

Future Energy Lab

STUDIE

Quantentechnologien als Innovationstreiber

Bausteine und Grundlagen erklären, Potenziale
und Einsatzmöglichkeiten aufzeigen

Ein Projekt der

dena

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel.: +49 30 66 777-0
Fax: +49 30 66 777-699
E-Mail: info@dena.de
Internet: www.dena.de, www.future-energy-lab.de

Autorinnen und Autoren:

Jasmin Wagner, dena
Unter Mitwirkung der Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft

Stand:

06/2026

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.

Bitte zitieren als:

Deutsche Energie-Agentur (dena, 2026): Quantentechnologien als Innovationstreiber - Bausteine und Grundlagen erklären, Potenziale und Einsatzmöglichkeiten aufzeigen. Berlin.



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

Die Veröffentlichung dieser Publikation erfolgt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) unterstützt die Bundesregierung in verschiedenen Projekten zur Umsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele im Rahmen der Energiewende.

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Klassifizierung verschiedener Formen von Quantentechnologien	6
2.1	Quanteninformation.....	7
2.2	Quantencomputing	8
2.3	Quantensimulation.....	11
2.4	Quantenmetrologie und Quantensensorik	12
2.5	Quantenkommunikation.....	13
2.6	Quantenalgorithmen	15
2.7	Kurzzusammenfassung	15
3	Methodik	16
3.1	Methodik zur Erarbeitung von potenziellen Anwendungsfällen	16
3.2	Methodik zur Einordnung und Bewertung der Anwendungsfälle	18
4	Anwendungsfälle und Potenziale in der Energiewirtschaft	19
4.1	Anwendungsfeld „Stromnetze“	20
4.2	Anwendungsfeld „Dezentrale Anlagen und Märkte“	25
4.3	Anwendungsfeld „Cybersicherheit“	29
4.4	Anwendungsfeld „Materialkunde“	31
4.5	Bewertungsergebnis.....	34
5	Fazit und Handlungsempfehlungen	36
	Abbildungsverzeichnis	39
	Literaturverzeichnis	40
	Abkürzungsverzeichnis	43

1 Einleitung

Im Rahmen der Hightech-Agenda definiert das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) zentrale Zukunftsfelder, die als Motor für wirtschaftliches Wachstum, technologische Souveränität und gesellschaftlichen Fortschritt dienen sollen. Diese Schlüsseltechnologien tragen nicht nur zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit bei, sondern schaffen zugleich attraktive Perspektiven für Fachkräfte, ziehen Investoren an und fördern die Ansiedlung innovativer Unternehmen.

Eine dieser strategisch bedeutsamen Technologien ist die Quantentechnologie. Sie nimmt eine zentrale Rolle in der technologischen Ausrichtung Deutschlands und Europas ein. So wird unter anderem angestrebt, bis zum Jahr 2030 mindestens zwei fehlerkorrigierte Quantencomputer auf international führendem Niveau zu entwickeln und deren praktischen Nutzen zugänglich zu machen. Parallel dazu soll im Bereich der Quantenkommunikation das bestehende Innovationsökosystem gezielt gestärkt und ausgebaut werden.

Deutschland verfügt im internationalen Vergleich über eine sehr gute Ausgangsposition. Die Kombination aus exzellenter, weltweit anerkannter Forschung und einem dynamisch wachsenden Ökosystem aus Start-ups, etablierten Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen bildet eine starke Grundlage. In Bezug auf Quantentechnologien hat sich insbesondere seit 2020 eine hohe Entwicklungsdynamik entfaltet, die zur Entstehung leistungsfähiger regionaler Cluster geführt hat. (BMFTR, 2025)

Maßgeblich hierfür sind umfangreiche Investitionen der öffentlichen Hand. 2020 wurden im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspakets rund 2 Milliarden Euro von der Bundesregierung für Quantentechnologien bereitgestellt, mit einem besonderen Schwerpunkt auf der Entwicklung von Quantencomputern und ersten Anwendungen. Damit wurden bestehende Förderprogramme wie „Plattform und Ökosystem für quantengestützte Künstliche Intelligenz“ (PlanQK) erweitert und der Aufbau eines Kompetenzzentrums der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wurde weiter ausgebaut. Durch die Einbindung von Unternehmen und Start-ups wurde zudem der Aufbau eines nationalen Ökosystems für Quantentechnologien gefördert (Bundwirtschaftsministerium, 2025). Auch auf EU-Ebene erfährt das Thema Quantentechnologie gezielte Förderungen. So wurden im Arbeitsprogramm „Digital, Industrie und Raumfahrt“ 2023–2024 des Forschungsprojekts Horizon insgesamt 40 Millionen Euro für die Forschung in diesem Bereich bereitgestellt (Europäische Kommission, 2024).

Die Wirkung dieser Investitionen zeigt sich unter anderen in konkreten technologischen Meilensteinen. Mit der Inbetriebnahme des IBM Quantum System One im Januar 2021 in Ehningen wurde erstmals ein kommerziell nutzbarer Quantencomputer auf europäischem Boden etabliert. Das neue IBM Quantum System One, ein supraleitender Quantencomputer mit 433 Quantenbits, steht nicht nur einem kleinen Forschungsteam zur Verfügung, sondern auch externen Wirtschaftspartnern, Unternehmen und Universitäten. Zudem werden Cloud-Zugriffe auf Quantencomputer ermöglicht, und dies nicht nur durch IBM, sondern durch nahezu alle führenden kommerziellen und global agierenden Anbieter von Quantentechnologien, zum Teil sogar kostenlos. Diese Entwicklung zeigt, dass die Kommerzialisierung von Quantentechnologien mit großen Schritten fortschreitet und es an der Zeit ist, die Nutzung dieser Technologien zu überdenken und neu einzuordnen (All-Electronics.de, 2021; IBM, 2022).

Quantentechnologien und ihre vielfältigen Anwendungsbereiche haben sich somit in den vergangenen Jahren rasant weiterentwickelt. Ein Trend, der sich unvermindert fortsetzt und die technologische Zukunft immer schneller greifbar macht.

Unter Berücksichtigung dieser Entwicklungen und der wesentlichen Erfolgsfaktoren für den Einsatz von Quantentechnologien, darunter die Verarbeitung und Modellierung komplexer Systeme und großer Datenmengen, die Beschleunigung rechenintensiver Prozesse sowie die Einhaltung neuer, hoher Sicherheitsstandards, stellt sich für die Energiebranche zunehmend die Frage nach den konkreten Anwendungspotenzialen und möglichen Risiken. Dies gilt im besonderen Maße für die aktuellen Transformationsprozesse im Rahmen der Energiewende und der damit verbundenen Digitalisierung.

Denn die Transformation des Energiesystems, welche von einer zunehmenden Volatilität, einer stärker dezentralen Erzeugungslandschaft und einer wachsenden technologischen Vielfalt geprägt ist und zeitgleich angesichts geopolitischer Unsicherheiten, steigender Energiepreise und wachsender Anforderungen an die industrielle Wettbewerbsfähigkeit die Versorgungssicherheit, Systemstabilität und Bezahlbarkeit stärker fokussieren muss, macht die Digitalisierung des Energiesektors in besonderem Maße unverzichtbar.

Große Datenmengen müssen künftig in Echtzeit erfasst, verarbeitet und sicher übertragen werden, um eine präzise Steuerung von Erzeugung, Netzen und Verbrauch zu ermöglichen. Digitale Technologien leisten einen entscheidenden Beitrag zur Optimierung des Kraftwerkeinsatzes, zur Reduzierung von Systemkosten sowie zur Erhöhung der Transparenz im Netzbetrieb. Hierbei bieten Quantentechnologien das Potenzial innovative, effiziente Lösungsansätze bereitzustellen.

Ziel dieser Studie „Quantentechnologien als Innovationstreiber – Bausteine und Grundlagen erklären, Potenziale und Einsatzmöglichkeiten aufzeigen“ ist es daher, das Thema Quantentechnologien in der Energiewirtschaft zu erschließen und einen gezielten Wissensaufbau für Wirtschaft, Fachöffentlichkeit und Politik zu betreiben. Dies dient als Basis für eine ganzheitliche Strategie zur Anwendung von Quantentechnologie für die Energiewirtschaft und soll damit als Entscheidungshilfe für Akteure des nationalen Energiesystems zur Verfügung stehen.

Das folgende Kapitel 2 beinhaltet hierfür zunächst eine allgemeine Klassifizierung unterschiedlicher Formen von Quantentechnologien. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wird im nächsten Schritt untersucht, bei welchen Anwendungsfällen Quantentechnologien einen Lösungsbeitrag leisten könnten. Dafür wird vorab in Kapitel 3 die Methodik zur Identifikation dieser potenziellen Anwendungsfelder erläutert. Darauf aufbauend werden in Kapitel 4 die Anwendungsfälle beschrieben und nach Relevanz gewichtet. Mit einem Fazit und einer Handlungsempfehlung zur Förderung der Entwicklung von Quantentechnologien in Kapitel 5 schließt diese Studie ab.

2 Klassifizierung verschiedener Formen von Quantentechnologien

In diesem Kapitel werden die gegenwärtig wichtigsten Quantentechnologien nach den jeweiligen Formen und Begrifflichkeiten definiert und klassifiziert (siehe Abbildung 1). Zudem wird der aktuelle Forschungs- und Entwicklungsstand der jeweiligen Technologieklasse vorgestellt.

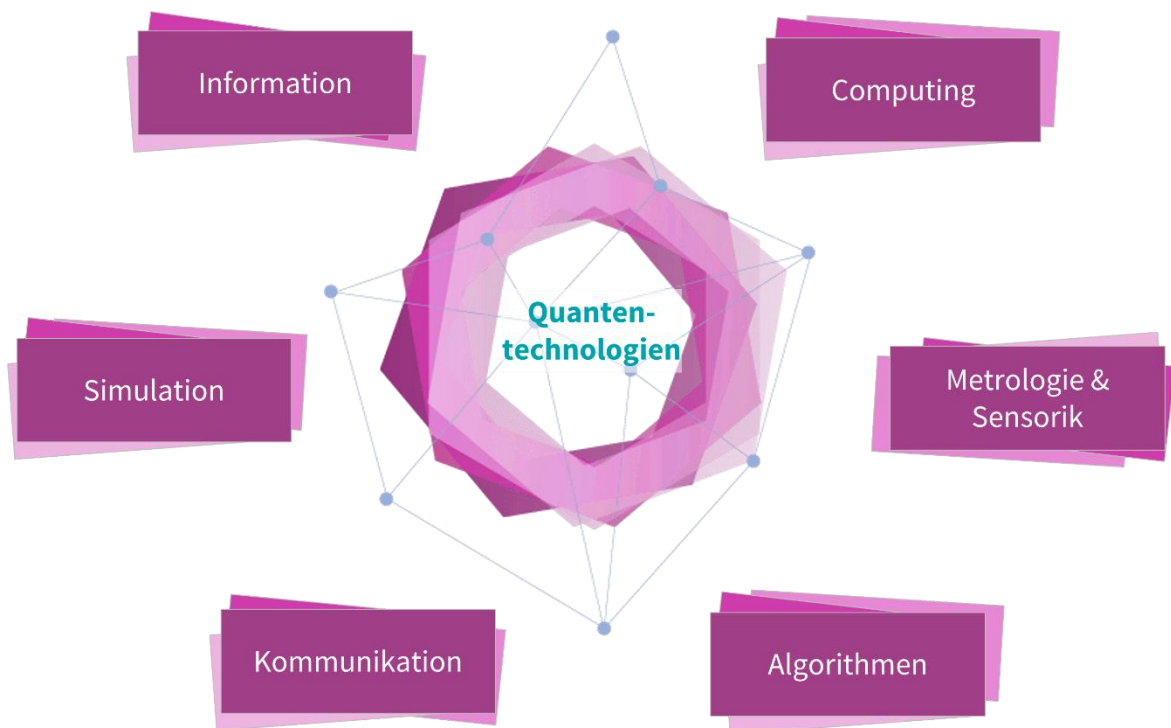


Abbildung 1: Übersicht verschiedener Quantentechnologien

Quantentechnologien stellen die Summe der Anwendungen dar, die sich aus den physikalischen Forschungsgebieten der Quantentheorie und insbesondere der Quantenmechanik entwickelt haben. Die Quantentheorie beschreibt Phänomene auf eine Weise, die sich oft nicht mit anderen Bereichen der Physik vereinbaren lässt. Dazu gehören beispielsweise die Quantenverschränkung, der Tunneleffekt, die Superposition oder die Existenz diskreter Energieniveaus. Folglich beschreibt die Quantentheorie aus physikalischer Sicht die Theorie von subatomaren Teilchen und ihren Zuständen in einem definierten System.

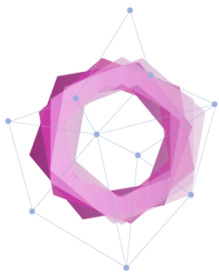
Die physikalische Grundlage zur Beantwortung fundamentaler Fragen der Quantentheorie bildet insbesondere die Eigenschaft der **Verschränkung** von Photonen, also Lichtteilchen. Diese Eigenschaft lässt sich in der Physik nur mithilfe der Quantentheorie erklären und bedeutet, dass die Zustände von Quantenteilchen auch über große Entfernungen miteinander verbunden sind. Die Definition der Quantenverschränkung ist der Kernpunkt der Disparität zwischen klassischen physikalischen und quantenphysikalischen Theorien, die sich aus physikalischer und mathematischer Sicht bisher nicht in Einklang bringen lassen, obgleich beide

Theorieansätze als bewiesen gelten. Die Quantenverschränkung beschreibt anschaulich die Messung und perfekte Korrelation physikalischer Eigenschaften wie Position, Impuls, Spin oder Polarisation von Teilchen. Diese Teilchen werden durch Wahrscheinlichkeitszustände und die zugehörigen Wellenfunktionen beschrieben, die zusammen mit den Energien mathematisch durch Schrödingers Gleichung dargestellt werden (Cornell University, 2010).

Durch experimentelle Anwendung der Verschränkungstheorie konnte die Teleportation von Quantenzuständen in unterschiedliche Quantensysteme erfolgen, was die physikalische Grundlage für Quantencomputing, Quanteninformation, Quantenkommunikation, Quantenkryptografie und viele weitere Technologien bildet.

Trotz der immensen technologischen Fortschritte und Forschungsentwicklungen sind Quantentechnologien noch sehr empfindlich hinsichtlich von Änderungen ihrer Umgebungsbedingungen. Beispielsweise sind stabile Druck- und Temperaturverhältnisse ohne Variationen von immenser Bedeutung für die erfolgreiche Nutzung von Quantentechnologien und können ein verschränktes System bei Abweichung unbrauchbar oder deutlich ineffizienter machen.

2.1 Quanteninformation

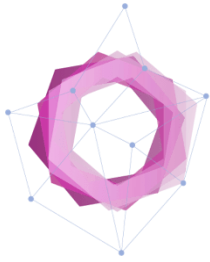


Information

Die Quanteninformation beschreibt die Verarbeitung von Informationen in korrelierten Quantensystemen, bei denen die Daten in den Quantenzuständen eines physikalischen Systems gespeichert werden. Als Informationseinheit dient dabei das sogenannte Quantenbit (Qubit), das im Gegensatz zu klassischen Bits steht, wie sie in binären Computersystemen Verwendung finden (Flink, 2024).

Je nach experimenteller Realisation und Bauart wird ein Qubit unterschiedlich geformt. Eine Möglichkeit, ein Qubit zu realisieren, besteht in der Auswertung und Manipulation von zwei Quantenzuständen eines Atoms oder Atomkerns oder aber in der Darstellung durch Polarisationsrichtungen eines einzelnen Photons, also eines Lichtteilchens. Entsprechend der Nutzung der Werte null oder eins in einem binären System würde man dem Qubit die logische Zuordnung zuweisen, beispielsweise durch den Energiezustand hoch oder niedrig des Atoms oder einen nach oben oder unten zeigenden Polarisationspfeil des Photons. Fundamental unterschiedlich ist jedoch beim Qubit die Überlagerungsmöglichkeit, sodass eine Wahrscheinlichkeit für einen Zustand null oder eins und seine Überlagerung instantan dargestellt werden kann. Man spricht von den Quantenzuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Eine gleichzeitige Darstellung von Zuständen steht im Gegensatz zur klassischen physikalischen Theorie. Das Superpositions- und Interferenzprinzip bildet jedoch neben der Beschreibung von Wellenfunktionen und Zustandswahrscheinlichkeiten durch Schrödingers Gleichung die maßgeblichen Grundlagen der Quantenmechanik (Nielsen & Chuang, 2010).

2.2 Quantencomputing



Computing

In den Medien wird häufig nicht zwischen den Begrifflichkeiten Quantencomputing und Quantentechnologien unterschieden, sie sind jedoch getrennt zu betrachten und Quantencomputing entspricht einer Teilmenge der Vielzahl von Quantentechnologien. Ähnlich wie bei klassischen Computern mit Bits gerechnet wird, wird ein Quantencomputer durch Qubits realisiert. Der Quantencomputer arbeitet als Input und Output mit der Anzahl

von Qubits im System, die durch Quantenzustände repräsentiert werden. Eine Berechnung auf einem Quantencomputer erfolgt durch den gezielten Eingriff an einzelnen oder mehreren Qubits. Es wird grundsätzlich zwischen unterschiedlichen Bauarten von Quantencomputern und Qubit-Zustandsrealisationen unterschieden, wie im Folgenden erläutert (Nielsen & Chuang, 2010).

Quantum Gate Arrays und Gated Quantum Computing arbeiten mit Sequenzen von Quanten-Gattern. Die effizientesten Quantencomputer werden durch Ionenfallen-Quantencomputer (siehe Abbildung 2) realisiert, sie sind jedoch technologisch am schwersten umsetzbar. Ionenfallen-Quantencomputer weisen eine fünffach geringere Fehlerrate bei Gatteranwendung und Kalkulationen auf (Gatterfehler) und ein zwanzigfach besseres Auslesen der Operationen im Vergleich zu supraleitenden Quantencomputern. Die Software in einem Ionenfallen-Quantencomputer wird mittels Laser-Pulsen und rotierend angelegter Wechselspannung in einem Vakuum, das Ionen in einem elektrischen Feld festhält, ermöglicht. Quantenzustände werden durch künstlich angeregte Fluoreszenz angeregt und können dadurch ausgelesen werden. Eine Kamera hält die Ionen fest und erlaubt das Auslesen und die optische Analyse (Stieler, 2025).

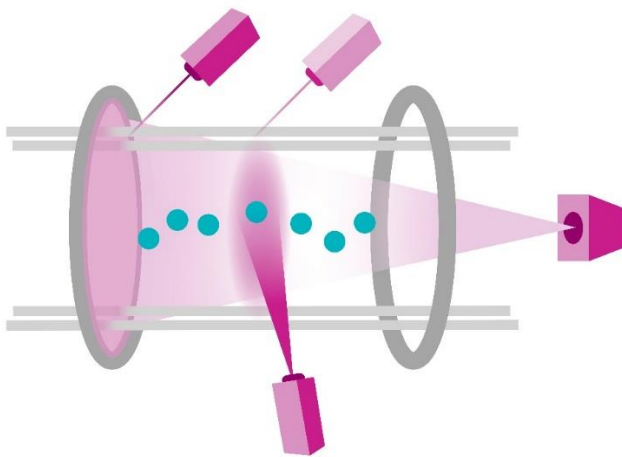


Abbildung 2: Quantencomputer – Ionenfalle

In Medien und Industrie werden Begriffe wie *Simuliertes Annealing*, *Quantum-inspiriertes Quantencomputing*, *Annealing* oder *Laser-Netzwerk-Quantencomputer* verwendet. Dabei ist es wichtig, zwischen echten Quantencomputer-Architekturen und ihrer Simulation bzw. Emulation zu unterscheiden.

Beim Simulierten Annealing und Quantum-inspirierten Quantencomputing werden digitale Schaltkreise genutzt, die ähnlich wie bestimmte Laser-Netzwerk-Quantencomputer arbeiten. Diese Systeme bilden bestimmte physikalische Prozesse nach, sogenannte Ising-Modelle, sind aber keine echten Quantencomputer.

Der Vorteil bei ihrer Verwendung liegt in der Möglichkeit der Operation und Manipulation bei Raumtemperatur und damit in klassischen Systemserverräumen von Unternehmen und Forschungsinstitutionen. Sie funktionieren, indem sie die Algorithmen auf einem binären Computer ausführen, die für die Berechnung auf einem Quantencomputer genutzt worden wären. Dabei werden die mathematischen Konzepte wie Hamiltonians, Energiefunktionen und polynomiale Zusammenhänge übernommen. Da diese Systeme als polynomiale Modelle definiert sind, können mit Simuliertem Annealing oder Quantum-Inspired Optimization nur kombinatorische Optimierungsprobleme gelöst werden (Zeng et al., 2024).

Tatsächliche, nicht simulierte Quanten-Annealer arbeiten mit Qubits, die sich in einem supraleitenden Ring befinden. Ihre Zustände werden durch den magnetischen Fluss in der Schleife bestimmt, der an dünnen Barrieren (den Josephson-Übergängen) wirkt (Stieler, 2025). Elektronenpaare tunneln diese Übergänge und ermöglichen messbare Operationen in Qubit-Schleifen. Quanten-Annealer bilden derzeit die Systeme mit der höchsten Zahl an Qubits, die abbildbar und nutzbar sind, sie weisen jedoch aufgrund ihrer Bauart deutliche Einschränkungen im Vergleich zu supraleitenden Quantencomputern und Ionenfallen-Quantencomputern auf. Das Forschungszentrum Jülich hat 2022 in Kooperation mit dem Technologieanbieter D-Wave einen mehr als 5.000 Qubits zählenden Quantencomputer fertiggestellt (Jülich, 2022). Die Qubit-Anzahl ist damit zehnmal so hoch wie die bei den gegenwärtig leistungsstärksten Quantencomputern aus Ionenfallen und Supraleitern. Nichtsdestotrotz ist der Vergleich der Qubit-Zahlen fehlgeleitet. Quanten-Annealer bieten aufgrund ihrer experimentellen Realisierbarkeit Grenzen in ihrer Verwendung und sie eignen sich nur für die Nutzung durch zugeschnittene Algorithmen, die Optimierungsprobleme lösen können. Probleme, die sich nicht in polynomieller Form abbilden lassen, können auf Quanten-Annealern nicht gelöst werden.

Supraleitende Quantencomputer bieten ähnlich wie Ionenfallen-Quantencomputer eine vielversprechende Aussicht für Universalquantencomputer. Ähnlich wie Quanten-Annealer arbeiten auch sie mit Josephson-Übergängen in Schwingkreisen. Die Qubits werden durch zwei Streifen aus supraleitendem Metall, die durch eine schmale Isolationsschicht getrennt werden, realisiert. Sowohl IBM als auch Google arbeiten intensiv mit supraleitenden Quantencomputern, während Ionenfallen mehrheitlich in der universitären Forschung zu Hause sind. Wie Ionenfallen haben supraleitende Quantencomputer ebenfalls die Einschränkung, dass sie nahe am absoluten Nullpunkt operieren müssen, in der Regel unter 15 Kelvin, was einer Temperatur von minus 258 Grad Celsius entspricht (Stieler, 2025).

Abgesehen von der Rauschanfälligkeit können heutige Quantencomputer bereits Probleme lösen, die klassische binäre Computersysteme technisch nicht mehr bewältigen können, ein Phänomen, das als Quantum Supremacy bezeichnet wird. Quantencomputer sind schon jetzt deutlich leistungsstärker in ihrer Rechenleistung für die Lösung spezieller Probleme als herkömmliche Computer. Das 2022 vorgestellte IBM Osprey System verfügt über 433 Qubits, 2023 folgen 1.121 Qubits. Dieses System aus dem Jahr 2022 kann bereits 2^{433} Zustände darstellen. Zum Vergleich: Unser Universum besteht aus etwa 2^{80} sichtbaren Atomen (Kolodziejczyk, 2023)

IBM bietet mit dem IBM Quantum Composer (siehe Abbildung 3) ein grafisches Quantenprogrammierungstool, mit dem per Drag & Drop Quantenschaltungen erstellt und auf echter Quantenhardware oder Simulatoren ausgeführt werden können (IBM, 2025a).



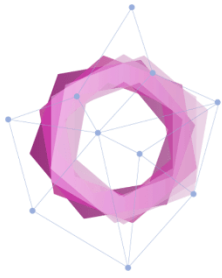
Abbildung 3: Oberfläche IBM Quantum Composer (IBM, 2025a)

Mit der Entwicklung solcher leistungsstarker Systeme kommen nicht nur Chancen auf die Wirtschaftswelt der Zukunft zu, sondern auch Risiken, deren Ausmaß sich heute in Teilen bereits prognostizieren und abschätzen lässt. Derzeit verwendete Verschlüsselungsverfahren im Cybersecurity-Umfeld werden beispielsweise zunehmend angreifbarer, da sie mithilfe von Quantencomputern und entsprechenden Algorithmen gebrochen werden können. Kritische Infrastrukturen gilt es bereits heute auf dieses Zeitalter vorzubereiten und zu schützen.

Zudem ist auch der Fachkräftemangel als Hindernis zu erwähnen, der für die erfolgreiche Integration von Quantencomputing-gestützten Geschäftsmodellen in Unternehmen zu berücksichtigen ist. Notwendiges Fachwissen und erforderliche Fähigkeiten müssen aufgebaut, geschult oder eingekauft werden, neue IT-Architekturen müssen installiert, neue Programmiersprachen gelernt und Algorithmen auf neue Art und Weise definiert werden. Dies wird im Abschnitt zu Quantenalgorithmen näher ausgeführt.

Experten von Google und IBM sowie aus der Forschung gehen übereinstimmend davon aus, dass Quantencomputer kommerziell weit verbreitet und in der standardmäßigen Verwendung und Nutzung in Unternehmen sein werden, sobald eine Anzahl von 1 Million Qubits in Quantencomputersystemen umsetzbar und durch Cloud-Anwendungen zugänglich sein werden. Dies wird bis zum Ende der Dekade als technologisch umsetzbar prognostiziert (Fortune, 2020; Quantum Insider, 2024).

2.3 Quantensimulation



Quantensimulation ermöglicht die Nachbildung komplexer Quantensysteme, die selbst für die leistungsfähigsten Supercomputer heute unlösbar wären und die sich weder virtuell vollständig nachbilden noch unter den derzeit möglichen Laborbedingungen umsetzen und untersuchen lassen. Ein Quantensimulator ist ein kontrollierbares und manipulierbares Quantensystem, das dazu verwendet wird, ein weiteres Quantensystem nachzuahmen. Aufgrund ihrer Komplexität

müssen Quantensimulatoren je Simulationszweck eigens entworfen werden. Richard Feynman postulierte bereits in den 1980er Jahren den analogen Quantencomputer zur Nachahmung von Quantensystemen, der nicht auf einer digitalen Codierung beruht (Morsch et al., 2025).

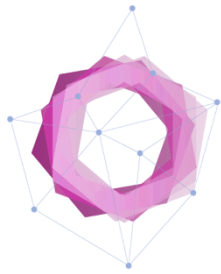
Quantensimulationen spielen unter anderem in der chemischen und pharmazeutischen Industrie eine Schlüsselrolle, da sie künftig die Entwicklung präziserer Medikamente ermöglichen und im Bereich des neuromorphen Computings dazu beitragen können, das menschliche Gehirn besser zu verstehen, wie in Theorien zur Magnetoenzephalographie gezeigt wurde (Nature, 2018). Langjährige experimentelle Trial-and-Error-Studien könnten durch präzisere Quantensimulationen und genauere Vorhersagen ersetzt werden, da diese dank des sogenannten Quantenparallelismus überlegen sind (Forbes, 2019).

Das computergestützte Simulieren von Proteinen in der Arzneimittelentwicklung wird voraussichtlich durch Quantensimulationen künftig möglich sein.

Der Quantenparallelismus begründet die höhere Präzision von Quantensimulationen auf Quantencomputern, da durch das Anwenden eines Gatters auf einen Zustand von n -Qubits in Summe 2^n Manipulationen durchgeführt werden können, wobei n der Anzahl an Qubits entspricht. Dies ermöglicht es, eine enorme Anzahl von Zuständen parallel zu berücksichtigen, was klassische Computersysteme in dieser Form nicht leisten können.

Ein realisiertes Beispiel für die Anwendung von Quantensimulationen ist die Erforschung des Magnetismus. Heidelberger Physiker haben es geschafft, mithilfe von ultrakalten Atomen das Verhalten von Elektronen in Festkörpern zu imitieren. Diese Grundlagenforschung bildet einen Meilenstein für eine Vielzahl von Anwendungsfällen und Ableitungen, insbesondere hinsichtlich der Erforschung und Entwicklung von neuartigen Materialien (pro-physik, 2015). Die unkonventionellen Methoden der Quantensimulationen bis in kleinste Details in den Forschungsbereichen des Magnetismus und der Elektrizität erlauben die Entwicklung neuer Materialien und können in Materialwissenschaften und Materialkunde vielversprechende Ausblicke auf die Gewinnung neuer Polymere und Materialien geben. Die wichtigsten Eigenschaften zur Nutzung der Quantensimulationen sind das Superpositions- und das Verschränkungsprinzip. Die Verschränkung wurde weiter oben im Zusammenhang mit den Eigenschaften, die bei der Quantenmechanik zum Tragen kommen, beschrieben.

2.4 Quantenmetrologie und Quantensensorik



Metrologie &
Sensorik

Quantenmetrologie und Quantensensorik nutzen Quanteneffekte und physikalische Größen wie Frequenz, Beschleunigung, Rotationen, Polarisierungen, elektrische und magnetische Felder sowie Temperaturen, die mit einer hohen relativen Genauigkeit messbar sind. Dadurch ist es möglich, wiederholt robuste Messungen und Kalibrierungen von atomaren Zuständen in einem Quantensystem abzubilden

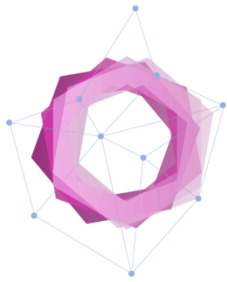
(BMFTR, 2026).

Sie finden Anwendung in Bereichen wie Quanteninterferometrie, Quantensensorik und Quantenlithografie. Zwar nimmt die Anzahl der Einsatzmöglichkeiten von Quantensensoren kontinuierlich zu, doch beschränken hohe Anforderungen an Robustheit und Kostensensitivität ihre derzeitige Marktreife auf teure und strategische Anwendungen, etwa in der Medizintechnik, Sicherheitstechnik, Navigation und satellitengestützten Erdbeobachtung. Insbesondere die Verwendung von Quantensensoren für die Navigation und zukünftige GPS-Systeme bietet allerdings enorme Zukunftspotenziale (Feng, 2019). Während herkömmliche GPS-Anwendungen zumeist eine Sensitivität und Genauigkeit von 16 Fuß (ca. 4,9 Meter) beispielsweise bei Smartphone- und Automobil-GPS haben, ermöglichen Quantensensoren deutlich genauere Messergebnisse (University of Arizona, 2020).

Für einige spezielle Anwendungen, die eine sehr präzise Positionierung erfordern, wie beispielsweise in der Landvermessung oder in der Luft- und Raumfahrt, werden auch heute schon DGPS- (Differential Global Positioning Systems) oder RTK-Techniken (Real-Time Kinematic) eingesetzt, um die Genauigkeit zu erhöhen. Mit diesen Techniken können Genauigkeiten von wenigen Zentimetern erreicht werden. Großbritannien fördert im Zusammenschluss verschiedener Forschungskonsortien die Entwicklung eines inertialen Quanten-Navigationssystems, um eine Absicherung mit alternativer Technologie für den Fall eines Ausfalls des globalen Satelliten-Navigationssystems aufzubauen (Quantum City, 2025).

Die Quanteninterferometrie als Unterkategorie der Sensorik beschreibt die Interferenz von verschränkten Photonen. Angewandt im Bereich der **Quantenlithografie** werden sehr hohe Auflösungen bei bildgebenden Messverfahren erreicht, die das optische Auflösungsvermögen im Vergleich zu herkömmlichen Sensoren verbessern. Sogenannte quanteninterferometrische Sensoren finden in der Medizintechnik und Diagnostik, im Bereich der quantenoptischen Kohärenztomografie sowie in der Satellitenforschung und in der Halbleiterfertigung Anwendung (Hölters & Wüppen, 2022; Fraunhofer IAF, 2025). Zukünftig kann durch die Nutzung von Quantensensoren der Einsatz von Röntgenstrahlung minimiert werden. Darüber hinaus kann auch beispielsweise die Überwachung der Erde mit geodätischen Daten aus dem niedrigen Erdorbit für die Evakuierung im Falle von Naturvorkommnissen wie Feuer oder Nebel effizienter betrieben werden (VDI, 2017; Feng, 2019).

2.5 Quantenkommunikation



Kommunikation

Quantenkommunikation beschreibt die Übertragung von Informationen auf Grundlage quantenmechanischer Prinzipien, insbesondere Superposition und Verschränkung. Sie verwendet typischerweise Photonen (Lichtteilchen) zur Übertragung von Qubits in einem Überlagerungszustand zwischen 0 und 1 entlang optischer Kabel (Glasfaser). Hacker, die den Teilchentransit beobachten, lassen den fragilen

Quantenzustand auf entweder 1 oder 0 zusammenfallen und zerstören ihn somit. Diese Störung kann vom Empfänger erkannt werden, wodurch ein Abhörversuch nachweisbar ist (NASA, 2024).

Die Quantenkryptografie, also die Verschlüsselung von Daten mittels Quantenphysik, ist dabei von besonderer Bedeutung. Erst bei Verwendung quantenkryptografischer Protokolle wie der Quanten-Schlüsselverteilung wird die Kommunikation abhörsicher. Die Grenzen liegen derzeit in der technischen Realisierbarkeit über große Distanzen, zum Beispiel 300 Kilometer über Glasfaser oder 4.000 Kilometer über Satellit. Weitere Anwendungen von Quantenkommunikation sind die Quantensynchronisation oder das Quanteninternet.

Da die direkte Übertragung von Quanteninformationen derzeit technisch stark limitiert ist, beschränkt sich die praktische Anwendung der Quantenkommunikation bisher meist auf die Quantenkryptografie. Dabei werden keine Nutzdaten, sondern nur geheime Schlüssel über einen Quantenzustand ausgetauscht. Die eigentlichen Nutzdaten werden anschließend klassisch, aber mit diesen quantensicher erzeugten Schlüsseln verschlüsselt übertragen. Wird während der Schlüsselverteilung ein Abhörversuch festgestellt, wird der Schlüssel verworfen und ein neuer Schlüssel verwendet.

Quantenschlüsselaustausch

Für eine sichere Übertragung von Daten über nicht vertrauenswürdige Netze werden die Daten verschlüsselt. Ein damit aufkommendes Problem ist nun, den kryptografischen Schlüssel zwischen den an der Kommunikation beteiligten Parteien auszutauschen. Denn auch der Angreifer kann die Daten lesen, sollte er in den Besitz des Schlüssels gelangen.

Der Quantenschlüsselaustausch (Quantum Key Distribution, QKD) macht sich die Eigenschaft der Quantenverschränkung zunutze. In zwei miteinander verbundenen, aber räumlich getrennten Teilkomponenten eines Quantenschlüsselaustausch-Systems wird ein kryptografischer Schlüssel auf Basis von Qubits erzeugt. Durch die Verschränkung wird auf beiden Teilkomponenten der gleiche Schlüssel erzeugt und ist somit beiden Kommunikationspartnern bekannt. Wenn ein Angreifer den Übertragungskanal abhört und die Quantenzustände misst, wird die Verschränkung gestört, was von den Kommunikationspartnern sofort bemerkt würde – ein Effekt, der durch das No-Cloning-Theorem erklärt wird.

Der technologische Fortschritt beim Quantenschlüsselaustausch wird bisher noch erheblich durch Kosteneffizienzen gebremst. Sie entstehen vor allem durch materialbedingte Teilchenstreuung in Kabeln und durch Absorption über längere Distanzen, die nur mithilfe sogenannter „Trusted Nodes“ (Quanten-Repeater) überwunden werden können. Gegenwärtig gibt es zwei kommerzielle Anwendungen und unterschiedliche Forschungsprojekte zum Thema QKD. Bei den kommerziellen Produkten, die das weniger sichere BB84-

Protokoll umsetzen, handelt es sich beispielsweise um ein VPN-Gateway der Firma Toshiba mit einer Reichweite zwischen den beiden oben erwähnten Teilkomponenten von 90 bzw. 150 Kilometern und einer Schlüsselaktualisierungsrate von 300 Kilobit pro Sekunde (Toshiba, 2025).

Die EU hat im Rahmen ihres Forschungsförderprogramms Horizon ein Projekt gefördert, mit dem ein quantensicheres Netzwerk über eine Distanz von 300 Kilometern Länge in Belgien, den Niederlanden und Frankreich aufgebaut werden konnte. Zudem veranstaltete das deutsche Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) im Rahmen der Bonner Konferenz im August 2021 gemeinsam mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (heute: Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt) eine quantensicher verschlüsselte Videokonferenz über das Projekt QuNET (BSI, 2025).

Quantenresistente Kryptografie (oder auch Post-Quanten-Kryptografie)

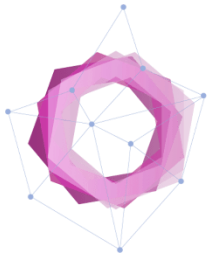
Quantentechnologie liefert bislang keine neuartigen Möglichkeiten der Verschlüsselung, jedoch Optionen, die etablierten asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren zu brechen.

Die Sicherheit aktueller asymmetrischer Verschlüsselungsverfahren beruht darauf, dass es mit klassischen Methoden mathematisch äußerst aufwendig ist, den Verschlüsselungsschlüssel zu bestimmen. Die Sicherheit des RSA-Algorithmus (Rivest-Shamir-Adleman) etwa basiert auf der sehr aufwendigen Primzahl-Faktorisierung des kryptografischen Schlüssels. Je größer eine zu zerlegende Zahl (der Schlüssel) ist, desto aufwendiger ist die Faktorisierung. Ein RSA 2048 Bit Schlüssel liegt in einem Lösungsraum von $2^{2048} \approx 3,2 \cdot 10^{616}$ Möglichkeiten. Selbst bei 1.000.000 Versuchen pro Sekunde im Rahmen eines Brute-Force-Angriffs würde ein Angreifer rund $5 \cdot 10^{602}$ Jahre benötigen. Es existieren bereits effektivere Angriffsmöglichkeiten auf den RSA-Algorithmus wie zum Beispiel der GNFS-Angriff (General Number Field Sieve), der allerdings auch schätzungsweise mehrere Jahrzehnte unter Verwendung der besten verfügbaren Supercomputer benötigen würde. Aktuell wird dieses kryptografische Verfahren bei entsprechender Schlüssellänge daher als sicher angesehen.

Dies wird sich mit der Quantentechnologie ändern. Ein Quantencomputer mit einer ausreichenden Anzahl an Qubits kann über die Quantenzustände und ihre Kombination/Superposition quasi viele Schlüsselmöglichkeiten zeitgleich testen und in sehr kurzer Zeit die Primzahl-Faktoren bestimmen, aus denen ein RSA-Schlüssel besteht.

Gegen symmetrische Algorithmen wie AES (Advanced Encryption Standard) haben Quantencomputer bislang ein geringeres Angriffspotenzial. Zwar führt der Grover-Algorithmus zu einer quantenspezifischen Schwächung der Verschlüsselung, da er den Schlüssel über statistische Verfahren im möglichen Zahlenraum in etwa der halben Zeit im Vergleich zu einem klassischen Brute-Force-Angriff finden kann. Dieser Effekt lässt sich jedoch durch eine Verlängerung der verwendeten Schlüssel kompensieren. Der mathematische Hintergrund besteht darin, dass symmetrische Verfahren eine Reihe von bit- und blockweisen logischen Operationen sowie Vertauschungen auf den zu verschlüsselnden Daten durchführen, jedoch nicht auf mathematischen Funktionen wie diskreten Logarithmen oder elliptischen Kurven basieren. Daher ist es nicht möglich, eine mathematische Umkehrfunktion zu formulieren, die von einem Quantencomputer in nur einem oder wenigen Schritten berechnet werden könnte.

2.6 Quantenalgorithmen



Algorithmen

Quantenalgorithmen dienen der Nutzung von Quantencomputern und ihrer Rechenoperationen. Prinzipiell ist es möglich, jede Art von Algorithmus, die auf einem klassischen Computer rechenbar ist, auch auf einem Quantencomputer rechnen zu lassen. Ein spezieller Quantenalgorithmus ist ein Algorithmus, bei dem wenigstens ein Rechenschritt einem Quantentheorem entspricht, wie beispielsweise der Anwendung von Superposition oder Verschränkung.

Quantenalgorithmen werden in der Regel in Form von Quantum Circuits beschrieben und definiert. Dabei entspricht der Quantum Circuit einem Modell für Quantenrechenoperationen, bei dem die Schritte zum Lösen von Problemen in Form von Quantengattern, die auf ein oder mehr Qubits angewandt werden, erfolgen. Ein Quantengatter beschreibt dabei eine Operation, die den Zustand einer oder mehrerer verschränkter Qubits verändert (Devoret, 2013).

Im Gegensatz zu klassischen Algorithmen für binäre Computersysteme ist ein Quantenalgorithmus stets reversibel, solange das Quantensystem noch nicht ausgelesen bzw. gemessen wurde. Probleme, die auf klassischen binären Systemen aufgrund ihrer quantenmechanischen Natur weder lösbar noch mathematisch vollständig beschreibbar sind, können durch diese Art von Algorithmen modelliert und gelöst werden. Sehr bekannte Beispiele sind der Grover-Algorithmus, bei dem es sich um einen Suchalgorithmus handelt, oder der Shor-Algorithmus, der zur Faktorisierung von Primzahlen herangezogen wird und insbesondere für den Bereich IT-Sicherheit und Kryptografie große Relevanz hat (Nielsen & Chuang, 2010).

2.7 Kurzzusammenfassung

Die Darstellung unterschiedlicher Arten von Quantentechnologien zeigt auf, dass die technologischen Entwicklungen, die wir gegenwärtig erleben, insbesondere im Zusammenspiel mit Digitalisierungsbestrebungen und der Vernetzung von Daten, einen Quantensprung an Fortschritt bringen werden, den es nun vorzubereiten gilt. Unternehmen und Regierungen müssen ein Bewusstsein für die Chancen und Risiken, die sich durch den Einzug von Quantentechnologien ergeben, entwickeln und sich bereits heute um ihre sensiblen Informationen kümmern.

3 Methodik

Quantentechnologien haben sich in den vergangenen Jahren rasant weiterentwickelt und dieser Trend setzt sich unvermindert fort, sodass die technologische Zukunft immer schneller greifbar wird. Daher gewinnt es insbesondere für die Energiewirtschaft an Bedeutung, die Einflussfaktoren, steuerbaren Parameter und Wechselwirkungen dieser Technologien mit bestehenden und zukünftigen Geschäftsmodellen frühzeitig zu analysieren. Ziel ist es, Chancen zu erkennen, Risiken abzuschätzen und die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Integration von Quantentechnologien in das Energiesystem zu schaffen.

Vor diesem Hintergrund untersucht das Gutachten die energiewirtschaftliche Relevanz von Quantentechnologien in unterschiedlichen Anwendungsfeldern.

Dabei stehen zentrale Fragen im Fokus:

- Welche Technologien unterstützen einzelne Anwendungsfälle?
- Welche Einsatzbereiche sind besonders erfolgversprechend?
- Welche Handlungsoptionen können die Etablierung beschleunigen?

Die Beantwortung dieser Fragestellungen erfordert die Betrachtung der Perspektiven verschiedener Marktrollen, da die Einschätzungen je nach Blickwinkel variieren können. Dieses Kapitel stellt hierzu die strukturierte Vorgehensweise zur Bewertung dieser Fragestellungen dar.

3.1 Methodik zur Erarbeitung von potenziellen Anwendungsfällen

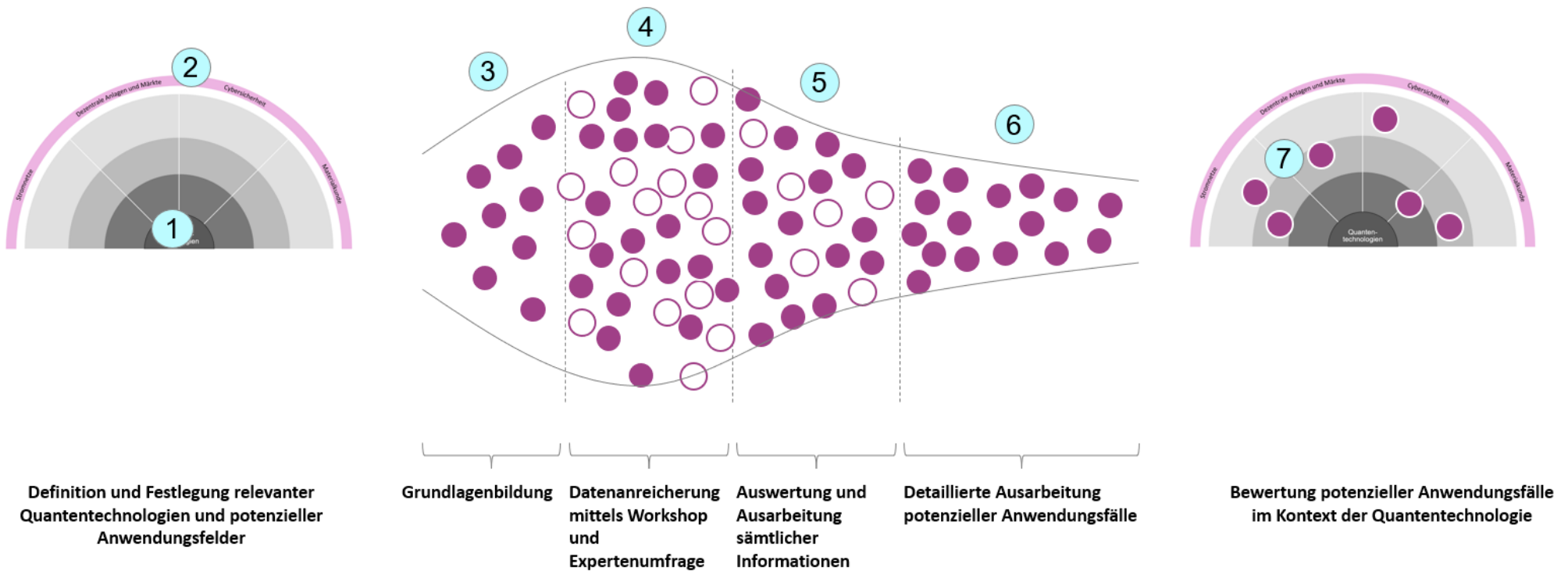
Zur Identifikation, Beschreibung und Bewertung potenzieller Anwendungsfälle wurde ein Vorgehen konzipiert, das auf eine große Nachvollziehbarkeit sowie die Beteiligung der Branche abzielt (siehe Abbildung 4).

Zunächst wurden relevante Quantentechnologien als Basistechnologien festgelegt (Computing, Simulation, Metrologie & Sensorik, Kryptografie & Kommunikation) und in einer Kurzbeschreibung stark vereinfacht beschrieben. Parallel wurden mögliche Anwendungsfelder definiert und festgelegt, in denen im späteren Verlauf die potenziellen Anwendungsfälle zu identifizieren waren. Im nächsten Schritt wurden Bewertungscluster und dahinterliegende Kriterien definiert, um die Relevanz von Quantentechnologien für die identifizierten Anwendungsfälle in „gering“, „mittel“ und „hoch“ einzuordnen.

Daraufhin wurde ein Workshop mit wesentlichen Partnern aus der Marktwirtschaft durchgeführt, um in mehreren Durchgängen Anwendungsfälle und -ansätze zu identifizieren sowie vordefinierte Anwendungsfälle und -ansätze auszuarbeiten und zu validieren.

Entsprechende Erkenntnisse und Anreicherungen aus dem Workshop wurden zusammengeführt und aufbereitet, um sie im Anschluss als Grundlage für eine Expertenbefragung zu verwenden. Dabei zielte die Expertenbefragung darauf ab, weitere Anwendungsfälle und -ansätze zu identifizieren sowie vordefinierte Anwendungsfälle und -ansätze mit weiteren Informationen anzureichern und zu validieren.

Zum Abschluss erfolgten die Auswertung und Ausarbeitung sämtlicher Informationen sowie die Strukturierung, Sortierung, Harmonisierung und inhaltliche Anreicherung der identifizierten Anwendungsfälle und -ansätze und ihre Einordnung in den Trendradar bzw. in das Bewertungscluster des Trendradars.



Legende / Beschreibung:

- ① Definition und Festlegung relevanter Quantentechnologien als Basistechnologien
 - ② Definition und Festlegung der potenziellen Anwendungsfelder
 - ③ Festlegung der Bewertungscluster und -kriterien sowie Einbringung von EY-vordefinierten Anwendungsfällen zur Grundlagenbildung
 - ④ Durchführung eines Workshops sowie einer Expertenurfrage zwecks Identifikation weiterer Anwendungsfälle und -ansätze
 - ⑤ Auswertung und Ausarbeitung sämtlicher Informationen sowie Strukturierung, Harmonisierung und Anreicherung der identifizierten Anwendungsfälle und -ansätze
 - ⑥ Detailliertere Ausarbeitung der Anwendungsfälle mit geringer, mittlerer und hoher Quanten- und Energierelevanz
 - ⑦ Bewertung und Einordnung potenzieller Anwendungsfälle in den Trendradar bzw. in das Bewertungscluster des Trendradars
- Anwendungsfall ohne wesentlichen Kontext zu Quantentechnologie
- Anwendungsfall mit Kontext zu Quantentechnologie

Abbildung 4: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens im Gutachten

3.2 Methodik zur Einordnung und Bewertung der Anwendungsfälle

Für eine verständlichere Einordnung der Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen wurde zwischen Anwendungsfeld und Anwendungsfall unterschieden.

Anwendungsfeld: Ist ein Bereich, auf den eine Theorie oder eine allgemeine technische Entwicklung für einen konkreten Gebrauch übertragen wird. Grundsätzlich ist ein Anwendungsfeld ein abgegrenztes Spektrum marktbezogener Aktivitäten im Rahmen der Digitalisierung und der Energiewende sowie im Kontext der Quantentechnologien.

Anwendungsfall: Ein Anwendungsfall ist eine strukturierte Beschreibung einer nach außen sichtbaren Interaktion eines Nutzers mit einem System, wobei der Nutzer eine Person, eine Organisation oder ein technologisches System sein kann. Ausgehend von einem Auslöser verfolgt der Akteur ein bestimmtes Ziel, das durch eine Abfolge von Aktionen im Zusammenhang mit dem System erreicht wird. Anwendungsfälle lassen sich auf verschiedenen Detaillierungsebenen darstellen – von allgemeinen Funktionen bis hin zu spezifischen IT-Prozessen – und erfassen alle Spezifikationen, die zur Erreichung des definierten Ziels notwendig sind.

Die identifizierten Anwendungsfälle wurden innerhalb ihres Anwendungsfelds in die Relevanzstufen „gering“, „mittel“ und „hoch“ eingeordnet (siehe Abbildung 5).

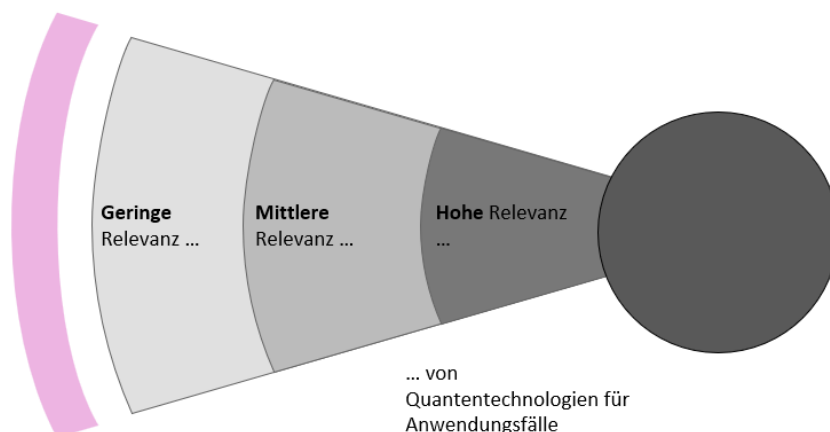
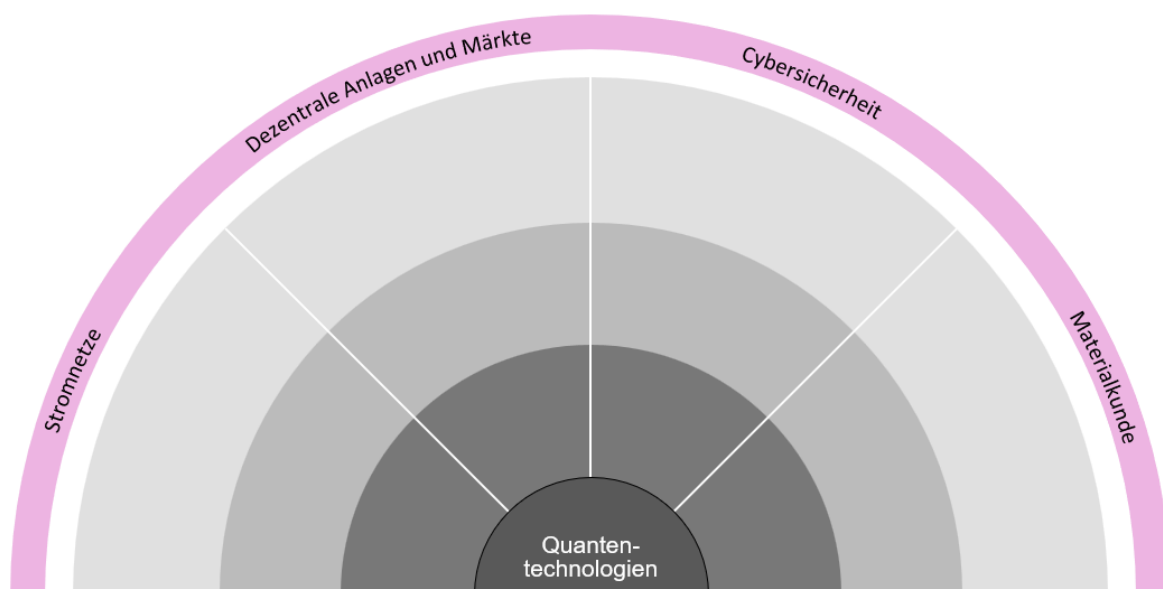


Abbildung 5: Bewertungscluster des Trendradars

- Im innersten Ring des Trendradars befinden sich Anwendungsfälle, bei denen die Relevanz der Quantentechnologien als hoch eingeschätzt wird, da der entsprechende Anwendungsfall durch ihren Einsatz überhaupt erst realisierbar wird.
- Im mittleren Ring des Trendradars befinden sich Anwendungsfälle, bei denen die Relevanz der Quantentechnologien als mittel eingeschätzt wird. Der Anwendungsfall ist bereits mit heutiger Technik realisierbar, kann allerdings durch den Einsatz von Quantentechnologien optimiert werden.
- Im äußersten Ring des Trendradars befinden sich Anwendungsfälle, bei denen die Relevanz der Quantentechnologien als gering eingeschätzt wird. Der Anwendungsfall ist bereits mit heutiger Technik realisierbar und kann durch den Einsatz von einzelnen Quantentechnologien nur noch unwesentlich verbessert werden.

4 Anwendungsfälle und Potenziale in der Energiewirtschaft

Um die Potenziale von Quantentechnologien auch in der Energiebranche zu nutzen, wird in diesem Kapitel aufgezeigt, in welchen Anwendungsfällen Quantentechnologien einen Mehrwert im zukünftigen Energiesystem bieten können und wie hoch dieser zu bewerten ist. Für die vier festgelegten Anwendungsfelder „Stromnetze“, „Dezentrale Anlagen und Märkte“, „Cybersicherheit“ und „Materialkunde“ wurden 13 Anwendungsfälle identifiziert. Sie werden im Folgenden nach dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Bewertungscluster dem in Abbildung 6 dargestellten Trendradar zugeordnet. Für die Bewertung der Relevanz wurden als wesentliche Quantentechnologien das Quantencomputing, die Quantensimulation, die Quantenkryptografie und -kommunikation sowie die Quantenmetrologie und -sensorik betrachtet.



Anwendungsfälle:

- (Re-)Dispatch 4.0
- Regionale Börse mit Echtzeit-Strompreisen
- Katalysatormaterialien (Entwicklung & Optimierung)
- Verbesserte Sensorik
- Verbesserte Materialentwicklung
- Digital Twin des europäischen Energiesystems
- Erhöhte Sicherheit bei Datenverschlüsselungen
- Betrieb und Steuerung des europäischen Energiesystems
- Sicherheit Smart-Meter-Infrastruktur
- Elektromobilität
- (Netz-) Simulation neuer regulatorischer Vorgaben
- Optimierung Stromerzeugung und Einspeisemanagement
- Optimierung Haber-Bosch-Verfahren

Legende:

- Abstand zum Mittelpunkt des Trendradars = Relevanz von Quantentechnologien für die Anwendungsfälle
- Hohe Relevanz
 - Moderate Relevanz
 - Geringe Relevanz

Abbildung 6: Trendradar

4.1 Anwendungsfeld „Stromnetze“

Das Anwendungsfeld „Stromnetze“ betrifft die Übertragungs- und Verteilnetzebene der Stromnetze. Auf dieser Infrastruktur wirken die Prozesse verschiedener Akteure, die durch Quantentechnologien unterstützt werden könnten. Hierzu zählen insbesondere die Netzbetreiber, die für die Planung und den Betrieb der Netze zuständig sind, aber auch Messstellenbetreiber und Bilanzkreisverantwortliche.

4.1.1 Digital Twin des gesamten europäischen Energiesystems

Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber nutzen Netzmodelle und vereinfachte Last- und Erzeugungsprofile beispielsweise für Simulationen zur Bewertung der Leistungsflüsse und des Netzzustands im Echtzeit-, Quasi-Echtzeit- und Look-Ahead-Modus. Die Systemsimulationen werden mit digitalen Zwillingen durchgeführt. Hierbei wird ein digitales Abbild, ein Zwilling der realen Wirklichkeit, simuliert und so werden Systemzustände nachgestellt, erprobt und evaluiert. Mit fortschreitender Technologie können diese virtuellen Systeme immer genauer und quasi in Echtzeit eingesetzt werden (IBM, 2025b).

Die Modellierung komplexer Energiesysteme mit dezentraler Erzeugung und stark schwankenden Lastprofilen vieler Anlagen ist jedoch nach wie vor herausfordernd, da der notwendige Detaillierungsgrad derzeit nur begrenzt erreichbar ist. Komplexe, vernetzte Systeme, zum Beispiel zwischen geografisch gebildeten Systemgrenzen, werden aktuell nicht ganzheitlich betrachtet und bedienen sich weitreichender Vereinfachungen, um sie berechenbar zu machen.

Vor allem auf europäischer Ebene könnte ein ganzheitliches Netzmodell erhebliche Optimierungspotenziale erschließen. Bereits heute existiert ein grundlegender Ansatz zur länderübergreifenden Koordination. Seit den 1950er Jahren arbeiten europäische Übertragungsnetzbetreiber (Transmission System Operators, TSOs) zusammen, da physikalische Stromflüsse keine nationalen Grenzen respektieren. Mit dem stetigen Ausbau der Netzinfrastruktur, zunehmend variablen Leistungsflüssen und den Anforderungen der Energiewende hat diese regionale Kooperation kontinuierlich an Bedeutung gewonnen und wird durch die fortschreitende Digitalisierung weiter intensiviert (ENTSO-E, 2025a).

Um diese Zusammenarbeit zu stärken, haben 36 TSOs gemeinsam mit ENTSO-E ein multilaterales Abkommen geschlossen, das zur Einführung der europäischen Regional Security Coordinators (RSC) bzw. der Regional Coordination Centres (RCC) führte. Diese Zentren unterstützen die Übertragungsnetzbetreiber mit fünf zentralen operativen Diensten: der Sicherheitsanalyse, der Kapazitätsberechnung, der Koordination geplanter Abschaltungen, der Versorgungslagebewertung sowie dem Aufbau und Betrieb eines gemeinsamen Netzmodells (Common Grid Model, CGM). Auf Basis dieser Dienste erstellen die Zentren Analysen und Handlungsempfehlungen für Zeiträume, die von einem Jahr im Voraus bis zu etwa einer Stunde vor Betrieb reichen. Die TSOs berücksichtigen diese Empfehlungen im Regelfall, können jedoch im Einzelfall abweichen, um die Systemsicherheit zu gewährleisten. Heute existieren mit Coreso, TSCNET, SCC, Nordic RSC, Baltic RSC und SEleNe CC sechs dieser regionalen Koordinationszentren (ENTSO-E, 2025a).

Die technische Grundlage dieser Zusammenarbeit bildet ein großes europäisches Netzmodell, das aus den nationalen Einzelmodellen (Individual Grid Models, IGMs) der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNBs) zum Common Grid Model zusammengeführt wird. Dabei kommen etablierte internationale Standards wie das IEC Common Information Model (CIM) sowie der ENTSO-E Common Grid Model Exchange Standard (CGMES) zum Einsatz. Trotz dieser Fortschritte stößt die Modellierung des Energiesystems in seiner vollen geografischen

und strukturellen Dimension jedoch an die Grenzen der heutigen Rechen- und Modellierungsverfahren (ENTSO-E, 2025b).

Vor diesem Hintergrund rückt der Einsatz von Quantentechnologien zunehmend in den Fokus. Quantencomputer versprechen, die Modellierung und Simulation des europäischen Energiesystems als umfassenden digitalen Zwilling erheblich zu verbessern. Durch ihre Fähigkeit, extrem komplexe Zustandsräume parallel zu verarbeiten, eignen sie sich besonders für Aufgaben mit hoher Stochastik und großen Freiheitsgraden, wie etwa die Verarbeitung von Echtzeit-Daten zu Erzeugung, Verbrauch und Netzzustand oder die Integration umfangreicher meteorologischer, historischer und marktbezogener Datensätze. Insbesondere in einem dezentral organisierten Energiesystem mit volatilen Quellen wie Wind und Photovoltaik entsteht ein hoher Bedarf an optimierten Energiemanagementsystemen. Die Stärken des Quantencomputings können hier zu einer signifikanten Reduktion von Rechenzeiten und einer genaueren Modellierung beitragen.

Bewertung des Anwendungsfalls „Digital Twin des gesamten europäischen Energiesystems“

Beim Anwendungsfall „Digital Twin des gesamten europäischen Energiesystems“ wird die Relevanz von Quantentechnologien als **hoch** bewertet, da die Abbildung der Realität des gesamten europäischen Energiesystems mit sämtlichen Teilnehmern und Komponenten eine Komplexität beinhaltet, die mit herkömmlichen Algorithmen und Computing-Technologien heute nicht dargestellt werden kann. Quantencomputing liefert hierbei die notwendigen Kapazitäten und die Skalierbarkeit für die anzuwendende Dimension des Problems; Quantensimulation ermöglicht die Modellierung der komplexen physikalisch-technischen Sachverhalte in verbesserter Auflösung.

Relevante Quantentechnologien



Computing

- Bereitstellung erhöhter Rechenkapazitäten
- Befähigung zur Skalierbarkeit des Energiesystems

Simulation

- Befähigung, den Ist-Zustand sowie beliebig viele zukünftige, mögliche Zustände des Energiesystems gleichzeitig abzubilden

4.1.2 Betrieb und Steuerung des gesamten europäischen Energiesystems

In Ergänzung zum Anwendungsfall in Kapitel 4.1.1, der die Simulation des europäischen Energiesystems ermöglicht, stellt in nächster Konsequenz der Betrieb und die Steuerung der realen Stromnetze im europäischen Gesamtsystem einen weiteren möglichen Anwendungsfall für Quantentechnologien dar. Betriebbarkeit und Steuerbarkeit des heutigen Systems beruhen auf den gleichen Vereinfachungen und könnten unter Zuhilfenahme der Simulation des Digital Twin ebenso verbessert werden. So könnten Zustände und

Regelkreise genauer und in Echtzeit erfasst und Maßnahmen großflächig aufeinander abgestimmt durchgeführt werden. Das Ergebnis wären die Identifikation zielgenauer Eingriffe im dafür am besten geeigneten Netzsegment oder eine optimale Kombination aus mehreren Maßnahmen.

Bewertung des Anwendungsfalls „Betrieb und Steuerung des gesamten europäischen Energiesystems“

Der Anwendungsfall „Betrieb und Steuerung des gesamten europäischen Energiesystems“ stellt die Ergänzung des in Kapitel 4.1.1 genannten Anwendungsfalls dar, da er die Steuerungs- und Wirkebene bereitstellt. Er schafft die Möglichkeit, die Netzstabilität und -integrität nicht nur wie bisher auf der Ebene einzelner verbundener Regelzonen, sondern gesamtheitlich für die Dimension des europäischen Energiesystems sicherzustellen. Bei diesem Anwendungsfall wird daher die Relevanz von Quantentechnologien als **hoch** bewertet, da er nur durch den Einsatz von Quantentechnologien in der gedachten Dimension möglich wird.

Relevante Quantentechnologien



Computing

- Bereitstellung erhöhter Rechenkapazitäten
- Befähigung zur Skalierbarkeit des Energiesystems

4.1.3 (Re-)Dispatch 4.0

Ein weiterer aus der Branche eingebrachter Anwendungsfall ist die Durchführung von Redispatch-Maßnahmen bis in die kleinste Erzeugungseinheit und auf Basis einer hochgranularen Simulation. Hierbei handelt es sich um eine Spezifizierung der beiden vorab vorgestellten Anwendungsfälle, die auch auf eine genauere Modelldarstellung sowie die Einbindung stark schwankender Prognosewerte bezogen auf das Markt-, Einspeise- und Lastverhalten abzielt. Technisch gesehen lässt die Skalierungsfähigkeit von Quantencomputern solche Simulationen und beschleunigten Berechnungen zu. Daher kann die Erweiterung des klassischen Redispatch durch Teilnahme weiterer, insbesondere auch kleinerer Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten ermöglicht werden.

Bewertung des Anwendungsfalls „(Re-)Dispatch 4.0“

Beim Anwendungsfall „(Re-)Dispatch 4.0“ wird die Relevanz von Quantentechnologien allerdings nur als **mittel** bewertet. Die Integration von kleineren Erzeugungseinheiten, inklusive Stromspeichern, kann mittels Quantensimulation modelliert und mittels Quantenkommunikation bis in die Wirkebene transportiert werden. Der Einsatz von Quantentechnologien für diesen Bereich erscheint jedoch nicht als zwingend notwendig, da eine Verbesserung der Granularität des Systems auch mit konventionellen Technologien erreicht werden kann. Inwieweit konventionelle oder Quantentechnologien Einsatz finden werden, wird von kommerziellen Aspekten und besonderen, lokalen Parametern des Energiesystems abhängen.

Relevante Quantentechnologien



Computing

- Bereitstellung erhöhter Rechenkapazitäten
- Befähigung zur Skalierbarkeit des Energiesystems

Simulation

- Befähigung, den Ist-Zustand sowie beliebig viele zukünftige, mögliche Zustände des Energiesystems gleichzeitig abzubilden

4.1.4 (Netz-)Simulation neuer regulatorischer Vorgaben

Neben den Einsatzmöglichkeiten bei den rein technischen Komponenten können Quantentechnologien aber auch bei der Optimierung des geltenden regulatorischen Rahmens innerhalb des Energiesektors einen Mehrwert bieten. Gesetz- und Verordnungsgeber überwachen Marktpartner bzw. setzen Leitplanken für den Nutzungsrahmen, in dem sich die Marktpartner im Energiesystem diskriminierungsfrei bewegen können. In diesem Anwendungsfeld sind auch Verbände, Normungsgremien und politische Einflussnehmer verortet. Mit Quantensimulationen können nicht nur große Systeme mit vielen Anlagenkomponenten und Betriebsmitteln granularer dargestellt werden, sondern auch Prozesse und Dynamiken aus beispielsweise dem Marktdesign oder anderen Sektoren.

Zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen kann dies aufseiten der Regulatorik genutzt werden, um Auswirkungen von neuen regulatorischen Vorgaben auf das bestehende Energiesystem abzuschätzen sowie Lösungs- und Umsetzungsszenarien zu identifizieren und miteinander zu vergleichen.

Bewertung des Anwendungsfalls „(Netz-)Simulation neuer regulatorischer Vorgaben“

Beim Anwendungsfall „(Netz-)Simulation neuer regulatorischer Vorgaben“ wird die Relevanz von Quantentechnologien als **hoch** bewertet. Unter der Annahme, dass die Komplexität des Energiesystems weiter zunimmt, müssen auch Marktteilnehmer aus Regulierung, Gesetzgebung und Politik zunehmend Sicherheit gewinnen, dass gestellte Anforderungen an das Energiesystem auf physikalisch-technischer Ebene umsetzbar sind. Der heutige Prozess der Kommentierung mit Marktteilnehmern aus Wirtschaft und Normung ist zeitaufwendig, schwerfällig und im Zweifel daher nicht dafür geeignet, Anpassungen schnell umzusetzen. Der Einsatz von Quantensimulation auch für die genannten Stakeholder erscheint daher sinnvoll, um Möglichkeiten zu schaffen, flexibler sowie mit geringerem Risiko von negativen Wechselwirkungen und damit Folgekosten auf Anforderungen reagieren zu können.

Relevante Quantentechnologien



Computing

- Bereitstellung erhöhter Rechenkapazitäten

Simulation

- Befähigung, den Ist-Zustand sowie beliebig viele zukünftige, mögliche Zustände des Energiesystems gleichzeitig abzubilden

4.1.5 Zusammenfassung „Stromnetze“

Das Anwendungsfeld „Stromnetze“ umfasst die Stromnetzinfrastruktur und bietet verschiedene Anwendungsfälle für Quantentechnologien. Für den Anwendungsfall „Digital Twin des gesamten europäischen Energiesystems“ wird die Relevanz als hoch bewertet, da herkömmliche Technologien die komplexe Realität nicht ausreichend abbilden können. Ebenso wird die Relevanz bei „Betrieb und Steuerung des gesamten europäischen Energiesystems“ als hoch betrachtet, da dieser Anwendungsfall die Netzstabilität auf gesamteuropäischer Ebene sicherstellen kann. Die Relevanz für den Anwendungsfall „(Re-)Dispatch 4.0“ wird als mittel eingestuft, da eine verbesserte Systemgranularität auch mit konventionellen Technologien erreichbar ist. Bei der „Simulation neuer regulatorischer Vorgaben“ wird die Relevanz als hoch betrachtet, da Quantensimulationen Marktteilnehmern ermöglichen, die Auswirkungen neuer Vorgaben effizienter abzuschätzen und flexibler darauf zu reagieren.

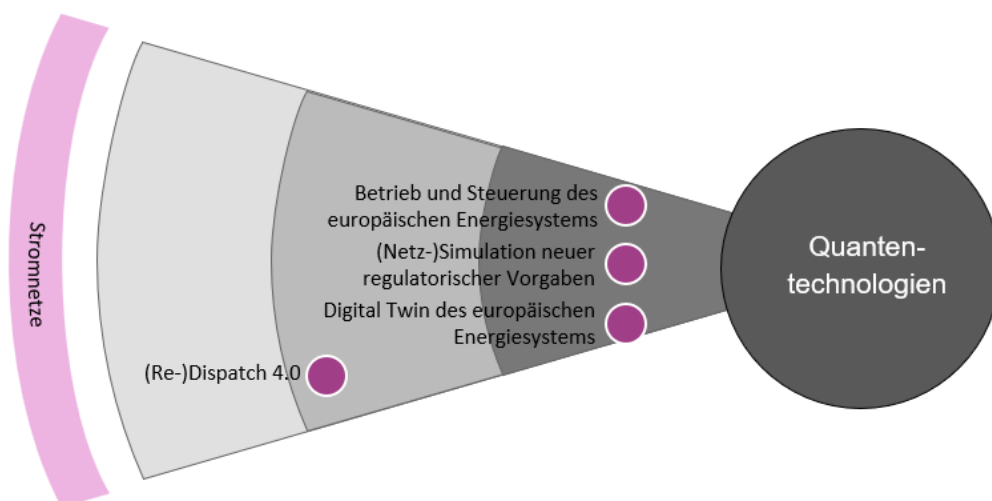


Abbildung 7: Anwendungsfälle „Stromnetze“

4.2 Anwendungsfeld „Dezentrale Anlagen und Märkte“

Das Anwendungsfeld „Dezentrale Anlagen und Märkte“ betrachtet vorwiegend marktdienliche Prozesse und Handelsaktivitäten sowohl von dezentralen Lasten als auch von dezentraler Erzeugung und Speicherung. Auch das Thema dezentrale bzw. regionale Märkte wird als neu zu etablierender Mechanismus in diesem Kapitel aufgezeigt. Wesentliche Akteure in diesem Anwendungsfeld sind neben den klassischen Energieversorgungsunternehmen bzw. Lieferanten auch Aggregatoren und weitere Betreiber von erneuerbaren Energien.

4.2.1 Optimierung der Stromerzeugung und des Einspeisemanagements

Wie bereits beim in Kapitel 4.1.2 vorgestellten Anwendungsfall „Betrieb und Steuerung des gesamten europäischen Energiesystems“ beschrieben, können Modelle durch Quantencomputing und Quantensimulation in einer vielfachen Detailtiefe im Vergleich zu Modellen mit klassischen Computern abgebildet werden. Auch die Rechenzeit von darauf aufbauenden Berechnungen wie Prognosen oder Prozessoptimierungen wird durch die neuen Technologien stark verkürzt. Diese Modelle könnten nicht nur netzdienlich, sondern auch marktdienlich für die Optimierung von dezentralen Erzeugungsanlagen eingesetzt werden. Für dezentrale Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen könnten verbesserte Wettermodelle und -prognosen die Erzeugung genauer bestimmen. Der Einsatz von Flexibilitäten und Regenergie kann gezielter modelliert und gesteuert werden, um die Wirtschaftlichkeit von Einspeiseanlagen zu erhöhen. Idealerweise können Abschaltungen durch die optimierte Nutzung von Flexibilitäten, inklusive Stromspeichern, nicht nur reduziert, sondern sogar gänzlich vermieden werden.

Bewertung des Anwendungsfalls „Optimierung der Stromerzeugung und des Einspeisemanagements“

Aktuelle konventionelle Methoden und Technologien können weiterhin skaliert werden, um im lokalen Bereich die Stromerzeugung sowie das Einspeisemanagement zu optimieren. Die übergreifende Optimierung erscheint nur sinnvoll in Kombination mit neuen Gesamtmodellen des Energiesystems, wie in Kapitel 4.1.1 aufgezeigt. Die Relevanz von Quantentechnologien wird daher beim konkreten Anwendungsfall „Optimierung der Stromerzeugung und des Einspeisemanagements“ als **gering** bewertet.

Relevante Quantentechnologien



Computing

- Bereitstellung erhöhter Rechenkapazitäten
- Befähigung zur Skalierbarkeit des Energiesystems

Simulation

- Befähigung, den Ist-Zustand sowie beliebig viele zukünftige, mögliche Zustände des Energiesystems gleichzeitig abzubilden

4.2.2 Elektromobilität

Im Anwendungsfall „Elektromobilität“ wurden sowohl der netzdienliche Einsatz von Elektroautos durch Vehicle-to-Grid (V2G) als auch das optimierte Lademanagement betrachtet.

V2G betrifft dabei die Nutzung des privaten Elektroautos als Speichermedium für das öffentliche Stromnetz, indem elektrische Energie in der Batterie des Elektroautos gespeichert und wieder zurückgespeist werden kann. Analog zum Anwendungsfall „Optimierung der Stromerzeugung und des Einspeisemanagements“ bietet die Quantentechnologie hier die notwendige Skalierbarkeit bei Simulationen und bei der Steuerung in der Wirkebene.

Das optimierte Lademanagement von Elektroautos durch Einbeziehung von Ist-Werten und Prognosen aus Simulationen und Wetterinformationen ermöglicht die verbesserte Integration der Elektromobilität in das Netz (bei optimiertem Netzausbau) unter Beibehaltung weiterer Zielfunktionen (optimale Ladung des individuellen Fahrzeugs passend zum Fahrprofil – „Traveling Salesman“). Ermöglicht wird dies durch die Skalierung der Leistungsfähigkeit des Quantencomputings.

Bewertung des Anwendungsfalls „Elektromobilität“

Analog zum in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Anwendungsfall können aktuelle konventionelle Methoden und Technologien weiter skaliert werden, um im lokalen Bereich die Integration von V2G zu optimieren. Die übergreifende Optimierung erscheint nur sinnvoll in Kombination mit neuen Gesamtmodellen des Energiesystems, wie in Kapitel 4.1.1 aufgezeigt. Für „Vehicle-to-Grid (V2G)“ wird die Relevanz von Quantentechnologien daher als **gering** eingeschätzt.

Die Optimierung weiterer Ziele (optimale Ladung des individuellen Fahrzeugs passend zum Fahrprofil) erscheint mit zukünftig verbesserten, größeren Kapazitäten der Fahrbatterie nicht ein Ziel von hoher Priorität zu sein. Der Einsatz von Quantentechnologien wird daher bei der konkreten Anwendung „Optimiertes Lademanagement“ in seiner Relevanz als **gering** bewertet.

Relevante Quantentechnologien



Computing

- Bereitstellung erhöhter Rechenkapazitäten
- Befähigung zur Skalierbarkeit des Energiesystems

Simulation

- Befähigung, den Ist-Zustand sowie beliebig viele zukünftige, mögliche Zustände des Energiesystems gleichzeitig abzubilden

4.2.3 Regionale Börse mit Echtzeit-Strompreisen

Die zukünftig weiter steigende Anzahl an dezentralen Anlagen im Energiesystem bildet den Ausgangspunkt dieses Anwendungsfalls, da sie eine zunehmende Flexibilisierung des Stromsystems erforderlich macht. Traditionell wurde diese Flexibilität nahezu ausschließlich über die Steuerung der Versorgungsseite in großen Kraftwerken gewährleistet. Mit dem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien sowie dezentraler Großverbraucher wie Elektromobilität und Wärmepumpen steigt jedoch der Bedarf an zusätzlicher Flexibilität, um die Zuverlässigkeit des Systems sicherzustellen.

Ein vielversprechender Ansatz zur Bereitstellung dieser Flexibilität liegt in der Einführung regionaler Märkte für Flexibilitätsprodukte. Solche Konzepte wurden bereits in verschiedenen Forschungsprojekten, beispielsweise im Rahmen von eEnergy und SINTEQ, entwickelt und erprobt. Auch die Studie „Das dezentrale Energiesystem im Jahr 2030“ der dena zeigt das Potenzial solcher dezentralen Energiemärkte auf (dena, 2023). Zentrale Voraussetzung für die Umsetzung ist die Erstellung eines Fahrplans zur Einrichtung, zum Betrieb und zur Optimierung von Flexibilitätsdiensten. Dieser Fahrplan sollte sowohl den Netzbedarf berücksichtigen als auch ein Portfolio an Flexibilitätsprodukten abbilden.

Die Nutzung der sich daraus ergebenden Optimierungspotenziale bietet mehrere Vorteile. Sie ermöglicht eine ausgeglichene Energiebilanz im jeweiligen Netzsegment (Netto-Null) und erfolgt dezentral, diskriminierungsfrei und verbraucherorientiert, indem Flexibilitätsprodukte bevorzugt eingesetzt werden, bevor es zu Eingriffen des Verteilnetzbetreibers kommt. Zudem kann die Integration regulatorischer Aspekte, wie etwa die Zustimmung zu granular abgestuften Netzentgelten für Netzkunden, erleichtert werden.

Die Skalierbarkeit von Quantencomputern macht die Simulation und Abbildung solcher komplexen Systeme möglich. Dadurch kann die Bereitstellung von Echtzeit-Strompreisen für alle Verbraucher und Erzeuger anhand aktueller hochvolatiler Angebots- und Nachfragesituationen sowie der Inkludierung von „Handel mit Flexibilitäten“ direkt in einer gemeinsamen Strombörse (Gesamtsystem) erfolgen. Auf die Umsetzung von vielen kleinen, regionalen Märkten, die dann in ein System aus verbundenen, kleineren Einheiten überführt werden, kann dadurch verzichtet werden.

Zudem kann durch Quantenkryptografie eine sichere Übertragung der Daten zwischen der Vielzahl an Akteuren sichergestellt werden. Vor allem bei Steuerungsvorgängen ist dies besonders wichtig, da hier besonders einfach durch Angriffe kritische Netzzustände herbeigeführt werden können.

Bewertung des Anwendungsfalls „Regionale Börse mit Echtzeit-Strompreisen“

Durch regionale Märkte wird die Integration dezentraler Anlagen in das Energiesystem erleichtert, da neue Einnahmequellen entstehen und die Anlagen systemdienlicher betrieben werden können. Die Quantentechnologie wird zudem eine wichtige Rolle spielen, wenn es darum geht, die richtige Lösungsarchitektur für den skalierten Anschluss von Erneuerbare-Energien-Anlagen in Stromnetzen zu entwickeln.

Für die Umsetzung müssen mehrere Datenpunkte von Flexibilitätsanbietern zu verschiedenen Messwerten wie Wirkleistung, Blindleistung, Spannung, Verfügbarkeit und Preise in hoher Auflösung ausgetauscht und verarbeitet werden. Zudem müssen Funktionen wie Beschaffungs-, Ausschreibungs-, Dispatch- und Abrechnungsprozesse in großem Umfang umgesetzt werden. Quantencomputer werden hierzu in der Lage sein.

Die Relevanz von Quantentechnologien wird beim Anwendungsfall „Regionale Börse mit Echtzeit-Strompreisen“ als **hoch** bewertet, obwohl dezentrale Märkte auch ohne Quantentechnologien umgesetzt werden können. Allerdings ist das Potenzial, diese Prozesse durch Quantencomputing und Quantensimulation zu optimieren, besonders hoch.

Relevante Quantentechnologien



Computing

- Bereitstellung erhöhter Rechenkapazitäten
- Befähigung zur Skalierbarkeit des Energiesystems

Simulation

- Befähigung, den Ist-Zustand sowie beliebig viele zukünftige, mögliche Zustände des Energiesystems gleichzeitig abzubilden

Kryptografie

- Bereitstellung eines vertraulichen Kommunikationsmediums/-kanals

4.2.4 Zusammenfassung „Dezentrale Anlagen und Märkte“

Das Anwendungsfeld „Dezentrale Anlagen und Märkte“ fokussiert sich auf marktdienliche Prozesse von dezentralen Lasten sowie dezentraler Erzeugung und Speicherung. Die Relevanz der Quantentechnologien für den Anwendungsfall „Optimierung der Stromerzeugung und des Einspeisemanagements“ wird als gering bewertet, da aktuelle Methoden lokal optimiert werden können. Im Anwendungsfall „Elektromobilität“ zeigt sich eine geringe Relevanz für die Integration von Vehicle-to-Grid (V2G) und das optimierte Lademanagement. Die Einführung dezentraler Märkte im Anwendungsfall „Regionale Börse mit Echtzeit-Strompreisen“ ist auch ohne Quantentechnologien möglich, dennoch wird ihre Relevanz in diesem Anwendungsfall als hoch bewertet, da Quantencomputing und Quantensimulationen das Potenzial zur Optimierung der Prozesse bieten.

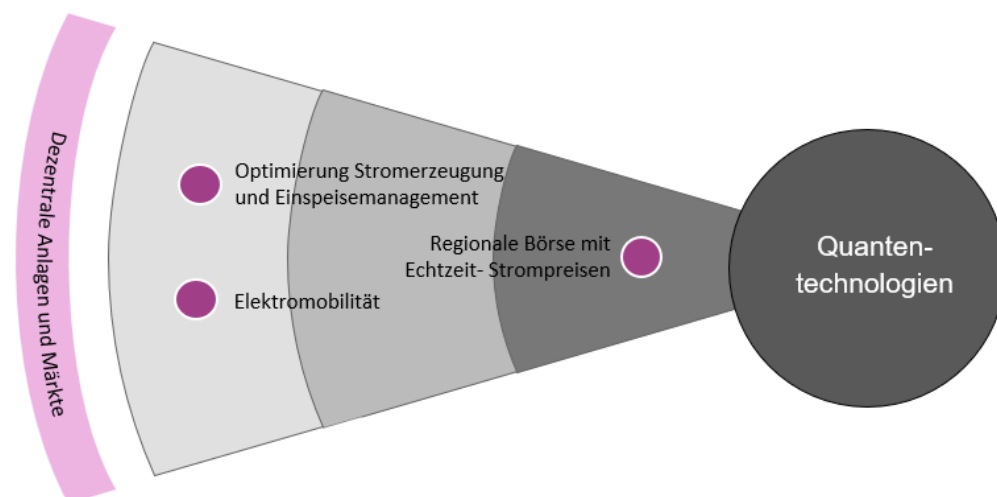


Abbildung 8: Anwendungsfälle „Dezentrale Anlagen und Märkte“

4.3 Anwendungsfeld „Cybersicherheit“

Das Anwendungsfeld „Cybersicherheit“ ist ein Querschnittsthema, das alle Akteure im Energiesektor betrifft. Von besonderer Bedeutung ist es aber für Betreiber Kritischer Infrastruktur (KRITIS). Im Energiesektor betrifft dies vor allem Netzbetreiber und Betreiber größerer Erzeugungsanlagen.

Aktuelle Technologien im Umfeld von KRITIS sind, selbst wenn sie bereits dem Stand der Technik entsprechen oder darüber hinaus umgesetzt werden, perspektivisch durch Angriffsvektoren des Quantencomputings kompromittierbar. Der Begriff „harvest now, decrypt later“ verdeutlicht, warum bestehende kryptografische Verfahren heute nicht als dauerhaft ausreichend angesehen werden können. Gelingt es Angreifern, bereits jetzt Zugang zu vertraulich eingestuft Datensätzen zu erlangen und sie zu kopieren („harvest now“), kann eine spätere Entschlüsselung dieser Kopien mithilfe eines leistungsfähigen Quantencomputers deutlich vereinfacht werden („decrypt later“).

4.3.1 Erhöhte Sicherheit bei Datenverschlüsselungen

Der Bereich „Cybersicherheit“ betrachtet im Energiesystem zum einen den Schutz der physischen Infrastruktur vor Angriffen, aber auch den Schutz sensibler Daten. Eigenschaften und Fähigkeiten des Energiesystems hinsichtlich Verbindlichkeit, Vertraulichkeit, Integrität und Authentizität sind unter dem Eindruck potenziell neuer Möglichkeiten der Quantentechnologien auf ihre Wirksamkeit hin zu überprüfen. Aktuell wird das System unter anderem mit klassischen asymmetrischen Algorithmen wie RSA abgesichert.

Quantenkommunikation ermöglicht eine besonders sichere Übertragung von Schlüsselinformationen, da jeder Abhörversuch die Quantenzustände kollabieren lässt und dadurch entdeckt werden kann.

Bewertung des Anwendungsfalls „Erhöhte Sicherheit bei Datenverschlüsselungen“

Beim Anwendungsfall „Erhöhte Sicherheit bei Datenverschlüsselungen“ wird die Verwendung von Quantentechnologien in ihrer Relevanz als **hoch** bewertet. Mit der Fähigkeit von Quantencomputing, aktuelle Verschlüsselungsverfahren als Grundlage für eine sichere Kommunikation und einen sicheren Datenaustausch zu kompromittieren, stellt diese Quantentechnologie in naher Zukunft einen Angriffsvektor dar, leistet aber durch die Nutzung der Technologien auch zeitgleich einen möglichen Lösungsansatz. Eine Alternative ist die in Kapitel 2.5 beschriebene Post-Quanten-Verschlüsselung. Das BSI empfiehlt aktuell die Anwendung hybrider Lösungen, also einer Kombination von Quantentechnologien und klassischen Algorithmen (BSI, 2020).

Relevante Quantentechnologien



Kryptografie & Kommunikation

- Bereitstellung eines vertraulichen Kommunikationsmediums/-kanals
- „Negative Eigenschaft“: Fähigkeit, aktuelle kryptografische Verfahren zu kompromittieren

4.3.2 Sicherheit Smart-Meter-Infrastruktur

Intelligente Messsysteme sind die zentrale Kommunikationseinheit für den digitalen Datenaustausch im Energiesektor. Sie bestehen aus einer modernen Messeinrichtung, die lediglich verschiedene Messwerte erfasst, und einem Smart Meter Gateway (SMGW), mit dessen Hilfe verarbeitete Messdaten gesendet und durch die Ergänzung eines CLS-Kommunikationsadapters auch Steuerungsbefehle empfangen und ausgeführt werden können.

Die aktuelle Architektur des vom BSI definierten Smart Metering mit SMGW und modernen Messeinrichtungen ist Teil der KRITIS-Umgebung im Energiesystem. Die hierbei genutzten Verfahren zur Verschlüsselung und zum Einsatz von Zertifikaten basieren, soweit bekannt, auch auf Standards, die durch Quantencomputing dem Risiko einer Kompromittierung ausgesetzt sind.

Quantentechnologien stellen für diesen Teil der Infrastruktur also aktuell keinen Anwendungsfall dar, sondern einen Gefahrenfall. Auf der anderen Seite ist anzumerken, dass durch das zentrale und stark regulierte System um die Mess- und Steuerungstechnik mittels intelligenter Messsysteme in Deutschland zentrale Vorgaben zur Umstellung auf quantensichere Systeme einheitlicher und leichter möglich sein werden.

Bewertung des Anwendungsfalls „Sicherheit Smart-Meter-Infrastruktur“

Die Relevanz von Quantentechnologien wird beim Anwendungsfall „Sicherheit Smart-Meter-Infrastruktur“ als **hoch** bewertet. Die Notwendigkeit des Einsatzes von Post-Quanten-Verfahren in der Kryptografie wurde bereits in Kapitel 4.3.1 beschrieben und gilt auch für die Smart-Meter-Infrastruktur. Der Einsatz von Quantenmetrologie und -sensorik in Verbindung mit Quantenkommunikation kann darüber hinaus die Qualität und Integrität von Messungen und der Steuerung dezentraler Anlagen verbessern.

Relevante Quantentechnologien:



Kryptografie & Kommunikation

- Bereitstellung eines vertraulichen Kommunikationsmediums/-kanals
- Quantenschlüsselaustausch zur sicheren Kommunikation

4.3.3 Zusammenfassung „Cybersicherheit“

Im Anwendungsfeld „Cybersicherheit“ werden Quantentechnologien für den Anwendungsfall „Erhöhte Sicherheit bei Datenverschlüsselungen“ als hoch relevant bewertet. Sie bieten die Möglichkeit, aktuelle Verschlüsselungsverfahren zu kompromittieren, stellen aber gleichzeitig einen Lösungsansatz dar, um die Sicherheit sensibler Daten und physischer Kritischer Infrastruktur zu erhöhen.

Auch beim Anwendungsfall „Sicherheit Smart-Meter-Infrastruktur“ zeigt sich eine hohe Relevanz der Quantentechnologien. Die Notwendigkeit des Einsatzes von Post-Quanten-Verfahren in der Kryptografie wird betont, insbesondere für die Sicherheit von intelligenten Messsystemen im Energiesektor.

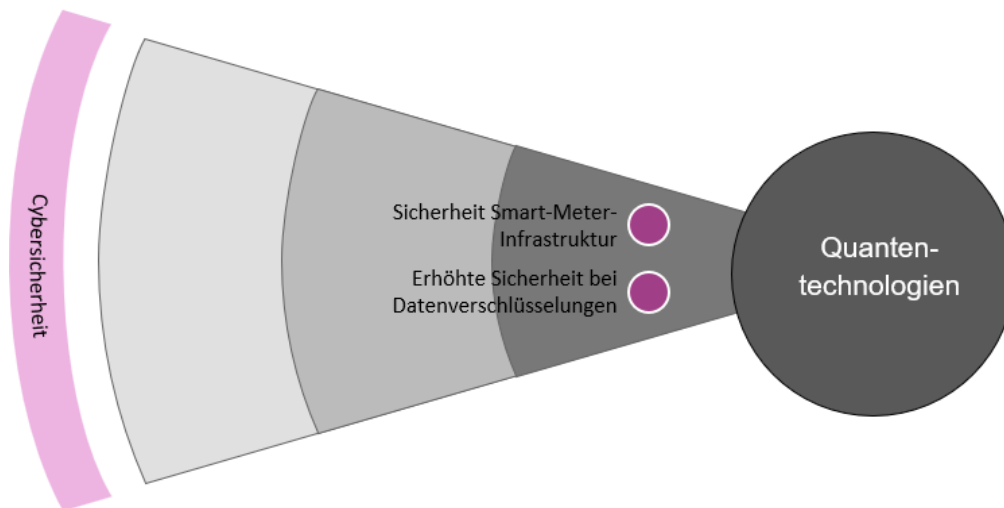


Abbildung 9: Anwendungsfälle „Cybersicherheit“

4.4 Anwendungsfeld „Materialkunde“

Das Anwendungsfeld „Materialkunde“ im Energiesystem umfasst die Dimensionen der Möglichkeiten zur Optimierung technischer, chemischer und physikalischer Prozesse zur verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien, zum Einsatz optimierter Materialien (z. B. Supraleitung) zum effizienteren Energietransport und zu weiteren verbesserten Komponenten der Infrastruktur (z. B. Sensoren) mittels Quantentechnologien.

4.4.1 Optimierung Haber-Bosch-Verfahren

Die Simulation physikalisch-chemischer Prozesse mittels Quantensimulation ermöglicht die Entdeckung neuer Materialien als Katalysatoren, durch deren Einsatz eine Steigerung der Effizienz bei verfahrenstechnischer Nutzung erzielt werden kann. Im Energiesystem der Zukunft ist die Optimierung des Haber-Bosch-Verfahrens (technische, industrielle Ammoniaksynthese) durch Simulation des physikalisch-chemischen Prozesses unter Einsatz neuer Katalysatoren (z. B. FeMoco) zur Reduktion von CO₂-Emissionen zu nennen. Letztlich wird hierdurch die CO₂-Bilanz durch Wegfall des Einsatzes von fossilen Ausgangsprodukten im Energiesystem verbessert, da Erdgas durch grünen Wasserstoff und vorhandenes CO₂ ersetzt wird.

Bewertung des Anwendungsfalls „Optimierung Haber-Bosch-Verfahren“

Beim Anwendungsfall „Optimierung Haber-Bosch-Verfahren“ wird die Relevanz von Quantentechnologien als **hoch** bewertet. Die CO₂-freie Ammoniaksynthese, inklusive der Verlagerung von Erdgas hin zu grünem Wasserstoff für die benötigte Prozesswärme, ist ein wesentlicher Faktor für die Nachhaltigkeit der Energiewende. Die Steigerung der Effizienz des Verfahrens mittels Quantensimulation kann dazu einen wesentlichen Beitrag leisten.

Relevante Quantentechnologien



Simulation

- Befähigung, den Ist-Zustand sowie beliebig viele zukünftige, mögliche Zustände des Energiesystems gleichzeitig abzubilden

4.4.2 Verbesserte Sensorik

Durch die Entwicklung von Sensoren, die auf quantenphysikalischen Effekten basieren, lassen sich signifikante Verbesserungen bei der Überwachung von Infrastrukturkomponenten erzielen. Diese Sensoren ermöglichen die hochpräzise Messung physikalischer Größen wie Temperatur, Spannung oder Strom auf atomarer Ebene.

Bewertung des Anwendungsfalls „Verbesserte Sensorik“

Physikalische Parameter, die im Energiesystem zur Anwendung kommen (Temperatur, Spannung, Strom etc.), können auch mit konventionellen Sensoren und ausreichender Messgenauigkeit erfasst werden. Eine Ausnahme bildet die Sensorik in der Verfahrenstechnik, wo mittels Quantensensorik die atomare Messung physikalischer Größen die Synthese zum Modell auf Basis von Quantensimulation bewirkt. Der Wirkungsbereich dieser Technologie betrifft also im Kontext des Energiesystems nur einen ausgewählten Zweig. Für den Anwendungsfall „Verbesserte Sensorik“ wird daher die Relevanz von Quantentechnologien als **mittel** bewertet.

Relevante Quantentechnologien



Metrologie & Sensorik

- Befähigung zur atomaren Messung (hohe Genauigkeit) von physikalischen Größen

4.4.3 Verbesserte Materialentwicklung und Katalysatormaterialien (Entwicklung & Optimierung)

Die Simulation physikalisch-chemischer Prozesse mittels Quantensimulation ermöglicht die Entdeckung und das Testen neuer Materialien. Sie kann bei der Materialentwicklung und -optimierung einschließlich Bereichen wie Supraleitern und Speichertechnologie eingesetzt werden. Dies wird ermöglicht durch Simulationen

unter Laborbedingungen und die Durchführung anspruchsvoller Berechnungen unter Verwendung erweiterter Rechenkapazitäten.

Um Energie aus erneuerbaren Quellen umzuwandeln, kommen Katalysatoren zum Einsatz. Mittels Quantensimulation können beispielsweise neue Katalysatormaterialien entwickelt und bereits bekannte Katalysatormaterialien in ihrer Wirksamkeit optimiert werden. Der Einsatz von Quantensimulation kann somit die Effizienz von verfahrenstechnischen Prozessen steigern, indem neues, wirksameres Katalysatormaterial entdeckt und entwickelt wird. Dies betrifft beispielsweise Anwendungsfälle bei der Herstellung von Solarmodulen oder dem Einsatz von Brennstoffzellen (Fraunhofer IAP, 2021). Die Anwendung von Quantentechnologie findet hier in Forschung und Entwicklung und nicht direkt im Energiesystem statt.

Bewertung der Anwendungsfälle „Verbesserte Materialentwicklung“ und „Katalysatormaterialien (Entwicklung & Optimierung)“

Neue Materialien für den Einsatz im Energiesystem (z. B. Supraleiter, Speichertechnologien etc.) können mittels Quantensimulation und physikalisch-technischer Laborversuche mitunter durch Zuhilfenahme von Quantensensorik entwickelt werden. Aufgrund des Lebenszyklus der bisher eingesetzten Materialien und der Prozesse um Netzplanung und Instandhaltung ist wahrscheinlich nicht mit einem schnellen flächendeckenden Einsatz dieser neuen Materialien zu rechnen.

Die Relevanz von Quantentechnologien wird daher bei den Anwendungsfällen „Verbesserte Materialentwicklung“ und „Katalysatormaterialien (Entwicklung & Optimierung)“ als **mittel** bewertet.

Relevante Quantentechnologien



Simulation

- Befähigung, den Ist-Zustand sowie beliebig viele zukünftige, mögliche Zustände des Energiesystems gleichzeitig abzubilden

Metrologie & Sensorik

- Befähigung zur atomaren Messung (hohe Genauigkeit) von physikalischen Größen

4.4.4 Zusammenfassung „Materialkunde“

Zusammenfassend ermöglicht der Einsatz von Quantentechnologien im Anwendungsfeld „Materialkunde“ im Energiesystem die Optimierung des Haber-Bosch-Verfahrens für eine CO₂-freie Ammoniaksynthese. Die Relevanz wird für diesen Anwendungsfall als hoch bewertet. Die Entwicklung verbesserter Sensorik wird mit mittlerer Relevanz eingestuft, da konventionelle Sensoren oft ausreichend sind. Bei der verbesserten Materialentwicklung bietet sich Potenzial für neue Energiesystemmaterialien, allerdings mit mittlerer Relevanz aufgrund des langsamen Einsatzes. Für die Entwicklung und Optimierung von Katalysatormaterialien haben Quantentechnologien eine mittlere Relevanz, da sie vorwiegend in der Forschung und Entwicklung stattfinden und nicht direkt im Energiesystem.

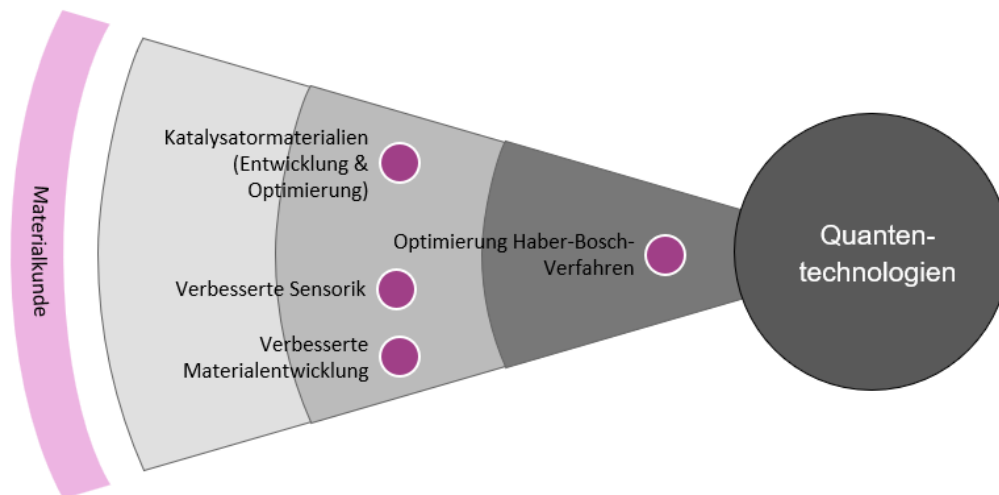


Abbildung 10: Anwendungsfälle „Materialkunde“

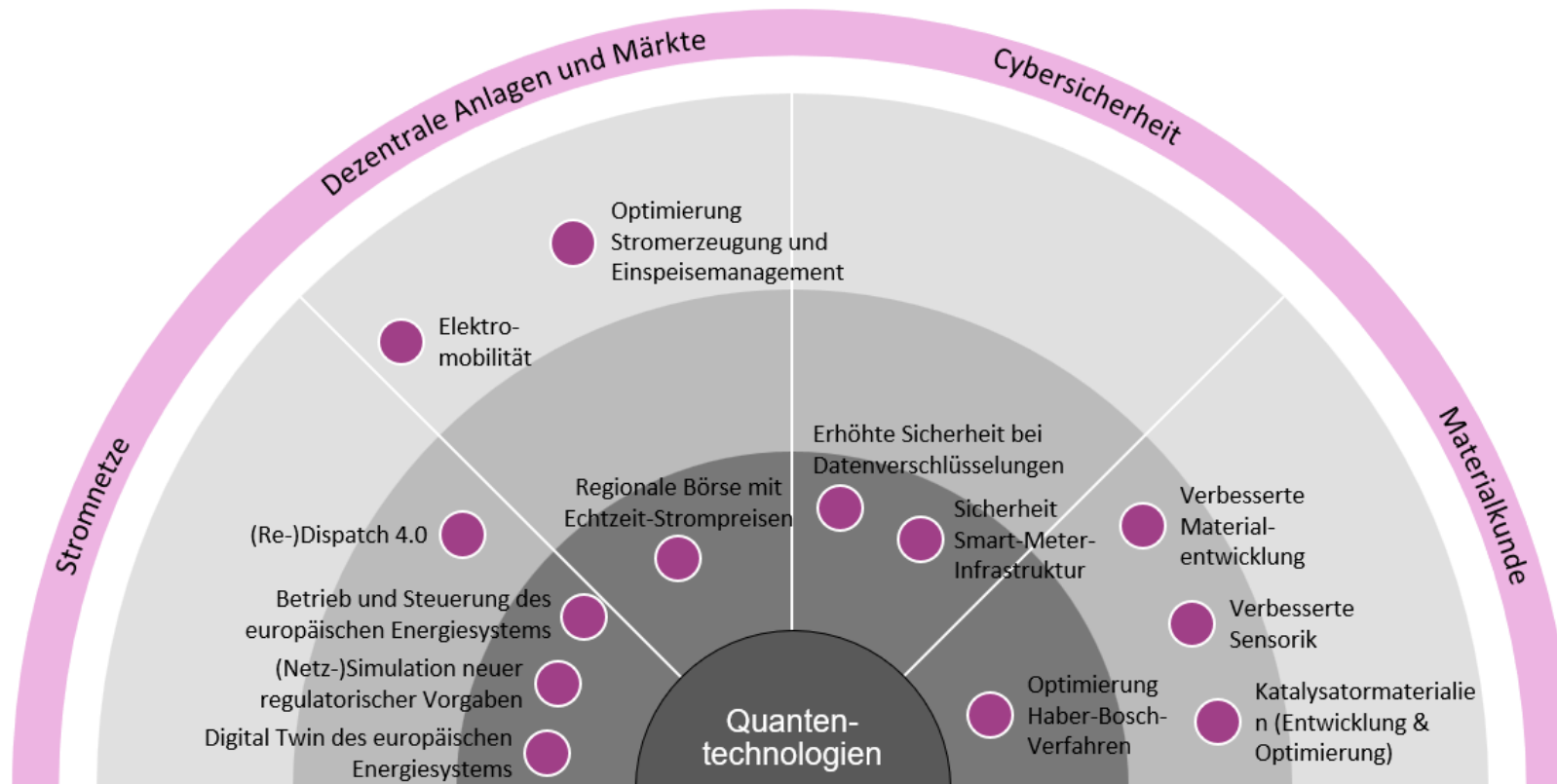
4.5 Bewertungsergebnis

Quantentechnologien können als Innovationstreiber im Energiesystem der Zukunft eine maßgebliche Relevanz haben

Die aufgeführten Anwendungsfälle zeigen auf, dass Quantentechnologien als Innovationstreiber im Energiesystem der Zukunft eine maßgebliche Relevanz haben. Der folgende Trendradar fasst die Ergebnisse grafisch zusammen und gibt einen Gesamtüberblick zu den wesentlichen Anwendungsfeldern und Anwendungsfällen im Energiesektor.

Wie in Abbildung 11 dargestellt, teilen sich die insgesamt 13 Anwendungsfälle wie folgt auf:

- **Sieben Anwendungsfälle** werden mit **hoher** Relevanz von Quantentechnologien eingeschätzt.
- **Vier Anwendungsfälle** werden mit **mittlerer** Relevanz von Quantentechnologien eingeschätzt.
- **Zwei Anwendungsfälle** werden mit **geringer** Relevanz von Quantentechnologien eingeschätzt.



Legende:

Abstand zum Mittelpunkt des Trendradars = Relevanz von Quantentechnologien für die Anwendungsfälle

■ Hohe Relevanz
 ■ Moderate Relevanz
 ■ Geringe Relevanz

Abbildung 11: Trendradar mit Anwendungsfällen mit Relevanz der Quantentechnologien

5 Fazit und Handlungsempfehlungen

Erneuerbare Energien leisten nicht nur einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz, sondern vermindern auch Abhängigkeiten von Öl, Kohle und Gas aus anderen Ländern und erhöhen somit die Energiesicherheit und stärken die Energieversorgung. Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien und dem stetig steigenden Strombedarf durch die Verkehrs- und Energiewende kommen neue Herausforderungen auf die Energiewirtschaft und die angrenzenden Sektoren zu. Volatilität, Dezentralität und technologische Vielfalt werden das Energiesystem der Zukunft prägen. Innovationen wie Quantentechnologien können einen wertvollen Beitrag zu einem beschleunigten, kostengünstigeren und effizienteren Umbau des Systems leisten.

In der Forschung und Entwicklung sind Quantentechnologien bereits heute ein fester Bestandteil und in der Wirtschaft, Politik und Gesellschaft begrifflich teilweise bekannt. Aktuelle Umsetzungen von Quantencomputern, -algorithmen und -sensorik lassen nur erahnen, welche zukünftigen Möglichkeiten in zahlreichen Anwendungsfeldern verborgen sind. Dabei versprechen Quantentechnologien nicht nur Skalierbarkeit und schnellere Berechnungen komplexer Sachverhalte, sondern auch die Abbildbarkeit der Realität in einem genaueren und umfassenderen Maße als bisher möglich. Einige Anwendungsfälle werden erst mittels Quantentechnologien realisierbar, während andere durch ihren Einsatz optimiert werden können.

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens, erstellt im Auftrag der dena durch das Beratungsunternehmen Ernst & Young, wurde das Ziel verfolgt, das Thema Quantentechnologien in der Energiewirtschaft zu erschließen und einen gezielten Wissensaufbau für Wirtschaft, Fachöffentlichkeit und Politik zu betreiben. Dies dient als Grundlage für eine umfassende Strategie zur Anwendung von Quantentechnologien in der Energiewirtschaft und soll somit als Entscheidungshilfe für die Akteure des nationalen Energiesystems dienen. Das zentrale Anliegen dieses Gutachtens bestand in der Identifikation, Ausarbeitung und Evaluierung von Anwendungsfällen im Energiesektor im Kontext der Quantentechnologien.

Hierzu wurde ein methodisches Vorgehen definiert, mit dem die Ausarbeitungen und Ergebnisse transparent, nachvollziehbar und strukturiert dargestellt werden konnten. Im Projektverlauf wurden so Anwendungsfelder definiert, Anwendungsfälle und ihre Ansätze im Rahmen eines Workshops mit Marktpartnern ausgearbeitet sowie entsprechende Anwendungsfälle und -ansätze harmonisiert, dokumentiert und letztlich nach einem Bewertungscluster und Bewertungskriterien auf einem Trendradar eingeordnet.

Im Kontext der Nutzung von Quantentechnologien in der Energiebranche wurden verschiedene Anwendungsfelder analysiert, um den potenziellen Mehrwert für das zukünftige Energiesystem zu beleuchten. Für die identifizierten Anwendungsfelder „Stromnetze“, „Dezentrale Anlagen und Märkte“, „Cybersicherheit“ und „Materialkunde“ wurden insgesamt 13 Anwendungsfälle herausgearbeitet. Im Anwendungsfeld „Stromnetze“ wird die Relevanz von Quantentechnologien für den „Digital Twin des gesamten europäischen Energiesystems“ und für „Betrieb und Steuerung des gesamten europäischen Energiesystems“ als hoch bewertet. Ebenso erweisen sich die Quantentechnologien für die „(Netz-)Simulation neuer regulatorischer Vorgaben“ als bedeutend. Für den Anwendungsfall „(Re-)Dispatch 4.0“ werden sie hingegen nur als mittel in ihrer Bedeutung eingeschätzt. Das Anwendungsfeld „Dezentrale Anlagen und Märkte“ fokussiert sich auf marktdienliche Prozesse, wobei die Relevanz für die „Optimierung der Stromerzeugung und des Einspeisemanagements“ und die „Elektromobilität“ als gering eingestuft wird. Für den Anwendungsfall „Regionale Börse mit Echtzeit-Strompreisen“ hingegen werden Quantentechnologien mit einer hohen Bedeutung

bewertet. In Bezug auf „Cybersicherheit“ betont die Studie die Bedeutung von Quantentechnologien, insbesondere für die „Erhöhte Sicherheit bei Datenverschlüsselungen“ und die „Sicherheit Smart-Meter-Infrastruktur“. Bei beiden Anwendungsfällen werden Quantentechnologien in ihrer Bedeutung als hoch eingestuft. Im Anwendungsfeld „Materialkunde“ werden Möglichkeiten zur Optimierung technischer Prozesse durch Quantentechnologien aufgezeigt. Für die beiden Anwendungsfälle „Verbesserte Sensorik“ und „Verbesserte Materialentwicklung“ werden sie mit einer mittleren Bedeutung eingeschätzt, für die „Optimierung des Haber-Bosch-Verfahrens“ hingegen mit einer hohen Relevanz. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 in einem Trendradar grafisch dargestellt. Insgesamt zeigt die Bewertung, dass Quantentechnologien als Innovationstreiber im Energiesystem der Zukunft eine maßgebliche Relevanz haben können.

Zwar können Quantentechnologien, wie in diesem Gutachten aufgezeigt, als Innovationstreiber das Energiesystem der Zukunft gestalten. Allerdings können sie in bestimmten Anwendungsfällen (insbesondere in der Kryptografie) auch Risiken für weit verbreitete und etablierte Technologien darstellen. Daher gilt es in diesem Bereich, die bisherigen Technologien durch quantenresistente Kryptografie wie Post-Quanten-Verschlüsselung zeitnah zu ersetzen.

Auf Basis der Erkenntnisse des Gutachtens wurden fünf konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet, um die Nutzung von Quantentechnologien als wichtige Innovationstreiber des Energiesystems im Markt weiter auszubauen und somit auch das Interesse relevanter Marktteilnehmer zu steigern. Darüber hinaus gilt es sicherzustellen, dass erforderliches Grundwissen zu Quantentechnologien bei den Marktteilnehmern vorhanden ist.

1. Stärkere Verankerung des Themas in der Branche und Vernetzung wesentlicher Akteure

Die Potenziale und auch Risiken von Quantentechnologien sollten stärker in der Branche verbreitet und die Bewusstmachung für zukünftige Anwendungsfelder sollte gestärkt werden. Die Definition neuer und die Evaluation der bereits identifizierten Anwendungsfälle in Workshops oder anderen Veranstaltungsformaten unter Einbindung des BSI fördert die Verbreitung der hier erarbeiteten Wissensbasis und schafft einen praktischen Bezug zum Thema. Zeitgleich führt dies zur Vernetzung relevanter Akteure. Um die Teilnahmebereitschaft bzw. gegebenenfalls die Teilnahmemöglichkeit zu steigern, empfiehlt es sich, die Einstiegshürde zum Thema „Quantentechnologien“ niedriger anzusetzen, beispielsweise durch ihre stark vereinfachte Beschreibung.

2. Zeitnahe Risikoanalyse zur potenziellen Gefährdung Kritischer Infrastrukturen durch Quantentechnologien sowie Ableitung von Maßnahmen

Durch die Existenz von Quantencomputern in Forschung und Unternehmen besteht bereits heute ein theoretisches Gefährdungspotenzial bei den Kommunikationsverbindungen der Kritischen Infrastrukturen. Daher sollte zeitnah eine Risikoanalyse für jeweils spezifische Anwendungsfelder erstellt und es sollten Maßnahmen im Zeitverlauf abgeleitet und ihre Realisierung sollte geplant werden. Es ist abzusehen, dass einzelne Maßnahmen auch die Standardisierung von neuen Krypto- und Kommunikationsprotokollen umfassen. Da derartige Standardisierungsvorhaben erfahrungsgemäß einige Jahre benötigen und erst danach die Hersteller mit der Entwicklung entsprechender Produkte beginnen können, sollten diese Verfahren frühzeitig angestoßen werden, um echten Angriffen auf die aktuellen Krypto-Protokolle zuvorzukommen.

3. Entwurf und Etablierung einer Kommunikationsstrategie

Um den Einsatz von Quantentechnologien im Kontext der Energiewirtschaft noch stärker im Markt und bei den Marktteilnehmern zu intensivieren, empfiehlt es sich, eine entsprechende Kommunikationsstrategie zu entwickeln. Diese kann beispielsweise folgende Elemente und Ansätze beinhalten:

- Ausrichtung eines jährlichen „Quantengipfels der Energiewirtschaft“ mit Teilnehmern und Vorträgen aus Politik, Forschung und Wirtschaft, um das Netzwerk zu vergrößern und einen engeren und intensiveren Austausch zu ermöglichen
- Entwicklung einer (regelmäßig durchgeführten) Studie zu „Quantentechnologien im Energiesektor“ mit wichtigen Themen und Fragestellungen des jeweiligen Zeitraums sowie einer Umfrage unter relevanten Marktteilnehmern. Diese Umfrage dient zur Erhebung aktueller Trends und eines Stimmungsbildes am Markt und befähigt dazu, die Entwicklung über die Jahre hinweg quantitativ zu beobachten.
- Aufsetzen eines Newsletters zur regelmäßigen Kommunikation von Informationen und Neuigkeiten (z. B. Grundwissen, Artikel, Events etc.) sowie Etablierung und Ausweitung des Netzwerks

4. Konzeption und Durchführung eines Pilotprojekts mit Kooperationspartnern

Ein in der Praxis realisierter Anwendungsfall steigert das Interesse an und die Akzeptanz von Quantentechnologien bei den Marktteilnehmern. Darüber hinaus kann erforderliches Grundwissen zu Quantentechnologien bei den Marktteilnehmern verbreitet werden. Daher wird empfohlen, ein Pilotprojekt umzusetzen, in dem ein oder mehrere Anwendungsfälle umgesetzt werden (z.B. Kommunikationsteststrecken). Die Kooperationen im Rahmen eines Pilotprojekts (z. B. Forschung und Entwicklung) erweitern das Netzwerk und heben Synergieeffekte. Zudem kann die nationale und internationale Sichtbarkeit gesteigert werden.

5. Stärkere Aufklärung und Vorgaben zur Verwendung von Post-Quanten-Kryptografie

Mit der fortschreitenden Entwicklung von Quantentechnologien wird der Einsatz von Post-Quanten-Kryptografie (PQK) zunehmend notwendig. Daher erscheint es erforderlich, das Thema PQK in der Branche zu platzieren und zu verankern. Dies gilt insbesondere auch für die Berücksichtigung bei der Ausgestaltung von Regularien, beispielsweise den Technischen Richtlinien des BSI und den Vorgaben für die Erarbeitung und Umsetzung von KRITIS.

Die genannten Handlungsempfehlungen tragen dazu bei, dass auch kurzfristig die Themen rund um Quantentechnologien erhöhte Aufmerksamkeit bei den Marktteilnehmern erfahren. Mittel- und langfristig gilt es, weitere Potenziale der Quantentechnologien mit den Marktteilnehmern zu identifizieren und umzusetzen, um so das deutsche und europäische Energiesystem weiterzuentwickeln.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht verschiedener Quantentechnologien	6
Abbildung 2: Quantencomputer – Ionenfalle	8
Abbildung 3: Oberfläche IBM Quantum Composer (IBM, 2025a)	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens im Gutachten	17
Abbildung 5: Bewertungscluster des Trendradars	18
Abbildung 6: Trendradar	19
Abbildung 7: Anwendungsfälle „Stromnetze“	24
Abbildung 8: Anwendungsfälle „Dezentrale Anlagen und Märkte“	28
Abbildung 9: Anwendungsfälle „Cybersicherheit“	31
Abbildung 10: Anwendungsfälle „Materialkunde“	34
Abbildung 11: Trendradar mit Anwendungsfällen mit Relevanz der Quantentechnologien.....	35

Literaturverzeichnis

All-Electronics.de (2021): Erster IBM-Quantencomputer in Deutschland eingeweiht. Online verfügbar unter <https://www.all-electronics.de/quantencomputer/erster-ibm-quantencomputer-in-deutschland-ingeweiht/700135>

BMFTR (2025): Hightech Agenda Deutschland. Online verfügbar unter https://www.bmftr.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/L/31881_Hightech_Agenda_Deutschland.pdf?blob=publicationFile&v=14

BMFTR (2026): Was sind Quantensysteme? Online verfügbar unter <https://www.quantensysteme.info/was-sind-quantensysteme>

BSI (2020): Migration zu Post-Quanten-Kryptografie – Handlungsempfehlungen des BSI. Online verfügbar unter <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Krypto/Post-Quanten-Kryptografie.pdf?blob=publicationFile&v=1>

BSI (2025): BMBF und BSI demonstrieren quantengesicherte Videokonferenz. Online verfügbar unter https://www.bsi.bund.de/DE/Service-Navi/Presse/Alle-Meldungen-News/Meldungen/QuNET-quantengesicherte-Videokonferenz_210810.html

Bundeswirtschaftsministerium (2025): Quantentechnologien. Online verfügbar unter <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Technologie/quantentechnologien.html>

Cornell University (2010): A primer quantum mechanics and its interpretations. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/abs/1001.3080>

Dena (2023): Das dezentrale Energiesystem im Jahr 2030. Online verfügbar unter https://future-energy-lab.de/app/uploads/2023/11/231120_dena_Das_dezentralisierte_Energiesystem_im_Jahr_2030_final.pdf

Devoret, Michel (2013): Superconducting Circuits für Quantum Information: An Outlook. Online verfügbar unter https://www.academia.edu/97983315/Superconducting_Circuits_for_Quantum_Information_An_Outlook

ENTSO-E (2025a): Interconnected Europe. Online verfügbar unter <https://www.entsoe.eu/regions/>

ENTSO-E (2025b): CIM-Konformität und Interoperabilität. Online verfügbar unter <https://www.entsoe.eu/data/cim/cim-conformity-and-interoperability/>

Europäische Kommission (2024): Neue Finanzierung von Horizont Europa fördert europäische Forschung im Bereich KI und Quantentechnologien. Online verfügbar unter <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/news/new-horizon-europe-funding-boosts-european-research-ai-and-quantum-technologies>

Feng, Donghui (2019): Review of Quantum navigation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 237 (2019)

Flink, Thomas (2024): Das QuBit. Online verfügbar unter <https://physikdidaktik.uni-freiburg.de/wp-content/uploads/2024/05/DasQuBit.pdf>

- Forbs (2019):** What Is Quantum Technology? Online verfügbar unter <https://www.forbes.com/sites/sap/2019/02/28/what-is-quantum-technology/?sh=63cf2c6e606a>
- Fortune (2020):** IBM plans a huge leap in superfast quantum computing by 2023. Online verfügbar unter <https://fortune.com/2020/09/15/ibm-quantum-computer-1-million-qubits-by-2030/>
- Fraunhofer IAF (2025):** Quantensensorik am Fraunhofer IAF. Online verfügbar unter <https://www.iaf.fraunhofer.de/de/kunden/quantensysteme/quantensensorik.html>
- Fraunhofer IAP (2021):** Neue Katalysatoren für Brennstoffzellen: effizient und mit konstant hoher Qualität. Online verfügbar unter <https://www.iap.fraunhofer.de/de/Pressemitteilungen/2021/neue-katalysatoren-fuer-brennstoffzellen-effizient-und-mit-konstant-hoher-qualitaet.html>
- Hölters, Stefan; Wüppen, Jochen (2022):** Quanten-OCT. Online verfügbar unter <https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/de/documents/Jahresberichte/jb21/tf6/jb21-s102-quanten-oct.pdf>
- IBM (2022):** IBM Unveils 400 Qubit-Plus Quantum Processor and Next-Generation IBM Quantum System Two. Online verfügbar unter <https://newsroom.ibm.com/2022-11-09-IBM-Unveils-400-Qubit-Plus-Quantum-Processor-and-Next-Generation-IBM-Quantum-System-Two>
- IBM (2025a):** IBM Quantum Plattform. Online verfügbar unter <https://quantum.cloud.ibm.com/composer?initial=N4lgjghgzgtiBclDyAFAogOQloEEDKAsgAQBMAAAwDcAogHYCWdAxAJgKZE3jdWDAEYBGMk2b9ademABO3AOZEwAbQAsAXRnNFK5pp316IADQg6EGNwOgAqnQAuDj626cizBvObtXIAC%2BQA>
- IBM (2025b):** What ist a digital twin? Online verfügbar unter <https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin>
- Jülich (2022):** Green Light for Unique Quantum Annealer at Jülich. Online verfügbar unter <https://juelich-quantum.de/en/>
- Kolodziejczyk, Bartłomiej (2023):** Scaling Quantum Computing Technologies – Opportunities, Challenges and Policy Interventions. Online verfügbar unter <https://sdgs.un.org/sites/default/files/2023-05/A2-%20Bart%20Kolodziejczyk%20-%20Scaling%20quantum%20computing%20technologies.pdf>
- Morsch, Oliver; Palma, Massimo G; Rossini, Davide (2025):** Quantum simulations of complex systems. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s40766-025-00069-0>
- NASA (2024):** Quantum Communication 101. Online verfügbar unter <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/07/quantum-communication-101-final.pdf?emrc=b0a13c>
- Nature (2018):** Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system. Online verfügbar unter <https://www.nature.com/articles/nature26147>
- Nielsen, Michael A; Chuang, Isaac L. (2010):** Quantum Computing and Quantum Information. Online verfügbar unter https://almuhammadi.com/sultan/books_2020/Nielsen_Chuang.pdf
- pro-physik (2015):** Mit Quantensimulation Magnetismus verstehen. Online verfügbar unter <https://pro-physik.de/nachrichten/mit-quantensimulation-magnetismus-verstehen>
- Quantum City (2025):** Quantum Navigation. Online verfügbar unter <https://www.quantumcity.org.uk/quantum-technologies/quantum-navigation>

Quantum Insider (2024): Google Promises „Useful, Error-Corrected“ Quantum Computer By End of Decade, Unveils New Quantum Campus. Online verfügbar unter <https://thequantuminsider.com/2021/05/19/google-promises-useful-error-corrected-quantum-computer-by-end-of-decade-unveils-new-quantum-campus/>

Stieler, Wolfgang (2025): Das Quanten Zeitalter. *MIT Technology Review – das Magazin für Innovation*, 2025 (8), S. 10 – 27.

Toshiba (2025): Quantum Key Distribution – Products and Services. Online verfügbar unter <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/security-ict/qkd/products.html#4>

University of Arizona (2020): Quantum Entanglement Offers Unprecedented Precision for GPS, Imaging and Beyond. Online verfügbar unter <https://news.engineering.arizona.edu/news/quantum-entanglement-offers-unprecedented-precision-gps-imaging-and-beyond#:~:text=Usually%2C%20a%20sensor%E2%80%99s%20precision%20is%20limited%20by%20something,the%20standard%20quantum%20limit%20and%20take%20ultrasensitive%20measurements>

VDI (2017): Förderung von Quantentechnologien (QUTEGA) – Positionspapier der Deutschen Industrie. Online verfügbar unter https://www.spectaris.de/fileadmin/Infothek/Photonik/Themen/Positionspapier_Quantentechnologie.pdf

Zeng, Qing-Guo; Cui, Xiao-Peng; Liu, Bowen; Wang, Yao; Mosharev, Pavel; Yung, Man-Hong (2024): Performance of quantum annealing inspired algorithms for combinatorial optimization problems. Online verfügbar unter <https://www.nature.com/articles/s42005-024-01705-7.pdf>

Abkürzungsverzeichnis

BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
CLS	Controllable Local System
ENTSO-E	Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber
EY	Ernst & Young
KRITIS	Kritische Infrastruktur
PlanQK	Plattform und Ökosystem für quantengestützte Künstliche Intelligenz
PQK	Post-Quanten-Kryptografie
PTB	Physikalische-Technische Bundesanstalt
QKD	Quantum Key Distribution (Quantenschlüsselaustausch)
Qubit	Quantenbit
RSA	Rivest–Shamir–Adleman
SMGW	Smart Meter Gateway
TSO	Transmission System Operator
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
V2G	Vehicle-to-Grid
VPN	Virtual Private Network

www.dena.de

future-energy-lab.de

Ein Projekt der

dena
