

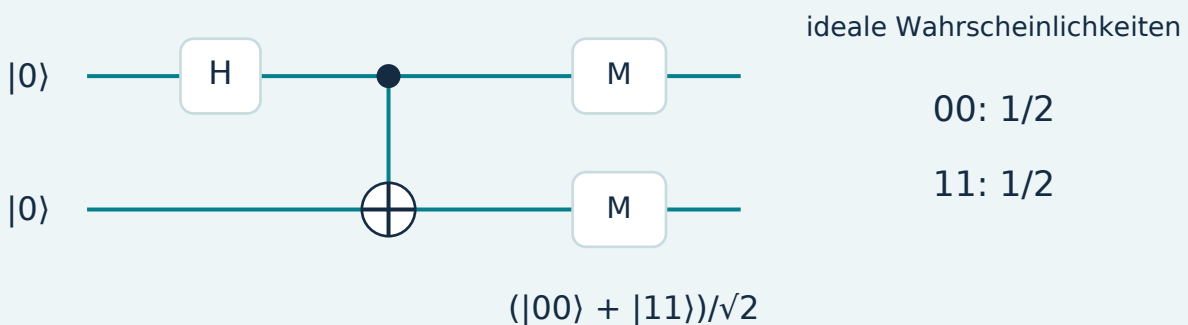
Quantentechnologie

Von physikalischen Grundlagen zu Prozessoren, Netzwerken und Sensoren

Didaktische Gesamtausgabe

26.09.2026 | v1.0 | DE

Ein eigenständiger, systematischer Leitfaden für interessierte Leser, Studierende und Technologieteams. Dies ist eine breit angelegte Einführung, kein vollständiges Verzeichnis aller Experimente und keine Bauanleitung für ein Labor. Mathematik wird dort eingeführt, wo sie den Mechanismus erklärt. Die Zeichnungen sind konzeptionell und nicht maßstabsgetreu. Forschungsstand geprüft am 26. September 2026; die Daten einzelner Nachweise stehen im Literaturverzeichnis.



Inhalt

01 Die Landschaft der Quantentechnologien	3
02 Ein Jahrhundert der Ideen und Experimente	3
03 Zustände, Amplituden und Messung	4
04 Superposition ist keine Sammlung fertiger Antworten	4
05 Verschränkung, Korrelationen und No-Cloning	5
06 Gatter, Schaltungen und ein erstes Experiment	5
07 Algorithmen und Bedingungen für Beschleunigung	6
08 Wie Hardware ein Qubit kodiert	6
09 Der Prozessor ist nur ein Teil der Maschine	7
10 Steuerelektronik, Optik und Kryotechnik	7
11 Rauschen und Fehlerkorrektur	8
12 Logische Qubits und Fehlertoleranz	8
13 Der Quanten-Softwarestapel	9
14 Aussagekräftige Benchmarks	9
15 Kommunikation und Quanteninternet	10
16 Sensoren und Präzisionsmessung	10
17 Post-Quanten-Kryptografie und QKD	11
18 Nachweise zum Prüfdatum 2026	11
19 Zukunftsrichtungen sind bedingt, nicht unvermeidlich	12
20 Lernpfad und Aufgaben	12
21 Die Bibliothek verantwortungsvoll nutzen	13
Literatur und weiterführende Quellen / 14+	

01 Die Landschaft der Quantentechnologien

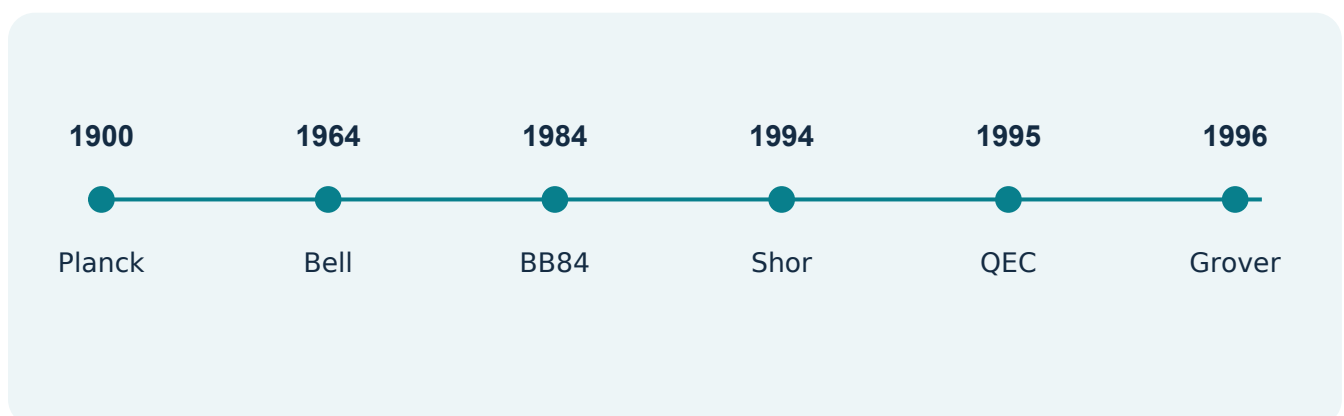
Quantentechnologie nutzt kontrollierte physikalische Systeme, deren Verhalten die Quantenmechanik erfordert. Computer verarbeiten Informationen; Kommunikation verteilt Quantenzustände oder Schlüssel; Sensoren messen physikalische Größen. Laser, Transistoren und Magnetresonanz beruhen bereits auf Quantenphysik. Neuere Ansätze nutzen einzelne Quantensysteme, Kohärenz und teilweise Verschränkung als gezielt eingesetzte Ressourcen.

Ein Quantencomputer ist normalerweise ein Beschleuniger, der mit klassischen Computern verbunden ist. Er ersetzt nicht jeden Prozessor und ist nicht bei jeder Aufgabe schneller. Ein nutzbarer Vorteil bedeutet ein besseres Ergebnis bei vertretbaren Gesamtkosten einschließlich Vorbereitung, Steuerung, Wiederholungen und Prüfung. Es gibt keine experimentell bestätigte Technologie, die einfach über allen Quantentechnologien steht. Unterschiedliche Architekturen lösen unterschiedliche Probleme. [R1, R2]

02 Ein Jahrhundert der Ideen und Experimente

Planck führte 1900 die Energiequantisierung ein; Einstein verband 1905 Lichtquanten mit dem photoelektrischen Effekt. Matrizen- und Wellenmechanik entstanden 1925-1926. Das EPR-Argument von 1935 und Bells Theorem von 1964 verdeutlichten die Bedeutung von Korrelationen, die lokale klassische Modelle unter den jeweiligen Annahmen nicht reproduzieren können.

In den 1980er-Jahren motivierte Feynman die Quantensimulation, während Deutsch universelle Quantenberechnung formalisierte. BB84 schlug 1984 Quantenschlüsselverteilung vor. Shors Algorithmus von 1994 und Grovers Suchalgorithmus von 1996 zeigten wichtige Rechenmöglichkeiten; Quantenfehlerkorrektur entstand 1995. Spätere Meilensteine umfassen kontrollierte Gatter, über die Cloud zugängliche Prozessoren, leistungsfähigere Simulatoren und Demonstrationen logischer Qubits. Das sind unterschiedliche Erfolge und kein Beleg dafür, dass jede nützliche Anwendung bereits praktikabel ist. [R1, R2, R10]



Eigenständiges didaktisches Diagramm 01. Ausgewählte historische Meilensteine; Daten bezeichnen Ideen, keine Produktreife.

03 Zustände, Amplituden und Messung

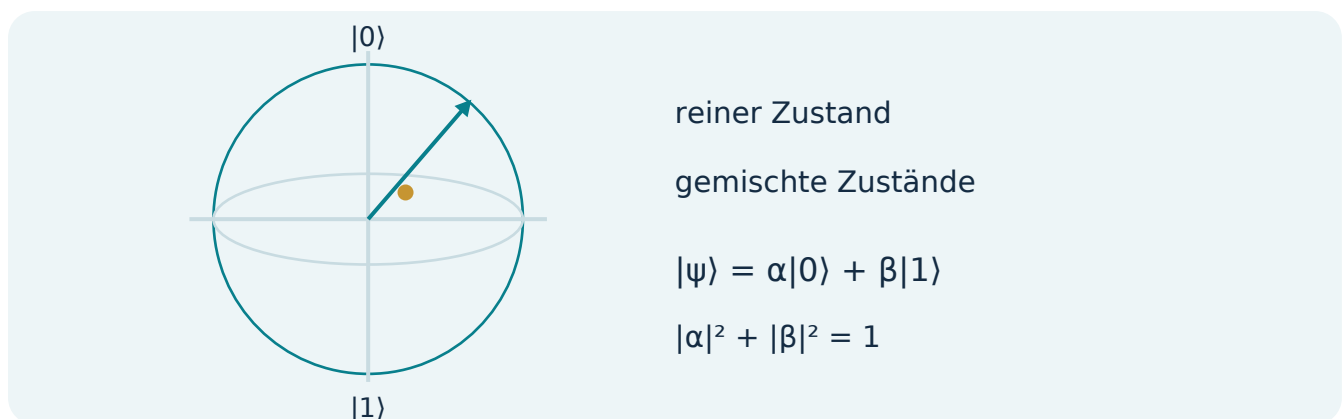
Ein Qubit ist ein kontrollierbares Quantensystem mit zwei Niveaus. In einer gewählten Basis lautet sein reiner Zustand $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, mit komplexen Amplituden und $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Eine Messung liefert 0 oder 1 mit den entsprechenden Betragsquadraten als Wahrscheinlichkeiten. Eine einzelne Messung verrät nicht beide Amplituden; eine Zustandsschätzung benötigt viele identisch präparierte Exemplare und mehrere Messeinstellungen.

Die relative Phase verändert Interferenz; eine globale Phase ändert die Messvorhersagen nicht. Die kohärente Entwicklung eines isolierten Systems ist unitär; ein Hamiltonoperator beschreibt Energie und Dynamik. Gemischte Zustände erfassen Ungewissheit oder Verschränkung mit einer unbeobachteten Umgebung und benötigen eine Dichtematrix. Die Bloch-Kugel stellt reine Einzelqubit Zustände auf der Oberfläche und gemischte Zustände im Inneren dar, nicht die Flugbahn eines Elektrons. [R10, R11]

04 Superposition ist keine Sammlung fertiger Antworten

Die Zustände $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ und $|-\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ liefern in der Rechenbasis gleiche 0/1-Wahrscheinlichkeiten. Ein Hadamard-Gatter H vor der Messung unterscheidet sie: $H|+\rangle = |0\rangle$ und $H|-\rangle = |1\rangle$. Interferenz wandelt damit Phaseninformation in beobachtbare Wahrscheinlichkeitsunterschiede um.

Ein reiner Zustand mit n Qubits besitzt 2^n Amplituden, doch sein Auslesen liefert keine 2^n klassischen Antworten. Algorithmen müssen Interferenz so gestalten, dass nützliche Ergebnisse wahrscheinlich werden. Selbst der riesige Zustandsraum beweist keine Beschleunigung: Manche großen Quantenschaltungen lassen sich effizient klassisch simulieren. Die zentrale technische Herausforderung besteht darin, die richtige Interferenz zu erhalten und unerwünschte Wechselwirkungen zu unterdrücken. [R2, R10]



Eigenständiges didaktisches Diagramm 02. Bloch-Kugel: geometrische Darstellung eines Qubits, keine Elektronenbahn.

05 Verschränkung, Korrelationen und No-Cloning

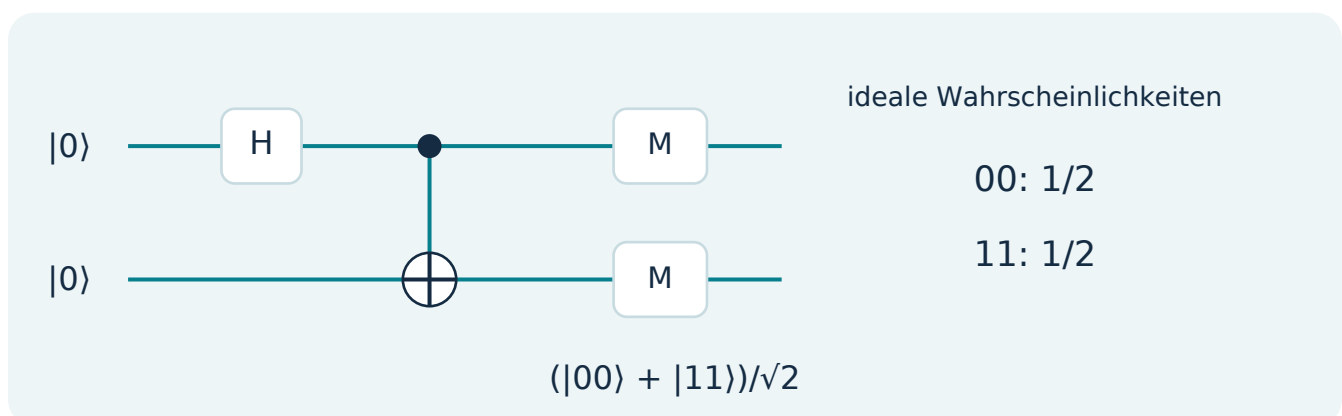
Ausgehend von $|00\rangle$ wird H auf das erste Qubit angewandt, dann ein CNOT mit diesem Qubit als Steuerqubit. Es entsteht der Bell-Zustand $(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$. Ideale Messungen in der Rechenbasis ergeben gleich häufig 00 und 11. Jedes Teilsystem wirkt für sich zufällig. Korrelation in nur einer Basis beweist keine Verschränkung: Eine klassische Mischung von 00 und 11 liefert dieselbe Verteilung.

Ein verschränkter Gesamtzustand lässt sich nicht als Mischung von Produktzuständen schreiben. Geeignete Messungen oder Verschränkungszeugen unterscheiden ihn von klassischen Korrelationen. Verschränkung überträgt keine steuerbare Nachricht schneller als Licht. Das No-Cloning-Theorem verbietet einen universellen perfekten Kopierer unbekannter Quantenzustände; bekannte orthogonale klassische Zustände können dennoch kopiert werden. Teleportation verbraucht gemeinsame Verschränkung und benötigt klassische Kommunikation. [R3, R10]

06 Gatter, Schaltungen und ein erstes Experiment

X vertauscht $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Z ändert das Vorzeichen der $|1\rangle$ -Amplitude. H wechselt zwischen Rechen- und Superpositionsbasis. Die Phasengatter S und T erzeugen bestimmte relative Phasen; kontinuierliche Rotationen liefern eine weitere Beschreibung. CNOT kippt sein Zielqubit nur bei Steuerzustand $|1\rangle$ in der Rechenbasis. Ein universeller Gattersatz kann beliebige unitäre Berechnungen mit gewählter Genauigkeit approximieren.

Schaltungslinien kennzeichnen Qubits; die horizontale Richtung zeigt die Operationsfolge, keine räumliche Entfernung. Präparieren Sie $|00\rangle$, wenden Sie H(0) und CNOT(0,1) an, messen Sie beide Qubits und wiederholen Sie dies 1.000-mal. Ideal sind ungefähr 500 Ergebnisse 00 und 500 Ergebnisse 11 mit normalen statistischen Schwankungen. Rauschen erzeugt weitere Ergebnisse. Dokumentieren Sie Simulator oder Gerät, Schaltung, Bitreihenfolge, Wiederholungen und Kalibrierungszeit. Dies zeigt Präparation und Korrelation, keinen Rechenvorteil. [R10, R11]



Eigenständiges didaktisches Diagramm 03. Bell-Schaltung: ideale Z-Messergebnisse allein beweisen keine Verschränkung.

07 Algorithmen und Bedingungen für Beschleunigung

Shors Algorithmus führt Faktorisierung und diskrete Logarithmen auf periodenbezogene Quantenberechnungen zurück und bedroht verbreitete Public-Key-Verfahren auf ausreichend leistungsfähiger fehlertoleranter Hardware. Grovers Suche benötigt $O(\sqrt{N})$ Orakelaufufe für einen markierten Eintrag unter N Kandidaten, gegenüber $O(N)$ klassischen Abfragen. Orakel, Datenzugriff und Fehlerkorrektur verursachen zusätzliche Kosten.

Phasenschätzung erschließt Eigenwerte, wenn passende kontrollierte Entwicklungen und Eingabezustände verfügbar sind. Quantensimulation zielt auf Molekül- und Materialdynamik. VQE und QAOA verbinden parametrisierte Schaltungen mit klassischer Optimierung, doch eine allgemeine praktische Überlegenheit ist unbewiesen. Verfahren für lineare Systeme und maschinelles Lernen setzen oft effizientes Laden, günstige Konditionierung oder eingeschränkte Ausgaben voraus. Verglichen werden müssen vollständige Abläufe mit leistungsfähigen klassischen Methoden, nicht nur idealisierte Unterprogramme. [R2, R1]

08 Wie Hardware ein Qubit kodiert

Supraleitende Schaltungen verwenden nichtlineare elektrische Oszillatoren, häufig Transmons, mit Mikrowellensteuerung und Millikelvin-Kühlung. Gefangene Ionen nutzen innere Atomzustände in elektromagnetischen Fallen und optische oder Mikrowellengatter. Neutrale Atome werden mit optischen Pinzetten oder Gittern angeordnet; Rydberg-Wechselwirkungen können Verschränkung erzeugen.

Halbleiter-Spin-Qubits nutzen Elektronen- oder Kernspins und versprechen hohe Integrationsdichte, während einheitliche Steuerung und Verbindungen schwierig bleiben. Photonische Systeme kodieren Informationen in Licht, etwa Moden oder Polarisation; Verluste, Quellen, Detektion und verschränkende Operationen sind entscheidend. Farbzentren verbinden Festkörperspins mit optischen Schnittstellen. Topologische Ansätze suchen geschützte Kodierungen, doch Aussagen brauchen unabhängige Bestätigung und skalierbare Gatterdemonstrationen. Die Qubitzahl allein erlaubt keine Rangfolge. [R3, R8, R21]



Eigenständiges didaktisches Diagramm 04. Sechs physikalische Ansätze; die Kästen sind Kategorien, keine Rangliste.

09 Der Prozessor ist nur ein Teil der Maschine

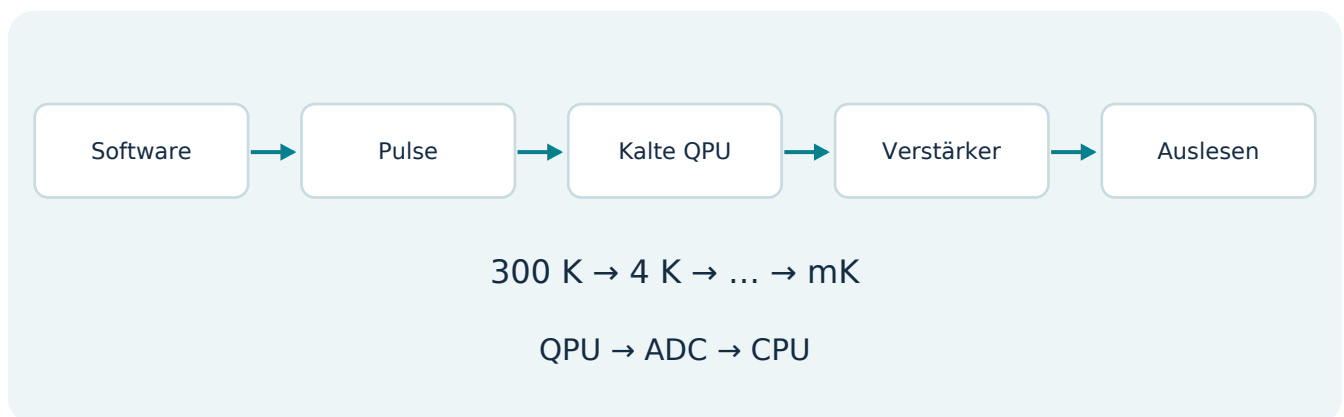
Ein funktionierendes System braucht Präparation, Adressierung, verschränkende Wechselwirkungen, Auslesen, Zurücksetzen und Kalibrierung. Die Konnektivität bestimmt direkte Wechselwirkungen. Routing kann SWAP-Operationen einfügen und Laufzeit sowie Fehler erhöhen. Leakage führt aus dem vorgesehenen Zweiniveau-Unterraum heraus; Übersprechen lässt eine Steueroperation andere Qubits stören.

Fertigungsausbeute, Gehäuseintegration, optische Ausrichtung, Vakuumsysteme und Verkabelung können ebenso wichtig sein wie eine Rekordgattertreue. Modulare Prozessoren benötigen schnelle zuverlässige Verbindungen und Protokolle, die fehlgeschlagene Verschränkungsversuche berücksichtigen. Analoge Simulation und Quantenannealing verwenden andere Steuerungsmodelle als universelle Gatterschaltungen; ihre Qubit Zahlen und Leistungswerte sind deshalb nicht unmittelbar austauschbar. [R1, R3, R8]

10 Steuerelektronik, Optik und Kryotechnik

Bei supraleitenden Prozessoren fordert klassische Software Pulse an; Wellenformgeneratoren und Mikrowellenkomponenten formen sie; gefilterte und gedämpfte Leitungen führen sie zum kalten Chip. Auslesesignale gelangen über Verstärkung und Digitalisierung zurück. Decoder oder Rückkopplungsregler müssen gegebenenfalls innerhalb der Zeitvorgaben der Fehlerkorrektur reagieren.

Ein Verdünnungskryostat stellt mehrere Temperaturstufen bereit; Millikelvin-Betrieb ist nicht der absolute Nullpunkt. Zusätzliche Leitungen bringen Wärme, Rauschen und Platzprobleme. Kryogenes CMOS und Multiplexing sollen diese Last reduzieren, doch Verlustleistung und Genauigkeit müssen gemessen werden. Ionen und neutrale Atome benötigen vor allem Laser, Vakuum und optische Kontrolle statt derselben Kühlung. Manche Photonendetektoren brauchen dennoch kryogene Temperaturen. Die Skizzen erklären Funktionen und sind keine Bauspezifikationen. [R8, R3, R21]



Eigenständiges didaktisches Diagramm 05. Funktionale supraleitende Steuerkette; Rücksignale werden verstärkt und digitalisiert.

11 Rauschen und Fehlerkorrektur

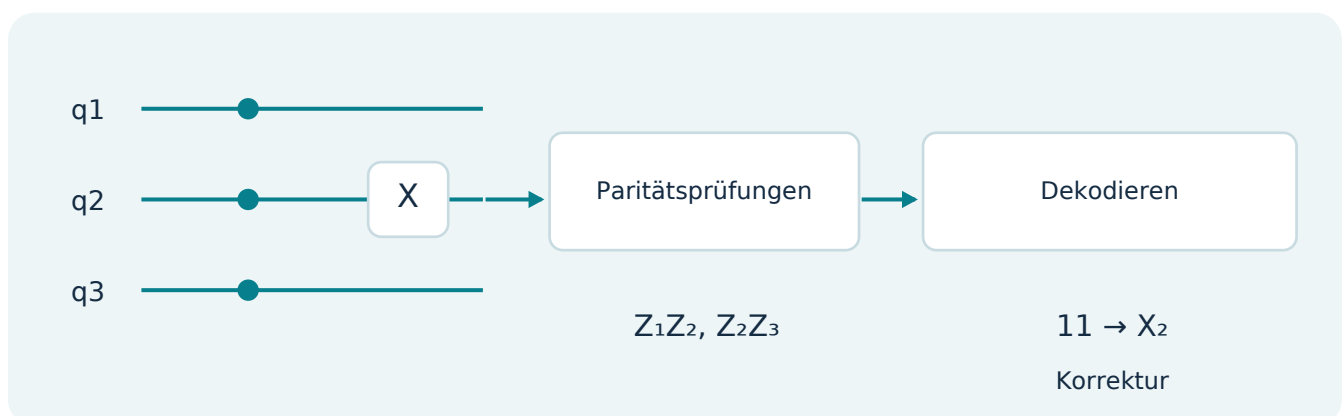
Relaxation, oft durch T_1 beschrieben, verändert Besetzungen angeregter Zustände; Dephasierung reduziert Phasenkohärenz (T_2). Gatter- und Messfehler, Verluste und korrelierte Störungen wirken unterschiedlich. Fehlerminderung schätzt weniger verzerrte Ergebnisse durch zusätzliche Stichproben oder Modelle; sie liefert im Allgemeinen keine skalierbare Fehlertoleranz.

Quantenfehlerkorrektur verteilt logische Information auf physikalische Freiheitsgrade und misst Fehlersyndrome, ohne die logischen Amplituden direkt auszulesen. Ein Drei-Qubit-Wiederholungscode bildet $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ auf $\alpha|000\rangle + \beta|111\rangle$ ab und korrigiert einen einzelnen Bitflip unter seinem Fehlermodell; beliebige Phasenfehler korrigiert er nicht. Vollständiger Schutz benötigt umfassendere Codes. Auch Syndrommessungen können fehlschlagen und werden daher meist wiederholt. [R4, R12]

12 Logische Qubits und Fehlertoleranz

Der Oberflächencode nutzt lokale Paritätsprüfungen auf einem Gitter. Die Codedistanz bestimmt den kleinsten unentdeckbaren logischen Fehler; größere Distanz kostet mehr physikalische Qubits. Unterhalb einer geeigneten Rauschschwelle kann der logische Fehler mit wachsendem Code sinken. Die Schwelle hängt von Rauschmodell, Schaltungen und Decoder ab und ist keine universelle Hardwarekennzahl.

Fehlertoleranz benötigt auch zuverlässige logische Gatter, Präparation, Messung und Echtzeitdekodierung. Manche Nicht-Clifford-Operationen erfordern teure Hilfsressourcen wie destillierte magische Zustände. Bosonische und Quanten-LDPC-Codes untersuchen andere Kompromisse. Ein geschützter Speicher beweist noch keinen vollständigen nutzbaren fehlertoleranten Computer. Ressourcenschätzungen müssen Algorithmus, Zielfehlerwahrscheinlichkeit, physikalisches Rauschen, Zykluszeit, Code und Konnektivität angeben. [R4, R13]



Eigenständiges didaktisches Diagramm 06. Drei-Qubit-Bitflipcode: Paritätssyndrome erkennen einen Bitflip, keine allgemeinen Phasenfehler.

13 Der Quanten-Softwarestapel

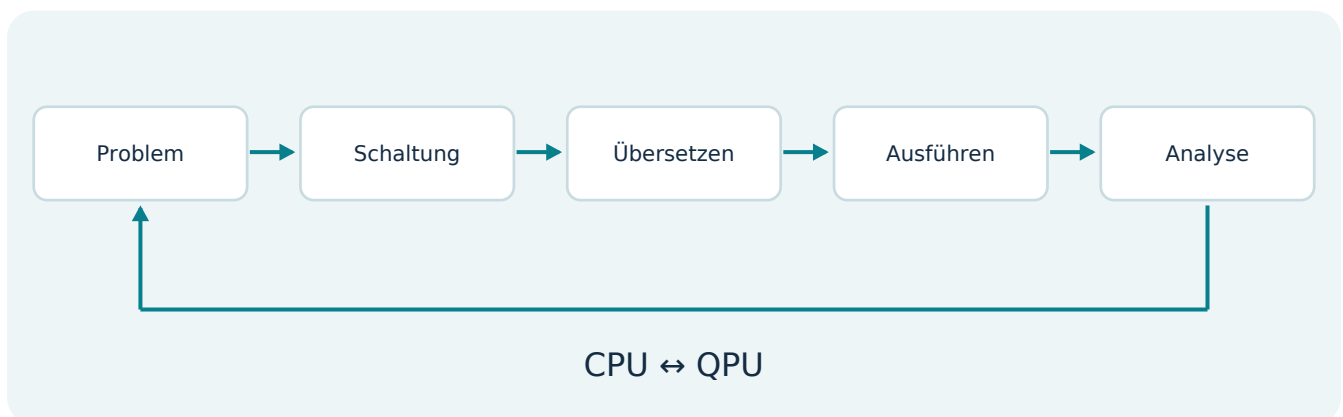
Ein typischer Ablauf beginnt mit einem Problemmodell und einer klassischen Referenz. Der Algorithmus wird zu einer Schaltung oder Zwischendarstellung. Die Übersetzung zerlegt Operationen in native Gatter, wählt physikalische Qubits und routet Wechselwirkungen. Zeitplanung und Pulssteuerung verbinden Programm und Gerät. Messergebnisse gehen an die klassische Nachverarbeitung zurück; hybride Methoden wiederholen diese Schleife.

Qiskit, Cirq und PennyLane unterstützen Teile dieses Ablaufs; OpenQASM beschreibt Quantenprogramme. Schnittstellen und Funktionen ändern sich, daher sollten ausführbare Beispiele Versionen fixieren und aktuelle Dokumentation nennen. Simulatoren modellieren ideale Zustände, verrauschte Kanäle oder spezielle Schaltungsstrukturen. Klassische Simulationskosten hängen von der Struktur ab, nicht nur von der Qubitzahl. Für Reproduzierbarkeit müssen Code, Zufallsstartwerte, Übersetzungsentscheidungen, Kalibrierungen und Rohdaten erhalten bleiben. [R14, R15]

14 Aussagekräftige Benchmarks

Physikalische und logische Qubits sind getrennt anzugeben. Wichtige Metriken sind Gatter- und Auslesefehler, Kohärenz, Konnektivität, Schaltungstiefe, Durchsatz, logischer Fehler pro Zyklus und Gesamtzeit bis zur Zielgenauigkeit. Randomisiertes Benchmarking schätzt Fehler unter Annahmen; Kreuzentropie und Anwendungsbenchmarks beantworten andere Fragen. Eine einzige Punktzahl verdeckt Zielkonflikte.

Eine belastbare Vorteilsbehauptung benennt Aufgabe und Genauigkeit, berücksichtigt Präparation, Wiederholungen und klassische Kosten und vergleicht mit den besten relevanten klassischen Verfahren. Ergebnisse sind zu prüfen oder geeignet statistisch zu validieren. Ein schwer simulierbares Experiment ist von wirtschaftlichem Nutzen zu unterscheiden. Herstellerpläne sind Prognosen. Ein Laborrekord bei einer Kalibrierung ist nicht automatisch dauerhaft verfügbare Produktionsleistung. [R1, R16, R20]



Eigenständiges didaktisches Diagramm 07. Softwareablauf: Messungen gehen an klassische Analyse zurück und können weitere Läufe auslösen.

15 Kommunikation und Quanteninternet

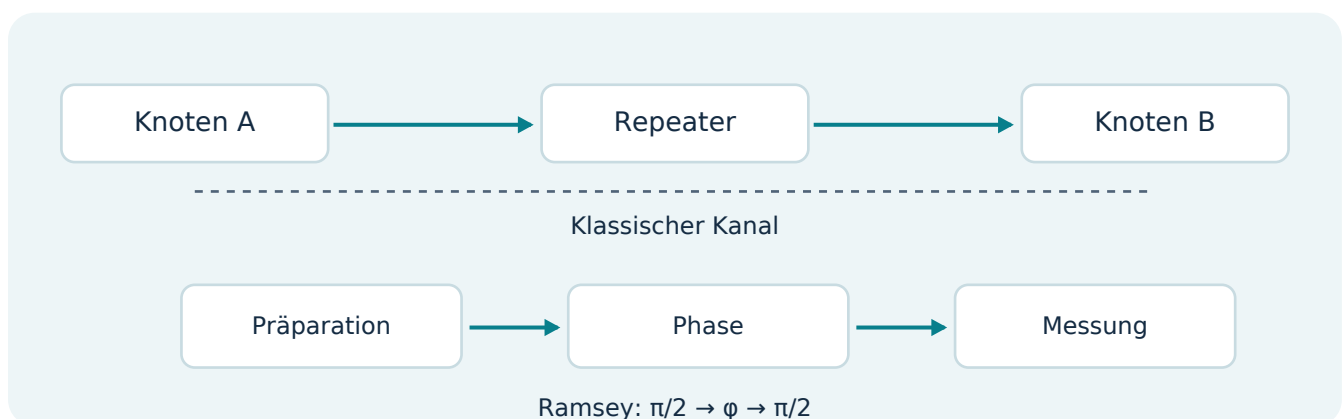
Photonen können Quantenzustände durch Fasern oder freien Raum tragen. Verluste wachsen mit der Entfernung, und unbekannte Zustände lassen sich nicht durch gewöhnliches Kopieren verstärken. Quantenrepeater sollen Verschränkungserzeugung, Speicher und Entanglement Swapping, gegebenenfalls Reinigung oder Fehlerkorrektur, für größere nutzbare Distanzen verbinden.

Teleportation überträgt einen Quantenzustand mit einem gemeinsamen verschränkten Paar und zwei klassischen Bits im üblichen Qubitprotokoll; sie bewegt keine Materie und umgeht die Lichtgeschwindigkeit nicht. Netzwerke könnten Prozessoren verbinden, Schlüssel verteilen oder gemeinsame Messungen verbessern. Demonstrierte Verbindungen und kleine Netze sind wichtig, doch ein universelles skalierbares Quanteninternet bleibt ein Entwicklungsziel. Schlüsselnetze mit vertrauenswürdigen Knoten und repeaterbasierte Verschränkungsnetze bieten unterschiedliche Sicherheit und Funktionen. [R3]

16 Sensoren und Präzisionsmessung

Quantensensoren übersetzen Felder, Beschleunigungen oder Frequenzen in Änderungen eines kontrollierten Quantenzustands. In einer Ramsey-Sequenz erzeugt ein erster Puls Kohärenz, freie Entwicklung sammelt signalabhängige Phase, und ein zweiter Puls wandelt diese in messbare Besetzung um. Atomuhren, Atominterferometer und Spinmagnetometer nutzen verwandte Prinzipien.

Bei unabhängigen idealen Sonden sinkt statistische Unsicherheit häufig wie $1/\sqrt{N}$. Verschränkte Ressourcen können unter geeigneten Annahmen besser skalieren; Rauschen, Verluste, Vorbereitung und Auslesen können diesen Vorteil jedoch aufheben. Empfindlichkeit, Bandbreite, räumliche Auflösung, Drift und Betriebsumgebung sind gemeinsam zu bewerten. Einige Quantensensortechnologien sind etabliert; viele biomedizinische oder verteilte Anwendungen bleiben Forschungsprojekte und sind keine validierten Diagnosegeräte. [R5, R17]



Eigenständiges didaktisches Diagramm 08. Quantenverbindungen brauchen klassische Koordination. Ramsey-Messung wandelt Phase in ein Signal um.

17 Post-Quanten-Kryptografie und QKD

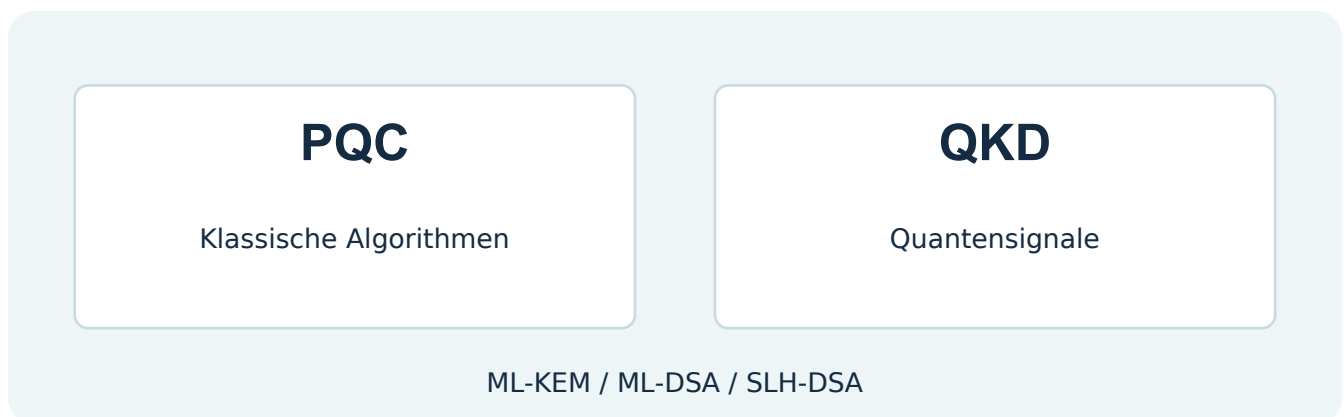
Post-Quanten-Kryptografie (PQC) verwendet klassische Algorithmen, die bekannten klassischen und Quantenangriffen widerstehen sollen, auf klassischer Infrastruktur. NIST FIPS 203 von 2024 spezifiziert ML-KEM zur Schlüsseletablierung; FIPS 204 und 205 spezifizieren die Signaturen ML-DSA und SLH-DSA. Das sind unterschiedliche Funktionen, keine drei austauschbaren Verschlüsselungsverfahren.

Quantenschlüsselverteilung (QKD) nutzt Quantensignale und einen authentifizierten klassischen Kanal unter ausdrücklichen Sicherheitsannahmen. Sie authentifiziert nicht von selbst Identitäten, schützt keine kompromittierten Endgeräte und beseitigt keine Implementierungsangriffe. PQC-Migration benötigt ein Kryptografieinventar, Kompatibilitätstests und gepflegte Implementierungen; dieser Leitfadens ist keine Einsatzspezifikation. Langlebige Geheimnisse motivieren Aufmerksamkeit für „heute sammeln, später entschlüsseln“. Vor Umsetzung sind aktuelle Standards, Korrekturen und Sicherheitsvorgaben zu prüfen. [R6, R7, R9, R18]

18 Nachweise zum Prüfdatum 2026

Veröffentlichte Experimente belegen steuerbare Prozessoren, Quantenkommunikationsverbindungen und Fortschritte bei der Unterdrückung logischer Fehler. Googles Oberflächencode-Arbeit, online erstmals im Dezember 2024 und 2025 in Nature erschienen, zeigt Verhalten unterhalb der Schwelle in einer konkreten Versuchsanordnung. Sie demonstriert keine beliebigen großskaligen fehlertoleranten Anwendungen. Die Millikelvin-CMOS-Studie zur Spinsteuerung von 2025 behandelt einen konkreten Integrationsengpass. [R13, R8]

DARPA's Quantum Benchmarking Initiative untersucht, ob industriell nützliche Quantenberechnung bis 2033 erreichbar ist; das Datum ist ein Programmziel, kein garantierter Liefertermin. Keine Rangfolge umfasst alle Plattformen und Anwendungen. Diese Ausgabe nutzt ausgewählte geprüfte Meilensteine statt einer vollständigen Rekordtabelle; Leistungsbehauptungen sind mit Publikationsdatum, Annahmen und Benchmark zu lesen. [R16]



Eigenständiges didaktisches Diagramm 09. PQC nutzt klassische Hardware; QKD braucht Quantensignale und authentifizierte klassische Kommunikation.

19 Zukunftsrichtungen sind bedingt, nicht unvermeidlich

Wichtige Richtungen sind zuverlässigere logische Operationen, ressourcensparende Codes, bessere Decoder, modulare Verbindungen, bessere Fertigung und integrierte Steuerung. Heterogene Systeme könnten Speicher, Berechnung und Kommunikation verschiedenen Plattformen zuweisen. DARPA HARQ erforscht diese Integration, beweist aber keine allgemeine Überlegenheit heterogener Maschinen. [R19]

Quantenlernen, neuromorphe Vorschläge, topologische Kodierungen und verteilte Sensorik sind aktive Gebiete mit unterschiedlicher Beweislage. Universelle exponentielle Beschleunigung, unbegrenzt parallele Antworten und Technologie jenseits der Quantenphysik sind nicht belegt. Ein sinnvoller Plan nennt prüfbare Meilensteine: logische Genauigkeit, stabile Laufzeit, Verbindungsrate oder vollständigen Anwendungsnutzen. Prognosen benötigen Annahmen und müssen an neue Nachweise angepasst werden. [R1, R2, R16]

20 Lernpfad und Aufgaben

Beginnen Sie mit Vektoren, komplexen Zahlen, Wahrscheinlichkeit und kleinen Schaltungen. Rechnen Sie H, X und CNOT auf Papier durch und reproduzieren Sie sie im idealen Simulator. Ergänzen Sie ein einfaches Rauschmodell und vergleichen Sie Verteilungen. Studieren Sie eine Hardwareplattform, danach Syndromextraktion und logische Operationen. Das Bibliotheksmanifest führt von Einführungen zu Übersichten und Originalexperimenten.

Aufgabe 1: Bei $\alpha = \sqrt{3}/2$ und $\beta = 1/2$ ist $P(1)$ wie groß? Antwort: $1/4$. Aufgabe 2: Warum beweisen 00/11-Häufigkeiten keine Verschränkung? Eine klassische Mischung liefert dieselben Häufigkeiten. Aufgabe 3: Bei 1.000 unabhängigen Versuchen mit $p = 1/2$ ist die Standardabweichung der Anzahl $\sqrt{(1000 \times 1/2 \times 1/2)}$, etwa 15,8. Aufgabe 4: Korrigiert der Wiederholungscode jeden Qubitfehler? Der Drei-Qubit-Bitflipcode korrigiert keine allgemeinen Phasenfehler.



Eigenständiges didaktisches Diagramm 10. Forschungsmeilensteine sind bedingt; Pfeile versprechen keine Liefertermine.

21 Die Bibliothek verantwortungsvoll nutzen

Jeder externe Eintrag nennt Urheber, Thema, Originalquelle, Lizenz, Prüfdatum und Veröffentlichungsempfehlung. Lokale PDF-Kopien werden nur aufgenommen, wenn geprüfte Bedingungen diese Nutzung erlauben. Freier Zugang ohne Weiterverbreitungsrecht wird nur verlinkt. NonCommercial-Beschränkungen gelten nicht automatisch als mit einer Firmenwebsite vereinbar. Fremde Originale bleiben unverändert und werden nicht als Veröffentlichungen von LIGHT BRIDGE GROUP umetikettiert.

Der Leitfaden und seine konzeptionellen Abbildungen sind eigenständiges Lernmaterial für LIGHT BRIDGE GROUP. Quellen stützen Tatsachen, bedeuten jedoch keine Unterstützung durch die genannten Institutionen. Literaturtitel bleiben zur zuverlässigen Suche in der Originalsprache. Prüfen Sie externe Links und Korrekturen regelmäßig, insbesondere bei Kryptografiestandards.

01 → 06 → 11 → 17

R10 Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing

R1 Quantum Computing in the NISQ era and beyond

R2 Quantum algorithms: an overview

R4 A Short Introduction to Quantum Error Correction

R3 Quantum networks with neutral atom processing nodes

R5 Quantum sensing

R21 A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits

R6 FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard

Literatur und weiterführende Quellen

R1 John Preskill / Caltech (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond.

<https://quantum-journal.org/papers/q-2018-08-06-79/>

R2 Ashley Montanaro / University of Bristol (2016). Quantum algorithms: an overview.

<https://www.nature.com/articles/npjqi201523>

R3 Jacob P. Covey; Harald Weinfurter; Hannes Bernien (2023). Quantum networks with neutral atom processing nodes.

<https://www.nature.com/articles/s41534-023-00759-9>

R4 Thiago Lucena de Macedo Guedes (2026). A Short Introduction to Quantum Error Correction.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13538-026-02007-9>

R5 C. L. Degen; F. Reinhard; P. Cappellaro (2017). Quantum sensing.

<https://arxiv.org/abs/1611.02427>

R6 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/203/final>

R7 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/final>

R8 Bartee, Samuel K. et al. (2025). Spin-qubit control with a milli-kelvin CMOS chip.

<https://www.nature.com/articles/s41586-025-09157-x>

R9 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 205: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/205/final>

R10 Thomas G. Wong / Creighton University (2023). Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing.

<https://www.thomaswong.net/>

R11 John Preskill / Caltech (updated chapters). Lecture Notes for Physics 219: Quantum Computation.

<https://www.preskill.caltech.edu/ph219/index.html>

R12 Joschka Roffe (2019). Quantum Error Correction: An Introductory Guide.

<https://arxiv.org/abs/1907.11157>

R13 Google Quantum AI and Collaborators (2024 online / 2025 volume). Quantum error correction below the surface code threshold.

<https://www.nature.com/articles/s41586-024-08449-y>

R14 IBM Quantum (2026). IBM Quantum documentation and learning.

<https://quantum.cloud.ibm.com/docs/en/guides>

R15 OpenQASM contributors (2026). OpenQASM Live Specification.

<https://openqasm.com/>

R16 DARPA (2026). Quantum Benchmarking Initiative (QBI).

<https://www.darpa.mil/research/programs/quantum-benchmarking-initiative>

R17 Daniele Faccio / University of Glasgow (2024). The future of quantum technologies for brain imaging.

<https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3002824>

R18 Valerio Scarani; Helle Bechmann-Pasquinucci; Nicolas J. Cerf; Miloslav Dusek; Norbert Lutkenhaus; Momtchil Peev (2009). The Security of Practical Quantum Key Distribution.

<https://arxiv.org/abs/0802.4155>

R19 DARPA (2025-2026). Heterogeneous Architectures for Quantum (HARQ).

<https://www.darpa.mil/research/programs/heterogeneous-architectures-for-quantum>

R20 Akeel Hashim et al. (2025). Practical Introduction to Benchmarking and Characterization of Quantum Computers.

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.030202>

R21 Philip Krantz; Morten Kjaergaard; Fei Yan; Terry P. Orlando; Simon Gustavsson; William D. Oliver (2019). A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits.

<https://arxiv.org/abs/1904.06560>

Erstellt von LIGHT BRIDGE GROUP | lbgroup.rs. Version 1.0, 26. September 2026. Originaltext, Übersetzungen und Diagramme wurden für LIGHT BRIDGE GROUP erstellt. Diese Ausgabe wurde nicht unabhängig wissenschaftlich begutachtet. Externe Veröffentlichungen behalten ihre Urheberschaft und eigenen Lizenzen. Die englische und serbische Ausgabe haben denselben Umfang; die Übersetzungen bewahren die wissenschaftlichen Unterscheidungen.