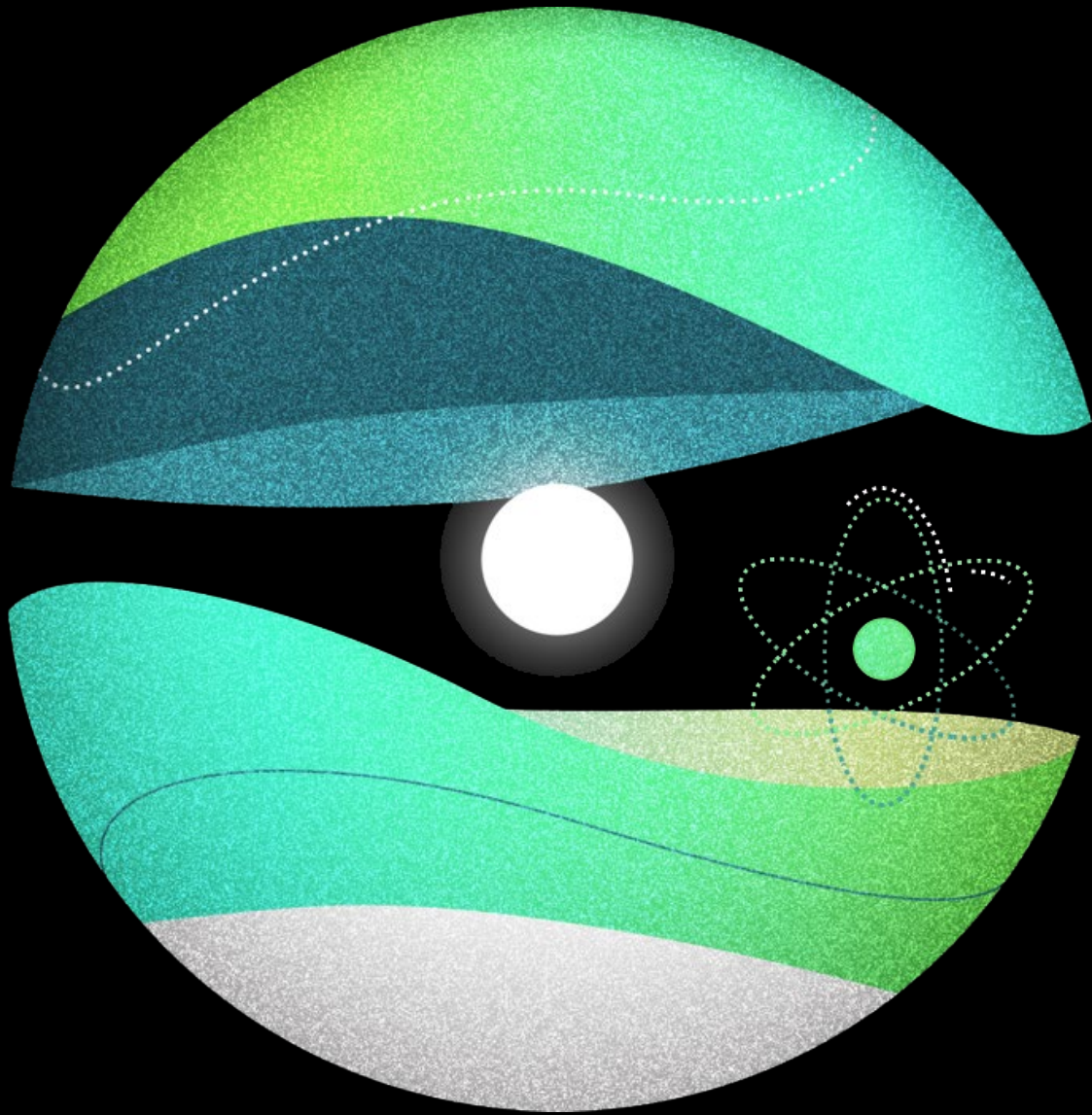


Deloitte.



Ohne Quantum keine
nachhaltige Zukunft!



Überlebensfrage Nachhaltigkeit	05
Phasen der Entwicklung	06
Anwendungsgebiete	08
Fazit	15



Überlebensfrage Nachhaltigkeit

Der anthropogene Klimawandel bedroht das Leben auf unserem Planeten. Wie der Weltklimarat in seinem aktuellen Bericht eindrücklich darstellt, können viele negative Folgen unseres Handelns bereits heute nicht mehr vermieden werden, da wir dabei sind, Kipppunkte zu überschreiten. Klimaschutzende Maßnahmen sind weltweit erforderlich, damit menschliches Leben auf der Erde grundsätzlich möglich bleibt. Dabei sind insbesondere Lösungen gesucht, die die Grundbedürfnisse aller sichern und die individuelle Freiheit des Einzelnen so wenig wie möglich beschränken.

Relativ zögerlich wird noch in Richtung eines steuernden Ansatzes geschaut, der mit Lenkungsimpulsen aktiv in dynamische Systeme eingreift: Neuartige Simulationsumgebungen wären etwa in der Lage, komplexe, multivariable Prozesse wie etwa Mobilität oder Energieverbräuche exakt zu modellieren und dabei die Auslastung der Ressourcen in Echtzeit zu optimieren.

Quantentechnologien machen diese Großsimulationen erst möglich. Tatsächlich ist das Potential von Quantentechnologien immens, gerade in Bezug auf klimaneutralen technologischen Fortschritt. Sich Wissen über Quantentechnologien anzueignen lohnt sich daher bereits heute für jeden, der nach progressiven Lösungen für die Zukunft sucht.

Die Rechenmethodik von Quantencomputern basiert auf grundlegend anderen physikalischen Prinzipien verglichen mit klassischen Computern. Der eigentliche „Clou“ dabei ist die hochgradige Parallelisierung der Operationen: Quantencomputer sind dadurch unfassbar schnell. Sie können Aufgabentypen bewältigen, die mit klassischen Computern nicht lösbar sind – und dies in hinreichend kurzer Zeit: eine Optimierung der Nachfrage nach elektrischer Energie in einer Großstadt, die ein Jahrzehnt an Rechnerzeit benötigt, ist komplett wertlos – dieselbe Optimierung in Minuten oder sogar Sekunden würde aber völlig neue Planungs- und Steuerungsmodelle erlauben, der Strompreis könnte lokal und schnell an das aktuell Angebot grüner Energie angepasst und an die Smart Meter in den Haushalten weitergegeben werden.

Quantentechnologien können Innovationen in allen großen klimarelevanten Bereichen vorantreiben: im Energiesektor, im Bereich Mobilität, in der Ernährung und Landwirtschaft, sowie bei Industrieprozessen und im verarbeitenden Gewerbe.

Phasen der Entwicklung

Es stellt sich die Frage, wann Quantencomputer die benötigten Rechenleistungen aufweisen werden

Bisher haben sich zwei Quantencomputermodelle herausgebildet: adiabatische Quantencomputer und (universelle) Quantengattercomputer. Eine von Quantum.Link durchgeführte Prognose sieht die Entwicklung in mehreren Phasen ablaufen. Wichtige Meilensteine sind dabei:

- In den nächsten 1–2 Jahren können einzelne Anwendungsfälle aus allen Branchen von Quantencomputing profitieren. Darunter fallen vor allem statische Optimierungsprobleme, die sich auf adiabatischen Quantencomputern, sog. „Quantum Annealern“ lösen lassen, und heute bereits etwa in Verkehrsflussoptimierungen Anwendung finden. Durch stetige Weiterentwicklung werden Annealer bereits in 3–5 Jahren echtzeitfähig sein und somit Steuerungsaufgaben in Produktion und laufendem Betrieb optimieren können.
- Parallel zur Weiterentwicklung von Annealern werden auch universelle gatterbasierte Quantencomputer Fortschritte erzielen. Signifikante, fehlerfreie Rechenleistungen auf Basis von rund 1k logischen Qubits können in den nächsten 5–10 Jahren erwartet werden. Damit werden Simulationen aller Art, Quantum Machine Learning und ein erweitertes Spektrum an Optimierungsaufgaben ermöglicht. Weiterentwicklungen hin zu 1 Mio logischen Qubits erlaubt in 8–20 Jahren auch eine Echtzeitfähigkeit von universellen Quantencomputern.

Doch auch wenn die Entwicklung universeller Quantencomputer längere Zeit benötigen wird, können Unternehmen bereits jetzt sinnvolle vorbereitende Arbeiten vollziehen: die Definition von Anwendungsfällen, Aufstellung von geeigneten Teams, Umstellung von Prozessen und die Gestaltung neuer Geschäftsideen.

Tatsächlich ist das Potential von Quantentechnologien immens, gerade in Bezug auf klimaneutralen technologischen Fortschritt. Sich Wissen über Quantentechnologien anzueignen lohnt sich daher bereits heute für jeden, der nach progressiven Lösungen für die Zukunft sucht.



Anwendungsgebiete

Um die Ausmaße der Bedeutung von Quantum für das Klima begreifbarer zu machen, werden im Folgenden trotz der noch ausstehenden Experimente konkrete Beispiele benannt, bei denen durch Quantentechnologien disruptive Fortschritte in Richtung Klimaneutralität erzielt werden könnten:



Energiesektor

Dezentrale Netzwerke und virtuelle Batterien

Mit jedem neuen E-Auto steigt das mobile Batterie-Volumen und einhergehend die Anzahl an Ladepunkten im häuslichen und mittelfristig auch im gewerblichen Besitz. Darauf basierend entstehen neue übergreifende Produkte und Geschäftsideen, wie beispielsweise die Tesla Powerwall: Ein Stromspeicher für Zuhause, der – mit einer Solaranlage kombiniert – für das nächtliche Aufladen von E-Autos mit sauberer Energie sorgen kann. Denkt man die Möglichkeiten weiter und betrachtet die mobilen Batterien als Teile eines Netzwerks, kann eine dezentrale virtuelle Batterie aufgebaut werden.

Ein solches komplexes dezentrales Stromnetz stellt eine multidimensionale Optimierungsaufgabe dar, die kontinuierlich dynamisch in Echtzeit gelöst werden muss. Als Zielparameter gilt es, den dezentral gewonnenen Solarstrom maximal im Gesamtnetz zu nutzen, so dass auf möglichst wenig externe Stromquellen zurückgegriffen werden muss. Um ein solches Netz effizient steuern zu können, ist der Einsatz von Quantencomputern unabdingbar, da eine solche Optimierungsaufgabe in Echtzeit auf klassischen Computern nicht lösbar ist. Gelingt eine effiziente Steuerung mittels Quantencomputer, kann ein entscheidender Beitrag zur klimaneutralen Stromversorgung geleistet werden. Gleichzeitig kann die Attraktivität von E-Mobilität und Nutzung von Park-and-Ride-Angeboten gesteigert werden.

Wirkungsgradsteigerung in der Photovoltaik

Da Quantencomputer auf quantenphysikalischen Prinzipien beruhen, können mit ihnen physikalische und chemische Prozesse nahe an der Wirklichkeit simuliert werden. Solche Simulationen sind in vielen Branchen essenziell und werden daher teilweise auch heute schon behelfsmäßig auf klassischen Computern durchgeführt. Ein prominentes Beispiel ist die Photovoltaik, bei der die Stromgewinnung aus Sonnenlicht auf quantenmechanischen Effekten innerhalb der eingesetzten Photovoltaik-Module basiert. Heute liegt der Wirkungsgrad der Module je nach Basistechnologie bei rund 10%–40% in der Serienfertigung. Berechnungen zur Effizienzsteigerung durch Verwendung von alternativen Materialien, Dotierungsgraden, Schichtdicken und Verschaltungen mit klassischen Computern werden auf Basis einfacher Modelle und Simulationen der Solarenergie-Gewinnung, -Transmission und -Distribution durchgeführt. Jedoch müssen diese Berechnungen auf klassischen Computern heute zwangsläufig entweder stark vereinfacht werden, oder sie sind sehr zeit- und rechenkapazitätsaufwendig oder liefern erst nach langwierigen Iterationen brauchbare Ergebnisse. Mit steigender Komplexität einer Simulation steigt der Rechenaufwand auf klassischen Computern exponentiell.

Hier werden Quantencomputer absehbar bereits in wenigen Jahren über genügend stabile Rechenleistung verfügen, dass ihr Einsatz enorme Vorteile gegenüber klassischen Computern bietet. Durch die präzisere Simulation können quantenmechanische Vorgänge, makro-physikalische Eigenschaften und somit übergreifend die Charakteristika von funktionalen Materia-

lien und Stoffen besser verstanden werden und sinnvolle Kompositionen für Produkte und Komponenten berechnet werden. In Bezug auf Photovoltaik werden nicht nur viel höhere Wirkungsgrade erreichbar sein, auch werden die Module weitere vorteilhafte Eigenschaften erlangen: Dünnere Schichten und Substrate sorgen für höhere Biegsamkeit und Flexibilität; die Materialien werden langlebiger und weisen auch nach langfristigen Einsatz nur einen geringen Verlust an Wirkungsgrad auf; Kristalldefekte, Hot-Spots, Unregelmäßigkeiten und Verspannungen innerhalb der Module werden minimiert; die Energieausbeute wird von optimierten Ansteuerungen profitieren. Die Gewinnung von Energie aus Sonnenlicht und damit übergreifend die Energiewende werden in Quantencomputing also eine extrem starke Verbündete finden.

Künstliche Photosynthese

Die Königsdisziplin der Klimatechnologien ist die Erforschung der künstlichen Photosynthese für eine langfristig grüne Energieversorgung bei gleichzeitiger Reduzierung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre. Wie bei der natürlichen Photosynthese sollen aus Kohlenstoffdioxid und Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht Sauerstoff und Biomasse entstehen. Ein Beispiel für entstehende Biomasse sind alternativer Kraftstoffe, die auch heute schon mit natürlicher Photosynthese erzeugt werden. Allerdings beträgt der Wirkungsgrad der natürlichen Photosynthese nur ca. 1%, weshalb die Erzeugung der Kraftstoffe mit einem enormen Flächenbedarf verbunden ist. Der geringe Wirkungsgrad liegt u.a. daran, dass das Chlorophyll, das für den Prozess in Pflanzen verantwortlich ist, nicht das komplette Sonnenlicht absorbiert, sondern nur die blauen und roten Anteile. Die Anteile im

grünen Spektralbereich werden reflektiert, wodurch wir die Pflanzen in grünen Farben sehen. Um höhere Wirkungsgrade zu erreichen, suchen Wissenschaftler nach alternativen Stoffen, die einen möglichst breiten Bereich des Sonnenlichtspektrums absorbieren. Gleichzeitig müssen die Stoffe robust und möglichst kostengünstig sein. Bis heute ist es nicht gelungen, Materialien zu finden oder zu synthetisieren, die alle Anforderungen erfüllen, so dass eine wirklich effiziente künstliche Photosynthese noch nicht gelungen ist.

Mit Hilfe von einerseits präzisen Simulationen der Vorgänge bei der natürlichen Photosynthese werden Quantencomputer die Forschung im Bereich künstliche Photosynthese weit voranbringen können. Neben der Suche nach Ersatzstoffen für das natürliche Chlorophyll als Absorber können Quantencomputer auch bei der Identifizierung geeigneter Katalysatoren unterstützen, die die Funktion natürlicher Enzyme zur Wasserspaltung übernehmen. Der in der Photosynthese enthaltene Teilschritt der Oxidation von Wasser, bei der dieses in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird, ist für die Erzeugung auf „grünem Wasserstoff“ auch als einzelne Reaktion von hohem Interesse. Mit den heutzutage bekannten Katalysatoren geht bei diesem Schritt jedoch eine große Menge Energie verloren. Können mit Hilfe von Quantencomputern bessere Katalysatoren gefunden werden, wird auch Wasserstoff als alternativer grüner Energielieferant realistischer.

Small modular reactors (SMR)

Die friedliche Nutzung der Kernenergie wird vor allem in Deutschland seit Beginn sehr kontrovers diskutiert. Nach der Nuklearkatastrophe von Fukushima wurde

im Jahr 2011 endgültig beschlossen, bis zum 31. Dezember 2022 sämtliche Reaktoren abzuschalten. Deren Grundlastfunktion wird ab diesem Zeitpunkt von Kohle- und Gaskraftwerken übernommen.

Vor allem die USA und Frankreich forschen an neuartigen Reaktortypen, mit denen die Sicherheit der Energieversorgung und die des Betriebs gleichermaßen gewährleistet werden können. Die „kleinen modularen Reaktoren“ sind Kernspaltungsreaktoren in Miniaturform, die in Werken in Massenproduktion vorgefertigt und dann – i.d.R. mit LKWs – zum Einsatzort gebracht werden. In den SMR wird mit anderen Zuständen und Temperaturen gearbeitet als bei herkömmlichen Reaktoren, wodurch eine Umwandlung langlebiger radioaktiver Stoffe in kurzlebige erfolgt. Für die Entsorgung am Ende der Lebenszeit werden die Module zu einer entsprechenden Fabrik zurückgeführt. Ziel ist die Gewinnung von Energie mit geringen CO₂-Footprint und sauberer Entsorgung ebenso wie erhöhte Sicherheit und geringe Kosten.

Tatsächlich könnten diese Reaktoren eine wichtige Lücke in der Energieversorgung schließen, und damit signifikant zur Vermeidung des Klimawandels beitragen: Zwar geht der Ausbau der erneuerbaren Energien in vielen Teilen der Welt engagiert voran. Gerade aber die weit verbreiteten Windenergie- und Photovoltaikanlagen sind „fluktuierend“, d.h. können in bestimmten Situationen („Dunkelflaute“) keine oder nur geringe Mengen elektrischer Energie produzieren. Nukleare Kraftwerke hingegen sind grundlastfähig, und SMRs sind – anders als ihre großen Geschwister – schnell an- und abschaltbar, können also flexibel die aus externen Faktoren bestimmten Unterversorgungen ausgleichen oder aber kurzfristige Lastspitzen auffangen. SMRs können daher eine sinnvolle Ergänzung zur erneuerbaren Energiegewinnung darstellen. Erste Unternehmen setzen bereits auf die Karte SMR – Rolls Royce etwa plant den Einsatz erster Modelle bereits ab 2029. Die USA und neun weitere Länder starteten im Mai 2018 eine Initiative zur Nutzung der „Nuklearenergie als Klimaschützer“, bei der insbesondere Investitionen in Small Modular Reactors angekündigt wurden.

Die Idee der SMRs ist bereits viele Jahrzehnte alt. Die meisten neueren Konzepte sind über das Designstadium bisher kaum hinausgekommen. Jedoch ist die Erforschung der Systeme heute – vor dem Hintergrund des immer sichtbaren Klimawandels und seinen Folgen – in vollem Gange. Entwicklung, Test und Zulassungsverfahren könnten vermutlich radikal beschleunigt werden, wenn die Möglichkeiten ausgefeilter Simulationen um Molekülniveau umfangreicher und vor allem „echtzeitfähiger“ wären: Atomzerfallsprozessen gehören zum Gebiet von Quantenphysik und Quantenchemie. Genau hierfür sind Quantencomputer optimal – sie sind „by design“ perfekt für die Simulation dieser Prozesse geeignet. In komplexen Simulationen könnten nicht nur die chemischen und physikalischen Prozesse für

das Design solcher Reaktoren optimiert werden, vielmehr könnten sicherheitstechnische Fragen mit hoher Zuverlässigkeit in der „virtuellen Realität“ untersucht werden. Sicherheitsprüfungen werden ohne Gefahren durchführbar, und die Testszenarien gehen bis hin zur Simulation von etwaigen Katastrophenfällen, ihre Früherkennung und ihrer Behandlung.

Geoengineering

Die Emissionen klimaschädlicher Gase haben in den vergangenen Jahren global betrachtet zu- und nicht abgenommen. Die Programme der großen Emittenten zur klimaneutralen Transition ihrer Volkswirtschaften sind leider nicht ehrgeizig genug, insbesondere was die zeitliche Planung der Maßnahmen betrifft. Ein Beispiel ist der für 2038 geplante Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland.

Da gleichzeitig die existenzbedrohenden Auswirkungen des Klimawandels wie Dürrezeiten, Starkregenereignisse und die Überflutung küstennaher Siedlungsbereiche immer direkter erlebbar werden, ist es nicht unwahrscheinlich, dass Regierungen unter dem Druck ihrer Bürger:innen zum relativ einfach und schnell verfügbaren Werkzeug des Geoengineerings greifen werden um der Erderwärmung entgegen zu wirken. Ein Beispiel ist die kontrollierte Einbringung von Aerosolen wie Calciumkarbonat oder Aluminiumoxid in die Stratosphäre.

Das Weltklima ist ein komplexes dynamisches System. Trotz seiner Trägheit ist es in mathematischem Sinne chaotisch, bereits vergleichsweise kleine Steuereingriffe können langfristig sehr große, unter Umständen unumkehrbare Auswirkungen haben. Es ist deshalb unabdingbar, dass man vor Maßnahmen des Geoengineerings deren Konsequenzen in Simulationen ermittelt. Der Quantencomputer kann hier durch seine inhärent parallele Arbeitsweise große Hilfestellung bieten.



Mobilität, Ernährung und Life Sciences

Kondensstreifenoptimierung im Flugverkehr

Verkehrsflugzeuge mit Strahltriebwerken emittieren neben Kohlendioxid, Rußpartikeln und weiteren Luftschadstoffen auch große Mengen Wasserdampf. In bestimmten atmosphärischen Situationen ist das Kondensat als Kondensstreifen sichtbar. Diese anthropogenen Wolken können – ebenso wie natürliche Wolken – eine wärmende oder eine kühlende Wirkung für das Klima entfalten, je nach Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung. Im Mittel überwiegt im globalen Flugbetrieb die wärmende Wirkung. Dieser Beitrag des Fliegens zur Erderwärmung ist wesentlich höher als der durch die CO₂-Emission verursachte, man beschreibt die Gesamtwirkung als Radiative Forcing

Index, der im Flugverkehr den Wert 2.7 erreicht. Die Umstellung des Antriebs auf SAF oder E-Fuels mit neutraler Kohlenstoffbilanz löst das Klimaproblem des Fliegens also nur zu einem Teil.

Wählt man die Flugroute dynamisch, so dass möglichst durch trockene Luftschichten mit darunterliegenden kühlen Luftmassen geflogen wird, dann lässt sich die klimaschädliche Wirkung der Kondensstreifen erheblich reduzieren, in manchen Fällen sogar negieren. Die Wahl einer klimaoptimalen Flugroute muss natürlich innerhalb der Randbedingungen eines sicheren und wirtschaftlichen Flugbetriebs erfolgen, und die potentielle Reduktion der klimaschädlichen Wirkung der Kondensstreifen muss in Relation zum erhöhten Treibstoffverbrauch durch die Verlängerung einer konkreten Flugroute gesetzt werden.

Die Lösung dieser Optimierungsaufgabe muss in Echtzeit erfolgen, da sich die atmosphärische Situation fortlaufend

ändern kann. Das überfordert auch sehr leistungsfähige Digitalrechner. Die Aufgabe lässt sich jedoch als QUBO-Problem formulieren und mit den bereits heute verfügbaren Annealern lösen, die für jedes Flugzeug individuell die klimaoptimale Flugroute berechnen können. Neben der klimaoptimalen Flugroute kann der Quantum-Annealer quasi nebenbei auch noch die Flugrouten so optimieren, dass die Wartezeiten der Passagiere an Umsteigepunkten minimiert wird.

Zelluläre Erzeugung von Lebensmitteln

Die traditionelle Landwirtschaft emittiert große Mengen klimaschädlicher Gase, nicht nur Kohlendioxid, sondern u.a. auch die enorm treibhauswirksamen Stoffe Methan und Distickstoffmonoxid („Lachgas“). Dies gilt unabhängig davon, ob die Nahrungsmittel konventionell oder biologisch-dynamisch erzeugt werden. Gleichzeitig hat die herkömmliche Art der Erzeugung von Lebensmitteln einen großen Flächenbedarf, benötigt viel Wasser und Düngemittel und schädigt durch Herbizide, Pestizide und Nitratüberschüsse die natürliche Umwelt. Gleichzeitig steht die Menschheit vor der Herausforderung den Hunger zu besiegen, obwohl die Weltbevölkerung noch einige Zeit wachsen wird.

Der revolutionäre Ansatz der Cellular Agriculture, hilft uns, diese existenzielle Herausforderung auf der Basis moderner Biotechnologie anzunehmen. Pflanzliche und tierische Nahrungsmittel werden dabei aus Zellkulturen in Nährlösungen aus Stammzellen vervielfältigt und anschließend in Formen gebracht, die uns Menschen vertraut sind. Ein Beispiel ist die Grillscheibe („Patty“) eines Hamburgers. Die bioindustrielle Erzeugung der Lebensmittel ist emissionsfrei und kommt ohne Giftstoffe zur Bekämpfung von Schädlingen aus. Die Produkte sind gesünder als die konventionell erzeugten. Ihre Herstellung kann in Produktionsstätten erfolgen, die nahe bei den Konsumenten errichtet werden, z.B. in dafür umgewidmeten Bürogebäuden, für die in der Post-Corona-Zeit kein Bedarf mehr besteht. Das reduziert den zur Verteilung der Lebensmittel erforderlichen Verkehr.

Die Zelluläre Agrikultur stellt große Anforderungen an die verfahrenstechnische Steuerung der biochemischen Prozesse. Die denkbaren Alternativen müssen parallel im Rechner evaluiert werden, da die sequentielle Durchführung und Auswertung von Experimenten zu viel Zeit in Anspruch nehmen. Und Zeit ist das wertvollste Gut im Kampf um die Erreichung des 1.5 °C Ziels, zu dem sich die Staatengemeinschaft bekannt hat. Der Quantencomputer kann hierzu einen entscheidenden Beitrag leisten, und zwar bereits mit dem aktuell zur Verfügung stehenden Quantenvolumen.

Medikamenten- und Impfstoffforschung

Anlässlich der Corona-Pandemie in 2019–2021 wurde der Weltöffentlichkeit bewusst, wie aufwendig und langwierig die Entwicklung von Medikamenten und Impfstoffen ist. Vor allem die Phase der Identifizierung potenzieller Wirkstoffe nimmt eine lange Zeit in Anspruch und endet in den meisten Fällen damit, dass zunächst verheißungsvoll erscheinende Kandidaten aussortiert werden müssen. Diese aufwendigen Prozesse resultieren in enormen Kosten und Umweltbelastungen. Quantencomputer versprechen hier massive Vorteile. Komplexe Moleküle und ihre Wechselwirkungen mit anderen Stoffen können auf Quantencomputern effizient simuliert werden, so dass Wirkstoffe bereits in frühen Entwicklungsphasen zielführend evaluierbar sind. Durch die frühere Identifizierung weniger, dafür passgenauerer Wirkstoffkandidaten wird der Aufwand für Forschung insgesamt minimiert und die einzelnen Entwicklungsphasen verkürzt. Als positiver

Nebeneffekt werden auch Tierversuche und frühe ergebnislose Teststudien mit Freiwilligen in der Anzahl reduziert.

Neben Massenwirkstoffen wie für Impfstoffe und allgemeine Medikamente, können mit Hilfe von präzisen medizinischen Quantensensoren und anschließender Quantensimulation auch spezielle Wirkstoffe für individuelle Leiden identifiziert werden. Die Vision ist hier, dass Patienten auf Basis von Blut- oder Gewebeproben für sie passgenaue Medikationszusammensetzungen erhalten und diese dann individuell produzieren lassen können, oder auch zu Hause im medizinischen 3D-Drucker selbst herstellen.

Fazit

Der Quantencomputer hilft Antworten auf die Überlebensfrage der Menschheit zu finden: Wie können wir Wirtschaft und Gesellschaft nachhaltig gestalten und trotzdem Lebensqualität für alle Bewohner unseres Planeten ermöglichen? Bereits heute verfügbare Quanten-Annealer helfen durch ihre Fähigkeit zur Lösung statischer Optimierungsaufgaben bei der Einsparung

von Energie und Material in der Produktion und Logistik von Gütern. Zukünftige Generationen von Quantencomputern ermöglichen die echtzeitfähige Lösung von Aufgaben, die bislang nur in zeit- und ressourcenaufwändigen Prozessen bearbeitbar sind. Wir von Deloitte Quantum.Link helfen Ihnen, Ihr Unternehmen in diese Zeit des nachhaltigen Wirtschaftens zu führen.



Ansprechpartner



Dr.-Ing. Markus A. Stulle
Director
EMEA IoT CoP Lead
Tel: +49 89 290367390
mstulle@deloitte.de



Dr. Barbara Wellmann
Senior Manager
Operational Lead Quantum.Link
Tel: +49 30 254682857
bwellmann@deloitte.de



Cathleen Sudau
Manager
Climate & Sustainability Services
Tel: +49 69 756956210
csudau@deloitte.de



Ko-Autorin dieser Veröffentlichung ist **Prof. Dr. Sabina Jeschke – Deloitte Senior Advisor** für die Zukunftsthemen Quantum Computing, Künstliche Intelligenz und digitale Transformation.

Unser Dank gilt Finn Piltz und Enrico Wendrich für die wertvolle Unterstützung, die diesen Bericht möglich gemacht hat.

Deloitte.

Deloitte bezieht sich auf Deloitte Touche Tohmatsu Limited („DTTL“), ihr weltweites Netzwerk von Mitgliedsunternehmen und ihre verbundenen Unternehmen (zusammen die „Deloitte-Organisation“). DTTL (auch „Deloitte Global“ genannt) und jedes ihrer Mitgliedsunternehmen sowie ihre verbundenen Unternehmen sind rechtlich selbstständige und unabhängige Unternehmen, die sich gegenüber Dritten nicht gegenseitig verpflichten oder binden können. DTTL, jedes DTTL-Mitgliedsunternehmen und verbundene Unternehmen haften nur für ihre eigenen Handlungen und Unterlassungen und nicht für die der anderen. DTTL erbringt selbst keine Leistungen gegenüber Kunden. Weitere Informationen finden Sie unter www.deloitte.com/de/UeberUns.

Deloitte bietet branchenführende Leistungen in den Bereichen Audit und Assurance, Steuerberatung, Consulting, Financial Advisory und Risk Advisory für nahezu 90% der Fortune Global 500®-Unternehmen und Tausende von privaten Unternehmen an. Rechtsberatung wird in Deutschland von Deloitte Legal erbracht. Unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter liefern messbare und langfristig wirkende Ergebnisse, die dazu beitragen, das öffentliche Vertrauen in die Kapitalmärkte zu stärken, die unsere Kunden bei Wandel und Wachstum unterstützen und den Weg zu einer stärkeren Wirtschaft, einer gerechteren Gesellschaft und einer nachhaltigen Welt weisen. Deloitte baut auf eine über 175-jährige Geschichte auf und ist in mehr als 150 Ländern tätig. Erfahren Sie mehr darüber, wie die mehr als 345.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Deloitte das Leitbild „making an impact that matters“ täglich leben: www.deloitte.com/de.

Diese Veröffentlichung enthält ausschließlich allgemeine Informationen und weder die Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft noch Deloitte Touche Tohmatsu Limited („DTTL“), ihr weltweites Netzwerk von Mitgliedsunternehmen noch deren verbundene Unternehmen (zusammen die „Deloitte Organisation“) erbringen mit dieser Veröffentlichung eine professionelle Dienstleistung. Diese Veröffentlichung ist nicht geeignet, um geschäftliche oder finanzielle Entscheidungen zu treffen oder Handlungen vorzunehmen. Hierzu sollten Sie sich von einem qualifizierten Berater in Bezug auf den Einzelfall beraten lassen.

Es werden keine (ausdrücklichen oder stillschweigenden) Aussagen, Garantien oder Zusicherungen hinsichtlich der Richtigkeit oder Vollständigkeit der Informationen in dieser Veröffentlichung gemacht, und weder DTTL noch ihre Mitgliedsunternehmen, verbundene Unternehmen, Mitarbeiter oder Bevollmächtigten haften oder sind verantwortlich für Verluste oder Schäden jeglicher Art, die direkt oder indirekt im Zusammenhang mit Personen entstehen, die sich auf diese Veröffentlichung verlassen. DTTL und jede ihrer Mitgliedsunternehmen sowie ihre verbundenen Unternehmen sind rechtlich selbstständige und unabhängige Unternehmen.