

AIQ-FAB

Hybrid AI for Reproducible Quantum Photonic Chip Fabrication by Femtosecond Laser Micromachining

Programm / Ausschreibung	DST 24/26, Menschen in FT2025, Digitale Technologien 2025	Status	laufend
Projektstart	01.10.2026	Projektende	30.09.2029
Zeitraum	2026 - 2029	Projektlaufzeit	36 Monate
Barwert der Projektförderung	€ 999.851		
Keywords	Hybrid AI, Quantum Photonic Chip, Femtosecond Laser Micromachining		

Projektbeschreibung

Das Projekt entwickelt eine KI-gestützte Fertigungsplattform für integrierte photonische Quantenschaltkreise auf Basis der Femtosekunden-Laser-Direktstrukturierung (FLDW) im Volumen von Glas. Durch die strukturelle Integration hybrider Künstlicher Intelligenz mit adaptiver Optik, Inline-Sensorik und einer harmonisierten Dateninfrastruktur wird die Herstellung von Quantenchips von einer empirischen Trial-and-Error-Optimierung zu einem reproduzierbaren und skalierbaren Fertigungsansatz weiterentwickelt. Künstliche Intelligenz wird dabei nicht nur zur Analyse eingesetzt, sondern direkt in die Prozesssteuerung integriert.

Integrierte photonische Schaltkreise sind Schlüsseltechnologien für Quantenkommunikation, Quantensensorik und Quantencomputing. Ihre Leistungsfähigkeit hängt von der präzisen Kontrolle von Wellenleitergeometrie, Brechungsindexmodifikation und Kopplungseigenschaften ab. Diese wiederum beeinflussen zentrale Kenngrößen (KPIs) der Quantenchips wie Ausbreitungsverluste, Modenfelddurchmesser, Lichtbrechung, Phasenstabilität und Interferenzvisibilität. Die FLDW-Fertigung ist jedoch durch nichtlineare Laser-Materie-Wechselwirkungen, Wärmeeinträge und tiefenabhängige Aberrationen gekennzeichnet. Daraus entstehen komplex gekoppelte Abhängigkeiten zwischen Laserparametern, adaptiver Optik und quantenrelevanten KPIs. Klassische Modelle erfassen diesen hochdimensionalen Parameterraum nur unvollständig, rein datengetriebene Ansätze verlieren häufig an Interpretierbarkeit und Robustheit.

Zur Bewältigung dieser Herausforderung entwickelt das Projekt ein hybrides KI-Framework, das physikbasierte Randbedingungen mit datengetriebenen Surrogat- und graphbasierten Modellen kombiniert. Eine Experiment-Management- und Wissensplattform gewährleistet strukturierte, FAIR-konforme Datenerfassung, semantische Verknüpfung von Parametern und KPIs sowie die Nachverfolgbarkeit von Optimierungsentscheidungen. Systematische Design-of-Experiments-Versuchsreihen erzeugen harmonisierte Datensätze, die Prozessparameter, adaptive Optik und Bauteilperformance verknüpfen. Darauf basierend werden multiobjektive Optimierungsmodelle trainiert, die stabile Prozessfenster für unterschiedliche Tiefen und Geometrien identifizieren.

Die KI-Modelle werden in eine hierarchische Closed-Loop-Regelarchitektur integriert, die Fertigung, Sensorik und Optimierung in Echtzeit verbindet. Inline-Monitoring ermöglicht adaptive Parameteranpassungen und stabilisiert die Prozessbedingungen. Dadurch werden Entwicklungszyklen verkürzt und Ausschuss verringert.

Über 36 Monate reicht das Projekt von der Etablierung der Plattform und Dateninfrastruktur über die KI-Entwicklung bis zur Closed-Loop-Integration und Validierung an photonischen Quantenschaltkreisen. Die erzielten Device-KPIs werden statistisch mit konventionellen Ansätzen verglichen, um Verbesserungen in Reproduzierbarkeit und Optimierungseffizienz nachzuweisen.

Das Projekt stärkt die technologische Souveränität Österreichs und Europas im Bereich photonischer Quantentechnologien durch den Aufbau prozessnahen Know-hows zur KI-gestützten Herstellung von Quantenhardware. JOANNEUM RESEARCH vertieft Kompetenzen an der Schnittstelle von Materialwissenschaft, Photonik und digitalen Technologien. Die industriellen Partner gewinnen verwertbares Know-how in hybriden KI-Frameworks und datengetriebener Prozessoptimierung mit Verwertungspotenzial in der fortgeschrittenen photonischen Fertigung und Quantentechnologie.

Abstract

The project develops an AI-supported fabrication platform for integrated quantum photonic circuits based on femtosecond-laser direct writing (FLDW) in bulk glass. By structurally integrating hybrid artificial intelligence with adaptive optics, inline sensing and a harmonised data infrastructure, it transforms quantum chip fabrication from empirical trial-and-error optimisation into a reproducible and scalable manufacturing paradigm. The project moves AI from post-process analysis to embedded process control at quantum device level.

Integrated quantum photonic circuits enable quantum communication, sensing and computing. Their performance depends on precise control of waveguide geometry, refractive index modification and coupling behaviour, directly affecting propagation loss, birefringence, phase stability, interference visibility and quantum state fidelity. FLDW fabrication is governed by nonlinear laser-material interaction, cumulative heat deposition and depth-dependent aberrations, leading to coupled dependencies between laser parameters, adaptive optics states and device-level key performance indicators (KPIs). Conventional modelling cannot capture this multidimensional parameter space, while purely data-driven approaches lack interpretability and robustness beyond trained domains, which is critical for quantum hardware with narrow tolerances.

The project establishes a hybrid AI framework combining physics-informed symbolic constraints with data-driven surrogate and graph-based models. A dedicated Experiment Management & Knowledge Platform ensures structured, FAIR-compliant data acquisition, semantic linking of parameters and KPIs, and traceable logging of optimisation decisions. Systematic Design of Experiments generates harmonised datasets linking process parameters and adaptive optics configurations to quantum-device performance metrics. These datasets train uncertainty-aware, multi-objective optimisation models capable of identifying stable fabrication windows across depths and geometries.

The hybrid AI models are integrated into a hierarchical closed-loop control architecture connecting fabrication, sensing and optimisation in real time. Inline monitoring of process signatures enables adaptive parameter updates and stabilisation of fabrication conditions. The resulting platform supports “first-time-right” manufacturing, reduces development cycles and improves yield stability.

Over 36 months, the project progresses from platform setup and data infrastructure development to hybrid AI modelling, closed-loop integration and extended validation on representative quantum photonic circuits. Device-level KPIs are benchmarked against conventional fabrication approaches to demonstrate improvements in reproducibility, optimisation efficiency and robustness.

The project strengthens Austria's and Europe's technological sovereignty in quantum photonics by establishing process-level know-how in AI-driven quantum hardware manufacturing. For JOANNEUM RESEARCH, it consolidates expertise at the interface of materials science, photonics and digital technologies. For the industrial partners, it creates exploitable intellectual property in hybrid AI frameworks, data platforms and AI-supported process optimisation, enabling future commercialisation in advanced photonic manufacturing and quantum technologies.

Projektkoordinator

- JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH

Projektpartner

- Krämer & Partner KG
- Phidtelity e.U.