



Quantencomputing @ DLR

Das DLR entwickelt Fähigkeiten und Konzepte, um Quantencomputer zu verbessern.

Lisa Wörner, Sabine Wölk und Marc Wurz

Geschwindigkeit und Genauigkeit sind wichtige Attribute – auch in der Informationstechnologie. Mit der immer besser werdenden Kontrolle über Quantenzustände verbessern sich auch Quantencomputer stetig. Die DLR Quantencomputing-Initiative dient insbesondere dazu, neue Hardwarekonzepte zu untersuchen und Algorithmen zu entwickeln.

In diesem Rahmen engagiert sich das DLR-Institut für Quantentechnologien beispielsweise in Anwendungen des maschinellen Lernens auf Quantencomputern. Der Schwerpunkt liegt auf dem „reinforcement learning“ (bestärkendes Lernen). Klassisch bedeutet dies die schrittweise Lösung eines gegebenen Problems durch einen Agenten. Dafür beginnt der Agent initial, zufällig

nach der Lösung zu suchen. Zusätzlich erhält er Feedback in Form von Belohnungen, auf deren Basis er ein verbessertes Vorgehen erlernt, um sein Ziel zu erreichen.

Methoden für die gute Balance

Basierend auf diesen Informationen lässt sich eine Belohnungsmaximierung durch effizienteres Vorgehen im Limes eines unendlich langen Lernvorgangs erreichen. Klassisches bestärkendes Lernen zielt auf eine gute Balance zwischen einer möglichst kurzen Lernzeit und einer möglichst guten Belohnungsausbeute ab.

Der Einsatz quantenmechanischer Systeme erlaubt die Superposition aller verschiedener Schritte, die der Agent ausführen kann. Dies ver-

bessert die erwartete Erfolgswahrscheinlichkeit auf eine Belohnung. Wir konnten bereits zeigen, dass ein auf Quantencomputing basierender Agent unter bestimmten Voraussetzungen quadratisch schneller lernen kann als ein ähnlicher rein klassischer Agent und dabei eine gleichgute Belohnungsausbeute erzielt [1]. Gemeinsam mit Gruppen der Universitäten Wien, Innsbruck und Leiden bestätigten wir dies auch experimentell [2]. Der dafür verwendete nanophotonische Prozessor enthielt 88 Mach-Zehnder-Interferometer. Mit diesem Setup und einem klassischen Computer ließen sich die Ergebnisse der Aufgabe vergleichen und die Vorteile aufzeigen. Die daraus resultierenden neuen Herausforderungen bearbeiten wir im Projekt „QLearning“, das auf

„reinforcement learning“ fokussiert ist.

Reduktion des Rauschens

Quantencomputer basieren auf realer Hardware und besitzen somit verschiedene Rauschquellen. Diese können im Extremfall die Verschränkung der einzelnen Q-Bits zerstören. In der Folge sind die Resultate des ausgeführten Algorithmus fehlerhaft oder sogar falsch. Neben der Reduktion des Rauschens gibt es verschiedene Möglichkeiten, Fehler in den Ergebnissen zu korrigieren: So lassen sich Fehler zum Beispiel aktiv korrigieren (Quantenfehlerkorrektur) oder im Nachgang der Berechnung mindern. Trotz dieser Möglichkeiten ist die Reduktion des Rauschens eine der Herausforderungen in der Entwicklung neuer Quantencomputer. Das Rauschen limitiert bisher auch die Anzahl verschränkter Q-Bits und damit die Effektivität eines Systems.

In Quantencomputern, die auf supraleitenden Materialien basieren, dienen derzeit aufwändige Kühlsysteme dazu, das thermische Rauschen des Systems zu reduzieren und die Kohärenz zwischen den Q-Bits zu erhalten. Komplexe Kühlsysteme kommen allerdings schnell an ihre Grenzen. Denn die Anforderungen an die Uniformität der Temperaturverteilung und die Kühlung des Systems steigen mit der Anzahl verwendeter Q-Bits an. Die Skalierbarkeit, Transportfähigkeit und Genauigkeit eines Quantencomputers hängen von zukünftigen Entwicklungen und verwendeten Systemen ab. Einerseits ist dies durch die Miniaturisierung nötiger Infrastruktur zu erreichen, andererseits durch den Einsatz von

Hochtemperaturquantencomputern, die bei Raumtemperatur hinreichende Kohärenz erreichen können.

Systeme für neue Konzepte

An den DLR-Standorten Ulm und Hamburg werden im Rahmen der DLR Quantencomputing-Initiative neue Fähigkeiten entwickelt, um Quantencomputer zu verbessern. Die Schwerpunkte liegen dabei unterschiedlich. In Ulm werden derzeit vor allem Verfahren zur Bearbeitung von Stickstoff-Fehlstellen (NV-Zentren) in Diamant entwickelt. Diese Fehlstellen zeichnen sich dadurch aus, dass sie gut kontrollierbare Spins ausbilden. Diese lassen sich mithilfe optischer und radiofrequenter Strahlung manipulieren und auslesen. Mittels Manipulation der Q-Bits werden die nötigen Quantengatter implementiert. Die Einsatzfelder solcher Systeme sind nahezu unbegrenzt. So eignen sie sich etwa dazu, elektromagnetische Felder zu detektieren, sie können als Gyroskope dienen, als Quellen für die Quanten-Schlüssel-Verteilung oder als Q-Bits. Durch eine entsprechende Dotierung erlauben NV-Zentren in Diamant kleine Systeme mit mehreren Q-Bits.

Kohärente Verschränkung ist auch in anderen Systemen zu erreichen. So verwendet beispielsweise einer der kommerziellen Computer von IBM kryogene Festkörpersysteme. Daneben gibt es Bestrebungen, Atome zu nutzen. Für diese Systeme eignen sich neutrale Atome oder auch Ionen. Für Quantencomputer basierend auf neutralen Atomen kommen vor allem Systeme auf optischen Gittern zum Einsatz. Diese sind durch die Anregung des Rydberg-Zustandes

manipulierbar, um Quantengatter zu erzeugen. Dieses System verspricht die Operation in kontrollierter Umgebung bei Raumtemperatur.

In Hamburg werden derzeit Systeme basierend auf gefangenen Ionen untersucht. Dabei werden mehrere Ionen in einer elektromagnetischen Falle gefangen und miteinander verschränkt. Sie lassen sich individuell auslesen und adressieren. Mit den neuen Fähigkeiten der Hamburger Einrichtung gilt es, die Chip-basierten Fallen weiterzuentwickeln. Dies birgt die Hoffnung, neben der erreichbaren Miniaturisierung auch eine hinreichende Skalierbarkeit von Quantencomputern zu ermöglichen. Diese Aktivitäten sind Teil unseres Projekts „Technologieentwicklung und -unterstützung für Ionenfallenbasierte-Quantencomputer – TeufiQ“. In diesem geht es konkret um die Miniaturisierung von erforderlichen Vakuumkomponenten für den Einsatz unter kryogenen Bedingungen sowie die Integration von Funktionselementen in die Ionenfalle.

Mit den komplementären Systemen entwickelt das DLR aktiv Komponenten und Prozesse, um einen Weg für neue Konzepte und damit die Zukunft des Quantencomputings zu bereiten.

DLR-weit werden derzeit verschiedene Konzepte für die Entwicklung neuer Algorithmen untersucht. Dabei lassen sich auch spezifische Problemstellungen und deren Anwendbarkeit für einen Quantencomputer direkt überprüfen. So sind insbesondere komplexe Probleme, die bisher nicht lösbar waren, relevant für das Quantencomputing. Als Themen eignen sich vor allem Optimierungsprobleme und Herausforderungen der Materialwissenschaften sowie der Chemie.

[1] A. Hamann und S. Wölk, *New J. Phys.* **24**, 033044 (2022)

[2] V. Saggio et al., *Nature* **591**, 229 (2021)

DLR Quantencomputing-Initiative (QCI)



Quantencomputer bieten Forschung, Industrie und Wirtschaft enorme Chancen. Doch bis zur kommerziellen Nutzung ist noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit nötig. Um das zu beschleunigen und eigene Kompetenzen auszubauen, entwickelt die DLR Quantencomputing-Initiative (QCI) zusammen mit Partnern aus Industrie, Wirtschaft,

Start-ups und Forschung prototypische Quantencomputer und die dafür notwendigen Technologien. Dafür hat das BMWK 740 Millionen Euro über vier Jahre zur Verfügung gestellt. Weitere Infos unter qci.dlr.de

Die Autor:innen

Dr. Lisa Wörner, PD Dr. Sabine Wölk und **Prof. Dr. Marc Wurz**, DLR Institut für Quantentechnologien Ulm, Wilhelm-Runge Str. 10, 89081 Ulm