

Schlussbericht II – Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 13N15404

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur
Förderung der angewandten Forschung e.V.
– Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT)

Teilvorhaben:
Entwicklung und Fertigung der Spektrometermodule

Im Verbundprojekt
Quanten-OCT keramischer und polymerer Werkstoffe mit
verschränkten Photonen im mittleren Infrarot (QUIN)

Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2021-30.04.2025

Aachen, den 31.10.2025

Berichtersteller:
Fabian Wendt M. Sc.

Inhalt

1	Projektarbeiten	1
1.1	Entwicklung der Spektrometermodule	1
1.2	Entwicklung des Scankonzepts	6
1.3	Datenverarbeitung	7
1.4	Zusammenführung zum QUIN-Sensorsystem	9
1.5	Integration in 3D-Inspektionsanlage	14
1.6	Messungen an stark streuenden Materialien	15
1.6.1	Aluminiumoxid	15
1.6.2	Zirkonoxid	15
1.6.3	Kollagen	17
1.7	Zusammenfassung	17
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	18
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	18
4	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	19
5	Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	20
6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	20

1 Projektarbeiten

1.1 Entwicklung der Spektrometermodule

Die Spektrometermodule wurde mithilfe des Optiks simulationsprogramms Ansys Zemax OpticStudio ausgelegt. Zentrales Kriterium war die Anpassung der Spektrometermodule an den Emissionsbereich der signal-Photonen der Quantenlichtquelle im nahen Infrarot (785-825 nm). In diesem Bereich wurde auf einen Detektor mit 4096 Pixeln gesetzt, um eine hohe spektrale Auflösung zu erzielen, die sich in dem angestrebten Messbereich und geringem Signalverlust zum Messbereichsende (Signal-Rolloff in dB/mm) äußert. Um eine näherungsweise lineare Abtastung in der Wellenzahl (k-Linearität) zu erzielen und damit eine wellenlängenunabhängige Interferenzfrequenz zu erreichen, wurde zusätzlich zum Beugungsgitter ein Prisma verwendet.

Zur Einkopplung des Lichts wurde eine Singlemode-Faserschnittstelle vorgesehen. Diese dient auch als Eintrittsapertur, sodass keine weitere Blende oder Spalt im Spektrometer benötigt wird. Das Spektrometerdesign ist in Bild 1 dargestellt.

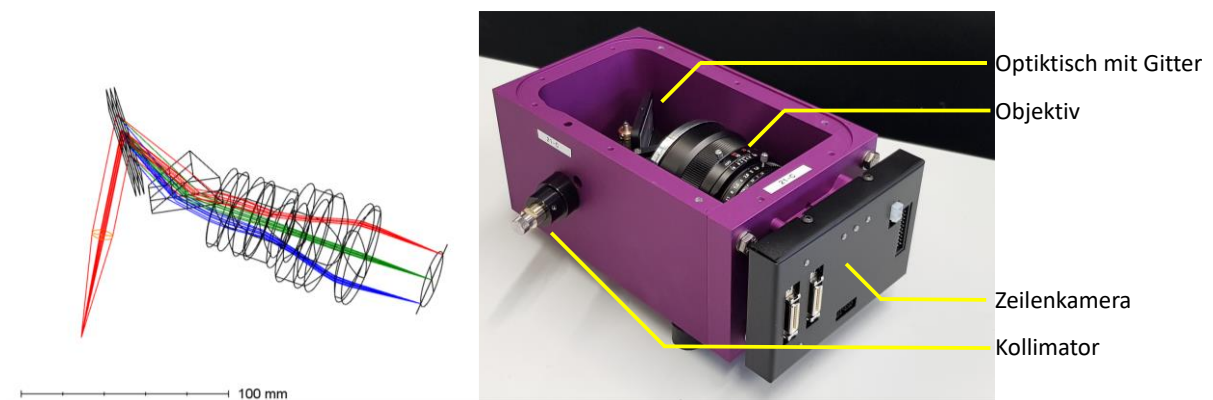
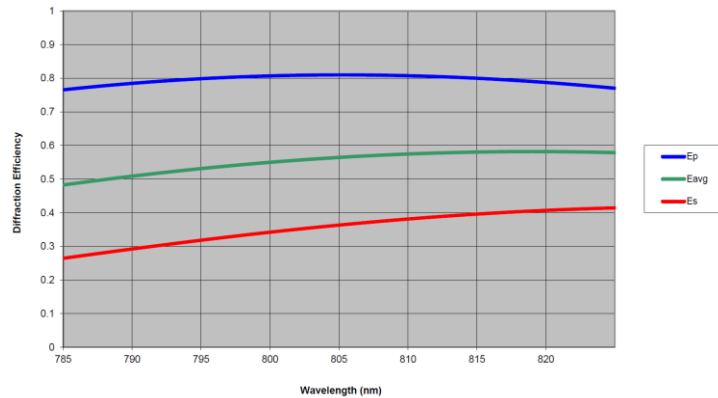


Bild 1 – Optiksimulation (links) und fertig gestelltes Spektrometermodul mit vorläufiger Zeilenkamera (rechts)

Die Spektrometereffizienz ergibt sich aus der Beugungseffizienz des Gitters, Reflexionsverlusten an Optiken und der Quanteneffizienz des Detektors. Die Beugungseffizienz des gewählten Gitters beträgt ca. 80% für p-polarisierte Strahlung und 30-40% bei s-polarisierter Strahlung, siehe Bild 2. Die Reflexionsverluste an den Optiken betragen insgesamt ca. 10%. Der Detektor wurde anfänglich aufgrund einer Quanteneffizienz von 60% ausgewählt. Es stellte sich im Projektverlauf heraus, dass dies auf veralteten Angaben beruhte. In aktuellen Datenblättern wird die Quanteneffizienz mit nur noch 34% bei 800 nm angegeben.

Bild 2 –
Beugungseffizienz
des Gitters



Als nachteilhaft am gewählten Sensor erwies sich zudem die geringe Zeilenhöhe. Zwar erfasst der Detektor nach dem optischen Design 90% der Strahlung (Bild 3), jedoch wurden experimentell aufgrund von Fertigungstoleranzen und resultierendem Smile-Effekt im Spektrometer ca. 40% Abbildungsverluste festgestellt. Insgesamt lag die Effizienz des Spektrometers somit bei ca. 14,5% gegenüber der Auslegung von ca. 43%. Auf einen effizienteren Detektor konnte zu diesem Zeitpunkt im Projektverlauf jedoch nicht mehr umgestiegen werden, da die Arbeiten beim Projektpartner Solectrix an der Datenerfassungselektronik bereits zu weit fortgeschritten bzw. in Hinsicht auf die Hardware und Detektorschnittstelle bereits abgeschlossen waren.

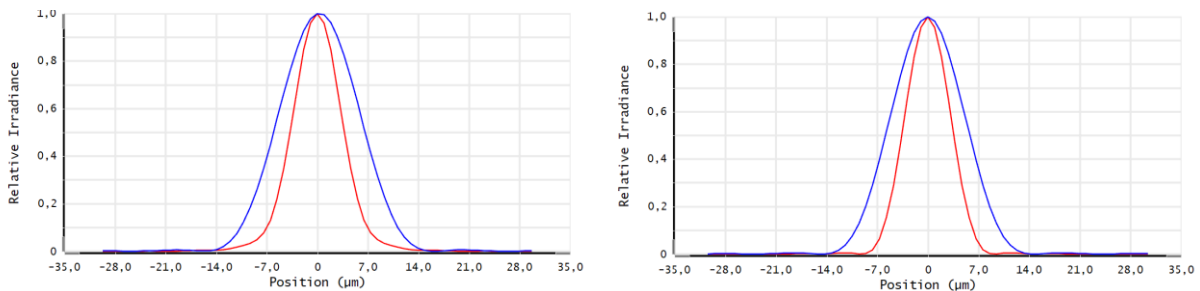


Bild 3 – Zemax-Simulation der Punktspiz-Funktion in Richtung des Spektrums (blau) und senkrecht zum Spektrum (rot) bei 785 nm (links) und bei 805 nm (rechts). Der Detektor hat zwei Zeilen mit einer Pixelgröße von 7 μm .

Für die Justierung wurde ein optomechanisches Konzept umgesetzt, bei dem zwei Freiheitsgrade zur Orientierung des Spektrums auf dem Detektor zur Verfügung stehen, die primär auf einer leichten Verkippung des Gitters basieren. Eine erste Justierschraube verschiebt das abgebildete Spektrum vertikal auf dem Detektor, sodass die Abbildung mittig erfolgt. Eine zweite Justierschraube rotiert das abgebildete Spektrum relativ zum Detektor, um eine Schiefelage auszugleichen. Aufgrund der geringen Zeilenhöhe des Detektors ist insbesondere die vertikale Korrektur wichtig, um thermischen Drift zu kompensieren. Hierzu wurden piezo-

getriebene Justierschrauben verwendet, die eine automatisierte Ansteuerung erlauben. Das Justierkonzept ist in Bild 4 dargestellt.

Bild 4 -
Justierkonzept



Als Zielgröße für den Regelungsalgorithmus dienen die Differenz der (untergrundbereinigten) Intensitätsmaxima für die erste Justierschraube und die Differenz der berechneten Schwerpunkte für die zweite Justierschraube. Bild 5 zeigt die gemessenen Abhängigkeiten der Regelungsgrößen von der Schraubenposition (willkürliche Einheiten). Nahe der Sollposition ist das Verhalten näherungsweise linear, sodass die Sollposition vom Ist-Wert ohne viele Iterationen gefunden werden kann.

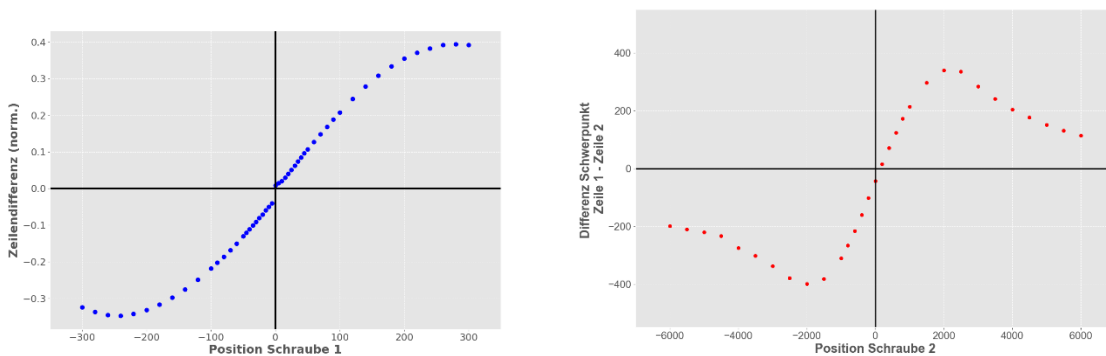


Bild 5 – gemessene Steuerwerte der automatisierten Spektrometerjustierung

Ab einem gewissen Punkt weist der Gradient der Regelungskurve das falsche Vorzeichen auf und das Spektrometer muss zunächst manuell (grob-)justiert

werden. Mit der Regelungsstrategie können jedoch auch vergleichsweise starke Dejustierungen kompensiert werden, wo das Licht nur noch im Randbereich auf den Detektor trifft (Bild 6).

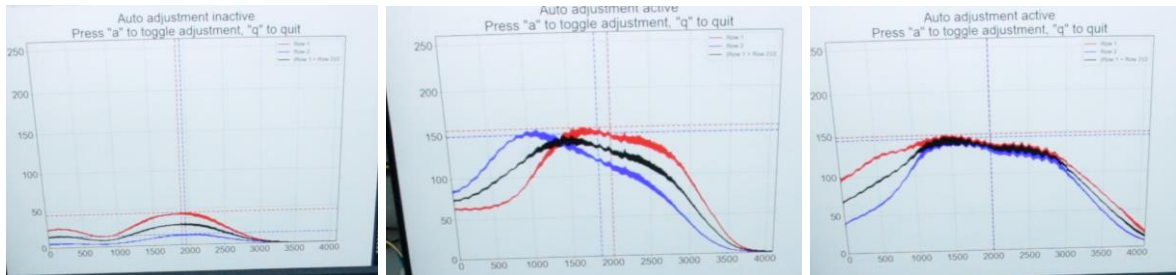


Bild 6 – Ausgehend von einer starken Dejustierung (links) wird zunächst die vertikale Lage des Spektrums korrigiert (mitte) und schließlich die Schiefelage des Spektrums kompensiert (rechts). Die verbleibende Abweichung zwischen den Zeilen ist die quadratische Verzerrung des Spektrums auf den Detektor (Smile-Effekt), die nicht von der Regelung kompensiert werden kann. Rote und blaue Kurven sind jeweils die gemessene Intensität auf einer Zeile des Detektors, die schwarze Kurve der Mittelwert.

Es wurden drei Spektrometermodule gefertigt und in Betrieb genommen. Die drei Spektrometer wurden während des Projektverlaufs parallel für die Projektarbeiten der Partner sowie die weiterführenden Entwicklungsarbeiten des Fraunhofer ILTs genutzt.

Die Spektrometer wurden mithilfe der Emissionslinien von Xenon-, Neon-, und Kryptonlinienstrahlern teilautomatisiert kalibriert. Die aufgezeichneten Spektrallinien werden automatisch detektiert und den aus der Literatur bekannten Wellenlängen mithilfe eines bipartiten Matching-Algorithmus zugeordnet. An die gemessenen Stützpunkte wird ein Polynom dritten Grades angepasst und als Kalibrierung hinterlegt. Prinzipiell beeinflusst die (automatisierte) Justierung des Spektrometers die Kalibrierung. Die sich ergebenden Abweichungen sind jedoch für die Anwendung in der optischen Kohärenztomographie zu vernachlässigen und erfordern keine Neukalibrierung durch den Nutzer.

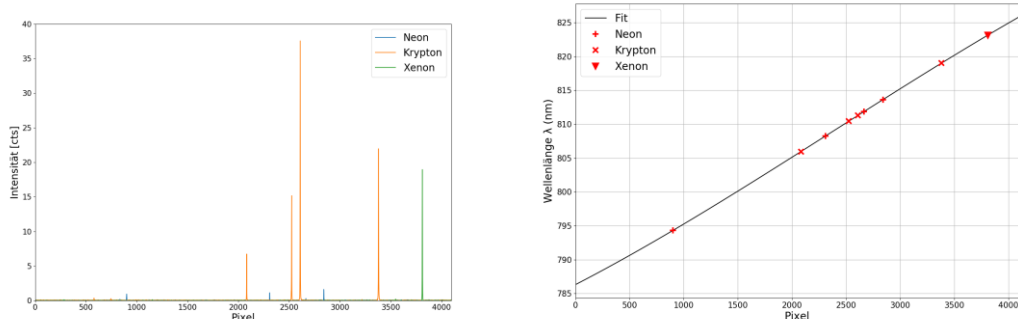


Bild 7 – Spektrometerkalibration. Links: Gemessene Spektrallinien. Rechts: Kalibrierpolynom

Zur weiteren Charakterisierung der Spektrometer für den Anwendungsfall OCT wurde ein Freistrah-Michelson-Interferometer mit einer klassischen Strahlquelle (Superlumineszenzdiode) mit Zentralwellenlänge bei ca. 800 nm genutzt. Eine Linearachse ermöglicht die Messung der Signalstärke als Funktion der Messbereichsposition. Die Signalstärke sinkt mit zunehmender Messbereichsposition, da diese einer höheren Modulationsfrequenz des interferometrischen Signals entspricht, deren gemessener Kontrast entsprechend der Spektrometer MTF abfällt. Der gemessene Signal-Rolloff betrug ca. -1,6 dB/mm bei einem maximalen Messbereich von 16 mm, siehe Bild 8.

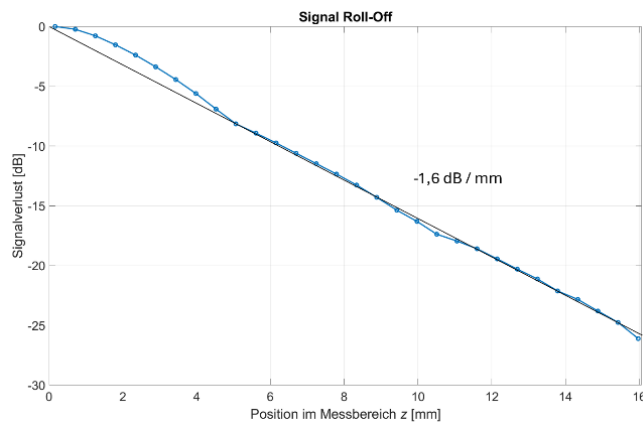


Bild 8 – Gemessener Spektrometer-Rolloff bei OCT mit Superlumineszenzdiode bei 800 nm

In Tabelle 1 sind die Kernspezifikationen der Spektrometermodule gegenüber den Designzielen aufgeführt.

Tabelle 1

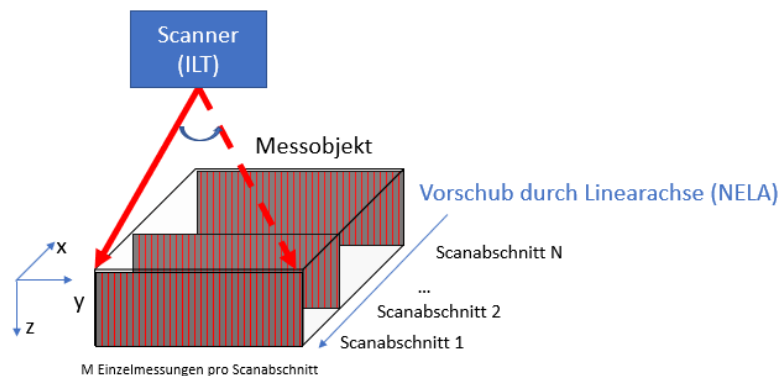
KenngroÙe	Antragsziel	Ist
Spektraler Messbereich	785..825 nm	786..826 nm
Bildpunkte	4096 px	4096 px
Spektrale Abtastrate	10 pm	9,7 pm
Spektrale Auflösung (FWHM)	25 nm	20-30 nm
Resultierende OCT-Größen		
Messbereich	16 mm	16 mm
Signal-Rolloff	-	-1,6 dB / mm
Messfrequenz, maximal	0,01..10 kHz	0,01..80 kHz

1.2 Entwicklung des Scankonzepts

Das grundlegende Messszenario wurde mit dem Projektpartner Nela abgestimmt. Das Messgut wird linear durch das Scan-Feld eines 2D-Scanners geführt. Eine Achse des Scanners ist in telezentrischer Konfiguration. Bevorzugt wird nur diese Achse des Scanners genutzt und die zweite Achse über den Probenverschub angesteuert. Dies maximiert die Signalstärke der QUIN-Sensorik, da der Messstrahl stets senkrecht auf das Messobjekt fällt.

Der Ansatz erlaubt grundsätzlich Stop-and-Go-Messungen als auch Messungen bei einer kontinuierlichen Bewegung des Messguts. Die Anordnung ist so konzipiert, dass die Messungen zur Sicherstellung der Bauteilqualität in der Prozesslinie erfolgen und dass alle Bauteile untersucht werden können.

Bild 9 - Scankonzept



Um eine gute Abbildungsqualität der breitbandigen MIR-Strahlung über das gesamte Scanfeld zu erhalten, wurde ein achromatisches Flachbildobjektiv ausgelegt. Der letzte Spiegel des 2D-Scanners wird im rückwärtigen Fokus des Objektivs positioniert, sodass in dieser Achse eine telezentrische Abbildung erreicht wird. Die Auslegung der Scanoptik erfolgte in Ansys Zemax Optic Studio unter Verwendung von kommerziell erhältlichen Kataloglinsen. Das Ergebnis ist ein Triplet-Design aus Kataloglinsen mit einer effektiven Brennweite von $EFL=38,35$ mm und optischem Arbeitsabstand von 36,5 mm bestehend aus einer plankonkaven CaF₂-Linse ($f=-200$ mm) sowie zwei plankonvexen ZnSe-Linsen ($f=50$ mm und $f=100$ mm). Mit mechanischer Einhausung beträgt der Arbeitsabstand ca. 30 mm. Der Farbfehler im QUIN-Wellenlängenbereich wird durch das Design nahezu vollständig korrigiert, siehe Bild 10.

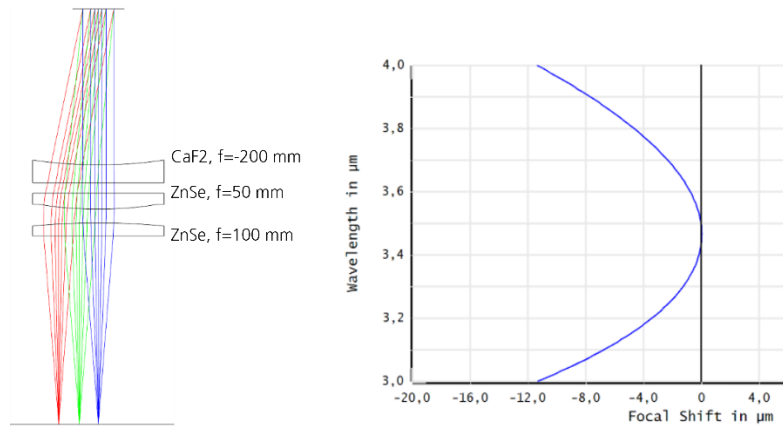


Bild 10 – Achromatisches Objektivdesign (links) und axialer Farbfehler (rechts)

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Solectrix und Nela wurde zudem die Synchronisation anhand von elektrischen Signalen definiert und auf der Scansteuerung umgesetzt. Die Scansteuerung dient dabei als Schnittstelle zwischen der Probenzuführung und der Spektrometerelektronik. In der Scansteuerung wird programmatisch die Länge einer Scanlinie, die Anzahl der Messpunkte und die Belichtungszeit definiert. Der Scanvorgang kann per Software-Trigger oder Hardware-Trigger durch die Anlagensteuerung ausgelöst werden, sobald sich das Messgut an der Sollposition befindet. Der Scanner meldet dabei ein digitales Scanner-Ready Signal an die Anlagensteuerung zurück, um das Ende eines Scanvorgangs und damit erneute Scanbereitschaft zu signalisieren.

Vom Scanner werden die einzelnen Messpositionen auf der Scanlinie angefahren. Der Scanner pausiert an der Messposition für die vorgesehene Messzeit und setzt für diese Zeit einen Line-Trigger auf HIGH, der von der Solectrix-Elektronik als Trigger und Belichtungszeitsteuerung genutzt wird, um den OCT-A-Scan an der jeweiligen Messposition zu erfassen. Über die gesamte Scanlinie wird ein FRAME-Trigger auf HIGH gesetzt. Dieser wird von der Solectrix-Elektronik genutzt, um die einzelnen A-Scans in einen B-Scan variabler Länge (entsprechend der Vorgabe in der Scansteuerung) zusammenzufassen.

1.3 Datenverarbeitung

Für die OCT-Datenverarbeitung wurden bestehende PC- und GPU-basierte Algorithmen an die QUIN-Komponenten angepasst. Den Partnern FBH und HUB wurden PC-gestützte Datenerfassungshardware und -software zur Durchführung der Projektarbeiten übergeben. Dem Partner Solectrix wurden die Algorithmen für die Implementierung auf dem FPGA offengelegt.

Für die Dispersionskorrektur zwischen signal- und idler-Photonen wurde ein Algorithmus aus der klassischen OCT implementiert, wobei vor der Fourier-Transformation zur Berechnung des A-Scans ein komplexwertiger Korrekturterm auf das Signal multipliziert wird. Die Bestimmung der Koeffizienten erfolgt im vollständigen Messaufbau inklusive Scanoptik über eine Hilbert-Transformation des vorverarbeiteten Interferenzsignals auf einem Goldspiegel zur Extraktion des nichtlinearen Anteils der Phasenlage.

Für die Verifikation der Dispersionskorrektur wurde zunächst mit einem der entwickelten Spektrometer, einem 50:50 Faserkoppler und einer Superlumineszenzdiode (Zentralwellenlänge ca. 800 nm) ein klassisches OCT aufgebaut und eine 2-lagige Kunststoffolie vermessen. Ohne Dispersionsungleichgewicht werden die Folienschichten aufgelöst und sind vom Probenträger abgegrenzt (unten links). Nach Einbringen von 64 mm SF57-Glas (Abbezahl: 23,8) in den Referenzarm (oben rechts) sind die Folienschichten nicht länger auflösbar (unten mittig). Die numerische Dispersionskorrektur stellt die ursprüngliche Auflösung wieder her (unten rechts).

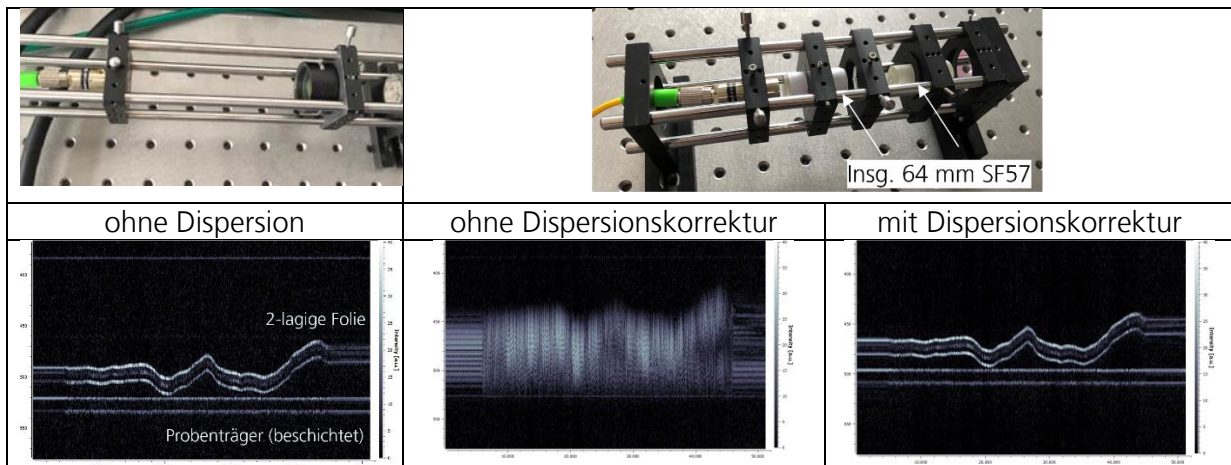


Bild 11 – Test der numerischen Dispersionskorrektur anhand eines klassischen OCT-Aufbaus und einer mehrlagigen Plastikfolie

Die Eignung der Dispersionskorrektur für den QUIN-Messansatz mit verschränkten Photonen wurde an Messdaten des QUIN-Laboraebaus an einer Wendeschneidplatte beim Projektpartner HUB verifiziert (Bild 12). Die erhaltene axiale Auflösung entspricht im Wesentlichen der berechneten Kurve auf Basis der spektralen Einhüllenden des Lichts (gestrichelte Kurve), sodass die verwendete Methode der Dispersionskorrektur für das QUIN-Messprinzip geeignet ist.

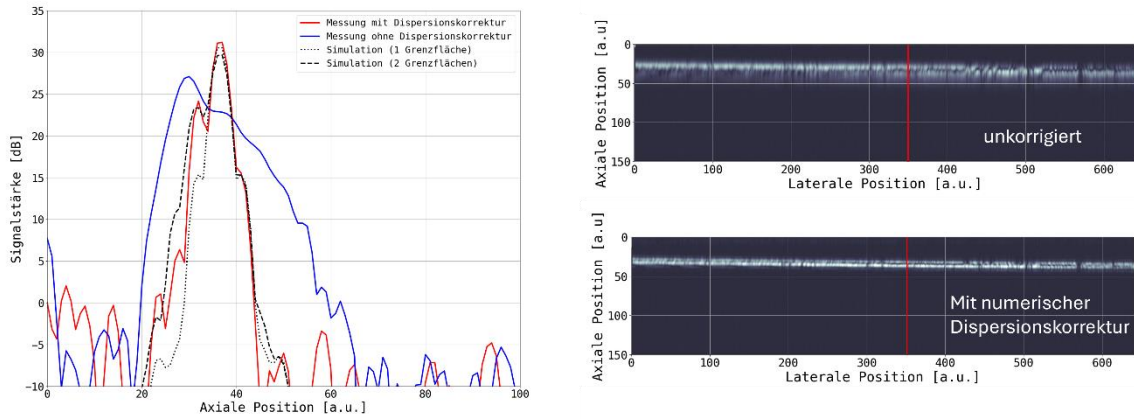


Bild 12 –Effekt der numerischen Dispersionskorrektur im Laboraufbau der Humboldt-Universität zu Berlin bei Messung an einer Wendeschneidplatte. Links: A-Scan mit und ohne Dispersionskorrektur an der rot markierten Position des B-Scans (rechts).

1.4 Zusammenführung zum QUIN-Sensorsystem

Die Spektrometer wurden mit der FPGA-Elektronik des Projektpartners Solectrix zusammengeführt. Die Datenverarbeitung wurde im Labor des Fraunhofer ILT zunächst an dem klassischen OCT-Aufbau, der bereits zum Test der numerischen Dispersionskorrektur verwendet wurde, geprüft und getestet. Die auf der von Solectrix-Elektronik berechneten B-Scans entsprachen qualitativ den PC-basierten Algorithmen.

Bild 13
Spektrometereinschub mit integrierter Solectrix-Elektronik



Im nächsten Schritt wurde auch die Quantenlichtquelle in den Aufbau integriert, siehe Bild 14.

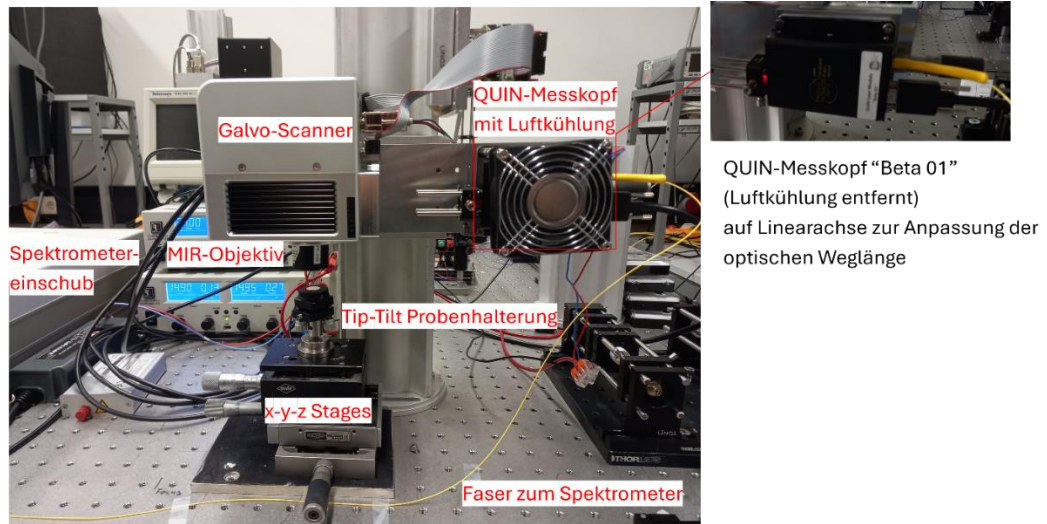


Bild 14 – QUIN-System im Labor des ILT

Das Quantenlichtmodul wurde über einen Lüfter gekühlt. Das Langzeitverhalten der Strahlquelle zeigt dennoch einen mutmaßlich thermischen Einschwingprozess (Bild 15). Der optimale Arbeitspunkt konnte hier nicht vollständig erreicht werden. Eine optimierte Temperaturkontrolle bspw. mittels Wasserkühlung konnte zu diesem Projektzeitpunkt von den beteiligten Partnern nicht mehr umgesetzt werden. Das Signal-Rausch-Verhältnis war bei Belichtungszeiten von 100 ms näherungsweise schrotrauschlimitiert mit einem verbleibenden überschüssigen Rauschanteil von ca. 10% durch Dunkelstrom.

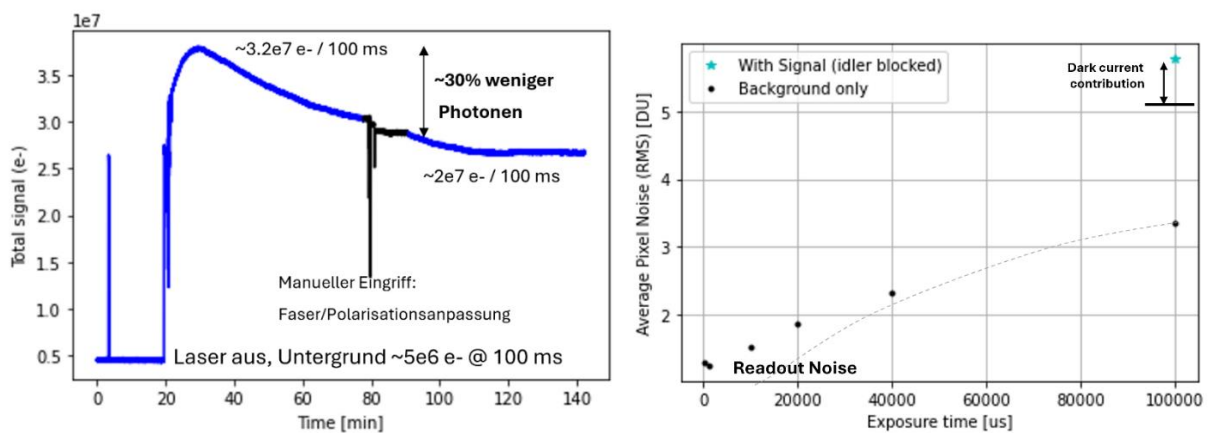
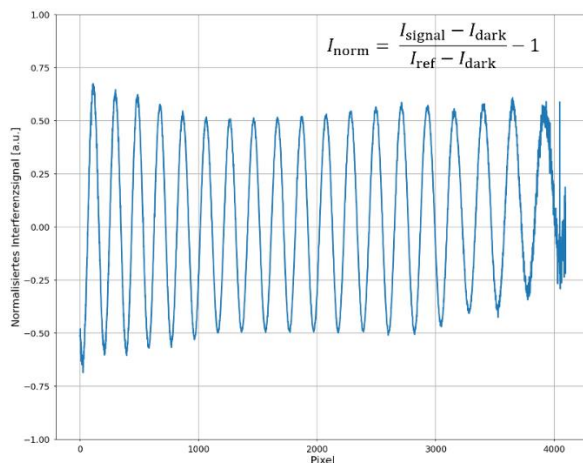


Bild 15 – Gesamtanzahl der detektierten Photonen in einer Langzeitmessung (links) und Detektorrauschen im Endzustand (rechts)

Die gemessene Visibilität (Interferenzkontrast) an einem Goldspiegel betrug ca. 50%, siehe Bild 16.

Bild 16 – Visibilität des QUIN-Sensors



Am Messbereichsanfang betrug das SNR ca. 57 dB bei einer Belichtungszeit von 100 ms. Zur Messung des Signal-Rolloffs wurde die Weglänge des kollimierten Teilstrahls über eine Linearachse variiert. Bild 17 zeigt die Überlagerung von an verschiedenen Messbereichspositionen gemessenen A-Scans (schwarze Kurve). Als Messobjekt diente ein Goldspiegel ($R \approx 0,96$). Aufgrund des endlichen Verfahrenswegs der Linearachse wurden nur Messungen bis 11 mm durchgeführt. Die kleineren Peaks am Messbereichsanfang in Bild 17 entsprechen Messartefakten aufgrund parasitärer Interferenzen von Doppelreflexionen an Optikelementen. Gegenüber dem zuvor mit einem klassischen OCT vermessenen spektrometerlimitierten Roll-Off (gestrichelte Linie, vgl. Bild 8) wurde eine deutliche Abweichung festgestellt. Insbesondere existiert ein lokales Minimum innerhalb des Messbereichs bei ca. 7 mm.

Der verschlechterte Roll-Off lässt sich plausibel durch ein Multimode-Emissionsverhalten des Pumpasers außerhalb der optimalen Betriebstemperatur erklären. Unter der Annahme, dass die Moden des Pumpasers voneinander unabhängige SPDC-Prozesse auslösen, entsprechen die durch das Spektrometer gemessenen signal-Wellenlängen unterschiedlichen idler-Wellenlängen mit einem konstanten Versatz in der Wellenzahl entsprechend einer Verschiebung des gemessenen spektralen Interferogramms auf dem Spektrometer. Bei einer Modulationsfrequenz des spektralen Interferogramms, wo dieser Versatz gerade Maxima des ersten Interferogramms mit den Minima des zweiten Interferogramms überlagert, kommt es zur Auslöschung des Signals (bei gleicher Modenenergie). Am Messbereichsanfang, wo die Modulationsfrequenz langsam gegenüber der Verschiebung ist, ist der Effekt hingegen klein. Bei höherer Modulationsfrequenz ist die Auslöschung wiederum unvollständig. Da das Spektrometer nicht exakt k-linear abtastet, die Modenenergien nicht exakt gleich sind und mehr als nur zwei Moden auftreten, folgt der sich ergebene Rolloff nur näherungsweise diesem Verhalten und

das gemessene Signalminimum ist nicht exakt Null. Eine Abschätzung des Modenversatzes aus dem Rolloff ergibt:

$$\Delta\lambda_p \approx \frac{\lambda_{p,0}^2}{4 \cdot 7 \text{ mm}} \approx \frac{(660 \text{ nm})^2}{28 \text{ mm}} \approx 16 \text{ pm}.$$

Der am FBH – unter anderen Betriebsbedingungen und an einem anderen Strahlquellenmodul - gemessene Modenabstand beträgt ca. 20 pm und liegt damit in der korrekten Größenordnung dieser Abschätzung.

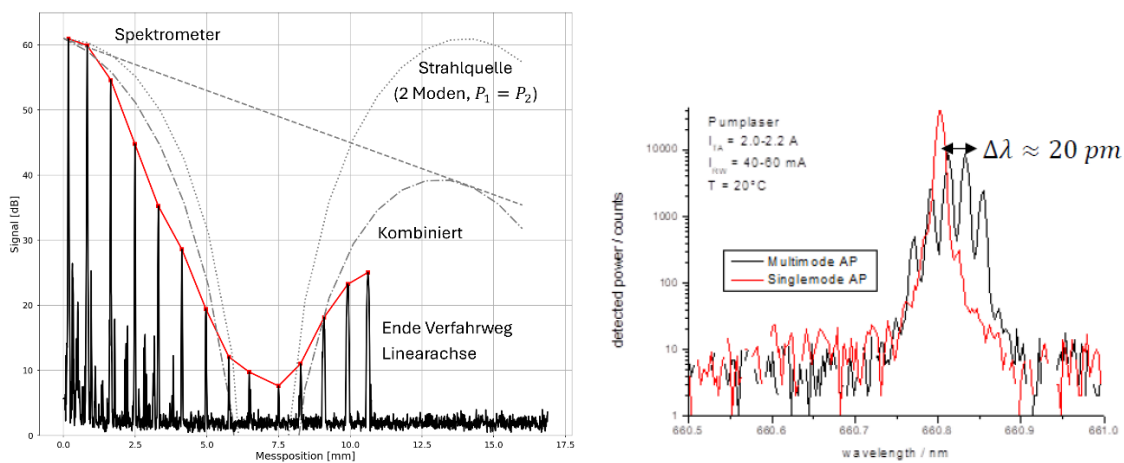


Bild 17 – Der gemessene OCT-Rolloff des QUIN-Systems (links, rot) weicht vom Spektrometerlimit (gestrichelt, vgl. Bild 8) ab. Das Verhalten lässt sich plausibel durch einen Multimoden-Arbeitspunkt des QUIN-Pumplasers (rechts, Quelle: FBH) beschreiben.

Das SNR des QUIN-Sensors in Abhängigkeit der Scanposition ist in Bild 18 dargestellt. In der y-Achse ist das SNR aufgrund der telezentrischen Abbildung in dieser Achse erwartungsgemäß unabhängig vom Scanwinkel bis am Rand des Scanfelds der Strahl durch die endliche Apertur abgeschnitten wird. Das verfügbare Scanfeld beträgt ca. 20 mm in dieser Achse. In der x-Achse gibt es erwartungsgemäß durch die nicht-telezentrische Abbildung nur einen idealen Arbeitspunkt, bei dem der Messstrahl senkrecht auf die Probe trifft.

Die laterale Auflösung wurde über den SNR-Verlust entlang einer Kante zu ca. 30 µm bestimmt.

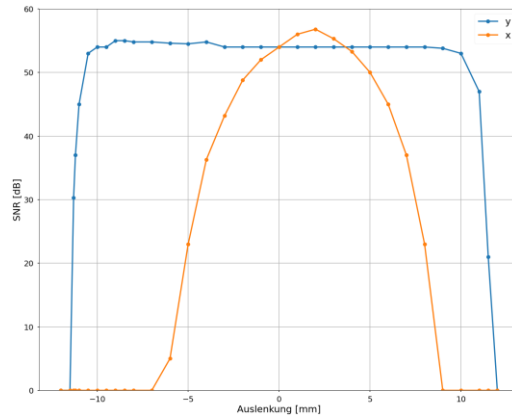


Bild 18 – SNR des QUIN-Sensors über das Scafeld

Das optimale SNR des Sensors wird nur bei einer senkrechten Ausrichtung der Probe zum Messstrahl und bei Positionierung der Oberfläche im Fokus des Objektivs erreicht. Zur Messung des SNR-Verlusts in Abhängigkeit der Probenneigung wurde die Probe (Goldspiegel) verkippt. Zur Messung des SNR-Verlusts durch Defokussierung wurde die Probe aus dem Fokus gefahren und zugleich die kollimierte Wegstrecke angepasst, sodass sich die Oberfläche weiterhin an der gleichen Messbereichsposition befindet, um den Einfluss des messpositionsabhängigen Signal-Rolloffs (siehe oben) zu vermeiden. Die gemessenen Abweichungen sind in Bild 19 dargestellt. Das SNR sinkt um -3 dB/deg^2 in beiden Winkelachsen (links) und hat eine näherungsweise Lorentz-förmige Abhängigkeit als Funktion der Defokussierung (rechts). Das Verhalten entspricht somit in guter Näherung der theoretischen Beschreibung von Single-Mode zu Single-Mode Kopplung unter Winkel- und Fokusfehlern über das Überlappintegral.

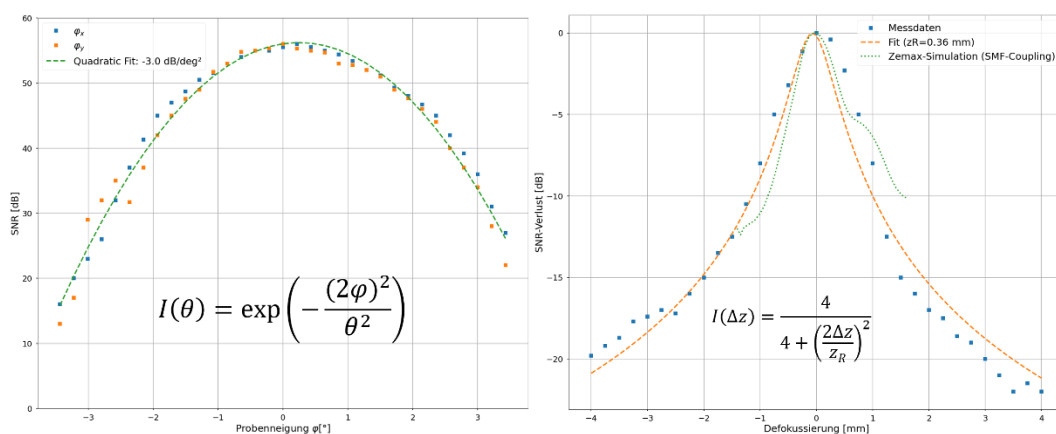


Bild 19 – SNR-Verlust bei Messung unter einem Winkel (links) und bei Defokussierung (rechts). Messungen an Goldspiegel.

Tabelle 2 Messtechnische Kenngrößen der QUIN-Sensorik

Kenngröße	Ist-Wert
Sensitivität	67 dB/s
Scanlänge y	20 mm
Scanlänge x (< 3dB Verlust)	3 mm
Laterale Auflösung	ca. 30 μm
Axiale Auflösung	ca. 15 μm (n=1)
Winkeltoleranz	-3 dB/deg ²

1.5 Integration in 3D-Inspektionsanlage

Der QUIN-Sensor wurde in Zusammenarbeit mit Solectrix bei Nela in die Prüfanlage integriert, justiert und in Messbereitschaft versetzt. Nachdem Maßnahmen zur Verbesserung der Justierfähigkeit und zur Unterdrückung von Schwingungen in der Maschine durchgeführt wurden, entsprach die Performance der Sensorik den Ergebnissen aus der Laborinbetriebnahme, insbesondere betrug die gemessene Sensitivität 67 dB/s und der Signal-Rolloff entsprach den vorgehenden Labormessungen.



Bild 20 – Integrierter QUIN-Sensor in der 3D-Inspektionsanlage im Technikum des Projektpartners Nela

1.6 Messungen an stark streuenden Materialien

Um den Einfluss des Signal-Rolloff des QUIN-Systems zu minimieren, wurden die Messungen an Proben in der Regel im gespiegelten OCT-Messbereich durchgeführt, d.h. das Innere des Materials liegt näher am Messbereichsanfang und die Oberseite, wo das Messsignal intrinsisch höher ist, tiefer im Messbereich. Die Fokusposition wurde jeweils an die Proben angepasst, um möglichst Signal von Ober- und Unterseite der Proben zu erhalten.

1.6.1 Aluminiumoxid

Bei Labormessungen des Projektpartners HU Berlin wurde bereits früh im Projektverlauf eine maximale Messtiefe von ca. 300 μm (entsprechend ca. 500 μm optische Weglänge bei $n_g=1,8$) in Al_2O_3 -Keramiken identifiziert. Messungen mit dem vollständigen QUIN-System an 3D-gedruckten Keramiken bestätigten dies qualitativ. Die Signalstärke fällt schnell ab, sodass längere Mittelungszeiten notwendig sind. Zum Teil wird Reststreuung im Material gemessen, welche sich als Speckle im OCT-Signal äußert. Die Sensorik ist für Aluminiumoxid oberflächennah einsetzbar.

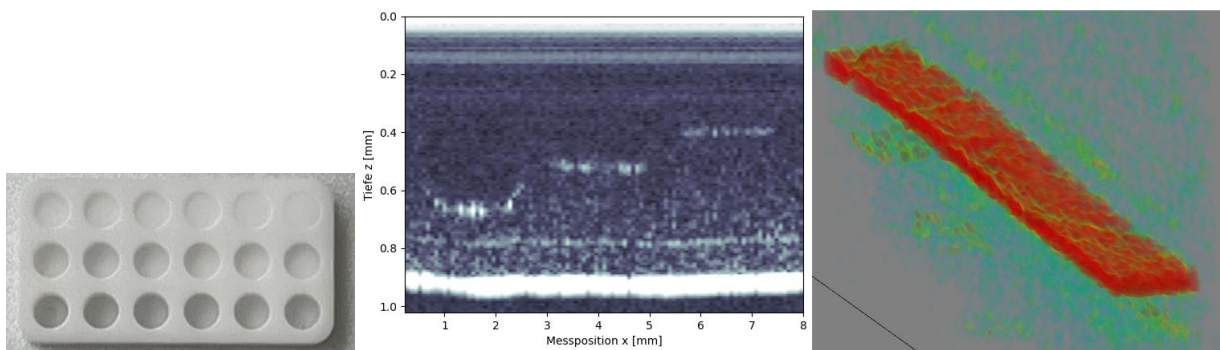


Bild 21 – 3d-gedruckte Al_2O_3 -Probe mit kreisförmigen Vertiefungen (links). Mitte: B-Scan entlang der drei dünnsten Vertiefungen (Mittelung über 25 Scans, jeweils 100 ms Belichtungszeit). Rechts: Ungemittelter C-Scan der Probe

1.6.2 Zirkonoxid

In Zirkonoxid wurde kein innenliegendes Speckle durch Streuung festgestellt und es konnten tiefere Eindringtiefen als in Aluminiumoxid erreicht werden. Bild 22 zeigt die Messung an einer Probe mit gleicher Geometrie wie die vorherige Probe aus Aluminiumoxid.

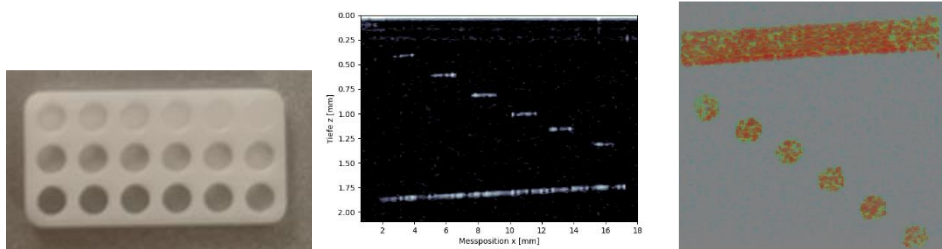


Bild 22 – 3D-gedruckte Probe aus ZrO_2 (links), B-Scan (Mitte) entlang der oberen Reihe C-Scan (rechts)

Weiterhin wurden Messungen an Keramikendmaßen aus ZrO_2 durchgeführt. Diese sind durch ihre Geometrie und Glattheit besonders geeignet, um ein gutes Signal auch an der Rückseite zu erzielen. Es konnten bis zu 2 mm dicke ZrO_2 Endmaße vermessen werden. Beschränkend ist hier insbesondere der reduzierte effektive Messbereich aufgrund des Multimode-induzierten Signalrolloffs, da die optische Weglänge bei 2 mm Materialdicke bereits ca. 4,5 mm beträgt. Im Vergleich konnte ein klassisches OCT-System bei 1550 nm nur das Oberflächensignal der 2 mm-Endmaße erfassen. Insbesondere ist bei 1550 nm noch ein deutliches Streusignal zu beobachten. Bei der Vermessung der Keramikendmaße fiel auf, dass die Rückseite einiger Endmaße desselben Herstellers trotz nominell gleichen Materials und gleicher Dicke nicht gemessen werden konnte. Zum Teil war die Rückseite auch bei dünneren Endmaßen (1 mm Dicke) nicht erfassbar. Innere Streuzentren konnten dabei nicht im OCT-B-Scan beobachtet werden. Der exakte physikalische Grund hierfür konnte nicht eindeutig identifiziert werden. Plausibel ist eine zu starke Verzerrung der Wellenfronten durch Inhomogenitäten im Material, und einer resultierenden Abschwächung des Signals durch Dekohärenz unter die Detektionsschwelle. Ein Indiz ist die höhere gemessene Streuung bei der Messung dieser Endmaße mit dem 1550er-OCT, siehe Bild 23.

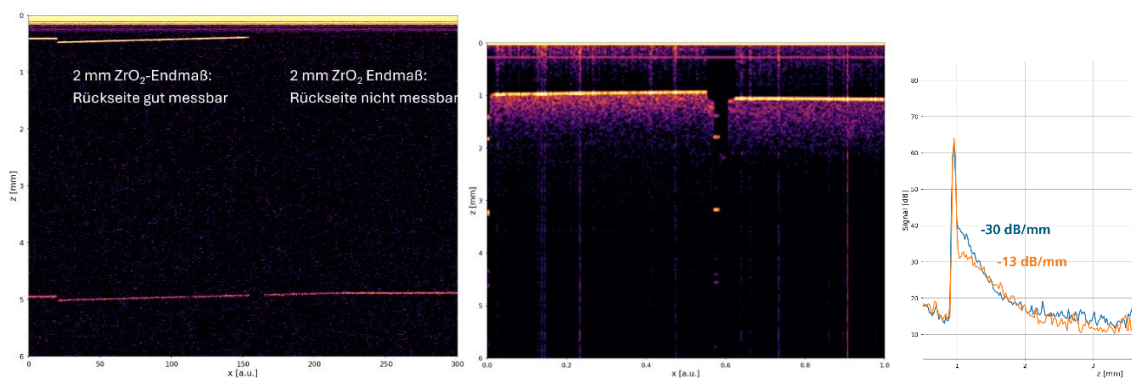


Bild 23 – B-Scan zweier nebeneinander positionierter Endmaße erfasst mit dem QUIN-Sensor (links) und einem 1550er-OCT (mitte). Rechts: Gemittelter A-Scan der Endmaße (1550er OCT).

Als Beispiel realer Objekte mit innenliegenden Strukturen wurde eine Faserferrule für Singlemode-Fasern aus Zirkonoxid vermessen. Die Probengeometrie ist im

Wesentlichen ein hohler Zylinder. Es wird nur nahe des Zenits ein Signal erfasst. Der Durchmesser der innenliegenden Bohrung von 126 μm konnte korrekt mit der QUIN-Sensorik erfasst werden.

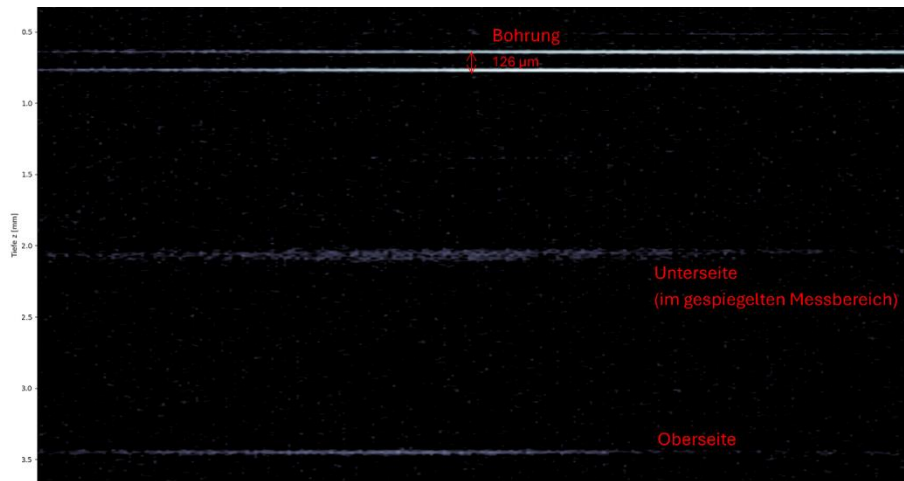


Bild 24 – B-Scan einer Faserferrule aus Zirkonoxid

1.6.3 Kollagen

Kollagen ist ein Biopolymer mit Anwendungen im medizintechnischen Bereich, welches im trockenen Zustand zu stark für Messungen mit klassischen OCT-Wellenlängen streut. Mit der QUIN-Sensorik lässt sich die Dicke erfassen, wobei die Signalstärke auf der Rückseite stark verringert ist.

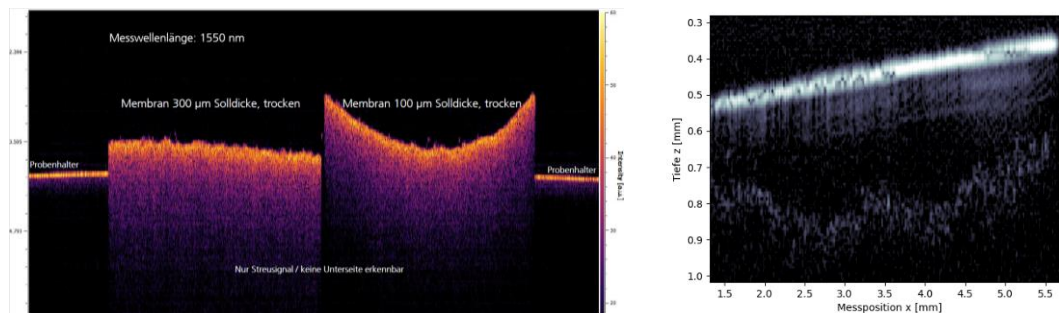


Bild 25 – B-Scan entlang einer trockenen Kollagenmembran mit OCT bei 1550 nm (links) sowie mit dem QUIN-Sensor (rechts)

1.7 Zusammenfassung

Die technischen Zielspezifikationen der Spektrometer konnten im Hinblick auf den spektralen Messbereich und die spektrale Auflösung erfüllt werden.

Verbesserungspotential besteht bei der Spektrometereffizienz. Durch quanteneffizientere Detektoren und verbesserte Abbildung bzw. größere Pixel wäre eine Steigerung um den Faktor 3 möglich, entsprechend ca. 5 dB erhöhte Sensitivität des QUIN-Sensors.

Mit dem QUIN-Demonstrator wurde der zugrundeliegende quantentechnische Messansatz erstmals aus dem Laboraufbau in die einsatznahe Umgebung übertragen und um ein Scankonzept erweitert. Die grundlegende Funktionalität sowie ein Vorteil gegenüber klassischen OCT-Wellenlängen bis 1550 nm konnte experimentell demonstriert werden. Für die angestrebten technische Anwendung erwies sich die Sensitivität des Demonstrators allerdings als noch zu gering.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Personalmittel

Ein wesentlicher Teil der Projektmittel entfiel auf die Personalkosten. Ein Großteil der Arbeitsstunden entfiel auf Auslegung und Charakterisierung der Spektrometer sowie Inbetriebnahme und Charakterisierung des QUIN-Sensors im Labor.

Sachkosten

Ein Großteil der Sachkosten entfiel auf die optischen und mechanischen Komponenten zum Zusammenbau der Spektrometer. Weitere wesentliche Punkte waren ein PC mit Grafikkarte und Framegrabber zur Datenerfassung und -verarbeitung für Laborarbeiten.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Im QUIN-Projekt wurde das zugrundeliegende quantenoptische Messprinzip erstmals von Laborversuchen in eine industrienahere Einsatzumgebung übertragen. Dazu war die Entwicklung von definierten und robusten Schnittstellen und Teilkomponenten notwendig. Insbesondere war die Charakterisierung der Sensorik notwendig und angemessen, da es sich um ein neuartiges Messverfahren handelt.

Die Entwicklung der an das Emissionsspektrum der Quantenlichtquelle angepassten hochauflösenden k-linearen Spektrometer war notwendig, um den Signalverlust über den Messbereich zu minimieren, um so trotz geringer Photonenraten einen hinreichenden verfügbaren Messbereich zu erzielen. Die Automatisierung des Justierprozesses ermöglicht die Nutzung der Spektrometer ohne Expertenwissen.

Die Fertigung insgesamt dreier Spektrometer war notwendig, um parallele Entwicklungen der Projektpartner zu ermöglichen und die Projektziele innerhalb des

gesetzten Zeitrahmens zu erreichen. So wurden die Spektrometer während des Projekts zunächst zeitgleich Arbeiten von ILT, FBH und HU Berlin eingesetzt. Im späteren Verlauf für die Arbeiten von ILT, HU Berlin und Nela. Die Nutzung der zunächst PC-basierten Datenerfassung war einerseits zur Durchführung der Projektarbeiten vor Fertigstellung der Solectrix-Elektronik notwendig, zum anderen für die Verifikation der Solectrix-Elektronik durch Vergleich. Die Systeme werden auch nach Projektende genutzt, um weiterführende Forschungsarbeiten durchzuführen.

Während der gesamten Projektlaufzeit hat das ILT die Projektpartner intensiv bei der Bearbeitung ihrer jeweiligen Teilvorhaben, insbesondere bei der Auslegung des Gesamtsystems sowie bei der Inbetriebnahme vor Ort unterstützt.

4 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit sind keine vergleichbaren Arbeiten zur optischen Kohärenztomographie im mittleren Infrarot mit verschränkten Photonen bekannt geworden.

Allerdings sind alternative Ansätze für OCT im mittleren Infrarot verfolgt worden. Einerseits wurden Ansätze mit klassischer MIR-Technologie weiterentwickelt.¹ Daneben wurden Ansätze verfolgt, bei denen die MIR-Strahlung durch Upconversion in den nahen Infrarotbereich übertragen wird.² Insbesondere existieren Ansätze, bei denen über femto-Sekunden Laser und nichtlinearer Optik die MIR-Strahlung erzeugt wird und anschließend über Upconversion konvertiert wird.³ Ein Vergleich ist in Tabelle 3 gegenübergestellt. Dabei wurde eine Skalierung der Sensitivität proportional zur Wurzel von Belichtungszeit und optischer Leistung (Schrotrauschlimierte Skalierung) angenommen.

Tabelle 3 Alternative MIR-OCT-Ansätze aus der Literatur

Ansatz	Messrate	Sensitivität @ 10 Hz*	Optische. Leistung (im MIR)	Sensitivität/mW @ 10 Hz
QUIN	10 Hz	57 dB	$\sim 10^{-7}$ mW	127 dB
MIR-OCT ¹	50 Hz	87 dB	230 mW	64 dB
MIR + Upconversion ²	3 kHz	90 dB	22 mW	77 dB
DFG + Upconversion ³	1 MHz	105 dB	10 mW	95 dB

Diese Ansätze erzielten somit absolut höhere Sensitivitäten und dadurch Messraten als der QUIN-Demonstrator, verwendeten jedoch deutlich höhere optische

¹ Zorin et al. "Mid-infrared optical coherence tomography as a method for inspection and quality assurance in ceramics additive manufacturing", Open Ceramics (2022)

² Israelsen et al. "High-resolution mid-infrared optical coherence tomography with kHz line rate," Opt. Lett. 46, 4558-4561 (2021)

³ Satoko Yagi et al., Mid-infrared optical coherence tomography with MHz axial line rate for real-time non-destructive testing. APL Photonics (2024);

Ausgangsleistungen und waren nicht schrotrauschlimitiert. Die QUIN-Strahlquelle ist zudem gegenüber den alternativ benötigten ps- bzw. fs-Strahlquellen der Upconversion-Ansätze einfacher, robuster und perspektivisch wirtschaftlicher. Der QUIN-Ansatz ist daher weiterhin vielversprechend, allerdings muss die Photonenrate in zukünftigen Arbeiten weiter gesteigert werden.

5 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Kontext des Projekts wurde von der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. ein deutsches Patent für eine weiterführende, kompaktere Ausführungsform der Spektrometer unter dem Aktenzeichen 10 2022 110 651.9 angemeldet und erteilt. Das Fraunhofer ILT plant, die Ergebnisse des Teilprojekts durch weiterführende Forschungsaktivitäten sowie über Vermarktung über Lizenznehmer zu verwerten.

Einer der drei im Projekt aufgebauten QUIN-Sensoren steht dem Fraunhofer ILT im Technikum zur Verfügung und wird zur weiteren Erkundung von Anwendungsfeldern und Verwertungsmöglichkeiten genutzt. Zudem wird eine zusätzliche Nutzung als studentischer Praktikumsversuch geprüft.

Das Fraunhofer ILT plant zudem die Durchführung weiterer Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich der optischen Messtechnik mit verschränkten Photonen. Ein gemeinsames Projekt mit dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, Berlin (FBH) sowie der Humboldt-Universität zu Berlin im Bereich der Spektroskopie im mittleren Infrarot mittels verschränkter Photonen wurde bereits unter dem Förderkennzeichen 13N16383 gefördert. Ein weiterer Projektantrag mit Anwendungsfall optischer Kohärenztomographie im mittleren Infrarot wurde gemeinsam mit dem Partner FBH gestellt.

In diesen Projekten profitieren die Projektkonsortien signifikant von den im Rahmen des Verbundprojekt QUIN gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnissen.

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Das Fraunhofer ILT hat die Arbeiten zum QUIN-Projekt auf der Messe World of Quantum in München in den Jahren 2023 und 2025 im Rahmen eines Messestands dem Fachpublikum vorgestellt.

Eine wissenschaftliche Veröffentlichung über die Vermessung von Keramikproben mit der QUIN-Sensorik wird derzeit federführend von der Humboldt-Universität zu Berlin und dem Fraunhofer ILT mit Beiträgen der weiteren Projektpartner erarbeitet.