

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Teil II: Eingehende Darstellung

FKZ 13N16357

Vorhabenbezeichnung: NImSoQ – New Imaging and Control Solutions for Quantum Processors and Metrology

Zuwendungsempfänger: Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ), Garching

Projektleiter: Dr. Sebastian Blatt

Laufzeit: 01.07.2022 – 31.12.2025 (42 Monate inkl. Verlängerung)

## 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen

### 1.1 Aufgabenstellung und Vergleich zur Vorhabenbeschreibung

Das übergeordnete Ziel des NImSoQ-Projekts war die Entwicklung einer neuartigen Kamera mit integrierter FPGA-SoC-Datenverarbeitung für die schnelle und zuverlässige Auslese von Qubit-Zuständen in atomaren Quantenprozessoren und Präzisions-Metrologie-Anwendungen. Die Kamera, zusammen mit einem dedizierten Kontrollsystem, ist ein Schlüsselgerät für die Realisierung fortgeschrittener Quantenalgorithmien, Multiqubit-Operationen und Fehlerkorrekturprotokolle in Architekturen mit kalten Atomen oder gefangenen Ionen. Das Projekt wurde im Rahmen des QuantERA Call 2021 als transnationales Verbundvorhaben zwischen Creotech Instruments S.A. (CTI, Polen, Koordinator), dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ, Deutschland) und dem Institut za fiziku (IPZ, Kroatien) durchgeführt.

Die Aufgabe von MPQ im Rahmen des Projekts umfasste drei Hauptbereiche:

- Mitwirkung an der Definition der Anforderungen an das Kamerasystem und die Kontrollsystemarchitektur (WP1)
- Aufbau einer experimentellen Plattform für die ultraschnelle Zustandsdetektion von Strontium-Atomen und Bewertung der Bildgebungsmethoden (WP3)
- Integration und Validierung der CTI-Kamera in Proof-of-Concept-Experimenten zur Qubit-Auslese, einschließlich Demonstration von Erasure-basierten Ausleseprotokollen für Quantenfehlerkorrektur (WP5)

Im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung wurden die Kernziele erreicht. Aufgrund administrativer Verzögerungen bei den nationalen Förderagenturen, der COVID-19-Pandemie und globaler Lieferkettenprobleme musste der zeitliche Ablauf angepasst werden. Der effektive Projektstart bei MPQ erfolgte am 1. Juli 2022 (Zugang zu Fördermitteln), praktisch mit der ersten Einstellung im Oktober 2022. Die COVID-19-Pandemie verursachte eingeschränkte Mobilität und erhebliche Verzögerungen bei Geräteelieferungen, was zu Verzögerungen bei der Vorbereitung geplanter Experimente und zu einer Änderung des Arbeitsplans führte. Die Verzögerungen wurden durch die Verteilung der Projektaktivitäten auf mehrere experimentelle Plattformen kompensiert. Das Konsortium beantragte eine kostenneutrale Verlängerung um sechs Monate, die von QuantERA und den nationalen Förderagenturen genehmigt wurde. Die Projektlaufzeit der deutschen nationalen Phase endete am 31. Dezember 2025.

### 1.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

#### 1.2.1 Anforderungsanalyse und Kontrollsystemarchitektur (WP1)

Gemeinsam mit CTI und IPZ wurden die Anforderungen an das Kamerasystem für die Strontium-Zustandsauslese definiert. Dies umfasste die erwarteten Photonenflüsse,

Verluste, Vibrationsgrenzen, elektromagnetische Störungen, erforderliche Abstraten und Quanteneffizienzen, Grenzen für Ausleserauschen sowie mechanische Anforderungen an Kühlung und physische Abmessungen. Funktionale Anforderungen wie Schnittstellen, Triggerung, Zeitstempel, Datenstreaming und Rekonfigurierbarkeit wurden ebenfalls spezifiziert.

In enger Zusammenarbeit mit MPQ und IPZ definierte CTI die Architektur des Kontrollsystems und bereitete das Sinara/ARTIQ-Kontrollsystem für die Experimente in den Partnerlaboratorien vor. Ein Aurora-64b/66b-Block auf dem Kasli-SoC wurde installiert und für die Kamerakommunikation konfiguriert. Ein Gateway wurde entwickelt, um Daten von der Kamera zu empfangen und als RTIO-Eingangsdaten bereitzustellen. Dieses Gateway wurde in ein ARTIQ-Modul eingekapselt, was die Steuerung auf ARTIQ-Softwareebene ermöglichte. Damit wurde Meilenstein MS1 „Kontrollsystem mit kommerzieller Kamera einsatzbereit“ erreicht.

Die Anforderungsdefinition wurde in 17 Konsortiumstreffen erarbeitet, darunter ein Laborbesuch von CTI bei MPQ in Garching am 8. März 2023, bei dem die Kameramechanik und mechanische Schnittstellen im Detail besprochen wurden.

### 1.2.2 Aufbau der experimentellen Plattform (WP3)

Der Schwerpunkt der Arbeit bei MPQ lag auf dem Aufbau einer dedizierten experimentellen Plattform – einer optischen Strontium-88-Gitteruhr – als Testplattform für die CTI-Kamera. Aufgrund der Verzögerungen bei der Lieferung experimenteller Komponenten entschied das MPQ-Team, die Projektaktivitäten auf mehrere experimentelle Plattformen zu verteilen. Während das Hauptexperiment aufgebaut wurde, wurde das Protokoll für schnelle Bildgebung an einem bereits etablierten Experiment realisiert. Der Aufbau des Hauptexperiments gliederte sich in folgende Phasen:

**Montage und Vakuumsystem (Januar–Juni 2024):** Die Vakuumkammer wurde entworfen, gefertigt und montiert. Das gesamte experimentelle Setup wurde auf einem kompakten Schienensystem aufgebaut. Die Atomquelle basiert auf einer selbstgebauten 2D-MOT mit Permanentmagneten bei 461 nm (ohne Zeeman-Slower). Ein schwacher Push-Strahl (ca. 100  $\mu$ W) erzeugt einen Atomfluss von etwa  $10^6$  Atomen pro Sekunde. Die Physik findet in einer unbeschichteten Glaszelle statt. Magnetfeldspulen wurden gelötet und Software/Hardware-Kontrollsysteme vorbereitet. Nach dem Ausheizen wurde ein Ultrahochvakuum von ca.  $10^{-11}$  mbar erreicht.

**Atomares Kühlen und Fangen (Juli–Oktober 2024):** Die zweistufige Laserkühlung wurde implementiert. In der ersten Stufe werden die Atome mittels der 461-nm-MOT auf ca. 3–5 mK gekühlt und eingeschlossen. In der zweiten Stufe wird die schmale 689-nm-Linie verwendet, um die Atome auf ca. 2  $\mu$ K abzukühlen – geeignet für das Laden in ein optisches Gitter. Es wurden erfolgreich die 2D-MOT-Atomquelle zur Überführung der Atome in die Glaszelle implementiert sowie Atome in einer 3D-MOT bei 2 mK-Temperaturen gefangen. Anschließend konnten ca.  $3 \times 10^6$  Atome in der roten MOT auf 2  $\mu$ K gekühlt werden.

**Magisches Wellenlängengitter (November 2024–Januar 2025):** Ein horizontales eindimensionales optisches Gitter bei der magischen Wellenlänge von 813 nm wurde implementiert. Ca. 200.000 (200e3) Atome konnten erfolgreich in das Gitter geladen werden. Parallel wurden grüne Lasersysteme für die Bildgebung metastabiler Zustände aufgebaut.

**496-nm-Bildgebung (Januar–Februar 2025):** Erste direkte Bilder von Atomen im metastabilen  $^3P_2$ -Zustand wurden sowohl im Gitter als auch in der Magnetfalle aufgenommen, zunächst mit einer kommerziellen EMCCD-Kamera, dann mit der CTI-Kamera (siehe Abschnitte 1.2.3 und 1.2.4).

**Uhrenspektroskopie (Februar–Juni 2025):** Der  $^1S_0$ – $^3P_0$ -Uhrübergang bei 698 nm wurde mit einem Faserlaser angeregt. Es wurden Ramsey-Spektroskopie und Rabi-Oszillationen

demonstriert. Die erreichte Linienbreite von ca. 100 Hz bestätigt den Uhrbetrieb im Lamb-Dicke-Regime.

Mit dem Abschluss des Aufbaus und der Validierung durch Fluoreszenzbilder von Grundzustandsatomen mit einer kommerziellen EMCCD-Kamera wurde Meilenstein MS6 „Kontrollsystem mit Kamera-Engineering-Modell einsatzbereit“ erreicht.

### 1.2.3 Bildgebung metastabiler Zustände am 496-nm-Übergang

Ein zentrales Ergebnis des MPQ-Beitrags ist die erstmalige direkte Bildgebung von Strontium-Atomen im metastabilen  $^3P_2$ -Zustand. Der 496-nm-Übergang ( $^3P_2 \rightarrow ^3D_3$ ) ist ein vielversprechender Kandidat für die direkte Auslese von Qubits in der Feinstruktur des Strontiums. Dieser Übergang ist jedoch nicht vollständig geschlossen: Nach etwa 3000 gestreuten Photonen setzt ein Verzweigungsprozess in höhere Zustände ein, was die Hauptlimitierung für Fluoreszenz-Bildgebungsschemata darstellt.

Erste Messungen umfassten Absorptionenbilder von Atomen, die kohärent über den 671-nm-Übergang in den  $^3P_2$ -Zustand getrieben wurden. Mittels Time-of-Flight-Bildgebung bei 496 nm konnte die Temperatur der Atome im  $^3P_2$ -Zustand direkt bestimmt werden ( $T \approx 1,6\text{--}2,5 \mu\text{K}$ ). Die Wechselwirkung zwischen Polarisation der Bildgebungsstrahlen und dem Hintergrundmagnetfeld wurde systematisch für  $\pi$ - und  $\sigma$ -Übergänge bei verschiedenen Magnetfeldstärken (5–20 G) charakterisiert.

Es wurden erstmals direkte 496-nm-Fluoreszenzbilder von Atomen aufgenommen, die entweder magnetisch oder in einem optischen Gitter gefangen waren. Insbesondere stellt die In-situ-Bildgebung von magnetisch gefangenen  $^3P_2$ -Atomen ein Novum dar. Das Team schaffte es, Atome direkt mittels einer komplexen magnetischen Quadrupol-Transition zwischen dem Grundzustand und dem metastabilen Zustand zu transferieren. Dies ermöglichte die gleichzeitige Auslese des Atomzustands über mehrere Bildgebungsübergänge. Damit wurden Meilenstein MS3 „Gleichzeitige Auslese zweier Qubit-Zustände demonstriert“ und der MPQ-Anteil von MS6 erreicht.

### 1.2.4 Integration und Charakterisierung der CTI-Kamera

Die von CTI entwickelte Kamera (Engineering Model, EM) wurde im Juni 2024 bei MPQ empfangen. Die Kamera hatte bei Transport erhebliche Schäden erlitten, weshalb Ersatzteile bestellt werden mussten. Creotech testete die Kamera per Fernzugriff (Juli–August 2024), um sicherzustellen, dass die Elektronik nicht beschädigt war.

Die Integration in das Experiment und das ARTIQ-Kontrollsystem erfolgte im September–Oktober 2024. Einige erforderliche Funktionalitäten erforderten Hardware- und Software-Upgrades. Im November 2024 wurden Hardware-Upgrade-Pakete von Creotech empfangen und implementiert. Ein externer Hardware-Trigger wurde implementiert, um die Kameraauslösung präzise mit der experimentellen Sequenz zu synchronisieren.

Erste Atombilder mit der CTI-Kamera wurden im Dezember 2024 bis März 2025 aufgenommen. Die erste direkte Beobachtung von Atomen im  $^3P_2$ -Zustand sowohl im Gitter als auch in der Magnetfalle wurde mit der CTI-Kamera erreicht. Die anfänglichen Untersuchungen der metastabilen Zustandsbildung wurden zunächst mit einer kommerziellen EMCCD durchgeführt; in den späteren Projektphasen wurden diese Messungen mit der CTI-Kamera wiederholt und die Leistung verglichen.

Die Kalibrierung umfasste Low-Gain- und High-Gain-Modi bei einer Belichtungszeit von 50 ms, einer Sensortemperatur von 40 °C und 12 Bit Auflösung. Ohne Repumping ist das Signal pro Atom auf ca. 300 Photonen begrenzt. Zur Verbesserung der Einzelatom-Leistung ist eine Aufrüstung der numerischen Apertur auf 0,65 sowie Repumping zur Erhöhung der Photonenfrequenz geplant.

### 1.2.5 Schnelle Qubit-Auslese und Erasure-Konversion (WP5)

Parallel zum Aufbau der Hauptexperimentplattform wurde die schnelle Qubit-Auslese an einem bestehenden Quantengas-Mikroskop bei MPQ demonstriert. Das MPQ-Team zeigte, dass ein 30- $\mu$ s-Puls ausreicht, um den Zustand eines Strontium-Feinstruktur-Qubits zu bestimmen (MS7). Das demonstrierte Schema für schnelle Bildgebung wurde dann genutzt, um die Qubit-Treue im Postprocessing zu verbessern. Die Erasure-Konversion verbesserte die Bell-Zustands-Treue von 0,94 auf 0,98. Dies unterstreicht das Potenzial solcher Bildgebungsschemata als schnelle und zuverlässige Auslese, die für Quantenfehlerkorrektur in neutralatom-basierten Quantentechnologien genutzt werden kann.

Die schnelle Bildgebung von Einzelatomen wurde bei MPQ ebenfalls bestätigt, was die Eignung für Erasure-basierte Ausleseprotokolle für Quantencomputing-Anwendungen belegt. Weiterführende Arbeiten umfassen die Implementierung von Dreifarbbildgebung (461, 689 und 496 nm) für gleichzeitige Auslese und Erasure-Konversion sowie die Aufrüstung des optischen Systems für erhöhtes Signal-Rausch-Verhältnis.

### 1.3 Meilensteine und Deliverables (MPQ-Beteiligung)

Die folgende Tabelle fasst die für MPQ relevanten Meilensteine und Deliverables zusammen:

Nr.	Bezeichnung	Typ	Status
MS1	Kontrollsystem mit kommerzieller Kamera einsatzbereit	Meilenstein	Erreicht
MS3	Gleichzeitige Auslese zweier Qubit-Zustände demonstriert	Meilenstein	Erreicht
MS6	Kontrollsystem mit Kamera-EM einsatzbereit	Meilenstein	Erreicht
MS7	Niedriglatenz-Bildgebung von 1S0, 3P0 und 3P2 demonstriert	Meilenstein	Erreicht
D1/D2	System-/Kamera-Anforderungsbericht	Bericht	Pünktlich
D3	Leistung des Kontrollsystems in Sr-Experimenten	Bericht	Verzögert*
D7	Abgeschlossener Aufbau – Phasenbericht	Bericht	Verzögert*
D13	Benchmark bestehender Kameratechnologie	Bericht	Pünktlich
D15	Strontium-Zustandsdetektion (Bericht statt Preprint)	Bericht	Ersetzt
D16	Quantitativer Vergleich neue vs. alte Kamera	Bericht	Verzögert
D17	Demonstration der Niedriglatenz-Bildgebung	Bericht	Pünktlich

\* Verzögerungen aufgrund von Verzögerungen beim Aufbau des Experiments.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Mittel des MPQ-Teilprojekts wurden überwiegend für Personalkosten (wissenschaftliche Mitarbeiter, Postdoktoranden, Doktoranden) sowie für Investitionen in experimentelle Ausrüstung verwendet. Die wesentlichen Investitionspositionen umfassten:

- Lasersysteme: Diodenlaser bei 461 nm, 689 nm, 496 nm, 698 nm und 813 nm für Kühlung, Bildgebung, Spektroskopie und Gittererzeugung
- Vakuumsystem: Ultrahochvakuumkammer mit Glaszelle, Pumpen und Messgeräte
- Optische Komponenten: Spiegel, Linsen, akustooptische Modulatoren, Faser-Frequenzkamm-Anbindung
- Kontrollsystem: ARTIQ/Sinara-Hardware für die experimentelle Steuerung und Kameraintegration
- Magnetfeldspulen und Netzteile für die MOT-Konfigurationen

Die Ausgaben waren notwendig und angemessen für den Aufbau einer vollständigen optischen Gitteruhr als Testplattform. Die kostenneutrale Laufzeitverlängerung um sechs Monate ermöglichte die vollständige Nutzung der bewilligten Mittel.

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Sämtliche durchgeführten Arbeiten waren für die Erreichung der Projektziele notwendig und in ihrem Umfang angemessen. Der Aufbau einer neuen experimentellen Plattform war erforderlich, um die CTI-Kamera unter realistischen Bedingungen testen zu können. Die gewählte Plattform – eine optische Gitteruhr – erlaubt sowohl die Bewertung der Kameraleistung für die 496-nm-Bildgebung als auch die Demonstration der Relevanz für Präzisions-Metrologie.

Die parallele Arbeit an einem bestehenden Quantengas-Mikroskop war eine notwendige und vom Konsortium genehmigte Ausweichstrategie, um trotz der Verzögerungen beim Aufbau der Hauptplattform frühzeitig Ergebnisse zur schnellen Qubit-Auslese zu erzielen. Diese Strategie hat sich als sehr erfolgreich erwiesen und zum Erreichen von MS7 geführt.

Die umfangreiche Kalibrierung und Charakterisierung der CTI-Kamera war notwendig, um eine fundierte Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit im Vergleich zu kommerziellen Lösungen zu ermöglichen und Rückmeldungen an CTI für die Weiterentwicklung zu geben.

### 4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse haben unmittelbaren Nutzen für mehrere Bereiche:

**Quantencomputing:** Die demonstrierte schnelle Qubit-Auslese mit 30- $\mu$ s-Erase-Konversion ist direkt relevant für die Implementierung von Quantenfehlerkorrekturprotokollen in neutralatom-basierten Quantencomputern. Die Firma planqc, ein Spin-off des MPQ, hat bereits Interesse an der Nutzung der Kamera bekundet und es wird gemeinsam ein Projektantrag vorbereitet.

**Präzisions-Metrologie:** Die optische Strontium-Gitteruhr bietet eine Plattform für verschränkungsverstärkte Quantenmetrologie, dokumentiert durch den eingeladenen ICOLS-2025-Beitrag.

**Kameratechnologie:** Die detaillierte Bewertung und das Feedback an CTI tragen zur Kommerzialisierung des Kamerasystems bei. CTI wurde von mehreren Stakeholdern angesprochen, darunter planqc und AQT (gefangene Ionen). Die Kamera hat auch Anwendungspotenzial jenseits der Quantentechnologie, z.B. in der Fluoreszenzmikroskopie, FLIM, Superauflösungsmikroskopie und HDR-Bildgebung. Zudem wurde bei IPZ die Fähigkeit der Kamera als Hochbandbreite-Quanten-Zufallszahlengenerator demonstriert.

Die Zusammenarbeit wird über die Förderperiode hinaus fortgesetzt, wie im Abschlussbericht dokumentiert.

### 5. Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit gab es bei gefangenen Ionen neue Ansätze zur Integration von APD- oder supraleitenden Nanodraht-Detektoren direkt in die Ionenfalle. Diese Ansätze haben jedoch eine sehr begrenzte Flexibilität in ihrer Implementierung und sind mit erheblichem Rauschen und Übersprechen behaftet. Nach unserem Kenntnisstand gibt es bisher keine anderen kamerabasierten Lösungen mit integrierter FPGA-SoC-Elektronik, die speziell für die Qubit-Auslese entwickelt werden. Die Entwicklung der Kamera und die Demonstration neuartiger Auslesetechniken für Strontium-Atome in Schlüsselanwendungen des Quantencomputing und der Metrologie bleibt das Hauptziel und ist nach wie vor relevant.

## 6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Veröffentlichungen mit MPQ-Beteiligung:

- **Nr. 3 (2022):** A. Kaminska, P. Zienkiewicz, N. Šantić, S. Blatt, J. Zeiher: „The NImSoQ project“. Konferenzpräsentation, alle Partnerinstitutionen.
- **Nr. 7 (2025):** R. Tao et al.: „Universal gates for a metastable qubit in strontium-88“. Unter Begutachtung (Peer-reviewed Journal). arXiv:2506.10714. MPQ.
- **Nr. 8 (2025):** K. H. Goh, F. Priestersbach, S. Blatt, S. Kristensen: „Towards entanglement-enhanced quantum metrology with cold <sup>88</sup>Sr atoms“. Akzeptiert bei ICOLS 2025. MPQ.

Abschlussarbeiten:

- Ka Hui Goh: Masterarbeit „Towards Rapid Imaging of the Strontium Optical Qubit“, verteidigt im November 2024 am MPQ.

Geplante Veröffentlichungen:

- Publikation zur erstmaligen direkten Fluoreszenzbildgebung metastabiler Strontium-Zustände am 496-nm-Übergang (in Vorbereitung).
- Ergebnisse der Kamera-Charakterisierung und des Vergleichs mit kommerziellen Detektoren in Zusammenarbeit mit CTI.