling 2022: Das Forschungszentrum Jülich und GENCI starten HPCQS, eine europäische Plattform für hybrides Hochleistungsrechnen und Quantencomputing, mit zwei 100-Qubit-Quantensimulatoren von PASQAL. Einer dieser Simulatoren ist am Campus vom Forschungszentrum Jülich installiert.



# QUANTENCAMPUS JÜLICH

Das Forschungszentrum Jülich ist ein Hotspot der Quantenforschung in Europa. Von der Grundlagenforschung über den Bau eines universellen Quan-

tencomputers bis hin zur Integration in eine High Performance Computing (HPC) - Architektur werden alle Forschungsbereiche abgedeckt.



**JÜLICH**  
Forschungszentrum

**JUQCA**  
QUANTUM COMPUTING ALLIANCE

Die Jüelich Quantum Computing Alliance, kurz JUQCA, bündelt die Jülicher Aktivitäten zur Entwicklung von Quantencomputern und deren Anwendungen. Sieben Institutsbereiche, die sich mit der Theorie,

Entwicklung und Anwendung von Quantencomputern beschäftigen, sind derzeit in JUQCA vertreten. Ziel ist es, Quantencomputer so schnell wie möglich einsatzfähig zu machen.



## INTEGRATION IN HPC-ARCHITEKTUR



## BAU EINES UNIVERSELLEN QUANTENCOMPUTERS



## GRUNDLAGENFORSCHUNG QUANTENMATERIALSYSTEME

Die Forschung in Jülich konzentriert sich auf festkörperbasierte Systeme wie supraleitende und Halbleiter-Qubits und entwickelt neue Ansätze. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler profitieren von Forschungsinfrastrukturen wie dem Helmholtz

Quantum Center, das eine spezialisierte Laborumgebung schafft, und der Helmholtz Nano Facility, die eine Reinrauminfrastruktur für die Herstellung von Bauelementen und Quantenchips bereitstellt.

## ELEKTRONIK

Prof. Dr. Stefan van Waasen  
**Schaltkreisentwicklung zur Kontrolle sehr vieler Qubits**



## QUANTEN- ALGORITHMEN

Prof. Dr. Kristel Michielsen  
**Entwicklung von Anwendungsfällen und Nutzerinfrastruktur**

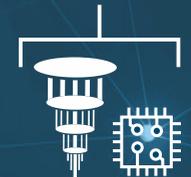


## LOGISCHE QUBITS UND GATTER

Prof. Dr. Tommaso Calarco  
**Quantenkontrolle**

Prof. Dr. David DiVincenzo  
**Quanten-Fehlerkorrektur**

Prof. Dr. Frank Wilhelm-Mauch  
**Quanten-Firmware**



## HARDWARE

Prof. Dr. Rami Barends  
**Supraleitende Qubits, Bauelementarchitektur**

Prof. Dr. Hendrik Bluhm  
**Halbleiter-Qubits und Chip-Design**



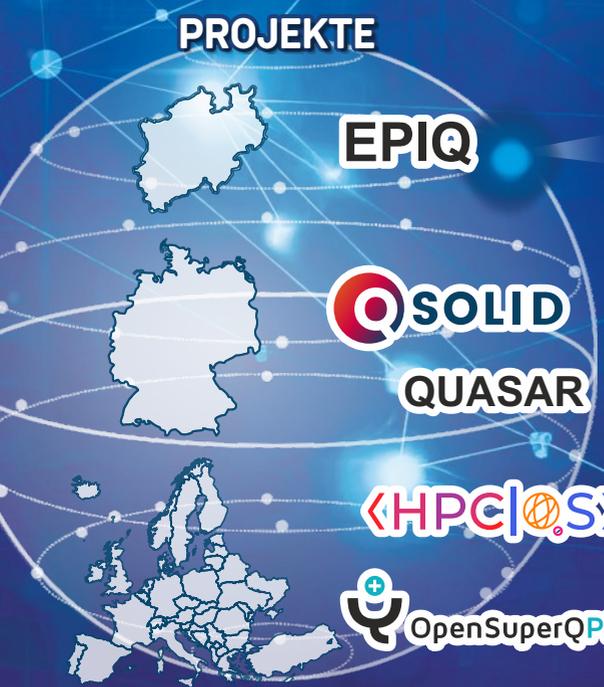
### **Ansprechperson:**

Wissenschaftlicher Koordinator:  
**Prof. Frank Wilhelm-Mauch**

JUQCA-Büro: [juqca@fz-juelich.de](mailto:juqca@fz-juelich.de)



# PROJEKTE, KOOPERATIONEN & SPIN-OFFS





**Jülich ist bekannt für seine Supercomputer-Infrastruktur. Die Integration von verschiedenen Quantensystemen in das Supercomputing-Ökosystem ermöglicht es, Quantenrechner für zukünftige Anwendungen zu testen.**

Die Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing, kurz JUNIQ, bietet Wissenschaft und Industrie Zugang zu modernsten Quantencomputern und unterstützt die frühzeitige Erforschung und Anwendung von Quantencomputertechnologien.

Das Angebot umfasst gatterbasierte Quantencomputer, Quantenannealer, Quantensimulatoren und Quantencomputeremulatoren - diese simulieren die Funktionsweise von Quantencomputern auf Supercomputern.

Wie die Supercomputer des JSC werden auch die Quantencomputer im Rahmen eines Peer-Review-Verfahrens genutzt. Darüber hinaus bieten die Expert:innen Benutzersupport, Service und Schulungen an. Gemeinsam mit anderen Forschenden entwickeln sie Algorithmen und Prototypanwendungen für die Systeme.

gefördert durch

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt | Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen





# TALENTFÖRDERUNG UND WISSENSTRANSFER



**Personalbetreuung, -entwicklung und Recruiting**  
[www.fz-juelich.de/de/gp](http://www.fz-juelich.de/de/gp)

Das Forschungszentrum Jülich fördert junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit zentrumsweiten Programmen – und mit Trainings, die zeigen, wie sich Forschung in marktfähige Produkte und Dienstleistungen übersetzen lässt.

Die Faszination für Quantencomputer verbindet alle beteiligten Institute.

Mitarbeitende aus der Theorie und Anwendung tauschen sich regelmäßig aus und arbeiten eng zusammen. Wer hier forscht, knüpft Kontakte zu Partnern in aller Welt – in Projekten, in Netzwerken oder bei Konferenzen.

Der Standort Jülich bietet eine einzigartige Forschungslandschaft für Quantencomputing.



# AUSBLICK



„Vor 100 Jahren beschrieben Artikel in der „Zeitschrift für Physik“ und in den „Annalen der Physik“ eine neue physikalische Realität: die moderne Quantenmechanik. Wir sind noch dabei, die Bedeutung dieser Entdeckungen zu verstehen, aber sie werden mit Sicherheit neue Technologien hervorbringen.“

**Prof. Dr. David DiVincenzo**  
 Direktor Theoretische Nanoelektronik  
 und JARA-Institut für Quanteninformatik

„Praktisches Quantencomputing für reale Anwendungen erfordert die Integration von High Performance Computing (HPC)-Systemen und Quantencomputern für hybrides HPC-Quantencomputing.“

**Prof. Dr. Kristel Michielsen**  
 Institute for Advanced Simulation,  
 Jülich Supercomputing Centre (JSC)



## Wie geht es weiter?

Als Turing die erste Rechenmaschine baute, ahnte er nicht, welche Anwendungen 70 Jahre später möglich sein würden.

Wofür könnten Quantencomputer in 50 Jahren eingesetzt werden?

**In Jülich arbeiten Expertinnen und Experten mit Pioniergeist an der Weiterentwicklung.**





**Erfahren Sie mehr  
zu dem Thema  
Quantentechnologie:**

[www.fz-juelich.de/de/forschung/  
unsere-forschung/information/  
quantentechnologie](http://www.fz-juelich.de/de/forschung/unsere-forschung/information/quantentechnologie)



**Folgen Sie uns  
gerne auch auf  
LinkedIn:**

[www.linkedin.com/showcase/  
quantum-computing-fzj/](http://www.linkedin.com/showcase/quantum-computing-fzj/)