

# Zukunftstechnologie Quantencomputing – Grundlagen, Potenziale, Beispiele

---

PD Dr. habil. Jeanette Miriam Lorenz  
26.11.2024

# Airbus Quantum Computing Challenge

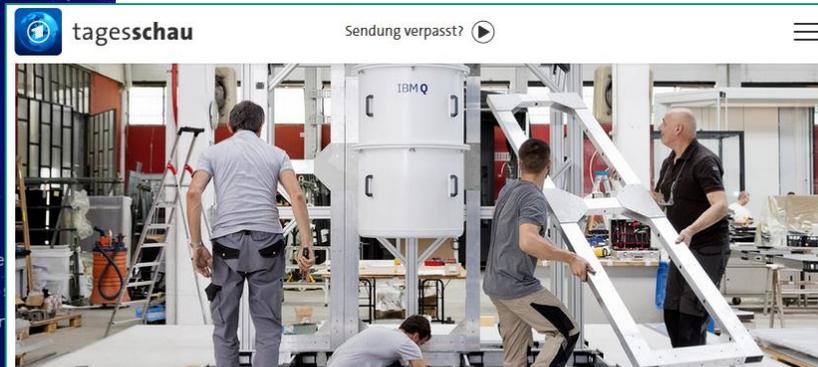
Bringing flight physics into the Quantum Era



# The future is Quantum.

The Second Quantum Revolution is unfolding now, exploiting the enormous advancements in our ability to detect and manipulate quantum objects. The Quantum Flagship is driving this revolution in Europe.

[LEARN MORE](#)



Computertechnologie

## Ein Quantensprung für Deutschland?

Stand: 15.06.2021 18:25 Uhr

In Ehningen bei Stuttgart wurde Europas erster Quantencomputer eingeweiht. Der ultraschnelle Rechner der Firma IBM soll der Wirtschaft helfen, im Wettstreit mit China und den USA zu bestehen.

Von Michael Herr, SWR

Das "Wunderwerk der Technologie", wie Angela Merkel es nannte, ist wichtig: Immerhin eine Grundfläche von drei mal drei Metern bei einer Höhe von drei Metern soll der Quantencomputer haben, den IBM zusammen mit der Fraunhofer-Gesellschaft am Dienstag in der Deutschland-Zentrale des IT-Konzerns in Ehningen bei Stuttgart der Öffentlichkeit präsentiert hat. Der laut IBM "leistungsstärkste Quantencomputer im industriellen Umfeld"

ZEIT ONLINE

Politik Gesellschaft Wirtschaft Kultur • Wissen Gesundheit • **Digital** Campus • Arbeit Sport ZEITmagazin • mehr •

Technologie

# Bund investiert zwei Milliarden Euro für Quantencomputer

Innerhalb von fünf Jahren soll in Deutschland ein Quantencomputer entstehen. Mithilfe von Qubits erzielt die Technologie weit höhere Leistungen als herkömmliche Rechner.

11. Mai 2021, 11:29 Uhr / Quelle: ZEIT ONLINE, dpa, kzi /



# Aufkommende Technologie:

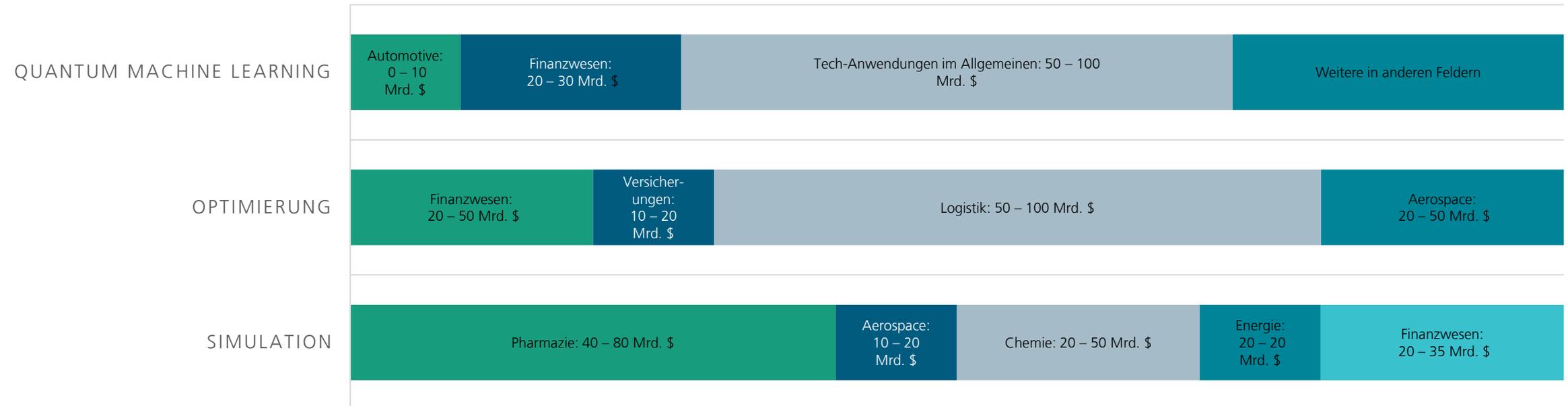
## Quantencomputing

Quantencomputing (QC) hat das Potenzial in vielen (industriellen) Bereichen zu disruptiven Veränderungen zu führen:

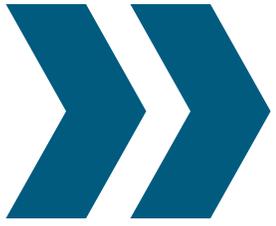
- **Simulation** von quantenmechanischen Systemen
  - Entwicklung neuer Medikamente, chemischer Bereich mit Batterieentwicklung...
- **Lösung linearer Gleichungssysteme**
  - Strömungsmechanik,...
- **Optimierungsprobleme**
  - Logistik, Produktion, Pharma, ...
- **Quantum Machine Learning**
  - Computer Vision, Mobilität,...



# Erwartete Wertschöpfung in den nächsten 15-30 Jahren



Gemäß einer Analyse der Boston Consulting Group: <https://www.bcg.com/de-de/publications/2021/building-quantum-advantage>



***because nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy.***

Richard Feynman, Simulating Physics with Computers, International Journal of Theoretical Physics 21, 467 (1982)

# Was ist Quantencomputing?

0



1

**Klassischer Bit**

Ein **klassischer Bit** ist entweder 0 oder 1.

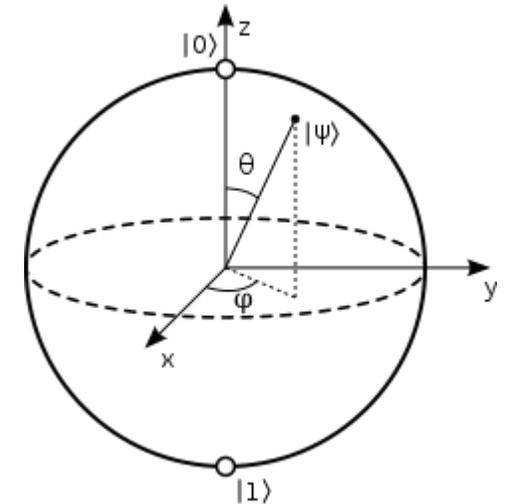
Ein **Quantum Bit** ( $\hat{=}$  Qubit) ist eine Superposition von zwei (quantenmechanischen) Zuständen  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$  **zugleich**:

$$a |0\rangle + b |1\rangle$$

mit  $|a|^2 + |b|^2 = 1$

**Aber:** Sobald der Qubit **gemessen** wird, können nur die klassischen Zustände 0 und 1 gemessen werden, und zwar mit einer Wahrscheinlichkeit von  $|a|^2$  für 0 und  $|b|^2$  für 1.

**Ein Quantencomputer gibt probabilistische Ergebnisse zurück.**



**Qubit: Bloch  
Sphäre**

[Wikimedia](#)

# Beispiel: Darstellung von Zahlen

Um Zahlen zwischen 0 und 15 in Bits darzustellen, benötigen wir 4 Bits:

0 0 0 0

0 0 0 1

0 0 1 0

0 0 1 1

0 1 0 0

...

1 1 1 1

Vier Qubits erlauben uns aber auch alle diese Zustände **gleichzeitig** darzustellen:

$$|0000\rangle + |0001\rangle + |0010\rangle + |0011\rangle + |0100\rangle + |0101\rangle + |0110\rangle + |0111\rangle + |1000\rangle + |1001\rangle + |1010\rangle + |1011\rangle + |1100\rangle + |1101\rangle + |1110\rangle + |1111\rangle$$

→ **Dadurch ist eine Parallelisierung von Berechnungen möglich.**

**Somit können wir mit n Qubits  $2^n$  Zustände gleichzeitig darstellen.**

# Warum ist Quantencomputing in den Datenwissenschaften vielversprechend?

**Superposition** von Zuständen

**Verschränkung** von Zuständen – d.h. mehrere Qubits sind miteinander vernüpft bzw. miteinander **synchronisiert**.

**Interferenz** von Qubits – d.h. Zustände interferieren miteinander → Verstärkung oder Abschwächung von Zuständen.

Quantencomputing könnte somit zu einer **vergrößerten Computing-Kapazität** führen – und daher zu einer effizienteren Lösung von Problemen.

→ Möglicherweise vereinfachtes Prozessieren von komplizierten Datensätzen und Lösung von **bislang unlösbaren** Problemen.

Es ist jedoch gänzlich unklar, wann die Qualität aktueller QC **ausreichend** sein wird, um von diesen Eigenschaften zu profitieren.

# Ein perfekter Quantencomputer

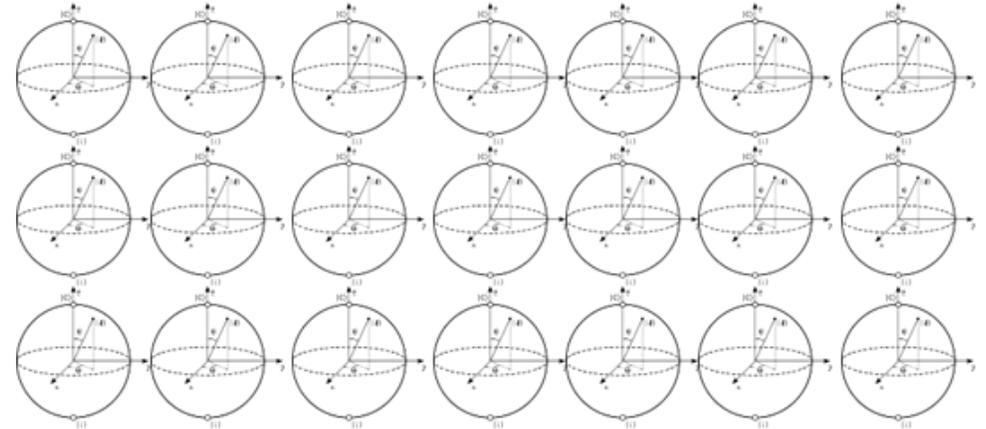
Zum tatsächlichen Realisieren eines Vorteils durch QC perfekte Qubits notwendig – logische Qubits:

- Logische Qubits halten ihren Zustand ohne aktive Modifikationen
- Es können beliebig viele Operationen d.h. Gates auf sie angewendet werden

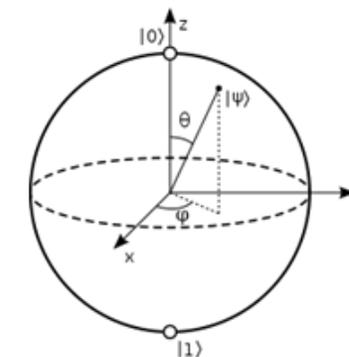
**Reale, d.h. physikalische, Qubits verlieren ihre Eigenschaften mit der Zeit, gemäß ihrer Dekohärenzzeit**

→ Viele **Hunderte physikalische Qubits und Fehlerkorrektur** notwendig, um ein logisches Qubit zu realisieren.

## Physikalische Qubits



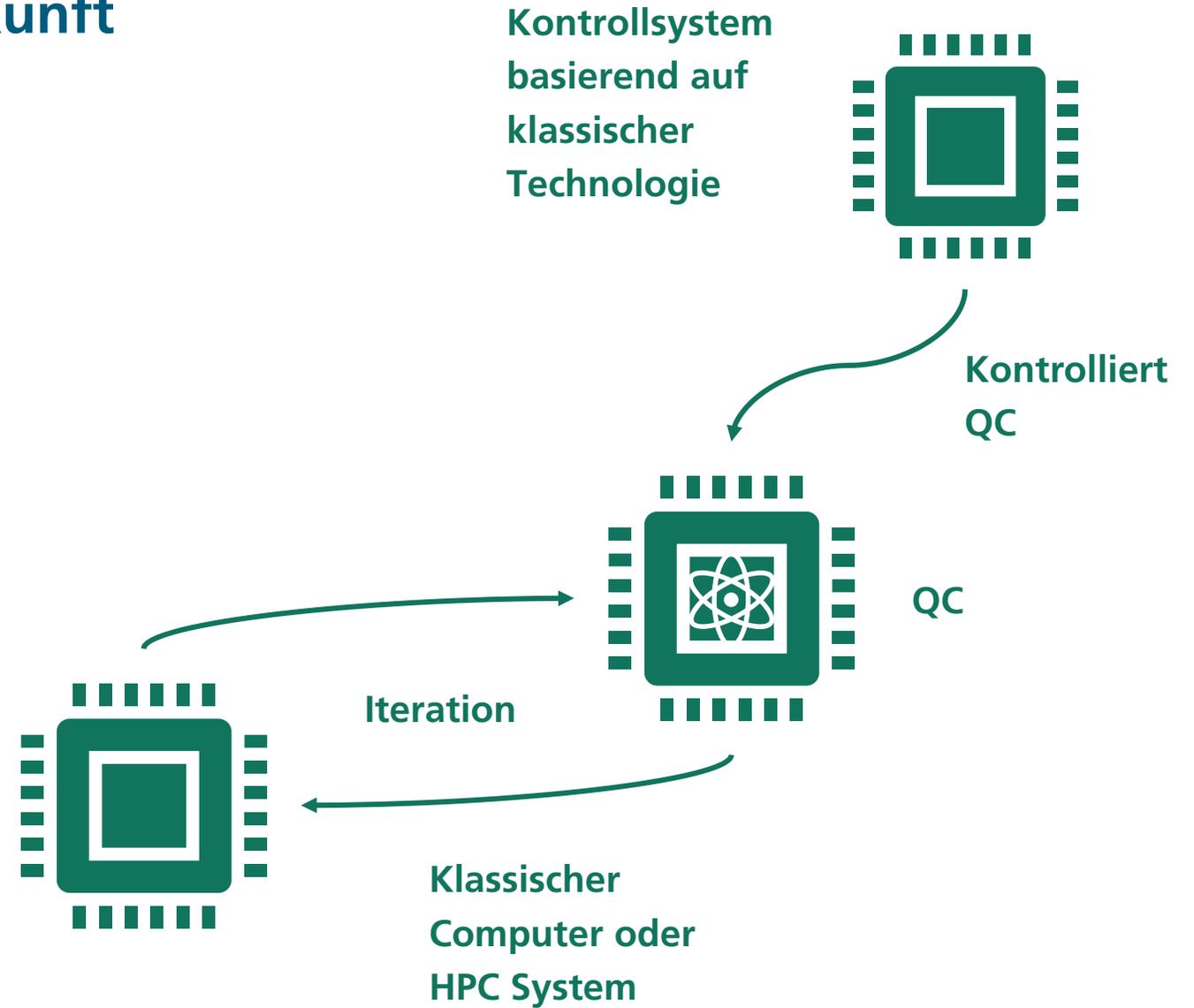
**Logical Qubit**



# Quantencomputing in näherer Zukunft

Aktuelle **Noisy Intermediate Scale Quantum** (NISQ) Computer sind noch nicht leistungsstark genug, um auch große Probleme lösen zu können.

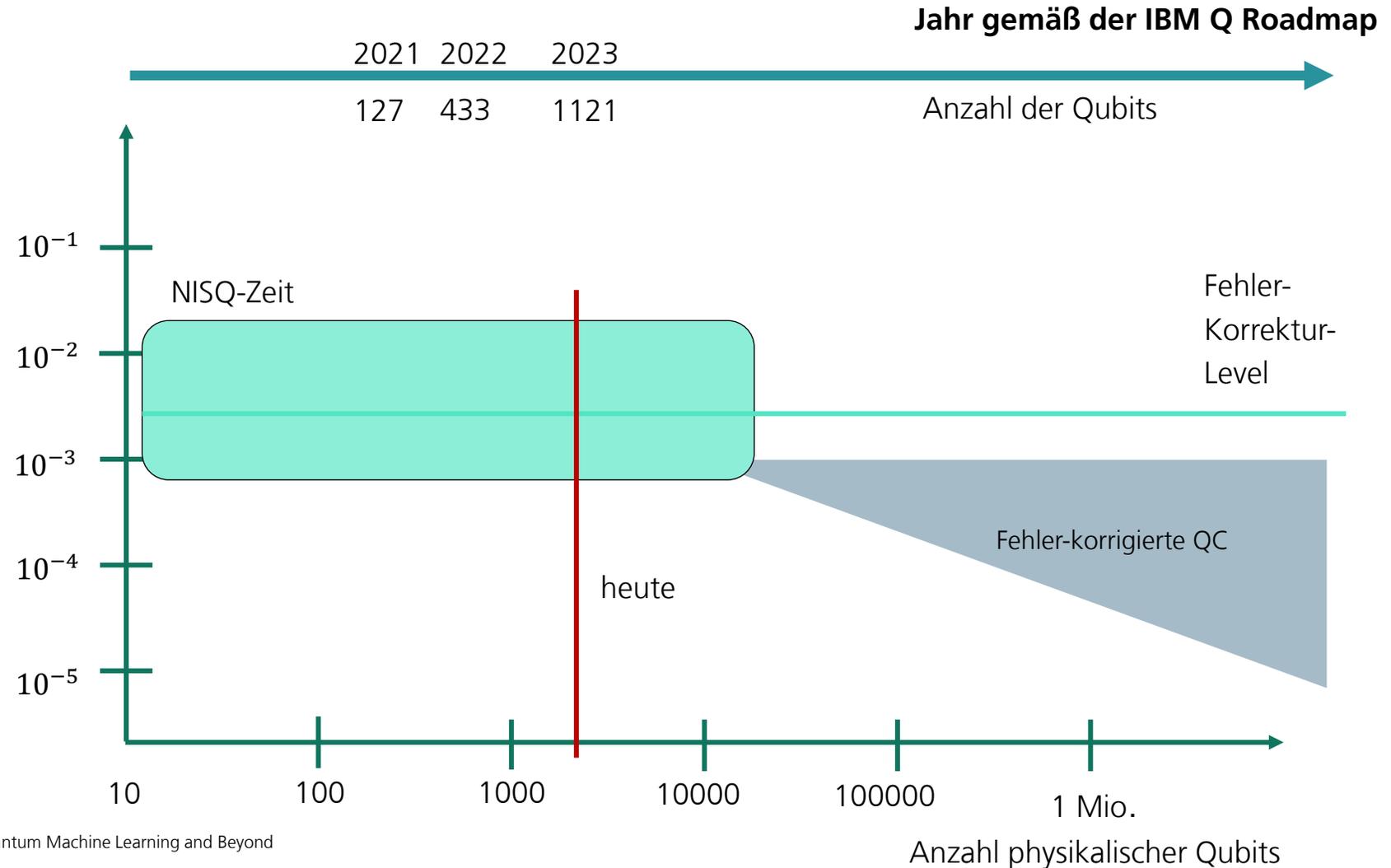
Für NISQ-Geräte sind vor allem **hybride** Algorithmen vielversprechend: Berechnungen mit **limitierter Größe aber hoher Komplexität** auf einem QC, in enger Abstimmung mit einem klassischen Computer oder einem High Performance Computing (HPC)-System.



# Aktueller Stand der Technik

**Aktuell nur theoretischer und akademischer Quantenvorteil gezeigt. IBM behauptet Quantum Utility. Verschiedene Experimente demonstrieren erste logische Qubits.**

**Für einen praktischen Quantenvorteil benötigt:** Fähigkeit, praktisch relevante Probleme lösen zu können, d.h. Arbeiten mit komplizierten oder unordentlichen Datensätzen



Sources:  
Preskill, 2018, <https://arxiv.org/abs/1801.00862>  
Combarro, 2020, A Practical Introduction to Quantum Computing: From Qubits to Quantum Machine Learning and Beyond  
IBM Roadmap 2021, <https://research.ibm.com/blog/quantum-development-roadmap>

2016–2019

2020

2021

2022

2023

2024

2025

2026

2027

2028

2029

2033+

Ran quantum circuits on the IBM Quantum Platform

Released multi-dimensional roadmap publicly with initial aim focused on scaling

Enhanced quantum execution speed by 100x with Qiskit Runtime

Brought dynamic circuits to unlock more computations

Enhanced quantum execution speed by 5x with Quantum Serverless and execution modes

Improve quantum circuit quality and speed to allow 5K gates with parametric circuits

Enhance quantum execution speed and parallelization with partitioning and quantum modularity

Improve quantum circuit quality to allow 7.5K gates

Improve quantum circuit quality to allow 10K gates

Improve quantum circuit quality to allow 15K gates

Improve quantum circuit quality to allow 100M gates

Beyond 2033, quantum-centric supercomputers will include 1000's of logical qubits unlocking the full power of quantum computing

Data scientists

Platform

Qiskit Code Assistant

Qiskit Functions Service

Mapping collections

Specific libraries

General purpose QC libraries

Researchers

Middleware

Qiskit Serverless

Qiskit Transpiler Service

Resource management

Circuit knitting x.p

Intelligent orchestration

Circuit libraries

Quantum physicists

Qiskit Runtime Service

IBM Quantum Experience

QASM 3

Dynamic circuits

Execution modes

Heron (5K)

Flamingo (5K)

Flamingo (7.5K)

Flamingo (10K)

Flamingo (15K)

Starling (100M)

Blue Jay (1B)

Early

Falcon

Eagle

Error mitigation

Error mitigation

Error mitigation

Error mitigation

Error mitigation

Error correction

Error correction

Canary 5 qubits Albatross 16 qubits Penguin 20 qubits Prototype 53 qubits

Benchmarking 27 qubits

Benchmarking 127 qubits

5k gates 133 qubits Classical modular 133x3 = 399 qubits

5k gates 156 qubits Quantum modular 156x7 = 1092 qubits

7.5k gates 156 qubits Quantum modular 156x7 = 1092 qubits

10k gates 156 qubits Quantum modular 156x7 = 1092 qubits

15k gates 156 qubits Quantum modular 156x7 = 1092 qubits

100M gates 200 qubits Error corrected modularity

1B gates 2000 qubits Error corrected modularity

Innovation Roadmap

Software innovation

IBM Quantum Experience

Qiskit

Application modules

Qiskit Runtime

Quantum Serverless

AI-enhanced quantum

Resource management

Scalable circuit knitting

Error correction decoder

Circuit and operator API with compilation to multiple targets

Modules for domain specific application and algorithm workflows

Performance and abstraction through primitives

Demonstrate concepts of quantum-centric supercomputing

Prototype demonstrations of AI-enhanced circuit transpilation

System partitioning to enable parallel execution

Circuit partitioning with classical reconstruction at HPC scale

Demonstration of a quantum system with real-time error correction decoder

Hardware innovation

Early

Falcon

Hummingbird

Eagle

Osprey

Condor

Flamingo

Kookaburra

Cockatoo

Starling

Canary 5 qubits Penguin 20 qubits Albatross 16 qubits Prototype 53 qubits

Demonstrate scaling with I/O routing with bump bonds

Demonstrate scaling with multiplexing readout

Demonstrate scaling with MLW and TSV

Enabling scaling with high density signal delivery

Single system scaling and fridge capacity

Demonstrate scaling with modular connectors

Demonstrate scaling with nonlocal c-coupler

Demonstrate path to improved quality with logical memory

Demonstrate path to improved quality with logical communication

Demonstrate path to improved quality with logical gates

Executed by IBM

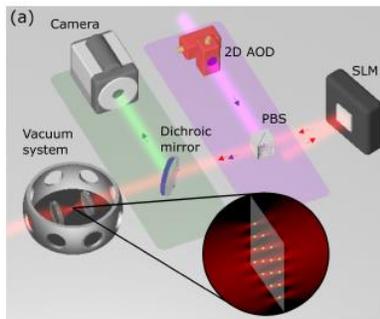
On target

# Unterschiedliche QC Hardware Konzepte

Vermutlich werden unterschiedliche Konzepte für unterschiedliche Anwendungen genutzt werden

## Neutralatome:

- Atomensembles umgeben von einem Lasersystem, welches eine magnetisch-optische Falle formt, adressierbares Array von Atomen.
- Benötigt einen spezifischen Weg zum Programmieren (Pulser), gute Konnektivität, ausgelegt auf QUBO Formulierungen?



L. Henriet et al, Quantum Computing with neutral atoms, arXiv:2006.12326v2

## Supraleitende Qubits

- Supraleitende Josephson Junctions bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt.
- Niedrige Konnektivität, dadurch viele SWAP-Operationen benötigt für Schaltkreise mit hoher Konnektivitätsanforderung. Erste Runtime-Ansätze.

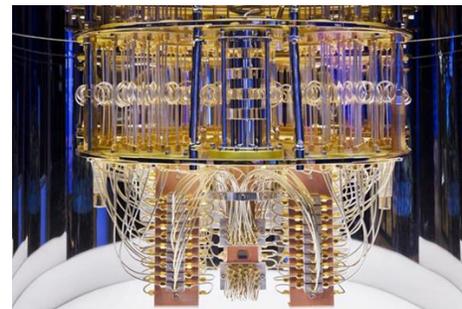


Image of the interior of IBM's Quantum Computer. Copyright IBM

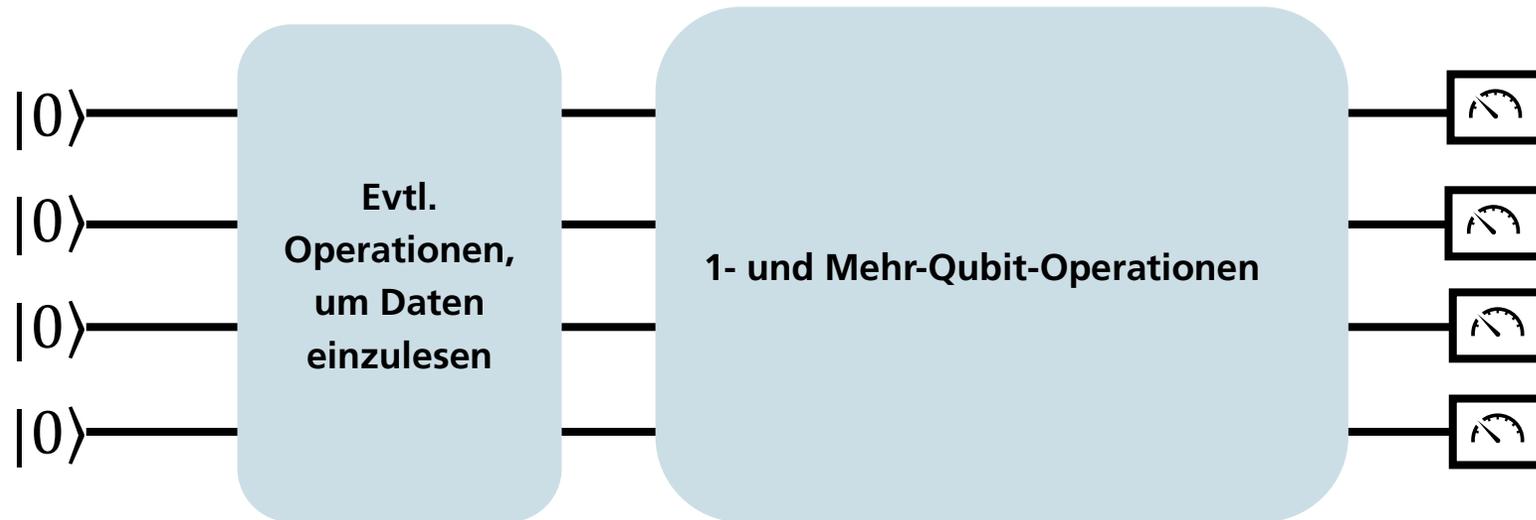
## Ionenfallen

- Ionen in einer Falle aus elektronischen Potentialen, die Ionen bilden eine Kette von Qubits.
- Kann gegebenenfalls bei Raumtemperatur betrieben werden. Langsame Operationen.

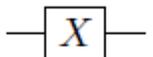
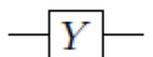
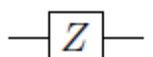
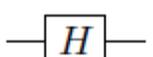
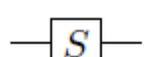
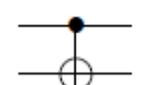


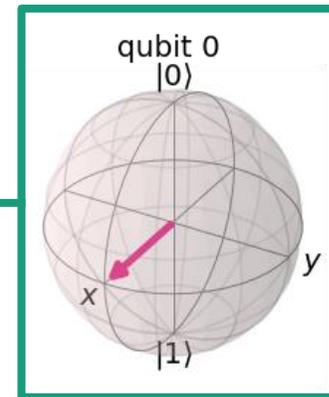
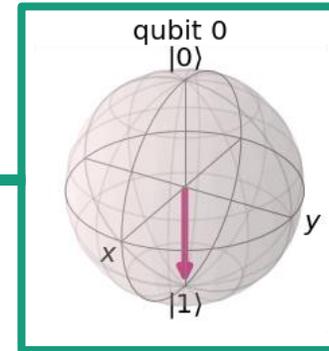
Source: <https://www.aqt.eu/media-press/>, Dieter Kühl

# Wie werden Berechnungen auf Quantencomputern ausgeführt?

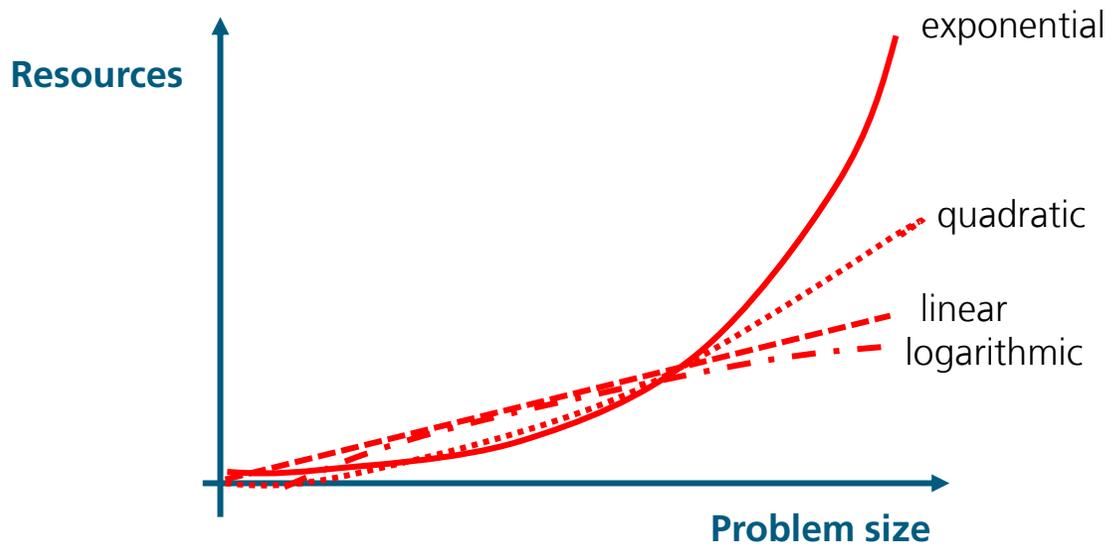


# Qubit-Operationen

Gate	Circuit symbol	Matrix representation
X		$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
Y		$\begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$
Z		$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
H		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$
S		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$
CNOT		$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

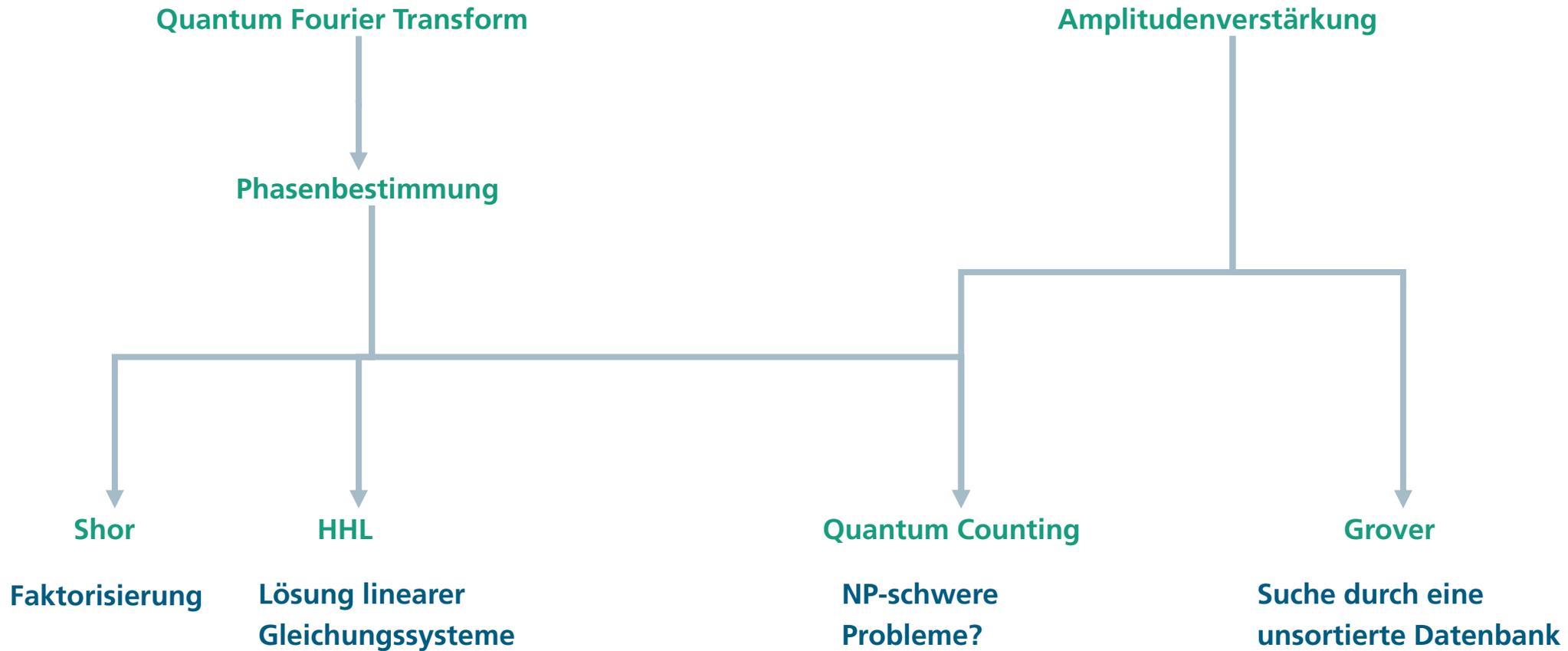


# Rechenkomplexität und was wir eigentlich erreichen müssen



Wir müssen zumindest eine polynomielle Beschleunigung in Vergleich zu klassischen Algorithmen erreichen.

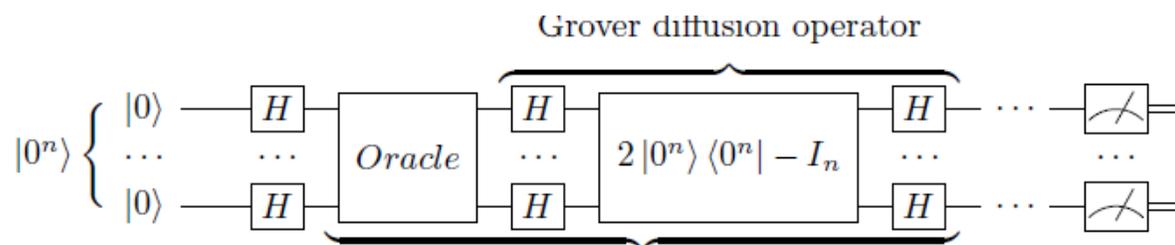
# Fehlertolerantes Quantencomputing



# Das Prinzip vom Grover-Algorithmus

## Problem: Suche durch eine unsortierte Datenbank mit $N$ Einträgen.

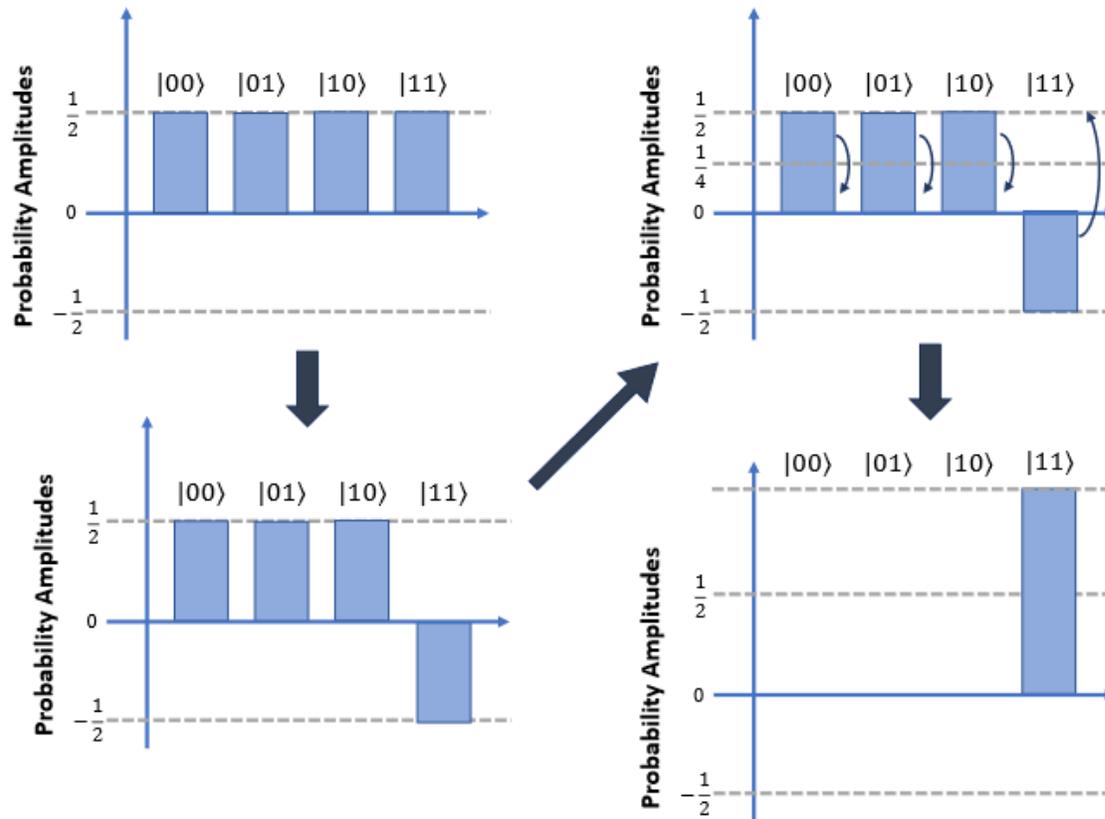
Klassisch werden  $O(N)$  Abfragen benötigt, im schlechtesten Fall.  
Grover's Algorithmus benötigt nur  $O(\sqrt{N})$  Abfragen.



## Schritte von Grover's Algorithmus:

1. Kodierung des Datensatzes mit  $n$  Qubits für  $N = 2^n$  Einträge. Es wird eine Abbildung von den Daten auf die Basis-Kets benötigt.
2. Anwendung von Hadamard-Gattern, um die Basiszustände in eine Superposition zu bringen.
3. Ausführung von Grover's Iteration  $O(\sqrt{N})$  mal:
  - a) Orakel («black-box») Funktion, welche die Lösung markiert ( $f(x) = 1$ , falls  $x$  die Lösung ist, ansonsten  $f(x) = 0$ ).
  - b) Grover Diffusion Operator.

# Beispiel



Aufgabe: Auffinden von einem Beispiel in einer Menge mit 4 Beispielen.

Das Orakel wird einfach den Zustand  $|11\rangle$  markieren.

Anschließend muss der Zustand  $|11\rangle$  verstärkt werden durch eine Invertierung um den Mittelwert, und alle anderen Zustände unterdrückt werden.

# Ein deutlich komplexeres Beispiel

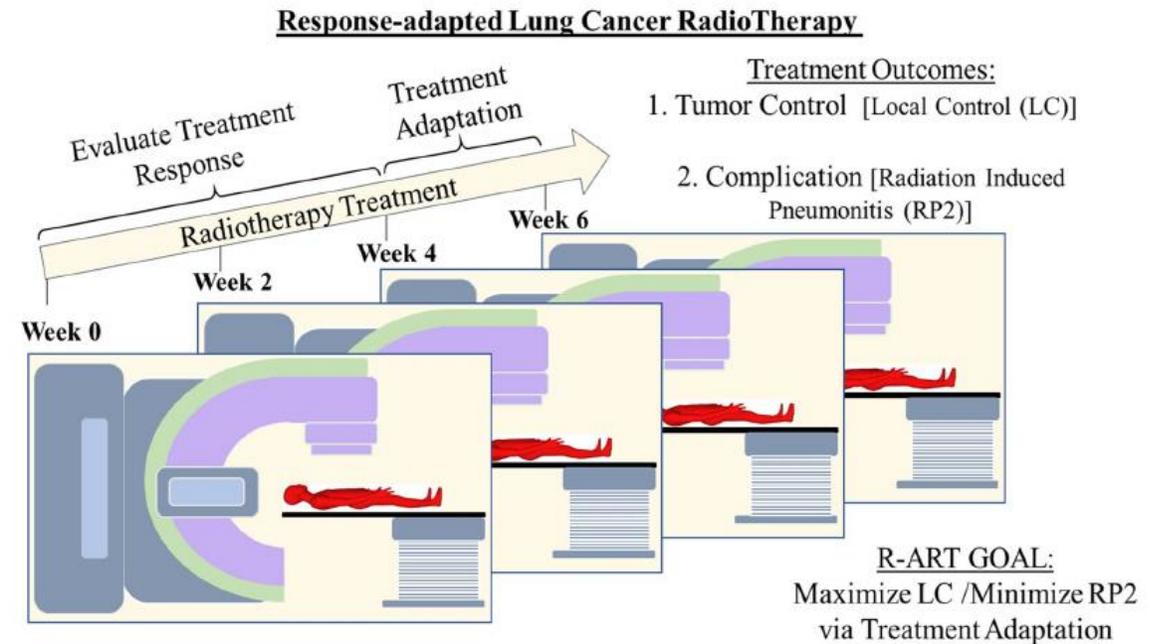
## Die Unterschiede in der Genetik von Patienten und in ihrer Physiologie kann die Reaktion auf Radiotherapiebehandlungen verändern.

→ Idealerweise wird die Therapie den Reaktionen angepasst, und dadurch eine personalisierte Behandlung ermöglicht.

Jedoch: die Entscheidungen sind mit Unsicherheiten behaftet.

→ Quantenalgorithmen könnten diese Unsicherheiten gegebenenfalls besser modellieren.

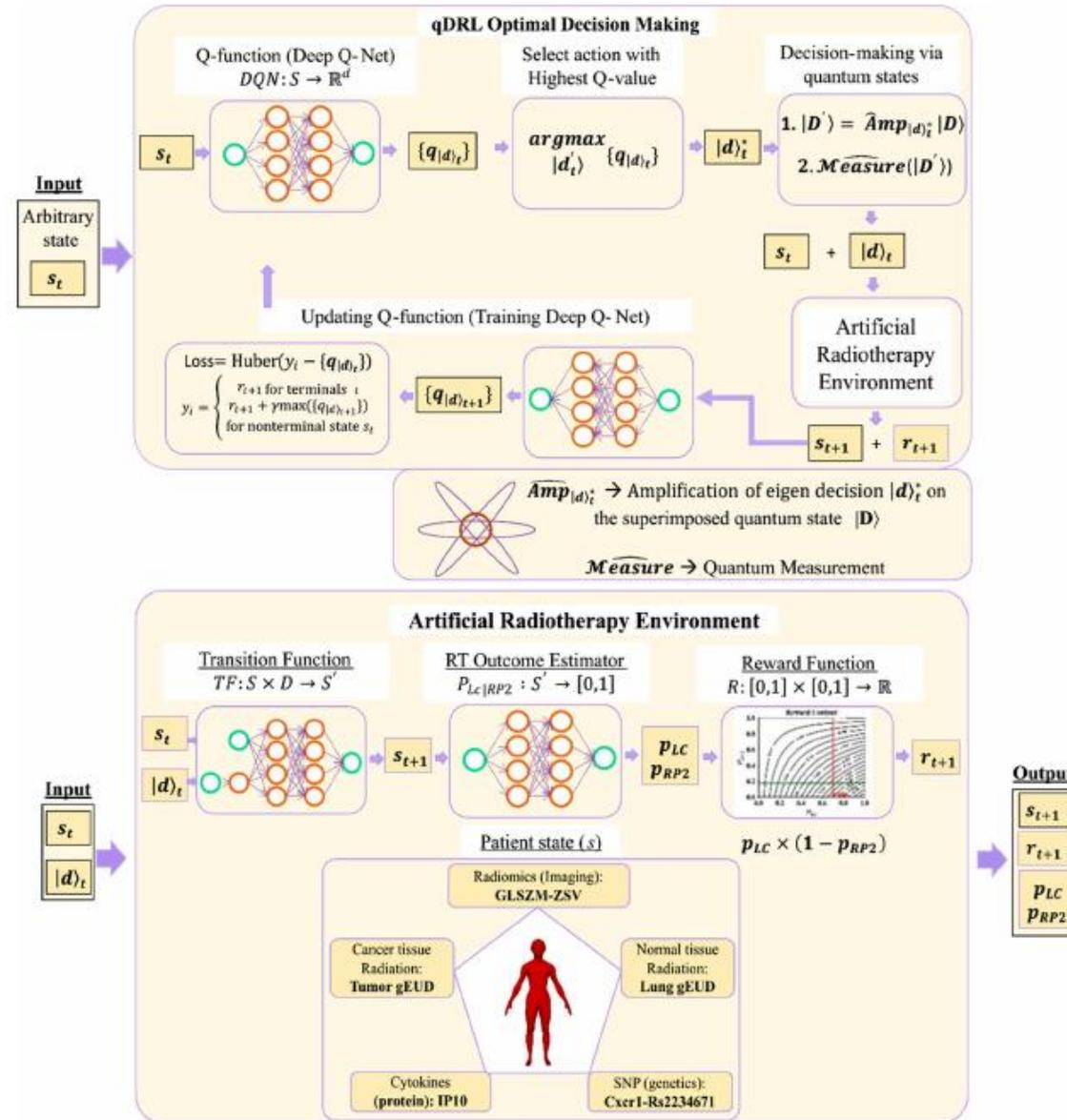
[D. Niraula, Quantum deep reinforcement learning for clinical decision support in oncology: application to adaptive radiotherapy, Scientific Reports volume 11, Article number: 23545 (2021)]



**Figure 1.** Schematics of response-adapted lung cancer radiotherapy. Response-adapted radiotherapy evaluates treatment response in the first two-thirds (week 1 to week 4) of the treatment period and then makes necessary adaptation in the last third (week 5 to week 6), with the goal of optimizing the treatment plan. For the case of lung cancer, optimization translates into maximizing tumor (local) control (LC) and minimizing radiation-induced pneumonitis of grade 2 or higher (RP2).

# Algorithmus

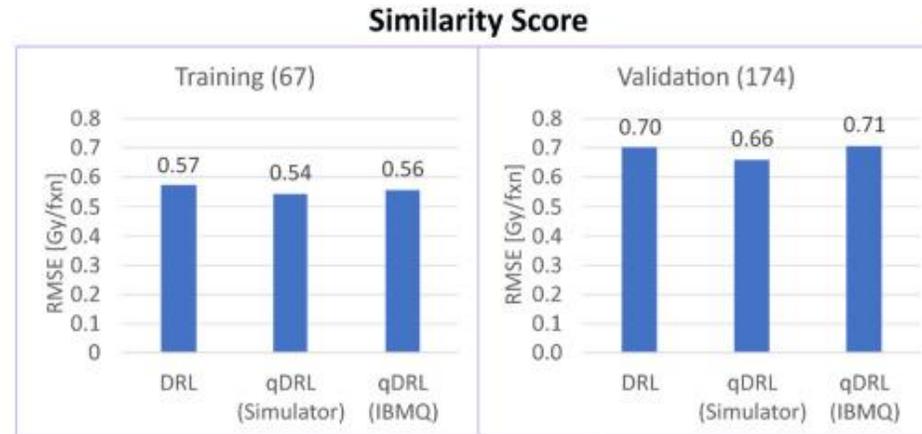
Lösung durch einen Quanten-Reinforcement-Learning-Algorithmus, wobei einen Quantenentscheidungsprozess zusammen mit einem modell-basierten q-Learning-Algorithmus kombiniert wird.



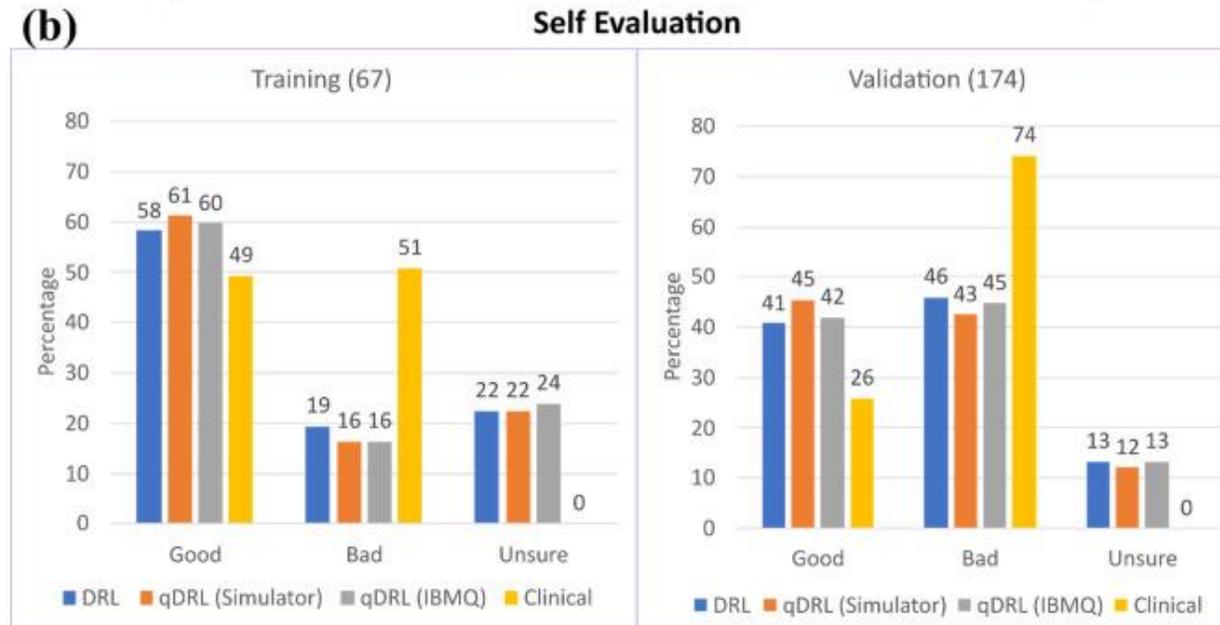
[D. Niraula, Quantum deep reinforcement learning for clinical decision support in oncology: application to adaptive radiotherapy, Scientific Reports volume 11, Article number: 23545 (2021)]

# Wie gut ist das Ergebnis?

(a)



(b)



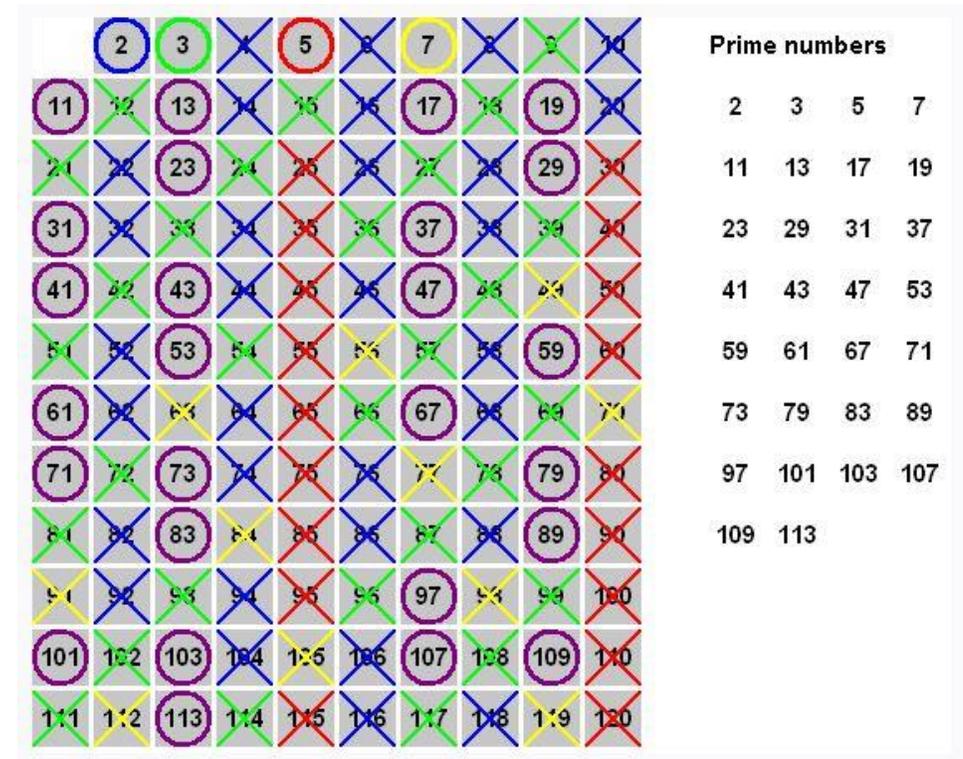
[D. Niraula, Quantum deep reinforcement learning for clinical decision support in oncology: application to adaptive radiotherapy, Scientific Reports volume 11, Article number: 23545 (2021)]

# Faktorisierung

Faktorisieren ist interessant, da manche kryptographischen Protokolle darauf beruhen, dass es nicht effizient möglich ist, große Zahlen in Primfaktoren zu zerlegen.

## Klassische Ansätze:

- Naiv: Verwende eine Liste sortierter Primfaktoren, und versuche N durch die Primfaktoren zu teilen.
- Sieb des Eratosthenes
- Der beste bekannte klassische Algorithmus braucht  $O\left(e^{cn^{\frac{1}{3}}} (\log n)^{\frac{2}{3}}\right)$  Schritte für eine n-Bit ganze Zahl.
- Shor's Algorithmus schafft das in  $O(n^2 (\log n)(\log \log n))$  Schritten.



[Quelle: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/implement-sieve-eratosthenes-java-using-eclipse-use-find-prime-numbers-less-equal-one-million-q26995549>]

# Shor's Algorithmus

## Shor's Algorithmus ist ein quanten-klassischer Algorithmus:

1. Wähle zufällig:  $1 < a < N$
2. Prüfe  $\gcd(a, N)$ . Falls  $> 1$ , fertig. Ansonsten weiter.
3. **Finde  $a \bmod N$ , so dass  $a^r \equiv 1 \bmod N$  und  $r > 0$**  QC
4. Falls  $r$  ungerade, gehe zu Schritt 1.
5. Falls  $r$  gerade, berechne:  $x = a^{\frac{r}{2}} + 1 \bmod N$  und  $y = a^{\frac{r}{2}} - 1 \bmod N$
6. Falls  $x = 0$  gehe zu Schritt 1. Falls  $y = 0$ , nehme  $r = \frac{r}{2}$  und gehe zu Schritt 4.
7. Berechne  $p = \gcd(x, N)$  und  $q = \gcd(y, N)$ . Zumindest einer von beiden wird ein nicht-trivialer Faktor von  $N$  sein.

# Ist nun Shor's Algorithmus ein NISQ Algorithmus?

Und müssen wir uns daher Sorgen machen?

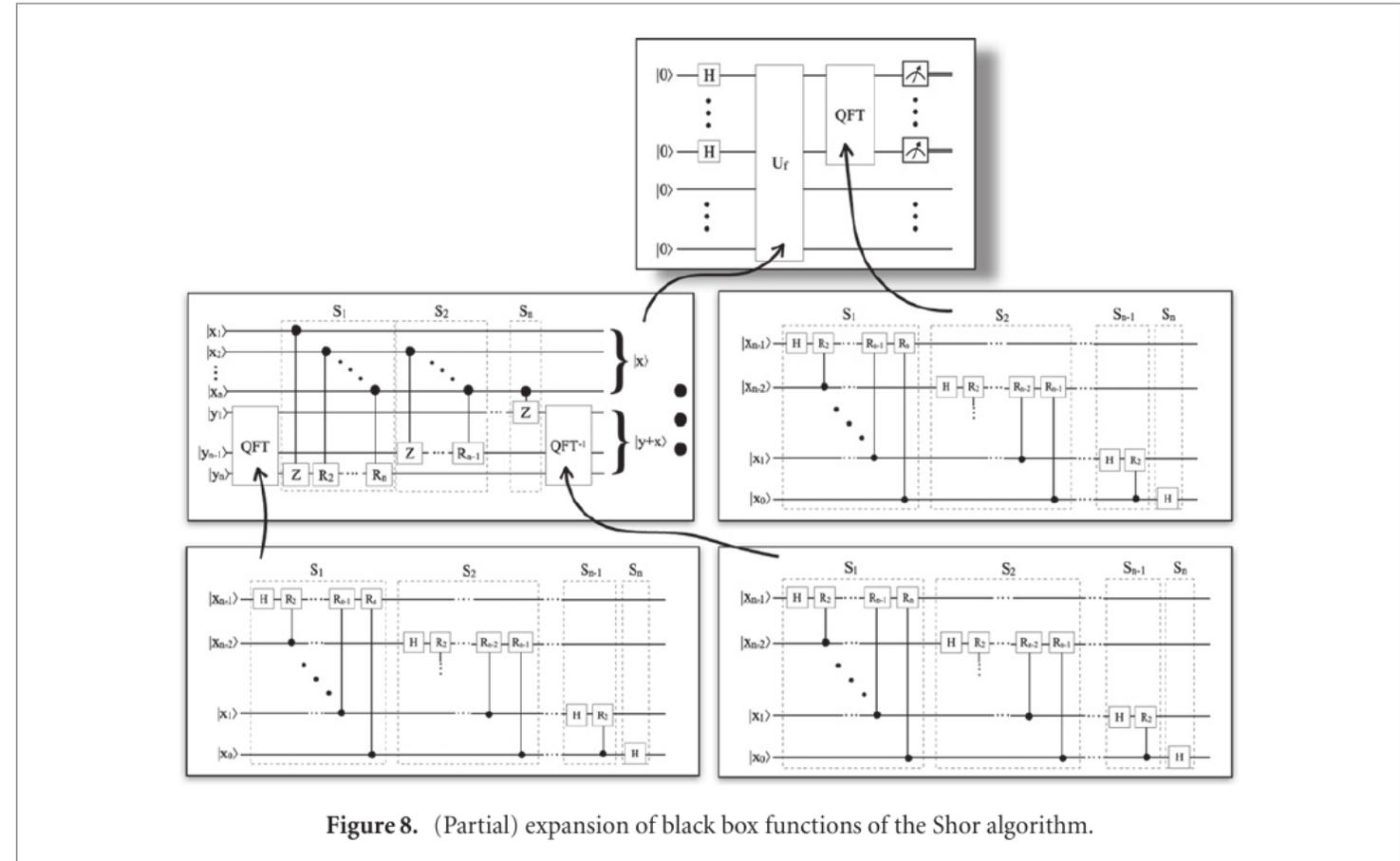
[Frank Leymann and Johanna Barzen 2020 Quantum Sci. Technol. 5 044007]

Falls der gesamte Algorithmus ausgeschrieben wird, so hat er eine wesentliche Länge.

→ Daher wurden bislang nur bis zu 15 und 21 auf einen QC zerlegt. Die Störanfälligkeit aktueller QC verhindert aktuell das Zerlegen größerer Zahlen.

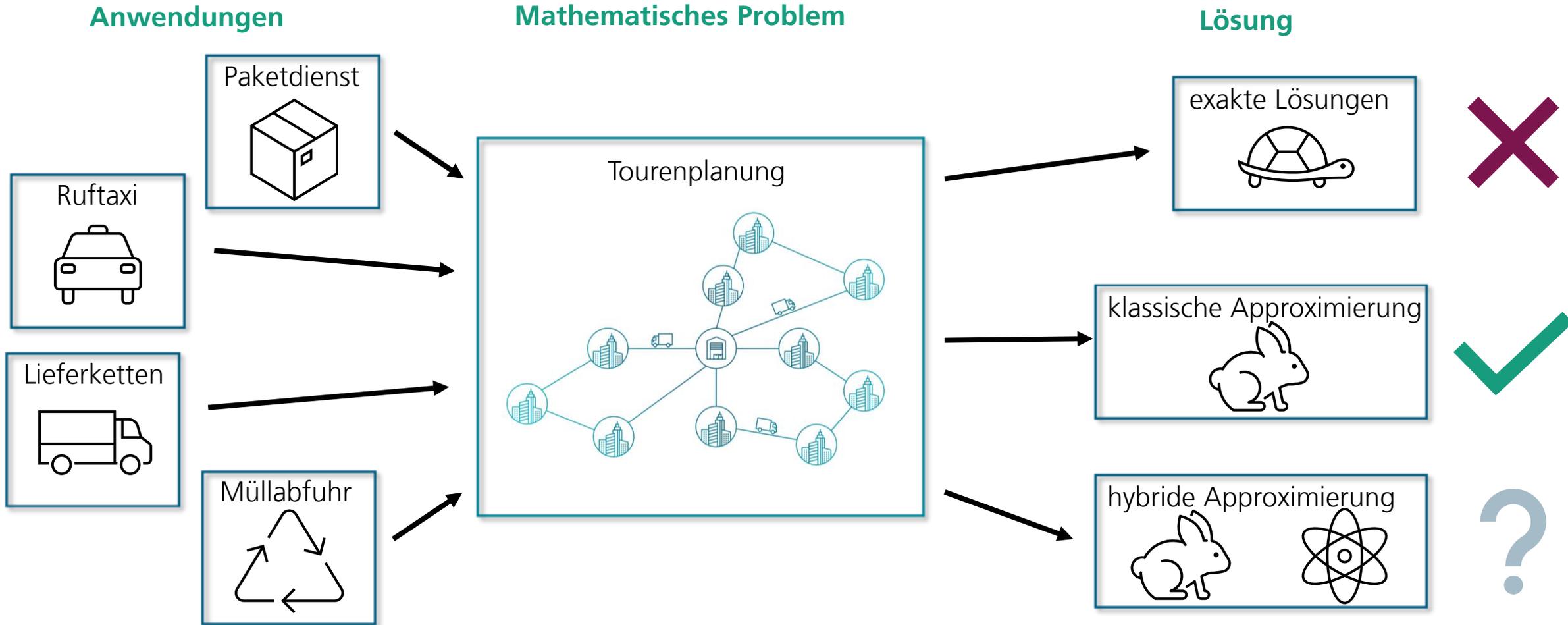
**Aktuelle QC stellen noch keine ‚Bedrohung‘ dar. Jedoch wird befürchtet, dass Daten bereits jetzt gespeichert werden könnten, um später dekodiert zu werden.**

→ **Umsteigen auf QC-sichere Verschlüsselung (NIST-Empfehlungen, aktuelle Forschung)**



# Wofür könnten wir dann Quantencomputer einsetzen?

Lösungen von Optimierungsproblemen



# Beispiel: Waste Management/Logistik

Daten aus dem Infineon-Sensor und –Aktuator-Netzwerk liefern Füllstanddaten von Abfallcontainern

## Aufgabe:

- Routenoptimierung für Abfallfahrzeuge mittels QC-gestützten Lösungen
- Simulation für mehrere Tage basierend auf historischen und aktuellen Daten liegt vor.
- Ziel: Effiziente und dadurch ökologische und wirtschaftliche Routen.

**Bereits 1-2% Effizienzsteigerung bedeutet einen großem Impact.**



Infineon  
Loudspeaker &  
Microfons



Available:  
Smart Recycling



# Quanten-gestützte Lösung von Optimierungsproblemen

## Capacitated Vehicle Routing Problem

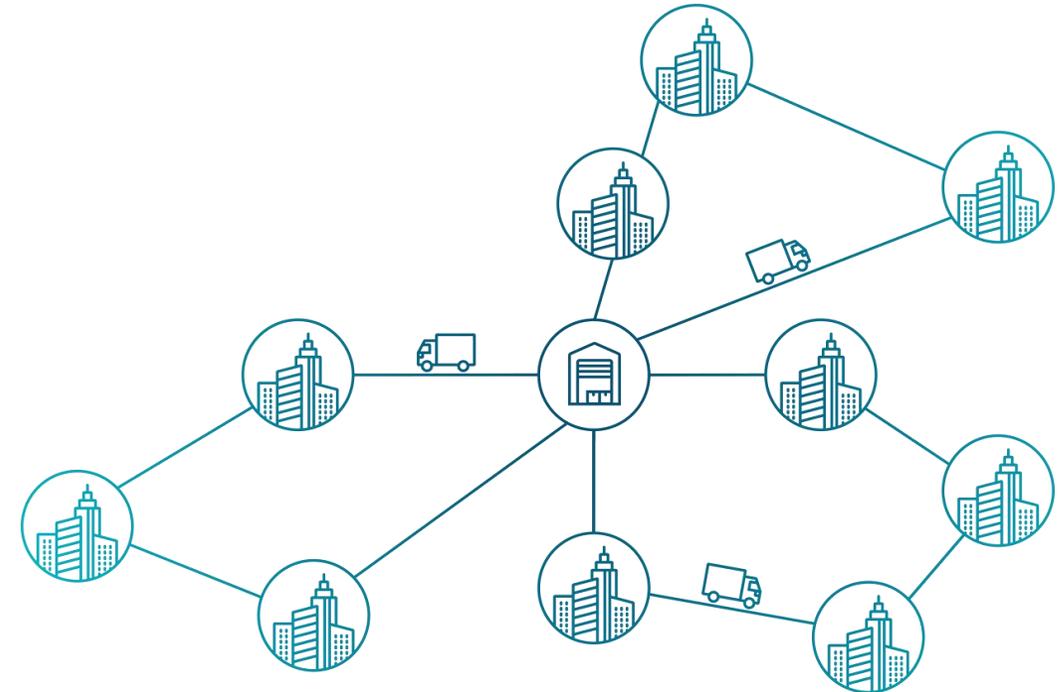
Das Capacitated Vehicle Routing Problem ist eine Verallgemeinerung des Handlungsreisenden-Problem.

### Aufgabe:

- Finden der *besten* Route zwischen Städten, wobei Transportmittel unterschiedlicher Kapazität zur Verfügung stehen.

### Mathematische Formulierung für zahlreiche industrielle Fragestellungen

- Z.B. Planung von effizienten Routen zur Leerung von Müllcontainern
  - **Beispiel unseres Partners Infineon**
    - Der Füllstand der Müllcontainer wird durch Sensoren überwacht.
    - Die Entleerung soll optimiert gemäß Füllstand erfolgen
    - Durch optimierte Routen Kostenersparnis und umweltfreundlicher durch Vermeidung unnötiger Fahrten.



# Wie kann eine quanten-gestützte Lösung aussehen?

Kombination klassisches Computing + QC

Kombinatorische Optimierungsprobleme werden typischerweise approximativ durch Heuristiken gelöst.

## Quanten-gestützte Lösung:

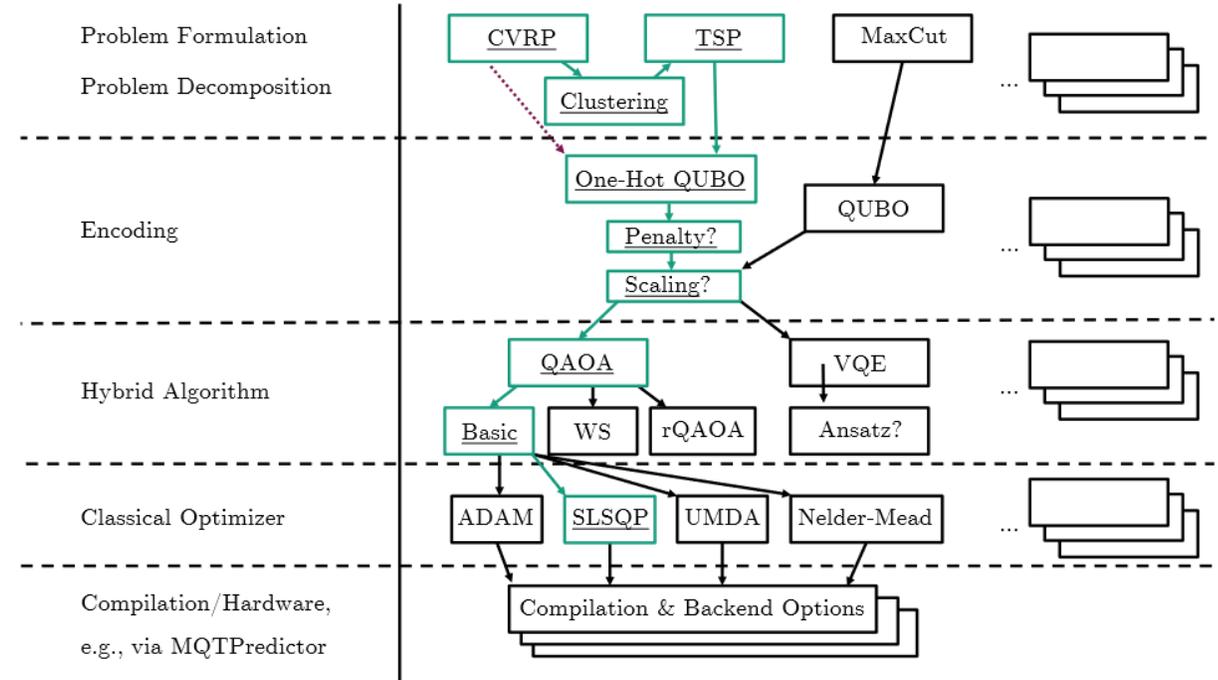
- Kombination klassischer Berechnungsschritte und Berechnungen auf dem Quantencomputer in einem quanten-klassischen Solver.
- Für klassische Computer nur schwer berechenbare Schritte werden auf den Quantencomputer berechnet.
- Beispielsweise das Finden eines mathematischen Minimums.

Expertise notwendig, um klassische und quanten-gestützte Berechnungsschritte richtig zu kombinieren!

“Recommending Solution Paths for Solving Optimization Problems with Quantum Computing”, B. Poggel et al., arXiv:2212.11127, 2022.



“Quantum-Assisted Solution Paths for the Capacitated Vehicle Routing Problem”, L. Palackal, B. Poggel, M. Wulff, H. Ehm, J. M. Lorenz, C. B. Mendl, arXiv:2304.09629, 2023.



**BMWK-Projekt:**  
Quantum-enabling  
Software und Tools für  
industrielle  
Anwendungen



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Aktuell sind quanten-inspirierte Methoden direkt einsetzbar

## Beispiel Quantenannealing

**Quantenannealing ist angelehnt an adiabatisches QC: Systeme, die sich langsam genug verändern, bleiben in ihrem Grundzustand.**

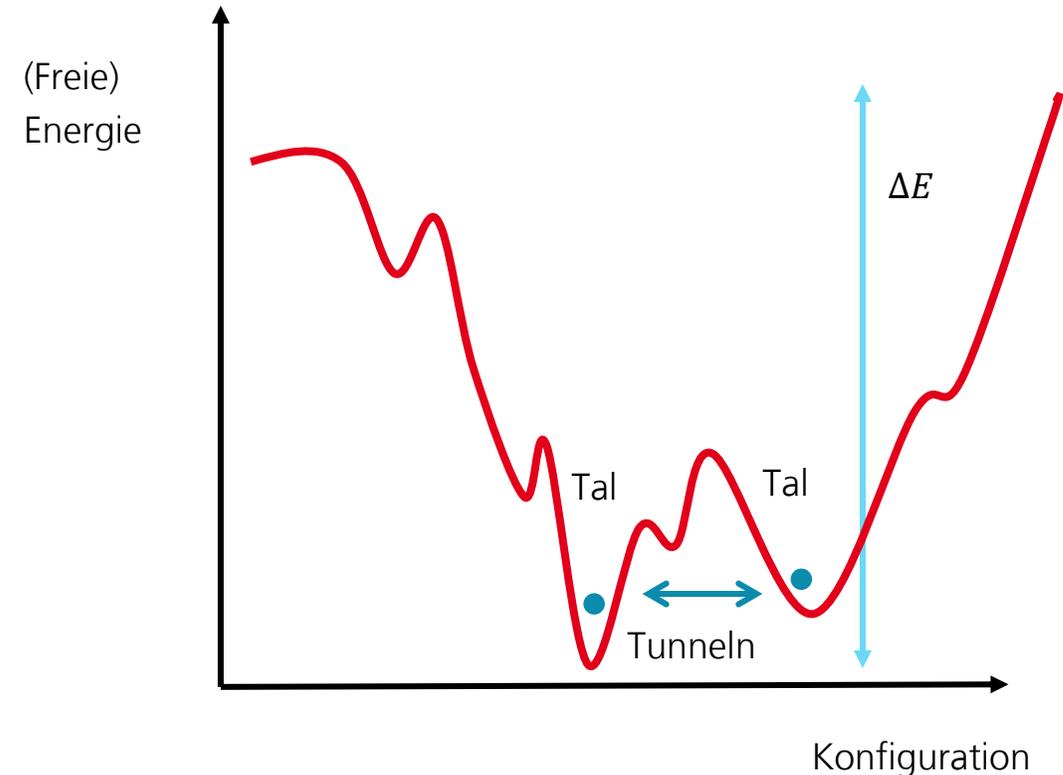
Quantenfluktuationen erlauben die globale Minimierung durch Energiebarrieren hindurch (Tunneleffekt).

Kommerziell verfügbar durch die D-Wave-Annealer. **Manche Unternehmen berichten von einem empirischen Vorteil für ihre Geschäftsprozesse.**

**Wissenschaftlich ist dieser Vorteil nicht direkt beweisbar.**

Tests auf 5000+ Qubits möglich.

Andere quanteninspirierte Methoden wären **Tensornetzwerke**.



# Quantenannealing

Anwendungen

## Quantensimulation

Chemie, Physik, Biologie



## Künstliche Intelligenz

Klassifizierung  
Reinforcement Learning  
Cluster-Analyse  
Matrixfaktorisierung



## Mobility

Verkehrsflussoptimierung

Quanten-  
annealing

## Finanzwesen

Portfoliooptimierung



## Produktionsdesign

Materialdesign  
Finite-Elemente-Design



## Logistik

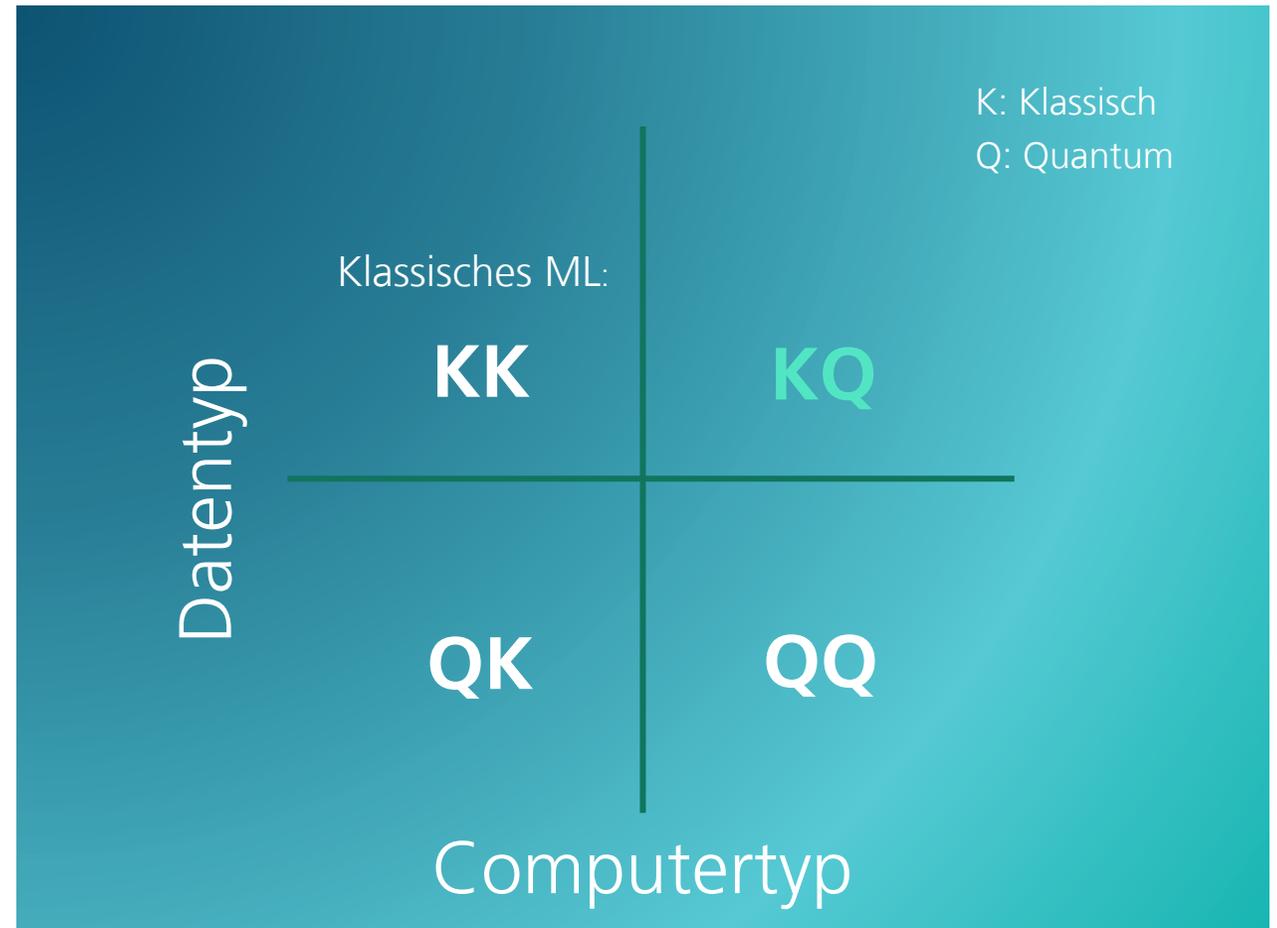
Belegung / Scheduling  
Tourenplanung

nach Yarkoni et al., „Quantum Annealing for Industry Applications: Introduction and Review“, arXiv:2112.07491 (2022)

# Quantum Machine Learning

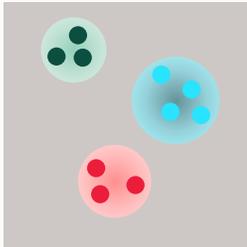
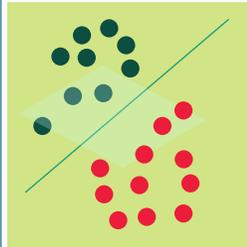
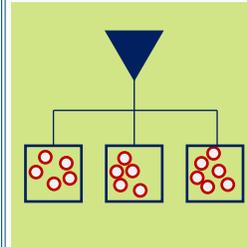
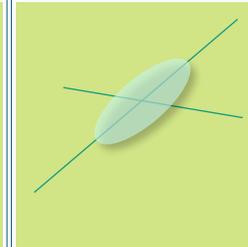
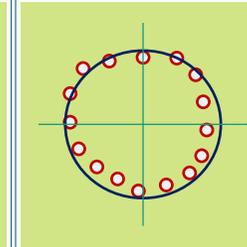
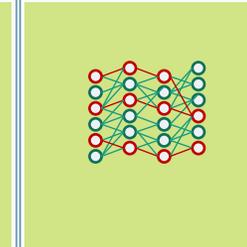
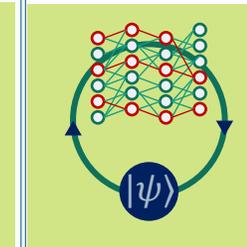
## QML hat unterschiedliche Bedeutungen

KQ – aktuell: entweder werden klassische ML Routinen durch eine Quantensubroutine verbessert, oder der gesamte ML-Algorithmus wird auf einen QC implementiert.



# Quasi jeder ML-Algorithmus kann auf QC gemappt werden

## Erwartungen

QUANTUM MACHINE LEARNING						
Quantum Clustering	Quantum Support Vector Machines	Quantum Classification	Quantum PCA <sup>1</sup>	Feature Topology	Quantum Deep Learning	Quantum Reinforcement Learning
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>• QC liefern gute Lösungen für hochdimensionale Datendarstellungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QC können effizient Hyperebenen in hochdimensionalen Räumen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QSVM und Quanten-Kernel-Methoden können Klassifikationsprobleme schneller lösen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantencomputer lösen Axenidentifikationen exponentiell schneller.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auffinden von Eigenwerten und -vektoren in hochdimensionalen Matrizen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bessere Quanten Neuronale Netze.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschleunigtes Lernen durch Quantenparallelismus.</li> </ul>



Quanten-maschinelle Lernmethoden



Mögliche Hybridmethoden, klassisch und quanten-Varianten kombiniert

Source(s): <https://medium.com/meetech/highlighting-quantum-computing-for-machine-learning-1f1abd41cb59>

<sup>1</sup> Principal component analysis

# Quanten-neuronale Netze

Sind sie mit klassischen neuronalen Netzen vergleichbar?

Es gibt keine genaue Definition von QNNs, aber häufig einfach verstanden als schichtweise konstruierte variationelle Quanten-Modelle.

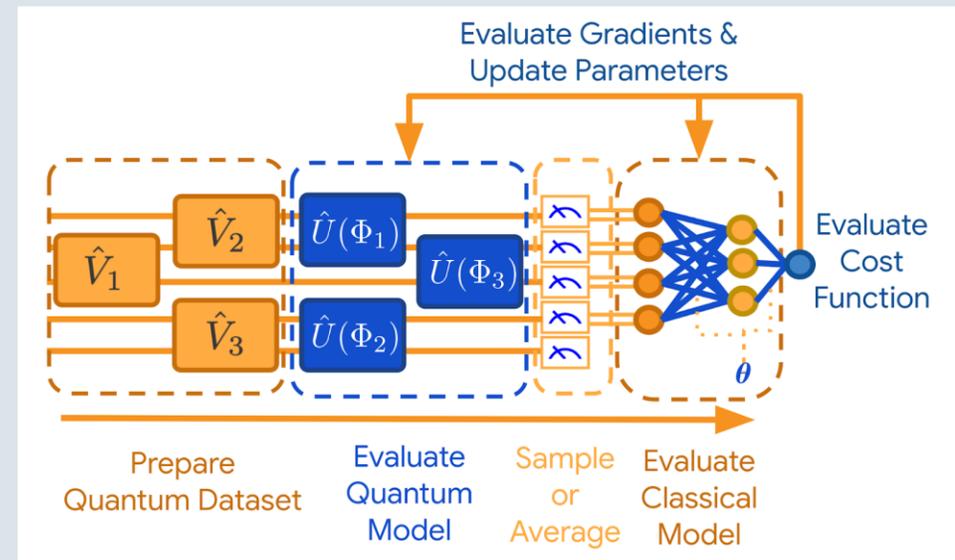
Wichtiger Unterschied zwischen NNs und QNNs:

Quantenschaltkreise sind linear/unitäre Transformationen



NNs sind schichtweise Abfolgen von trainierbaren, aber elementweisen nicht-linearen Transformationen

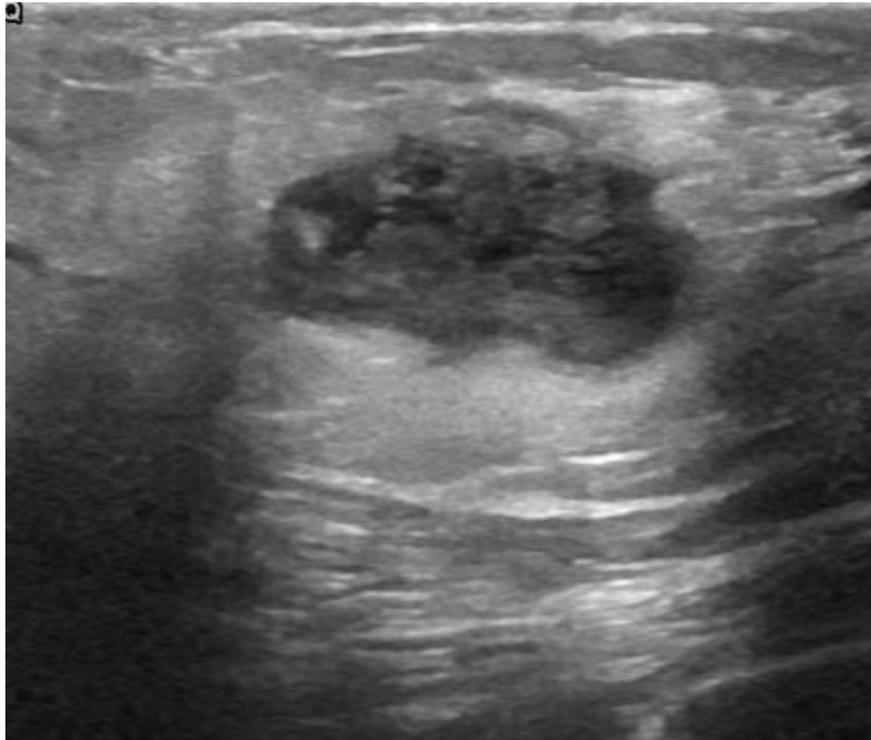
## Variationelle Quantenmodelle:



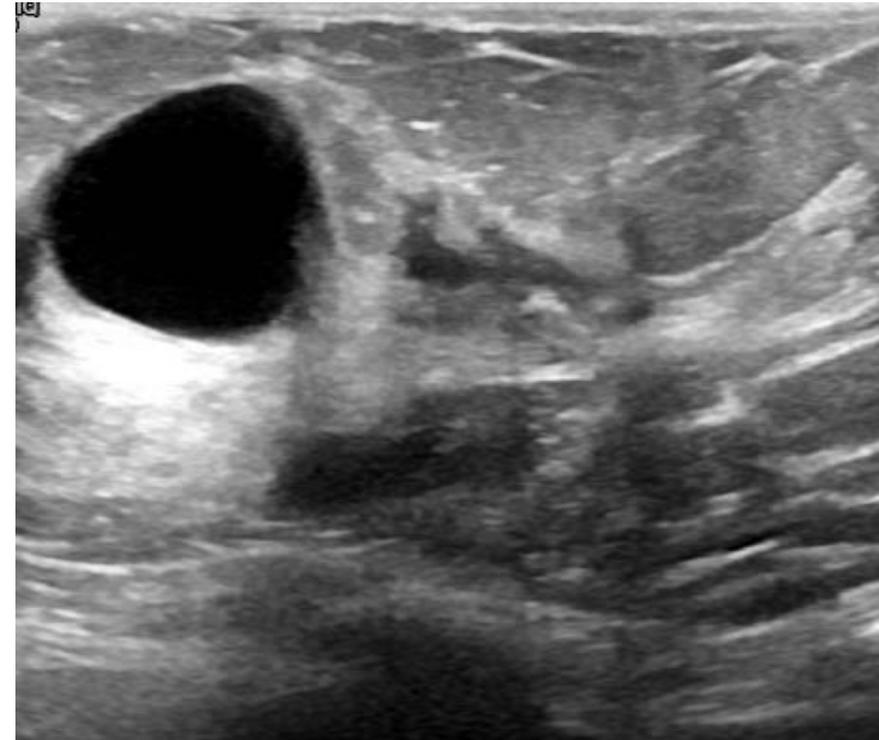
[Source: <https://blog.tensorflow.org/2020/03/announcing-tensorflow-quantum-open.html>]

# Verlässliche QC-gestützte KI für medizinische Klassifikationsaufgaben

Malign breast lesion



Benign breast lesion



Source: W. Al-Dhabyani, et al, "Dataset of breast ultrasound images".  
Data Brief, vol 28, pp 104863, 2020

# Verlässliche QC-gestützte KI für medizinische Klassifikationsaufgaben

**Kontext:** Künstliche Intelligenz wird in medizinischen Diagnoseprozessen immer wichtiger (z.B. in der Bildgebung).

**Herausforderungen:** Bilddaten sind teuer, kompliziert und nur begrenzt verfügbar ( $10^2$  -  $10^3$  Bilder),

Dennoch muss der Entscheidungsprozess nachvollziehbar und zuverlässig sein.

→ Hierfür benötigen klassische Methoden große Trainingsdatensätze.

**Ziel:** Verbesserung der medizinischen Klassifikation durch hybride, QC-gestützte ML-Methoden.

**Erwartete Verbesserung:** QC-gestützte Methoden führen möglicherweise zu einem beschleunigten Training, gerade in Situationen mit wenig Trainingsdaten.

# Klassisches ML

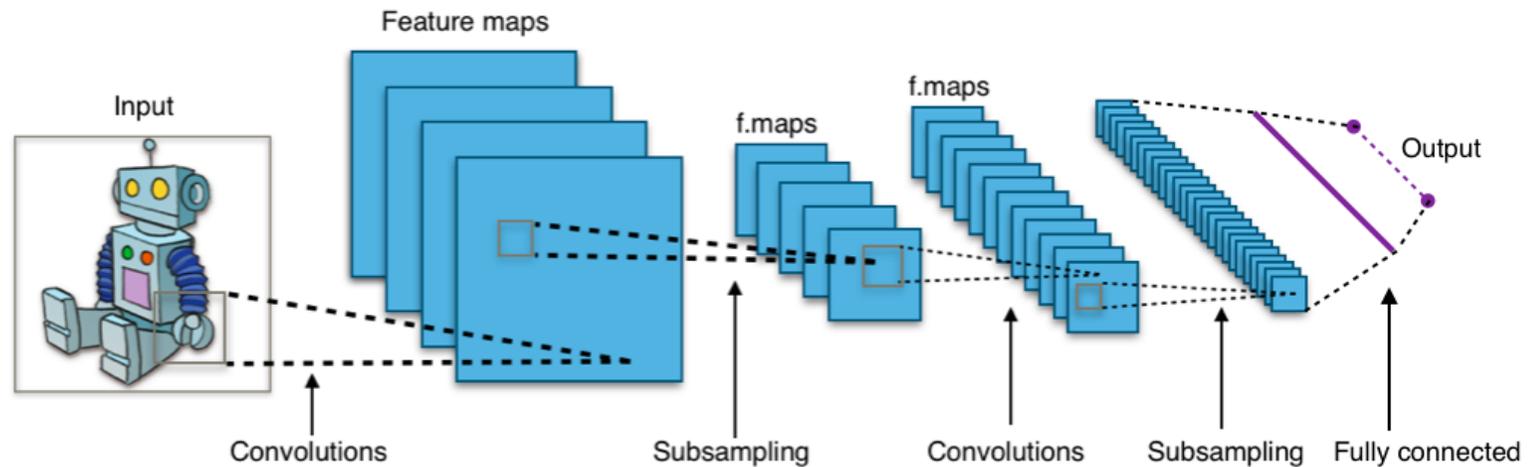
## Convolutional Neuronale Netze

### CNNs: Sehr erfolgreich in Bilderkennungsaufgaben

Architektur: Eine oder mehr **convolutional Schichten**, gefolgt von **voll verknüpften Schichten**.

Das Bild wird mit Filtern gefaltet → Extrahieren von Eigenschaften wie z.B. Ecken oder Formen.

Die Klassifikation erfolgt dann in der voll verknüpften Schicht.

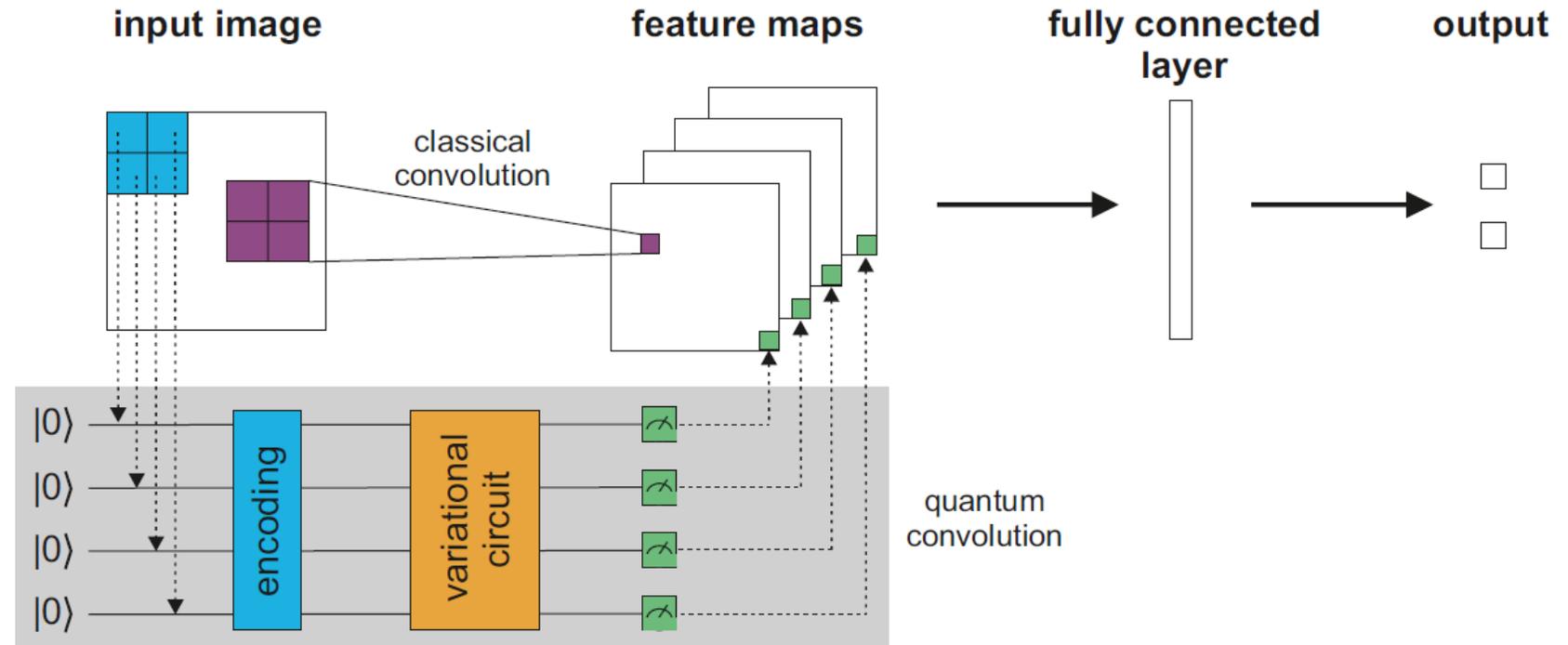


Source: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Typical\\_cnn.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Typical_cnn.png), Apex34, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons

# Hybride quanten-klassische Convolutional Neuronale Netze

**Idee:** Es werden einige der klassischen convolutional Schichten durch Quanten-convolutional Schichten ersetzt. Der Ersatz von Pooling-Schichten ist ebenso möglich.

**Hybrider Ansatz,** da nur ein paar Schichten ersetzt werden → möglicherweise bereits auf bald verfügbaren NISQ-QC realisierbar.



Zusammenarbeit mit dem **LMU Universitäts-Klinikum**

„Quantum-classical convolutional neural networks in radiological image classification“, A. Matic, M. Monnet, J.M. Lorenz, B. Schachtner, T. Messerer, arXiv:2204.12390, 2022



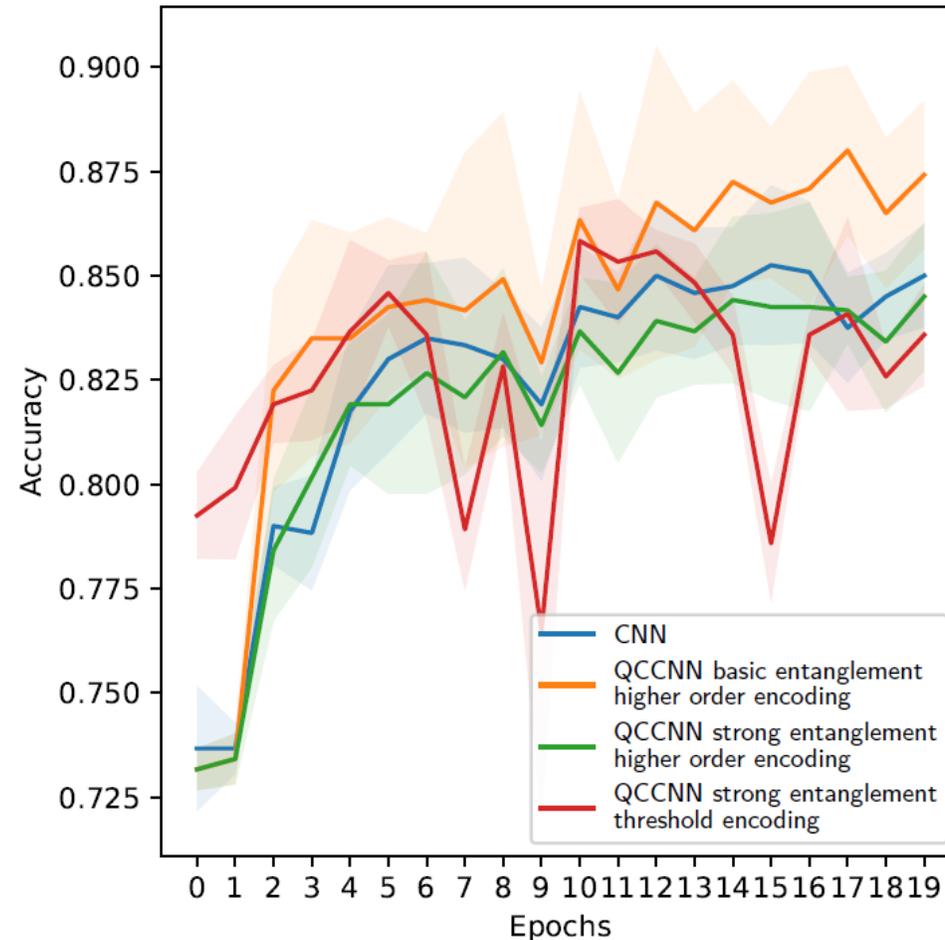
# Klassifikationsbeispiele

## Identifikation von Läsionen in Ultraschallbildern der Brust

**Es wird bereits eine sehr vielversprechende Performance mit einem hybriden quanten-klassischen Ansatz erreicht. Dies ermutigt weitere Studien.**

Hierbei sind komplizierte Varianten Daten einzulesen, vielversprechender als einfache Varianten.

Alle Konfigurationen nutzen Ein- und Zwei-Qubit-Gatter und sind somit NISQ-tauglich.



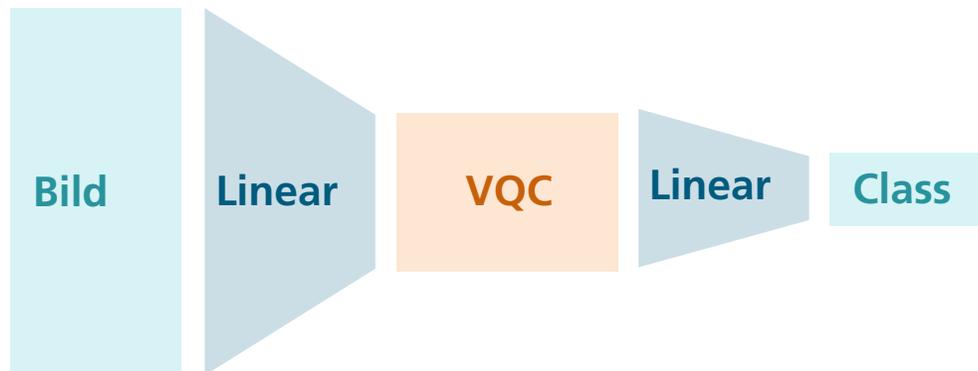
# Beispiel: QC für die automatische Detektion von Rissen

Bench-QC – Leuchtturmprojekt im Munich Quantum Valley, zusammen mit ML Reply

Quantum Neural Networks versprechen ein effizienteres Training im Vergleich zu klassischen neuronalen Netzen

Häufig hybride quanten-klassische Algorithmen, wo nur ein Teil durch einen Quantenschaltkreis ersetzt ist.

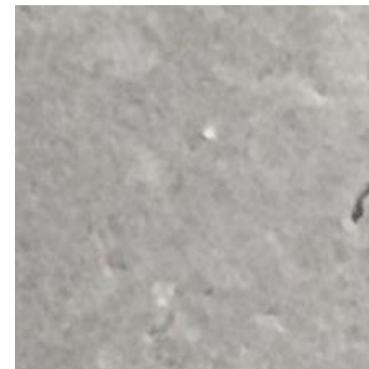
## Anwendung: Detektion von Rissen in Materialien



Negativ



Positiv



# Beispiel: Roboter Navigation

Pfadplanung durch den Einsatz von Quantencomputern

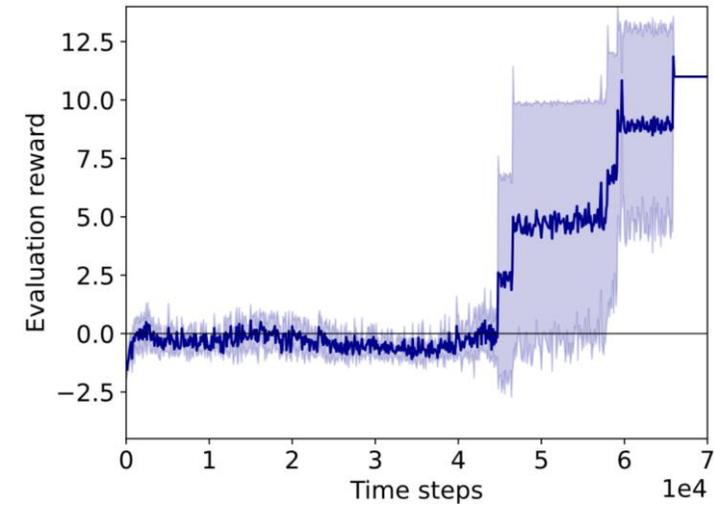


Navigation eines Roboters durch eine Umgebung, dabei Vermeidung von Kollisionen

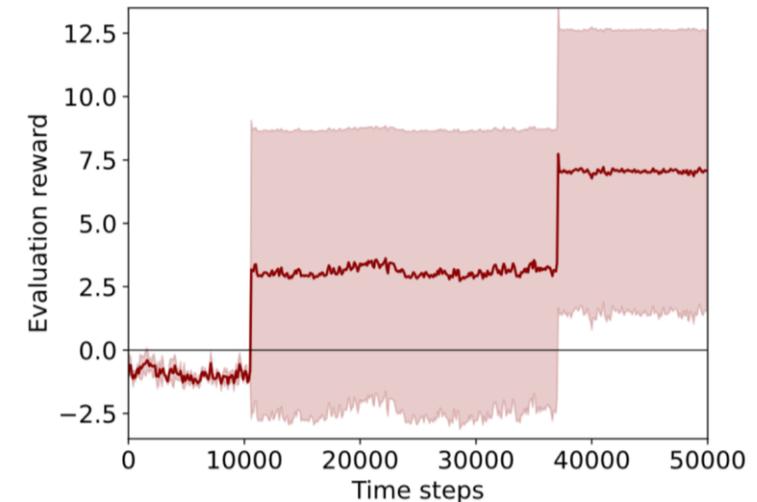
**Quantum-gestütztes verstärkendes Lernen weist gegenüber klassischen Methoden mögliche perspektive Vorteile auf:**

- Bessere Generalisierungseigenschaften, dadurch weniger Interaktionen mit der Umgebung.
- Weniger Rechenressourcen (GPU) benötigt.
- Robuster gegenüber Änderungen in den Lernraten.
- Geschwindigkeitsvorteile teilweise mathematisch belegbar.

## Klassisch



## Quanten-gestützt



# Beispiel: Roboter Navigation

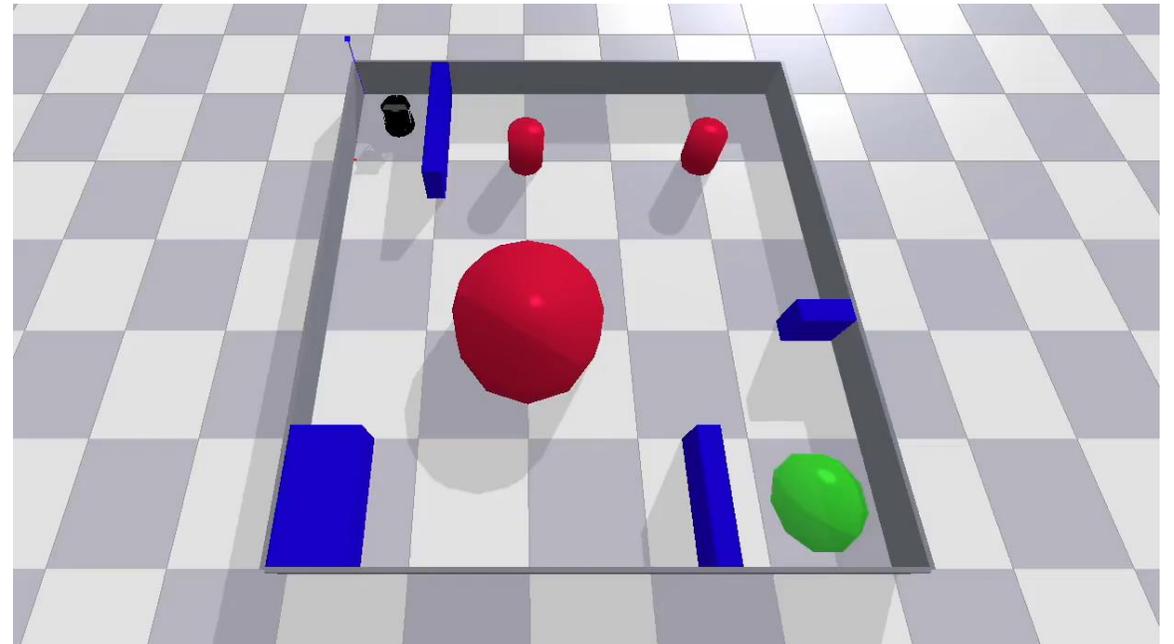
Pfadplanung durch den Einsatz von Quantencomputern



**Navigation eines Roboters  
durch eine Umgebung, dabei  
Vermeidung von Kollisionen**

**Quantum-gestütztes verstärkendes Lernen weist gegenüber klassischen Methoden mögliche perspektive Vorteile auf:**

- Bessere Generalisierungseigenschaften, dadurch weniger Interaktionen mit der Umgebung.
- Weniger Rechenressourcen (GPU) benötigt.
- Robuster gegenüber Änderungen in den Lernraten.
- Geschwindigkeitsvorteile teilweise mathematisch belegbar.



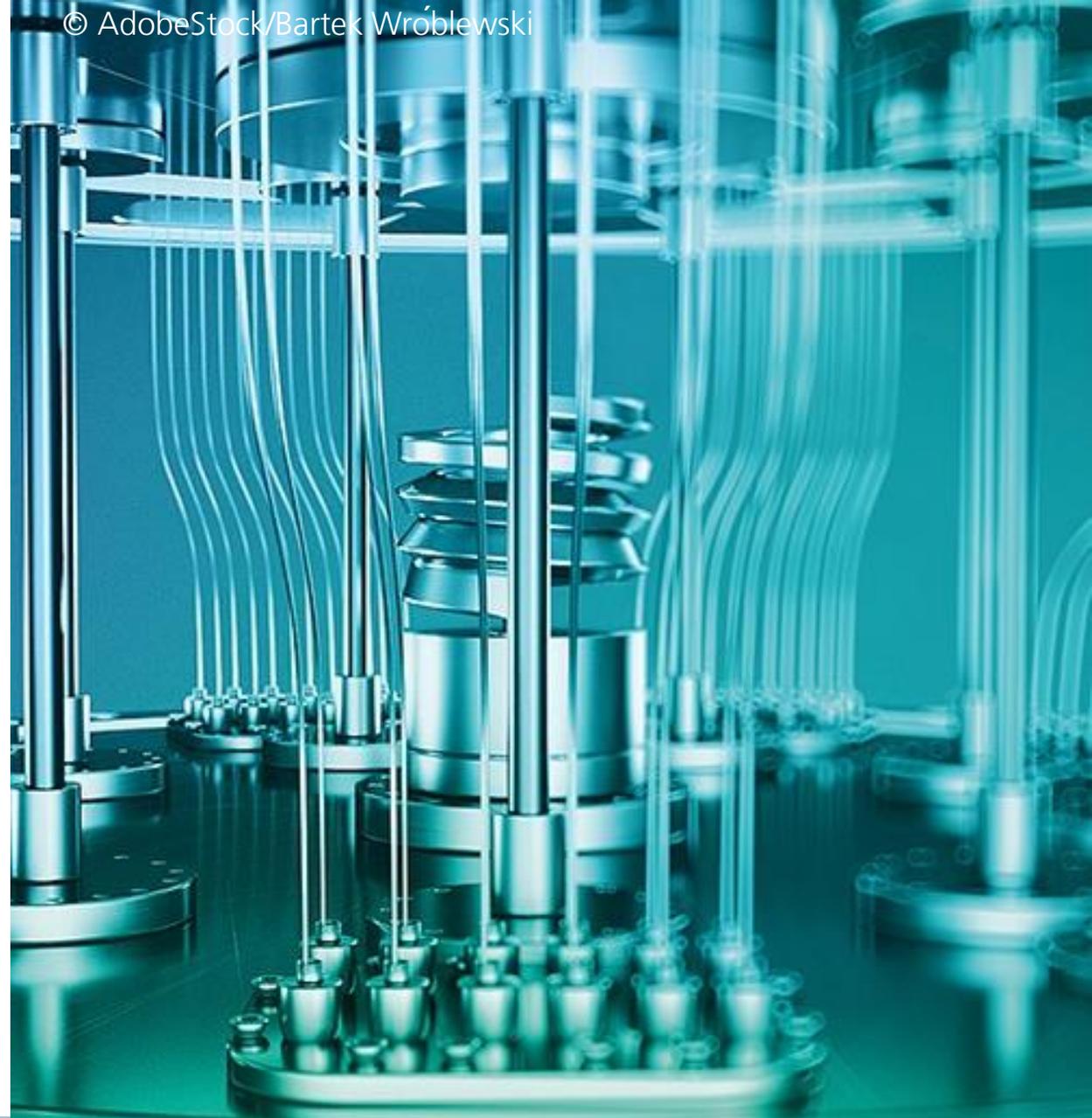
# Schlußfolgerung

**Aktuelle Quantencomputer sind immer noch zu klein und störanfällig, um industriellen Vorteil zu bieten.**

## **Aber:**

- Vielversprechende Fortschritte in Richtung fehlertoleranter Quantencomputer und Reduktion der Störanfälligkeit.
- Erste empirische Behauptungen von Nutzen von Quantenannealing.
- Quanten-inspirierte Methoden (wie Tensornetzwerke) sehr vielversprechend.
- In Bezug auf Verschlüsselungen besteht perspektivisch ein echtes Risiko.

**Die Integration von Quantencomputing in Betriebsprozesse muss frühzeitig durchdacht werden, da algorithmische Wechselwirkung mit klassischen Algorithmen.**



# Kontakt

---

**PD Dr. habil. Jeanette Miriam Lorenz**  
**Abteilungsleitung Quantum-enhanced AI**  
**Tel. +49 89 547088-334**  
**[Jeanette.miriam.lorenz@iks.fraunhofer.de](mailto:Jeanette.miriam.lorenz@iks.fraunhofer.de)**

Fraunhofer IKS  
Hansastr. 32  
80686 München  
[www.iks.fraunhofer.de](http://www.iks.fraunhofer.de)



Fraunhofer Institute for Cognitive  
Systems IKS