



**QUANTUM OPTICS  
JENA**

QUANTUM OPTICS JENA GMBH

## SCHLUSSBERICHT

# Titel: „Nichtlineares Interferometer als Beleuchtungsmodul für Quantenmikroskopie (qmic-lightengine)“

Teilvorhabensbeschreibung TP 14 des Verbundprojekts  
„Quanteninspirierte, omnifunktionale Fasersensorsysteme“

Akronym Gesamtvorhaben: QUANTIfiSENS

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**RUBIn**  
Regionale unternehmerische  
Bündnisse für Innovation

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Förderministerium:** Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und  
Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation (RUBIN)

**Projektzeitraum:** 01/09/2022 – 31/08/2025

**Förderzeichen:** 03RU1U071M

**Zuwendungsempfänger:** Quantum Optics Jena GmbH, Am Zementwerk 8, D-07745 Jena

**Projektleiter/Ansprechpartner:** Dr. Kevin Füchsel, Tel.: 03641/2361314, E-Mail: [k.fuechsel@qo-jena.com](mailto:k.fuechsel@qo-jena.com)

**Autoren:** Dr.-Ing. Oliver de Vries, Dr. rer. nat. Alessandro Zannotti, Dr. rer. nat. Alek Lagarrigue, M.Sc. Laurentiu Dosan  
(Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor)

Jena, 28/02/2026

## 1. Kurzdarstellung des Projektes

**Aufgabenstellung:** Das Teilprojekt 14 ‚Qmic-lightengine‘ im Verbundprojekt RUBIN QUANTIFISENS hatte zum Ziel, eine miniaturisierte Quantenlichtquelle für die mittelinfrarote (MID-IR) Mikroskopie zu entwickeln. Die zentrale Aufgabenstellung umfasste die Realisierung einer kompakten, transportablen Quelle mit drei Hauptanforderungen: (1) Langzeitstabilität über mindestens 24 Stunden im kontinuierlichen Betrieb, (2) eine Photonenpaarrate von mehr als  $10^9$  pro Sekunde und (3) eine breitbandige spektrale Abdeckung im Bereich von  $\sim 3.3 - 3.4 \mu\text{m}$  im mittleren Infrarotbereich. Die Entwicklung sollte zudem Schnittstellen zu den Projektpartnern LASOS GmbH, Precipoint GmbH und dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF) beinhalten.

**Voraussetzungen:** An den wissenschaftlichen Stand der Quantenbildgebung mit undetektierten Photonen (Quantum Imaging with Undetected Photons, QIUP) wurde angeknüpft [1,2]. Diese Technik basiert auf Quantenkorrelationen in nichtlinearen Interferometern und ermöglicht die Bildgebung im mittleren Infrarotbereich durch Detektion von sichtbaren Photonen. Das Verfahren nutzt korrelierte Photonenpaare aus nichtlinearer Frequenzkonversion: Pump-Photonen werden in periodisch gepolten nicht-linearen Kristallen in Signal- ( $<1000 \text{ nm}$ ) und Idler-Photonen ( $>1000 \text{ nm}$ ) konvertiert. Das Idler-Photon ist aufgrund seiner spezifischen Resonanzwellenlänge im MID-IR-Bereich in der Lage, effektiv mit der Probe zu interagieren, wird aber nicht detektiert, da Detektoren für diese Wellenlänge entweder kostspielig und wenig effizient oder schlicht nicht verfügbar sind. Stattdessen wird das korrelierte Signal-Photon mit hocheffizienten Silizium-Einzelphotonendetektoren gemessen. Diese Methode umgeht die technischen Herausforderungen der MID-IR-Detektion, die typischerweise aufwändige Kühlung und geringere Quanteneffizienzen erfordert [7]. Vorarbeiten verschiedener Forschungsgruppen, insbesondere die wegweisenden Arbeiten von Lemos et al. [2] und Paterova et al. [3,4], zeigten das Potenzial dieser Technik für die Spektroskopie und Bildgebung [5,6].

**Ablauf des Vorhabens:** Das Vorhaben gliederte sich in mehrere Arbeitspakete, die systematisch bearbeitet wurden. Zunächst erfolgte in enger Abstimmung mit den Projektpartnern die Definition der Schnittstellen zwischen der Qmic-lightengine-Hardware und dem Mikroskopsystem (AP 3.2.1-14). Als primäre Anwendung wurde eine mikroskopische Lipid-Analyse im Wellenlängenbereich von 3300-3400 nm mit einer minimalen Auflösung von  $200 \times 200$  Bildpunkten identifiziert. Die erforderlichen Parameter für die Qmic-lightengine wurden entsprechend spezifiziert, um die spätere Integration zu ermöglichen. Im Konzept- und Designprozess (AP 3.3.2-14) entwickelte Quantum Optics Jena GmbH in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOF und Precipoint GmbH ein optisch modulares Design. Die Quantenquelle basiert auf geschirpten nichtlinearen ppLN-Kristallen, um sowohl die erforderliche Helligkeit als auch die spektralen Anforderungen zu erfüllen. Ein integriertes Messmodul detektiert die 790 nm Signal-Photonen mittels Single Photon Avalanche Diode (SPAD) oder Spektrometer und nutzt eine sCMOS-Kamera für die präzise optische Ausrichtung. Das Mikroskopdesign verwendet ausschließlich reflektierende Optik, wobei die Fokussierung in der Probe zunächst mit off-axis Parabolspiegeln realisiert wurde. Die Eignung von Schwarzschild-Objektiven für zukünftige Optimierungen wurde durch optische Simulationen untersucht. Nach Abschluss des optischen Systemdesigns wurde ein transportables Breadboard-Laborexperiment aufgebaut (AP 3.3.3-14), um die Leistungsfähigkeit des QIUP-Mikroskops zu evaluieren. Dieser Aufbau diente der Charakterisierung der Güte des nichtlinearen Interferometers sowie der experimentellen Validierung des Designs für die spätere Miniaturisierung. Ein wichtiger Meilenstein war die Zusammenführung der Subsysteme Ende 2024: Die Breadboard Qmic-lightengine von Quantum Optics Jena GmbH, die hochpräzise Scanning-Stage von Precipoint GmbH und ein Lasersystem von Lasos GmbH wurden erfolgreich integriert und in Betrieb genommen. Parallel koordinierte Quantum Optics Jena GmbH als Leitung des Innovationsbereichs 3 ‚Quanten- und Lasertechnologie‘ (AP 5.3.10-14) die Forschungsaktivitäten zwischen allen Projektpartnern. Neben regelmäßigen monatlichen technischen Treffen wurden insbesondere in der Anfangsphase häufige themenspezifische Besprechungen durchgeführt, um die enge Verzahnung zwischen den Teilprojekten zu gewährleisten.

**Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Projektpartnern:** Im Berichtszeitraum wurden bedeutende wissenschaftlich-technische Ergebnisse erzielt. Alle geplanten Arbeitspakete wurden zu 100 %

bearbeitet und die gesetzten Meilensteine erreicht. Ein zentraler Erfolg war die Realisierung eines funktionsfähigen Prototyps einer QIUP-basierten Quantenlichtquelle für die mittelinfrarote Mikroskopie. Dieser Prototyp integriert gechirpte ppLN-Kristalle zur Erzeugung korrelierter Photonenpaare, hocheffiziente Silizium-Einzelphotonendetektoren und ein nichtlineares Interferometer in einem transportablen Breadboard-Aufbau. Die erfolgreiche Systemintegration mit der Scanning-Stage von Precipoint und dem Lasersystem von Lasos ermöglichte erstmals Bildgebungsexperimente im MID-IR-Bereich mittels Detektion sichtbarer Photonen. Die Charakterisierung dieser ersten Demonstrationsaufnahmen lieferte wichtige Erkenntnisse für die weitere Optimierung und Miniaturisierung des Systems. Die optische Charakterisierung des integrierten QIUP-Rastermikroskops ergab eine Visibility im Fernfeld von 46,7% und eine maximale fasergekoppelte Visibility von 15,8%. Diese Werte belegen die erfolgreiche Realisierung des nichtlinearen Interferometers und die Qualität der Quantenkorrelationen zwischen Signal- und Idler-Photonen. Als erstes Testobjekt diente eine 3D-gedruckte binäre Maske, die in einem  $11 \times 11$  Raster mit  $300 \mu\text{m}$  Schrittweite abgetastet wurde. Die Integrationszeit pro Bildpunkt betrug 1 Sekunde, was die Machbarkeit zeitaufgelöster Messungen demonstriert. Ein zentrales wissenschaftliches Ergebnis ist, dass die Auflösung der QIUP-Technik nicht von der Stärke der Quantenkorrelationen abhängt, sondern ausschließlich durch die klassische Punktstreufunction (PSF) des Systems bestimmt wird. Diese wird primär durch die Größe des Idler-Strahls in der Probenebene, die numerische Apertur und die Kristallparameter definiert – analog zur konventionellen konfokalen Mikroskopie. Dieses Verständnis ist fundamental für die zukünftige Systemoptimierung. Die laterale Auflösung wurde mittels Messerkantenmethode experimentell zu  $r_{\text{exp}} = 39,2 \mu\text{m}$  bestimmt, was mit der theoretischen Vorhersage von  $r_{\text{th}} = 33,4 \mu\text{m}$  übereinstimmt. Das gemessene Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) von 53,13 (34,5 dB) demonstriert die Funktionsfähigkeit des Proof-of-Concept-Systems. Die Auflösung kann durch teleskopische Vergrößerungssysteme im Idler-Arm oder kürzere ppLN-Kristalle verbessert werden, wobei Kompromisse zwischen Auflösung, Brightness und SNR berücksichtigt werden müssen. Das Projekt wurde in enger Kooperation mit mehreren Partnern durchgeführt. Das Fraunhofer IOF war maßgeblich an der Entwicklung des optischen Konzepts beteiligt, Precipoint GmbH entwickelte die hochpräzise Scanning-Stage und Automatisierungselektronik, Lasos GmbH lieferte das Lasersystem. Die Koordination erfolgte über regelmäßige monatliche Meetings sowie themenspezifische Besprechungen, um Schnittstellen zu definieren. Die erfolgreiche Zusammenführung der Komponenten Ende 2024 demonstriert die funktionierende Koordination im Innovationsbereich 3 ‚Quanten- und Lasertechnologie‘. Die Forschungsergebnisse wurden in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht, hervorzuheben ist die Arbeit von León-Torres et al. in *Laser & Photonics Reviews* [1] zur MID-IR-Quanten-Rastermikroskopie, die die wissenschaftlichen Grundlagen der QIUP-Technik weiterentwickelt und zur internationalen Sichtbarkeit beiträgt.

## Literaturverzeichnis

1. León-Torres, J. R., Dosan, V.-L., Ćurčić, M. M., Lagarrigue, A., Setzpfandt, F., Gräfe, M., & Gili, V. F. Mid-Infrared Quantum Scanning Microscopy via Visible Light Beyond Spatial Correlations. *Laser & Photonics Reviews*.
2. Lemos, G. B., Borish, V., Cole, G. D., Ramelow, S., Lapkiewicz, R., & Zeilinger, A. (2014). Quantum imaging with undetected photons. *Nature*, 512(7515), 409-412.
3. A. V. Paterova, H. Yang, C. An, D. A. Kalashnikov and L. A. Krivitsky (2018). Tunable optical coherence tomography in the infrared range using visible photons. *Quantum Science and Technology* 3, 025008.
4. Paterova, A. V., Maniam, S. M., Yang, H., Greci, G., & Krivitsky, L. A. (2020). Hyperspectral infrared microscopy with visible light. *Science Advances*, 6(44), eabd0460.
5. Gilaberte Basset, M., Setzpfandt, F., Steinlechner, F., Beckert, E., Pertsch, T., & Gräfe, M. (2019). Perspectives for applications of quantum imaging. *Laser & Photonics Reviews*, 13(10), 1900097.
6. Kviatkovsky, I., Chrzanowski, H. M., Avery, E. G., Bartolomaeus, H., & Ramelow, S. (2020). Microscopy with undetected photons in the midinfrared. *Science Advances*, 6(44), eabd0264.
7. Kalashnikov, D. A., Paterova, A. V., Kulik, S. P., & Krivitsky, L. A. (2016). Infrared spectroscopy with visible light. *Nature Photonics*, 10, 98-101.

## 2. Eingehende Darstellung (Sachbericht)

Im folgenden Kapitel wird die Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele wissenschaftlich-technisch beschrieben.

### AP 3.2.1-14 – Entwicklung Schnittstellen Software - Qmic-lightengine Hardware, Mikroskop

In Kooperation mit den Partnern PreciPoint, IOF und LASOS wurde über die konkrete Zielstellung der Forschungsaktivitäten diskutiert. Es herrscht Einigkeit darüber, dass eine reale mikroskopische Applikation die Technologieentwicklung motiviert. Aus der Erfahrung des Projektpartners PreciPoint im Umfeld der Analyse biologischer Proben, genauer, der Erkennung von Krebs-Markern, kann der quantenmikroskopische Ansatz gegenüber aktuellen Analyseverfahren sehr vorteilhaft sein. Bekannte Krebsbiomarker sind Lipide und Proteine, welche eine Analyse im mittleren Infrarotbereich notwendig macht. Lipide müssen dabei im Bereich von 3300-3400 nm analysiert werden. Aus diversen Gründen ist die Analyse von Proteinen im Wellenlängenbereich von 5880-6250 nm (mit breiteren spektralen Peaks) von sehr großem Interesse für den Mikroskop-Hersteller PreciPoint, sie ist jedoch herausfordernder für das Quanten-Quellendesign und damit die Implementation in einen realen, kompakten Mikroskop-Aufbau. Deshalb sieht der Plan vor, zunächst die Analyse der Lipide zu priorisieren.

Für die Umsetzung einer realen Demonstration wurden folgende Zielparameter definiert:

- Minimale Auflösung des scannenden Mikroskops: 200 x 200 Punkte (das ergibt 40.000 Einzelmessungen)
- Überlegung der Verwendung von zwei Modi (grober und feiner Scan)
- Verwendung reflektiver Optiken
- Einzelphotonendetektion
- Für Lipide: Möglichkeit der Nutzung von ppKTP oder ppLN als nichtlineare Kristalle
- Idler-Wellenlänge (Scanner): 3300-3400 nm
- Signal-Wellenlänge (Spektrometer): Si-basierte APD-Technologie im VIS/NIR Bereich, je nach Pump Laserwellenlänge (z.B. 405 nm Laserdiode, 532 oder 640 nm Festkörperlaser)
- Breitbandscan (100 nm) hat den Vorteil, dass kein Temperatur- und Wellenlängentuning benötigt wird (höhere Geschwindigkeit)
- Geschwindigkeit 90 ms je Einzelmessung: Gesamtdauer bei 40.000 Messpunkten = 1h
- Anzahl an Schritten je Einzelmessung:
  - Bewegung Scanner zu Zielposition
  - Anpassung des Interferometers = mind. 4 Zwischenmessungen
  - Präzise spektrale Messung 1-10 ms
- Kompaktheit der Quanten-Quelle und Analyse, damit diese in aktuelle Mikroskop-Plattformen integriert werden könnte

Weitere quantitative Ausarbeitungen dieses Arbeitspaketes werden im Verlauf des Projektes erfolgen. Ziel soll es sein, einen in sich schlüssigen Anwendungsfall zu generieren. Darauf basierend können dann die Entwicklungsziele bzgl. der Quanten- und Lasertechnologien extrahiert und unter den Partnern kommuniziert werden.

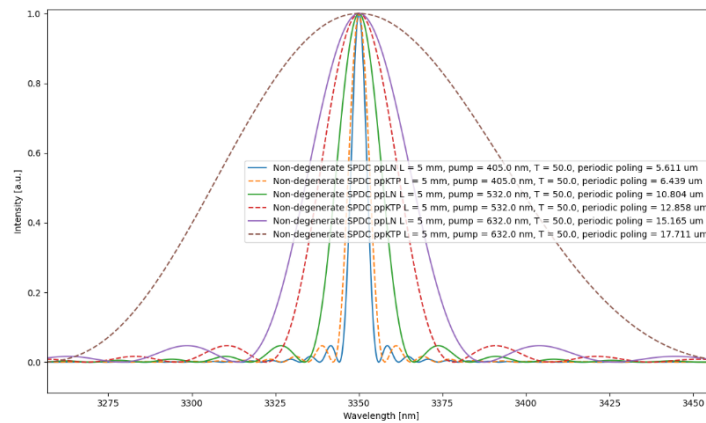
### AP 3.2.1-14 – Entwicklung Schnittstellen Software - Qmic-lightengine Hardware, Mikroskop

Die hohen Anforderungen des Projekts erfordern eine Evaluierung nichtlinearer Kristalle, um die große Bandbreite im MID-IR zu erreichen. Ein weiterer wichtiger Faktor neben dem nichtlinearen Kristall ist die Wahl der Pumpwellenlänge. Ursprünglich war in dem Projekt die Verwendung eines Pump Lasers bei 405 nm vorgesehen. Aufgrund der folgenden Überlegungen wurde jedoch beschlossen, auf eine Wellenlänge von 640 nm auszuweichen.

#### Änderung der Pumpwellenlänge von 405 nm auf 640 nm

Eine der Anforderungen an das Mikroskop besteht darin, eine Idler-Wellenlänge von 3,3 - 3,4  $\mu\text{m}$  anzustreben. Ursprünglich war geplant, die 405-nm-Pumpe zu verwenden, aber Simulationen der parametrisch-konvertierten Signal-

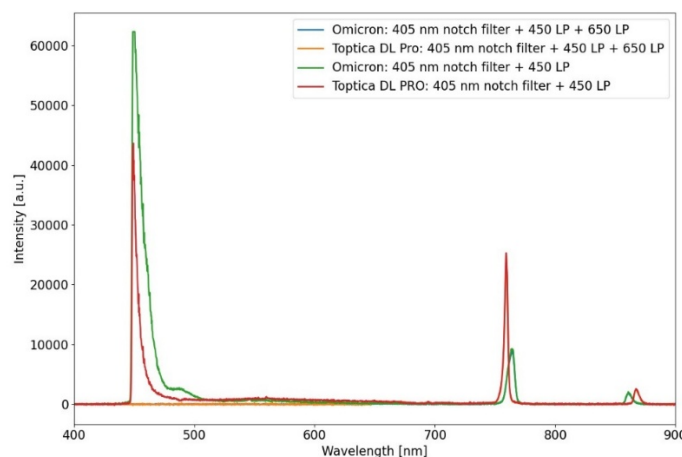
& Idler-Wellenlängen zeigten, dass ihre Bandbreite stark von der Wellenlänge des verwendeten Pump lasers abhängt, siehe Abbildung 1.



**Abbildung 1:** Vergleich der spektralen Bandbreite bei der zentralen Idler-Wellenlänge von 3350 nm für verschiedene Pumpwellenlängen und nichtlineare Kristalle. Es zeigt sich, dass eine längere Pumpwellenlänge (hier von 632 nm) zu der von uns angestrebten Bandbreite von wenigen Millimetern für nicht gechirpte Kristalle führt.

Die Verwendung des 405-nm-Lasers ist aufgrund seiner geringen SPDC-Bandbreite im Bereich von 3,3 – 3,4 µm mit den folgenden Problemen verbunden:

- Die Einstellung der Temperatur des nichtlinearen Kristalls ermöglicht das Scannen des gesamten Bereichs von 3,3 – 3,4 µm, was unnötig Zeit kostet (mind. einige Sekunden für jeden Scanpunkt, Ziel ist kleiner 90 ms).
- Die Verwendung von gechirpten, periodisch gepolten Kristallen könnte dieses Problem lösen, erfordert aber eine fortschrittliche Technologie der periodischen Polung.
- Kurze Kristalle würden auch größere Spektren abdecken, aber sie würden nur eine geringe Helligkeit liefern, was auch mit der geringen Leistung des 405-nm-Lasers nicht zu erreichen wäre.
- Die Wellenlänge des Signalphotons: 405 nm -> 460,7 nm + 3350 nm liegt in einem Wellenlängenbereich, in dem die Fluoreszenz des KTP durch die 405-nm-Pumpe die Visibility des Bildgebungsverfahrens verringern könnte.
- 405 nm hat eine Bandbreite von etwa 150 MHz, was einer Kohärenzlänge von ~640 nm entspricht. Da die parametrisch konvertierten Photonen, die beim ersten und zweiten Durchgang durch den nichtlinearen Kristall erzeugt werden, kohärent sein müssen, ist der optische Weg in und aus dem Mikroskop begrenzt.
- Zusammenfassung, siehe Abbildung 2.



**Abbildung 2:** Spektrale Messungen der SPDC, die beim Pumpen mit zwei verschiedenen 405-nm-Lasern und verschiedenen Filterkonfigurationen erzeugt werden: ein Notch-Block bei 405 nm, ein Langpassfilter bei 450 nm und ein optionaler Langpass bei 650 nm. Um einen Idler bei 3350 nm zu erreichen, ist aufgrund der Energieerhaltung des Prozesses eine Signalwellenlänge von 460 nm erforderlich. Bei dieser Wellenlänge zeigen die untersuchten Laser ein

Rauschen auf Einzelphotonenebene. Der anfängliche Peak, der direkt nach 450 nm auftritt, ist auf diese Restpumpe zurückzuführen, konnte aber mit einem Kurzpassfilter vor den Kristallen subtrahiert werden. Wenn die Pumpe nur bis 450 nm gefiltert wird, wird eine geringe Menge an Fluoreszenz bei 500-700 nm detektiert, deren Intensität jedoch im Vergleich zum SPDC-Signal deutlich geringer bleibt.

Die Verwendung einer längeren Wellenlänge um 640 nm ist in folgender Hinsicht von Vorteil:

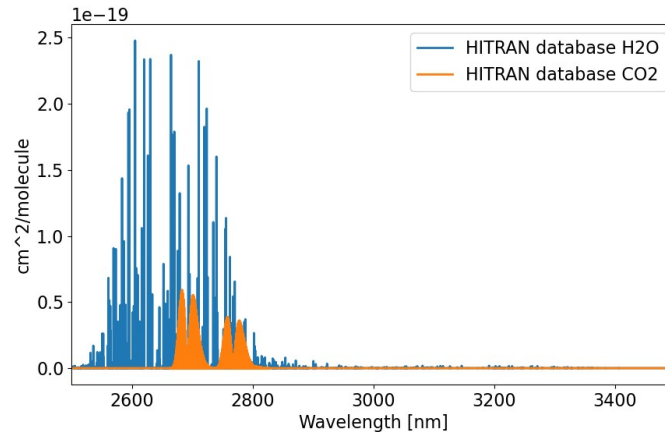
- Die Phasenanpassung ermöglicht die gesamte SPDC-Bandbreite von 3,3 – 3,4  $\mu\text{m}$ , selbst bei Kristallen von 5 mm Länge im Falle von ppKTP. Die Verwendung dieser langen Kristalle ermöglicht eine hohe spektrale Intensität der parametrisch konvertierten Photonen.
- Das Pumpen bei dieser längeren Wellenlänge ist mit diodengepumpten Festkörperlaser möglich. Diese Laser bieten eine sehr schmale Bandbreite von  $<1$  MHz, was einer Kohärenzwellenlänge von fast 100 Metern entspricht und keine Anforderungen an den optischen Pfad im Mikroskop stellt.
- Im Hinblick auf die Quanten-Bildgebung sollen auch längere Wellenlängen von  $>5$   $\mu\text{m}$  erforscht werden. Dazu werden verschiedene nichtlineare Kristalle mit einer Transmission im MIR wie AgGaS<sub>2</sub> (Transmission 0,5 - 13,2  $\mu\text{m}$ ), AgGaSe<sub>2</sub> (Transmission 0,78 - 18,0  $\mu\text{m}$ ), LiGaS<sub>2</sub>, LiGaSe<sub>2</sub> getestet. Diese Kristalle haben jedoch in der Regel eine hohe untere Transmissionswellenlänge, was die Verwendung einer längeren Wellenlänge für den Pumpelaser für eine spätere Applikation begünstigt (zukunftsicher).

Als Pumpwellenlänge für das aktuelle Mikroskop wird daher der DPSSL bei 640 nm empfohlen. Dieser Laser verfügt bereits über eine fasergekoppelte hohe Leistung von 160 mW, die den Start der Experimente ermöglicht. Für die Zukunft ist es jedoch auch interessant, eine höhere Leistung für diesen Laser zu entwickeln:

- Bei der Bildgebung ist eine höhere Leistung von Vorteil, da sie die Erfassungszeit für die Bilder sowie das Signal-Rauschverhältnis (SNR) verringert. Bei einem Rastermikroskop benötigt das Mikroskop eine gewisse Zeit, um den gewünschten Bereich abzutasten, was durch einen höheren Fluss an Abtastphotonen verringert werden kann. Ebenso lässt sich mit einer höheren Anzahl von Photonen das SNR des aufgenommenen Bildes aufgrund der Verringerung des Schrotrauschens erhöhen.
- Für künftige Wellenlängen von  $>5$   $\mu\text{m}$  haben die beschriebenen Kristalle einen geringeren nichtlinearen Koeffizienten und sind nicht mit periodischer Polung erhältlich. Diese Kristalle erfordern eine kritische Phasenanpassung, was den Nachteil hat, dass die Kristalle einen räumlichen Walk-Off haben, was dazu führt, dass kurze Kristalle verwendet werden. Daher ist eine höhere Pumpleistung erforderlich.

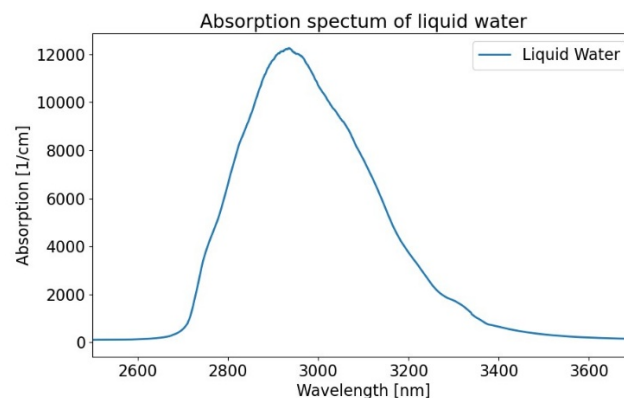
### **MID-IR-Auswertung der Wasserdampfabsorption**

Eine Schwierigkeit bei der Arbeit mit MIR-Wellenlängen ist die Absorption von Molekülen wie H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> bei 3  $\mu\text{m}$ . Zusätzliche Verluste in der QIUP verringern die Visibility der Quanteninterferenz, wodurch das SNR des Systems stark verringert wird. Um die Absorption verschiedener Moleküle im MIR zu überprüfen, wurde die HITRAN-Datenbank für die Moleküle H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> verwendet siehe Abbildung 3. HITRAN ist eine Zusammenstellung von spektroskopischen Parametern, die von einer Vielzahl von Anwendungen zur Vorhersage und Simulation der Übertragungseigenschaften der Atmosphäre verwendet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Absorptionsbereiche dieser Moleküle in der Atmosphäre zwischen 2500 und 2900 nm liegen und daher keine Auswirkungen auf unser Experiment haben sollten.



**Abbildung 3:** Darstellung der Absorptionsprofile der HITRAN-Datenbank für die Basisisotope von H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> im Gaszustand.

Während die Daten der Gasabsorption im MIR für uns kein Problem darstellen, ist das Absorptionsprofil von flüssigem Wasser deutlich in Richtung unseres Systems verschoben. Flüssiges Wasser weist eine Absorption zwischen 2600 und 3500 nm auf, und deshalb sollten Wasser im Aufbau minimiert werden (siehe Abbildung 4). Für die geplante Anwendung bedeutet das, dass wir trockene Proben mit einer sehr geringen Wasserkonzentration verwenden müssen, um das Absorptionsprofil der Lipide, die wir nachweisen wollen, bei 3,3 µm nicht zu verdecken.



**Abbildung 4:** Spektrale Absorption von flüssigem Wasser nach (D. Wieliczka, 1989).

#### AP 3.3.2\_14 Konzept & Design Qmic-lightengine

Zu Beginn der Gespräche mit Precipoint wurden verschiedene Optionen für das Design des Mikroskops und der Lichtquelle diskutiert. Die hohen Anforderungen an die Helligkeit und die spektrale Bandbreite der Quelle erfordern eine Bewertung nichtlinearer Kristalle in Bezug auf Material, Bulk-Kristall vs. Wellenleiterstruktur, Länge und Chirping. Weitere Schwerpunkte der Diskussion waren die Bewertung des Quantenmikroskopie-Schemas aus der Sicht der Erfahrungen von Precipoint mit dem Mikroskop-Design, dem Quanten-Imaging-Wissen des Fraunhofer IOF und der Systemintegrations- und Machbarkeitserfahrung von Quantum Optics Jena. Die Diskussion drehte sich um die Durchführbarkeit von Transmissions- oder Reflexionsmikroskopie, die potenziellen Vorteile des Einsatzes von Fern- oder Nahfeld in unserer Abbildungsmethode und die Kompatibilität eines Aufricht-Rastermikroskops mit den Projektzielen.

#### Bulk vs. nichtlinearer Wellenleiterkristall (in Zusammenarbeit mit IOF für AP 3.3.23\_2 – Evaluierung Bulk vs. nichtlinearer Wellenleiterkristall)

Der Vorteil der Verwendung von Wellenleitern ist die höhere Helligkeit bei der Erzeugung von Photonenpaaren. Im vorliegenden Fall müssen auch die Einfügeverluste und die Bandbreite der optisch-parametrisch generierten Photonen berücksichtigt werden. Durch Umschalten der Pumpwellenlänge auf 640 nm kann ein breiteres Spektrum im MIR-

Spektralbereich erreicht werden, allerdings nur bei kurzen Kristallen von wenigen Millimetern, denen es von Natur aus an spektraler Intensität fehlt. Eine Wellenleiterkonfiguration bietet eine viel höhere spektrale Intensität, hat aber eine sehr starke Einschränkung für den Aufbau: die Wellenleiterkopplungsverluste. In unserem Aufbau werden Pump- und konvertierte Photonen erzeugt und zum Mikroskop und wieder zurückgesendet. Nach der Rückkehr werden alle drei Wellen erneut in den nichtlinearen Kristall eingekoppelt, um die induzierte Kohärenz zu erreichen. Die endgültige Visibility des Systems und damit sein SNR wird stark von den Verlusten beeinflusst, die bei der Pumpe und dem Signal auftreten, was zu weniger Quanteninterferenz und damit weniger Quanten-Visibility führt. Wir kommen daher zu dem Schluss, dass eine Wellenleiterkonfiguration aufgrund der Wellenleiter-Einkopplungsverluste zu einem niedrigeren SNR führen würde, wenn die vom Mikroskop kommenden Strahlen so ausgerichtet werden, dass eine induzierte Kohärenz im nichtlinearen Kristall erreicht wird. Darüber hinaus würde die Wellenleiterkonfiguration die Ausrichtung erschweren, die durch die Verwendung von Parabolspiegeln zur gleichzeitigen Kollimation aller Wellenlängen bereits kompliziert ist, wie in Abschnitt 3.3.24 beschrieben.

In Gesprächen mit Anbietern wurde beschlossen, als Ausgleich für den Verzicht auf einen Wellenleiter einen gechirpten nichtlinearen Kristall zu verwenden. Gechirpte nichtlineare Kristalle sind Kristalle, bei denen sich die periodische Polung bei jeder Position allmählich ändert. Kürzere Kristalle bieten eine höhere Bandbreite auf Kosten einer geringeren spektralen Intensität. Bei gechirpten Kristallen kann ein längerer Kristall immer noch eine große Anzahl an Photonen erzeugen, während die unterschiedliche Polung an jeder Position dazu dient, eine breitere Phasen Anpassung zu erreichen, was zu einer höheren Bandbreite führt. Schließlich wird ppLN wegen des höheren nichtlinearen Koeffizienten sowie der Eignung und schnellen Verfügbarkeit dieses Materials gegenüber ppKTP bevorzugt. Im Folgenden sind die endgültigen Spezifikationen der erworbenen nichtlinearen Kristalle von HC Photonics Corporation aufgeführt: Gittertyp: gechirpt, Material: MCLN 5 mol%, QPM Periode: 15.43 ~ 15.61µm, Dimension: 16 x 1 x 1 mm<sup>3</sup>, Beschichtung: AR-Beschichtung 640nm(R<0.5%) / 780-800(R<0.5%) / 3300-3400(R<1%) nm bei S1&S2.

Zunächst wurde ein einpoliger nichtlinearer Kristall in Betracht gezogen. Ein kurzer Kristall kann die gewünschten breitbandigen Spektren erzielen. Das theoretische Argument für die reduzierte Kristalllänge ( $L$ ) ist mit der typischen Form des Emissionsspektrums verbunden  $\propto \text{sinc}\left(\frac{L \Delta k}{2}\right)$ . Es gibt jedoch einen Kompromiss zwischen der FWHM des emittierten Spektrums und seiner spektralen Intensität: Ein kürzerer Kristall ergibt eine größere Bandbreite, aber dieselbe Verringerung der Kristalllänge führt zu einem Rückgang der Photonenerzeugung.

Um die Herausforderung einer hohen Intensität zu meistern, wurde der Ansatz des Mehrfachgitters untersucht. Durch die Verwendung eines längeren gechirpten Kristalls kann gleichzeitig ein breitbandiges Spektrum und eine erhöhte Helligkeit erreicht werden. Das Emissionsspektrum dieses Kristalls weist im Vergleich zu dem eines kurzen nicht-gechirpten Kristalls eine größere Bandbreite auf. Darüber hinaus führen die Ränder der sinc-ähnlichen Spektren im nicht-gechirpten Szenario zu einer verminderten Intensität bei bestimmten Wellenlängen – ein Problem, das die gechirpte Kristallkonfiguration abschwächt und eine gleichmäßigere Intensitätsverteilung über das Spektrum gewährleistet.

### Reflektierende vs. transmissive Probenanordnung

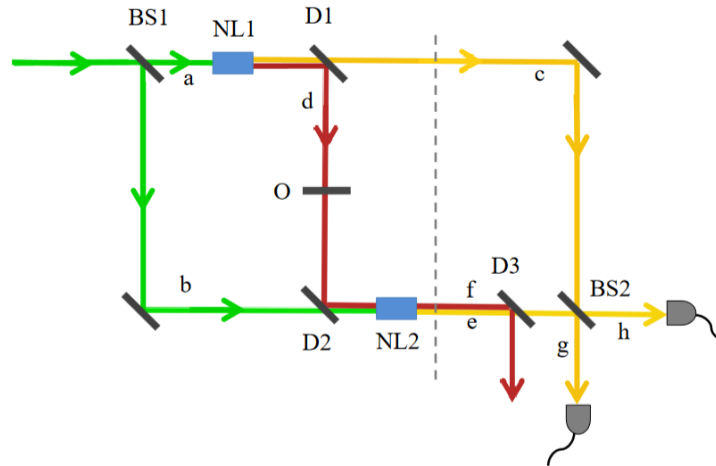
Das Dummy-Mikroskop besteht aus einem nichtlinearen Interferometer in Michelson-Geometrie. Die Strahlen werden durch einen dichroitischen Spiegel (DM1) räumlich getrennt, der mittleres IR-Licht durchlässt und sichtbares Licht reflektiert. Das Michelson-Interferometer entspricht dem Teil „Mikroskop“ in Abbildung 6. Die Probe wird vor dem Spiegel für den Test im Interferometer platziert. Die von uns verwendeten Proben sind bei 3,35 µm absorbierend, so dass das Licht zweimal die Probe durchläuft. Es ist jedoch möglich, dass eine andere Art von Probe nur eine bestimmte Wellenlänge reflektiert und den Rest blockiert. In diesem Fall würde die Quantenabbildung mit nicht-detektierten Photonen immer noch nach demselben Prinzip funktionieren.

### Fernfeld- vs. Nahfeldmikroskopie und Rastermikroskopie vs. Weitfeldmikroskopie

Bei dem in Abbildung 6 dargestellten Aufbau wird die Probe in den kollimierten Idler-Strahl eingeführt. Dies ist eine experimentelle Vereinfachung des späteren Abtastaufbaus, bei dem die Probe nur die Information der Gesamtabsorption oder der Gesamttransmission liefert. Für die Weitfeld-Abbildung sollte zwischen der Probe und dem nichtlinearen Kristall ein 4f-Aufbau vorhanden sein. Ebenso sollte die induzierte Kohärenz im nichtlinearen Kristall im Nahfeld durch eine 4f-Anordnung auf die sCMOS-Kamera abgebildet werden. Wenn die Kamera anstelle der 4f-Anordnung im Fernfeld platziert wird, kann die induzierte Kohärenz immer noch nachgewiesen und der Scan-Ansatz funktionalisiert werden, aber wir hätten in diesem Fall kein Weitwinkel-Bild auf der Kamera.

### Auflichtmikroskopie

Der Partner Precipoint brachte die Idee ein, das MID-IR-Licht als Beleuchtung der Probe zu verwenden und dann ein Mikroskop-Objektiv nach der Probe zu verwenden, um Licht von jedem Punkt zu sammeln. Dies könnte in dem in Abbildung 5 gezeigten ursprünglichen Schema funktionieren. Auf diese Weise kann eine sehr hohe Auflösung erreicht werden, da die Auflösung durch die numerische Apertur des Mikroskop-Objektivs gegeben ist. In unserem Fall sind wir jedoch daran interessiert, eine induzierte Kohärenz zwischen der Signal- und der Idler-Mode zu erzeugen. Dieses Verfahren würde bedeuten, dass der größte Teil des Idler Strahls bei der Beleuchtung der Probe verloren geht, wodurch die Interferenzfähigkeit und der SNR des Bildes verringert werden.



**Abbildung 5:** Frühes Design der Quantenbildgebung mit unentdeckten Photonen wie in (Gabriela B. Lemos, 2014) beschrieben. Bei diesem Schema werden zwei verschiedene Kristalle verwendet, was die Ununterscheidbarkeit verringern kann. Andererseits könnte das Scannen der Probe mit einem Mikroskopobjektiv direkt danach zu einer sehr hohen NA führen, die nur vom Mikroskopobjektiv abhängt. Dies würde jedoch zu einem hohen Verlust an Photonen führen, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### AP 3.3.3\_14 Konstruktion miniaturisierter Qmic-lightengine

Das Quantifisens-Projekt zielt auf eine endgültige Untersuchung von MIR-Bereichen bis zu  $5,9 - 6,3 \mu\text{m}$  ab, wobei jedoch ein Zwischenziel von  $3,3 \mu\text{m}$  gesetzt wurde. Auch für das Quellendesign ist ein erstes Labordesign vorgesehen, um die optimalen optischen Parameter zu testen, die in Zukunft auf eine miniaturisierte Version übertragen werden können. Die wichtigsten optischen Parameter für die Miniaturisierung der Quelle sind der Pumpstrahldurchmesser, die SPDC- und Pumpkollimationsoptik und die Kameraabbildungsoptik.

#### Transportabler Demonstrator im Laboraufbau (in Zusammenarbeit mit Fraunhofer IOF für AP 3.3.24\_2 – Laboraufbau SPDC Quelle Interferometer)

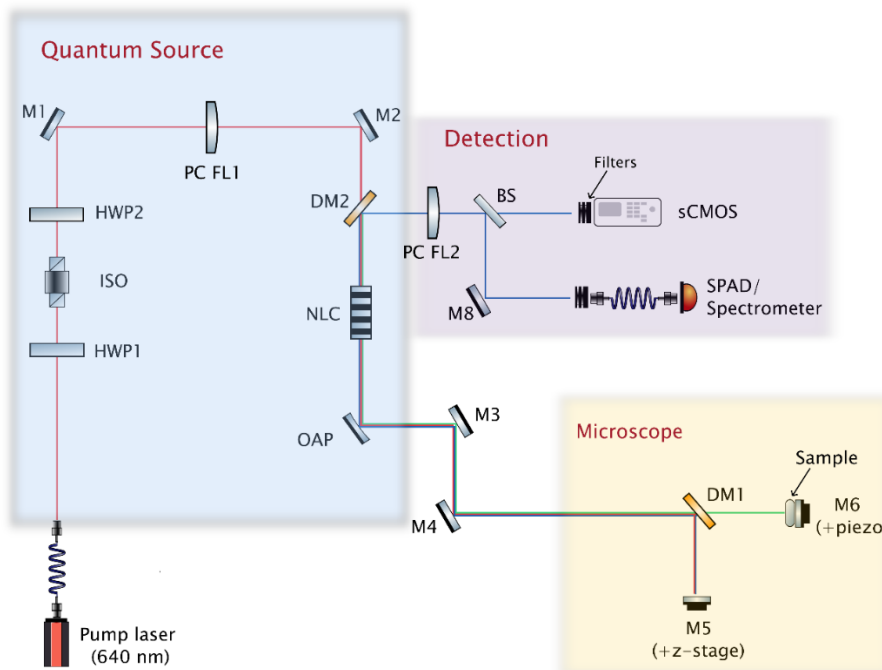
Das Design des QIUP-Breadboards (Quantum Imaging with Undetected Photons) wurde mit Hilfe des IOF erstellt und wurde bei QOJ als Teil des Meilensteins MS2 aufgebaut. Dieser Entwurf folgt dem allgemeinen Schema von QIUP, hat aber einzigartigen Merkmale: Für den Aufbau und das Mikroskop werden reflektierende Komponenten verwendet, um den Betrieb bei verschiedenen Wellenlängen und damit eine Kostenreduzierung zu gewährleisten. Der SPDC- und der Pumpstrahl werden mit einem off-axis Parabolspiegel (OAP) kollimiert, und auch das Mikroskop verwendet reflektierende Optiken, um das MIR auf die Probe zu fokussieren. Der off-axis Parabolspiegel ist für das System nützlich, weil: (i) die Aberrationen minimiert werden - im Gegensatz zu Linsen leiden Spiegel nicht unter chromatischer Aberration. Dies bedeutet, dass alle verwendeten Wellenlängen gleichmäßig kollimiert/fokussiert werden, was die OAP-Spiegel ideal für Breitband- oder Mehrwellenlängenanwendungen macht; (ii) die Verluste werden reduziert: die unbeschichteten Linsen (geeignet für alle verwendeten Wellenlängen) weisen eine verringerte Transmission auf; die silberbeschichteten OAP minimieren die Verluste und erhöhen somit die Visibility.

Die Detektion wird sowohl mit einer sCMOS als auch mit einem SPAD durchgeführt. Die sCMOS-Kamera ist für die Ausrichtung des Spektrometers unverzichtbar, aber für den endgültigen Scanvorgang werden die Daten vom SPAD als einzelne Zählung für jeden Scanpunkt erfasst.

Für die erste Charakterisierung des Systems wird ein Breadboard-Aufbau erstellt, der ein Dummy-Mikroskop enthält, das aus einem Michelson-Interferometer besteht, bei dem ein dichroitischer Spiegel Signal und Pumpe in einem Arm und Idler im anderen trennt. Sobald ein Interferenzbild mit diesem Dummy-Mikroskop erreicht ist, wird das System in das von Precipoint konstruierte Reflexionsmikroskop integriert, das in Bezug auf die Ausrichtung anspruchsvoller sein dürfte.

**Tabelle 1: Für den Laboraufbau verwendete optische Komponenten.**

	Komponenten	Beschreibung	Anzahl
-	Laboraufbau Quelle	Thorlabs: <a href="#">MB4560/M</a>	1
-	Laboraufbau Mikroskop	Thorlabs: <a href="#">MB3045/M</a>	1
-	Pumpenlaser	Lasos DPSSL 640 nm	1
-	Optokoppler + Kollimator	SUK Kirchhof 60FC-SF-4-A4.5S-01	1
ISO	Isolator	Thorlabs: <a href="#">IO-3D-633-PBS</a>	1
HWP	Halbwellenplatte	Thorlabs: <a href="#">WPH05M-633</a>	2
M	Flachspiegelpumpe	Thorlabs: <a href="#">BB1-E02</a>	2
M	Flachspiegelpumpe + SPDC	Thorlabs: <a href="#">PF10-03-P01-10</a>	1 (10x)
PC FL1	Kollimationslinse der Pumpe	F = 100 mm, Thorlabs: <a href="#">LA1251-AB</a>	1
DM1	Mikroskop mit dichroitischem Spiegel	Kunden-DM von Chroma: T-avg: $\geq 88\%$ 3300 - 3500 nm R-ave: $\geq 97\%$ 630 - 800 nm	3
DM2	Dichroitische Spiegelpumpe	Thorlabs: <a href="#">DMSP680B</a>	1
-	Strahlenteiler für die Ausrichtung	Thorlabs: <a href="#">BSW26</a>	1
OAP	Außeraxiale Parabolspiegel	TBD	1
NLC	Nichtlinearer Kristall	HC Photonics: gechirptes pPLN	2
-	Filter	Thorlabs: <a href="#">FELH0750</a>	4
SPAD	SPAD	Excelitas: spcm-aqrh	1
-	SPAD-Kollimator	SUK Kirchhof: 60FC-SF-0-M12NIR-10	1
PC-FL2	Linse	Thorlabs: <a href="#">LA1253-AB</a>	2
Piezo	Piezo	Physik Instrumente Q-545	1



**Abbildung 6:** Schematische Darstellung des Laboraufbaus von QOJ. Der Aufbau ist unterteilt in die Quantenquelle, das Detektionsmodul und das Mikroskop. Die Quantenquelle und das Detektionsmodul befinden sich auf demselben

Breadboard, während das Mikroskop als Proof of Principle dient und später durch die Lieferung von Precipoint ersetzt wird.

Ende 2023 waren die meisten optischen, opto-mechanischen und lasertechnischen Grundlagen vorhanden, aber die entscheidenden Komponenten wie der DM zur Trennung von Pumpe/Signal und Idler sowie die nichtlinearen Kristalle fehlten noch. Der exakte off-axis Parabolspiegel, der für die Kollimation verwendet wird, muss noch durch die spektrale und räumliche Charakterisierung des SPDC-Prozesses bestätigt werden. Eine Zusammenfassung der benötigten Komponenten ist in

Tabelle 1 aufgeführt.

### **Pumpstrahloptik**

In unserem Aufbau wird ein Faserkollimator mit einer Brennweite von 4,5 mm in Verbindung mit einer 200-mm-Linse verwendet, um den Pumpstrahl auf die nichtlinearen Kristalle zu fokussieren. Für den Pumpaser wird eine Corning Faser PM630 mit einem Modenfelddurchmesser von  $4,5 \pm 0,5 \mu\text{m}$  verwendet. Damit ergibt sich ein Strahldurchmesser von  $\sim 200 \mu\text{m}$  in der Mitte des Kristalls.

Ein sehr ähnlicher Parameter kann mit einer im Handel erhältlichen Mikrooptik-Kombination erreicht werden, nämlich einem Kollimator mit 4 mm Brennweite und einer 150-mm-Mikrooptik, die als Option angebracht werden kann. Dies sind die Produkte 60FC-4-A4-01 und 5M-S150-33-S, erhältlich bei Schäfter + Kirchhoff GmbH. Daraus ergeben sich die Größenbeschränkungen eines Pfadabstands von  $\sim 150 \text{ mm}$  von der Spitze der Faser bis zu den nichtlinearen Kristallen.

### **Kollimationsoptiken**

Nach den nichtlinearen Kristallen werden alle drei Strahlen kollimiert und mit einem Parabolspiegel mit einer Brennweite von 50,8 mm zum Mikroskop geleitet. Nach diesem Abstand haben die Strahlen einen maximalen berechneten Durchmesser von 25.4 mm, so dass alle Optiken im Strahlengang eine minimale Apertur von 1" haben müssen. Diese beiden Parameter sind optische Design-Zwänge für das künftige miniaturisierte Design.

### **Kamera**

Das verbleibende optische System ist das Detektionssystem, das in die Kamera und/oder die SPAD eingekoppelt wird. Im Falle der SPAD gibt es keine schwerwiegenden optischen Einschränkungen, da sie mit einer Multimode-Faser betrieben werden kann und der Signalstrahl problemlos in eine 100- $\mu\text{m}$ -Faser eingekoppelt werden kann. Für die Kamera wird ein System zur Abbildung des nichtlinearen Kristalls in die sCMOS-Kamera im Nah- und Fernfeld evaluiert. Dabei wird angestrebt, den gesamten sCMOS-Sensor der Größe 15 x 15 mm zu nutzen. Dabei wird ein geeignetes Abbildungssystem gewählt, wobei aufgrund der erforderlichen großen Abbildungsgröße zu erwarten ist, dass Objektive mit großem Brennweitenabstand erforderlich sind, um eine hohe Vergrößerung zu erreichen.

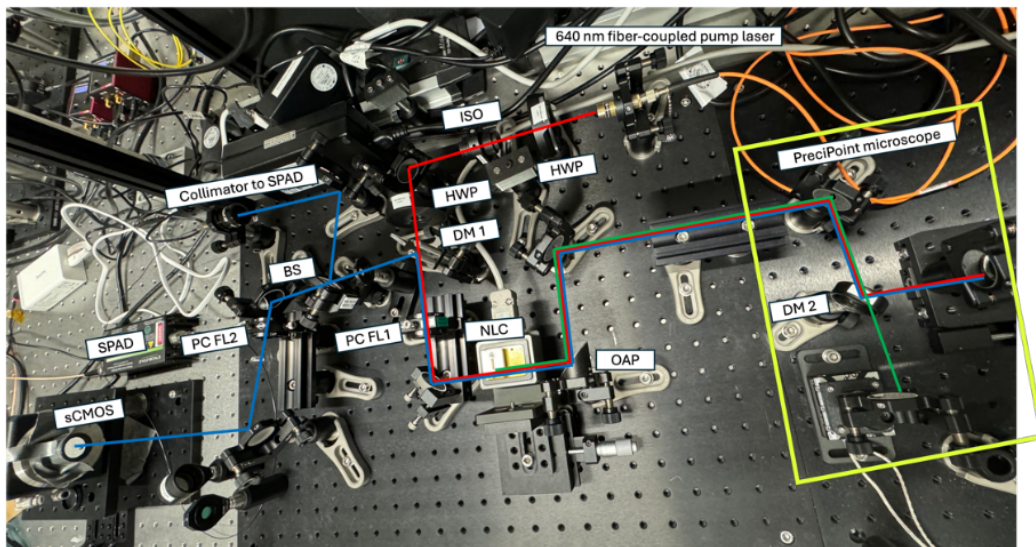
### **AP 3.3.3\_14 Konstruktion des Labor-lightengine**

In den folgenden Abschnitten beschreiben wir die lightengine anhand der Beschreibung von Abbildung 6.

#### **Die Quantenquelle**

Beim Pumpaser handelt es sich um einen fasergekoppelten, dioden-gepumpten Festkörperlaser (Lasos DPSSL-Serie) mit CW-Wellenlänge von 640 nm und einer Ausgangsleistung von bis zu 160 mW. Nach den Spezifikationen des Anbieters beträgt die Strahlqualität  $M^2 \approx 1,1$ , der Modenfelddurchmesser der verwendeten Faser  $MFD = 4,5 \mu\text{m}$  und die Kopplungseffizienz 85 %. Der aus der polarisationserhaltenden Faser emittierende Pumpstrahl wird mit einer Linse von 4,5 mm Brennweite kollimiert. Die Polarisation des emittierten Strahls ist horizontal, bezogen auf das Breadboard, mit einem Polarisationsextinktionsverhältnis (PER) von 210:1. Der Pumpstrahl durchläuft eine Halbwellenplatte (HWP1) und einen Isolator (ISO). Die Kombination dieser beiden Komponenten bildet eine Leistungssteuerungsstufe. Mit der HWP2 wird die Polarisation der auf den Kristall auftreffenden Photonen manipuliert. Der Pumpstrahl wird auf das Zentrum des Kristalls mit einer plan-konvexen Fokussierlinse (PC FL) mit 100 mm Brennweite fokussiert. Der durch den dichroitischen Spiegel (DM1) übertragene Pumpstrahl durchläuft den nichtlinearen Kristall (NLC) und erzeugt über SPDC Signal- und Idler- Photonen.

Bei dem verwendeten Kristall handelt es sich um  $1 \times 1$  mm lateral messenden und 16 mm langen 5%-MgO-dotiertes gechirptes kongruentes Lithiumniobat (MCLN), das mehrere Polungsgitter mit linear ansteigenden Perioden von  $15,43 \mu\text{m}$  bis  $15,61 \mu\text{m}$  enthält. Die SPDC-gewandelten Photonen und die aus dem NLC austretenden Pumpstrahlen sind Co-linear und divergieren. Daher wurde für die achromatische Kollimation der Strahlen ein außeraxialer Parabolspiegel mit einer Brennweite von 50,8 mm verwendet, der die Ausbreitungsrichtung um  $90^\circ$  umlenkt. Der Realaufbau des Labor-Modells ist in Abbildung 7 zu sehen.



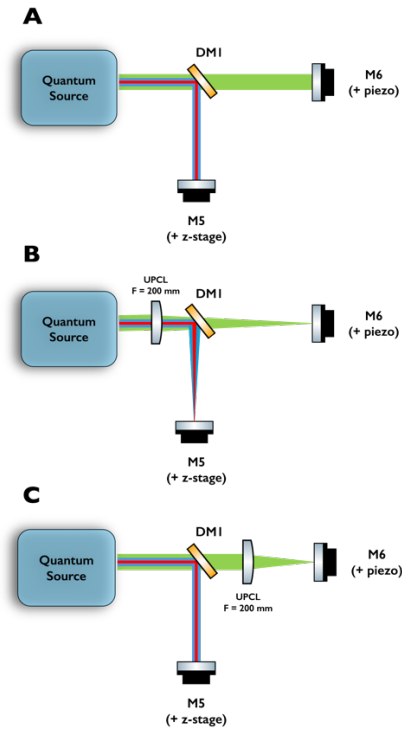
**Abbildung 7:** Foto des Breadboard-Aufbaus. Die rote Linie stellt den Pumpstrahl (640 nm) dar, die blaue Linie zeigt die Signalphotonen und die grüne Linie die Leerlaufphotonen, das gelbe Rechteck markiert das spätere Mikroskop.

### Das Dummy-Mikroskop

Um Abhängigkeiten in Bezug auf Ausrichtung, Stabilität und Miniaturisierung zu untersuchen, wurde ein Dummy-Mikroskop auf einer Leiterplatte in verschiedenen Konfigurationen aufgebaut. Zusammen mit dem nichtlinearen Kristall der Quantenquelle stellt das Dummy-Mikroskop ein nichtlineares Interferometer in gefalteter Michelson-Geometrie dar, das einen einzigen Kristall verwendet und ein Minimum an optischen Elementen benötigt. Die drei von der Quantenquelle ausgehenden Strahlen (Signal-, Idler- und Pumpstrahl) werden über die Spiegel M3 und M4 zum Dummy-Mikroskop geleitet (siehe Abbildung 6). Die Strahlen werden durch einen dichroitischen Spiegel (DM1) räumlich getrennt, der MID-IR-Photonen durchlässt und das sichtbare Licht reflektiert. M5 ist auf einem Z-Translations-Tisch platziert, während M6 auf einem Piezo-Element montiert ist, das eine Feinjustierung der optischen Wegdifferenz zwischen den beiden Armen ermöglicht. Die drei sich überlappenden Strahlen werden von den Endspiegeln M5 und M6 reflektiert und wandern zurück zur Quantenquelle, wodurch eine zweite SPDC-Emission entsteht. Bei korrekter Justage des Aufbaus sind das erste und das zweite SPDC-gewandelte Photonenpaar nicht voneinander zu unterscheiden. Auf diese Weise wird ein kohärentes Verhalten induziert.

Das Dummy-Mikroskop wurde in drei Konfigurationen getestet, siehe Abbildung 8:

- **DUMMIC 1:** die drei Strahlen werden im Interferometer kollimiert.
- **DUMMIC 2:** enthält eine unbeschichtete plan-konvexe Magnesiumfluorid-Linse (UPCL) mit einer Brennweite von  $f = 200$  mm vor DM1; die drei Strahlen werden auf M5 und M6 fokussiert.
- **DUMMIC 3:** enthält eine unbeschichtete plan-konvexe Magnesiumfluorid-Linse (UPCL) mit dem Brennweitenabstand  $f = 200$  mm im Idler-Arm, d. h. zwischen DM1 und M6. So werden die sichtbaren Photonen (Pump- und Signalphotonen) entlang des nichtlinearen Interferometers kollimiert, während die Idler-Photonen auf M6 fokussiert werden, wo die Probe platziert werden soll. Diese Konfiguration entspricht einem Auflichtmikroskop, da aus Gründen der Vereinfachung, der Kompaktheit und des Verlustmanagements eine Fokussierungsoptik nur im Idler-Arm vorgesehen ist.



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung der drei Dummy-Mikroskope: A. DUMMIC 1: die Strahlen werden kollimiert; B. DUMMIC 2: die Strahlen werden fokussiert; C. DUMMIC 3: der Idler-Strahl wird fokussiert.

### Die Detektion

Nach dem zweiten rückläufigen Durchgang durch den NLC wird der Pumpstrahl von DM2 transmittiert und durch den Isolator (ISO) auskoppelt, um Schäden am Pump Laser zu vermeiden. Die Signalphotonen werden von PC FL1 kollimiert, dann von DM2 reflektiert und zum Detektionssystem geleitet. Es wurden zwei verschiedene Konfigurationen des Detektionsmoduls konstruiert und analysiert (siehe Abbildung 9):

- Fernfeld: Die Fourier-Ebene des Kristalls wird auf der sCMOS-Kamera abgebildet
- Nahfeld: Die Kristallebene wird auf die sCMOS-Kamera abgebildet

In beiden Detektionsschemata wurden gleichzeitig eine Interferenzabbildung (über eine sCMOS-Kamera) und eine Photonen zählung (über ein SPAD) durchgeführt. Die sCMOS-Kamera (Hamamatsu ORCA Fusion mit einer Quanteneffizienz von  $\approx 70\%$  bei 790 nm) liefert Informationen über die Ausrichtung, während das SPAD die auftreffenden Photonen zählt. Die Detektion der Photonen zählraten wird später bei der Bilderzeugung verwendet werden.

Dabei wurde ein fasergekoppelter SPAD (Excelitas SPCM-NIR) mit einer Quanteneffizienz von  $\approx 70\%$  bei 790 nm und einer Totzeit von 22 ns verwendet. Der Detektor allein kann keine Informationen über die Anzahl der Photonen liefern. Daher wurde dazu ein Time Tagger von Swabian Instruments (Time Tagger Ultra) verwendet. Zur Entfernung der restlichen Idler-Photonen, Pump-Photonen und des Umgebungslichts wird eine Anordnung von Langpass- und Bandpassfiltern verwendet:

- Zwei Langpassfilter mit Cut-off-Wellenlänge bei 750 nm.
- Ein 10 nm (FWHM) Bandpassfilter mit einer Zentralwellenlänge von 790 nm

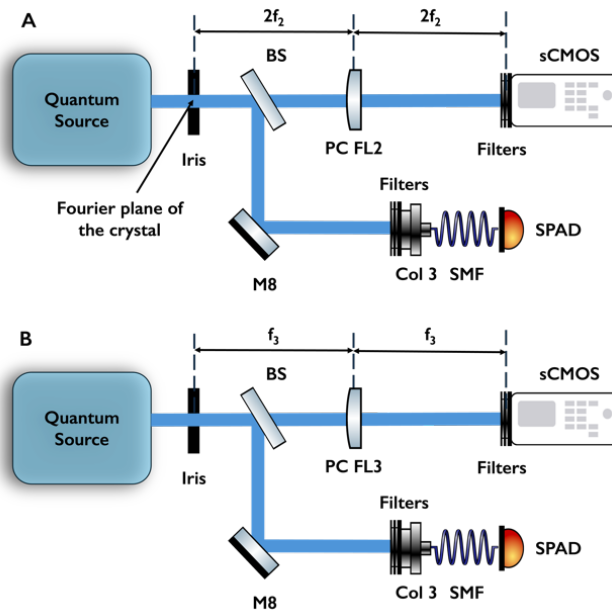


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Detektionsmoduls, A: Fernfeld & B: Nahfeld.

**Resultate**

Die drei Konfigurationen des Dummy-Mikroskops wurden konstruiert, um die Herausforderungen im Zusammenhang mit der Ausrichtung, Stabilität und Miniaturisierung des von der PreciPoint GmbH hergestellten realen Mikroskops zu untersuchen. Es wurde die Visibility der nichtlinearen Interferometer gemessen, indem die relative Phase zwischen den Armen variiert und die Intensität des zentralen Pixels aufgezeichnet wurde (Abbildung 10). Die Kameraerkennung erfolgt in der Fernfeldanordnung. Der Unterschied zwischen den erhaltenen Visibilities wird hauptsächlich durch das UPCL verursacht, das zusätzliche Verluste und Dejustierungen verursacht. Es kann daraus geschlossen werden, dass unterschiedliche optische Anordnungen in den beiden Armen des nichtlinearen Interferometers eingeführt werden können, sobald die Ununterscheidbarkeit zwischen den vor- und rückläufigen Moden innerhalb der Kristalle gewährleistet ist. Daher wurde an den Projektpartner PreciPoint die Empfehlung ausgesprochen, eine DUMMIC-3-ähnliche Konfiguration im Mikroskopdesign zu übernehmen, da diese kompakt ist, die minimale Anzahl optischer Elemente beinhaltet und eine hohe Visibility gewährleistet.

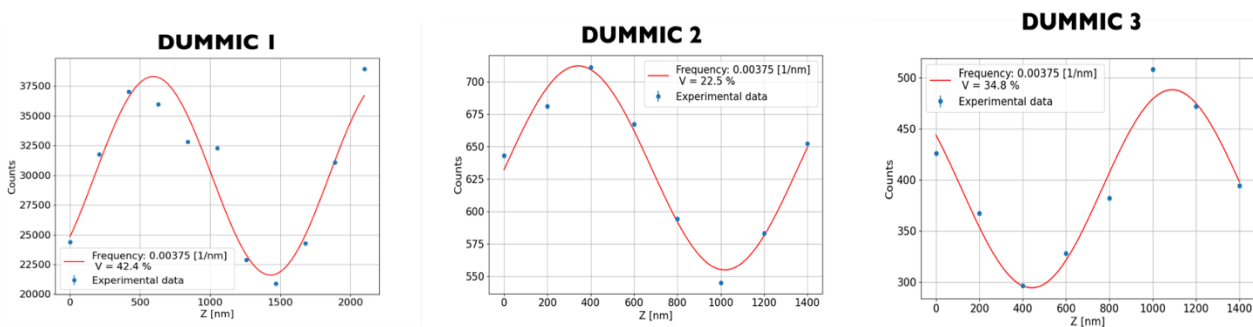


Abbildung 10: Die gemessene Photonenfrequenzen für verschiedene Piezopositionen für die drei Dummy-Mikroskopkonfigurationen. Die Messung wurde im Fernfeld-Detektionsschema durchgeführt.

Unter Verwendung des Nahfeld-Detektionsschemas wurde Visibility für die DUMMIC 1-Konfiguration wiederholt. Es kann festgestellt werden, dass die Nahfeld-sCMOS-Detektion eine höhere Visibility ( $V_{NF} = 73,6\%$ ) bietet als die Fernfeld-Detektion ( $V_{FF} = 42,4\%$ ). Dieses Phänomen lässt sich durch die unterschiedlichen Korrelationen erklären, die in den beiden Aufbauten verwendet werden. Das Fernfeld stützt sich auf Impulskorrelationen der SPDC-erzeugten Photonenpaare, während das Nahfeld Positionskorrelationen nutzt. Diese Korrelationen entsprechen den nicht-kommutierenden Operatoren  $\hat{X}$  und  $\hat{P}$ , was den Grundsatz verdeutlicht, dass mit zunehmender Kenntnis des einen

zwangsläufig die Kenntnis des anderen abnimmt. In diesem Zusammenhang besteht das Ziel darin, die Unschärfe des Impulses zu erhöhen, da eine höhere Unschärfe des Impulses die Ununterscheidbarkeit der erzeugten Photonen erhöht, was zu einer höheren Kohärenz und damit zu einer größeren Visibility führt. Im Versuchsaufbau wurde eine kleine Pumpentaille ( $\approx 50 \mu\text{m}$ ) im Inneren des Kristalls verwendet, wo der schmale Fokus zu einem breiteren Pumpwellenvektorenspektrum führt, die zur Erzeugung von SPDC-erzeugten Photonenpaaren beitragen. Diese erhöhte Unschärfe im Transversalimpuls des Pumpstrahls schwächt die Impulskorrelation zwischen Signal- und Idler-Photonen im Vergleich zu einem Szenario, bei dem der Pumpstrahl kollimiert die Kristalle durchläuft.

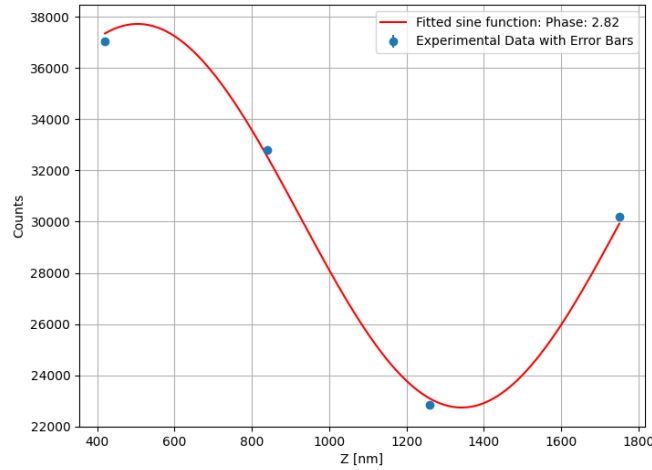
### AP 3.3.4\_14 Elektronikdesign & Umsetzung

In der frühen Entwurfsphase des Mikroskops wurde die Elektronik für die Zusammenarbeit zwischen dem Mikroskop und dem Detektionssystem entworfen. Es wurde beschlossen, dass das Mikroskop als Rastermikroskop konzipiert wird. Die Probe wird gescannt und für jede Position wird die Anzahl der Einzelphotonen aufgezeichnet. Um das Scanning und die SPAD zu synchronisieren, ist ein Signalgenerator vorgesehen, der ein Signal an den Scanning-Motor sendet, um zum nächsten Schritt zu gehen, und ein weiteres an die SPAD, um die Aufnahme für die gewünschte Dauer zu starten. Die SPADs verfügen über einen Gating-Modus, in dem die Photonendetektion aktiv ist, wenn ein hohes TTL-Signal an den Gate-Eingang angelegt wird. Die aktive Löschfunktion wird gestoppt, wenn ein niedriges TTL-Signal angelegt wird, wodurch der Ausgang des Moduls deaktiviert wird. Dieses Gating der SPADs ermöglicht eine Verringerung des Rauschens bei der Bewegung der Scan-Plattform und erleichtert die Nachbearbeitung.

Es wurde auch erörtert, dass ein SPAD in Zukunft nicht mehr im Geiger-Modus arbeiten muss, da nicht unbedingt die Anzahl der Photonen gezählt werden muss. Ebenso könnte die schrittweise Abtastung in eine kontinuierliche Abtastung umgewandelt werden. Diese Maßnahmen werden die Zeit verkürzen, die für die Aufnahme eines Bildes benötigt wird. Zur Entwicklung der Elektronikarchitektur haben wir ein Bildaufnahmeprotokoll definiert.

Beim QIUP werden die Informationen über die Phase und die Transmissivität  $T_i$  von den Idler-Photonen gewonnen, die an den Signalphotonen erkannt werden können. Die Phase des Signal-Photons wird geändert, indem ein Piezospiegel für das Signal im Inneren des nichtlinearen Interferometers bewegt wird, dargestellt durch die Variable  $z$ . Eine Distanzänderung am Spiegel um eine Strecke  $\Delta z$  führt zu einem Phasenunterschied von  $2 \Delta z$ . Die Fit-Funktion, die angepasst werden muss, ist die Photonenzahl  $C(z)$ :  $C(z) = A(T_i) \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_s} z + \phi_0\right) + B$ , wobei  $B$  eine Konstante ist (Hintergrundrauschen). In dieser Gleichung gibt die Amplitude der Schwingung  $A(T_i)$  bei Änderung der relativen Phase Auskunft über die Transmission der Probe. Für den Fall, dass die Probe  $T_i = 0 \Rightarrow A(T_i) = 0$  erfüllt, sollen mit dem Rastermikroskop Informationen für eine 2D-Anordnung von Punkten und die dazu gehörige Photonenzählrate  $C(x, y)$  erfasst werden. Die Bildgebung kann nun auf zwei Arten erfolgen:

- Direkte Erstellung eines Bildes von  $C(x, y)$ , das Auskunft über  $T_i$  gibt, wenn  $B$  (Hintergrundrauschen) und  $\phi_0$  (Interferometer-Phasendifferenz) konstant sind
- Anpassung der Funktion  $C(z)$  für jede  $x/y$ -Position und Erstellung des Bildes von  $A(x, y)$ . Um eine Sinusfunktion für jeden Abtastpunkt anzupassen, werden Punkte benötigt, die mit einer Phasendifferenz von  $\frac{\pi}{2}$  aufgenommen wurden, also  $\frac{4\pi}{\lambda_s} \Delta z = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \Delta z = 98.75 \text{ nm}$ . Da drei Parameter angepasst werden müssen, sind drei Messpunkte das Minimum. Damit die Genauigkeit der Fitfunktion hoch genug ist, wurde sich auf eine Erfassung von vier Punkten bei  $z_0, z_0 + \Delta z, z_0 + 2\Delta z, z_0 + 3\Delta z$  geeinigt (siehe Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Sinusförmige Fitfunktion über die Photonenzählraten bei verschiedener relativer Position  $z$  zwischen den beiden Interferometerarmen. Die Anpassungsparameter liefern die Sichtbarkeit und die relative Phase für jeden  $x/y$ -Abtastpunkt.

**AP 3.3.5\_14 Entwicklung von Assemblierungsmethoden für Qmic-lightengine**

Dieses Arbeitspaket wurde im Rahmen der Erreichung des MS3 realisiert. Basierend auf den Erfahrungen, die während der Entwicklungsphase des Breadboard-Moduls gesammelt wurden, wurden die kritischen Freiheitsgrade sowie die dazugehörigen spezifischen optischen Komponenten identifiziert, die für eine effiziente Ausrichtung notwendig sind. Eine Zusammenfassung ist in Tabelle 2 dargestellt.

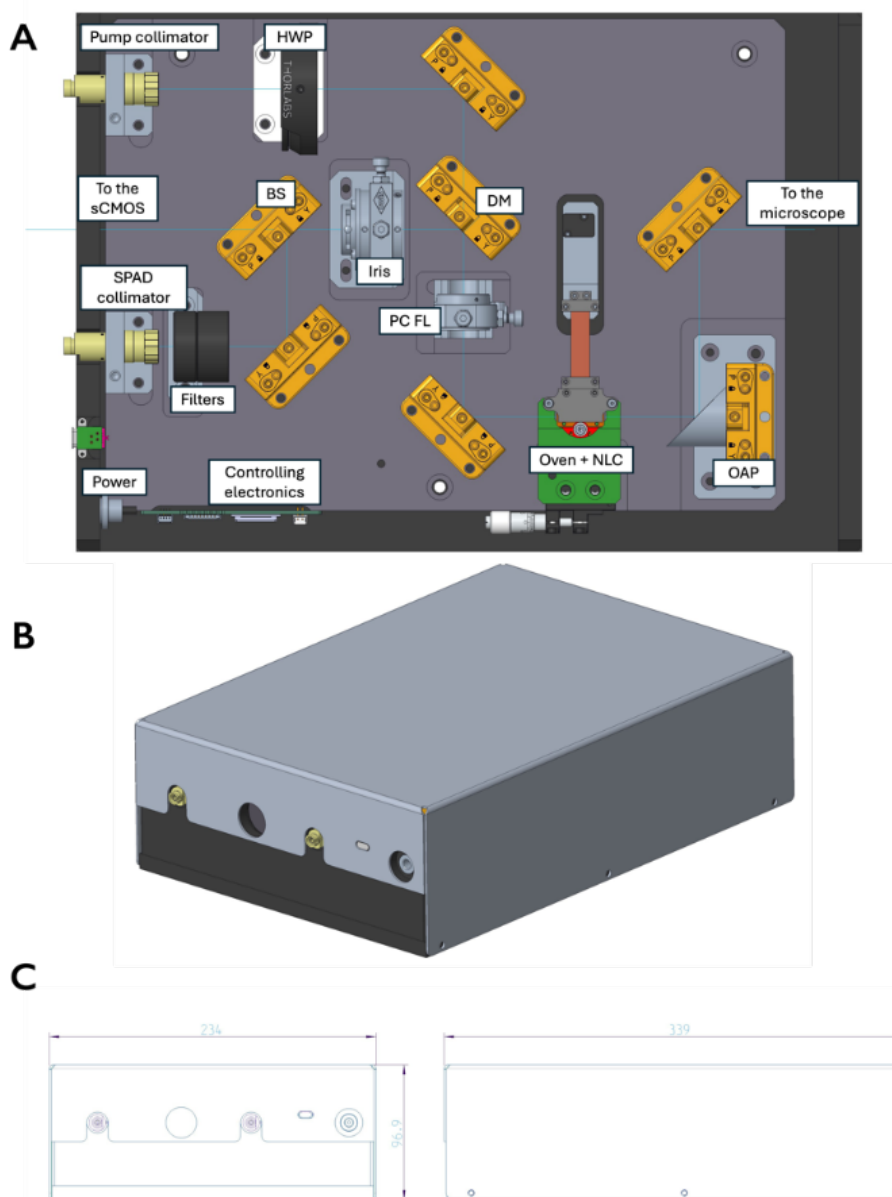
**Tabelle 2:** Die Freiheitsgrade der optischen Komponenten. X, Y, Z: Translation entlang der X-, Y- und Z-Achse; rZ: Rotation um die Z-Achse.

Component	Label	Mount
Collimator	Col 1, 2	Fixed
Mirror	M1-4	Tip-tilt
Mirror	M5	Tip-tilt, Z-stage
Mirror	M6	Tip-tilt, piezo stage
Dichroic mirror	DM1, 2	Fixed
Half-wave plate	HWP1-2	rZ
Off-axis parabolic mirror	OAP	Tip-tilt, rZ
Lenses	PC FL	Z
Oven (crystal)	NLC	Z
Beam splitter	BS	Tip-tilt
Iris	Iris	X, Y

Es wurde daraufhin ein CAD-Mechanik-Design der kompakten Qmic-lightengine realisiert (siehe Abbildung 12). Ein fasergekoppelter Pump Laser wird über den Pumpkollimator zur Quantenquelle geführt. Der Pump Laser ist ein externes Modul und enthält eine Leistungsregelungsstufe und einen Isolator. Über die HWP kann die lineare Polarisation des Lasers auf die korrekte Kristallachse angepasst werden. Der Pumpstrahl wird innerhalb des Kristalls durch den PC FL fokussiert. Nach der Übertragung durch das DM erzeugt der Pumpstrahl im NLC eine breitbandige SPDC. Nach dem NLC werden der Pumpstrahl und die SPDC-generierten Paare durch den OAP kollimiert und in das Mikroskop eingekoppelt. Auf dem Rückweg erzeugt die Pumpstrahlung erneut SPDC. Die Signalphotonen werden durch den PC FL kollimiert und durch das DM zur Detektion geschickt. In der Detektion wird eine Blende für die Nachselektion und für die Faserkopplung verwendet. Der BS überträgt 50 % der Signalphotonen an die sCMOS-Kamera, dann werden die Photonen fasergekoppelt und propagieren zum Photonenzähler. Weitere wichtige Merkmale der kompakten Qmic-lightengine sind:

- Verwendung von 1"-Optiken.

- Die optische Bank ist mit drei Schrauben befestigt, die jeweils durch O-Ringe zwischen dem Gehäuse und der Bank sowie zwischen der Bank und den Schrauben gehalten werden. Diese Anordnung dient dazu, Vibrationen zu dämpfen und die während des Montageprozesses auftretenden Spannungen zu reduzieren.
- Der Ofen und die dazugehörige Steuerelektronik (PCB) sind Eigenentwicklungen.
- Der Großteil der mechanischen Komponenten besteht aus AlMg4.5Mn / 3.3547/AW-5083 (Guss), das aufgrund unserer Erfahrung mit diesem Material und seiner geringen Eigenspannungen durch den Gussprozess ausgewählt wurde. Darüber hinaus wird die Aluminiumlegierung AlMg3 für die Blechabdeckung verwendet, während für den Ofen Kupfer verwendet wird.
- Um die sCMOS-Abbildung im Nahfeld zu gewährleisten, ist es notwendig, eine zusätzliche Linse entlang des optischen Pfades zur sCMOS-Kamera außerhalb des Qmic-Moduls zu platzieren.
- An der Schnittstelle zur Kamera wird ein Saphirglasfenster verwendet, um ein Schließen des Aufbaus zu gewährleisten.
- Die Spiegel werden von oben ausgerichtet.
- Die Spiegel enthalten einen Verriegelungsmechanismus, um die Langzeitstabilität zu steigern.



**Abbildung 12:** CAD-Konstruktion der kompakten Lichtquelle. A: Die Draufsicht zur Veranschaulichung der verwendeten Komponenten. B: Das äußere Design. C: Die Abmessungen des Systems.

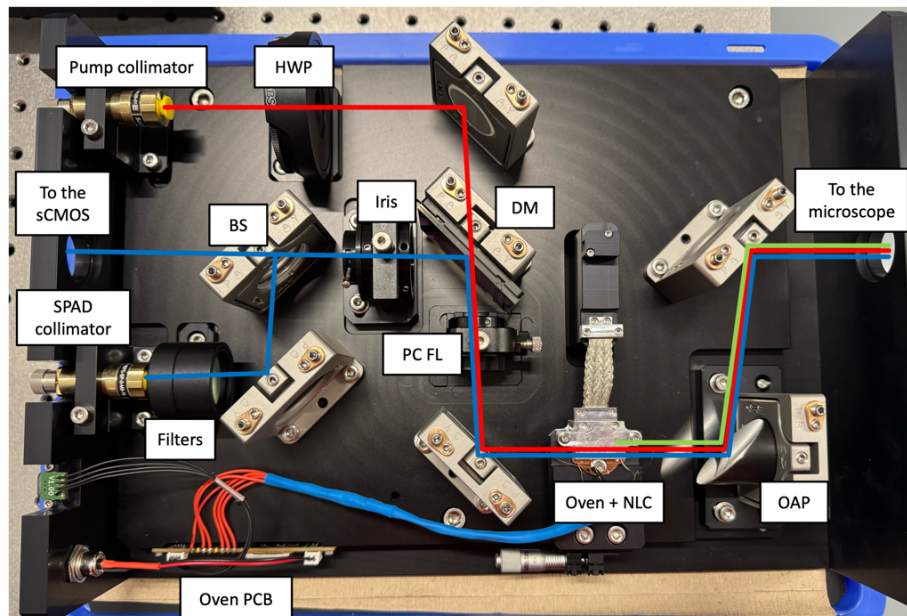
## IB 5 – Omnifunktionale Systemintegration

### AP 5.1.7-14 - Aufbau und Funktionstest kompakter / miniaturisierter Qmic-lightengine Demonstrator

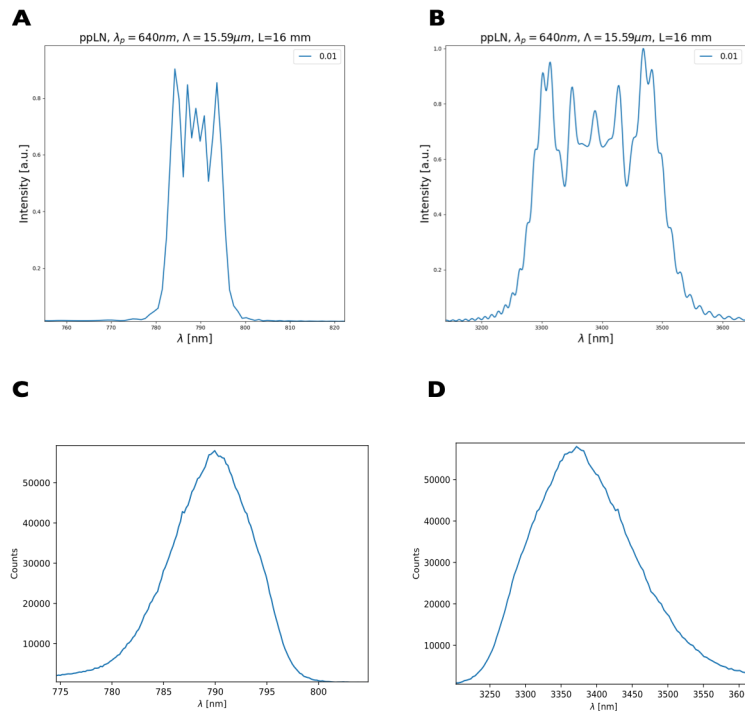
Dieses Arbeitspaket wurde im Rahmen der Erreichung des MS3 realisiert. Aufbauend auf den Erfahrungen, die bei der Entwicklung der Breadboard-lightengine gewonnen wurden, wurde der kompakte Demonstrator realisiert. Die Systemarchitektur wurde mit einem modularen Ansatz entworfen, so dass die kompakte Qmic-lightengine als Add-on für zukünftige Quantenmikroskope fungieren kann und so als Quantenlichtquelle dienen kann (siehe Abbildung 13).

Die Anforderungen an die kompakte Qmic-lightengine sind:

- Spektrales Profil: Idler-Photonen bei einer Zentralwellenlänge von 3350 nm und mit einer Bandbreite von 100 nm, sowie Signalphotonen, die zum sichtbaren Spektralbereich gehören (zentriert bei 790 nm).
- Räumliches Profil: Das erzeugte transversale räumliche Strahlprofil der SPDC-erzeugten Photonen ist nahezu scheibenförmig. Außerdem sollte der Strahl nicht durch die optischen Komponenten abgeschnitten werden.
- Brightness: Eine hohe Brightness ermöglicht kurze Integrationszeiten, die für das Abtastverfahren erforderlich sind. Außerdem erhöht eine hohe Brightness das SNR.



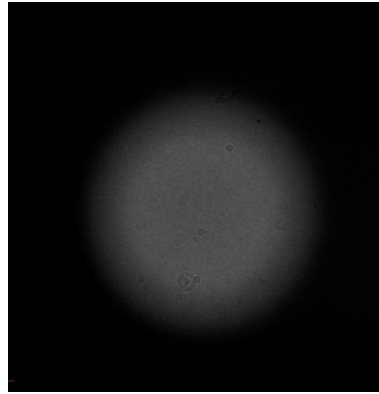
**Abbildung 13:** Foto des realisierten kompakten Demonstrators. Die rote Linie zeigt den Pumpstrahl (640 nm), die blaue Linie die Signalphotonen (790 nm) und die grüne Linie die Idler-Photonen (3350 nm)



**Abbildung 14:** Die theoretischen (normalisierten) Emissionsspektren für ein gechirptes LN mit dem Chirp-Parameter 0,01 A: Signalphotonen und B: Idler-Photonen, C: die gemessenen Signal-Emissionsspektren, D: die aus der Signalemission und der spektralen Korrelation gewonnenen Idler-Emissionsspektren (Energieerhaltung).

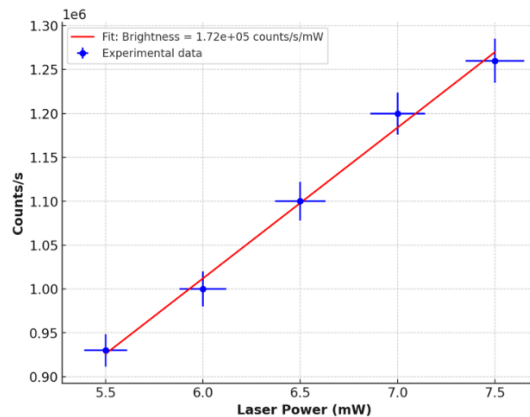
Um das spektrale Profil der erzeugten Photonen zu messen, werden die aus dem nichtlinearen Kristall austretenden SPDC-generierten Photonen in eine Multimode-Faser gekoppelt und dem faserbasierten Spektrometer zugeführt. Dabei handelt es sich um ein VIS-Spektrometer, sodass die spektrale Verteilung der Signalphotonen vermessen werden konnte. Die Spektren der Idler-Photonen werden mit Hilfe der Energieerhaltungsgleichung ermittelt und mit den theoretisch simulierten Spektren für eine gechirpte LN-Kristallstruktur verglichen. Die theoretischen Berechnungen der Spektren wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOF durchgeführt. Den Messungen zufolge sind die Signalphotonen im kollinearen Fall bei 791 nm zentriert und haben eine Bandbreite von  $>9$  nm, während die Idler-Photonen bei 3350 nm zentriert sind und eine Bandbreite von mehr als 100 nm aufweisen (siehe Abbildung 14). Daher erfüllt die kompakte Qmic-lightengine die spektralen Anforderungen des Projekts und entspricht auch der theoretischen Simulation.

Weiterhin wurde die transversale räumliche Verteilung der erzeugten Signalphotonen mit einer sCMOS-Kamera erfasst. Nach korrekter Ausrichtung hat die transversale Verteilung der erzeugten Photonen die Form einer Scheibe (siehe Abbildung 15). Außerdem beträgt der gemessene Durchmesser des Signalstrahls 5,2 mm, was einem Durchmesser des Idler-Strahls von 18,21 mm entspricht. Damit wurde sichergestellt, dass die SPDC-konvertierten Photonen nicht durch die optischen Komponenten abgeschnitten werden.



**Abbildung 15:** Die transversal-räumliche Verteilung der Signalphotonen, gemessen mit einer sCMOS-Kamera.

Die Brightness wird definiert über die Anzahl der Paare, welche pro Sekunde und pro mW Pumpleistung im nichtlinearen Kristall erzeugt werden. Um die Brightness experimentell zu bestimmen, wurden die Signalphotonen über eine Single-Mode Faser (SMF) einem SPAD zugeführt. Für variierte Pumpleistungen wurde dann die Anzahl der detektierten Photonen erfasst. Dann wurden die experimentellen Daten mit einer linearen Funktion gefittet. Die Steigung der linearen Funktion gibt dabei die (fasergekoppelte) Brightness an (siehe Abbildung 16). Die hohe Brightness des Kristalls ermöglicht Integrationszeiten in der Größenordnung von Hunderten von Millisekunden, was für eine zuverlässige Bildgebung in der Rastermikroskopie schon ausreichend ist. Um die Aufnahmezeit zu minimieren, muss die Brightness maximiert werden. Dies muss jedoch gegen als Kompromiss zwischen fasergekoppelter Brightness und der Totzeit des SPAD-Detektors (ca. 25 ns) abgewogen werden.



**Abbildung 16:** Die lineare Abhängigkeit zwischen den gemessenen Photonenzählraten und der Pumpleistung. Als Abschluss wurden der experimentelle Wert der erzielten Brightness mit dem theoretischen Wert verglichen, zusammengefasst in

Tabelle 3.

**Tabelle 3:** Vergleich der theoretischen und experimentell bestimmten Brightness.

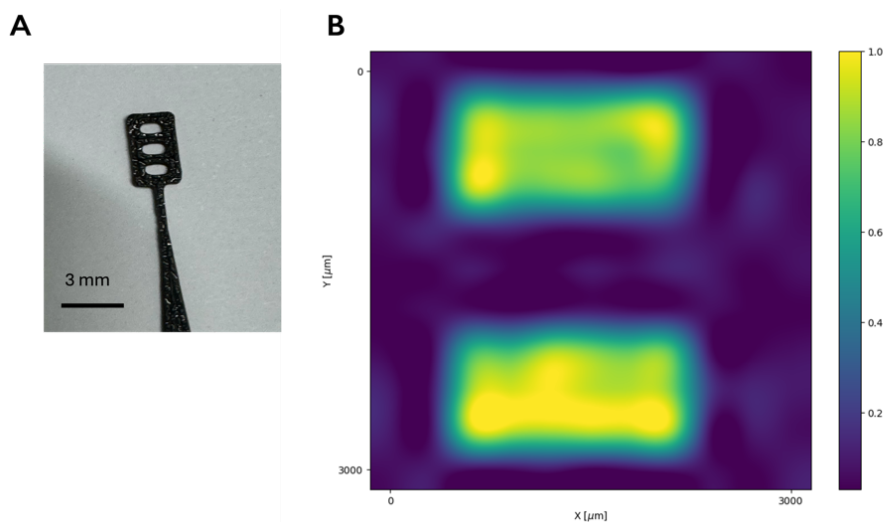
Total brightness	Theory	$8.25 \times 10^5$	pairs/s/mW
Fiber-coupled brightness	Theory	$1.93 \times 10^5$	pairs/s/mW
	Experiment	$1.72 \times 10^5$	
Fiber-coupled counts (max pump power)	Theory	$2.5 \times 10^7$	counts/s
	Experiment	$2.3 \times 10^7$	

### AP 5.1.8-14 – Erprobung Qmic-lightengine an offener Mikroskopie-Plattform

2024 wurden die Breadboard Qmic-lightengine (Quantum Optics Jena GmbH), die Scanning Stage (Precipoint GmbH) und ein frühes Lasersystem (Lasos GmbH) zusammengeführt. Die Automatisierungselektronik und der Algorithmus der Precipoint GmbH sind noch nicht fertiggestellt.

#### Allgemeine Merkmale der zusammengeführten Subsysteme

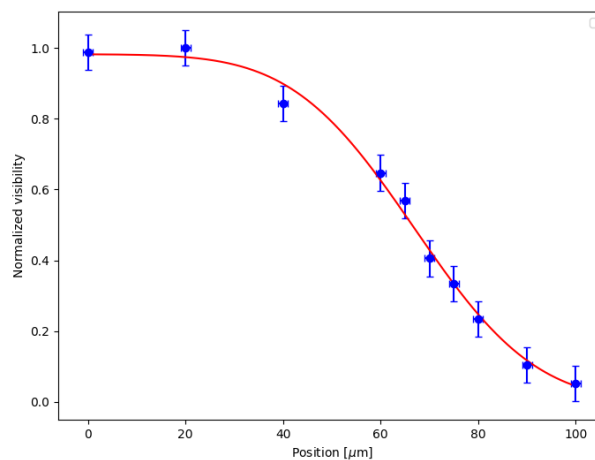
Das Sichtfeld (FoV) bezieht sich auf den Bereich des zu beobachtenden Objekts, der durch das optische Gerät gesehen wird. Bei der klassischen Laser-Scanning-Mikroskopie, bei der die Probe in der Regel mit Galvospiegeln abgetastet wird, ist das Sichtfeld durch den Akzeptanzwinkel des Objektivs begrenzt. Da die Probe selbst mit Hilfe eines Schrittmotors bewegt wird, wird das Sichtfeld durch den Bereich des Scanbereichs definiert, über den die Probe bewegt werden kann. Eine der wichtigsten Eigenschaften ist die Auflösung. Die Auflösung eines Systems hängt von der kleinsten Entfernung  $r$  ab, bei der einzelne Punkte eindeutig erkannt werden können. Um quantitativ zu beurteilen, ob diese Punkte voneinander unterschieden werden können, wurden verschiedene Standards verwendet. Bei der Quanten-Scanning-Mikroskopie mit nicht-detektierten Photonen (QIUP) ist die Auflösung unabhängig von der Korrelationsstärke, da der Abbildungsprozess keine Impuls- oder Positionskorrelationen zur Rekonstruktion des Bildes nutzt. Daher folgt die Auflösung der klassischen Beugungstheorie, wie sie in der konfokalen Mikroskopie beschrieben wird. Die laterale Auflösung ist durch die Größe des Strahls in der Probenebene gegeben. Theoretisch wird sie durch die FWHM der Punktstreuungsfunktion (PSF) des Systems bestimmt und ist gegeben durch  $r = 0.4 \frac{\lambda_i}{NA} = 0.4 \frac{\lambda_i}{\theta_i M_i}$ , wobei  $NA$  die numerische Apertur ist, die durch die optischen Elemente im Aufbau gegeben ist, und  $M_i$  die Vergrößerung des Idler-Pfads im nichtlinearen Interferometer ist. Mit anderen Worten:  $NA$  wird durch den Emissionswinkel der Idler-Photonen bei FWHM ( $\theta_i^{FWHM}$ ) bestimmt, der näherungsweise wie folgt berechnet werden kann:  $\theta_i^{FWHM} = \lambda_i \sqrt{\frac{2.78}{\pi L} \frac{n_s n_i}{n_s \lambda_i + n_i \lambda_s}}$ , wobei  $L$  die Kristalllänge,  $n_s$  und  $n_i$  die Brechungsindizes von Signal und Idler im Kristall sind. Die Pixelgröße wird durch die Schrittweite der Abtastung bestimmt. Um die kleinste Schrittgröße zu bestimmen, muss die laterale Auflösung und das Nyquist-Theorem berücksichtigt werden, was besagt, dass der Abtastabstand mindestens die Hälfte der lateralen Auflösung betragen sollte, um eine vollständige Rekonstruktion des Bildes zu ermöglichen.



**Abbildung 17:** A: 3D-gedruckte binäre Maske, die als Probe verwendet wurde. B: Das Bild der binären Maske, das mittels QIUP-Rastermikroskopie aufgenommen wurde.

#### Resultate

Nach der Zusammenführung der Subsysteme und der initialen Justage wurde das Ergebnis hinsichtlich der Visibility charakterisiert. Die Visibility im Fernfeld beträgt 46,7 %, und die maximale fasergekoppelte Visibility beträgt 15,8 %. Das erste abgebildete Objekt war eine 3D-gedruckte binäre Maske. Gescannt wurde die Probe in  $11 \times 11$  Positionen mit einer Schrittweite von  $300 \mu\text{m}$ . Die Integrationszeit für jeden Punkt wurde auf 1 s festgelegt. Das erhaltene Bild ist eine 2D-Karte der Visibility (Abbildung 17). Eine gängige Methode zur Messung der Auflösung ist die Abbildung einer USAF 1951-Zielscheibe. Sobald die vollständige Automatisierung abgeschlossen ist, wird die Auflösung erneut bestimmt, dann anhand der USAF-Zielscheibe. Eine alternative Methode zur Messung der Auflösung ist die Messung der Messerkante. Zur Umsetzung dieser Methode haben wir ein Messerkante auf den M8-Spiegel geklebt und einen Schrittmotor verwendet, um den Spiegel mit der Messerkante schrittweise in den fokussierten Idler-Strahl zu verschieben. Für jede Position wurde die Sichtbarkeit gemessen und die normalisierte Visibility-Positions-Abhängigkeit mit einer Fehlerfunktion angepasst (Abbildung 18). Die Kurve liefert eine Gaußsche Formfunktion, die die PSF darstellt. Daher wird die Auflösung durch die FWHM bestimmt,  $r_{\text{exp}} = 39.2 \mu\text{m}$ . Die theoretische Auflösung beträgt  $r_{\text{th}} = 33.4 \mu\text{m}$ .



**Abbildung 18:** Das Verhalten der Messerkantenmethode, das die laterale Auflösung des Abbildungssystems bestimmt.

Die Auflösung dieser Bildgebungstechnik hängt nicht von der Stärke der Korrelationen ab, sondern wird durch die klassische konfokale Abtastbeugungstheorie bestimmt. Die laterale Auflösung wird definiert als den kleinsten Abstand zwischen zwei Punkten, die unterschieden werden können. Sie wird durch die Größe des Idler-Spots auf der Probenebene bestimmt. Der geringe Unterschied zwischen der gemessenen und der theoretischen Auflösung lässt sich durch Unzulänglichkeiten bei der Justage (der Idler-Strahl zwischen den beiden OPMs ist nicht perfekt kollimiert) und durch die Unsicherheit der Messerkantenmethode erklären. Die MID-IR-Bildgebung mit einer Auflösung von  $40 \mu\text{m}$  kann zur Erfassung der morphologischen Konzentrationen von Lipiden verwendet werden. Um die Auflösung zu verbessern, muss ein teleskopisches Vergrößerungssystem innerhalb des Idler-Arms geschaffen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Auflösung ist die Verringerung der Kristalllänge. Es besteht jedoch ein Kompromiss zwischen der Kristalllänge, dem Single-Mode Betrieb und der Brightness: Ein kürzerer Kristall verbessert die Auflösung, verringert aber die Brightness und das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR).

Unter Berücksichtigung der lateralen Auflösung und des Nyquist-Theorems sollte für eine vollständige Rekonstruktion des Bildes eine Abtastschrittweite von weniger als  $20 \mu\text{m}$  konfiguriert werden.

Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) ist ein Maß, mit dem sich quantifizieren lässt, wie stark ein Signal durch Rauschen verfälscht wurde. Es ist definiert als das Verhältnis zwischen dem mittleren Signal  $\mu$  und der Standardabweichung des Rauschens  $\sigma$ :

$$\text{SNR} = \frac{\mu}{\sigma}$$

Das SNR kann auch in dB ausgedrückt werden als:

$$\text{SNR [dB]} = 20 \log_{10} \text{SNR}$$

Mittels der Software ImageJ wurden  $\mu = 171$  und  $\sigma = 3.2$  ermittelt. Daher beträgt der SNR 53,13 (34,5 dB).

### **AP 5.3.10-14 – Leitung IB 3 – Koordination Quanten- und Lasertechnologie**

Ziel ist weiterhin die Koordination der Forschungsaktivitäten zwischen allen Projektpartnern in IB 3 »Quanten- und Lasertechnologie«. Hierunter fallen auch die Aktivitäten innerhalb der Qmic-Entwicklung, welche durch Quantum Optics Jena GmbH in Kooperation mit dem Fraunhofer IOF vorangetrieben werden. Hierbei werden neben den monatlichen technischen Treffen auch zusätzliche Treffen bzgl. spezifischer Themen koordiniert (diese sind besonders in der Anfangsphase sehr häufig nötig gewesen).

## **3. Eingehende Darstellung (Nachweise)**

### **Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind:

- Pos. 0813 Material: 52.242,60 EUR
- Pos. 0837 Personalkosten: 359.823,80 EUR
- Pos. 0838 Reisekosten: 5.175,88 EUR
- Fördersatz: 60 %
- Eigenmittel des Antragstellers: 167.296,91 EUR
- Zuwendung: 245.007,60 EUR

### **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geplanten Arbeiten im Verbund- und im Teilvorhaben stellen ein erhebliches wissenschaftliches und technisches Risiko dar, da teilweise wissenschaftliches und technologisches Neuland betreten wird, insbesondere bei der Entwicklung einer miniaturisierten, transportablen Quantenlichtquelle für die MID-IR-Mikroskopie mittels QIUP-Technik. Die Klärung der Frage, ob eine Langzeitstabilität von 24 Stunden bei gleichzeitiger Realisierung einer Photonenpaarrate von über  $10^9$  pro Sekunde in einem kompakten Formfaktor überhaupt möglich ist, erforderte umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Eine Förderung aus eigenen Mitteln ist für die Quantum Optics Jena GmbH wegen des hohen technologischen Risikos nicht möglich. Aussicht auf Förderung im Bereich der EU bestand für das Vorhaben nicht. Zur Finanzierung der dargestellten Arbeiten im Teilvorhaben sind daher die beantragten Drittmittel unbedingt notwendig. Die im Projekt geleistete Arbeit war notwendig und angemessen.

### **Nutzen und Verwendbarkeit des Ergebnisses**

Alle geplanten Arbeitspakete wurden vollständig bearbeitet und die gesetzten Meilensteine erreicht. Die erlangten Erkenntnisse zur QIUP-basierten MID-IR-Mikroskopie dienen in Zukunft als Basis, aufgrund der Komplexität der Systeme, für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsaufgaben. Die erarbeiteten Lösungen zur Miniaturisierung von Quantenlichtquellen und die erfolgreiche Systemintegration helfen der Quantum Optics Jena GmbH sich im Bereich der Quantenbildgebung zu etablieren und sich gute Zukunftsaussichten im wachsenden Markt der markierungsfreien biomedizinischen Diagnostik zu erarbeiten.

### **Fortschritt bei anderen Stellen**

Es wurde kein für das Projekt wesentlicher Fortschritt bei Dritten wahrgenommen.

### **Veröffentlichungen der Ergebnisse**

- "Mid-Infrared Quantum Scanning Microscopy via Visible Light Beyond Spatial Correlations", Josué R. León-Torres, Vasile-Laurențiu Dosan, Marija M. Ćurčić, Alek Lagarrigue, Frank Setzpfandt, Markus Gräfe, Valerio Flavio Gili, Laser & Photonics Reviews, 2025; 23 December 2025, <https://doi.org/10.1002/lpor.202502356>

- Josué R. León Torres, Vasile-Laurentiu Dosan, Marija Ćurčić, Oliver de Vries, Frank Setzpfandt, Markus Gräfe, Valerio Flavio Gili „Mid-infrared scanning microscopy with undetected photons“, Quantum Optics XI, Kraków (Poland) 1-5 September 2025. <https://quantumoptics11.confer.uj.edu.pl/>
- Vasile Laurentiu Dosan, “Quantum Imaging: A Game Changer for Life Sciences?” Laser World of Photonics and World of Quantum, Application Panel on Quantum Sensing & Imaging, Munich (24.06.2025).
- Vasile Laurentiu Dosan, Alek Lagarrigue, Josué Ricardo León Torres, Adrià Sansa Perna, Dobryna Zalvidea, Markus Gräfe, Valerio Flavio Gili and Oliver de Vries, „A ready-to-use compact light engine for quantum microscopy,“ CLEO Europe 2025, CD-P.29, Munich (24.06.2025).
- L. Dosan et al., “Mid-IR Quantum Scanning Microscopy with undetected Light,“ Max Planck School of Photonics spring school 2025, Farchant.
- Vasile-Laurentiu Dosan, Adrià Sansa Perna, Marta Gilaberte Basset, Sebastian Töpfer, Oliver de Vries, „Simultaneous quantum imaging and spectroscopy with undetected photons,“ Optica Quantum 2.0, Rotterdam (June 2024). <https://doi.org/10.1364/QUANTUM.2024.QTu4C.6>

**Autor/Projektleiter:** Dr. Kevin Füchsel

**Datum:** 28.02.2026

---

Unterschrift Autor/Projektleiter und Firmenstempel