Ausgabe 4 / Oktober – Dezember 2025 / ISSN 0173-6264 B 13716 / EUR 5,– / CHF 9.–

DGLR

Luft- & Raumfahrt

Informieren • Vernetzen • Fördern

Mit Regolith zur Mondbasis – Additive Fertigung auf dem Mond

Quantentechnologie in der Flugplanung –
Flugrouten und Kapazitäten für den Luftverkehr optimal planen

Gitterionentriebwerke aus Deutschland –
Elektrische Antriebe für interplanetare Missionen

Be seen and be aware –
Vermeidung von Mid-Air-Kollisionen in der Allgemeinen Luftfahrt

Quantentechnologie in der Flugplanung

Lufthansa Industry Solutions forscht für DLR Quantencomputing-Initiative

Bild: Lufthansa Industry Solutions

Komplexe Entscheidungen in Echtzeit, Milliarden Kombinationsmöglichkeiten und höchste Sicherheitsstandards: Die Anforderungen an die Planungssysteme in der Luftfahrt sind hoch. Um kritische Prozesse zu optimieren und die Sicherheit weiter zu erhöhen, arbeitet *Lufthansa Industry Solutions (LHIND)* an neuen, wegweisenden Technologien. Das Unternehmen hat den Zuschlag des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)* erhalten, im Rahmen der *DLR Quantencomputing-Initiative (DLR QCI)* zwei Forschungsprojekte zu unterstützen.

Das „Problem des Handlungsreisenden" ist aus dem Mathematikunterricht bekannt: Je mehr Stationen angefahren werden, desto schwieriger wird es, die optimale Handelsroute zu finden. Durch das exponentielle Wachstum der Anzahl der zur Verfügung stehenden Routen ist das Problem sogar viel komplexer, als es auf den ersten Blick scheint. Dasselbe Prinzip steckt hinter dem ***Tail-Assignment-Problem***, bei dem es darum geht, jedem einzelnen Flug unter Berücksichtigung von Wartungszyklen, Umläufen und Betriebskosten ein geeignetes Flugzeug (Tail) zuzuordnen. Eine einfache Rechnung macht die Größenordnung deutlich: Stehen fünf Flugzeuge für einen einzigen Flug zur Verfügung, gibt es genau fünf mögliche Zuordnungen – ein überschaubarer Fall. Bei zwei Flügen und denselben fünf Flugzeugen ergeben sich bereits 25 Varianten. In der Realität ist die Lage jedoch weitaus komplexer: Hat eine Airline beispielsweise 400 Flüge an einem Tag und 100 einsetzbare Maschinen, explodiert die Zahl der möglichen Zuweisungen in astronomische Höhen – weit über das, was sich manuell oder mit einfachen Mitteln berechnen ließe.

Quantencomputer in der Luftverkehrspraxis

Dieses Phänomen, bei dem scheinbar einfache Aufgaben mit wachsender Größe unkontrollierbar werden, findet sich in vielen Bereichen der Wirtschaft. Neben obigem Beispiel gibt es in der Luftfahrt weitere Herausforderungen: Flugzeuge müssen optimal eingesetzt, Crews geplant, Flugrouten angepasst und Wartungszyklen eingehalten werden. Kombinatorische Optimierungsprobleme wie diese lassen sich trotz immer besserer Rechenleistung und dem Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) mit herkömmlichen Computern nur eingeschränkt lösen. Sie stoßen an technische und wirtschaftliche Grenzen.

Quantencomputer eröffnen neue und vielversprechende Perspektiven zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme. Sie sollen zukünftig Aufgaben in Minuten bewältigen, für die klassische Supercomputer Jahre benötigen würden – und könnten damit einen möglichen Ausweg aus diesem Dilemma bieten. Der Grund dafür liegt im technischen Aufbau: Statt auf Bits mit dem Zustand 0 oder 1 zu setzen, nutzt der Quantencomputer sogenannte ***Qubits***. Diese können dank der Prinzipien der Superposition gleichzeitig mehrere Zustände einnehmen und durch Verschränkung miteinander gekoppelt werden. Das Ergebnis ist eine rechnerische Parallelität, die zumindest für bestimmte Aufgabenstellungen die Leistung herkömmlicher Computer fundamental übertrifft.

LHIND befasst sich bereits seit fünf Jahren mit dem Übergang von der Quanten-Grundlagenforschung in die betriebliche Praxis. So ist das Unternehmen unter anderem Mitglied im ***Quantum Technology and Application Consortium*** *(QUTAC)*, das sich auf die Entwicklung industrieller Anwendungsfälle konzentriert. Darüber hinaus engagiert sich LHIND in der Initiative ***Hamburg Quantum Innovation Capital*** *(HQIC)* gemeinsam mit Akteuren aus Wirtschaft und Wissenschaft. Auf dem Weg zur industriellen Nutzung von Quantentechnologie entwickelt LHIND mit dem *Institut für Quantenphysik* der *Universität Hamburg* Quantenalgorithmen für das *Gate-Assignment-Problem* an Flughäfen.

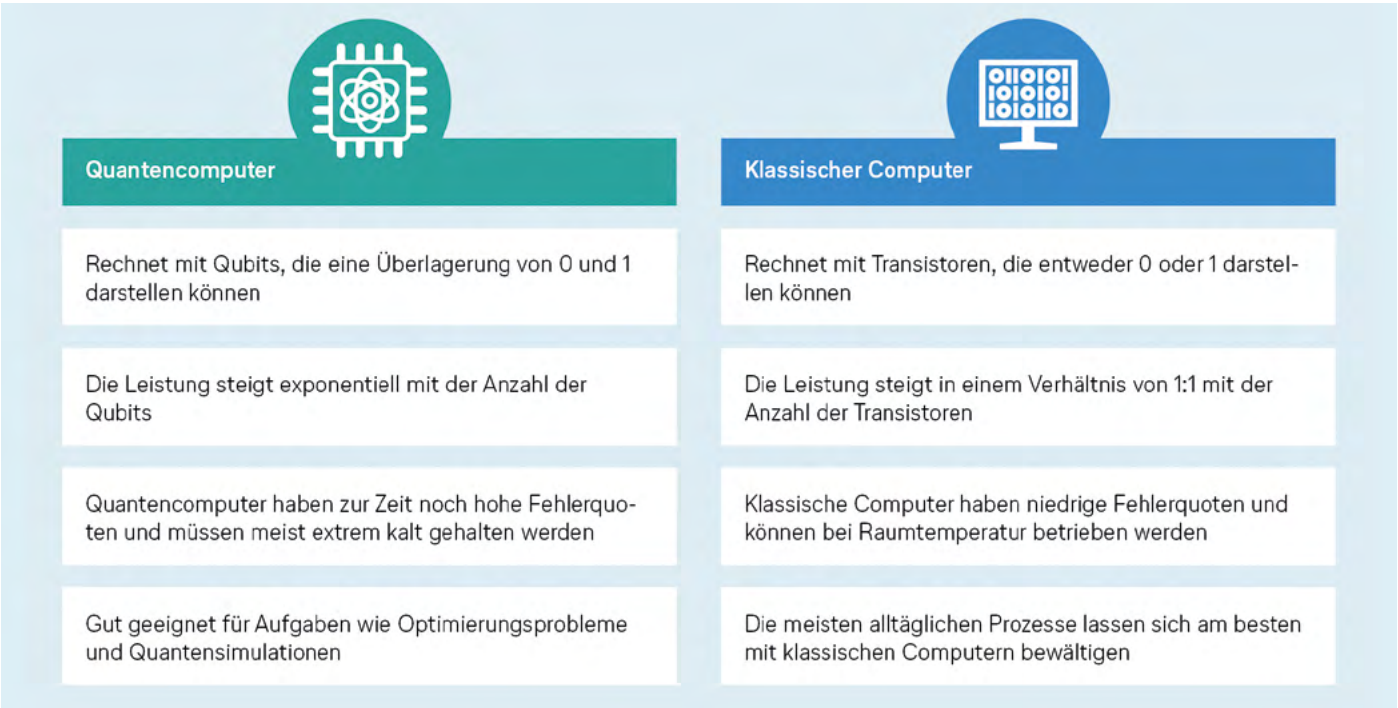


Bild: Lufthansa Industry Solutions

Der große Geschwindigkeitsunterschied zwischen klassischen Computern und Quantencomputing resultiert aus der unterschiedlichen Struktur der Prozesse

Seit Anfang 2025 ist das Unternehmen nun Auftragnehmer in der ***DLR Quantencomputing-Initiative***. Im Rahmen des DLR-QCI-Projekts *QCMobility* erhielt es den Zuschlag für die Luftfahrt-Teilprojekte „Strategische Planungsprozesse“ und „Taktische Planungsprozesse“. Bis Ende 2026 arbeitet LHIND dabei eng mit den DLR-Instituten für Luftverkehr und für Quantentechnologien zusammen.

Strategische Planungsprozesse: Immer das optimale Flugzeug am Start

Im Rahmen des Teilprojekts „Strategische Planungsprozesse“ werden gemeinsam mit der Fluggesellschaft *Eurowings* drei Optimierungsprobleme betrachtet, die zumeist Monate bis Wochen vor dem eigentlichen Flug ***(Day of Operations, DOO)*** stattfinden:

- *Aircraft Rotation Planning,*
- *Airline Disruption Management* (mit Fokus auf die Crew) und
- *Tail-Assignment*.

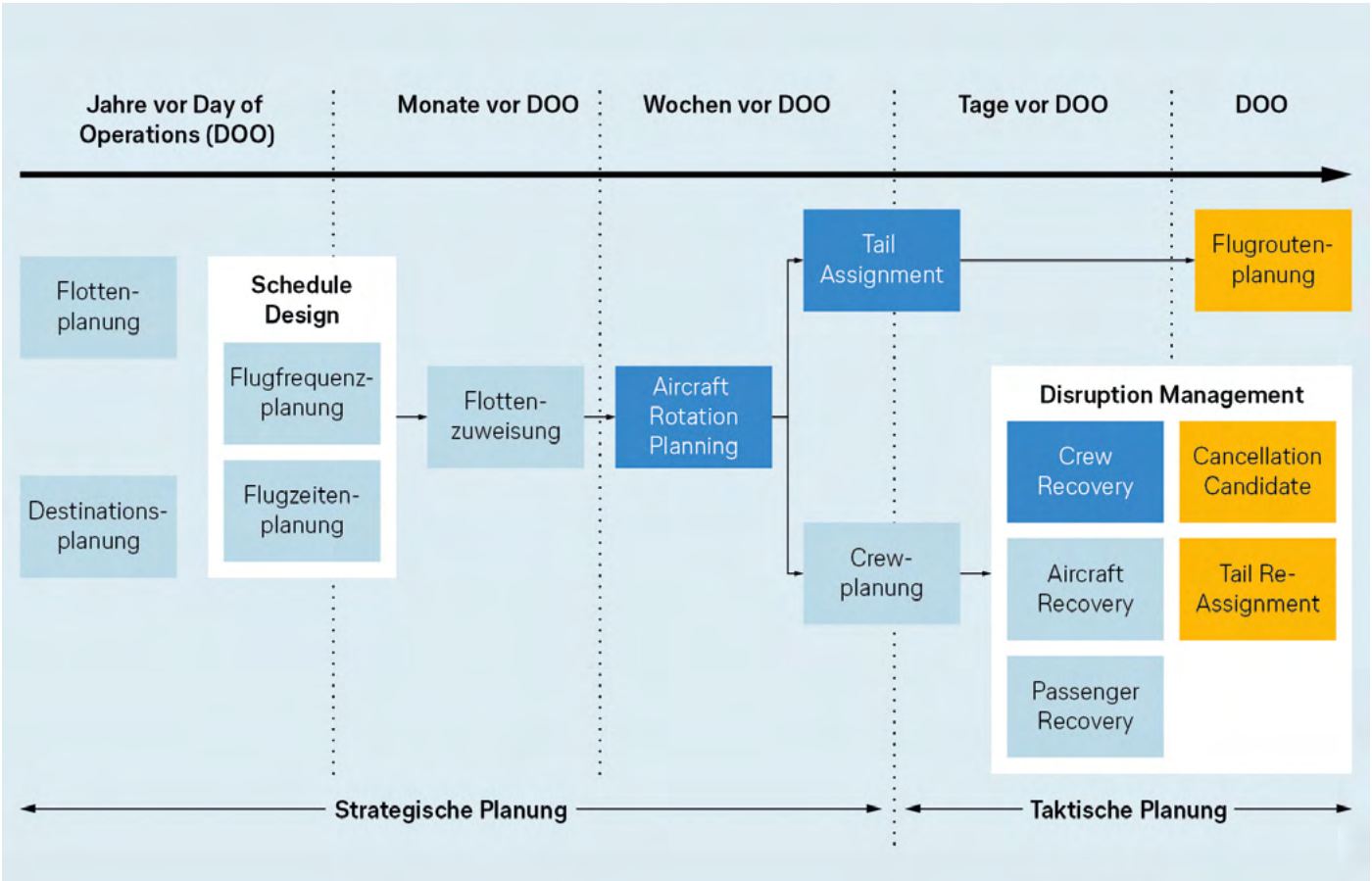
Beim **Aircraft Rotation Planning** wird die Reihenfolge geplant, in der Flugzeuge auf verschiedenen Flügen eingesetzt werden. Das Ziel besteht darin, die Nutzung der Flugzeuge zu optimieren und gleichzeitig die Einhaltung der Wartungsanforderungen sicherzustellen.

Das **Airline Disruption Management** befasst sich mit der Handhabung unvorhergesehener Ereignisse, die den Flugplan stören können, wie beispielsweise schlechtes Wetter, technische Probleme oder Personalengpässe. Das Ziel besteht darin, die Auswirkungen solcher Störungen zu minimieren und den Flugbetrieb so schnell wie möglich wieder in den regulären Ablauf zu bringen.

Beim **Tail-Assignment** wird festgelegt, welches spezifische Flugzeug (oft durch sein Registrierungszeichen oder *Tail Sign* identifiziert) für einen bestimmten Flug eingesetzt wird. Dabei werden die wirtschaftlichen und technischen Eigenschaften der Flugzeuge, ihre Wartungspläne und ihre Verfügbarkeit berücksichtigt. Die richtige Zuweisung ist entscheidend für die Effizienz und Zuverlässigkeit des Flugbetriebs. Es geht also nicht nur darum, „irgendein“ Flugzeug für einen Flug zu bestimmen, sondern das „richtige“ – aus wirtschaftlicher, technischer und betrieblicher Sicht.

Noch basiert dieser Prozess zu weiten Teilen auf klassischen Optimierungsverfahren. Mithilfe von verschiedenen Software-Systemen wird eine initiale Zuweisung erstellt – ergänzt durch manuelle Korrekturen durch Planungsteams sowie Expertinnen und Experten aus Instandhaltung, Netzwerkmanagement und Crewsteuerung. Dieser Zyklus beginnt etwa zehn Wochen vor dem DOO und kann sich über mehrere Iterationsschleifen erstrecken. Doch mit wachsender Netzwerkgröße und zunehmender Volatilität der Betriebslage wird dieser Ansatz immer fehleranfälliger und wirtschaftlich ineffizient.

Bild: Lufthansa Industry Solutions



Die Flugangebotsplanung beginnt für die Airline schon Monate, teilweise Jahre vorher. Die im Rahmen des Projekts QCMobility untersuchten Fragestellungen beziehen sich zum Teil auf strategische Prozesse, die lange im Voraus stattfinden, wie Tail-Assignment, Aircraft Rotation Planning oder Crew Recovery (blau markiert) und auch auf taktische, die am Tag des geplanten Flugs selbst stattfinden, wie Cancellation Candidate, Tail-Reassignment oder Flugroutenplanung (gelb markiert)

Formulierung als mathematisches Optimierungsproblem

Um möglichst realitätsnah forschen zu können und die praktische Anwendbarkeit zu belegen, konnte **Eurowings** als Partner für das Projekt gewonnen werden. Die Airline stellt Daten aus ihren Planungssystemen zur Verfügung. Eine Flotte von mehr als 100 Flugzeugen an 13 Standorten sorgt für ein hohes Maß an Komplexität. Gemeinsam mit dem auf anwendungs- und hardwarespezifische Quantencomputing-Lösungen spezialisierten Startup *Kipu Quantum* entwickelt LHIND hierfür mathematische Problemformulierungen und effiziente Quantenalgorithmen, die sowohl auf klassischen Computern als auch auf Quantenhardware evaluiert werden.

Bei der mathematischen Formulierung des Tail-Assignments als Multi-Commodity-Flow-Problem werden die Vorteile des Quantencomputings deutlich. Dabei handelt es sich um ein **Graphenbasiertes Optimierungsmodell**. Eine Kante kann man sich wie eine Linie zwischen zwei Punkten in einem Streckennetz vorstellen. Sie zeigt an, dass ein bestimmtes Flugzeug unter gegebenen Bedingungen von einem Flug zum nächsten übergehen kann. Ob dieser Übergang zulässig ist, hängt beispielsweise davon ab, ob genügend Zeit zum Umladen, Tanken oder technische Checks zur Verfügung steht. Ist der Übergang realistisch und regelkonform, entsteht eine gültige Kante im Graphen, andernfalls bleibt der Weg blockiert. Auf diese Weise entsteht ein Netzwerk aus möglichen Flugfolgen, das als Grundlage für die Optimierung dient.

Die Implementierung als *quadratisch-unbeschränktes-binäres Optimierungsproblem (QUBO)* schafft die Voraussetzung für die Ausführung auf Quantenhardware. Dabei geht es nicht nur um mathematische Eleganz, sondern um handfeste Ziele: Kostensenkung, CO_2-Reduktion, Betriebsstabilität und Resilienz.

Ein weiterer möglicher Vorteil der quantenbasierten Lösung ist, dass sie die Kombination bislang getrennter Entscheidungsbereiche ermöglichen könnte. So könnten in Zukunft Tail-Assignment und sogenannte *Cancellation-Candidate-Bewertungen*, also die gezielte Streichung von Flügen, gemeinsam optimiert werden. Was auf klassischen Computern aufgrund der unzähligen Flugkombinationen aktuell unlösbar ist, wird auf Quantencomputern zumindest denkbar – ein Fortschritt, der vor allem in irregulären Situationen wie Streiks oder massiven Wetterereignissen erhebliche operative Vorteile bringen könnte.

Taktische Planung: Schnell reagieren in Ausnahmefällen

Im Rahmen des Teilprojekts „Taktische Planungsprozesse“ stehen vor allem Lösungen zu operativen Planungsprozessen im Fokus:
- *Cancellation Candidate,*
- *Tail-Reassignment* und
- Flugroutenplanung

Diese sind für die Stabilität und Effizienz des Flugbetriebs im operativen Alltag von entscheidender Bedeutung. Während strategische Weichenstellungen und langfristige Planungen das Grundgerüst liefern, zeigt sich die Belastbarkeit des Systems im Umgang mit tagesaktuellen Störungen. In diesem Zusammenhang rücken das **Tail-Reassignment** und der **Cancellation Candidate** in den Mittelpunkt: die kurzfristige und oft unter hohem Zeitdruck zu treffende Entscheidung zum Ausfall von Flügen und zur Neuverteilung von Flugzeugen auf einzelnen Umläufen.

Bei der **Flugroutenplanung** gilt es, wenige Stunden vor Abflug die ideale Route zum Zielflughafen zu finden. Dabei müssen neben dem verfügbaren Flugwegenetz auch Wetter (zum Beispiel Wind), der Klimaeffekt, Kerosinverbrauch und Flugdauer berücksichtigt werden. An ihre Grenzen kommen aktuelle Löser hier vor allem aufgrund von komplizierten Regeln zur Nutzung des Flugwegenetzes.

Bei Lufthansa werden die verschiedenen Schritte und Entscheidungen aus den taktischen Planungsprozessen derzeit im ***Integrated Operations Control Center*** *(IOCC)* getroffen. Das IOCC befindet sich am Flughafen Frankfurt – von hier aus wird der Betrieb der in Frankfurt stationierten Flugzeuge gesteuert. Für die Entscheidungen werden Daten verschiedener Systeme mit Kunden-, Flugzeug-, Flugplan- und Crew-Daten integriert. Das Ziel besteht darin, innerhalb kürzester Zeit eine belastbare Entscheidungsgrundlage zu schaffen, die sowohl die unmittelbaren betrieblichen Auswirkungen als auch die mittel- und langfristigen Konsequenzen für den gesamten Flugplan abbildet.

Reaktionsfähigkeit als neuer Maßstab

Eine der kritischsten Disziplinen ist dabei das sogenannte Tail-Reassignment, also die kurzfristige Neuzuordnung von Flugzeugen. Herkömmliche Softwarelösungen stoßen hier an ihre Grenzen, da die Komplexität mit jeder zusätzlichen Kombination aus Flug, Crew und Maschine exponentiell steigt. Im IOCC der Lufthansa greifen Disponentinnen und Disponenten deshalb auf eine Vielzahl vernetzter Systeme zurück, um innerhalb weniger Minuten belastbare Entscheidungen zu treffen. Durch klassische und quantenbasierte Optimierungsverfahren soll diese Entscheidungsfindung künftig nicht nur schneller, sondern auch wirtschaftlicher und nachhaltiger werden.

Ob Gate-Assignment, Tail-Zuordnung oder Disruptionsmanagement: Die Herausforderungen in der Luftfahrt lassen sich mit konventionellen Mitteln bewältigen. Die Einbindung von Quantentechnologie bedeutet aber mehr als nur einen technologischen Fortschritt – sie verändert die Logik der betrieblichen Entscheidungsfindung. LHIND setzt dabei bewusst auf praxisnahe Szenarien und reale Flugdaten, um eine Brücke zwischen Forschung und Anwendung zu schlagen. Mittelfristig könnte die Luftfahrt dank neuer Quantenalgorithmen effizienter, resilienter und nachhaltiger werden. Quantencomputing ist eine Investition in die Zukunftsfähigkeit der Branche. Die Weichen dafür werden bereits heute in Projekten gestellt, die weit über theoretische Rechenmodelle hinausgehen. ●

DIE AUTOREN

Dr. Joseph Doetsch ist Leiter des LHIND Quantum- und Optimierungsteams.

Dr. Thorsten Ehlers ist Gruppenleiter „Digital Airline Twin“ des DLR-Instituts für Luftverkehr.