

# Quantum Machine Learning

Quantum Machine Learning (QML) bezeichnet typischerweise den Einsatz von Quantencomputern im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) zur Ausführung von Verfahren des maschinellen Lernens (ML), um auf diese Weise Leistungssteigerungen zu erzielen. Augenblicklich befindet sich QML noch in einem vergleichsweise frühen Entwicklungsstadium.

Allgemein gestattet es das maschinelle Lernen Computern, selbstständig anhand von Trainingsdaten bestimmte Aufgaben zu erlernen, z. B. welche Art von Objekt auf einem Bild abgebildet ist. Der gegenwärtig am häufigsten mit QML assoziierte potenzielle Vorteil gegenüber klassischen, d. h. nicht quantenphysikalischen, ML-Verfahren ist eine Beschleunigung der Verfahren. QML-Verfahren könnten aber beispielsweise auch eine geringere Anzahl an Trainingsdaten als klassische ML-Verfahren erfordern. Im Rahmen von QML können außerdem sowohl klassische Daten als auch Daten verarbeitet werden, die in Form von Quantenzuständen vorliegen. Solche Quantendaten lassen sich u. a. mit Hilfe von entsprechenden Quantensensoren gewinnen.

Im Gegensatz zu klassischen Computern basiert bei Quantencomputern die Informationsverarbeitung auf quantenphysikalischen Phänomenen. Dabei müssen sich im Vergleich zur klassischen Physik in der Quantenphysik Systeme nicht in einem scharf definierten Zustand befinden, sondern sie können in Form einer Überlagerung (Superposition) von mehreren unterschiedlichen Zuständen gleichzeitig existieren. Dies wird bei Quantencomputern dadurch ausgenutzt, dass hier anstatt klassischer Bits Quantenbits (Qubits) verwendet werden. Während ein klassisches Bit zu jedem Zeitpunkt entweder den Wert Null oder Eins besitzt, kann sich ein Qubit in einer Superposition aus beiden Zuständen befinden. Quantencomputer können die verschiedenen Zustände einer Superposition von Qubits gleichzeitig verarbeiten und dadurch potenziell erheblich schneller sein als klassische Computer.

Eine große Herausforderung bei Quantencomputern besteht darin, sie vor potenziell auftretenden Fehlern, z. B. aufgrund von Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung,

zu schützen. Einen wichtigen Ansatz hierfür stellen Verfahren dar, mit denen sich aufgetretene Fehler nachträglich wieder korrigieren lassen. Ohne den Einsatz solcher Verfahren lassen sich die Quanteneigenschaften der Qubits nur für relativ kurze Zeit aufrechterhalten, so dass dann nur Berechnungen mit entsprechend geringer Länge ausgeführt werden können.

Generell wären Quantencomputer nicht für beliebige Anwendungen schneller als klassische Computer, sondern nur in bestimmten Fällen. Ein Quantenalgorithmus muss nämlich beispielsweise berücksichtigen, dass es nach den Regeln der Quantenphysik nicht möglich ist, sämtliche Zustände einer Superposition zu messen, sondern stattdessen eine Messung nur einen einzigen, zufällig ausgewählten Zustand dieser Superposition ergibt. Darüber hinaus müssen für die Verarbeitung von klassischen Daten diese zuerst in Quantenzustände überführt werden. Der hierfür erforderliche Aufwand entscheidet u. a. darüber, ob mit Hilfe eines Quantenalgorithmus ein Geschwindigkeitsvorteil gegenüber einem klassischen Algorithmus erreicht werden kann.

Einen wichtigen Anwendungsbereich von QML könnte die intelligente Verarbeitung von umfangreichen Datenmengen (Big Data) darstellen, da QML das Potenzial bietet, die dort erforderlichen Berechnungen zu beschleunigen. So steigt z. B. zurzeit die Menge an Trainingsdaten, die für klassische ML-Verfahren genutzt wird, typischerweise kontinuierlich an. QML könnte hier u. a. für die Klassifikation von Bilddaten oder die Verarbeitung von natürlicher Sprache (Natural Language Processing) eingesetzt werden.

Ein weiteres Einsatzgebiet von QML könnte im Bereich der Robotik liegen. Hier könnte beispielsweise die Navigation von autonomen Fahrzeugen von QML profitieren. Darüber hinaus könnte QML im Rahmen der IT-Sicherheit genutzt werden, um z. B. unerwünschte E-Mails und Cyber-Angriffe auf Computersysteme oder Netzwerke zu erkennen. Außerdem könnte QML in der Werkstoffforschung Verwendung finden. Hier könnten beispielsweise direkt Quantendaten ausgewertet werden, die

mit Hilfe von quantencomputerbasierten Simulationen von quantenphysikalischen Systemen im Bereich der Festkörperphysik erzeugt wurden. Im Finanzsektor könnten ebenfalls einige Aufgabenstellungen von QML profitieren. Hierzu zählt u. a. die Abschätzung von Risiken bei Finanzinstrumenten. Des Weiteren könnte QML im medizinischen Bereich eingesetzt werden, etwa in der Arzneimittelforschung oder für die Auswertung von medizinischen Bilddaten. Darüber hinaus könnte QML in der Industrie beispielsweise bei Automatisierungssystemen in intelligenten Fabriken (Smart Factories) genutzt werden.

Die Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des QML waren bisher größtenteils theoretischer Natur. Die praktische Erprobung der diesbezüglichen Verfahren wird derzeit noch durch die begrenzte Leistungsfähigkeit von verfügbarer Quantencomputerhardware eingeschränkt, u. a. durch deren sehr geringe Anzahl von Qubits. Deshalb lassen sich beispielsweise lediglich Anwendungsfälle von QML experimentell untersuchen, die aufgrund von sehr kleinen Datensätzen nur einen geringen Bezug zur Realität aufweisen. Außerdem werden gegenwärtig häufig QML-Verfahren entwickelt, die seitens des Quantencomputers keine Korrektur von potenziell auftretenden Fehlern voraussetzen, da auch die in näherer Zukunft zur Verfügung stehenden Systeme hierzu vermutlich noch nicht in der Lage sein werden.

Viele Forschungsanstrengungen beschäftigen sich zurzeit mit quantencomputerbasierten Implementierungen von ML-Verfahren auf der Basis von sogenannten künstlichen neuronalen Netzwerken, mit deren Hilfe auf klassischen Computersystemen in letzter Zeit große Erfolge erzielt wurden. Generell erscheint im QML-Bereich die Verarbeitung von Quantendaten vielversprechend, die direkt mit Hilfe von Quantensensoren oder quantencomputerbasierten Simulationen von quantenphysikalischen Systemen erzeugt werden, da dann keine eventuell aufwändige Konvertierung der Eingabedaten erforderlich ist.

**Dr. Klaus Ruhlig**