

Quantentechnologie in Deutschland und Europa

Wolfgang Ertmer*

Es hat wohl kaum ein Technologiefeld in den letzten Jahren eine solche Beachtung gefunden wie das relativ junge, interdisziplinäre Gebiet der Quantentechnologien. Die Erforschung der zugrundeliegenden quantenphysikalischen Basis ist eine der ganz großen Erfolgsgeschichten des vergangenen Jahrhunderts. Gemeinsam mit der Allgemeinen Relativitätstheorie hat die quantenphysikalische Forschung unsere Auffassung von den Grundgesetzen der Natur dramatisch verändert. Die inzwischen hinlänglich als zutreffend überprüften quantenmechanischen und relativistischen Gesetzmäßigkeiten unterscheiden sich deutlich von unserer Alltagserfahrung, ja scheinen sogar im Widerspruch zu ihnen zu stehen. Auch wenn diese einzigartigen Facetten der Quantenwelt nur sehr schwer einem allgemeinen Publikum kommuniziert werden können, so bilden sie doch inzwischen – oft unbemerkt – die Grundlage für viele Schlüsseltechnologien unserer Wirtschaft. Beispiele sind hier die Halbleitertechnologie als Basis moderner Computer- und Informationstechnologien, die Lasertechnologie bzw. moderne Beleuchtungselemente basierend auf LED-Technologie oder die Magnetresonanztomographie (MRT) als unverzichtbares medizinisches bildgebendes Verfahren. Diese Erfolgsgeschichte wird oft auch mit der ersten Quantenrevolution umschrieben. Hier spielt die Quantenphysik von Festkörpern, Lasersystemen und deren Verhalten basierend auf deren mikrophysikalischem Verhalten die wesentliche Rolle.

Daneben haben in jüngerer Vergangenheit große Fortschritte in der Quantenoptik und Quantenphysik den Blick auf völlig neue Perspektiven zukünftiger Quantentechnologie eröffnet. Diese Erfolge basieren größtenteils darauf, dass man inzwischen gelernt hat, die inneren als auch die äußeren Freiheitsgrade von Licht und

Materie voll quantenphysikalisch manipulieren zu können – nur noch limitiert von den eigentlichen Quantengrenzen. Dies betrifft insbesondere die Manipulation isolierter Quantensysteme, wie einzelne Atome und Ionen, einzelne Elektronen und einzelne Photonen. So lassen sich inzwischen kohärente Materiewellen, wie z. B. sogenannte Atomlaser, generieren, die dem Bereich der Atomoptik – vergleichbar des Einsatzes von Lasern in der Optik – ganz neue Möglichkeiten, insbesondere für hoch präzise Metrologie bieten. Als Beispiel sei hier die Atominterferometrie erwähnt.

Andererseits kommen inzwischen weitere Quanteneffekte und -prinzipien, wie z. B. die quantenmechanische Verschränkung oder die Superposition von Quantensystemen, wie beispielsweise die Überlagerung von atomaren Systemen, die sich (unbeobachtet) gleichzeitig an getrennten Orten befinden können, in den Fokus für neue Anwendungsbereiche wie die Quanteninformationsverarbeitung, Quantenkryptographie, Quantensensorik und -metrologie oder zukünftige Quantencomputer. Sie ermöglichen die sogenannte zweite „Quantenrevolution“.

Das enorme Innovationspotenzial solcher Entwicklungen ist in der jüngeren Vergangenheit auch von der Politik erkannt worden, sowohl auf der europäischen als auch den nationalen Ebenen. Insbesondere die britische Regierung hat dies früh erkannt und im Jahre 2013 ein beeindruckendes Förderprogramm initiiert. Als Teil eines nationalen 270-Millionen-Pfund-Investitionsprogramms zu Quantentechnologien hat sie in Erwartung einer Multi-Milliarden-Pfund-Industrie vier *Quantum Technology Hubs* eingerichtet: *Sensors and Metrology*, *Quantum Enhanced Imaging* (QuantIC), *Network Quantum Information Technologies* (NQIT) und *Quantum Communication Technologies* (Quantum Communications hub).

* Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, E-Mail: ertmer@iqo.uni-hannover.de, <https://orcid.org/0000-0001-7912-5495>

Als die größten Anwendungsfelder hat die Regierung Quantenzeitgebersysteme (neue Atomuhren), Quantengravitationssensoren, Quantennavigationssysteme, sichere Quantenkommunikation, quantenbasierte Bildgebungsverfahren und Quantencomputer gesehen. Der Schwerpunkt der Forschungsförderung verfolgte in den, in einem harten Auswahlverfahren bestimmten, potenten Universitätsverbänden (*Hubs*) nicht die Förderung der Grundlagenforschung, sondern Innovationen in den anvisierten Anwendungsfeldern bei gleichzeitig früher Beteiligung der Industrie bzw. Wirtschaft. Hierfür mussten neue Kooperationsmodelle, insbesondere im PhD-Ausbildungsbereich, entwickelt werden, und die Managementabläufe in den *Hubs* erinnern eher an Prozesse in der Industrie als an die typischen Abläufe universitären Forschungsmanagements.

Auch in den Niederlanden ist recht früh, initiiert durch die Universität von Delft und die Forschungseinrichtung TNO, eine Forschungskollaboration für *Quantum Computing* und *Quantum Internet* gestartet worden: QuTech. Auch hier liegt das Hauptaugenmerk auf der Umsetzung der Quantentechnologie für anwendungsorientierte Innovationen.

Es ist daher auch nicht verwunderlich, dass die niederländische Regierung als EU-Ratspräsidentschaft recht früh die Zeichen der Zeit erkannt hat und im Jahre 2016 das Thema in der Europäischen Kommission (EC) prominent eingebracht hat, um global in diesem neuen Feld konkurrenzfähig zu bleiben. Im April 2016 haben dazu ca. 3500 europäische Wissenschaftler ein Quanten-Manifest präsentiert, in dem die Forscher die Bedeutung und das enorme Potenzial der Quantentechnologie für die europäische Wirtschaft und Gesellschaft hervorhoben. Professor Tommaso Calarco hat hier als Vertreter der Wissenschaft, unterstützt von vielen sehr prominenten Wissenschaftlern, die Europäische Kommission davon überzeugen können, ein sogenanntes *Quantum Technologies Flagship* zu starten, ein Förderprogramm für einen Zeitraum von insgesamt 10 Jahren mit einem Budget von einer Milliarde Euro.

Die wesentlichen Ziele dieses Programms sind die exzellente Stellung der europäischen Quantenforschung auszubauen, die Industrie ebenfalls in diesem Bereich in eine Führungsposition zu bringen und – nicht zuletzt – die Attraktivität der EU hinsichtlich Forschung und Investitionen in der Quantentechnologie zu erhöhen. Als wesentliche Mission hat die EU die folgenden Felder identifiziert:

- Quantenkommunikation zur inhärent sicheren Datenübertragung für unsere Informationsgesellschaft Dank Quantenkryptographie und einem zukünftigen Quanteninternet,

- Quantencomputer zur Lösung von Problemen, die zurzeit mit den klassischen Computern nicht sinnvoll lösbar sind,
- Quantensimulation, um wichtige Probleme im Bereich Chemie, Materialwissenschaften, sowie in der fundamentalen Physik lösen bzw. simulieren zu können und
- Quantensensoren und -metrologie für bisher in der Auflösung, Empfindlichkeit und Genauigkeit unerreichte Sensorik und Metrologie.

Als Teil des Programms wird aber weiterhin Grundlagenforschung unterstützt, um bisher nicht erkannte Effekte oder unvorhergesehene Durchbrüche in der Forschung nicht zu verpassen.

Auch andere europäische Nationen haben inzwischen, ähnlich wie England und die Niederlande, entsprechende Programme aufgelegt und wollen hier sowohl die Forschung als auch die Industrie strategisch fördern.

In Deutschland hat sich ebenfalls relativ früh ein Konsortium namhafter Wissenschaftler für diesen Bereich engagiert und ein Grundlagenpapier QUTEGA – eine nationale Initiative zur Förderung der Quantentechnologien – im April 2017 beim BMBF eingereicht und von diesem akzeptiert. In der Folge sind in einem Auswahlverfahren drei Pilotprojekte identifiziert worden, in denen Forscher gemeinsam mit der Industrie erste Projekte aus den Quantentechnologien bearbeiten werden. Hierzu gehört auch das Projekt „opticlock“, in dem eine optische Einzelionen-Uhr für den Feldeinsatz entwickelt werden soll (siehe „Neue Frequenznormale und Tests fundamentaler Physik“ in diesem Heft). Verbundkoordinator ist hierbei TOPTICA Photonics AG; die wissenschaftliche Koordination liegt bei der PTB. Inzwischen hat die Bundesregierung ein Rahmenprogramm zur Quantentechnologie verabschiedet und fördert diese Arbeiten im Umfang von 650 Millionen Euro in der laufenden Legislaturperiode.

Im vorliegenden Doppelheft der PTB-Mitteilungen, dessen erstes Teilheft Sie lesen, geht es um „Quantentechnologie mit Atomen und Photonen“. Die PTB ist hier aufgrund ihres Auftrags und ihrer Erfahrung sowohl im Bereich Quantenoptik, Zeit und Frequenz als auch in der optischen Quantenmetrologie hervorragend positioniert, Ergebnisse und Ideen aus der Grundlagenforschung bis in die industrielle Anwendung zu begleiten und gleichzeitig die Grundlagen der Quantentechnologie weiter zu stärken.

Dieses Heft beginnt mit einem Beitrag zu optischen Resonatoren, die gewissermaßen das Schwungrad eines jeden optischen Frequenzstandards bilden. Hier sind in den letzten Jahren

wichtige Durchbrüche erzielt worden, welche diese sensiblen Apparaturen für Anwendungen feldtauglich machen könnten und gleichzeitig die Stabilität der Uhrenlaser zur Abfrage eines Frequenzstandards massiv verbessert haben. Der folgende Beitrag beleuchtet die Anwendungen optischer Frequenzstandards in der Geodäsie und für neuartige fundamentale Tests – ein hervorragendes Beispiel für die gegenseitige Befruchtung von Quantentechnologie und Grundlagenforschung. Der abschließende Beitrag zu neuen Frequenzstandards stellt sowohl neuartige Ansätze zum Aufbau von Frequenzstandards auf Basis von Vielteilchensystemen gespeicherter Ionen vor als auch vielversprechende Spezies für den Einsatz in zukünftigen Frequenzstandards, wie zum Beispiel optische Kernübergänge oder hochgeladene Ionen.

