

Quanteninterferenzmodule für die optische Kohärenztomographie zur zerstörungsfreien Prüfung keramischer Bauteile unter Zuhilfenahme „undetektierter“ Photonen im mittleren Infrarotbereich

Gunnar Blume¹, David Feise¹, Alexander Sahn¹, Nils Werner¹, Johannes Zender¹, Sven Ramelow^{1,2}, Katrin Paschke¹
 1 Ferdinand-Braun-Institut (FBH), Gustav-Kirchhoff-Straße 4, 12489 Berlin, Germany;
 2 Institute for Physics, Humboldt-Universität zu Berlin, Newtonstraße 15, 12489 Berlin, Germany.

Kurzfassung

Der mittlere Infrarotbereich (MIR) bietet im Gegensatz zum sichtbaren oder nahinfraroten (NIR) Spektralbereich aufgrund geringerer Streuung die Möglichkeit zur zerstörungsfreien Prüfung von keramischen Bauteilen. Allerdings sind die Lichtquellen und Detektoren in diesem Bereich um Größenordnungen unempfindlicher. Daher wird die Quantenkorrelation zwischen Photonen im MIR und NIR benutzt, die mittels parametrischer Fluoreszenz in einem Interferometer-Aufbau erzeugt wurden. Wird dann mit den Photonen im MIR die Probe abgetastet, kann die Information aus dem Interferenzspektrum der NIR-Photonen gewonnen werden. Die MIR-Photonen bleiben dabei „undetektiert“. Bisherige Laboraufbauten wurden jetzt so weit miniaturisiert, dass sie in industrieller Umgebung eingesetzt werden können.

Abstract

The non-destructive testing of ceramics is preferably done in the mid-infrared (MIR) spectral region rather than the visible or near infrared (NIR) due reduced scattering. However, MIR light sources and detectors feature a significantly lower sensitivity than their NIR counter parts. Quantum correlation between MIR and NIR photons can be used to circumnavigate the challenge. Entangled photons are generated in a spontaneous parametric down conversion process, which is put in an interferometer setup. Thus, the MIR photon can be used to scan a sample, while the NIR photons which also carry the same interference information due to the correlation are detected. The MIR photons remain “undetected” in the whole process. The setup was now miniaturized enabling future industrial application.

1 Einleitung

Für viele Fertigungsprozesse ist ein zerstörungsfreier Messprozess wünschenswert. Optische Messungen werden in der automatisierten Produktion in großer Zahl verwendet, da hier zusätzlich kein physischer Kontakt zum Messobjekt notwendig ist (siehe Bild 1). Die Wahl der verwendeten Wellenlänge spielt dabei eine entscheidende Rolle. Bei Keramiken hat z.B. eine Wellenlänge im mittleren Infrarot (MIR) den Vorteil der geringeren Streuung und damit größeren Eindringtiefe. Allerdings sind die Leistungen der Quellen und die Effizienz der Detektion um Größenordnungen geringer als im sichtbaren oder nahinfraroten (NIR) Bereich.

Eine elegante Methode um im MIR messen und im NIR detektieren zu können, ist die Nutzung der Quantenkorrelation zwischen Photonen im MIR und NIR. Ein solches korreliertes (und verschränktes) Photonenpaar lässt sich mit parametrischer Fluoreszenz (spontaneous parametric down conversion, SPDC) in einem passenden nichtlinearen Kristall erzeugen [1,2,3].

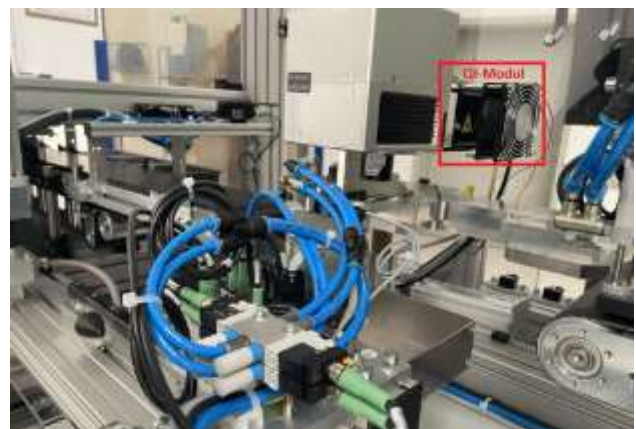


Bild 1 Foto eines Quanteninterferenzmoduls im Messaufbau in einer Sortieranlage (mit freundlicher Genehmigung von NELA).

2 Konzept

Um ein Interferenz-Messsignal zu erhalten, ist es notwendig, dass sowohl MIR- als auch die NIR-Photonen sowie das Pumplicht zweimal einen SPDC-Prozess durchlaufen

(siehe Bild 2). Hierzu wird ein nichtlinearer Kristall (periodisch gepoltes Kaliumtitanylphosphat, ppKTP) mit einer Wellenlänge von 660 nm optisch gepumpt. Der Pumplaser ist in unserem Fall ein Halbleiterlaser, der extra für diesen Einsatz entwickelt wurde, um ausreichend kohärentes Pumplicht bei kleinsten Abmaßen bereitzustellen [4].

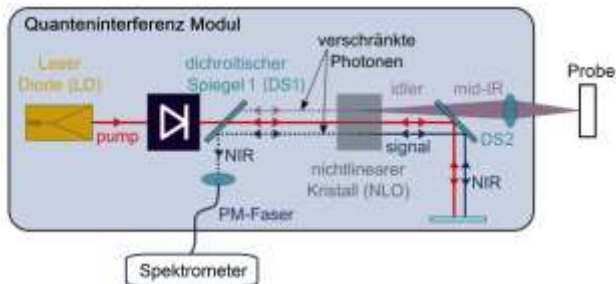


Bild 2 Prinzipskizze des Messens mit „undetektierten“ Photonen

Das Pumplicht passiert einen optischen Isolator und wird geeignet auf den ppKTP-Kristall fokussiert, um verschränkte NIR- (um ca. 800 nm) und MIR-Photonen (um ca. 3.8 μm) zu erzeugen [2]. Danach wird das NIR-Licht und die Pumpstrahlung vom MIR-Anteil getrennt (Langpassfilter, DS 2) und verbleibt auf einer Referenzstrecke im Quanteninterferenz-Modul. Die MIR-Photonen verlassen das Modul, werden auf eine Probe gelenkt, von der sie zurückgestreut oder reflektiert werden und auf dem Rückweg ein zweites Mal den ppKTP Kristall passieren. Das geschieht zeitgleich zusammen mit dem NIR und Pumplicht aus dem Referenzarm. Dadurch können alle Photonen miteinander interferieren (Quantenvariante eines Michelson-Interferometers). Dabei entsteht ein Interferenzsignal nicht nur in den MIR-Photonen sondern auch in den korrelierten NIR-Photonen. Letztere werden dann über einem dichroitischen Strahlteiler (Kurzpassfilter, DS1) in eine optische Faser gekoppelt und zu einem Spektrometer mit einer Silizium-Detektorzeile geleitet.

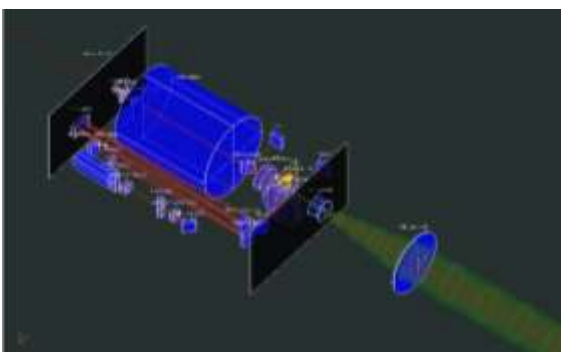


Bild 3 Optische Simulation des Strahlengangs im Quanteninterferenzmodul.

Für die Miniaturisierung des Aufbaus wurde als erstes der optische Strahlengang mit Hilfe der Software BeamXpert DESIGNER simuliert (siehe Bild 3). Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Dispersionseigenschaften der verwendeten Optiken gelegt, um möglichst viele NIR-Photo-

nen detektieren zu können. Daraus wurde ein mechanisches Modell entwickelt, welches neben den Optiken auch elektrische Leiterbahnen, eine interne Peltierkühlung integriert sowie optischen und elektrische Anschlüsse ermöglicht. Das Gehäuse hat dabei eine Grundfläche von 75 x 90 mm² (siehe Bild 4).



Bild 4 Renderbild der mechanischen Zeichnung des Quanteninterferenzmoduls.

Bau und Messergebnisse

Daraufhin wurden alle Einzelteile angefertigt (Optikträger Inlay, Laser, Gehäuse) bzw. kommerziell erworben (optischer Isolator, Mikrooptiken, Photodioden, Temperatursensoren, Faser und Elektroanschlüsse). Mittels Mikromontage wurden sämtliche Komponenten im Modul mit einer Genauigkeit von teilweise < 0.2 μm platziert und montiert (siehe Bild 5).

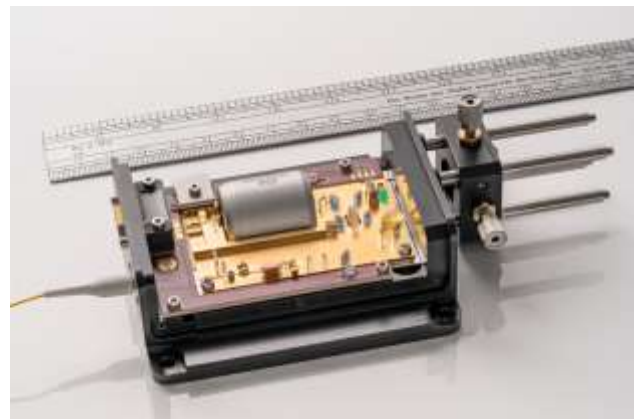


Bild 5 Foto eines Quanteninterferenzmoduls mit Mikrooptiken und Maßstab zum Größenvergleich.

Zusätzlich wurde eine externe Elektronik entwickelt, die eine Leistungsstabilisierung des Pumplasers ($\Delta P < 1\%$ über 1 h) und eine Temperaturstabilisierung des gesamten Optikträgers (± 0.2 K) ermöglicht [5].

Mit dem Quanteninterferenzmodul und einem Spektrometer (HR-6N750-50WG6) mit konventionellem Silizium-Zeilendetektor konnte dann das NIR-Licht mit einer Gesamtphotonenrate von ca. 10^8s^{-1} detektiert werden. Wird ein Silberspiegel als Probe für das mit einer externen ZnSe-Linse kollimierte MIR-Licht benutzt, zeigt sich im NIR-Licht Interferenz mit einer Sichtbarkeit von ca. 39%.

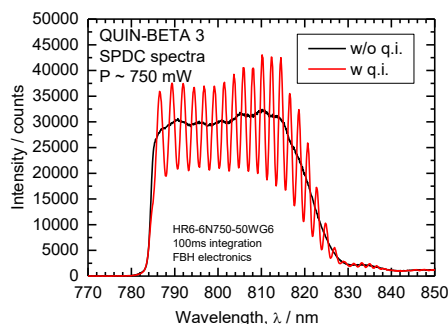


Bild 6 Spektren des detektierten nahinfraroten Anteils der parametrischen Fluoreszenz ohne (schwarz) und mit (rot) Quanteninterferenz

Wird das SPDC-Licht ohne Quanteninterferenz vom Signal mit aufmodulierter Quanteninterferenz abgezogen, ergibt sich ein reines Interferenzsignal dessen Frequenz sich aus dem Unterschied der Weglängen zwischen dem MIR-Licht und der NIR-Referenzstrecke ergibt (siehe Bild. 7).

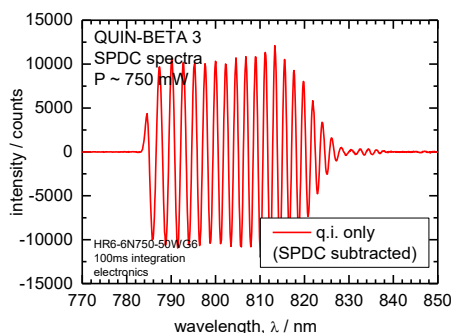


Bild 7 Quanteninterferenz abzüglich des Untergrundes der parametrischen Fluoreszenz

Um einen Anwendungsfall zu demonstrieren, wurden drei verschiedene CaF_2 -Spiegel, die eine hochreflektierende Schicht im sichtbaren und NIR-Bereich besitzen, als Proben mit MIR-Photonen untersucht. Die CaF_2 -Spiegel haben Dicken von 1 mm, 2 mm und 3 mm (siehe Bild 8).



Bild 8 Foto von drei CaF_2 Proben mit $d = 1$ mm, 2 mm und 3 mm. Die Proben sind hochreflektierend im sichtbaren und nahinfraroten Bereich.

Werden die Proben in den MIR Strahl gehalten, verlängert sich der optische Weg um die doppelte Dicke mal dem Brechungsindex ($n = 1.4$). Das verändert die Frequenz des Interferenzsignals (siehe Bild 9).

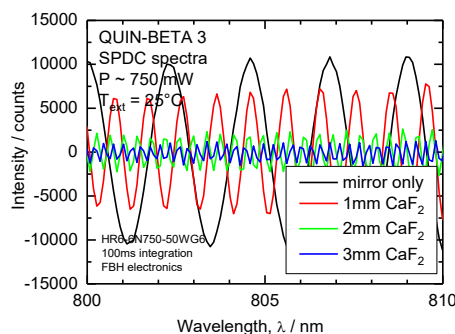


Bild 9 Ausschnitt aus dem Quanteninterferenzspektren für verschieden dicke CaF_2 -Proben.

Dabei ändert sich allerdings nicht nur die Frequenz, sondern durch Absorption und Streuung auch die Amplitude. Um die Größen besser darzustellen wurde an den Spektren eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) durchgeführt (siehe Bild 10).

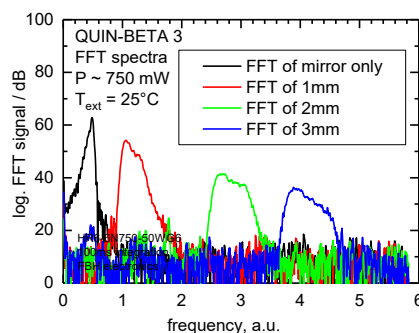


Bild 10 Fast Fourier Transformierte (FFT) der QI-Spektren aus denen sich, bei bekanntem Brechungsindex, direkt die Dicke der Proben ableiten lässt.

Aus Bild 10 wird ersichtlich, dass alle drei Proben vermessen werden konnten und diese die Frequenz der Quanteninterferenz um den Faktor ihrer Dicke ändern. Im Fall der 3 mm dicken Probe ist allerdings eine Signalabschwächung von ca. 25 dB im Verhältnis zum rein am Silberspiegel reflektierten MIR Licht zu beobachten.

3 Zusammenfassung

Es wurden Quanteninterferenzmodule entwickelt, die es ermöglichen im industriellen Umfeld optische Dickenmessungen im mittleren Infrarot (MIR) durchzuführen. Dabei bleiben die eigentlichen MIR-Photonen „undetektiert“. Stattdessen werden in einem Interferometeraufbau verschränkte Photonen im nahen Infrarot detektiert. Die NIR Photonen können unkompliziert und kostengünstig mit einem Si-basierten Spektrometer detektiert und daraus die Quanteninterferenzinformation gewonnen werden. Somit

erhält man mit diesen Modulen einen anwenderfreundlichen Zugang zu Spektren und Tiefeninformation im mittleren Infrarot, was zukünftig die Messtechnik und Produktionsüberwachung beispielsweise von Keramikenbauteilen vereinfacht.

4 Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim BMFTR für die Förderung des Projektes QUIN (FKZ 13N15402, 13N15403) und der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD). Weiterer Dank gilt der Firma NELA Brüder Neumeister GmbH für die gute Zusammenarbeit und Tests unter Industriebedingungen.

5 Literatur

- [1] Lemos, G. B., Borish, V., Cole, G. D., Ramelow, S., Lapkiewicz, R., Zeilinger, A. "Quantum imaging with undetected photons," *Nature* 512, 409–412 (2014). <https://doi.org/10.1038/nature13586>
- [2] Vanselow, A., Kaufmann, P., Zorin, I., Heise, B., Chrzanowski, H.M., and Ramelow, S., "Frequency-domain optical coherence tomography with undetected mid-infrared photons," *Optica* 7 (12), pp. 1729-1736 (2020). <https://doi.org/10.1364/OP-TICA.400128>
- [3] Pearce, E., Gemmell, N.R., Flórez, J., Ding, J., Oulton, R.F., Clark, A.S., Phillips, C.C., "Practical quantum imaging with undetected photons," *Optics Continuum* 2 (11), 2770-0208 (2023). <https://doi.org/10.1364/OPTCON.507154>
- [4] Blume, G., Matalla, O., Wenzel, H., Maaßdorf, A., Feise, D., Fricke, J., Ressel, R., Kreuzmann, S., Gino-las, A., Sahn, A., Knigge, A., Paschke, K., "Single mode 660 nm DBR tapered laser with 1 W optical output power," *Proc. of SPIE*, 12402, 1240205 (2023). <https://doi.org/10.1117/12.2647842>
- [5] Blume, G., Feise, D., Sahn, A., Hildenstein, P., Werner, N., Zender, J., Wendt, F., Gewers, F., Pearce, E., Ramelow, S., Paschke, K., "Long wavelength, small quantum interferometer module: shrinking MIR OCT systems via quantum entanglement," *Proc. of SPIE* 13392, 133920V (2025). <https://doi.org/10.1117/12.3044313>