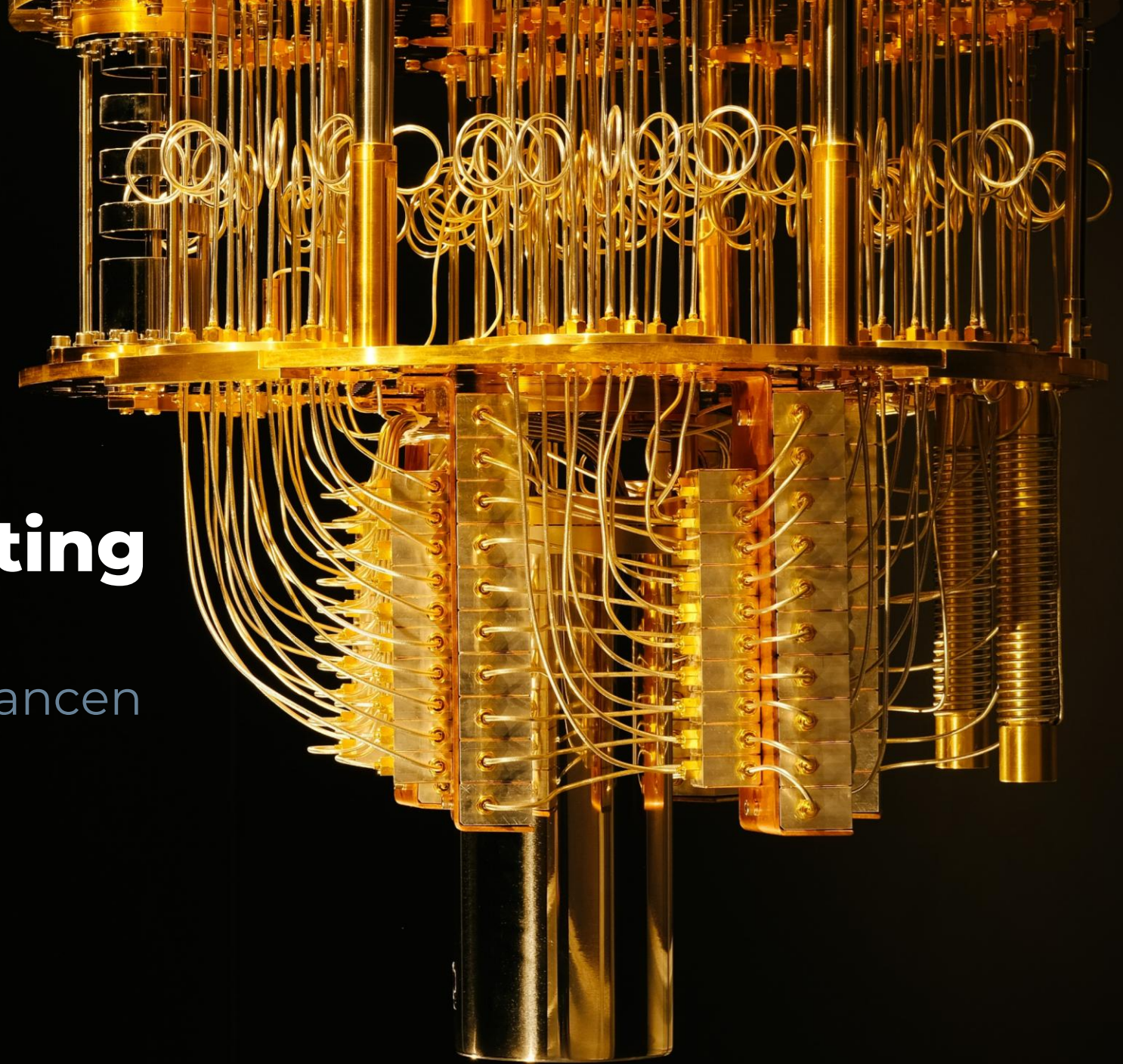
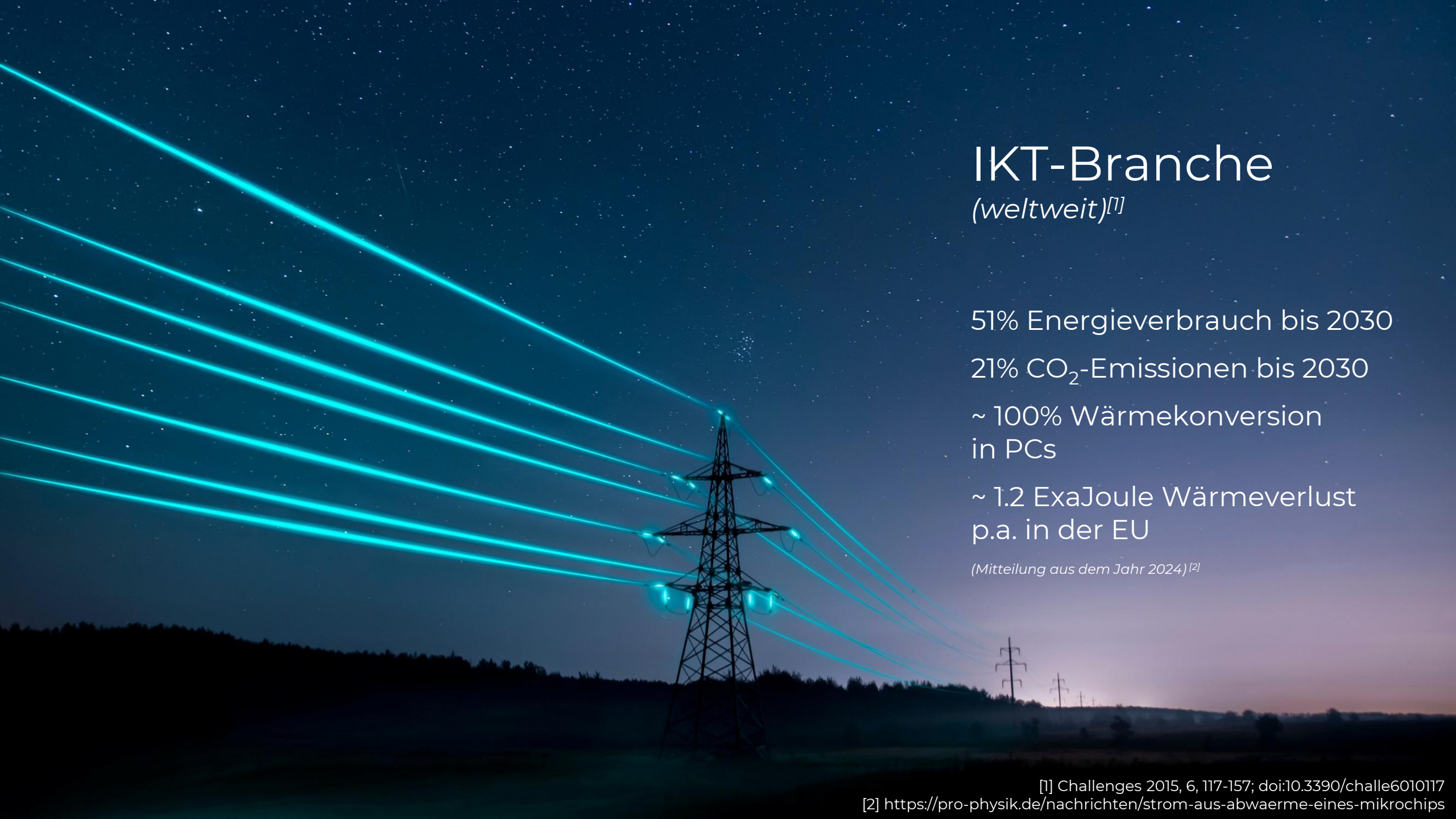


Zukunftsmarkt Quantencomputing

Technologie – Markt – Chancen





IKT-Branche

(weltweit)^[1]

51% Energieverbrauch bis 2030

21% CO₂-Emissionen bis 2030

~ 100% Wärmekonversion
in PCs

~ 1.2 ExaJoule Wärmeverlust
p.a. in der EU

(Mitteilung aus dem Jahr 2024)^[2]

[1] Challenges 2015, 6, 117-157; doi:10.3390/challe6010117

[2] <https://pro-physik.de/nachrichten/strom-aus-abwaerme-eines-mikrochips>

Quantencomputing ist Teil der *Future Computing* Technologien.

Etablierte Computing-Technologien sind aufgrund ihrer Bauweise nicht geeignet, um aktuelle Herausforderungen so zu lösen, wie sie wirtschaftlich und gesellschaftlich wichtig sind. Neue Computerarchitekturen sind nötig, um Zeit und Energie zu sparen. Das macht sie zu wichtigen Plattformtechnologien für die Zukunft.

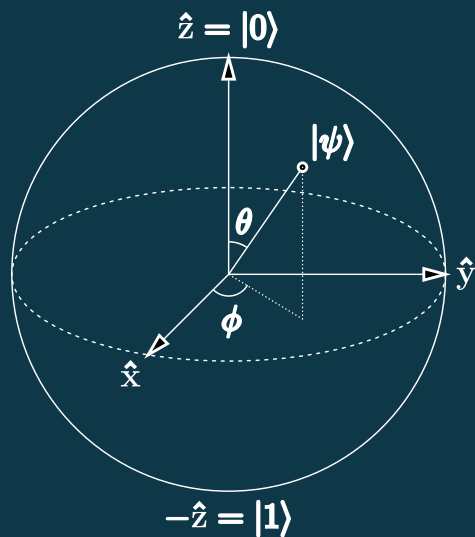
		Ansatz	Anwendung (Beispiele)	Reifegrad	Herausforderung
	Neuromorphes Computing	Nachbau neuronaler Strukturen mit Hardware	KI-Training	TRL 3-6	Chipdesign, Standardisierung, Software
	Quantum Computing	Nutzung von Quanteneffekten	Molekülberechnung, Optimierung großer Probleme	TRL 6-8*	Skalierung, Integration
	Photonic Computing	Nutzung von Licht statt Strom	KI-Training	TRL 6	Skalierung, Integration
	Kryogenic Computing	Computing bei sehr kalten Temperaturen	Energieeffizientes Computing	TRL 3-5	Grundlagen
	Künstliche Intelligenz	Nachbau neuronaler Netze mit Software	LLMs, Mensch-Maschine-Interaktion	Mature	Energiekonsum

Quantentechnologien nutzen die physikalischen Eigenschaften einzelner Teilchen.

Quantentechnologien haben ihren Namen, weil einzelne Teilchen (Elektronen, Photonen) diskrete, d.h. bestimmte Eigenschaften aufweisen. Ein gutes Beispiel ist der LASER, der aufgrund eines klar definierten „Energieabstandes“ (Quantisierung) von zwei Energieniveaus in der Lage ist, Licht einer ganz bestimmten Farbe (Wellenlänge) zu erzeugen. Während LASER die Quanteneigenschaften vieler Teilchen nutzen, nutzen Quantencomputer die Quanteneigenschaften einzelner Teilchen.



Ein Qubit kann im Zustand „0“ und „1“ sein. (Superposition)
Ein Bit kann im Zustand „0“ oder „1“ sein.

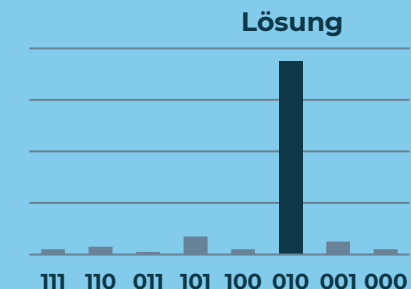
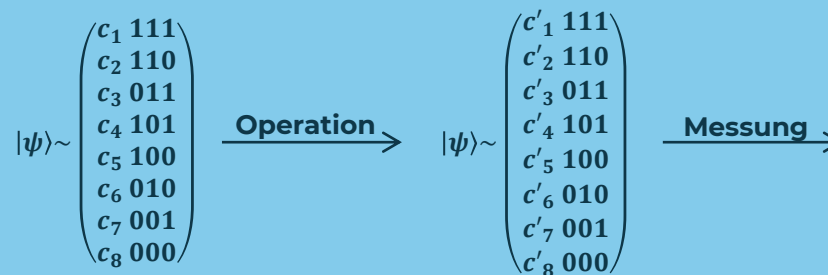


Bloch Sphäre
3D Darstellung eines Qubits

Mathematische Beschreibung eines Qubits: $|\psi\rangle = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle$

- c_1 und c_2 enthalten die **Wahrscheinlichkeiten** der Zustände „0“ und „1“
- Entlang des Äquators ist die Wahrscheinlichkeit 50:50
- Durch Beeinflussung der Wellenfunktion $|\psi\rangle$ können c_1 und c_2 manipuliert werden.
- **Herausforderung:** Kontrolle (Messen) des Zustands zerstört Superposition

Rechnen mit 3 Qubits



Quantencomputing löst komplexe Probleme in kurzer Zeit.

Konventionelle Computer-Bits können entweder im Zustand „0“ oder im Zustand „1“ sein. Quanten-Bits (Qbits) können im Zustand „0“ und „1“ gleichzeitig sein. Damit steigt die Zahl der gleichzeitig möglichen Zustände exponentiell an und macht die Berechnung komplexer Probleme in sehr kurzer Zeit möglich. Die zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien heißen „Superposition“ und „Verschränkung“. Der Zeitpunkt, an dem Quantencomputing ein Problem schneller löst, als konventionelles Computing wird als „Quantenüberlegenheit“ betitelt.



Datacenter

Cloud Zugang

Host von Prozessoreinheiten

Allgemeine Aufgaben



Quantencomputer

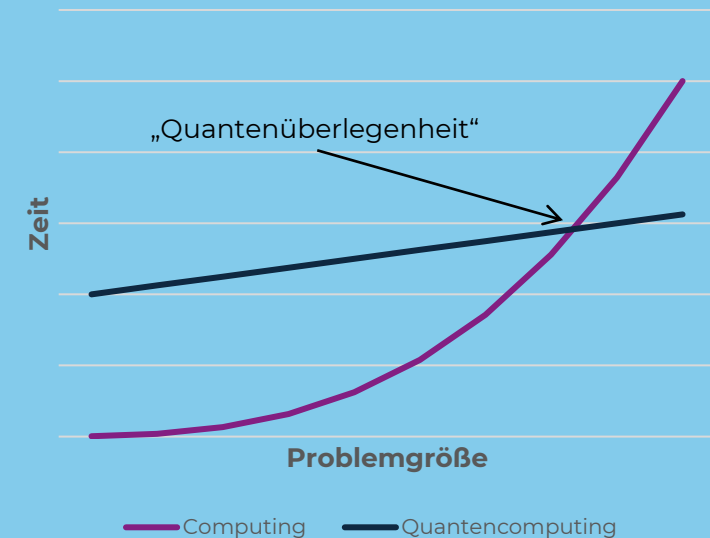
Cloud Zugang

Ko-Prozessor

Spezialisierte Anwendungen

Quantencomputer und Datacenter werden zusammenarbeiten. Datacenter werden komplexe Aufgaben an Quanten Ko-Prozessoren weiterleiten und die berechneten Daten zur Bearbeitung von Nutzeranfragen auswerten.

„Quantum Speed-up“



Quantencomputing – Plattformen

Im Gegensatz zu konventionellen Computern ist die finale Entscheidung für eine Quantencomputer-Architektur noch nicht gefallen. Derzeit liefern sich verschiedene Technologieansätze ein Wettrennen um die Technologieführerschaft. Die derzeit am weitesten entwickelten Technologieplattformen sind Supraleiter, Ionenfallen und neutrale Atome. Halbleiterbasierte Quantencomputer schließen allerdings rapide auf. Jede Technologie hat Vor- und Nachteile im Hinblick auf Schnelligkeit und Qualität der Q-Bits.



Supraleiter



Ionenfallen



Neutralatome



Halbleiter

Quanteneffekt

Josephson Junction

Photoinduzierte
Elektronenanregung

Photoinduzierte
Elektronenanregung

Elektronen-Spin

Entwicklungsstand

1000 + physikalische QuBits
Fehlerkorrektur demonstriert

Fehlerkorrektur gezeigt
Höchste Präzision

Sehr schnelle Entwicklungs-
dynamik

Quantenvorteile
demonstriert

Unternehmen

IQM, IBM, Rigetti,
Amazon, Google, Fujitsu

IonQ, **EleQtron**, AQT, NeQxt,
Quantinuum

Planqc, PasQal, QuEra,
Infleqtion

Arque Systems, Intel, Diraq,
Equal1

Quantencomputing ist ein B2B Produkt.

Quantencomputer liefern Mehrwerte bei der Lösung hochkomplexer Probleme. Damit sind sie hauptsächlich für die Nutzung im unternehmerischen Kontext prädestiniert. Zudem ist eine kontinuierliche Nutzung nur für wenige Kunden interessant. Eine Verdrängung von Endgeräten, die konventionelle Technologien der ersten Quantenrevolution nutzen, ist unwahrscheinlich. Das Geschäftsmodell vieler Quantencomputerhersteller ist daher Quantum as a Service.

Erwerb und Betrieb von Quantencomputern sind kostspielig...



Total Cost of Ownership^[3]

~ 10 Mio. US-\$ *Hardware*
~ 2 Mio. US-\$ *Personal + Training*



Rechenzeit^[4]

Die Preise für Rechenzeit variieren von 98\$/Minute bis ca. 175.000\$/Monat.



F+E Kooperation

Häufiges Problem: IP, Zeit, Zuverlässigkeit der Hardware

... die Nutzung vorhandener QC-Infrastruktur ist attraktiver.

Geschätzter Umsatz von Quantencomputer-Unternehmen (Mc Kinsey 2025)



~ 0,9 - 2 Bio. €

Potenzieller Wert, der **bis 2035** von vier Branchen getragen wird:

- globale Energie- und Rohstoffindustrie**
- Pharma- und Medizinprodukte**
- Finanzindustrie
- Reise, Transport und Logistik