QCMobility – Erforschung des Potenzials von Quantencomputing im On-Demand-Verkehr

Dr. rer. nat. Rita Cyganski, Dipl.-Geograph Ludger Jürgens, Dipl.-Betr.wirt (FH) Holger Schulz, Dr. Sebastian Schwinn, M.Sc.

Wie können Quantencomputer zu einer nachhaltigeren, effizienteren und bedarfsgerechteren Mobilität im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) beitragen? Dieser Frage geht das Anwendungsprojekt „QCMobility | Straßenverkehr“ der DLR Quantencomputing-Initiative (DLR QCI) unter Leitung des DLR-Instituts für Verkehrsforschung gemeinsam mit Partnern aus Beratung, Industrie und Forschung nach. Im Mittelpunkt steht ein praktischer Anwendungsfall im On-Demand-Verkehr (ODV) auf Basis realer Betriebsdaten, der mathematisch modelliert, anhand quantengestützter Optimierungsansätze erprobt und hinsichtlich des zukünftigen Nutzens bewertet wird. An dieser Aufgabenstellung arbeitet ein Konsortium, angeführt durch d-fine und planqc, das von den Verkehrsunternehmen Rhein-Neckar-Verkehr und DB Regio Bus, dem Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML sowie dem Logistikdienstleister Dachser unterstützt wird. „QCMobility | Straßenverkehr“ ist Teil des Gesamtprojekts QCMobility unter Federführung des DLR-Instituts für Quantentechnologien.

On-Demand-Verkehr sinnvoll weiterentwickeln

Verkehrsunternehmen stehen vor der Herausforderung, steigende Mobilitätsbedarfe trotz eingeschränkter finanzieller Mittel und begrenzter Personalressourcen in einem zunehmend knappen öffentlichen Raum in Städten bewältigen zu müssen. Gleichzeitig sind viele Busse und Bahnen im ÖPNV nicht ausgelastet und angestrebte Pooling-Quoten im ODV werden nicht erreicht. Folglich werden vorhandene Beförderungskapazitäten nicht effizient genutzt, obwohl ein hoher Besetzungsgrad von zentraler Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit bedarfsorientierter Verkehre ist [1, 2, 3].

Der ODV ist nicht als bloßer Ersatz für Taxiverkehr zu verstehen. Sein Mehrwert entsteht durch die intelligente Bündelung mehrerer Fahrtwünsche, den bedarfsgerechten Fahrzeugeinsatz und eine effiziente Nutzung des Straßenraums. Ziel ist es, Mobilität neu und barrierefrei zu denken und die Angebotsqualität zu erhöhen. Durch die Verringerung der Entfernung zur nächstgelegenen (virtuellen) Haltestelle soll insbesondere mobilitätseingeschränkten Personen eine gleichberechtigte Teilhabe an öffentlicher Mobilität ermöglicht werden.

Fahrgäste erwarten zugleich flexible, leicht zugängliche und verlässlich nutzbare Angebote, die sich an individuellen Fahrtwünschen orientieren. Integriert in den bestehenden Mobilitätsmix können On-Demand-Verkehre einen wichtigen Beitrag leisten. Besonders in ländlichen Regionen ergänzen sie den Linienverkehr dort,

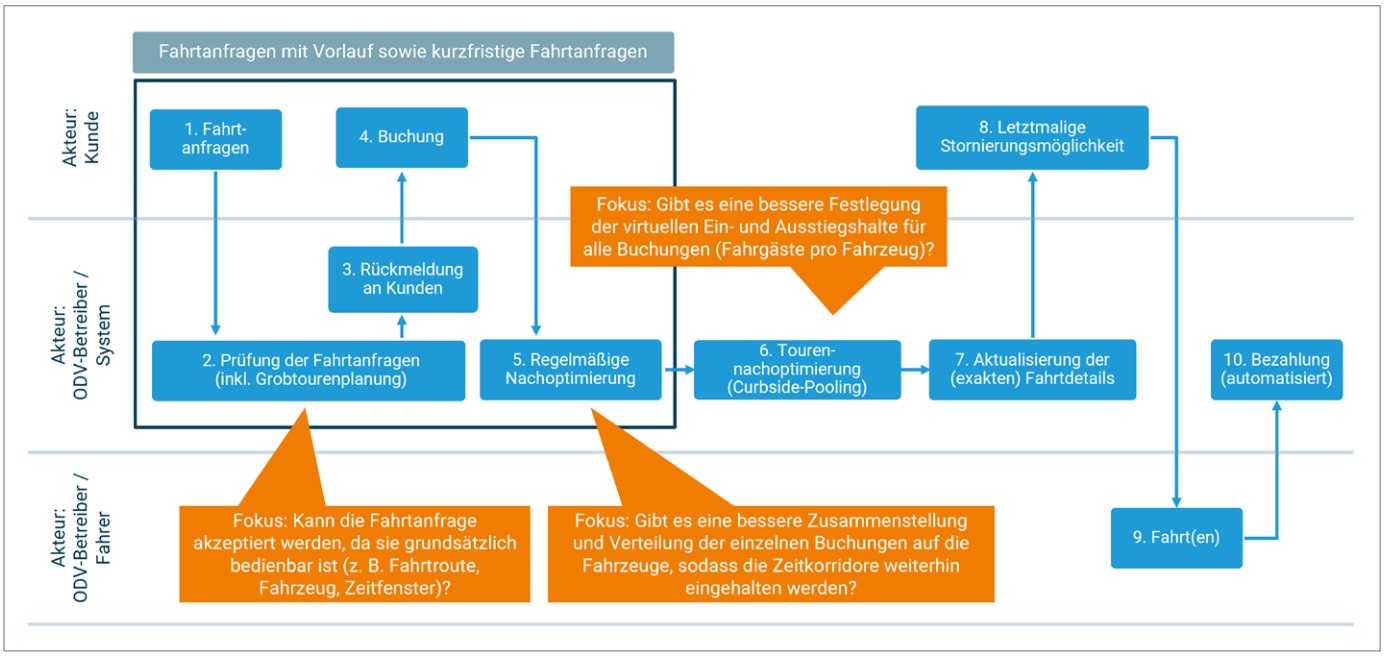


Abb. 1: Visualisierung des Prozessablaufs für eine Fahrtanfrage im ODV mit akteursbezogener Zuordnung und der Einbindung des Curbside-Pooling als Tourennachoptimierung.

Grafiken: Darstellungen der Autoren

Autoren PDF zur Einbindung auf der Website https://elib.dlr.de/ / Social Media - Kontakt & Rechte: archiv@dvvmedia.com DVV Media 2026

wo Nachfrage und Siedlungsstruktur einen wirtschaftlichen Betrieb fester Linien in angemessener Taktung nicht durchgehend ermöglichen. Im städtischen Raum erweitern sie das bestehende Verkehrsangebot auf der ersten und letzten Meile sowie in nachfrageschwachen Zeiten. Mit Blick auf die Entwicklung des autonomen Fahrens gilt es, von Beginn an effizienzsteigernde Pooling-Ansätze zu fokussieren, bevor zusätzlicher, autonomer Individualverkehr den öffentlichen Raum belastet.

Eine zentrale Herausforderung besteht in der mathematischen Modellierung und Lösung zugrundeliegender Problemstellungen. Viele graphentheoretische Optimierungsprobleme wie die Bestimmung optimaler Routen oder das optimale Pooling zählen zu den rechnerisch anspruchsvollsten Problemklassen und bringen klassische Verfahren schnell an ihre Grenzen. Genau diese Klasse von Problemen adressiert Quantencomputing mit potenziellem Effizienzgewinn. Inwieweit sich dieses Potenzial auf die Optimierung im ODV übertragen lässt, ist eine der zentralen Forschungsfragen dieses Projekts.

Dies motiviert auch Rhein-Neckar-Verkehr, DB Regio Bus und Dachser zur Mitarbeit am Projekt und genau hier setzt QCMobility an. Für sie ist von Interesse, ob Quantencomputing künftig komplexe Planungs- und Optimierungsaufgaben im ÖPNV und der Logistik unterstützen und dazu beitragen kann, beispielsweise mit derselben Fahrzeugflotte mehr Mobilität und mehr Transporte zu ermöglichen. QCMobility schafft die Grundlage, um die Potenziale dieser Technologie abzuschätzen und mögliche Einsatzfelder zur Weiterentwicklung zu erproben.

Innovativer Pooling-Ansatz optimiert operative Haltepunkte im ODV

Zur ganzheitlichen Betrachtung des ODV von der Fahrtanfrage bis zur Durchführung wurde ein Prozessablauf erstellt, in einzelne Schritte gegliedert und visualisiert (Abb. 1). Diese Darstellung ermöglicht es, relevante Optimierungspotenziale zu identifizieren und den jeweiligen Teilprozessen zuzuordnen.

Im Rahmen des Projekts wird der praxisbezogene Anwendungsfall „Curbside-Pooling“ als Tourennachoptimierung sowohl aus fachlicher als auch algorithmischer Perspektive untersucht. Ziel ist es nicht,



Zur Autorin

Dr. rer. nat. Rita Cyganski forscht am DLR-Institut für Verkehrsforschung in Berlin. Ihre Schwerpunkte liegen insbesondere in den Bereichen Quartiersmobilität und Verkehrsmodellierung. Sie leitet die Gruppe „Rethinking Neighborhoods & Transport Infrastructures“ in der Abteilung „Räume in Mobilitäts- und Transportsystemen“. Cyganski hat am Geographischen Institut der Humboldt-Universität zu Berlin promoviert.



Zum Autor

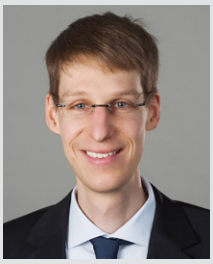
Dipl.-Geograph Ludger Jürgens ist Teamleiter Beratung und Planung in der Abteilung „Innovative Verkehrskonzepte“ bei DB Regio Bus. Er befasst sich schwerpunktmäßig mit der Entwicklung integrierter Verkehrssysteme, der strategischen Mobilitätsplanung sowie der Konzeption und Evaluation innovativer Nahverkehrsangebote. Seine fachlichen Schwerpunkte umfassen insbesondere On-Demand-Verkehre, Verkehrsmodellierung, Raumanalyse und den Einsatz geobasierter Planungsinstrumente.



Zum Autor

Dipl.-Betr.wirt (FH) Holger Schulz, Master of Systems Engineering, ist seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML). Am Projektzentrum „Verkehr, Mobilität und Umwelt“ in Prien am Chiemsee ist er als langjähriger Projektmanager und Projektleiter in verschiedenen nationalen und internationalen Forschungs- und Industrieprojekten, vorrangig in den Bereichen der Sicherheits-, Verkehrs- und Informationslogistik, tätig.

Weiterer Autor seitens Fraunhofer IML ist Benjamin Beck (M. Sc. Mathematik, wissenschaftlicher Mitarbeiter).



Zum Autor

Dr. Sebastian Schwinn, M. Sc., ist Manager bei d-fine und entwickelt gemeinsam mit seinen Projektteams Lösungen für die analytischen, quantitativen und technologischen Herausforderungen von Kunden aus dem Mobilitäts- und Transportsektor. Seine umfangreiche Erfahrung reicht von der fachlichen Datenmodellierung bis zur Umsetzung KI-gestützter Anwendungsfälle – wie zum Beispiel Analytics-Plattformen für den On-Demand-Verkehr oder Prognosemodelle im ÖPNV.

Weitere Autoren seitens d-fine sind Florian Niggl (M. Sc. Mathematik, Consultant), Dr. Daniel Ohl de Mello (M. Sc. und Promotion in Physik, Manager Quantencomputing) und Leena Tharwat (M. Sc. Physik, Senior Consultant).

ANZEIGE



Autoren PDF zur Einbindung auf der Website https://elib.dlr.de/ / Social Media - Kontakt & Rechte: archiv@dvvmedia.com DVV Media 2026

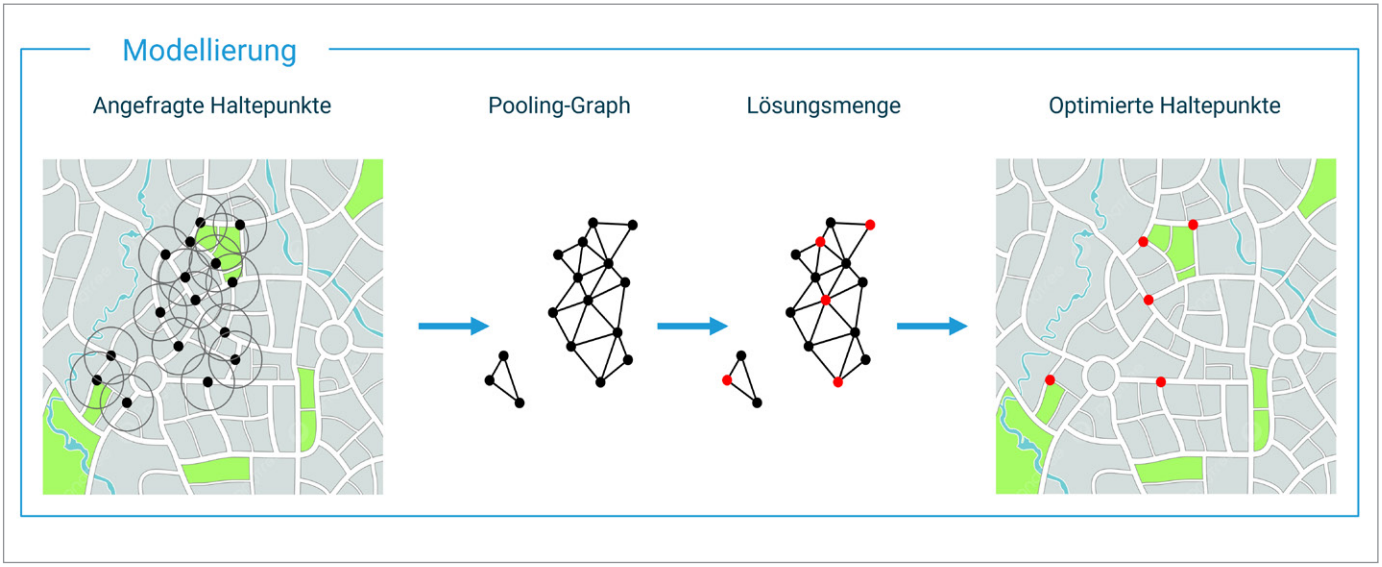


Abb. 2: Skizze einer vereinfachten Modellierung von initial angefragten Haltepunkten über die Konstruktion des Pooling-Graphen bis hin zur reduzierten Menge optimierter Haltepunkte, die mit der optimierten Tour angefahren werden.

das bestehende klassische Pooling zu ersetzen, sondern es gezielt zu ergänzen und dadurch zentrale Zielsetzungen des ODV zu unterstützen:

- eine optimierte Raumnutzung,
- eine höhere Effizienz durch gesteigerte Fahrzeugauslastung sowie
- die dynamische Ermittlung geeigneter Haltepunkte.

Beim Curbside-Pooling werden die Haltepunkte mehrerer Fahrtanfragen beziehungsweise „Fahrgäste an der Bordsteinkante (Curbside)“ gebündelt und durch einen gemeinsamen Haltepunkt er-setzt. Das gemeinsame Ein- und Aussteigen der Fahrgäste an einer virtuellen Haltestelle kann Fahr- und Haltezeiten sowie die Anzahl der anzufahrenden Haltestellen reduzieren. Die Pilotierung basiert auf realen Betriebs- und Nachfragedaten der im Flächenbetrieb eingesetzten On-Demand-Shuttles von Rhein-Neckar-Verkehr.

Modellierung und Optimierung des Curbside-Pooling als Graphenproblem

Das Ziel der Optimierung ist es, die geplante Tour jedes Fahrzeugs so anzupassen, dass benachbarte Ein- und Ausstiegshaltepunkte effizient zusammengelegt werden, ohne bestätigte Buchungen wesentlich zu verändern. Für die Fahrgäste können sich dabei andere Fußwege zu neu festgelegten Haltepunkten ergeben, die von den initial zugewiesenen Haltestellen abweichen.

Die Nebenbedingungen der Optimierung stellen sicher, dass definierte Abhol- und Absetzzeitfenster eingehalten, die Fahrzeugkapazität nicht überschritten und die maximal zulässige Fußwegdistanz pro Fahrgast berücksichtigt werden. Weitere Anforderungen wie zum Beispiel die Eignung von Haltestellen für Kinder und mobilitätseingeschränkte Personen können ebenfalls einbezogen werden.

Zur mathematischen Abbildung wird aus der geplanten Tour ein Pooling-Graph konstruiert. Seine Knoten repräsentieren mögliche Haltepunkte zu bestimmten Zeitpunkten, während die Kanten zulässige Bündelungen unter räumlichen und zeitlichen Gesichtspunkten abbilden. Auf dieser Grundlage wird anschließend algorithmisch entschieden, welche virtuellen Haltestellen angefahren werden (Abb. 2).

Die mathematische Optimierung wählt aus den Knoten des Pooling-Graphen eine möglichst kleine Teilmenge von Haltepunkten aus, sodass jeder Fahrgast unter Einhaltung aller fachlichen Restriktionen mindestens einen dieser Haltepunkte erreichen kann. Dieses Auswahlproblem lässt sich unter anderem als Maximum Weighted Independent Set (MWIS) [4] oder als Annotated Dominating Set (ADS) [5] formulieren. Beide Ansätze ermöglichen die Bestimmung einer optimierten Menge an Haltepunkten, die den betrieblichen und fachlichen Anforderungen genügt und dem Mobilitätsbedarf entspricht.

Betriebliche Perspektive und Fahrgastnutzen gemeinsam bewerten

Für die Bewertung der Lösung des Curbside-Pooling wurden mehrere fachliche Metriken entwickelt, die einen datenbasierten Vergleich zwischen den initialen Touren und den optimierten Touren ermöglichen. Curbside-Pooling bewegt sich stets in einem Spannungsfeld zwischen betrieblicher Effizienz und Fahrgastnutzen:

- Aus betrieblicher Sicht stehen die Fahrtstrecke und Fahrzeit des Fahrzeugs, der Auslastungsgrad, die Anzahl der angefahrenen Haltestellen sowie die gesamte Haltezeit für Ein- und Ausstiege im Mittelpunkt. Diese Größen beeinflussen die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Betriebs unmittelbar. Als übergreifende Kennzahl fasst die Pooling-Quote den erzielten Bündelungseffekt zusammen.
- Aus Fahrgastperspektive werden die Fußwegdistanzen zu den Ein- und Ausstiegshaltepunkten sowie die Gesamtreisestrecke und -reisezeit pro Fahrgast betrachtet. Dabei werden je nach Personengruppe unterschiedliche Gehgeschwindigkeiten und maximal zulässige Fußwegdistanzen zugrunde gelegt.

Während diese fachlichen Metriken die Lösungsqualität auf Fahrgast- und Tourebene beschreiben, werden für den Vergleich des klassischen Lösungsalgorithmus mit quantenbasierten Verfahren zusätzliche

Autoren PDF zur Einbindung auf der Website https://elib.dlr.de/ / Social Media - Kontakt & Rechte: archiv@dvvmedia.com DVV Media 2026

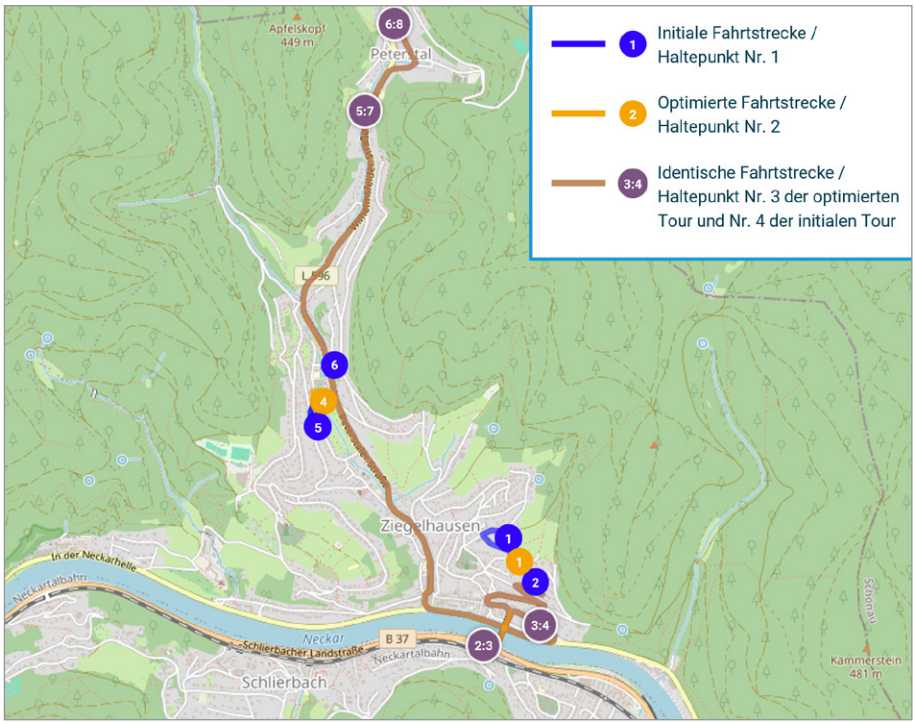


Abb. 3: Visualisierung des Pooling-Ergebnisses eines Beispiels als Gegenüberstellung der initialen Tour mit acht Haltepunkten und der optimierten Tour mit sechs Haltepunkten.

algorithmische Kennzahlen herangezogen. Dazu zählen unter anderem die Laufzeit, der Speicherbedarf und die Approximationsgüte. Sie ermöglichen eine Bewertung der Leistungsfähigkeit und der technischen Umsetzbarkeit der jeweiligen Lösungsverfahren.

Erste klassische Ergebnisse

Der entwickelte Pooling-Algorithmus wird zunächst klassisch, also ohne Quantencomputer, erprobt. Eine zur Bewertung implementierte Verarbeitungspipeline umfasst die Datenaufbereitung, Modellierung, Optimierung sowie Erstellung und Visualisierung der optimierten Tour. Außerdem wird die optimierte Tour mit der initialen Tour verglichen.

Eine beispielhafte Visualisierung in Abb. 3 zeigt, dass sich durch die Bündelung die Anzahl der anzufahrenden Haltestellen reduziert, wodurch die Touren in vielen Fällen kompakter und effizienter werden. Damit gehen häufig ebenso Verringerungen der Fahrzeit sowie der zurückgelegten Fahrtstrecke einher.

Auf Fahrgastebene verkürzen sich für viele Personen die Fahrzeiten und Fahrtstrecken, während sich einzelne Fußwege erwartungsgemäß verlängern. Die ersten Projektergebnisse bestätigen damit das Potenzial des Curbside-Pooling und unterstreichen zugleich die Notwendigkeit, betriebliche Kennzahlen und fahrgastbezogene Auswirkungen ausgewogen zu betrachten.

Untersuchung des Potenzials quantengestützter Lösungsansätze

Quantencomputer nutzen Prinzipien der Quantenphysik wie Superposition, Interferenz und Verschränkung, um bestimmte komplexe Probleme zu bearbeiten, bei denen klassische Rechner an ihre Grenzen stoßen [6]. Das Beispiel in Abb. 3 zeigt eine einzelne Tour, bei der acht auf sechs Haltepunkte gebündelt werden. Durch die zusätzliche Berücksichtigung der Zeitdimension und weiterer Nebenbedingungen entstehen Pooling-Graphen mit deutlich mehr Knoten und Kanten als Abb. 2 vermuten lässt. Ein Pooling über mehrere Fahrzeuge hinweg, wie es in einem realen Flächenbetrieb sinnvoll wäre, erhöht die Komplexität zusätzlich.

Curbside-Pooling ist aufgrund seiner Problemstruktur NP-schwer. Die Anzahl möglicher Kombinationen wächst mit der Anzahl an Fahrtanfragen, Haltepunkten und Fahrzeugen stark an, sodass der Rechenaufwand exakter Verfahren im ungünstigsten Fall exponentiell steigt. Heuristische Verfahren liefern häufig zwar schnell gute Lösungen, können deren Optimalität jedoch nicht garantieren.

Hier setzt die Untersuchung quantengestützter Verfahren an. Ziel ist es nicht, die klassische Verarbeitungspipeline zu ersetzen, sondern zu prüfen, ob Quantenalgorithmen oder hybride Verfahren an

ANZEIGE



Autoren PDF zur Einbindung auf der Website https://elib.dlr.de/ / Social Media - Kontakt & Rechte: archiv@dvvmedia.com DVV Media 2026

geeigneter Stelle Vorteile gegenüber der klassischen Lösung bieten. Dadurch ließen sie sich gezielt in etablierte Abläufe bei Verkehrsunternehmen integrieren und perspektivisch auf weitere Optimierungsaufgaben wie die Tourenplanung ausweiten.

Für gatterbasierte Quantencomputer kann das oben erwähnte ADS-Problem als quadratisches binäres Optimierungsproblem (QUBO) formuliert werden, indem jedes Qubit eine mögliche Haltestelle repräsentiert. Die Nebenbedingungen werden durch zusätzliche Strafterme und die Einführung weiterer binärer Variablen berücksichtigt. Das Optimierungsergebnis wird anschließend anhand der Messergebnisse des Quantencomputers bestimmt.

Ein weiterer Ansatz basiert auf der MWIS-Formulierung und überträgt den Pooling-Graphen auf die physikalische Anordnung neutraler Rydberg-Atome. Die Rydberg-Blockade verhindert dabei die Auswahl benachbarter Haltepunkte und ermöglicht so potenziell konfliktfreie, nahezu optimale Lösungen. Dieser hardwarenahe heuristische Ansatz könnte bekannten klassischen Heuristiken überlegen sein. Entscheidend ist, ob er auch bei wachsenden Problemgrößen in vertretbarer Laufzeit Lösungen ausreichender Qualität liefert.

Das Erproben auf heute verfügbaren Quantencomputern ist durch deren Größe, Rauschen und begrenzte Qubit-Konnektivität auf vereinfachte Probleminstanzen mit wenigen Variablen beschränkt. Bis zu etwa 40 Qubits lassen sich idealisierte, fehlerfreie Quantenschaltkreise noch klassisch simulieren. Durch ergänzende Experimente auf Hardware mit mehreren Hundert Qubits kann das zukünftige Potenzial der quantenbasierten Verfahren für den ODV bereits heute abgeschätzt werden.

Überführung des Curbside-Pooling in den Betrieb

Für die weitere Forschung steht neben der algorithmischen Weiterentwicklung vor allem die Integration in den Betrieb von Verkehrsunternehmen im Mittelpunkt. Dabei sind insbesondere eine echtzeitfähige Anwendung, die perspektivische Anbindung eines Quantencomputers an bestehende Dispositions- und Buchungssysteme sowie die transparente Kommunikation an Fahrgäste über veränderte Ein- und Ausstiegshaltepunkte relevant.

Unter realen Bedingungen sollte zudem untersucht werden, wie robust die Optimierung gegenüber Störungen wie Straßensperrungen, Verspätungen durch die Verkehrslage und kurzfristige Buchungen ist. Ebenso relevant ist die Akzeptanz der Fahrgäste: Zusätzliche Fußwege müssen nachvollziehbar, fair verteilt und für unterschiedliche Personengruppen zumutbar sein.

Im weiteren Projektverlauf werden quantengestützte Algorithmen weiterentwickelt und mit klassischen Verfahren verglichen. Die zunächst primär forschungsorientierten Arbeiten dienen dazu, langfristige Potenziale neuer Rechentechnologien zu bewerten und in die Entwicklung einer Roadmap „Quantencomputing in der Mobilität“ einzubeziehen. Es gilt, robuste, nachvollziehbare und in bestehende Betriebsabläufe integrierbare Lösungen zu entwickeln, die in Projekten wie QCMobility validiert und schrittweise in Produktivsysteme überführt werden können.

Danksagung: Das Projekt „QCMobility | Straßenverkehr“ wird im Rahmen der DLR Quantencomputing-Initiative (DLR QCI) durch Mittel des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) ermöglicht, siehe auch *https://qci.dlr.de/qcmobility/*.

Literatur/Anmerkungen

[1] Preuß, Wiebke, et al. „Vom Piloten ins System – Empirische Befunde zur Wirkung von On-Demand-Verkehren im ÖPNV“. Ramboll Management Consulting GmbH (2026). *https://www.wir-bewegen.bayern.de/uploads/RMC_Insights_On_Demand_Verkehre_im_Oe_PNV_2026_2_fbd10b8b1b.pdf* (Abruf. 10.08.2026).

[2] Schneider, Paul, et al. „On-Demand-Ridepooling als Beitrag zu Mobilitätswende und Daseinsvorsorge: Erkenntnisse zum Status quo in Deutschland und Entwurf einer Systemtypologie“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2024). *https://doi.org/10.48506/opus-8611*.

[3] Kagerbauer, Martin, et al. „Ridepooling in Hamburg auf dem Weg in die Zukunft – Ergebnisbericht zur MOIA Begleitforschung“. MOIA GmbH (2021). *https://www.ifv.kit.edu/downloads/211207_MOIA_Ergebnisbericht_Begleitforschung.pdf* (Abruf: 10.08.2026).

[4] Lamm, Sebastian, et al. “Exactly solving the maximum weight independent set problem on large real-world graphs”. 2019 proceedings of the twenty-first workshop on algorithm engineering and experiments (alenex). Society for Industrial and Applied Mathematics, 2019.

[5] Demaine, Erik D. “Structural Rounding: Approximation Algorithms for Graphs Near an Algorithmically Tractable Class”. In 27th Annual European Symposium on Algorithms (ESA 2019). Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), Volume 144, pp. 37:1-37:15.

[6] Abbas, Amira, et al. “Challenges and opportunities in quantum optimization”. Nat Rev Phys 6, 718–735 (2024). *https://doi.org/10.1038/s42254-024-00770-9*.

Zusammenfassung/Summary

QCMobility – Erforschung des Potenzials von Quantencomputing im On-Demand-Verkehr

Das Projekt „QCMobility | Straßenverkehr“ untersucht das Potenzial von Quantencomputing zur Lösung komplexer Planungs- und Optimierungsaufgaben im ÖPNV sowie in der Logistik. Im Mittelpunkt steht der praxisnahe Anwendungsfall „Curbside-Pooling“ im On-Demand-Verkehr. Dieser wird mathematisch modelliert, mit klassischen und quantengestützten Verfahren erprobt und im Hinblick auf seinen künftigen Nutzen bewertet. Erste Ergebnisse zeigen eine höhere betriebliche Effizienz, während zugleich die Auswirkungen auf Fußwege und Reisezeiten der Fahrgäste betrachtet werden.

QCMobility – Exploring the potential of quantum computing in on-demand transportation

The “QCMobility | Road Transport” project investigates the potential of quantum computing to solve complex planning and optimization problems in public transport and city logistics. It focuses on the practical use case of “curbside pooling” in demand-responsive transport. This use case is modeled mathematically, tested using both classical and quantum-assisted optimization methods, and evaluated with regard to its future benefits. First results indicate greater operational efficiency, while also examining the impact on passengers’ walking distances and travel times.

Autoren PDF zur Einbindung auf der Website https://elib.dlr.de/ / Social Media - Kontakt & Rechte: archiv@dvvmedia.com DVV Media 2026