

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Schlussbericht

Verbund: 05A2020 - 3G-GWD

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Projektleitung: Prof. Dr. Stefan Funk  
E-Mail: s.funk@fau.de  
Förderkennzeichen: 05A20WE3  
Förderzeitraum: 01.07.2020 - 31.03.2024  
Zuwendung: 423.077,18 €  
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:  
Zusätzlicher Name:

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	Universum Generation		Gravitationswellendetektor der 3.
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	1		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	0		
Andere Veröffentlichungen:	0		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	0		
Masterarbeiten:	1		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 25.09.2024 15:42 für eine Veröffentlichung freigegeben.

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Projektleitung:	Prof. Dr. Stefan Funk
Verbund:	05A2020 - 3G-GWD: Gravitationswellen-Teleskop der dritten Generation. Teilprojekt 2
Thema:	Detektoren für Gravitationswellen

## Zusammenfassung

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu den Technologien für die dritte Generation der Gravitationswellendetektoren haben im Laufe des Verbundprojekts „3G-GWD: Gravitationswellen-Teleskop der dritten Generation“ große Fortschritte gemacht. Die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) konnte als Partner in diesem Verbundprojekt wichtige, sichtbare Beiträge mit dem von ihr durchgeführten Teilprojekt machen. Die folgenden Ergebnisse wurden erreicht:

- **Teilprojekt 2 (High Performance Phase Camera)**  
Im Rahmen der Projektlaufzeit konnte eine Phasenkamera, basierend auf eines 64-Kanal Glasfaserbündelarrays in Verbindungen mit individuellen Photodioden und einer Digitalisierungselektronik entworfen, aufgebaut und vermessen. Dazu wurde ein Optisches Setup installiert, das die Phasensignale, wie sie im tatsächlichen Interferometer erwartet werden, erzeugt. Bei einer Laserleistung von 10 mW können wir eine Phasenauflösung von mindestens 0,03 Rad bei einer Integrationszeit von 8  $\mu$ s erreichen. Die Ortsauflösung beträgt dabei 127  $\mu$ m, in 1D-Anordnung (linear) und in 2D-Anordnung (8x8). Im Rahmen der nächsten Förderperiode wird die Kamera sowie die dazugehörigen Analysemethoden weiterentwickelt um die Einsetzbarkeit am Einstein-Teleskop (ET) zu erreichen. Anders als die Phasenkameras der existierenden Gravitationswellendetektoren ist unsere Kamera für den Einsatz bei 1550 nm geeignet.

Im Laufe des Verbundprojekts konnte die Voraussetzungen geschaffen werden, um die Ergebnisse auf internationaler Ebene mit den Aktivitäten in anderen Ländern zusammenzuführen. In 2021 wurde das Einstein-Teleskop als europäisches Projekt der dritten Generation auf die ESFRI Roadmap aufgenommen. Im Juni 2022 wurde dann die ET-Kollaboration formal gegründet, die nun den organisatorischen Rahmen für die F&E-Arbeiten stellt und die Kooperation mit anderen internationalen Projekten koordiniert.

# Bericht

## 1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Ziel des Teilprojektes war die Entwicklung und der Bau einer Phasenkamera für einen Gravitationswellendetektor der dritten Generation. Das Konzept sollte auf den Erfahrungen existierender Projekte aufbauen und die Nachteile dieser kompensieren, sowie für den Einsatz einer neuen, bisher in Gravitationswellendetektoren nicht verwendeten Laserwellenlänge geeignet sein.

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP) an der FAU war vor der Förderperiode nicht an der Entwicklung Gravitationswellendetektor beteiligt, verfügt jedoch über eine weite Expertise an schneller Ausleseelektronik, speziell in Verbindung mit Photosensoren. Selbstverständlich konnte auf Entwicklungen im Bereich der Phasenkameras die für laufende Gravitationswellendetektoren LIGO und VIRGO zurückgegriffen werden.

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Aufgrund der Corona-Pandemie konnten die Arbeiten nicht zu Beginn der Projektlaufzeit aufgenommen werden. Durch die genehmigte Verlängerung konnten dennoch die meisten Arbeiten beendet werden oder stehen kurz vor ihrem Abschluss.

Die Arbeiten wurden von Beginn an eng in die Entwicklungen für das Einstein-Teleskop integriert. Die FAU ist inzwischen Teil der ETpathfinder Kollaboration. Ein detaillierter Austausch findet mit den Arbeitsgruppen statt, die ebenfalls an der Entwicklung von Phasenkameras beteiligt sind und für andere Detektoren entwickelt haben.

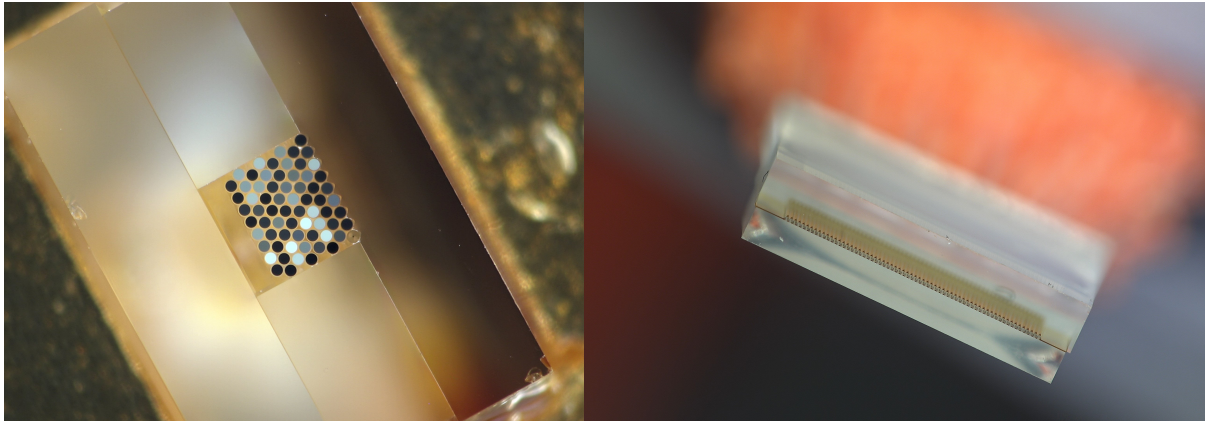
## 4 Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)

Da Aufgrund der Corona-Pandemie nicht rechtzeitig entsprechendes Personal gefunden werden konnte, konnten dank der Verlängerung des Projektzeitraumes 210.922,53 € von zu Verfügung stehenden 216.604,32 € ausgegeben. Ebenfalls fand nur eine reduzierte Reisetätigkeit da. Die Investitionsmittel konnten weitgehendst antragsgemäß ausgegeben werden. Statt dem APD-Array wurden Fiber-Arrays sowie einzelne Photodioden gekauft, die Fiber-Arrays wurden aus Eigenmitteln beschafft. Daher wurden auf den entsprechenden Positionen 1 und 2 lediglich 425,84 € anstelle von geplanten 21.800 € ausgegeben. Die größte Position 5 (Digitizer), wurde trotz Preiserhöhung des Herstellers nur leicht überschritten, hier wurden 78.688,05 € anstelle der geplanten 67.000 € benötigt. Für die Position 4 (Laser) wurde ein anderes, geeigneteres Gerät angeschafft. Zusätzlich mussten mehrere Instrumente zur Laserstrahl Charakterisierung beschafft werden. Daher erhöhten sich die Ausgaben auf dieser Position von geplanten 9.500 € zu 24.445,72 €. Bei den Geräten zur Phasen- und Frequenzmodulation sowie deren Zubehör (5,6 und 7) wurden 8706,14 € anstelle der geplanten 7.620 € ausgegeben. Anstelle von 6.000 € wurde für optische Komponenten (8) insgesamt 12.701,56 € investiert. Zum testen der Kamera wurde einen komplexeres optisches Setup als ursprünglich geplant benötigt. Aufgrund von Preissteigerungen kam es für das FPGA Board

(9) sowie das ADC Evaluationsboard (10) erheblichen Mehrkosten, 5.100,32 € bei geplanten 4.200 €, 3820,83 € bei geplanten 1.880 €. Insgesamt wurden 133.888,46 € bei geplanten 118.000 € Investmitteln > 410 € verbraucht.

## 5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Als Vereinfachung werden die vereinbarten Arbeitspakete aus dem GW Verbundforschungsantrag chronologisch abgearbeitet:



**Abbildung 1** Beide beschaffenen Glasfaserbündelarrays; Links: das 2D Array in 8 x 8 Konfiguration von von Meisu Optics. Rechts: das 1D Array von SQS VláknoVá optika a.s.. Beides sind Glasfaser in Multimode Gestaltung mit einem Kerndurchmesser von 105  $\mu\text{m}$  und einem Mantel von 125  $\mu\text{m}$ . Der Abstand zwischen diesen ist 127  $\mu\text{m}$  und jede davon ist mit einem FC/PC Stecker abgeschlossen um beliebige Dioden an diesen zu testen.

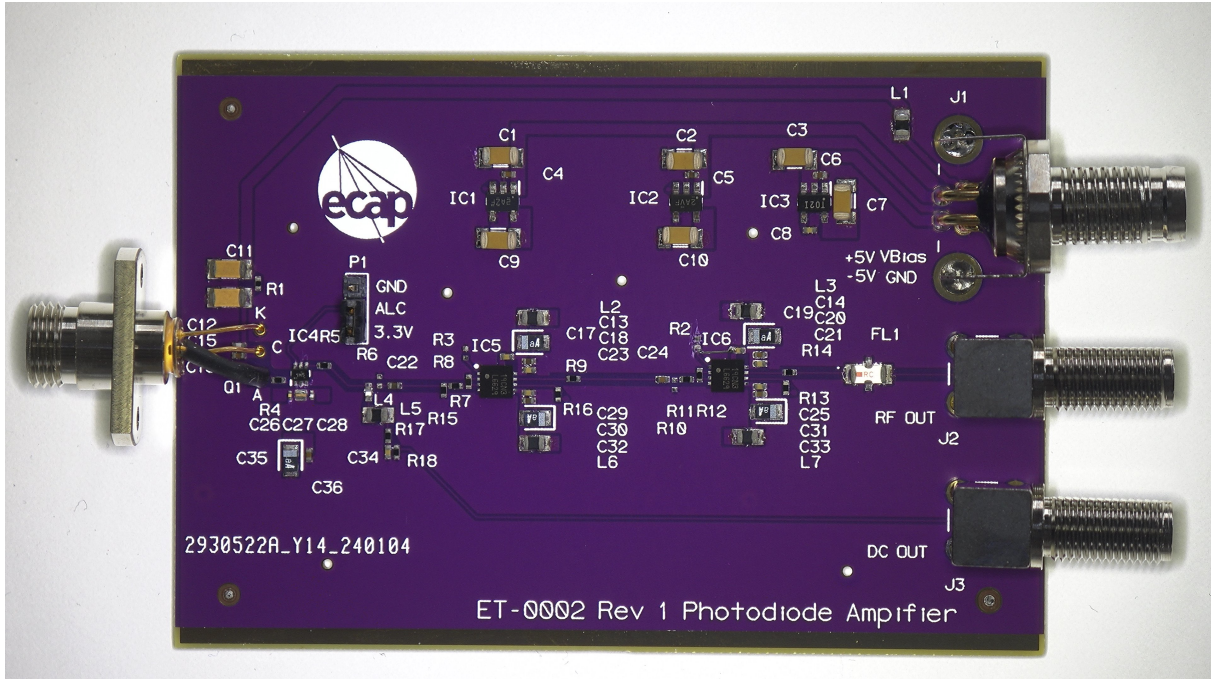
### Design des Photodiodenarrays und dessen Verstärkerboard

Anstelle des ursprünglich angedachten OTRON IGA128-APD Arrays wurden zwei Glasfaserbündelarrays beschafft. Der große Nachteil an APD-Arrays ist deren starkes Übersprechen im Radiofrequenzbereich, in dem sich die zu Messenden Phasensignale befinden. Zusätzlich dazu hat eine Markterkundung ergeben, dass große 2D Arrays industriell nicht nachgefragt sind und daher kostspielig wären, beziehungsweise nicht herstellbar sind. Um eine zukunftsfähige Phasenkamera mit nahezu beliebiger Größe entwickeln zu können, sind wir daher auf Glasfaserbündelarrays mit Einzeldioden umgestiegen, welche sich beliebig erweitern lassen und kein Übersprechen im Radiobereich haben. Um ein 2D Bilder zu charakterisieren wurde ein 8 x 8 Array beschafft. Ein 1D 1 x 64 Array wurde zugleich beschafft um die Wellenfront spatial genauer zu vermessen können und um eine 1D Kamera zu entwickeln, welche mithilfe eines beweglichen Spiegels, der den Laser über die Kamera scannt, 2D Bilder generieren kann. Beide sind in Abbildung 1 zu sehen.

Beide Arrays bestehen aus speziellen Multimode Fasern (105  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser) um so viel Licht wie möglich aufzufangen. Vermessen wird die Intensität mit einer für Infrarot-Licht optimierten FCI-InGaAs-120-FC Photodiode welche mit einem FC/PC Anschluss mit der Faser gekoppelt ist.

Um das Signal der Photodiode auszulesen wurde ein Verstärkerboard entwickelt, das den Anforderungen unserer Phasenkamera gerecht wird. Ziel waren eine Bandbreite von ca. 250 MHz (um alle Seitenbänder des Einstein Teleskops parallel zu vermessen zu können) bei einer Verstärkung von mindestens 100.000 (da die Intensitäten der Seitenbänder 60dB ge-

ringer sind als das Hauptband sind) mit dem kleinst möglichen Rauschen zu erreichen. Über mehrere Iterationen war das ET-0002 Board das Endergebnis (siehe Abbildung 2). Beginnend mit der Photodiode wird der zu messende Strom über einen Transimpedanzverstärker (LMH33440) verstärkt und in eine Spannung gewandelt. Eine Frequenzweiche teilt das Signal in das zu analysierende Phasensignal und ein Gleichstromsignal um die Intensität des Lasers zu überwachen. Im Phasensignalpfad folgen dann noch zwei auf dem LMH6629 Operationsverstärker basierende invertierende Verstärker und ein 250 MHz Antialiasing-Filter.



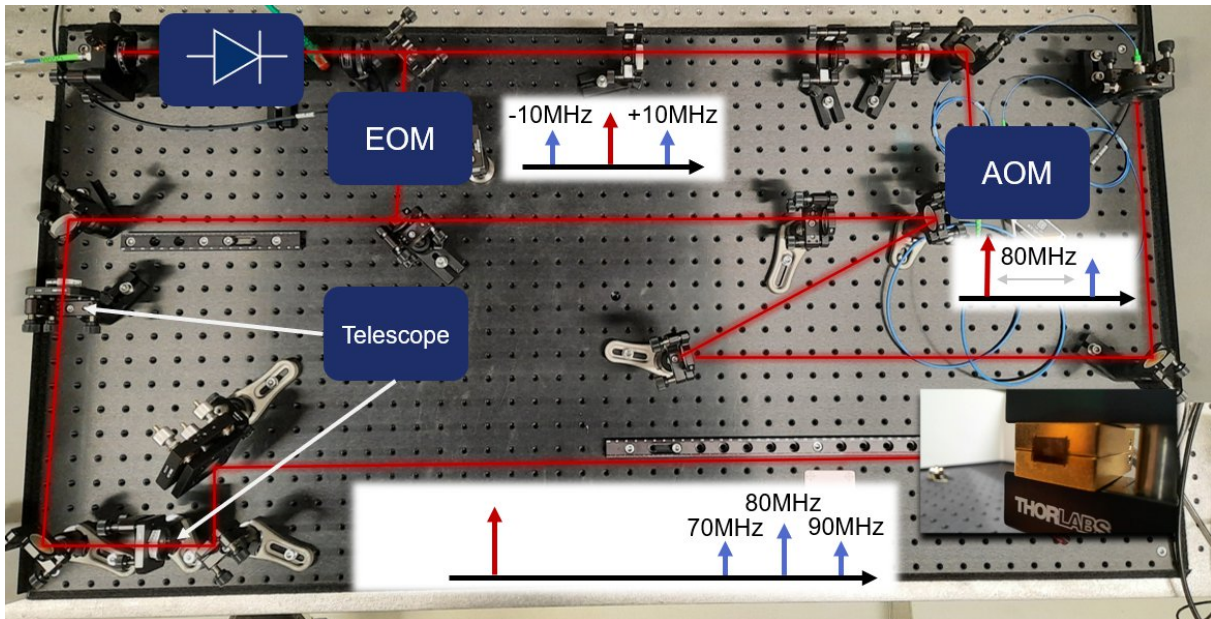
**Abbildung 2** Das ET-0002 Verstärker Board. Links im Bild die Photodiode welche an die Faser angeschlossen wird. Rechts im Bild die nötigen Anschlüsse, von oben nach unten: Die Spannungsversorgung, der Ausgang des Phasensignals, Ausgang des Gleichstromsignals

### Charakterisierung des Sampling- und Digitalisierungsmoduls

Der Digitalisierer besteht aus insgesamt 6 intern miteinander synchronisierten Spectrum Instrumentation M4i.4451-x8 4-Kanal PCIe-Digitalisierungskarten (500 MSamples/s, 14-Bit), die in eine Workstation eingebaut sind. Um die Digitalisierungskarten ordnungsgemäß zu benutzen, wurde eine Software geschrieben, welche die Attribute der Karte wie dynamische Spannungsbereich, Eingangsimpedanz etc. koordiniert und protokolliert. Für die Datennahme wurden zwei Aufnahmeverfahren entwickelt, eine kontinuierliche und eine, die nach einem Triggersignal eine gewisse Anzahl von Samples aufnimmt (Burst-Mode). Es konnte sichergestellt werden, dass die benutzten Spektrum Karten die nötige Datenraten besitzen um kontinuierlich auf 500 MSamples/s für 2 Sekunden aufzunehmen. Das Grundrauschen ist um 100  $\mu\text{V}$  höher als vom Hersteller angegeben beeinträchtigt aber nicht den Betrieb der Phasenkamera.

Zusätzlich wurde noch auf der Basis des Arduino Duos eine Digitalisierungsbox mit 24 Kanälen entwickelt welche das Signals des Gleichstromausganges des Verstärkerboards digitalisiert. Diese digitalisiert auf der Basis einer gestellten Digitalisierungsfrequenz mit beliebiger Frequenz kleiner gleich 10 kHz. Diese ist mit dem Gleichstromausgang der ET-0002 Verstärker verbunden.

## Optisches Setup und Charakterisierung des Lasers und der optischen Komponenten



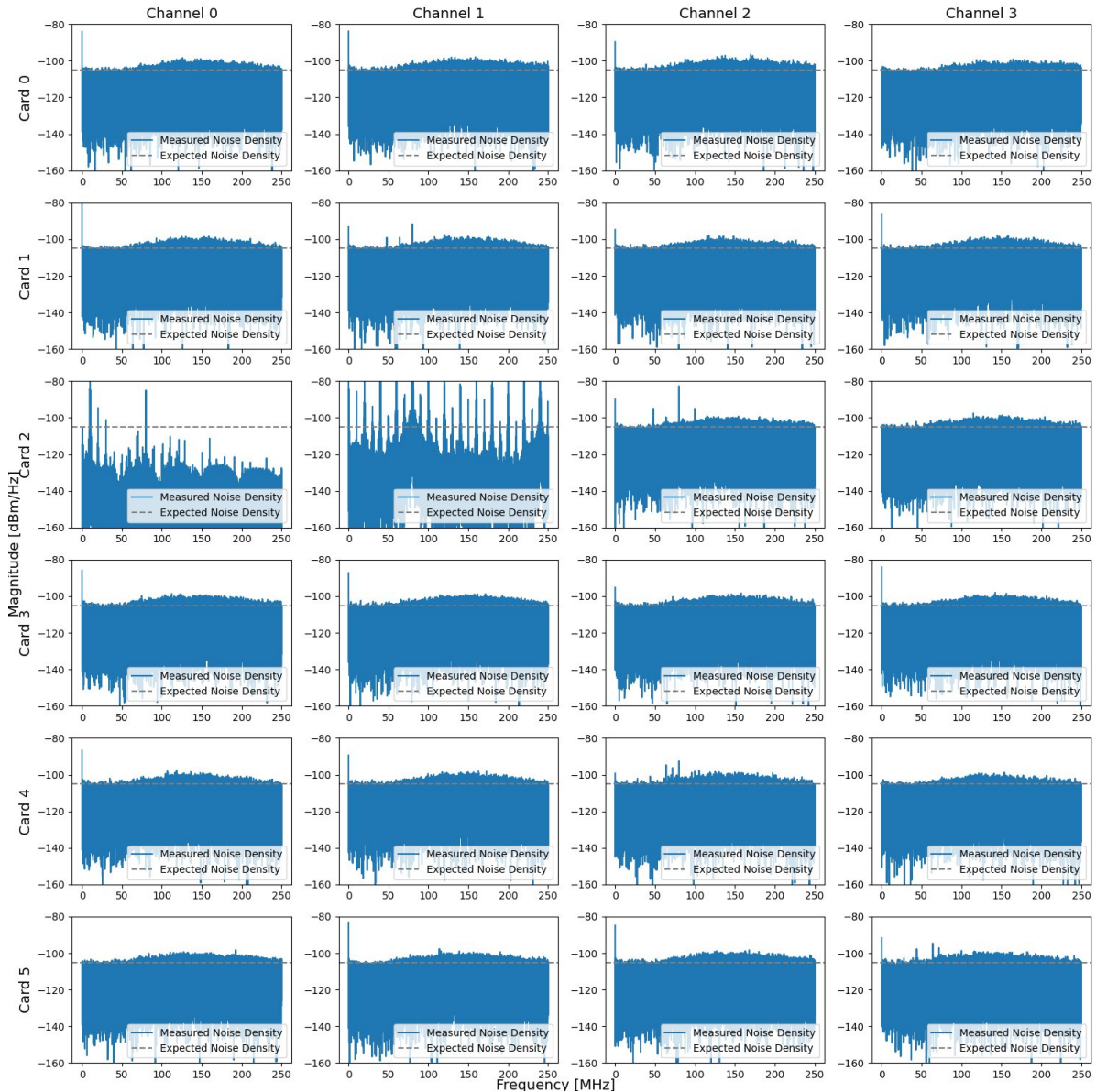
**Abbildung 3** Optisches Setup um die Phasenkamera zu vermessen. Alle wichtigen Komponenten wurden markiert und werden im Text erklärt. Streng genommen ist der Referenzpfad mit dem AOM (Akustooptischer Modulator) teil der Phasenkamera, da sich sonst die oberen Seitenbändern nicht von den unteren unterscheiden lassen würden.

Für die Charakterisierung der Phasenkamera benötigt es einen optischen Aufbau (siehe Abbildung 3) der ein Beispielsignal generieren kann. Hierfür wurde ein Fasergekoppelter Schmalband Laser bei 1550 nm und mit einstellbarer Leistung von 10 mW bis 200 mW (Connet Laser Technologies CoSF-D-ER-B-LP, Linienbreite ca. 1kHz) gekauft. Der Ausgangslaser wird kollimiert, um einen parallelen Strahl zu gewährleisten. Um den Laser vor schädlichen Reflexionen zu schützen, wurde eine optische Diode verbaut. Danach wird der Laser mittels eines Strahlteilers in einen Signalpfad und einen Referenzpfad, welcher Teil der Phasenkamera ist, gespalten. Mittels eines elektrooptischen Modulators werden die Seitenbänder auf den Laser im Signalpfad auf moduliert. Im Referenzpfad wird dagegen die Frequenz des Lasers mit Hilfe eines Faser gekoppelten akustooptischen Modulators um 80 MHz verschoben. Um möglichst effizient in dieses zu koppeln musste ein geeignetes Linsen Setup gefunden werden. Danach werden beide Pfade wieder mit einem Strahlteiler vereint. Das Ergebnis lässt sich nun mit der Phasenkamera vermessen. Die Frequenzverschiebung im Referenzpfad dient dazu, um zwischen den oberen und unteren Seitenband unterscheiden zu können, da plus und minus 10Mhz sonst das gleiche Signal generieren würden. Um möglichst flexibel zu sein, wurde noch ein Teleskop entwickelt, um beliebige Strahlgrößen zu ermöglichen, um beide Glasfaserbündelarrays effektiv vermessen zu können.

## Charakterisierung des Photodiodenarrays und dessen Verstärkerboard

Für das Verstärkerboard wurde als Teil des Designs das Grundrauschen abgeschätzt. Dieses ist strenggenommen frequenzabhängig, wurde aber für die Abschätzung als konstant über alle Frequenzen angenommen und beträgt -107 dBm/Hz. Hauptanteil davon trägt der Trans-

impedanzverstärker LMH33440, dessen Eingangsruschen durch den hohen Verstärkungsfaktor von 92 dB bedingt ist. Zusätzlich hierzu addiert sich noch das thermische Rauschen des Rückkopplungswiderstandes, welches sich nicht minimieren lässt. Da für die Messung des Grundrauschens kein Signal auf dem Kanal liegen darf, wurde in dieser Rechnung das Schrotrauschen der Photodiode, welche von der Leistung des detektierten Lichts abhängt, nicht berücksichtigt. Für den Betrieb bei 10 mW wäre jenes jedoch um eine Größenordnung kleiner als das des Transimpedanzverstärkers.



**Abbildung 4 Grundrauschen der 22 Verstärkerboards die für den aktuellen Stand der Phasenkamera benutzt werden. Die Abschätzung deckt sich mit dem gemessenen Grundrauschen. Die Kanäle 0 und 1 von Karte 2 sind getrennt zu betrachten, da hier kein Verstärkerboard angeschlossen ist sondern jeweils ein Funktionsgenerator die die Signale auf den Laserstrahl modulieren.**

Die Messung des Grundrauschens für 22 der gebauten Verstärkerboards ist in Abbildung 4 zu sehen. Zwei der Kanäle der Digitalisierungskarte (Karte 2, Kanal 0 und 1) werden zum Überwachen des AOMs und EOMs benutzt, weswegen diese ein anderes Rauschspektrum haben

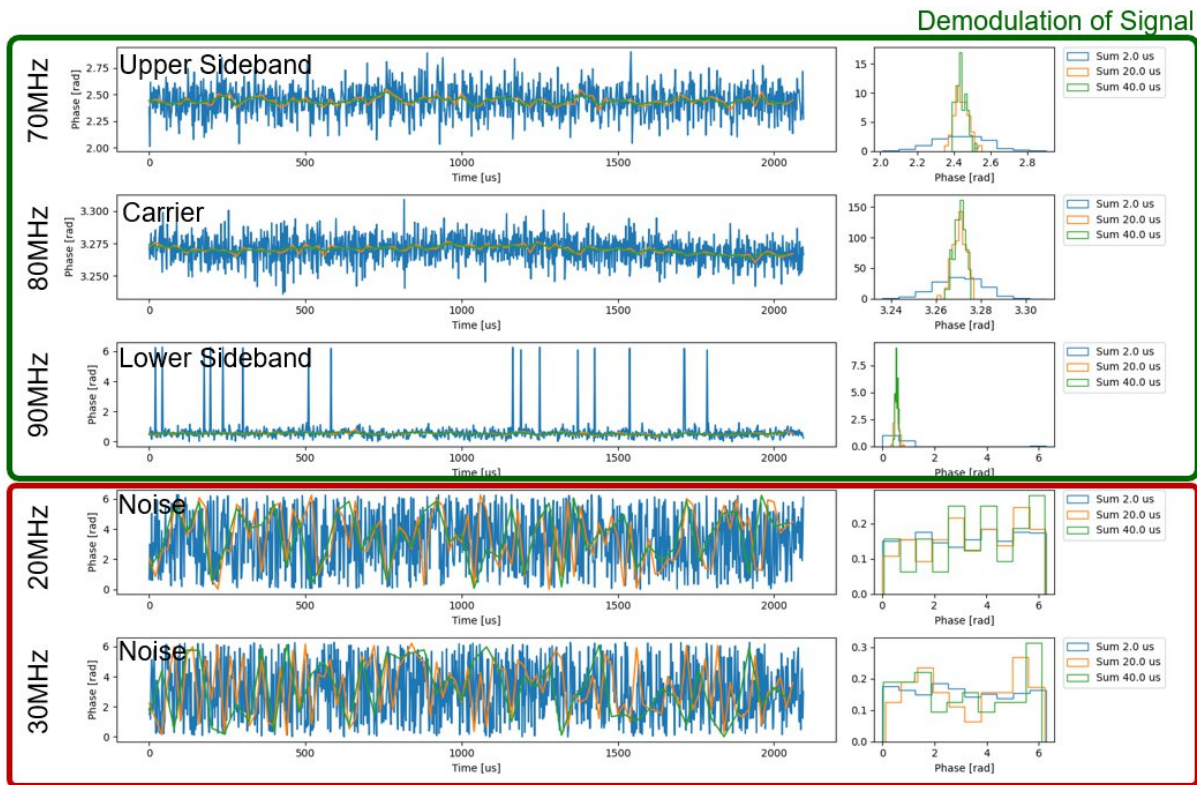
und man dort deutlich die Signalfrequenzen sehen kann. Das gemessene Grundrauschen für die 22 Verstärkerboard entspricht den Erwartungen und ist für die Frequenzen von 80 MHz bis 250 MHz leicht erhöht. Dies ist zum einen auf den nicht linearen, frequenzabhängigen Verstärkungsfaktor zurückzuführen und zum anderen der vereinfachten Betrachtung von konstanten Rauschen über alle Frequenzen. Zum Beispiel zeigt das Datenblatt des LMH33440 ein erhöhtes Grundrauschen in diesem Frequenzbereich.

Ausstehen ist noch das Vermessen des frequenzabhängigen Verstärkungsfaktors. Ein Messaufbau hierfür wurde konzeptioniert, konnte aber aufgrund des Endes der Projektlaufzeit im Berichtszeitraum nicht ausgeführt werden.

### **Frequenzabhängige Analyse der Messungen**

Die vermessenen Rohdaten können nun mit Hilfe einer I-Q Demodulation der einzelnen Frequenzen in ein Phasen- und Amplitudensignal umgewandelt werden. Dies geschieht im Moment Offline und soll in Zukunft in Echtzeit auf einem FPGA berechnet werden. Der Signal-zu-Rausch Wert hängt hier stark von der Integrationszeit ab. Für eine Integrationszeit von z.B. 4  $\mu$ s ergibt sich ein Rauschen von 0,1 rad, bei einer zeitlichen Auflösung von 125 kHz, die von der Integrationszeit diktiert wird.

Ein Beispiel für eine derartige Analyse ist für verschiedene Frequenzen in Abbildung 5 zu sehen. Es wird die Phase der beiden Seitenbänder und des Hauptsignals analysiert, sowie auch zwei zufällig herausgesuchte Frequenzen, welche kein aufmoduliertes Signal tragen. Die Phase wird über die Zeit dargestellt. Rechts davon findet sich ein Histogramm, welches die Messgenauigkeit der Einzelanalysen für unterschiedliche Integrationszeiten widerspiegelt. Für die Analyse der zufällig ausgewählten Frequenz ergibt sich grob eine Gleichverteilung der Phasen, da hier die Phase des Grundrauschens gemessen wird, welche zufällig verteilt ist. Die Spitzen im unterem Seitenband bei 90 MHz sind künstlich und der Modularität der Phase geschuldet. Hier wird die Phase eigentlich kleiner als 0 rad und wird so in den  $2\pi$  Bereich befördert.



**Abbildung 5** Beispielhafte Analyse eines Pixels der Phasenkamera über 2 Millisekunden. Beide Seitenbänder können parallel in einem Datensatz vermessen werden. Die Zacken der 90 MHz Messung sind lediglich ein Artefakt der Darstellung. Da die Phase zyklisch ist, folgt bei unterschreiten von 0 rad der Wert  $2\pi$  rad. Die Demodulation von Rauschen ergibt eine zufällige Phase. Durch erhöhen der Integrationszeit lässt sich das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis signifikant steigern.

### Auswahl und Kauf des FPGA-Boards

Aufgrund der hohen Kosten der kommerziell verfügbaren Digitalisierer ist es nicht möglich auf Basis dieser eine kosteneffektive Lösung für eine große Anzahl an Kanälen bereitzustellen. Daher wurde eine eigene Entwicklung auf Basis eines Xilinx Virtex 7 FPGA- und eines Analog Devices AD9694 Digitizer-Evaluationsboards getestet. Der ADC verfügt über 4 Kanäle, die mit 500 MSamples/s auf 14-Bit digitalisiert werden. Der FPGA verfügt prinzipiell über genügend interne Ressourcen, um die Daten von bis zu 7 ADCs gleichzeitig zu verarbeiten. Die Evaluationsboards verfügen jeweils über ein kompatibles FMC Interface, dass eine Verbindung der beiden und somit Test der I-Q Demodulation zulässt.

### Design der Zeitsynchronisierung

Da die Phasenanalyse auf dem Demodulieren von Schwebungen beruht, welche durch die Phasenverschiebung sehr naheliegender Frequenzen erzeugt werden, darf es nicht zu künstlichen Phasenverzügen kommen, welche durch nicht synchronisierte Clocks von verschiedenen Geräten verursacht werden. Daher müssen alle Komponenten der Phasenkamera und des optischen Setups auf die gleiche Grundfrequenz synchronisiert werden. Hierfür wird ein GPS-synchronisierter Oszillator benutzt, welcher ein 10 MHz Referenzsignal an alle relevan-

ten Komponenten verteilt. Eine Skizze dazu befindet sich in Abbildung 6. Würde dies nicht geschehen, würde man künstliche Phasenrampen auf dem Phasensignal beobachten, welche die tatsächliche Phase verzerren.

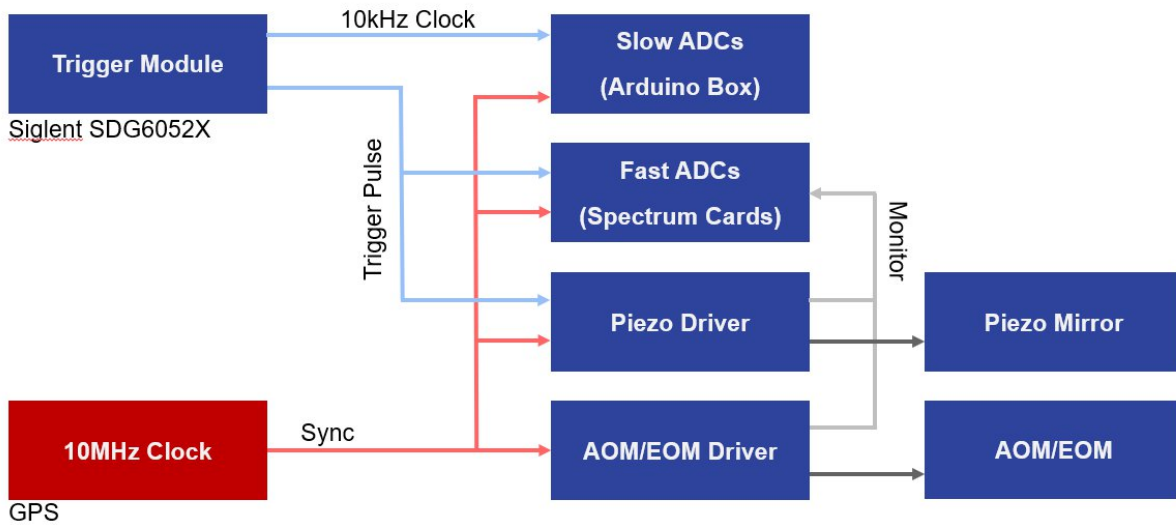


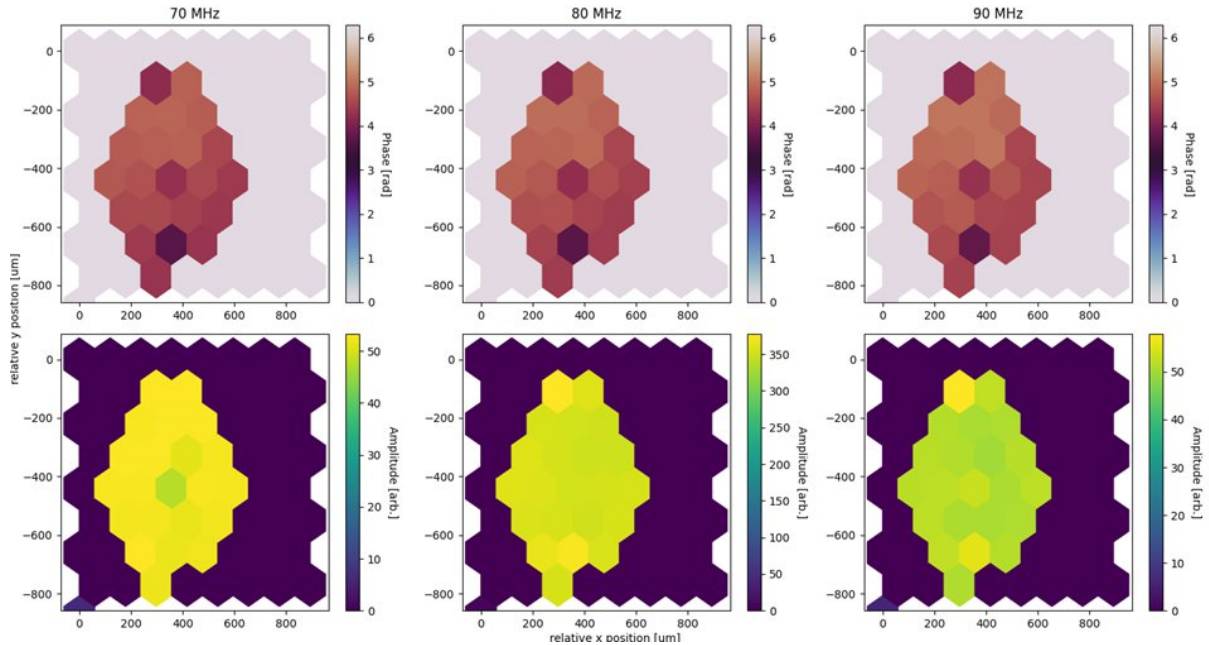
Abbildung 6 Schematischer Aufbau des kompletten Setups. Ein Trigger Modul koordiniert alle Messungen. Eine GPS Clock stellt sicher, dass alle Digitalisierer, Messgeräte und Funktionsgeneratoren, welche die Modulationen auf dem Strahl erzeugen, auf der selben Referenzfrequenz laufen. Dies verhindert ein künstliche Fortlaufen des gemessenen Phase durch eine falsche Referenz.

### Charakterisierung des FPGA-Boards

Aufgrund des Personalmangels konnten nur Initialtests auf dem FPGA-Board ausgeführt werden. Eine Analyse in Echtzeit auf Basis der I-Q Demodulation konnte noch nicht realisiert werden ist aber geplant.

### Messung mit dem kompletten System

Mit Hilfe der entwickelten Hardware und Software Tools können nun die Zeitserien einzelner Pixel zu 2D Bildern an bestimmten Zeitpunkten zusammen gefügt werden. Ein Beispiel hierfür findet sich in Abbildung 7. Hier wurden 22 Pixel in Rautenkonfiguration aus dem 64 Pixel Glasfaserbündelarray ausgewählt. Prinzipiell sind aber beliebige Kombinationen möglich. Die obere Reihe spiegelt die gemessenen Phasen wieder während die untere die jeweiligen Amplitude des jeweiligen Seitenbands zeigt. Die Einheit ist hier noch in arbiträren Einheiten, da der frequenzabhängige Verstärkungsfaktor für die einzelnen Verstärkerboards noch nicht vermessen wurde und daher die Intensitäten nur mit Vorsicht untereinander vergleichbar sind.



**Abbildung 7** Beispiel Phasen- und Amplitudenbilder der zwei Seitenbänder und der Hauptfrequenz aus 22 Pixeln. Eine ähnliche Phasenverteilung der Wellenfront aller Signalbänder ist zu erwarten, da diese keine zusätzlichen optischen Apparaten wie im Einstein Teleskop durchlaufen sondern direkt auf die Kamera gestrahlt werden.

### Analyse des kompletten Systems

Das Konzept der 2D Phasenkamera auf Basis von Glasfaserbündelarrays konnte sicher gestellt werden. Die groben Performance-Limits der Kamera konnten angeschnitten werden, müssen aber in der Tiefe überprüft werden. Eine Analyse, wie zum Beispiel das interferieren von verschiedenen gekrümmten Wellenfronten sich auf das Signal auswirkt, wurde von Timo Neeser in dessen Masterarbeit angefangen. Die Limitation von 22 Pixeln ermöglicht zwar die angegebenen Proof-of-Concept Studien erschweren aber das Analysieren eines Phasenbildes durch die niedrige spatiale Auflösung. Als nächster Schritt wird daher das 1D Glasfaserbündelarray getestet, welches die Analyse von größeren Laserquerschnitten auf Kosten der zweiten Dimension erlaubt.

### Messkampagne mit der Phasen Kamera am ETpathfinder

Eine Messkampagne am ETpathfinder konnte leider nicht realisiert werden, da bis zum Ende des Projektzeitraums das ETpathfinder Setup noch nicht fertig gestellt wurde. Diese wurde daher in das folge Projekt mitübernommen und wird voraussichtlich im letzten Quartal von 2024 stattfinden.

## 6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Förderung der universitären Antragsteller zielt auf die optimale Verwendung der dort bestehenden Expertise für die Entwicklung und Optimierung des Einstein Teleskops ab. Die dabei zu entwickelnden und zu testenden Methoden, Techniken und Geräte sind von entscheidender Bedeutung für den Erfolg des Einstein Teleskops. Die universitären Partner können

durch die Förderung sichtbare und nachhaltige Beiträge liefern und sich damit einen privilegierten Zugang zu einer bedeutenden wissenschaftlichen Infrastruktur sichern. Ohne die beantragte Zuwendung wäre der Bau der Phasenkamera nicht möglich gewesen.

Neben der projektbezogenen Notwendigkeit der Arbeiten soll auch darauf verwiesen werden, dass im Rahmen des Projektes wissenschaftliche Nachwuchskräfte ausgebildet wurden, die hervorragend qualifiziert sind für neue Aufgaben in Wissenschaft und Technik in einer zunehmend durch raschen technischen Fortschritt geprägten Gesellschaft.

## **7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Ergebnisse werden von direktem Nutzen für die Gravitationswellendetektoren der dritten Generation sein. Sie können darüber hinaus auch für andere größerer Forschungsprojekte von Nutzen sein. Dies gilt speziell auch für andere Bereiche, wie die Optik. Hochgeschwindigkeit-Phasenkameras sollten weit über die Grundlagenforschung hinaus nutzbar sein.

## **8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Verschiedene Internationale Arbeitsgruppen arbeiten ebenfalls an der Weiterentwicklung von Phasenkameras für das Einstein-Teleskop und verfolgen dabei andere Ansätze, wie beispielsweise die Adaption einer 1-Pixel Scanning Camera auf 1550 nm oder die Verwendung von Pockel-Zellen für eine optische Lock-In Kamera. Jedoch gehen diese Entwicklungen ebenfalls noch nicht über das Prototypenstadium hinaus. Außerhalb des Einstein-Teleskops sind keine Fortschritte bekannt geworden.

## **9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

### **9.1 Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)**

Keine (Veröffentlichung zur 2D Phasenkamera in Vorbereitung)

### **9.2 Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)**

Keine

### **9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)**

Aufgrund des verspäteten Beginns der Arbeiten an der FAU konnten im Förderabschnitt noch keine Arbeiten abgeschlossen werden, eine Dissertation und eine Masterarbeit sind jedoch aktuell in der Endphase.

## Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger:	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Projektleitung:	Prof. Dr. Stefan Funk
Verbund:	05A2020 - 3G-GWD: Gravitationswellen-Teleskop der dritten Generation. Teilprojekt 2
Thema:	Detektoren für Gravitationswellen

### 1. Ziel und Inhalt des Projektes

Im Jahr 2015 gelang der LIGO Kollaboration mit ihren beiden interferometrischen Detektoren in Hanford und Livingstone erstmals der Nachweis einer Gravitationswelle, eine Entdeckung, die bereits zwei Jahre später mit dem Nobelpreis in Physik ausgezeichnet wurde. Sie öffneten damit ein neues Fenster in unser Universum, die Gravitationswellenastronomie. Um dieses Fenster zu erschließen ist die Empfindlichkeit der heutigen Generation an Detektoren, zu der neben LIGO auch VIRGO und KAGRA gehören, nicht ausreichend. Eine neue, dritte Generation an Detektoren soll eine zehnfach höherer Empfindlichkeit erreichen, um damit das ganze beobachtbare Universum erfassen zu können, in die dunklen Zeitalter des Universums zurückblicken zu können, mehr unterschiedliche Typen von Quellen nachweisen zu können und einen größeren Massenbereich der Quellen abdecken zu können. Konkrete Pläne für Detektoren der dritten Generation gibt es in den USA mit dem Cosmic Explore und in Europa mit dem Einstein-Teleskop.

Auf dem Weg zu einem Gravitationswellendetektor der dritten Generation sind erhebliche technologische Herausforderungen zu überwinden. Das Ziel des Verbundprojektes war es, einen sichtbaren deutschen Beitrag zu diesen technologischen Entwicklungen zu leisten. Einzelne Partner des Verbundes haben sich dabei auf unterschiedliche Schlüsselbereiche konzentriert.

### 2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden in den einzelnen Gruppen weitgehend eigenständig durchgeführt. Fortschritte, Probleme und Ergebnisse wurden auf nationaler Ebene im Verbund diskutiert, die Ergebnisse flossen auf internationaler Ebene in die Entwicklung der Detektoren der dritten Generation ein.

Beim Partner Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Teilprojekt 2 (High Performance Phase Camera)  
Im Rahmen der Projektlaufzeit konnte eine Phasenkamera, basierend auf eines 64-Kanal Glasfaserbündelarrays in Verbindungen mit individuellen Photodioden und einer Digitalisierungselektronik entworfen, aufgebaut und vermessen. Dazu wurde ein Optisches Setup installiert, das die Phasensignale, wie sie im tatsächlichen

Interferometer erwartet werden, erzeugt. Bei einer Laserleistung von 10 mW können wir eine Phasenauflösung von 0,03 Rad bei einer Integrationszeit von 8  $\mu$ s erreichen. Die Ortsauflösung beträgt dabei 127  $\mu$ m, in 1D-Anordnung (linear) und in 2D-Anordnung (8x8). Im Rahmen der nächsten Förderperiode wird die Kamera sowie die dazugehörigen Analysemethoden weiterentwickelt um die Einsetzbarkeit am Einstein-Teleskop (ET) zu erreichen. Anders als die Phasenkameras der existierenden Gravitationswellendetektoren ist unsere Kamera für den Einsatz bei 1550 nm geeignet.

### **3. Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und deren konkreter Nutzen sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen**

Auf europäischer Ebene konnten große Fortschritte auf dem Weg zu einem Gravitationswellendetektor der dritten Generation erzielt werden, zu denen die Partner des Verbundprojekts einen sichtbaren Beitrag geleistet haben.

Im Laufe des Projekts hat sich die Zusammenarbeit der Partner miteinander verfestigt und eine Einbettung in eine europäische Kooperation entwickelt. Im Juni 2022, kurz vor Ende der Förderperiode, wurde auf dem ET Symposium in Budapest eine internationale Kollaboration zum europäischen Projekt, dem Einstein-Teleskop entwickelt. Mehrere Partner des Verbunds sind Gründungsmitglieder der Kollaboration. Mit der Gründung der Kollaboration begann auch der Aufbau einer Koordinationsstruktur für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, der mittlerweile abgeschlossen ist. Die Arbeiten sind im Instrument Science Board zusammengefasst, das in sechs Divisionen untergliedert ist, die wiederum in 5 bis 7 working groups unterteilt sind. Die deutschen Partner des Verbunds kooperieren in diesem Rahmen untereinander und mit den europäischen Partnern.