

acatech

# HORIZONTE

## Quantentechnologien



Warum sind Quanten wichtig?

---

Grundlagen für das Verständnis  
der Quantentechnologien

Quantentechnologien der ersten und  
zweiten Generation

---

Gestaltungsspielräume und  
Erwartungsmanagement

Mit der vorliegenden Publikationsreihe untersucht acatech bedeutende Technikfelder, die sich klar am Horizont abzeichnen, deren Auswirkungen aber noch geklärt werden müssen. Diese Technikfelder werden in acatech HORIZONTE fundiert und anschaulich aufbereitet. In diesen Prozess fließen der aktuelle Stand der internationalen Forschung, Entwicklung und Anwendung sowie die Wertschöpfungspotenziale der Technologien ein. Darüber hinaus nehmen die acatech HORIZONTE ethische, politische und gesellschaftliche Fragen sowie denkbare Entwicklungen und Gestaltungsoptionen in den Blick. Mit den acatech HORIZONTEN möchte die Akademie die Diskussion über neue Technologien anregen, politische Gestaltungsräume aufzeigen und Handlungsoptionen formulieren – und so einen Beitrag für eine vorausschauende Innovationspolitik leisten.

## Quantum-Safe-Kryptografie

Auch wenn es zum Verwechseln ähnlich klingt, bezeichnet die „Quantum-Safe-Kryptografie“ ein ganz anderes Verfahren als die Quantenkryptografie, das zudem nichts direkt mit Quanten zu tun hat. Es geht vielmehr darum, gegenwärtige Verschlüsselungsmethoden „quantensicher“ zu machen. Der Grund, warum unsere gebräuchlichsten Kryptografieverfahren so leicht von einem Quantencomputer geknackt werden können, ist, dass dieser potenziell über eine extrem hohe Rechenleistung verfügt. Unsere Verschlüsselungsmethoden beruhen unter anderem auf dem mathematischen Problem der Primfaktorzerlegung, für dessen Lösung normale Computer extrem viel Zeit benötigen. Ein universeller Quantencomputer mit ausreichender Anzahl an Qubits könnte dieses Problem allerdings durch Anwendung des sogenannten Shor-Algorithmus sehr effektiv lösen. Der amerikanische Mathematiker Peter Shor entwickelte diesen Algorithmus bereits in den 1990er Jahren.<sup>26</sup> Für kleine Primzahlen wurde experimentell gezeigt, dass der Shor-Algorithmus erfolgreich auf einem Quantencomputer durchgeführt werden kann.<sup>27</sup>

„Wir müssen uns jetzt schon Gedanken machen über die Verschlüsselung von morgen und dürfen nicht warten, bis es zu spät ist. Beim Internet haben wir es verpasst, Sicherheit von Anfang an mitzudenken.“

Quantum-Safe-Kryptografie, also quantensichere Kryptografie, befasst sich mit der Suche nach Verschlüsselungsalgorithmen, die gegen Entschlüsselungsversuche sowohl von klassischen als auch von Quantencomputern resistent sind. Die Idee ist, andere mathematische Probleme als die Primfaktorzerlegung zur Verschlüsselung zu verwenden, die von einem Quantencomputer nicht so schnell berechnet werden können. Dabei tapen wir allerdings etwas im Dunkeln, da wir noch nicht sicher wissen, wie viel Zeit ein Quantencomputer für welche Berechnungen benötigen wird. Deshalb wird an unterschiedlichen Ansätzen getüftelt – in der Hoffnung, dass sich einer davon gegen einen möglichen Quantencomputer in der Zukunft behaupten kann. Bei der Quantum-Safe-Kryptografie geht es vor allem darum, die Sicherheit von morgen schon heute mitzudenken und sich auf zukünftige Herausforderungen vorzubereiten – was nicht heißt, dass die Verfahren nicht bereits heute angewandt werden könnten, um unsere Kommunikation schon jetzt sicherer zu gestalten. Deswegen ist die Bezeichnung „Post-Quantum-Kryptografie“, die für diesen Bereich häufig auch verwendet wird, eher irreführend.

## Implikationen für Wirtschaft und Gesellschaft

Ob wir jemals mit Quantenkommunikation oder quantensicherer Kryptografie eine komplett abhörsichere Kommunikation für alle realisieren können, bleibt ungewiss. Am Ende müssen sich die Verfahren für die Anwender rechnen, das heißt einen Mehrwert bringen. Das mag in manchen Fällen durchaus der Fall sein, denn der Bedarf an Quantenkryptografie ist teilweise tatsächlich schon in sicherheitsrelevanten Bereichen vorhanden. Mit entsprechendem Aufwand können bestimmte wichtige Kanäle, zum Beispiel zwischen wichtigen Behörden, sicherer gestaltet werden. Ähnlich wie beim Quantencomputer könnte es letztlich eine strategische Entscheidung sein, die Technologien dafür hierzulande weiterzuentwickeln oder sie von außen einzukaufen. Gegenwärtig gibt es in Deutschland große Entwicklungsbemühungen in Richtung Quantenkryptografie und auch Quantum-Safe-Kryptografie.<sup>28</sup>

### 3.2.3 Quantenmetrologie, Quantensensorik und quantenbasierte Bildgebung

Was sind Metrologie, Sensorik und Bildgebung, und wie hängen sie zusammen? Während die Metrologie die Wissenschaft des Messens ist, sind die Sensoren die Geräte, mit denen relevante Messgrößen wie beispielsweise Temperatur oder Beschleunigung im Alltag tatsächlich erfasst werden. Auch für die Bildgebung braucht es einen Sensor, meistens einen optischen Sensor in Form eines Kamerachips. Setzt man ein „Quanten-“ vor die Begriffe, also „Quantenmetrologie“, „Quantensensorik“ und „Quantenbildgebung“, bedeutet das, dass die Prozesse des Messens und Erfassens jeweils mithilfe von Quanten geschehen und deshalb sehr genau sind.

#### Quantenmetrologie

Abstände, Temperatur, Zeit, Druck, Gewicht oder Geschwindigkeit – über all diese physikalischen Größen möchten wir in unserem Alltag oft sehr genau Bescheid wissen. Niemand würde sich gerne in ein Auto ohne Tachometer setzen oder ein Medikament einnehmen, ohne die korrekte Dosierung zu kennen.

Die Quantenmetrologie, auch „quantenbasierte Metrologie“ genannt, erforscht, wie Quanteneffekte genutzt werden

#### Kommt Zeit, kommt Caesium

Der Begriff „Caesiumübergangsfrequenz“ klingt sperrig und ist wohl den wenigsten bekannt. Caesium ist ein Metall. Es verhält sich in seiner Dampfphase (nicht, wenn es als physisches Metall vorliegt) im Grunde wie ein Zwei-Zustands-System: Es hat zwei Energiezustände, zwischen denen es hin- und herspringen kann. Strahlt man nun Mikrowellen mit einer ganz bestimmten Frequenz (9.192.631.770 Hertz, um genau zu sein) auf das Caesiumatom, dann springt es von einem Energiezustand in den anderen. 1967 wurde festgelegt, dass eine Sekunde genau die Zeitdauer ist, in der diese Mikrowelle, die das Caesiumatom von einem Zustand in den anderen „schubst“, 9.192.631.770 Mal nach oben und wieder nach unten „schwingt“.<sup>8</sup>

Warum wurde gerade die Caesiumübergangsfrequenz für die Definition der Sekunde herangezogen? Die Wahl fiel unter anderem deshalb darauf, weil der Übergang des Caesiumatoms zwischen den beiden Zuständen durch Mikrowellen angeregt wird. Zur Zeit der Entwicklung der ersten Atomuhren, also in den 1960er Jahren, gab es bereits die Technologie, die es erlaubte, den Frequenzbereich der Mikrowellen zu nutzen.

Caesium liefert demnach eine genaue Definition der Sekunde, die mit 16 Nachkommastellen die am genauesten realisierte Einheit darstellt. Dank deren Definition konnten im Laufe der Zeit nun Größen wie ein Meter genau festgelegt werden: Wie weit kommt das Licht in einem bestimmten, sehr kleinen Sekundenbruchteil? Hier war die Naturkonstante der Lichtgeschwindigkeit maßgebend (im wahrsten Sinne des Wortes).

können, um Messungen noch viel genauer zu machen als bisher. Dabei profitieren wir davon, dass man ganz genau weiß, wie ein Quantensystem aufgebaut ist und welche Eigenschaften es hat, zum Beispiel welche Übergangsfrequenz es aufweist (siehe Kasten „Kommt Zeit, kommt Caesium“). Quantenmetrologie revolutionierte bereits geradezu die Genauigkeit von Messungen und die Festlegung von Naturkonstanten wie der Lichtgeschwindigkeit und ermöglichte es so, ein universelles Einheitensystem aufzubauen.

Die physikalischen Einheiten sind im sogenannten „SI-System“ (vom französischen „Système International d’Unités“) festgelegt. Den Begriff kennen zwar wohl die wenigsten, was dahinter steckt, begegnet uns allen jedoch täglich. Das SI-System beschreibt einheitlich alle physikalischen Einheiten durch sieben Basisgrößen: Sekunde für die Zeit, Meter für die Länge, Kilogramm für die Masse, Ampere für die Stromstärke, Kelvin für die Temperatur, Mol für die Stoffmenge und Candela für die Lichtstärke. Aus diesen sieben Basisgrößen lassen sich alle anderen physikalischen Größen ableiten, zum Beispiel die Geschwindigkeit eines Objekts, die sich aus Meter pro Sekunde zusammensetzt.<sup>29</sup>

„Das SI-System ist so etwas wie die  
Währungsunion der Physiker.“

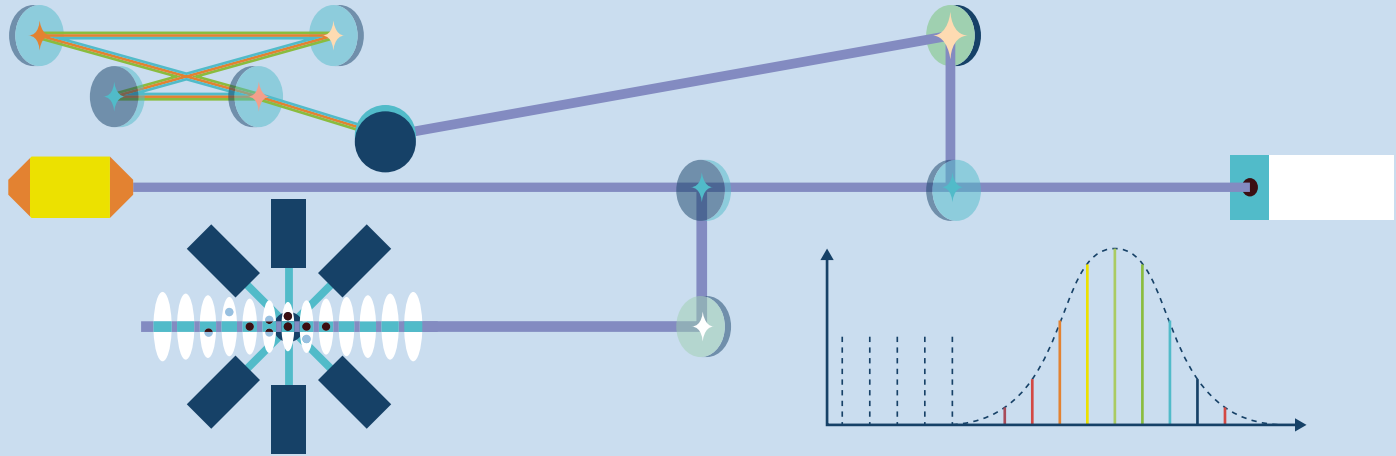
Jede der sieben Basisgrößen basiert auf Naturkonstanten und ist damit eindeutig und präzise festgelegt. Erst 2019 wurde die vollständige Definition aller Basisgrößen durch Naturkonstanten umgesetzt. Dies war nur aufgrund von Fortschritten in der Quantenphysik in den vorangegangenen Jahrzehnten möglich.

So können heute auch alle elektrischen Einheiten – also Spannung, Stromstärke und Widerstand – über Quanteneffekte miteinander verbunden werden und bilden damit einen Teil des Systems. Die Grundlagen dafür schafften der Josephson-Effekt (für den Brian D. Josephson 1973 den Nobelpreis für Physik erhielt) und der Quanten-Hall-Effekt (für den Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis für Physik erhielt).

#### Quantensensorik

Die Waage in unserer Küche hilft uns beim Kuchenbacken, und anhand des Thermometers im Backofen können wir die richtige Temperatur einstellen. Mag die heutige Sensortechnik fürs Kuchenbacken reichen, gibt es Felder wie die medizinische Diagnostik oder die Erdbeobachtung, in denen heutige Sensoren an ihre Grenzen stoßen, da hier immer präzisere Messungen erforderlich werden.

## Die Atomuhr - wichtig für unseren Alltag



### Der Frequenzkamm als metrologische Grundlage der optischen Atomuhr

Licht besteht aus Photonen, die sich wie Teilchen und Welle gleichzeitig verhalten können. Dabei besitzt jede Welle auch eine Frequenz, die angibt, wie viele Schwingungen sie pro Sekunde macht.

Sichtbares Licht besteht aus Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen, die wir als unterschiedliche Farben wahrnehmen. So schwingt rotes Licht langsamer als blaues Licht, besitzt also eine niedrigere Frequenz.

Um die Frequenz von Licht (und auch allgemein von elektromagnetischer Strahlung) sehr präzise zu messen, benötigt man ein besonderes „Lineal“: den Frequenzkamm.<sup>f</sup> Möchte man die Frequenz eines anderen Lasers messen, überlagert man das Licht des Frequenzkamms mit dem Licht des Lasers, indem man sie gemeinsam einem Detektor zuführt. Über das elektrische Signal, das im Detektor entsteht, kann man dann die Frequenz des zu messenden Lasers präzise bestimmen.

Dadurch lassen sich noch viel genauere optische Atomuhren herstellen, die unter anderem bei der Satellitennavigation eine wichtige Rolle spielen. Für die Erfindung der Frequenzkammtechnik – die erst in den späten 1990er Jahren erfolgte – erhielt Theodor Hänsch 2005 den Nobelpreis in Physik.

### Präzise Standortbestimmung als Anwendung einer Atomuhr

Atomuhren sind die genauesten Uhren der Welt. Ohne es zu wissen, benutzen wir sie tagtäglich, denn sie sind die Grundlage präziser Standortbestimmungen durch die Navigationssysteme GPS oder Galileo (GNSS). Rund 400 Atomuhren weltweit erzeugen gemeinsam die international verbindliche Zeit, und jeder kann sie in seiner Funkuhr einfach abrufen. Auch wenn die Atomuhr nicht so aussieht wie die gewöhnliche Armband- oder Standuhr, funktioniert sie nach dem gleichen Prinzip: Sie misst Zeitintervalle. Was bei der Standuhr die Frequenz eines schwingenden Pendels ist, entspricht in der Atomuhr der Übergangsfrequenz, wenn ein Elektron in einen anderen Zustand springt (siehe auch „Zwei-Zustands-System“, Kapitel 2.2). Hätten seit Beginn des Universums (vor 13,7 Milliarden Jahren) optische Atomuhren mit dem Ticken begonnen, würden sie seitdem nur eine Sekunde falsch gehen.<sup>8</sup>

Noch sind keine optischen, sondern andere Arten von Atomuhren in um die Erde kreisenden Satelliten verbaut, doch zukünftig werden optische Atomuhren wegen ihrer noch höheren Genauigkeit für die Standortbestimmung verwendet werden.

**f** Um diesen Frequenzkamm zu erzeugen, benötigt man einen speziellen Laser, der eine Serie extrem kurzer Laserpulse in extrem genau kontrollierten Zeitabständen erzeugt. Das Farbspektrum des Laserpulses setzt sich dann aus einem dichten Kamm einzelner Frequenzen zusammen, deren Abstände äußerst präzise definiert sind – das ideale „Lineal“ zur Messung optischer Frequenzen.

Die Quantensensorik nutzt die hohe Empfindlichkeit von Quantensystemen gegenüber kleinsten Einflüssen wie elektrischen oder magnetischen Störungen. Diese Empfindlichkeit, die bei der Entwicklung von Quantencomputern, die aus vielen Qubits bestehen, eine große Herausforderung darstellt (siehe Kapitel 3.2.1), ist für die Quantensensorik ein Segen, denn sie erlaubt in Kombination mit anderen Faktoren die Entwicklung von Sensoren mit bisher nie da gewesener Messgenauigkeit. Erste technisch anwendbare Quantensensoren für Magnetfelder wurden bereits 1964 realisiert.<sup>30</sup> Die Empfindlichkeit dieser Magnetfeldsensoren ist heute so groß, dass sogar Körperfunktionen oder Gehirnströme über deren externe Magnetfelder gemessen werden können. Neueste Entwicklungen basieren unter anderem auf sogenannten Stickstoff-Fehlstellen (oder kurz „NV-Zentren“) in Diamanten. Dabei handelt es sich im Prinzip um einen Strukturfehler in einem Diamanten, in den man ein Quantensystem „einsperrt“. Dadurch können hochsensitive magnetische Resonanzmessungen bei Raumtemperatur durchgeführt werden, auf deren Basis auch die Bestimmung von Magnetfeldern und der Temperatur möglich ist (siehe Schaubild auf Seite 48). Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung von genaueren Sensoren für die Navigation beim autonomen Fahren.

#### **Quantenbasierte Bildgebung**

Ohne Bildgebung blieben viele Fragen unbeantwortet. Egal ob es um das Diagnostizieren von Krankheiten und Knochenbrüchen oder das Verhalten von Bakterien geht, die dabei helfen, neue Medikamente zu entwickeln: Beobachtungen mit bloßem Auge ließen keinerlei zuverlässige Schlüsse zu. Bildgebungsverfahren wie hochauflösende Mikroskope oder MRT eröffneten neue Welten und gaben uns ein neues und vor allem besseres Verständnis von unserer Umwelt.

Mithilfe der sogenannten STED-Mikroskopie („STED“ steht für „Stimulated Emission Depletion“) ist es bereits heutzutage möglich, ein hochauflösendes „Live-Bild“ von einzelnen Körperzellen zu erhalten. Für die Entdeckung und Entwicklung dieser Technologie wurden Stefan Hell, Eric Betzig und William Moerner 2014 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet.<sup>32</sup> Die STED-Mikroskopie baut auf der Lichtmikroskopie auf und

erlaubt einen enormen Sprung in der Auflösung von Bildern. Bis dahin dachte man, dass Lichtmikroskope nie über eine gewisse physikalische Grenze hinauskommen könnten. Der Trick der STED-Mikroskopie besteht in einer geschickten Verwendung von Fluoreszenzfarbstoffen und Lasern, die auf Erkenntnissen und Fortschritten in der Quantenoptik basiert. Dabei werden jedoch relativ hohe Laserintensitäten benötigt, die zum einen den Zellen schaden und zum anderen den Fluoreszenzfarbstoff ausbleichen können.<sup>33</sup>

Hier setzt die quantenbasierte Bildgebung (englisch: „Quantum Enhanced Imaging“) an, deren Ziel es ist, in den kommenden Jahren eine weitere, neue Ära der Bildgebungsverfahren einzuläuten. Durch Nutzung von Quanteneffekten könnte es in naher Zukunft möglich sein, Bilder zu erzeugen, die selbst mit modernsten Mikroskopen nicht generiert werden können (siehe Schaubild auf Seite 50).

#### **Implikationen für Wirtschaft und Gesellschaft**

Vor allem in der Magnetfeld- und der Schwerefeldmessung hat die neue Generation der Quantensensoren das Potenzial, aktuelle Sensorkonzepte um ein Vielfaches zu übertreffen. Fortschritte in der Magnetfeldmessung könnten vor allem in der medizinischen Diagnostik zur Messung von Magnetfeldern des Gehirns und von Gehirnströmen von Nutzen sein. Eine verbesserte Schwerefeldmessung der Erde kann hingegen helfen, ein besseres Bild des Erdinneren zu liefern. Dies könnte vor allem als Frühwarnsystem bei Erdbeben und Vulkanausbrüchen, beim Aufspüren von Bodenschätzen oder zur Detektion von Löchern im Untergrund helfen.

Die Effekte auf die Gesellschaft könnten recht groß sein. Sollte man durch Quantensensorik riesige Vorkommen an neuen Ressourcen entdecken oder Krankheiten frühzeitig besser erkennen können, würde die Gesellschaft sehr davon profitieren.

„Deutschland ist ein Sensorland.“

Im Gegensatz zur Entwicklung von Quantencomputern oder der Quantenkryptografie sind die Einstiegshürden für Firmen hier relativ gering, da Unternehmen, die bereits im Bereich der Sensorik arbeiten, keine fundamental neue Infrastruktur benötigen. Das soll jedoch nicht heißen, dass Entwicklungen auf dem Gebiet der Quantensensorik einfach wären. Überall werden neue Materialien, neue Sensorkonzepte, neue Algorithmen und neues Wissen gebraucht. Außerdem ist noch nicht vorhersehbar, für welche Anwendungen sich die Quantentechnologien der zweiten Generation kommerziell durchsetzen werden. Das muss die Zukunft zeigen.

# Quantensensorik

Quanten reagieren extrem sensibel auf Umwelteinflüsse. Deshalb können sie sehr gut als Sensoren eingesetzt werden. Doch wie funktionieren Quantensensoren, und wo werden sie angewendet?

## Voraussetzungen für den Bau eines Quantensensors



1 Damit Quantensysteme als Sensoren verwendet werden können, müssen sie von der äußeren Welt abgeschottet werden. Man muss sie sozusagen „einsperren“.



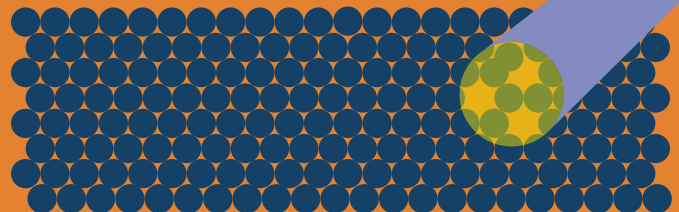
2 Veränderungen in der Quantenwelt können wir nur sehr schwer beobachten, da bereits die schiere Beobachtung den Quantenzustand beeinflusst (siehe Kapitel 2.4). Quanten sind also sehr „scheu“: Man muss die Veränderungen deshalb „indirekt beobachten“.

## Aufbau und Funktionsweise eines Quantensensors

3 Ein Ergebnis bisheriger Forschung ist, dass sich Diamanten, die einen bestimmten Strukturfehler haben, gut dazu eignen, Quantensysteme einzusperren. Durch den Strukturfehler entstehen sogenannte Stickstoff-Fehlstellen-Zentren. Diese kleinen Bereiche im Diamant lassen sich gut als „Gefängniszellen“ für Quantensysteme nutzen.



4 Größen wie Temperatur sowie magnetische und elektrische Felder beeinflussen den Zustand des eingesperrten Quantensystems im Diamant. Aus der Veränderung des Quantensystems in der „Gefängniszelle“ kann man auf Veränderungen der äußeren Welt um den Diamanten schließen, ohne den Beobachtereffekt auszulösen. Durch Kontrolle und Abfrage eines einzelnen, hochempfindlichen Quantensystems gelingt die Messung von kleinsten Effekten, die sonst nicht erfassbar wären.



## Anwendung von Quantensensoren in der Medizin

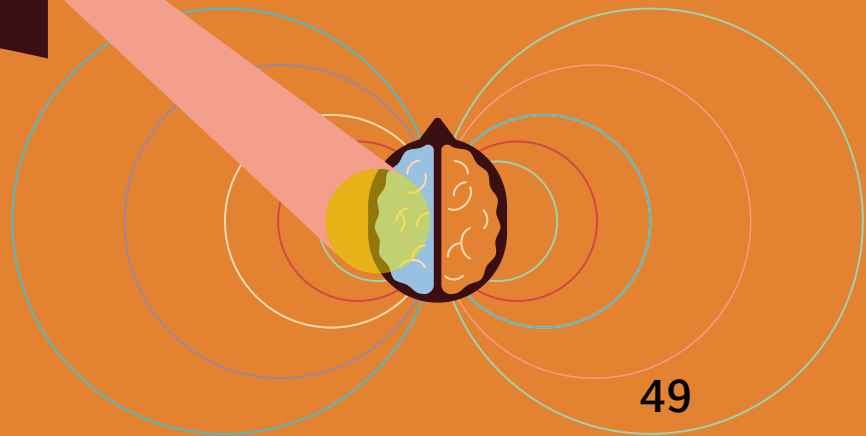
5

In der Medizin ist man auf Sensoren angewiesen. Vom Fieberthermometer bis zum Magnetresonanztomograf (MRT) – all diese Geräte messen Zustände in unserem Körper. Diagnostik und Behandlung von Krankheiten wären ohne Sensoren nicht möglich.



6

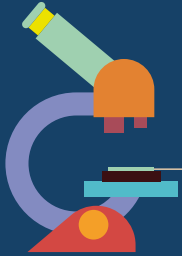
Durch Quantensensoren kann sich die medizinische Diagnostik deutlich verbessern. Sie sind so genau, dass beispielsweise das Magnetfeld unseres Gehirns gemessen werden kann. Dies könnte ein entscheidender Fortschritt für die Behandlung von Krankheiten wie Epilepsie sein. Bisher waren Gehirnstrommessungen sehr umständlich und oft unangenehm für die Patientinnen und Patienten. Könnte man das Magnetfeld mit hochsensiblen Sensoren erfassen, wären diese Unannehmlichkeiten Vergangenheit.



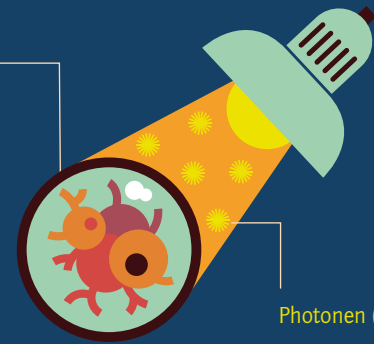


## Klassische Bildgebung

Eine Biologin untersucht mit einem Mikroskop eine Krebszelle, um neue Behandlungsmethoden zu erforschen. Damit sie etwas sehen kann, muss sie die Probe in irgendeiner Form mit Licht bestrahlen.

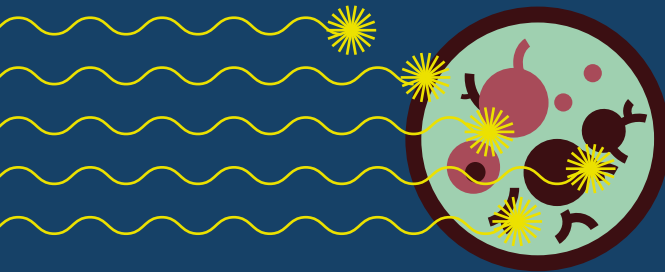


Wenn die Lichtstrahlen die Probe treffen, interagiert die Probe mit dem Licht. Im Prinzip kann man das mit unserer Haut vergleichen, wenn wir uns der Sonne aussetzen. Unsere Haut besteht auch aus einzelnen Zellen und reagiert auf die einfallenden Lichtstrahlen der Sonne.



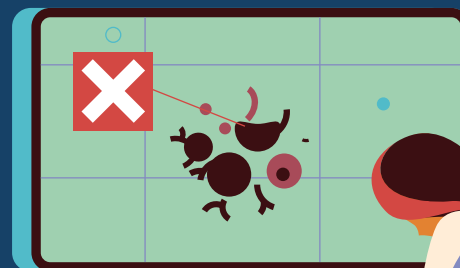
Photonen (= Lichtquanten)

Photonen in zellschädigenden Wellenlängen



Das Problem dabei ist, dass bestimmte Zellen, wie in unserem Fall die Probe der Biologin, sehr lichtempfindlich sind. Ein heute übliches Mikroskop schickt eine sehr große Anzahl von Photonen (= Lichtquanten) aus. Deshalb kann es passieren, dass die Lichtstrahlung des Mikroskops die Probe bei längeren Untersuchungen beschädigt oder zerstört.

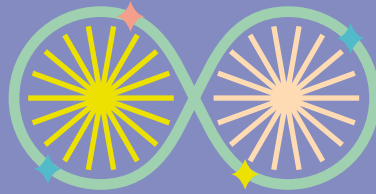
Mit bisherigen Bildgebungsverfahren kann man lichtempfindliche Zellproben also nur über einen begrenzten Zeitraum messen, bevor sie zerfallen. Dabei kann die Beobachtung von Zellen über einen längeren Zeitraum jedoch in manchen Fällen sehr wichtig sein, um beispielsweise Abläufe in den Zellen besser zu verstehen.



## Quantenbasierte Bildgebung

Dank der quantenbasierten Bildgebung könnten wir in Zukunft einzelne Zellen von Lebewesen viel genauer abbilden, als dies aktuell der Fall ist. Wie funktioniert die neue Art der Bildgebung, und was macht sie besser als bisherige Verfahren?

Eine Biologin nutzt die Quantenbildgebungstechnologie zur Untersuchung der Zelle. Sie erzeugt dafür Photonenpaare.



Die Biologin macht sich die Paareigenschaften von Lichtquanten zunutze, indem sie mit dem einen Photon des Paares die Zellprobe bestrahlt. Das andere Photon ist auf eine Kamera gerichtet.

Photonen in sichtbarer Wellenlänge

Photonen in nicht zellschädigender Wellenlänge

So kann sie gezielt die Information des einen Photons (in einem potenziell schwer zu detektierenden Lichtbereich) über das Partner-Photon (in einem potenziell leichter zu detektierenden Lichtbereich) auslesen. Das interagierende Photon wird dabei nie auf die Kamera gebracht, und dennoch entsteht das Bild.

Das Besondere an der quantenbasierten Bildgebung ist: Das Photon, das die Kamera erreicht, interagiert selbst nie mit der Zellprobe, nur sein Partner-Photon hat Kontakt zur Probe. Zudem lässt sich bei der Quantenbildgebung die Lichtmenge reduzieren, wodurch lichtempfindliche Proben geschont werden.



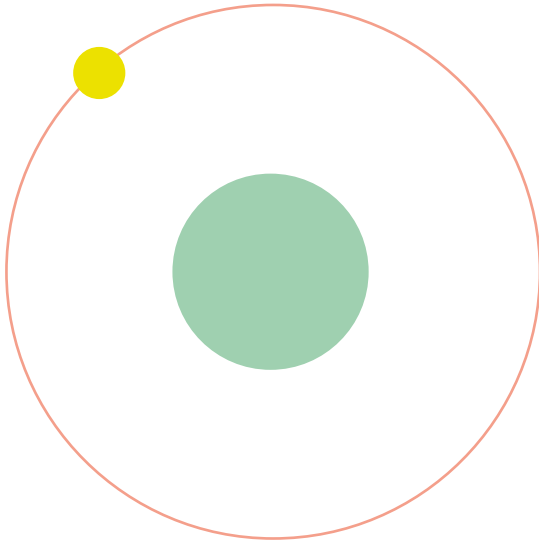
# Literaturverzeichnis

- 1** Buhrman, H., Cleve, R., van Dam, W. (2001): zitieren: „**Letter from Einstein to Max Born, 3 March 1947; The Born-Einstein Letters, Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955, Walker, New York, 1971.**“ In: Quantum Entanglement and Communication Complexity. SIAM Journal on Computing, 30(6):1829-1841.
- 2** Tegmark, M., Wheeler, J. A. (2001): **100 Years of Quantum Mysteries.** Scientific American.
- 3** Jaeger, L. (2018): **Die zweite Quantenrevolution.** Vom Spuk im Mikrokosmos zu neuen Supertechnologien. Springer, Berlin.
- 4** Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (2012): **PTR/PTB: 125 Jahre metrologische Forschung.** Online verfügbar unter [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb\\_mitteilungen/mitt2012/Heft2/PTB-Mitteilungen\\_2012\\_Heft\\_2.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb_mitteilungen/mitt2012/Heft2/PTB-Mitteilungen_2012_Heft_2.pdf), zuletzt geprüft am 03.11.2020.
- 5** Britannica: **Learn about Thomas Young's double-slit experiment which contradicted Newton's theory of light.** Online verfügbar unter <https://www.britannica.com/video/179685/experiment-Thomas-Young>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 6** Jönsson, C. (1961): **Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten.** Zeitschrift für Physik, 161(4):454-474.
- 7** Filk, T. (2019): **Zitate zur Quantentheorie.** Albert Einstein über die Quantenmechanik in einem Brief an Cornelius Lanczos, 21. März 1942, Einstein-Archiv 15-294, zitiert nach Einstein, Briefe, Seite 65, zitiert nach Alice Calaprice (Hrsg.): Einstein sagt, Piper-Verlag, München, Zürich 1996, S. 146. In: Filk, T. (Hrsg.), Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende. Springer Spektrum, Berlin.
- 8** Konitzer, F. (2014): **Atomuhren.** Welt der Physik. Online verfügbar unter <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/atomuhren/atomuhren/>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 9** Seabaugh, A. (2013): **The Tunneling Transistor.** IEEE Spectrum. Online verfügbar unter <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/the-tunneling-transistor>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 10** Brooks, M. (2019): **Beyond quantum supremacy: the hunt for useful quantum computers.** Nature, 574(7776):19-21.
- 11** Krieger, S. (2019): **Künstliche Intelligenz und Quantencomputing: Das Beste aus beiden Welten.** Online verfügbar unter <https://www.f05.uni-stuttgart.de/fakultaet/aktuelles/news/Kuenstliche-Intelligenz-und-Quantencomputing-Das-Beste-aus-beiden-Welten-00003/>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 12** Feynman, R., Mößbauer, R., Summerer, S. (1990): **Vom Wesen physikalischer Gesetze.** Piper, München.
- 13** Olson, E. (2019): **How quantum computers work.** Electronics 360. Online verfügbar unter <https://electronics360.globalspec.com/article/13553/how-quantum-computers-work>, zuletzt geprüft am 14.09.2020.
- 14** Hui, J. (2019): **QC - How to build a Quantum Computer with Superconducting Circuit?** Medium. Online verfügbar unter <https://jonathan.hui.medium.com/qc-how-to-build-a-quantum-computer-with-superconducting-circuit-4c30b1b296cd>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 15** Tavernelli, I. (2018): **Quantum Computing at IBM.** Quantum Computing for High Energy Physics. IBM Research - Zürich. Online verfügbar unter [https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3019718/attachments/1749768/2835637/CERN\\_Tavernelli4\\_1.pdf](https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3019718/attachments/1749768/2835637/CERN_Tavernelli4_1.pdf), zuletzt geprüft am 05.11.2020.
- 16** Castelvecchi, D. (2017): **The strange topology that is reshaping physics.** Nature News, 547(7663):272.
- 17** Bechtold, A., Rauch, D., Li, F., Simmet, T., Ardel, P.-L., Regler, A., Müller, K., Sinitsyn, N. A., Finley, J. J. (2015): **Three-stage decoherence dynamics of an electron spin qubit in an optically active quantum dot.** Nature Physics, 11(12):1005-1008.
- 18** Popkin, G. (2016): **Scientists are close to building a quantum computer that can beat a conventional one.** Online verfügbar unter <https://www.sciencemag.org/news/2016/12/scientists-are-close-building-quantum-computer-can-beat-conventional-one>, zuletzt geprüft am 02.11.2020.
- 19** Giles, M. (2019): **Explainer: What is quantum communication?** MIT Technology Review. Online verfügbar unter <https://www.technologyreview.com/2019/02/14/103409/what-is-quantum-communications/>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 20** Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018): **Q.Link.X. Quantenrepeater für eine abhörsichere Kommunikation über große Distanzen. Q.Link.X, Verbundprojekt Quanten-Link-Erweiterung.** Online verfügbar unter <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/q-link-x>, zuletzt geprüft am 05.11.2020.
- 21** Liao, S.-K., Cai, W.-Q., Liu, W.-Y., Zhang, L., Li, Y., Ren, J.-G., Yin, J., Shen, Q., Cao, Y., Li, Z.-P., Li, F.-Z., Chen, X.-W., Sun, L.-H., Jia, J.-J., Wu, J.-C., Jiang, X.-J., Wang, J.-F., Huang, Y.-M., Wang, Q., Zhou, Y.-L., Deng, L., Xi, T., Ma, L., Hu, T., Zhang, Q., Chen, Y.-A., Liu, N.-L., Wang, X.-B., Zhu, Z.-C., Lu, C.-Y., Shu, R., Peng, C.-Z., Wang, J.-Y., Pan, J.-W. (2017): **Satellite-to-ground quantum key distribution.** Nature, 549(7670):43-47.

- 22** Popkin, G. (2017): **China's quantum satellite achieves 'spooky action' at record distance.** Science, American Association for the Advancement of Science (AAAS), Online verfügbar unter <https://www.sciencemag.org/news/2017/06/china-s-quantum-satellite-achieves-spooky-action-record-distance>, zuletzt geprüft am 27.11.2020.
- 23** Zivkovic, A. B., Hristov, N. P., Jerković, D. D., Bogdanović, B. S., Milutinović, J. M. (2019): **Automatic measurement of precision and accuracy from the hit pattern of small arms using electronic target system.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 659:12015.
- 24** Mavroeidis, V., Vishi, K., Zych, M., Jøsang, A. (2018): **The Impact of Quantum Computing on Present Cryptography.** International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 9(3).
- 25** Bennett, C. H., Brassard, G. (1984): **Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing.** Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing.
- 26** Shor, P. W. (1997): **Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer.** SIAM Journal on Computing, 26(5):1484-1509.
- 27** Martín-López, E., Laing, A., Lawson, T., Alvarez, R., Zhou, X.-Q., O'Brien, J. L. (2012): **Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using qubit recycling.** Nature Photonics, 6(11):773-776.
- 28** Bundesministerium für Bildung und Forschung (2019): **BMBF-Initiative QuNET baut hochsicheres Quantennetzwerk.** Online verfügbar unter <https://www.bmbf.de/de/bmbfinitiative-qunet-baut-hochsicheres-quantennetzwerk-10126.html>, zuletzt geprüft am 27.11.2020
- 29** Bureau International des Poids et Mesures (2019): **The International System of Units (SI).** 9. Auflage.
- 30** Johnson, A. (2014): **How the Ford Motor Co. Invented the SQUID.** IEEE Spectrum. Online verfügbar unter <https://spectrum.ieee.org/tech-history/silicon-revolution/how-the-ford-motor-co-invented-the-squid>, zuletzt geprüft am 06.11.2020.
- 31** Thiel, L., Rohner, D., Ganzhorn, M., Appel, P., Neu, E., Müller, B., Kleiner, R., Koelle, D., Maletinsky, P. (2016): **Quantitative nanoscale vortex imaging using a cryogenic quantum magnetometer.** Nature nanotechnology, 11(8):677-681.
- 32** The Royal Swedish Academy of Sciences: **The Nobel Prize in Chemistry 2014.** The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Chemistry for 2014 to Eric Betzig, Stefan W. Hell and William E. Moerner "for the development of super-resolved fluorescence microscopy". Online verfügbar unter <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/press-26.pdf>, zuletzt geprüft am 27.11.2020
- 33** Fischer, L. (2014): **Bilder von der Grenze zwischen Biologie und Chemie.** Nobelpreise 2014. Spektrum.de. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/news/nobelpreis-fuer-chemie-2014-geht-an-deutschen-und-zwei-amerikanische-mikroskopieforscher/1311875>, zuletzt geprüft am 19.10.2020.
- 34** Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF (2019): **Quantenrevolution in der Medizintechnik kündigt sich an.** Quanten-imagingsystem vom Fraunhofer IOF liefert erste vielversprechende Bilder. Online verfügbar unter <https://www.iof.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2019/Quantenrevolution.html>, zuletzt geprüft am 27.11.2020
- 35** Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018): **Quantentechnologien von den Grundlagen zum Markt.** Rahmenprogramm der Bundesregierung. Online verfügbar unter [https://www.bmbf.de/upload\\_filestore/pub/Quantentechnologien.pdf](https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Quantentechnologien.pdf), zuletzt geprüft am 20.10.2020.
- 36** Deutscher Bundestag (2020): **Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Manuel Höferlin, Frank Sitta, Grigoris Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/17500. Hochsicheres Quantennetzwerk QuNET.** Online verfügbar unter <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/183/1918355.pdf>, zuletzt geprüft am 20.10.2020.
- 37** Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF (2020): **Wie verschränkte Quanten unsere Kommunikation revolutionieren.** Online verfügbar unter <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/quantentechnologie/quantenkommunikation.html>, zuletzt geprüft am 04.11.2020.
- 38** Liao, S.-K., Cai, W.-Q., Handsteiner, J., Liu, B., Yin, J., Zhang, L., Rauch, D., Fink, M., Ren, J.-G., Liu, W.-Y., Li, Y., Shen, Q., Cao, Y., Li, F.-Z., Wang, J.-F., Huang, Y.-M., Deng, L., Xi, T., Ma, L., Hu, T., Li, L., Liu, N.-L., Koidl, F., Wang, P., Chen, Y.-A., Wang, X.-B., Steindorfer, M., Kirchner, G., Lu, C.-Y., Shu, R., Ursin, R., Scheidl, T., Peng, C.-Z., Wang, J.-Y., Zeilinger, A., Pan, J.-W. (2018): **Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network.** Physical review letters, 120(3):30501.
- 39** Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A. (2020): **Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation** (acatech IMPULS), München.
- 40** Bundesministerium der Finanzen (2020): **Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken.** Ergebnis Koalitionsausschuss 3. Juni 2020. Online verfügbar unter <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunkt Papier.pdf>, zuletzt geprüft am 20.10.2020.

# Interviewpartnerinnen und Interviewpartner

Die Festlegung der Inhalte und die Arbeit am Text erfolgten durch die auf Seite 62 vorgestellte Projektgruppe. acatech hat für diese Publikation telefonisch oder persönlich insgesamt 28 Experteninterviews mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft geführt. Die Gespräche fanden zwischen Januar und April 2020 statt. Einige ausgewählte Kerngedanken der Befragten sind im Text als anonymisierte Zitate aufgeführt.



## **Das acatech Präsidium dankt allen Beteiligten sehr herzlich für ihre Teilnahme an den Interviews:**

**Prof. Dr. Monika Aidelsburger**, Gruppenleiterin, Max-Planck-Institut für Quantenoptik/Ludwig-Maximilians-Universität München

**Prof. Dr. Stefanie Barz**, Institut für Funktionelle Materie und Quantentechnologien, Leitung Quantum Information & Technology, Universität Stuttgart

**Prof. Dr. Immanuel Bloch**, Direktor, Max-Planck-Institut für Quantenoptik/Leiter Abteilung Quanten-Vielteilchensysteme, Quantum Optics Group, Ludwig-Maximilians-Universität München

**Dr. Astrid Elbe**, Managing Director, Intel Labs Europe, Intel Deutschland GmbH

**Christin Eisenschmid**, Managing Director, Vice-President und General Manager, Intel Deutschland GmbH

**Prof. Dr. Claudia Felser**, Direktorin, Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe/acatech

**Jens Fuhrberg**, Government Affairs/Public Affairs, Intel Deutschland GmbH

**Verena Fulde**, Pressesprecherin/Corporate Blogger, Deutsche Telekom AG

**Dr. Marc Geitz**, Innovation Architect, Telekom Innovation Laboratories

**Dr. Markus Gräfe**, Head of Quantum-Enhanced Imaging Group, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/Co-Founder, Quantum Optics Jena GmbH

**Prof. Dr. Michael J. Hartmann**, Lehrstuhl für Theoretische Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

**Prof. Dr. Stefan Kück**, EURAMET TC-PR Chair, Leiter der Abteilung Optik, Physikalisch-Technische Bundesanstalt

**Dr. Manfred Lochter**, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)

**Prof. Dr. Hilbert von Löhneysen**, Emeritus, Physikalisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie/acatech

**Dr. Sebastian Luber**, Leitung Quantum iCommunity, Infineon

**Prof. Dr. Dieter Meschede**, Gruppenleiter Quantentechnologie, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn

**Prof. Dr. Stuart Parkin**, Director, Max Planck Institute of Microstructure Physics

**Dr. Thomas Pöppelmann**, Senior Staff Engineer, Infineon Technologies AG

**Dr. Heike Riel**, IBM Fellow, Department Head Science & Technology, IBM Research

**Prof. Dr. Martin Schell**, Institutsleiter, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut

**Prof. Dr. Oliver Schmidt**, Institutsdirektor, Institute for Integrative Nanosciences, Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V./acatech

**Dr. Torsten Siebert**, Quantum Technologies Programme, Fraunhofer-Gesellschaft | Think Tank

**Dr. Thomas Strohm**, Koordinator und Senior Research Scientist für Quantentechnologien, Robert Bosch GmbH

**Dr. Michael Totzeck**, Fellow, Corporate Research and Technology, Carl Zeiss AG

**Prof. Dr. Andreas Tünnermann**, Institutsleiter, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/acatech

**Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Ullrich**, Präsident, Physikalisch-Technische Bundesanstalt/acatech

**Dr. Walter Weigel**, Vice-President & CSO, European Research Institute, Huawei Technologies

**Prof. Dr. Artur Zrenner**, Department Physik, Universität Paderborn/acatech



# Mitwirkende

## **Gesamtleitung acatech HORIZONTE:**

**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier**, Vizepräsident acatech, Seniorprofessor Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn

## **Leitung Innovationsforum:**

**Prof. Dr. Martina Schraudner**, Vorstandsmitglied acatech, Leiterin Fraunhofer Center for Responsible Research and Innovation

## **Projektgruppe Quantentechnologien:**

**Prof. Dr. Stefanie Barz**, Institut für Funktionelle Materie und Quantentechnologien, Leitung Quantum Information & Technology, Universität Stuttgart

**Dr. Astrid Elbe**, Managing Director, Intel Labs Europe, Intel Deutschland GmbH

**Dr. Markus Gräfe**, Head of Quantum-Enhanced Imaging Group, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/Co-Founder, Quantum Optics Jena GmbH

**Prof. Dr. Stefan Kück**, EURAMET TC-PR Chair, Leiter der Abteilung Optik, Physikalisch-Technische Bundesanstalt

**Dr. Thomas Pöppelmann**, Senior Staff Engineer, Infineon Technologies AG

**Dr. Heike Riel**, IBM Fellow, Department Head Science & Technology, IBM Research

**Dr. Thomas Strohm**, Koordinator und Senior Research Scientist für Quantentechnologien, Robert Bosch GmbH

**Dr. Michael Totzeck**, Fellow, Corporate Research and Technology, Carl Zeiss AG

**Prof. Dr. Andreas Tünnermann**, Institutsleiter, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/acatech

**Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Ullrich**, Präsident, Physikalisch-Technische Bundesanstalt/acatech

**Prof. Dr. Artur Zrenner**, Department Physik, Universität Paderborn/acatech (Leiter Projektgruppe)

## **Konzeption, Text und Experteninterviews:**

**Dr. Alexandra Heimisch-Röcker**, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE (Autorin)

**Christina Müller-Markus**, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE (Autorin)

**Vivian Würf**, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE

**Sebastian Grünwald**, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE

## **Mit Unterstützung durch:**

**Iris Michalik**, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE

**Annette Wiedemann**, acatech Geschäftsstelle, Kommunikation HORIZONTE



# acatech -

## Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter [www.acatech.de](http://www.acatech.de).



**HERAUSGEBER:**

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

**ADRESSEN STANDORTE****Geschäftsstelle**

Karolinenplatz 4

80333 München

T +49(0)89 / 520309-0

F +49(0)89 / 520309-900

**Hauptstadtbüro**

Pariser Platz 4a

10117 Berlin

T +49(0)30 / 2063096-0

F +49(0)30 / 2063096-11

**Brüssel-Büro**

Rue d'Egmont / Egmontstraat 13

B-1000 Brüssel

T +32(0)2 / 2 13 81-80

F +32(0)2 / 2 1381-89

horizonte@acatech.de

<https://www.acatech.de/horizonte>

**Empfohlene Zitierweise:**

acatech (Hrsg.): Quantentechnologien (acatech HORIZONTE),

München 2020

**Redaktionelle Bearbeitung:**

Karola Klatt

**Lektorat:**

Lektorat Berlin

**Layout, Satz und Illustrationen:**

Joseph & Sebastian – Grafikdesign, München

**Druck:**

Kern GmbH, Bexbach

**Vorstand i. S. v. § 26 BGB:**

Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Karl-Heinz Streibich,

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl

(Amt ruht derzeit), Dr. Stefan Oschmann, Prof. Dr. Christoph

M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier,

Prof. Dr. Martina Schraudner

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

• 2020

Mehr zu acatech HORIZONTE Quantentechnologien, inklusive der Grafiken, finden Sie auch unter:

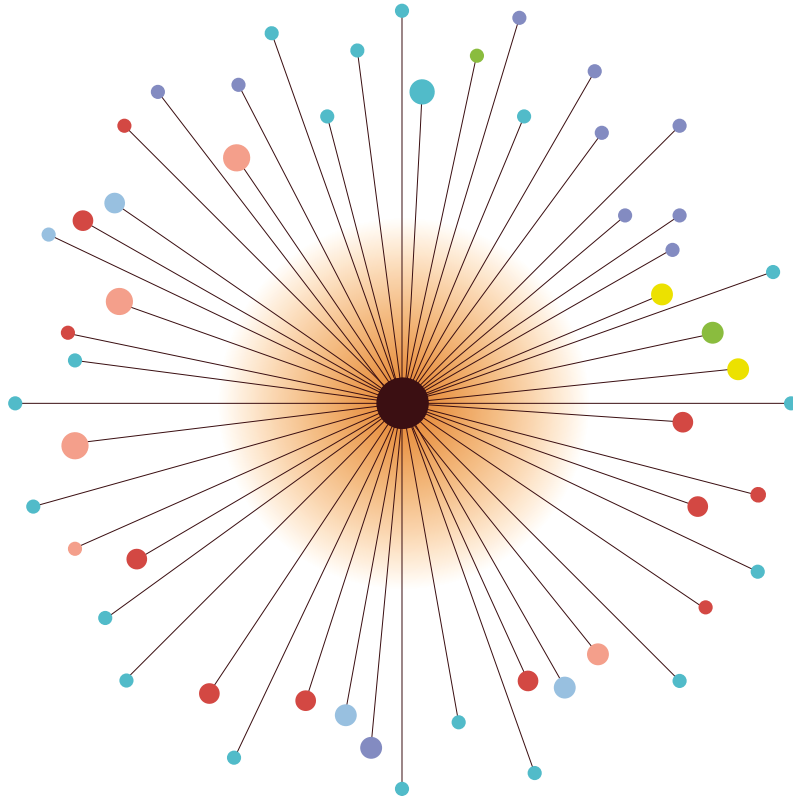
<https://www.acatech.de/projekt/acatech-horizonte-quantentechnologien>



München 2020

acatech HORIZONTE ISSN 2625-9605





Über die zweite Generation der Quantentechnologien, zu denen auch der Quantencomputer gehört, kursieren viele Mythen. Auch deshalb, weil die Grundlagen dieser Technologie – die Quanten und deren Manipulation – ferner von unserer Alltagswelt kaum liegen könnten.

Was sind Quanten überhaupt? Was ist momentan technisch möglich? Was ist Hype, und wo liegen die Potenziale der Technologien? Auf diese und weitere Fragen möchte die vorliegende HORIZONTE-Ausgabe Antworten geben.