This project has received funding from the Eurostars-2 joint programme with co-funding from the European Union Horizon 2020 research and innovation programme

Schlussbericht zum Vorhaben

„Gigahertz-Doppelkamm-System: Datenerfassung, Auswertung und Systemdemonstration"“

im Rahmen des Eurostars Projekts

E! 1984 GIGACOMB

„Gigahertz-Doppelkamm-Quelle für die Bauelementecharakterisierung und Qualitätskontrolle “

Dr. Jens Kießling

Fraunhofer IPM
Georges-Köhler-Allee 301
79110 Freiburg

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2258C

Projektlaufzeit: 01.11.2022 – 31.12.2024

1. Einführung

Das Projekt GIGACOMB zielte darauf ab, die kommerziellen, industriellen Frequenzkämme der Firma Menhir Photonics für die Doppelkammspektroskopie nutzbar zu machen, und einen Demonstrator für die Qualitätssicherung und Charakterisierung z. B. von Photonisch integrierten Schaltkreisen (PICs) zu entwickeln. Diese Technologie soll die bestehenden Methoden zur Inspektion und Charakterisierung von PICs übertreffen, indem sie eine höhere Präzision und Geschwindigkeit bietet.

Das Projekt wurde von mehreren Partnern durchgeführt: Menhir Photonics hat sich auf die Weiterentwicklung und Anpassung der Frequenzkämme konzentriert, TEM Messtechnik hat die Stabilisierungselektronik entwickelt, um zwei unabhängig laufende Einzelkämmen zu einem nutzbaren Doppelkamm zu stabilisieren, und Fraunhofer IPM hat ein Elektronikmodul zur Datenaufnahme- und Verarbeitung aufgebaut, um Messungen mit einem aufgebauten Demonstrator durchzuführen.

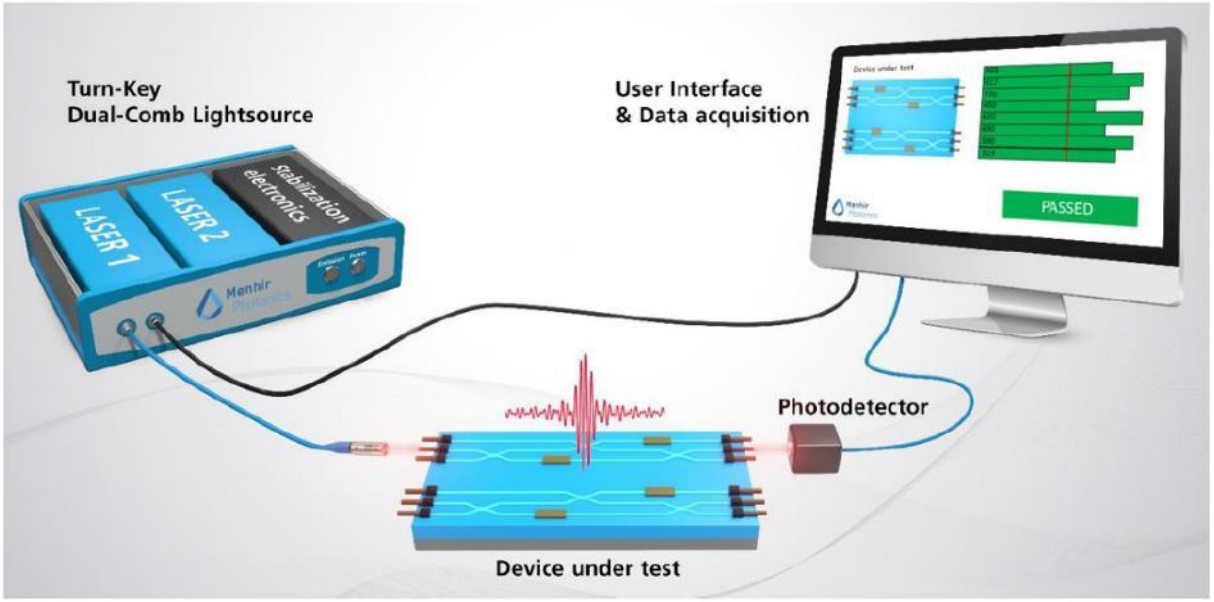

Abbildung 1 Applikationsskizze des GIGACOMB Doppelkammspektrometers

2. Beschreibung der Projektarbeiten

2.1. Konzept der Datenakquisition

Bei einem Doppelfrequenzkamm werden zwei optische Kämme mit leicht unterschiedlichen Repetitionsraten überlagert und gemeinsam auf eine Photodiode geführt. Auf der Photodiode entsteht durch die Interferenz der einzelnen Kammzüge ein zeitlich moduliertes elektrisches Signal, das die Information der optischen Spektren beider Kämme auf den Radiofrequenzbereich abbildet. Typischerweise liegen die zu erwartenden Bandbreiten des entstehenden elektrischen Signals im Bereich von wenigen Megahertz bis hin zu mehreren Hundert Megahertz, abhängig vom Unterschied d_{f_rep} der gewählten Repetitionsraten und der Kammbreite. Im Fall von Gigacomb soll d_{f_rep} im unteren kHz-Bereich liegen, und die von Menhir bereitgestellten Kämme haben typischerweise einige Tausend Kammzinken. Um genügend Erfassungsbandbreite sicherzustellen, wurden Thorlabs PDB770C balancierte Photodetektoren eingesetzt, welche bis zu 400 MHz eingesetzt werden können.

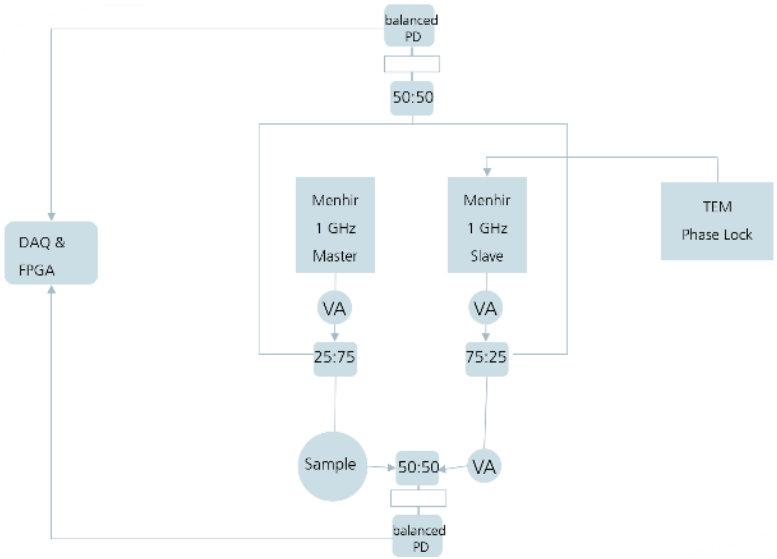

Abbildung 2 Konzept des optischen Teils der Akquisitionshardware

Das zugrundeliegende Optikkonzept ist in Abbildung 2 dargestellt. Die zwei von Menhir bereitgestellten und mit der TEM Stabilisierungsbox aufeinander gelockten Kämme werden über elektronisch variable Abschwächer (Thorlabs V1550PA) auf 75:25 Fasersplitter geleitet. Die 25% Ausgänge werden mit einem 50:50 Fasercombiner überlagert und auf die Referenz-photodiode geleitet.

Die 75 % optische Leistung des ersten Lasers wird über einen elektronisch variablen Abschwächer, und die 75% des zweiten Lasers durch das zu vermessende Objekt über einen zweiten 50:50 Fasercombiner auf die Sample-Photodiode geleitet.

Die Datenerfassung der Photodiodensignale erfolgt über ein PicoTech PicoScope 5444D mit 200 MHz elektronischer Bandbreite und bis zu 1GS/s Aufnahmegeschwindigkeit.

2.2. Aufbau der Hardware

Alle optischen Komponenten sind fasergekoppelt, um maximale Stabilität zu gewährleisten, und wurden auf einer gemeinsamen Trägerplatte montiert (siehe Abbildung 3). Dieser Aufbau wurde zunächst offen betrieben, um Anpassungen vornehmen zu können. Erste Tests fanden in den Laboren des Fraunhofer IPM in Freiburg unter Teilnahme aller Projektpartner statt (siehe Abbildung 4) Dazu wurden zwei unabhängig laufende Frequenzkämme mit 1 GHz Repetitionsfrequenz mit einem Prototypen der TEM Stabilisierung auf ein konstantes d_{f_rep} im kHz-Bereich gelockt und erfolgreich erste Doppelkammspektren aufgezeichnet.

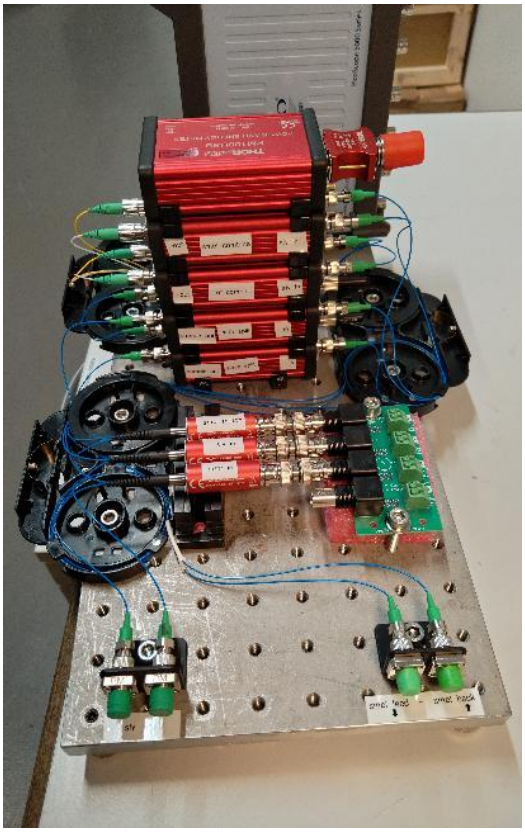

Abbildung 3 Kernstück der Akquisitionshardware mit Strahlteilern und -kombinierern, variablen Abschwächern sowie schnellen Photodioden und Digitalisierungsmodul auf einer gemeinsamen Trägerplatte.

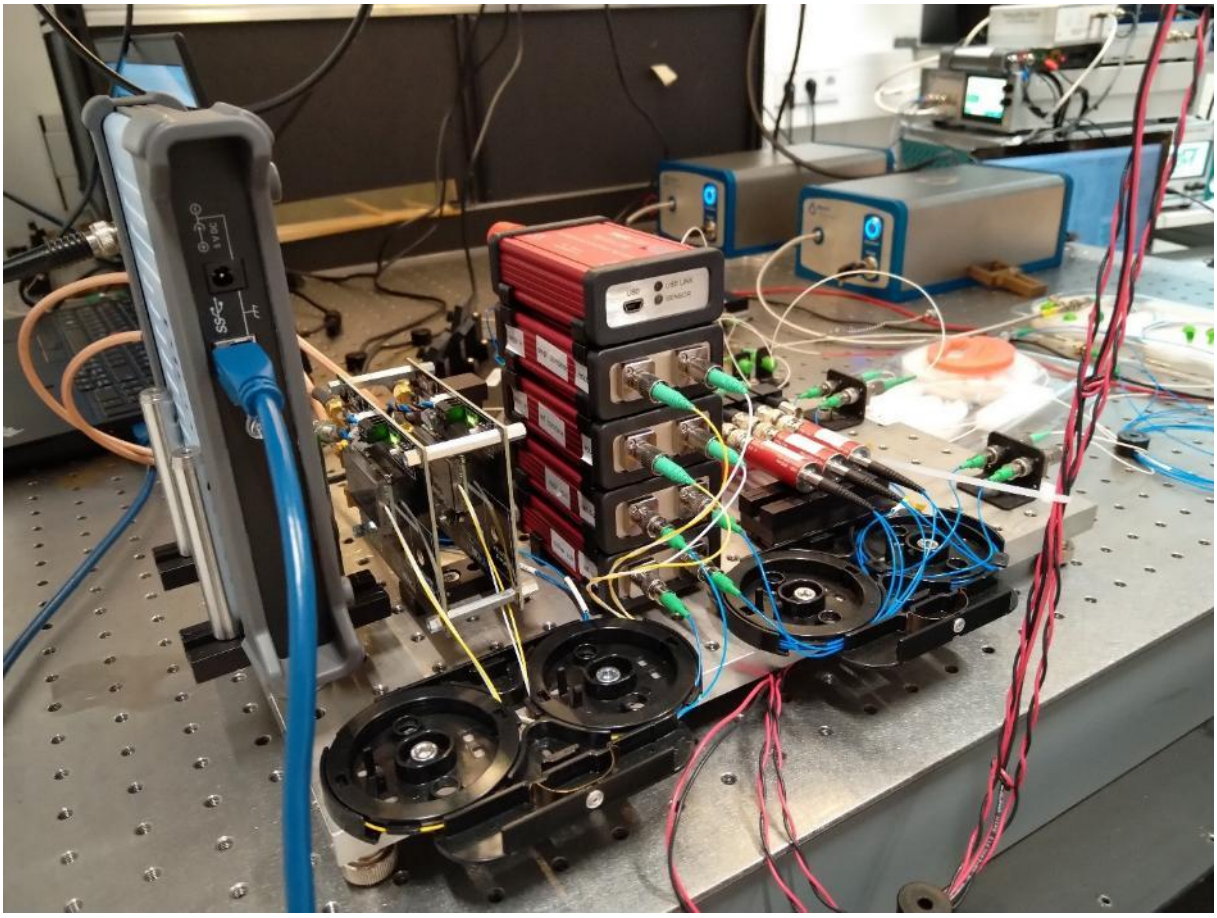

Abbildung 4 Komplettaufbau mit Menhir Frequenzkämmen (Hintergrund), TEM Lockbox-Prototypen (Hintergrund rechts neben dem Tisch) und Datenerfassungsmodul (Vordergrund) in der Erprobungsphase

2.3. Programmierung der Software

Die Aufnahme und Verarbeitung der digitalisierten Interferogramme sollte auf einem PC stattfinden, um maximale Flexibilität zu gewährleisten. Dazu wurde die gesamte Datenprozessierungskette, welche sich an den wissenschaftlichen Arbeiten von Hebert et al. orientiert (1; 2) in der Programmiersprache Python implementiert. Die Benutzerschnittstelle ist eine ebenfalls in Python programmierte GUI (siehe Abbildung 5). Zur Kontrolle der Prozessierung lassen sich neben dem Doppelkammspektrum als Endergebnis auch alle Zwischenschritte der Berechnung graphisch darstellen. Dies wird im folgenden beschrieben.

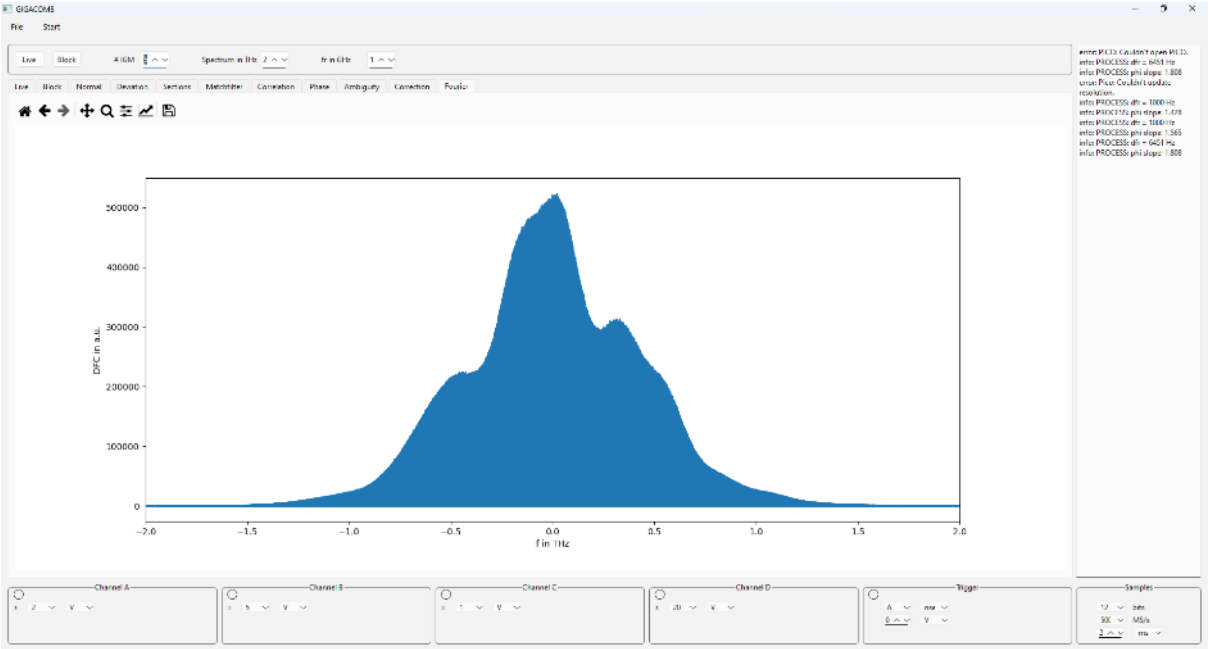

Abbildung 5 Im Projekt entstandene graphische Benutzeroberfläche zur Aufnahme von Doppelkamm-Messungen

Das Programm erlaubt zunächst die Konfiguration der Datenaufnahme hinsichtlich Messzeit, Bittiefe und Samplingrate für bis zu vier Kanäle. Aktuell können bis zu zwei Kanäle, nämlich der Referenzkanal ohne Probe, sowie der eigentliche Messkanal aufgenommen werden. In den Grafiken ist zur Vereinfachung nur der Messkanal dargestellt.

Die aufgenommenen Rohdaten werden zunächst zur Kontrolle dargestellt (Abbildung 6). Hier erkennt man den von der Photodiode aufenommenen, zeitlichen Pulszug der Interferogramme, welche durch die Interferenz des Doppelkamms entstehen. Im dargestellten Beispiel ist die Messung 50 ms lang und beinhaltet etwas über 300 Pulse, da die Differenz der Repetitionsraten der beiden Frequenzkämme auf d_{f_rep} = 6,451 kHz eingestellt war.

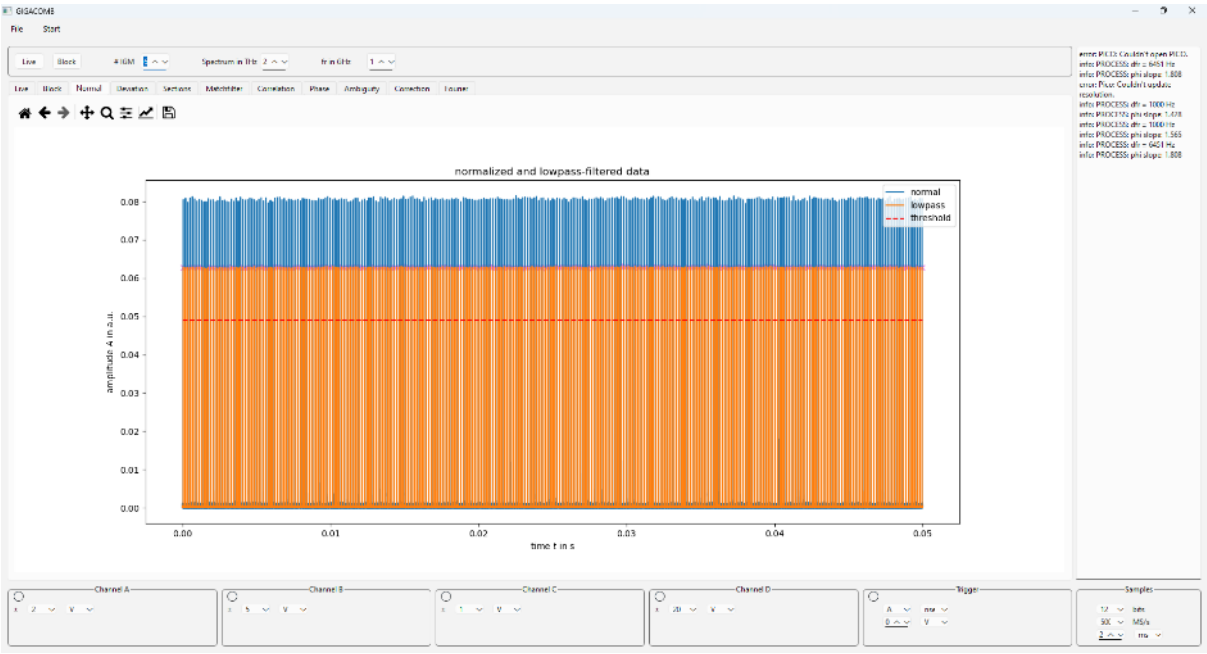

Abbildung 6 Aufgenommenes Rohsignal einer Doppelkamm-Messung über 50ms mit vielen Bursts, sie sich mit der Repetitionsfrequenz d_{f_rep} = 6,451 kHz wiederholen

Zur Verdeutlichung, wie ein Rohsignal aussieht, zeigt Abbildung 7 den zeitlichen Zoom in einen Puls. Das komplette Intensitätsspektrum des Frequenzkamms ist in jedem dieser Pulse komplett enthalten und kann durch Fouriertransformation daraus ermittelt werden, allerdings sind die Zahl der innerhalb eines Pulses aufnehmbaren Punkte und das Messrauschen zu hoch, um das Frequenzspektrum daraus mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Aus diesem Grund muss jeweils ein ganzer Pulszug aufgenommen und es reicht nicht nur ein Puls. Da während der Messung auftretende Fluktuationen die Phasenlage und Intensität aufeinanderfolgender Pulse beeinflussen, kann nicht einfach der gesamte Pulszug gemeinsam Fouriertransformiert werden. Stattdessen wird ein komplexer Algorithmus, welcher die einzelnen Pulse separiert, eine Phasen- und Intensitätskorrektur anwendet, die Pulse kohärent addiert und mittelt und die finale Fouriertransformation ausführt, angewendet (1; 2).

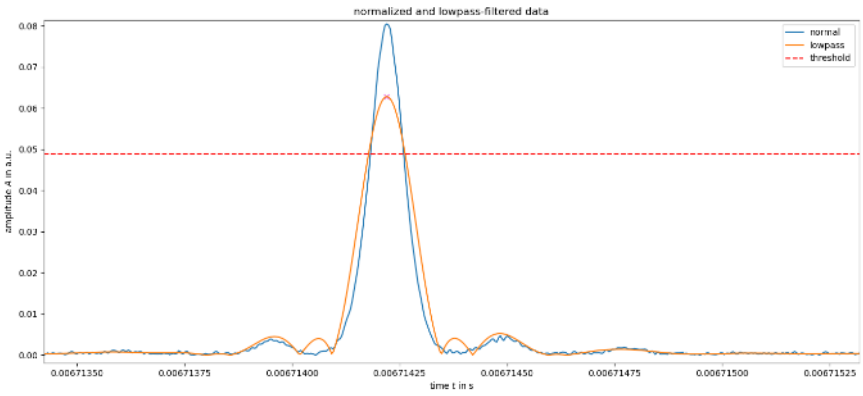

Abbildung 7 Zoom in einen Burst, inkl. tiefpassgefilterten Daten zur exakten Peak-Positionsbestimmung

Nachdem die Maxima aller Pulse automatisch bestimmt wurden, lässt sich die Repetitionsrate d_{f_rep} aus der Messung bestimmen, sowie die zeitliche Abweichung der einzelnen Pulse (siehe Abbildung 8) berechnen und korrigieren.

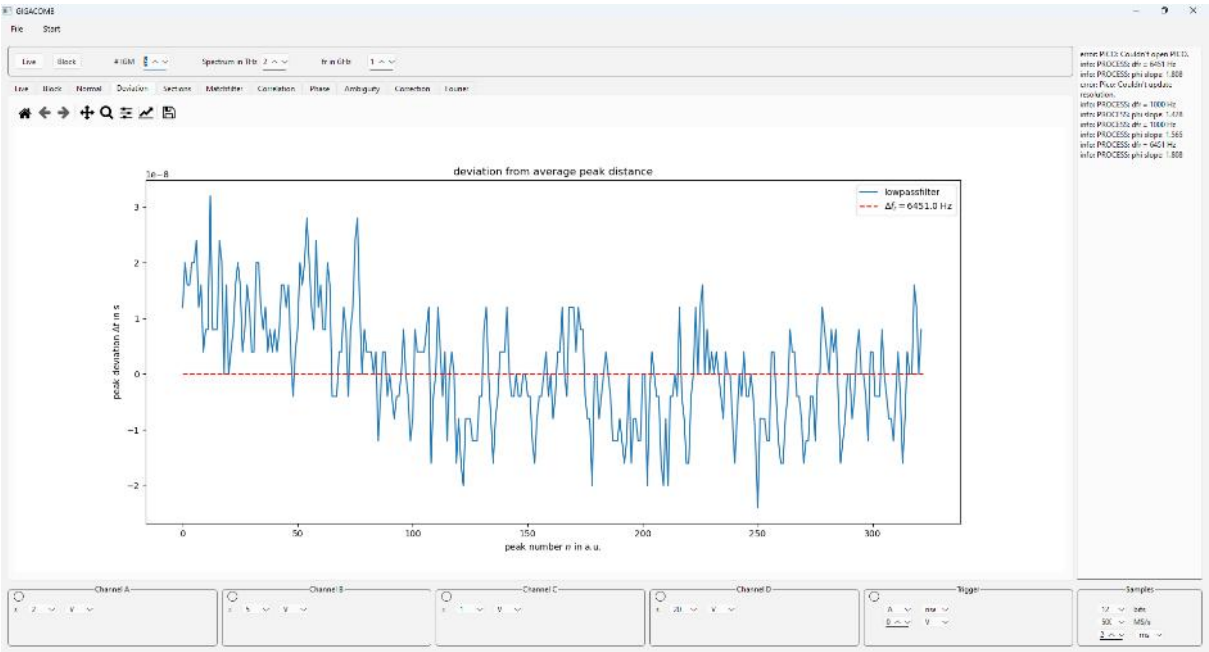

Abbildung 8 Bestimmung der Peakpositionen und ihrer Abweichung von der theoretischen Position in der gesamten Messung

Im nächsten Schritt wird jeder Puls in Real- und Imaginärteil zerlegt und über einen Fit eine Phasenkorrektur angewendet welche dazu führt, dass jeder Puls der Messung möglichst ähnlich zum ersten Puls der Messung wird.

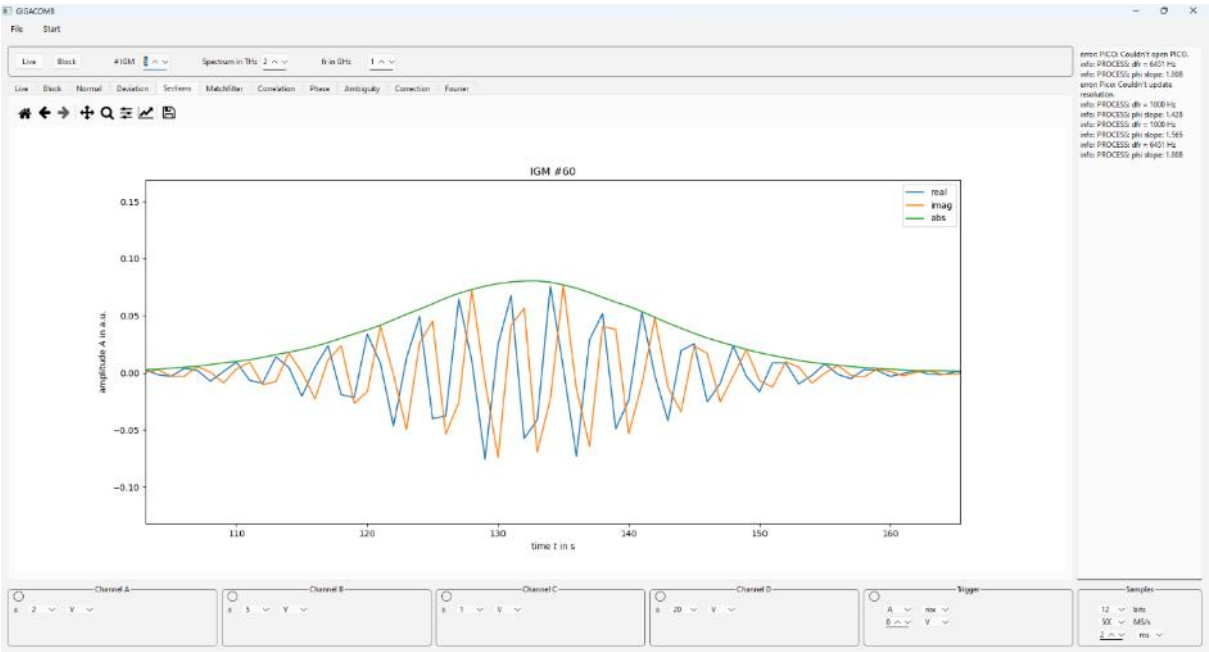

Abbildung 9 Beispielhafter Real- und Imaginärteil sowie Einhüllende eines einzelnen Pulses vor der kohärenten Mittelung

Nach erfolgter zeitlicher Überlagerung sowie Phasenkorrektur werden die Pulse kohärent addiert und eine Fouriertransformation (FFT) durchgeführt, welche direkt das Radiofrequenz-Kammspektrum liefert. Durch Umskalierung der Frequenzachse mit der bekannten Repetitionsfrequenz der

Frequenzkämme erhält man direkt das optische Kammspektrum (siehe Abbildung 10) mit einer Bandbreite von über 15 nm (2 THz) um 1550 nm.

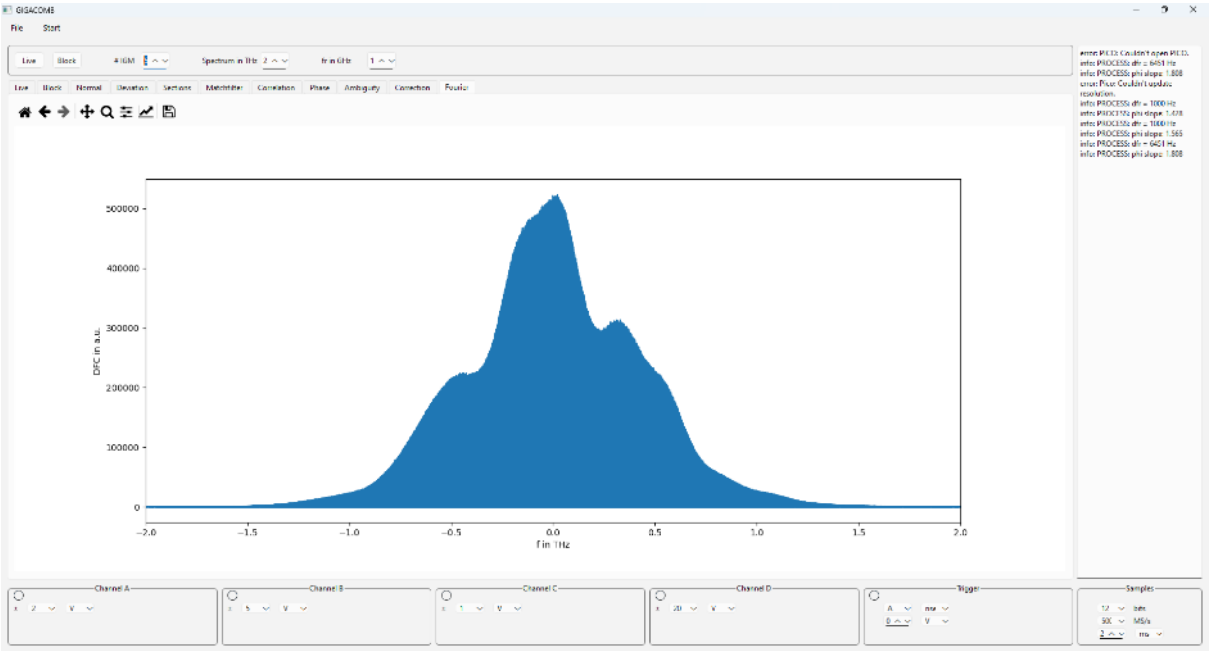

Abbildung 10 Doppelkammspektrum aus einer 50 ms Messung.Die komplette blau ausgefüllte Fläche besteht aus Kammzinken, die sich über mehr als 2 THz (15 nm) optische Bandbreite verteilen.

Zur Verdeutlichung der erreichbaren Auflösung zeigt Abbildung 11 einen Zoom in das Doppelkammspektrum aus Abbildung 10. So werden die einzelnen Kammzinken mit 1 GHz Abstand erkennbar, d. H. das spektrale Verhalten einer Probe kann über den gesamten Messbereich mit einer Auflösung von 1 GHz oder 8 pm abgetastet werden.

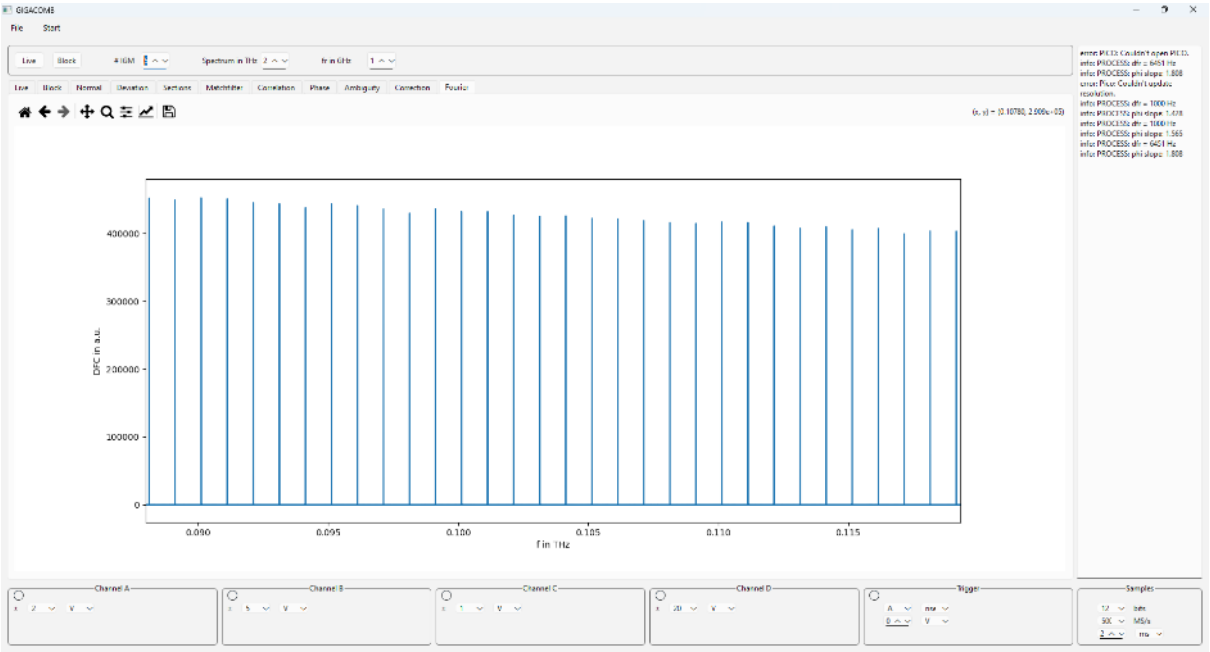

Abbildung 11 Zoom in das Doppelkammspektrum, sodass die einzelnen Kammlinien im Abstand von 1 GHz erkennbar sind.

Die gesamte Prozesskette benötigt je nach gewünschter Messzeit etwa 10 Sekunden auf einem normalen Laptop. Durch Einsatz einer leistungsstärkeren CPU kann die gesamte Datenerfassungs- und -prozessierungszeit auf unter 1s gebracht werden, sodass die Auswertung in Echtzeit

durchgeführt werden kann. Weitere Optimierungsmöglichkeiten (effizientere Programmierung, GPU oder FPGA Prozessierung) versprechen potentiell auch deutlich kürzere Messzeiten.

3. Demonstrator und Funktionstest

Nach Verifizierung der Optikeinheit wurde ein Rack-Gehäuse mit Frontplatte zum Bau des Systemdemonstrators designt. Neben einer Stromanschluss auf der Rückseite sind ein USB-Anschluss auf der Vorderseite zur Verbindung mit dem Steuerrechner sowie zwei Fasereingänge für die Frequenzkämme und Faseranschlüsse für das Testobjekt vorhanden. Abbildung 12 zeigt das Komplettsystem mit den jeweils von Menhir, TEM und IPM entwickelten Modulen bei der finalen Testmessung.

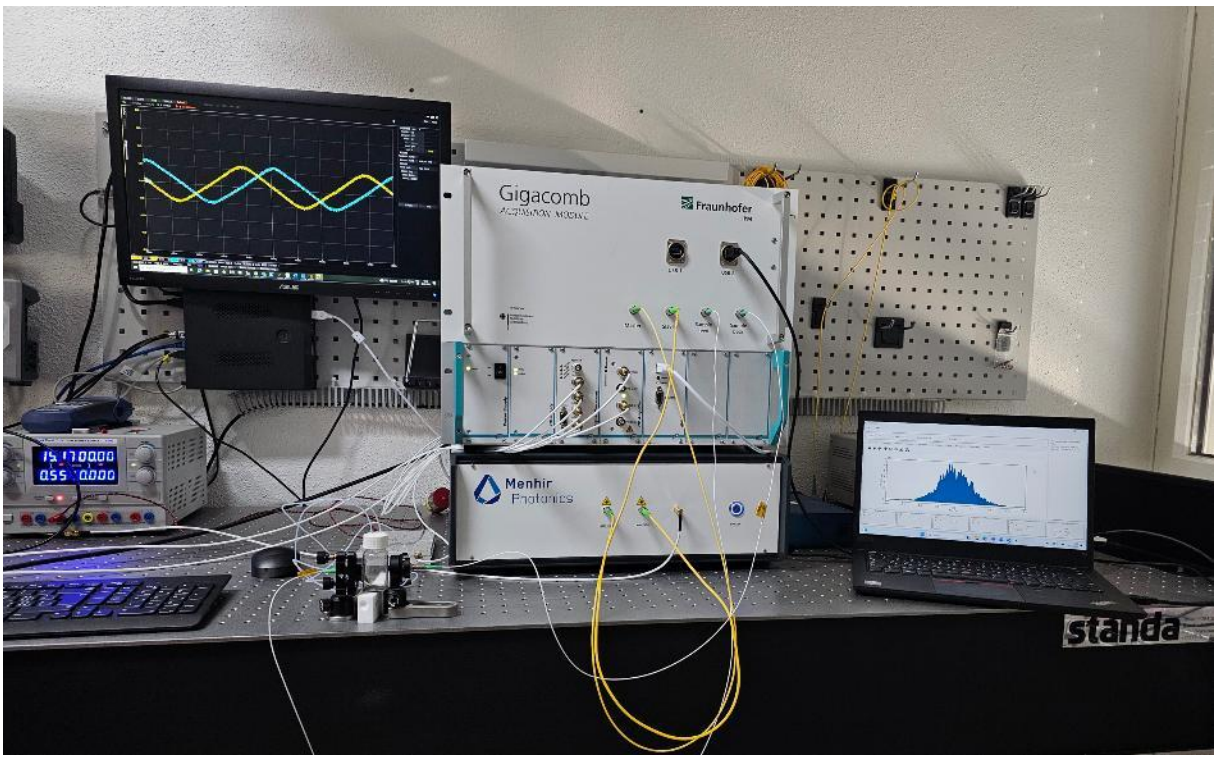

Abbildung 12 Komplettes Demonstrationssystem bestehend aus drei Modulen: Doppel-Frequenzkamm (unten, Menhir), Stabilisationselektronik (mittig, TEM) sowie Datenakquisitionseinheit (oben, IPM) im Betrieb in den Menhir-Laboren in Zürich

Als Testobjekt wurde beispielsweise eine HCN-Zelle in den Strahlengang eingebracht, welche Absorptionsfeatures um 1550 nm aufweist. Abbildung 13 zeigt das Doppelkammspektrum nach Transmission durch die Zelle mit eindeutig erkennbaren Absorptionslinien.

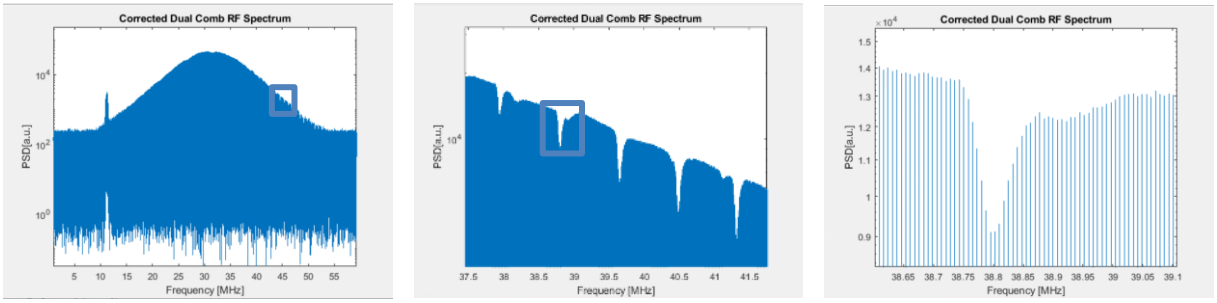

Abbildung 13 Doppelkammspektrum nach Transmission durch eine HCN Zelle

4. Bewertung im Sinne des Abschlussberichts

Das Hauptziel des Gesamtprojekts war die Demonstration der Möglichkeit, kommerzielle und vergleichsweise günstige, industrielle fs-Laser bzw. Frequenzkämme als Doppelkammsysteme zu stabilisieren, und hochauflösende optische Spektren aufnehmen zu können.

Die Bearbeitung des Projektes durch Fraunhofer IPM erfolgte im Umfang der zur Verfügung gestellten Fördermittel. Eine zeitliche Verzögerung durch zusätzlich notwendig gewordene Iterationen in der Laserentwicklung bei Menhir konnte durch kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit durch die Fördergeber erfolgreich abgefangen werden. Der Aufwand bei Fraunhofer IPM begründete sich hauptsächlich durch den für die Entwicklungen erforderlichen Aufwand an Personalmitteln. Sachaufwendungen für die Komponenten der Datenerfassungseinheit bewegten sich im durch die beantragten Mengengerüst gesetzten Rahmen.

Die durchgeführten Arbeiten erfolgten, wie oben dargelegt, lückenlos innerhalb der Notwendigkeit des Projektes. Durch die enge Vernetzung mit den Projektpartnern und die fundierte Planung der Arbeiten in der Konzeptionsphase konnten die Entwicklungszweige effizient parallel bearbeitet und zusammengeführt werden. Die Demonstration einer hochauflösenden (1 GHz) Messung im Telekom C-Band mit einer Messzeit von 50 ms und einer Rechenzeit im Sekundenbereich wurde erfolgreich durchgeführt, wobei die Messzeit durch zukünftige Weiterentwicklung noch deutlich reduziert werden kann.

Im Nachgang des Projekts soll der Demonstrator weiter eingesetzt werden, um weitere Anwendungsfelder zu erschließen und photonische Schaltkreise zu vermessen. Eine separate Veröffentlich durch Fraunhofer IPM ist derzeit nicht geplant, soll aber nach Durchführung weiterer Demonstrationsmessungen unter Beteiligung der drei Konsortiumspartner erfolgen.

5. Literaturverzeichnis

1. *Self-corrected chip-based dual-comb spectrometer.* **Hebert, N. B., Genest, J., Deschenes, J. D., Bergeron, H., Chen, G. Y., Khurmi, C., & Lancaster, D. G.** 2017, Optics Express, Vol. 25(7), pp. 8168-8179.

2. *Self-Correction Limits in Dual-Comb Interferometry.* **Hebert, N. B., Michaud-Belleau, V., Deschenes, J. D., & Genest, J.** 2019, Journal of Quantum Electronics, Bd. 55(4), S. 1-11.