



# IOT, KI, BLOCKCHAIN UND QUANTENCOMPUTER

Transformationen durch Technologiekonvergenzen

Der Beitrag widmet sich den disruptiven Potenzialen der Blockchain-Technologie und den vielfältigen Zusammenhängen zwischen dem Internet der Dinge (IoT) und der Künstlichen Intelligenz (KI). Der Autor erläutert, warum das Zusammenwirken dieser Technologien für die Prozesse im Bauwesen und in der Stadt- und Raumentwicklung wichtig ist – und warum es sich jetzt schon lohnt, einen Blick auf Quantencomputer, Quantenalgorithmen und die Post-Quanten-Kryptografie zu werfen.



# BLOCKCHAIN AND INTERNET OF THINGS

SMART DEVICES AND NETWORKS

Quelle: iStock.com/elenabs

---

**Michael Lautwein**

ist wissenschaftlicher Referent im Referat WB 4 „Digitale Transformation des Bauwesens“ des BBSR. Er ist gelernter Tischler und Architekt.  
michael.lautwein@bbr.bund.de

Wir leben in einer Zeit des ständigen Wandels und hohen technischen Fortschritts. Die Digitalisierung aller Wirtschaftsbereiche führt zu neuen Prozessketten mit einer immer stärkeren Vernetzung unterschiedlicher Akteure. Diese Akteure tauschen Daten und Informationen mit einem stark steigenden Datenvolumen aus. Ein zunehmend wichtiger Datenlieferant ist das Internet der Dinge (Internet of Things – IoT): Es bezeichnet die Automatisierung und Vernetzung von Prozessen durch elektronische Systeme. Beim IoT erkennen Sensoren an physischen Objekten automatisch relevante Zustandsinformationen und legen diese in einem lokalen Netzwerk in einer Datenbank ab oder stellen sie über das Internet zur Weiterverarbeitung zur Verfügung (vgl. BMVI 2019: 51).

Die gesammelten Daten lassen sich über maschinelles Lernen und intelligente Algorithmen verarbeiten und analysieren – auf diese Weise können Muster erkannt werden. Die Ergebnisse können dann direkt in die Optimierung von laufenden Prozessen einfließen (vgl. Sander/Groß 2020). Am Beispiel einer vernetzten Baustelle bedeutet dies, dass Sensoren an Maschinen und Bauteilen in Echtzeit Daten liefern. Diese Daten werden automatisch durch Algorithmen verarbeitet – im laufenden Prozess wird die Auslastung der Baumaschinen oder der ideale Materialfluss der Bauteile optimiert. Die anfallenden Daten von IoT-Sensoren können aber auch als Trainingsdaten der Entwicklung neuer Algorithmen dienen und über dezentrale Marktplätze basierend auf der Blockchain-Technologie gehandelt werden.

Bei immer komplexeren Abhängigkeiten, die durch Algorithmen optimiert werden sollen, und immer größeren Datenmengen, die zu verarbeiten sind, steigen die Anforderungen an die Rechenleistung der Hardware. Die anfallende Datenmenge lässt sich effektiv reduzieren, indem man die Informationen lokal am Sensor verarbeitet und nicht direkt zentral in einer Cloud oder einem Netzwerk ablegt. Dieses verteilte Lernen auf den datenerzeugenden Endgeräten ermöglicht es, die Lernalgorithmen lokal über leistungsstarke Hardware (Microcomputer) auszuführen. „Die zentrale Idee

dieses Vorgehens ist es, trainierte Modelle anstelle von Rohdaten auszutauschen“ (Sicking et al. 2019). Das reduziert die zu transferierende Datenmenge signifikant.

Das Verschmelzen und Optimieren der unterschiedlichen Prozesse in Echtzeit setzt voraus, dass diese Prozesse und die anfallenden Daten effizient bewältigt werden, sichere und resiliente Datennetze zur Verfügung stehen und gleichzeitig die Souveränität über die Systeme und die Daten bestehen bleibt. Es braucht also verlässliche elektronische Komponenten und Systeme. Sie müssen die Sicherheit und Kontrolle bei global verflochtenen Liefer- und Wertschöpfungsketten und einen vertrauensvollen Umgang mit den Daten gewährleisten.

Die Zukunftstechnologie der Blockchain hilft dabei, die Souveränität über die Systeme und der sensiblen Daten auch außerhalb der eigenen Rechenkapazitäten und Netzwerke zu erhalten. Laut Roman Beck, dem Leiter des European Blockchain Center, bietet Blockchain „die Möglichkeit, Bürgern und Verbrauchern gleichermaßen wieder die Kontrolle über ihre Daten und digitalen Profile zurückzugeben“ (Acatech 2018). Dank Blockchain-Technologie lassen sich Informationen sicher über dezentral betriebene Datenbanken transferieren und weiterverarbeiten. Viele kennen die Technologie vermutlich nur im Zusammenhang mit volatilen Kryptowährungen wie Bitcoin. Sie bietet jedoch vielfältige Anwendungsfelder: Mit ihr könnten sich künftig beispielsweise dezentrale Echtzeit-Geschäftsprozesse, digitale Vertragskonstellationen, effiziente Zahlungsprozesse und – ganz allgemein – der sichere Transfer von Informationen über dezentrale Netzwerke etablieren. Die Blockchain bildet aber auch die Basis dafür, dass in der Stadt- und Raumentwicklung Menschen und Maschinen stärker über sichere Netzwerke miteinander verbunden und Prozesse automatisierter und effizienter gestaltet werden. Gleichzeitig sind alle Interaktionen und Transaktionen innerhalb der dezentralen Netzwerke transparent, manipulationssicher gespeichert und jederzeit überprüfbar (Geißler/Schmitz 2021).

## Was ist eigentlich Blockchain?

Hinter der Blockchain-Technologie verbirgt sich ein kryptografisches Verfahren für ein dezentral von vielen Teilnehmerinnen und Teilnehmern geführtes elektronisches Register. Vereinfacht ausgedrückt ist eine Blockchain eine kontinuierlich erweiterbare, digital geführte Liste von Da-

ten, Ereignissen oder Transaktionen, die validierte Personen über ein dezentrales Netzwerk kontinuierlich austauschen und verwalten (vgl. Schlatt et al. 2016). Jede Teilnehmerin und jeder Teilnehmer im Netzwerk ist gleichberechtigt, verbindet sich mit einem Computer und bildet

damit einen Knoten. Knoten können aber beispielsweise auch von Fahrzeugen oder Maschinen erstellt werden.

Jeder Knoten im Netzwerk erhält eine Identität über eine digitale Signatur, womit die anderen Knoten erkennen können, wer den jeweiligen Datensatz erstellt hat. Die digitale Signatur besteht aus einem Schlüsselpaar, einem öffentlichen und einem privaten Schlüssel. Mit dem privaten Schlüssel identifiziert sich jede Nutzerin und jeder Nutzer im Netzwerk und kann Transaktionen ausführen. Mithilfe des öffentlichen Schlüssels können die anderen Teilnehmerinnen und Teilnehmer innerhalb des Netzwerks die Authentizität des Datensatzes verifizieren (vgl. Bundesnetzagentur 2019: 7 f.).

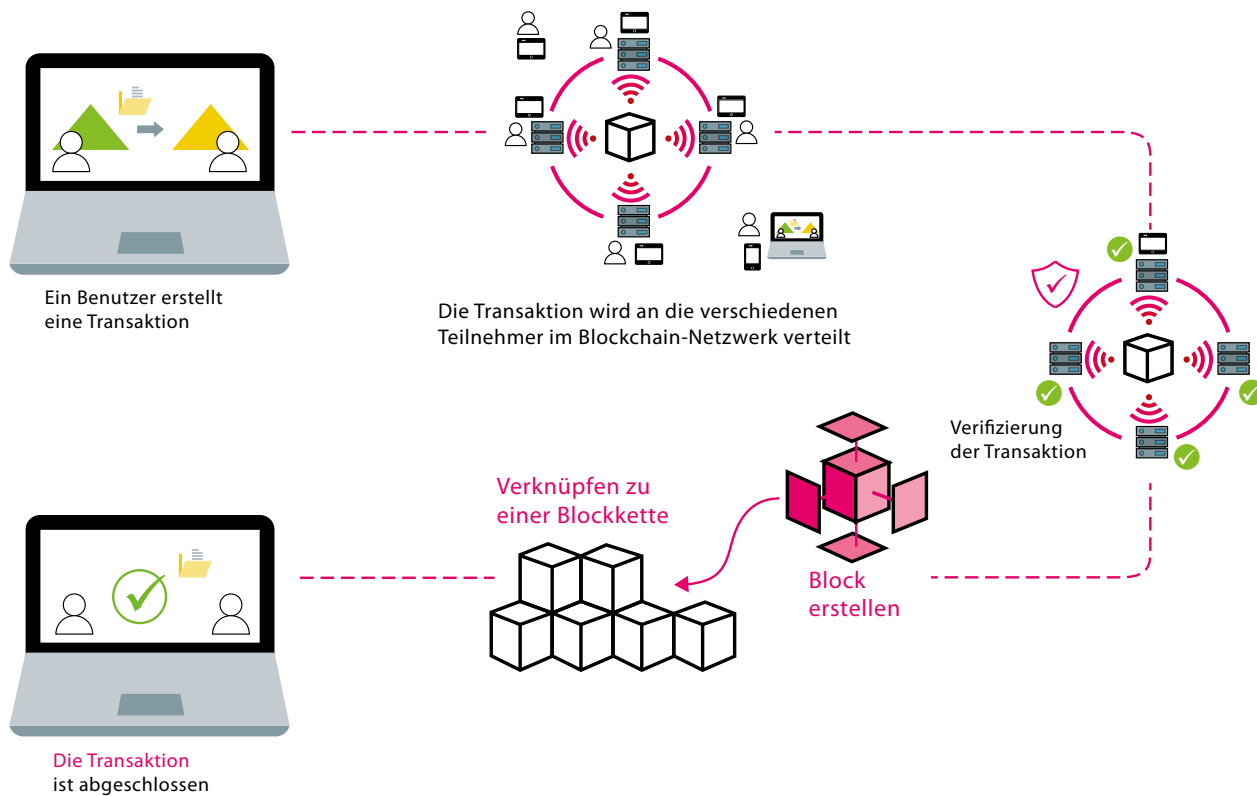
Jeder neue Datensatz wird vom gesamten Netzwerk verifiziert und mittels eines kryptografischen Verfahrens, der „Hashfunktion“, manipulationssicher gespeichert. Der Hashwert ist eine eindeutige Bit-Kette, bestehend aus Zahlen und Buchstaben mit einem Zeitstempel. Er enthält alle relevanten Informationen zu den einzelnen Transaktionen und referenziert auf die anderen Blöcke innerhalb einer Blockchain

(vgl. BMVI 2019: 31 f.). Das verhindert, dass nachträglich Manipulationen vorgenommen werden können, da andere Teilnehmerinnen und Teilnehmer Inkonsistenzen innerhalb des Netzwerks an der Blockchain erkennen. Zunächst einmal ist es für eine Blockchain unerheblich, was dokumentiert wird. Entscheidend ist, dass die Datensätze miteinander verkettet sind und aufeinander aufbauen, wodurch eine nachvollziehbare Historie entsteht (vgl. Hülsbömer/Genovese 2021). Diese Art der dezentralen und stets aktuellen „Dokumentationstechnik“ nennt sich auch Distributed-Ledger-Technologie (DLT).

Maurizio Ferraris (2018) hat die Blockchain-Technologie in einem Beitrag für die Neue Zürcher Zeitung mit der analogen Technik des Kerbstocks aus dem Neolithikum verglichen: „Die Grundidee des Kerbstocks ist äußerst einfach: Bei dieser genauso primitiven wie raffinierten Technik werden zwei Stöcke nebeneinandergelegt und quer eingeritzt, wobei jede Kerbe einer Schuld entspricht. Der Gläubiger nimmt einen Stock, der Schuldner den anderen. Der Gläubiger wird keine Kerbe hinzufügen und der Schuldner keine beseitigen können, da

1

Vereinfachte Darstellung einer Blockchain-Transaktion



Quelle: Universität Duisburg-Essen/Institut für Baubetrieb und Baumanagement (IBB) – Jacqueline Peter/HUSS-MEDIEN GmbH

der Vergleich der zwei Stöcke die Fälschung sofort offenbaren würde. [...] Denn die Blockchain [...] ist nichts anderes als ein weltweites, auf unzählige Computer ausgeweitetes Kerbholz. Anstelle eines von zwei Personen geteilten Zählstabs haben wir es mit einer Spur zu tun, die auf möglichst vielen Festplatten gespeichert wird, damit das Hinzufügen oder Löschen von Spuren (Blöcken) verhindert wird.“

Der Vergleich ist sehr vereinfacht, zeigt aber auch anschaulich und überzeugend die Grundidee hinter dieser Technologie. Durch das dezentrale Ablegen der Daten in einem verteilten Netzwerk ist ein Totalverlust der Informationen nahezu ausgeschlossen. Wenn Nutzerinnen und Nutzer die Daten einmal im digitalen Register verifiziert haben, sind sie unveränderbar und jeder Änderungsversuch ist nachvollziehbar. Somit lassen sich die einzelnen Transaktionen reproduzieren, personenspezifisch zuordnen und die Vertragspartner identifizieren. Die hohe Datenintegrität, System- und Ausfallsicherheit führt zu einer hohen Netzwerkfunktionalität und gewährleistet eine permanente Datenverfügbarkeit. Sie trägt zu einer Vertrauensbildung und hohen Akzeptanz zwischen den verschiedenen Akteuren innerhalb des Netzwerks bei (vgl. Bundesnetzagentur 2019: 5 ff.).

Mehrere Transaktionen bilden dabei einen neuen Block. Über ein Konsensfindungsverfahren innerhalb des Blockchain-Netzwerks wird entschieden, wer diesen neuen Block bilden darf. Es gibt zahlreiche solcher Verfahren, wobei die gebräuchlichsten Verfahren im Folgenden exemplarisch am Beispiel der derzeit viel diskutierten Kryptowährungen erläutert werden. Die Kryptowährungen sind unabhängig von Banken oder öffentlichen Institutionen und können nur digital gekauft und verkauft werden. Dabei verwaltet – anders als bei klassischen Finanztransaktionen – keine zentrale Instanz wie eine Bank das elektronische Register. Vielmehr tauschen sich die verifizierten Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Netzwerks über ein verteiltes Rechnernetz kontrolliert und permanent aus. Das Register und somit die Identität der Teilnehmerinnen und Teilnehmer sind nicht einsehbar.

Der Begriff der Kryptowährungen ist eigentlich zu verkürzt. Hinter der Kryptowährung Ethereum steckt zum Beispiel eine Plattform für dezentrale Applikationen (Decentralized Apps – Dapps). Diese verwendet für die Zahlungsabwicklung bei den Transaktionen die Kryptowährung Ether. Mit einer speziellen Programmiersprache (Solidity) lassen sich über die Plattform intelligente Verträge (Smart Contracts) anlegen und verwalten. Die Smart Contracts innerhalb der Blockchain bilden die Basis für dezentrale Geschäftsprozesse. Sie können verglichen mit manuellen Vertragsprozessen zu deutlich effizienteren Geschäfts- und Zahlungsprozessen beitragen (vgl. BMWi/BMF 2019: 38 f.).

Zurzeit setzen noch viele Kryptowährungen auf das Konsensfindungsverfahren „Proof-of-Work“ (PoW). Bei diesem Arbeitsnachweis erstellen Teilnehmerinnen und Teilnehmer im Netzwerk über das Lösen kryptografischer Rätsel neue Blöcke. Dieser Prozess gilt auch als Mining (Schürfen) – die Teilnehmerinnen und Teilnehmer erhalten für jede gelöste Aufgabe von einem Algorithmus eine Entlohnung (vgl. BMVI 2019: 32 ff.). Das Lösen der sehr komplexen kryptografischen Rätsel erfordert eine sehr hohe Rechenleistung. Dies führt zu einem enormen Energieverbrauch und ist ein häufig zurecht kritisiertes Skalierungsproblem für diese Technologie. Das „Centre for Alternative Finance“ der Universität Cambridge veröffentlicht täglich den notwendigen Stromverbrauch, der für das Schürfen und die Transaktion innerhalb des Bitcoin-Netzwerks benötigt wird (vgl. University of Cambridge 2021). Dabei zeigen die Berechnungen, dass alleine das Bitcoin-Netzwerk (115 TWh) jährlich mehr Strom verbraucht als die Niederlande (110 TWh). Deutlich umweltschonender – und für die angesprochene und notwendige Skalierbarkeit auch viel wirkungsvoller – wäre es, auf effizientere und leistungsfähigere Hardware und neue Konsensfindungsverfahren bei der Blockchain-Technologie zu setzen.

Für wirkliche Echtzeit-Geschäftsprozesse mit einer hohen Transaktionsgeschwindigkeit dauert das Erstellen neuer Blöcke mit dem Konsensfindungsverfahren „Proof-of-Work“ aber zu lange (vgl. BMVI 2019: 35 ff.). Daher versuchen aktuell viele Kryptowährungen, auf das Konsensfindungsverfahren „Proof-of-Stake“ (PoS) umzustellen (vgl. t3n 2021). Bei diesem Verfahren erfolgt die Validierung neuer Blöcke nicht durch das Schürfen komplexer Rechenaufgaben, sondern durch einen Konsens-Algorithmus innerhalb des Netzwerks. Dabei dürfen nur noch ausgewählte und als vertrauenswürdig eingestufte Personen als Teil des Blockchain-Netzwerks agieren (vgl. Bundesnetzagentur 2019: 12 f.). Durch die Zugriffsbeschränkung „bei privaten und konsortialen Blockchains wird das hohe technische Sicherheitsniveau des Proof-of-Work zugunsten einer verbesserten Handhabung (geringerer Energieverbrauch, geringere Komplexität, höhere Skalierbarkeit) eingeschränkt, weil bei diesen Blockchains davon ausgegangen wird, dass die einzelnen Teilnehmer vertrauenswürdig sind“ (Bundesnetzagentur 2019: 21). Laut Wagener (2018) zielen die beschriebenen neuen Verfahren vor allem auf das Internet der Dinge ab, „wo Transaktionen zwischen einzelnen Maschinen und Geräten dezentral abgebildet werden sollen. Für diese Vorgänge ist weder Zeit noch die notwendige Energie für ein aufwändiges Mining- und Validierungsverfahren vorhanden. Zudem sind die Anforderungen an die Manipulationssicherheit hier weit weniger kritisch als das bei einem digitalen Geldsystem wie Bitcoin der Fall ist“.

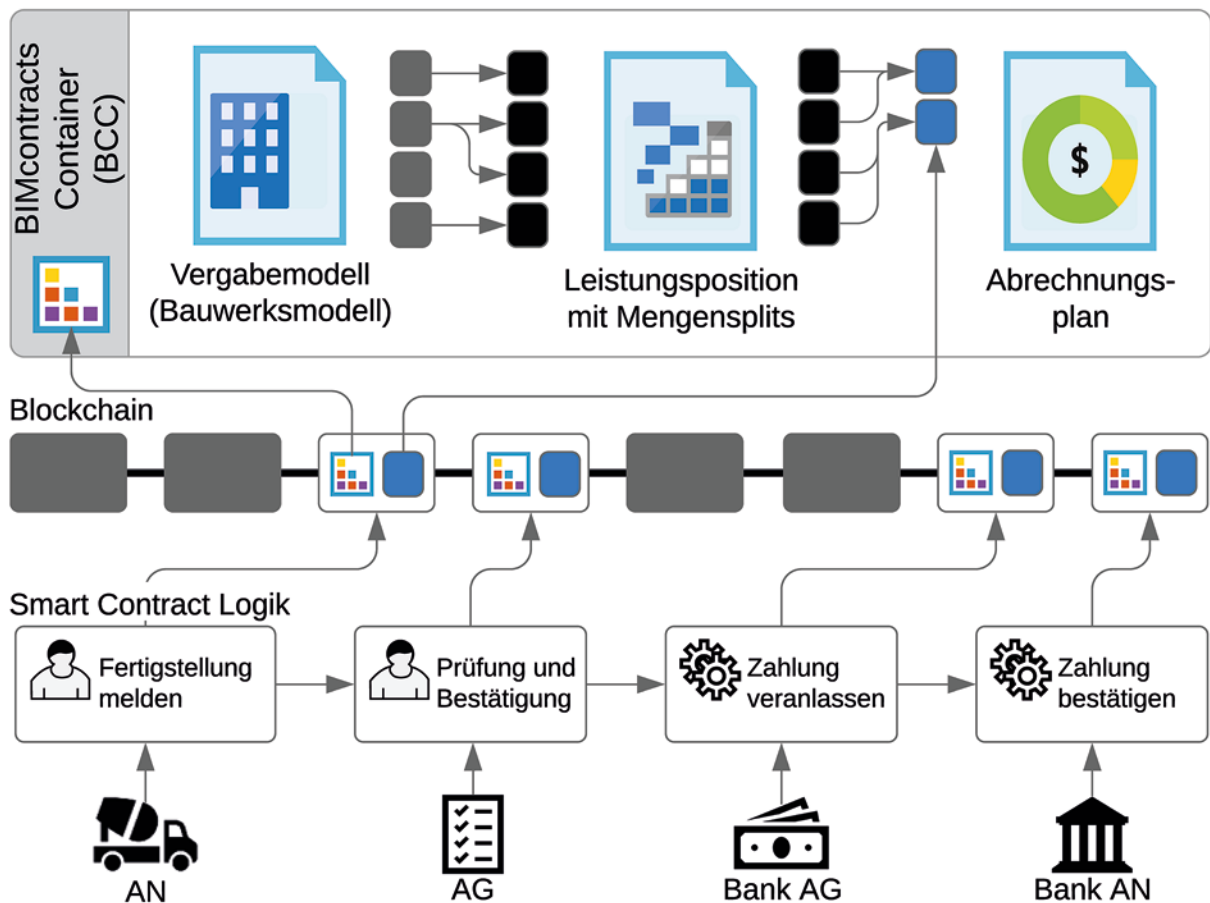
Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Forschungsvorhaben „BIMcontracts“ zur digitalen Zahlungsabwicklung im Bauprozess von der Ruhr-Universität Bochum ist ein Beispiel für ein zugriffsbeschränktes System, das auf der Blockchain-Technologie basiert. Das Vorhaben zielt darauf ab, komplexe Vertragskonstellationen zu vereinfachen und Verzögerungen in der Zahlungskette zu vermeiden. Dabei sollen alle Akteure im Bauprozess in einer digital abgebildeten Vertragskette Teil einer Blockchain sein. Das Forschungsteam möchte durch die Verknüpfung verschiedener digitaler Technologien ein digitales Abrechnungsmodell für ein automatisiertes Zahlungs- und Vertragsmanagement entwickeln. Dabei sind die einzelnen zu erbringenden Leistungen zwischen den Vertragspartnern im Bauprozess in einem digitalen BIM-Modell (Building Information Modeling) beschrieben und über

Smart Contracts geregelt. Fällige Rechnungen für erbrachte Dienstleistungen sollen so beispielsweise direkt nach der Bauabnahme – noch auf der Baustelle – automatisch zur Zahlung freigegeben werden können. Das würde derzeitige Verzögerungen von der Leistungserbringung bis zum Zahlungseingang – aufgrund langwieriger Prüfvorgänge und komplexer Vertragskomplikationen – und daraus resultierende Liquiditätseingänge bei den Unternehmen vermeiden. Die Ergebnisse sollen ab 2022 als Basisversion in Form einer öffentlichen Lösung frei zugänglich gemacht werden (vgl. Eschenbruch et al. 2020).

Dass die Zahlungen in den meisten Projekten weiterhin „klassisch“ über die Bank veranlasst werden, liegt häufig auch an den IT- und Buchungssystemen vieler Unternehmen (vgl. Sander/Groß 2020). Diese Systeme können derzeit keine

2

Automatisierte Leistungsmeldung, Prüfung und Zahlungsabwicklung



Quelle: Smart Service Welt 2021: 58

Kryptowährungen verarbeiten. Aus diesem Grund wäre aus Buchhaltungszwecken bei einem Smart Contract mit einer Finanztransaktion eine personell und finanziell belastende Umrechnung in eine Fiatwährung wie Euro oder US-Dollar notwendig. Diesen Nachteil haben einige Unternehmen und Institutionen erkannt und entwickeln Blockchain-basierte Fiatwährungen, die den geltenden regulatorischen Vorschriften entsprechen (ebd.).

Auch die Europäische Zentralbank (EZB) prüft derzeit, wie sich eine eigene europäische Digitalwährung – der digitale Euro – umsetzen lässt (vgl. Siedenbiedel 2021). Dabei geht es beispielsweise um die Frage, ob die EZB auch für den digitalen Euro bürgen kann, womit eine nahezu ausfallsichere,

preisstabile und unabhängige Digitalwährung für zukünftige Transaktionsprozesse entstehen würde. Allerdings wird die Einführung des digitalen Euros nach Expertenmeinung noch einige Jahre dauern, auch wenn der Druck aus anderen Ländern groß ist. China testet bereits seit 2020 seine staatliche Digitalwährung – Chinese Digital Currency Electronic Payment (DCEP), auch E-Yuan genannt. Zahlreiche Fachleute aus Wirtschaft und Wissenschaft veröffentlichten in einem offenen Brief im Juni 2020 eine High-Level-Roadmap, wie bis 2024 der „digital programmierbare Euro“ eingeführt werden kann (vgl. Sander 2020). Die Expertinnen und Experten sind der Meinung, dass die europäische digitale Währung idealerweise auf der Distributed-Ledger-Technologie, also der Blockchain-Technologie, basieren müsste.

## Wohin geht die Entwicklung bei der Blockchain-Technologie?

Im Bereich der Smart Contracts gibt es die Möglichkeit, die Zahlungsfreigabe von einer zusätzlichen Bedingung abhängig zu machen. Dabei wird der Smart Contract mit einer Information außerhalb der Blockchain – zum Beispiel einer Information von einem Sensor in der realen Welt – verknüpft. Erst wenn dieser Sensor gewisse Informationen geliefert hat, erfolgt die Zahlungsfreigabe. Diese zusätzliche Informationsquelle in einem Smart Contract heißt Orakel. Das Orakel erweitert somit den Spielraum von einem geschlossenen Blockchain-Netzwerk (vgl. Bundesnetzagentur 2019: 16). Hiermit könnten Sensoren an Fahrzeugen, Maschinen und Objekten vernetzt werden, automatisch und autonom innerhalb des Netzwerks Informationen austauschen, interagieren und sogar als selbständige Marktteilnehmer autonom Transaktionen ausführen.

Die Bundesregierung versucht seit Ende 2019 über vielfältige Forschungsvorhaben, mit einer eigenen Blockchain-Strategie und -Agenda die vielfältigen Potenziale der Technologie zu fördern (vgl. BMWi/BMF 2019). Diese strategische Forschungsförderung zeigt, wie groß die Potenziale für disruptive Veränderungen durch die Blockchain-Technologie gesehen werden. Dennoch fordert der „Blockchain Bundesverband“, dass Deutschland sich bei dieser disruptiven Technologie klarer positionieren und für die anstehenden Entwicklungen eine innovationsfreundliche Rechtssicherheit etablieren muss (vgl. Blockchain Bundesverband 2021).

Bezogen auf das deutsche Baugewerbe, mit seiner kleinteilig organisierten und stark von Bauvorschriften und Stan-

dards regulierten Struktur, bietet die Blockchain-Technologie die Möglichkeit, wieder ein hohes Maß an Transparenz und Nachvollziehbarkeit in den Strukturen sicherzustellen (vgl. Tapscott/Vargas 2019). Eines der größten Potenziale der Blockchain im Gebäudelebenszyklus liegt in der Nutzungsphase, also in der sicheren datenschutzsensiblen Speicherung von Informationen und Sensordaten (vgl. Turk/Klinc 2017). Anwenderinnen und Anwender könnten alle relevanten Informationen und Nachweise über den gesamten Lebenszyklus von einem Bauwerk in einem Onlineregister unwiderruflich speichern. Dadurch sollen im Bauprozess regulatorische Vorgaben schneller überprüft und notwendige Informationen für die Unterhaltung eines Gebäudes zu späteren Zeitpunkten einfacher aufgerufen werden können. Die Bauteilinformationen könnten daneben für das zukünftige Management von Bau-Recycling-Produkten genutzt werden, und dazu in einem zentralen Register abgelegt werden (vgl. Lüscher 2020). Die Baubranche steckt aber derzeit in einem Dilemma: Einerseits müssen die tradierten Prozessstrukturen auf die gegenwärtigen Entwicklungen und Potenziale der Informationstechnologien transformiert und fundamental überdacht werden – gleichzeitig erfährt die Baubranche aber eine Hochkonjunktur mit einem Fachkräftemangel (vgl. BMWi/BMF 2019: 51). Daher können wenige Firmen derzeit Kapazitäten und Know-how aufbringen, um sich auf diese noch junge Technologie einzulassen.

Das Blockchain-Labor am Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT arbeitet an vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. In einer Machbarkeitsstudie

wurde beispielsweise untersucht, wie unterschiedliche Mobilitätsdienstleister über eine offene und dezentrale, auf der Blockchain-Technologie basierende Mobilitätsplattform kooperieren können (vgl. Omos 2019). Im Projekt entstanden Konzepte, über die sich mit der Distributed-Ledger-Technologie verschiedene Mobilitätsdienstleister in ein herstellernerutrales und dezentrales Mobilitätssystem integrieren lassen. Die Endkundinnen und Endkunden sollen dadurch nicht mehr einzelne Tickets für unterschiedliche Verkehrsmittel buchen, sondern im Sinne der multimodalen Mobilität mit einer einzigen Buchung und Abrechnung verschiedene Verkehrsanbieter nutzen können. Die Blockchain-Technologie soll die sichere und sofortige Zahlungsabwicklung und Zahlungsverfolgung innerhalb des Netzwerks zwischen den unterschiedlichen Dienstleistern und den Kundinnen und Kunden ermöglichen.

Im Bereich der Energie entwickelt das Fraunhofer FIT in einem Verbundforschungsprojekt zudem einen Demonstrator für ein Blockchain-basiertes Flexibilitätsdatenregister für flexible Verbraucherinnen und Verbraucher sowie Erzeuger am Strommarkt. Damit sollen die volatilen dezentralen Energieerzeugungsanlagen mit einer intelligenten Laststeuerung effizienter in die bestehenden Netzstrukturen eingebunden werden – und beispielsweise ein Elektroauto netzdienlicher geladen werden (vgl. Fraunhofer FIT 2021). Geißler/Schmitz (2021) sehen daneben auch vielfältige An-

wendungsmöglichkeiten für die Blockchain, die zu einem gesamtgesellschaftlichen Mehrwert beitragen: „Die Funktionen der Blockchain und Smart Contracts können zur Digitalisierung der Bürgerrechte, Identitätsprüfung, Besteuerung, transparenten Abstimmung bei Wahlen, Bestätigung des Eigentums an Vermögenswerten, zur papierlosen Verwaltung und zur Automatisierung bürokratischer Prozesse zum Einsatz kommen.“

Wie bereits zu Beginn des Beitrags angemerkt, entsteht durch die Blockchain-Technologie mit dem Handel von sensiblen IoT-Daten, Ergebnissen aus der Echtzeitanalyse oder trainierten Algorithmen über verschlüsselte Datenmärkte ein neues Geschäftsfeld. Das Unternehmen SingularityNet bietet diese spezifisch trainierten KI-Algorithmen an und verkauft sie über Smart Contracts. Das Unternehmen möchte einen Marktplatz und eine Infrastruktur für ein selbständig agierendes, dezentrales Netzwerk von Künstlichen Intelligenzen aufbauen. Damit soll es zukünftig möglich sein, dass sich ein KI-Algorithmus zum Lösen einer spezifischen Aufgabe selbständig Fähigkeiten von einem anderen Algorithmus innerhalb des Netzwerks einkauft (vgl. Forbes 2020). Noch befindet sich das Projekt im Entwicklungsstadium und es ist unklar, ob die Ziele erreicht werden. Es zeigt aber sehr gut, welche disruptiven Potenziale zukünftig entstehen können, wenn die unterschiedlichen Technologien weiter miteinander konvergieren.

## Mehr Rechenleistung und weitere Entwicklungssprünge durch Quantencomputer?

Sei es bei der Verarbeitung von IoT-Daten und deren Analyse mit Algorithmen, dem Berechnen von neuen Blöcken bei einer Blockchain oder dem Lösen von vielfältigen Optimierungsproblemen: Überall ist der zentrale Schlüssel die zur Verfügung stehende Rechenleistung. Gerade bei sehr komplexen kombinatorischen Rechenproblemen – wie bei aufwendigen Simulationsprozessen in der Materialtechnologie oder Optimierungsprozessen in der Logistik – stoßen selbst leistungsstarke Großrechner an ihre Grenzen. Daher liegt aktuell große Hoffnung auf der Quantentechnologie und der Einführung von praxistauglichen und skalierbaren Quantencomputern.

Am 15. Juni 2021 sagte die Bundeskanzlerin Angela Merkel bei der Einweihung des ersten kommerziell nutzbaren uni-

versellen Quantencomputers in Deutschland mit dem Namen IBM Quantum System One (Fraunhofer 2021): „Wir stehen [...] erst am Anfang dieser neuen Technologie, doch sie lässt gewaltige disruptive Innovationspotentiale erwarten“.

Die Bundesregierung erhofft sich von den ultraschnellen Parallelrechnern große Leistungsschübe und Effizienzsteigerungen in der Industrie, die insbesondere in Verbindung mit Künstlicher Intelligenz erreicht werden sollen. Beim Mühen um technische und digitale Souveränität sieht sie die Technologie in einer Schlüsselrolle – und fördert konsortiale Forschungsprojekte bis 2025 mit über 2 Milliarden Euro. Das soll die Technologie möglichst schnell für wirtschaftliche Anwendungen nutzbar machen.



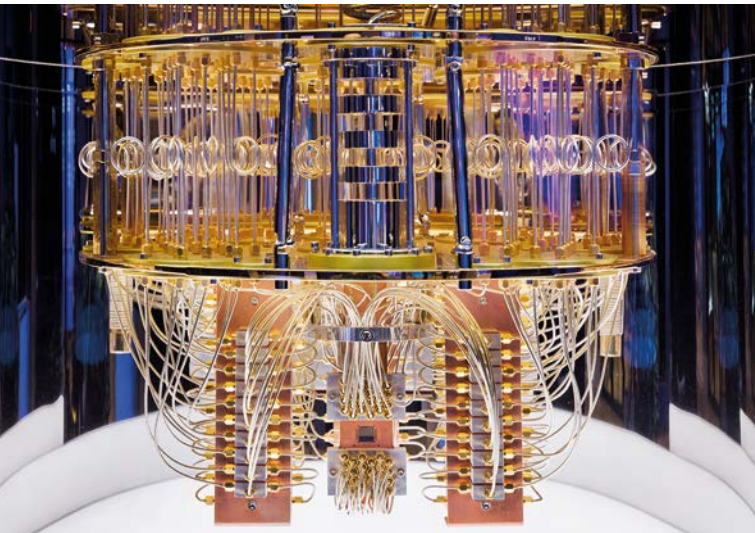


Foto: IBM

IBM Quantum Computer –  
Interior of IBM Quantum computing system

Die Technologie der Quantencomputer war lange Zeit eher ein theoretisches Konzept. Im Jahr 2019 erklärte Google in einem Artikel im Wissenschaftsmagazin Nature, zum ersten Mal die Quantenüberlegenheit erreicht zu haben (vgl. Nature 2019). Damit ist der Zeitpunkt gemeint, zu dem ein Quantencomputer eine Rechenaufgabe sehr viel effizienter löst als derzeitige Supercomputer (vgl. Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz 2020).

Wie stark Quantencomputer die Rechenzeit bei der Lösung von komplexen Aufgaben tatsächlich schon reduzieren können, diskutieren Fachleute sehr kontrovers. Die Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz (2020) kommt zu dem Schluss: „Im Quantum Computing steckt das Potenzial, die prinzipiellen Beschränkungen klassischer Computer zu überwinden. Denn viele Aufgaben im Bereich Big Data, Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen sind heute, trotz fortschrittlicher Rechenleistung, nur mit immensem Zeit- und Rechenaufwand lösbar – manche sind sogar so komplex, dass ihre Berechnung mit heutigen Rechnerkapazitäten Jahre dauern würde.“

## Unterschiede klassischer Computer zum Quantencomputer

Die Grundeinheit eines Quantencomputers ist das Quantenobjekt Qubit – es unterscheidet sich fundamental von dem Bit eines klassischen Computers und kann viel mehr Informationen darstellen. Das Bit in einem klassischen Computer kann nur den Wert 0 oder 1 annehmen, ein Qubit kann sich dagegen auch für eine gewisse Zeitspanne (Kohärenzzeit) in einem Zwischenzustand aus 0 und 1 befinden. Dieses Phänomen der Überlagerung nennt sich auch Superposition. Neben der Überlagerung gibt es auch noch das Phänomen der Verschränkung: Dabei lassen sich die winzigen Teilchen koppeln. Der Zustand eines Teilchens verändert sich somit, auch wenn das gekoppelte Teilchen weit entfernt ist. Durch die Überlagerung und Verschränkung der Qubit kann der Quantencomputer mehrere Eingaben gleichzeitig berechnen und so die Berechnungsprozesse gegenüber einem klassischen Computer, der jede Eingabe nacheinander verarbeitet, deutlich beschleunigen. Mit jedem zusätzlichen Qubit verdoppeln sich die darstellbaren Zustände eines Quantencomputers. Hier liegt aber auch ein derzeitiges Skalierungsproblem: Je mehr unterschiedliche Zustände abgebildet werden können, umso fehleranfälliger werden die Systeme und desto ungenauer können die Berechnungsergebnisse werden. Die einzelnen Zustände der Qubits zu messen

und die Wechselwirkungen zwischen den Qubits bewusst zu steuern, ist derzeit noch eine zentrale Herausforderung. Diese fehlende Kontrolle über die Qubits nennt sich auch Rauschen. Es tritt bei komplexen Rechenoperationen und bei einer höheren Anzahl von Qubits auf, aufgrund der exponentiell steigenden Anzahl an möglichen Zuständen. Um dies zu vermeiden, zielen viele der massiven Investitionen in die Quantentechnologie darauf ab, die Fehleranfälligkeit bei der Operation mit Qubits zu verringern (vgl. Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz 2020: 18 ff.).

Die fundamentalen Unterschiede zwischen Bits und Qubits erfordern auch neue Formen von Algorithmen. Hier liegt eine besondere Herausforderung in der Überführung „der Daten aus einem klassischen System in ein Quantensystem sowie die entsprechende Transformation der Ergebnisse nach der Berechnung“ (Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz 2020: 35). In vielen Bereichen betreiben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler noch Grundlagenforschung und untersuchen, welche Verfahren des maschinellen Lernens sich wie auf Quantencomputer übertragen lassen und in welcher Form es eine Datenaufbereitung und Überführung in eine Qubit-Kodierung braucht.

Die Entwicklung von universellen und frei programmierbaren Quantencomputern, auf denen jede Art von Rechenoperation durchgeführt werden kann, ist derzeit eher ein theoretisches Konzept. Sie werden auch Quantencomputer der zweiten Generation genannt (vgl. Kagermann et al. 2020). Damit diese Rechensysteme stabil und nahezu fehlerfrei funktionieren, keine Informationen verloren gehen und die fragilen Quanten gegen sämtliche Umwelteinflüsse abgeschirmt sind, erfolgt die Anwendung in einem Tieftemperaturbetrieb nahe dem absoluten Nullpunkt ( $-273\text{ °C}$ ) in einer Laborumgebung. Dadurch ist der Bau von universellen Quantenrechnern technisch sehr anspruchsvoll und kostenintensiv (vgl. Kagermann et al. 2020: 42 ff.). Laut Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz (2020) ist die Technologie der universellen Quantencomputer noch einige Jahre von der praktischen Anwendung entfernt. Bis zur Berechnung großer unsortierter Datensätze und bis zum praktischen Einsatz in einem wirtschaftlichen Umfeld dauert es laut den Expertinnen und Experten noch etwa zehn bis zwanzig Jahre.

Derzeit werden Quantencomputer jeweils für spezielle Probleme und Anwendungen spezifisch entwickelt und konstruiert. Hierzu gibt es mehrere unterschiedliche Hardware-Ansätze und Funktionsprinzipien. Dabei unterscheiden sich die Prinzipien in der Art, wie die Qubits erzeugt werden, sehr grundlegend (vgl. Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz 2020: 20 ff.). Das Prinzip des Quanten-Annealing findet bereits erste praktische Anwendung. Dieses Verfahren eignet sich allerdings nur für das Lösen ganz spezifischer kombinatorischer Optimierungsprobleme (vgl. Streichfuss et al. 2021). Die Automobilkonzerne VW und BMW nutzen seit 2017 in vielfältigen Forschungs- und Entwicklungsprojekten diese Technik, unter anderem im Bereich der Verkehrsflussoptimierung, der Optimierung von Arbeitsschritten bei Fertigungsrobotern und der Teile-Logistik. Beide Konzerne haben sich 2021 mit zahlreichen anderen Industriepartnern zu dem Quantenkonsortium QUTAC zusammengeschlossen, um neue wirtschaftliche Anwendungsfälle schneller erschließen zu können (vgl. QUTAC 2021).

Die EU fördert Quantencomputer und konsortiale Forschungsprojekte mit dem Horizon-2020-Projekt „Quantum Flagship – The Future is Quantum“ massiv (vgl. European Commission 2021). Sie hofft, dass damit auch in Europa zukünftig Quantencomputer mit einer immer höheren Anzahl an Qubits entwickelt werden und sich dadurch Wettbewerbsvorteile für europäische Firmen durch neue Anwendungsmöglichkeiten für Quantencomputer ergeben. Die finanziellen Ressourcen werden sicherlich dazu beitragen, die Entwicklung der Quantencomputer voranzutreiben. Fraglich

bleibt jedoch, ob Europa es im internationalen Wettlauf bei dieser Schlüsseltechnologie schafft, die hoch qualifizierten Quantenexpertinnen und -experten in der europäischen Forschungslandschaft zu halten. Neben Quantencomputern werden mit den Förderprogrammen aber auch zahlreiche andere Quantentechnologien wie die sichere Quantenkommunikation über ein zukünftiges Quanteninternet gefördert.

Die Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz (2020) sieht künftig vier Hauptfähigkeiten von Quantencomputern: Die Vorhersage dynamischer Systeme (Wetter, Stoffströme), das Finden von Lösungen bei Optimierungsproblemen (Logistik, Finanzwesen, optimierter Einsatz von Ressourcen), die Simulation (Materialeigenschaften vorher-sagen) und die Verschlüsselung (Informationen und Nachrichten sicher verschlüsseln). Im Bauwesen könnten damit sehr komplexe kombinatorische Optimierungsprobleme sehr viel schneller gelöst und damit die Bauprozesse und die Ressourcenplanung verbessert werden. In der Materialforschung könnten sich Strukturen bis auf die kleinste Ebene untersuchen lassen sowie neue Materialeigenschaften vorhergesagt werden. In urbanen Räumen könnten Stabilitätsanalysen von kritischen Infrastruktursystemen oder Kapazitätsoptimierungen von Stromtrassen bei einer zunehmenden Einspeisung von erneuerbaren Energien in das Stromnetz erfolgen (vgl. Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz 2020: 37 ff.).

Bei der vergangenen KI-Konferenz „Rise of AI Summit 2020“ diskutierten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die Frage, inwiefern die Entwicklung der Quantencomputer eine Gefahr und inwiefern eine Chance für die Verschlüsselungsverfahren der Blockchain-Technologie ist. Die bisherigen gängigen kryptografischen Verfahren zur Verschlüsselung der Informationen könnten mit der möglichen Rechenleistung von Quantencomputern und Quantenalgorithmen in kürzester Zeit überwunden werden. Damit wären derzeit verschlüsselte Daten nicht mehr sicher (vgl. Kagermann et al. 2020: 62). Daher ist eine wichtige Herausforderung für die Blockchain-Technologie, das derzeitige Sicherheitsniveau auch langfristig zu gewährleisten (vgl. Bundesnetzagentur 2019: 19). Die Arbeit an entsprechend sicheren Verfahren und Konzepten der Post-Quanten-Kryptografie, die auch im Quantenzeitalter den Schutz der digitalen Datenketten gewährleisten, läuft bereits (vgl. BMVI 2019: 48, Streichfuss et al. 2021: 13 f.).

Nach heutigem Stand der Forschung werden die Quantencomputer in absehbarer Zeit nicht die klassischen Digitalcomputer ersetzen. Dafür ist die Technologie noch nicht robust genug und technisch zu sensibel. Die Fraunhofer-AL-

lianz Big Data und Künstliche Intelligenz (2020) konstatiert, dass viele Fachleute der Meinung sind, dass sich mittelfristig die „praktische Anwendung aller Voraussicht nach auf Optimierung und Simulationen beschränkt, da sowohl in der Kryptografie als auch für das Lösen praxisrelevanter linearer Gleichungen deutlich größere Quantencomputer nötig sind“. Sobald das Rauschen der Qubits zuverlässig unterdrückt werden kann, „weitet sich das Feld der Anwendungs- und Wertschöpfungsmöglichkeiten sprunghaft“.

Wichtig ist abschließend zu betonen, dass die anwendungsorientierte Forschung für die Quantencomputer erst am Anfang steht und noch vielfältige Positionierungen in diesem disruptiven Forschungs- und Anwendungsfeld möglich sind.

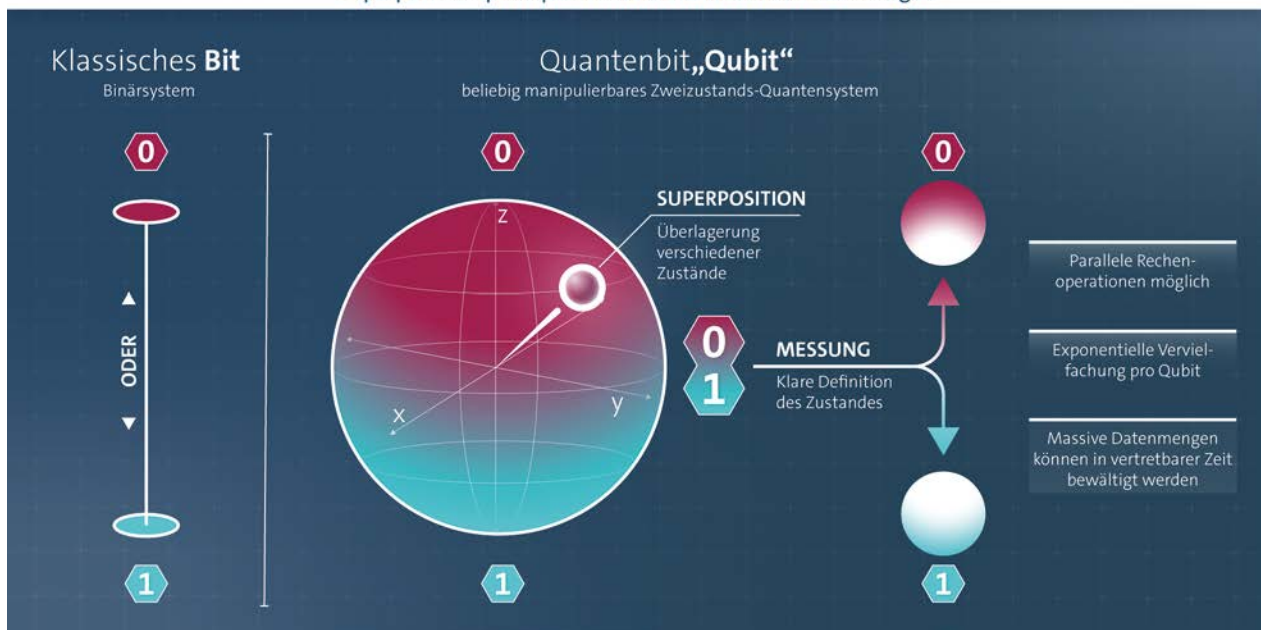
Quantenalgorithmen erfordern jedoch eine hohe Fachkompetenz, wofür es einen starken Wissenstransfer und neue Fachkräfte braucht. Hier bedarf es einer großen Förderung in der Nachwuchsqualifikation für die Weiterentwicklung von Anwendungen bis zur Marktreife sowie einer Umschulung der vorhandenen Expertinnen und Experten für das Programmieren von Quantenalgorithmen. Laut Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz (2020) werden Entscheiderinnen und Entscheider „in Unternehmen [...] zukünftig immer häufiger damit konfrontiert [...], die möglichen Chancen und Risiken dieser Technologie zu bewerten und auf potenzielle Anwendungen ihres Unternehmens zu übertragen“.

**3**

Klassisches Bit und Quantenbit im Vergleich

**SO FUNKTIONIERT EIN QUANTENCOMPUTER**

Superpositionsprinzip erlaubt Parallelität in den Rechnungen



Quelle: Volkswagen AG, Volkswagen Stories 2019

## Fazit

Damit sich die Transformationspotenziale nutzen lassen, ist es notwendig, die unterschiedlichen Technologien und die vielfältigen Zusammenhänge zu verstehen (vgl. Sander/Groß 2020). Durch die Automatisierung und Vernetzung von Prozessen wächst die Datenmenge rasant. Die Daten und Informationen lassen sich für die Optimierung von laufenden Prozessen durch intelligente Algorithmen nutzen. Durch das Verschmelzen von unterschiedlichen Prozessen entstehen immer komplexere Abhängigkeiten. Die Blockchain-Technologie bietet die Möglichkeit, die digitale Souveränität über die Daten zu behalten und über dezentrale Netzwerke neue Formen von Echtzeit-Geschäftsprozessen und digitalen Vertragskonstellationen zu etablieren. Neue Anwendungsmöglichkeiten der Blockchain-Technologie können zu einem hohen gesellschaftlichen Mehrwert beitragen. Erst durch das Zusammenwirken der innovativen Technologien IoT (Internet of Things), KI (Künstliche Intelligenz) und Blockchain entstehen die wirklichen Transformationspotenziale. Dafür ist es aber elementar, bei allen Transformationen den Menschen und seine Privatsphäre zu schützen und keine einseitige technikzentrierte Sichtweise zu entwickeln.

Quantencomputer haben darüber hinaus enorme Möglichkeiten, bei immer größeren zu verarbeitenden Datenmen-

gen und bei komplexen Simulationen neue Optimierungspotenziale zu erschließen. Hierfür sind jedoch noch einige grundlegende Entwicklungsschritte notwendig, um die Technologie in die breite Anwendung zu überführen. Quantencomputer bieten das Potenzial, „die Leistungsfähigkeit von Künstlicher Intelligenz und Machine Learning nochmals deutlich zu erhöhen“ (Kagermann et al. 2020: 27)

Für eine große Interoperabilität zwischen den einzelnen Technologien ist es wichtig, den standardisierten Daten- und Informationsaustausch weiterzuentwickeln und damit sektorübergreifende Anwendungskonzepte zu stärken (vgl. Bundesnetzagentur 2019: 20). Alle in diesem Beitrag benannten Technologien werden zukünftig immer stärker konvergieren. Damit sind grundlegende Veränderungen bei den Prozessen im Bauwesen sowie in der Stadt- und Raumentwicklung zu erwarten. Daher müssen Politik, Gesellschaft und Unternehmen die technologischen Entwicklungen nicht singulär, sondern ganzheitlich in den Blick nehmen. Umso wichtiger ist es, die unterschiedlichen Technologien in praxisnahen und disziplinübergreifenden Forschungsvorhaben weiterzuentwickeln und zu erproben. So lassen sich Vorteile der Technologien aufzeigen und anwendungsorientierte Lösungen schaffen.

# Literatur

- Acatech**, 2018: Experteninterview mit Roman Beck, IT University of Copenhagen. Zugriff: <https://www.acatech.de/allgemein/experteninterview-mit-roman-beck-european-blockchain-center> [abgerufen am 28.06.2021].
- Blockchain Bundesverband**, 2021: Kernforderungen. Zugriff: <https://bundesblock.de/de/about-us> [abgerufen am 24.06.2021].
- BMVI** – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), 2019: Chancen und Herausforderungen von DLT (Blockchain) in Mobilität und Logistik.
- BMWi** – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; **BMF** – Bundesministerium der Finanzen, 2019: Blockchain-Strategie der Bundesregierung. Wir stellen die Weichen für die Token-Ökonomie.
- Bundesnetzagentur** (Hrsg.), 2019: Die Blockchain-Technologie – Potenziale und Herausforderungen in den Netzsektoren Energie und Telekommunikation.
- Dalg**, P., 2021: Bär lädt zur Blockchainstandortbestimmung. Tagesspiegel Background vom 22.04.2021. Zugriff: <https://background.tagesspiegel.de/digitalisierung/baer-laedt-zur-blockchain-standortbestimmung> [abgerufen am 18.06.2021].
- Dena** – Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.), 2019: Blockchain in der integrierten Energiewende.
- Digiconomist**, 2021: Bitcoin Energy Consumption Index. Zugriff: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption> [abgerufen am 08.06.2021].
- Eschenbruch**, K.; Groß, D.; König, M., 2020: Auf dem Weg zum digitalen Bauvertrag – Automatisierung des Zahlungsverkehrs im Bauwesen mittels BIM und Smart Contracts (BIMcontracts). Bauwirtschaft, 1–2020.
- European Commission**, 2021: Quantum Technologies Flagship. Zugriff: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship> [abgerufen am 01.07.2021].
- Ferraris**, M., 2018: Was ist Kapital? Wie steht es zum Geld? Was leistet die Blockchain? Ein Blick ins Neolithikum liefert erstaunliche Antworten. Neue Zürcher Zeitung vom 17.12.2018. Zugriff: <https://www.nzz.ch/feuilleton/blockchain-geld-kerbholz-das-neolithikum-erklart-das-kapital-ld.1443274> [abgerufen am 06.05.2021].
- Forbes**, 2020: Is Artificial General Intelligence (AGI) on the Horizon? Interview. Zugriff: <https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2020/07/14/is-artificial-general-intelligence-agi-on-the-horizon-interview-with-dr-ben-goertzel-ceo-founder-singularity-net-foundation/?sh=6878c42459d0> [abgerufen am 18.06.2021].
- Fraunhofer**, 2021: Vorhang auf: Fraunhofer und IBM weihen Quantencomputer ein. Presseinformation. Zugriff: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2021/juni-2021/fraunhofer-und-ibm-weihen-quantencomputer-ein.html> [abgerufen am 24.06.2021].
- Fraunhofer-Allianz Big Data und Künstliche Intelligenz**, 2020: Quantum Machine Learning – Eine Analyse zu Kompetenz, Forschung und Anwendung.
- Fraunhofer FIT**, 2021: FlexHub – Verteiltes Flexibilitätsdatenregister für Strommärkte der Energiewende. Zugriff: <https://www.digitale-energie.fraunhofer.de/de/projekte/flexhub.html> [abgerufen am 01.07.2021].
- Geißler**, O.; Schmitz, P., 2021: Stadt der Zukunft: Smart City – Blockchain und Smart Cities. Zugriff: <https://www.blockchain-insider.de/blockchain-und-smart-cities-a-1019295> [abgerufen am 12.07.2021].
- Hülsbömer**, S.; Genovese, B., 2021: Was ist Blockchain? Computerwoche vom 05.06.2021. Zugriff: <https://www.computerwoche.de/a/blockchain-was-ist-das> [abgerufen am 21.06.2021].
- Joas**, R.; Groß, J.; Sander, P.; Duve, D.; Oehm, T., 2020: Blockchain, IoT und KI – eine perfekte Kombination. Zugriff: <https://jonasgross.medium.com/blockchain-iot-und-ki-eine-perfekte-kombination-f00f3fa36a67> [abgerufen am 10.06.2021].

- Kagermann, H.; Körner, J.; Süssenguth, F.; Liepold, A., 2020:** Innovationspotenziale der Quantentechnologie der zweiten Generation. Hrsg. von Acatech.
- Lüscher, M., 2020:** Blockchain im Bauhauptgewerbe. Schweizerischer Baumeisterverband. Zugriff: <https://baumeister.swiss/blockchain-im-bauhauptgewerbe/> [abgerufen am 04.06.2021].
- Omos – Open Mobility System, 2019:** Omos Concept Paper. MotionWerk GmbH, Fraunhofer FIT.
- QUTAC, 2021:** Industry Quantum Computing Applications – QUTAC Application Group. Positionspapier.
- Sander, P., 2020:** Open Letter: Roadmap towards a Digital Programmable Euro. Zugriff: <https://philippsandner.medium.com/open-letter-roadmap-towards-a-digital-programmable-euro-ab4ede44bac5> [abgerufen am 25.06.2021].
- Sander, P.; Groß, J., 2020:** Blockchain, IoT und KI – eine vielversprechende Mischung. Zugriff: <https://www.capital.de/wirtschaft-politik/blockchain-iot-und-ki-eine-vielversprechende-mischung> [abgerufen am 04.05.2021].
- Schlatt, V.; Schweizer, A.; Urbach, N.; Fridgen, G. (Hrsg.), 2016:** Blockchain White Paper: Grundlagen, Anwendungen und Potenziale. Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT.
- Sicking, J.; Voss, A.; Wirtz, T.; Paul, N. (Hrsg.), 2019:** Whitepaper Machine Learning on the edge. Fraunhofer IAIS – Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme.
- Siedenbiedel, C., 2021:** Angriff auf die Kryptowährungen. Frankfurter Allgemeine vom 21.06.2021. Zugriff: <https://www.faz.net/aktuell/finanzen/digitaler-euro-angriff-auf-die-kryptowaehrungen-17400352.html> [abgerufen am 25.06.2021].
- Smart Service Welt – Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (Hrsg.), 2021:** Smart Design, Smart Construction, Smart Operation – Einsatz von digitalen Services in der Bauwirtschaft.
- Streichfuss, M.; Alexander, M.; Hammermeister, F.; Heuer, A., 2021:** Quantencomputer | Wann kommt der Durchbruch? Hrsg. von Roland Berger GmbH.
- t3n – digital pioneers, 2021:** Kryptowährungen: Das unterscheidet Proof-of-Work und Proof-of-Stake. Zugriff: <https://t3n.de/news/kryptowaehrungen-proof-work-stake-ethereum-1379011> [abgerufen am 24.06.2021].
- Tapscott, D.; Vargas, V. R., 2019:** How Blockchain will change Construction. Harvard Business Review vom 26.07.2019. Zugriff: <https://hbr.org/2019/07/how-blockchain-will-change-construction> [abgerufen am 24.06.2021].
- Turk, Z.; Klinc, R., 2017:** Potential of Blockchain Technology for Construction Management. Creative Construction Conference. Zugriff: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581733179X> [Zugriff am 24.06.2021].
- University of Cambridge, 2021:** Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. Zugriff: <http://cbeci.org> [abgerufen am 08.06.2021].
- Volkswagen Stories, 2019:** Where is the electron and how many of them. Zugriff: <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/11/where-is-the-electron-and-how-many-of-them.html#> [abgerufen am 10.07.2021].
- Wagner, A., 2018:** Wie KI und Blockchain zusammenwachsen. industry of things, Expertenbeitrag. Zugriff: <https://www.industry-of-things.de/wie-ki-und-blockchain-zusammenwachsen-a-782046> [abgerufen am 08.06.2021].
- Wilhelm, F.; Steinwandt, R.; Langenberg, B.; Liebermann, P.; Messinger, A.; Schumacher P.; Spieldenner, A., 2020:** Status of quantum copmputer development – Entwicklungsstand Quantencomputer. Hrsg. vom BSI – Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik.