

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05A2020 - 3G-GWD

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (Universitätsaufgabe)
Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Steffen Grohmann
E-Mail: steffen.grohmann@kit.edu
Förderkennzeichen: 05A20VK4
Förderzeitraum: 01.07.2020 - 30.06.2023
Zuwendung: 199.152,00 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: steffen.grohmann@kit.edu
Zusätzlicher Name: Steffen Grohmann

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	andere	Europa	
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	0		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	3		
Andere Veröffentlichungen:	10		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	2		
Masterarbeiten:	0		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 22.12.2023 09:21 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. Steffen Grohmann
Verbund:	Third Generation Gravitational Wave Telescope
Thema:	He-II cooling for the Einstein Telescope and ETpathfinder

Zusammenfassung

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu den Technologien für die dritte Generation der Gravitationswellendetektoren haben im Laufe des Verbundprojekts „Third Generation Gravitational Wave Telescope“ große Fortschritte gemacht. Das KIT konnte als Partner in diesem Verbundprojekt wichtige, sichtbare Beiträge mit dem von ihm durchgeführten Teilprojekte machen. Die folgenden Ergebnisse wurden erreicht:

- Erarbeitung des Sollwerts für die Kälteleistung zur Kühlung der kryogenen Spiegel in den niederfrequenten ET-Interferometern (ET-LF) auf 10...20 K von 500 mW und Etablierung des Werts in der Projektkooperation
- Konzeptionelle Ausgestaltung des zur adäquaten Spiegel- und Kryopumpenkühlung nötigen Helium-Gesamtsystems unter Berücksichtigung der geplanten ET-Infrastruktur
- Entwicklung von Konfigurationsmöglichkeiten für eine rauscharme thermische Anbindung der kryogenen Spiegel an entfernt aufgestellte Wärmesenken durch Nutzung von suprafluidem Helium (He-II)
- Bestätigung der Eignung des heliumbasierten Kühlkonzepts im Bezug auf Zeitkonstanten des instationären Kaltfahrvorgangs der Spiegel: durch Nutzung erzwungener Konvektion mit Helium können Abkühlzeiten in der Größenordnung von 2 Wochen erreicht werden. Dabei handelt es sich um die ersten Ergebnisse überhaupt im Rahmen von Abkühlstudien zu den kryogenen Payloads im ET.
- Entwurf eines strukturellen Aufbaus der großen ET-LF Spiegelkryostate, die die Basis der darüber angeordneten seismischen Isolatoren („Super Attenuators“) bilden.
Die Kryostate enthalten dabei folgende Hauptkomponenten:
 - „Payload“ (Spiegel, „Marionette“, Reaktionsmasse, Steueringsfilter)
 - Thermische Schilde zur Abschirmung zusätzlicher Wärmelasten auf die kalten Spiegel
 - Geometrie zur Abtrennung des Vakuums im Kryostaten vom Vakuum im darüberliegenden warmen Super Attenuator (höherer Restdruck)
 - Vakuumbehälter, der räumliche Anforderungen der ET-Infrastruktur einhält
- Ausgehend von o.g. Kryostatentwurf: Erstellung detaillierterer 3D-Modelle, die u.a. als projektweit berücksichtigte Grundlage für weitere Untersuchungen dienen

Im Laufe des Verbundprojekts konnten 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

Teilprojekt 8.1: He-II cooling for the Einstein Telescope and ETpathfinder

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Ziel des Teilprojekts war die Entwicklung eines völlig neuartigen und auf suprafluidem Helium (He-II) basierenden Kühlkonzepts für einen Gravitationswellendetektor (GWD) der dritten Generation. Die Möglichkeit der Kühlung mit He-II wurde im Vorfeld des Projekts in den konzeptionellen Planungsstudien für das Einstein-Teleskop (2011, 2020) lediglich als abstrakte Option angesprochen.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Technische Anwendungen von He-II sind insbesondere aus der Beschleunigerphysik (LHC) und dem Bereich der Hochfeldmagnete (NMR) bekannt. Die spektakulären Eigenschaften des Superfluids ermöglichen hier eine rauscharme statische Kühlung mit sehr hoher Temperaturhomogenität und -stabilität. Seine außergewöhnlichen Eigenschaften prädestinieren die Verwendung von He-II gegenüber allen anderen Optionen zur Kühlung der kryogenen Spiegel im Niederfrequenz-Interferometer des Einstein-Teleskops (ET-LF). Die extremen Anforderungen an die Rauschfreiheit zum Erreichen der geplanten Sensitivität von ET-LF erfordern jedoch ein mehrstufiges F&E Programm zur Technologieentwicklung für diese spezifische Anwendung, wofür im Teilprojekt 8.1 erste und wesentliche Grundlagen gelegt wurden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Die Arbeiten zum Teilprojekt waren zu jeder Zeit fester Bestandteil der Entwicklungen des Gesamtvorhabens ET und wurden entsprechend in hoher Frequenz persönlich und transparent präsentiert. Sie dienten damit als Motor für die gesamttechnischen Entwicklungen im Bereich Kryotechnik des Einstein-Teleskops. Insgesamt erreichten die im Teilprojekt erzielten Fortschritte eine bemerkenswert hohe Sichtbarkeit in der Community der Gravitationswellenforschung.

Die Einbindung der Teilprojektarbeiten in die laufenden Entwicklungen des ET wurde von Beginn an durch personelle Integration in das „Instrument Science Board (ISB)“¹ kontinuierlich gewährleistet. Der Projektleiter, Prof. Steffen Grohmann ist Co-Chair der „Vacuum and Cryogenics Division“ im ISB. Darüber hinaus kam es zu beträchtlichem Engagement des teilprojektfinanzierten wissenschaftlichen Mitarbeiters in den Arbeitsgruppen „Detector Cooling“ und „Cryogenic Infrastructure“ des ISB. Dies umfasste unter anderem die Teilnahme an regelmäßigen Arbeitstreffen innerhalb des ISB, signifikante Beiträge zu Workshops im Rahmen von ET sowie die aktive An- und Einbindung neuer Arbeitsgruppen in das Gesamtvorhaben Einstein-Teleskop.

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

Die bewilligten Finanzmittel wurden gemäß Bewilligung vollständig ausgegeben. Geleistete Mehrausgaben werden vom KIT übernommen. Insgesamt wurden 160.709,25 EUR (ohne PP) für wissenschaftliche Mitarbeiter im Projekt ausgegeben und 8.647,95 EUR für projektbezogene Reisen. Die

¹ <https://wiki.et-gw.eu/ISB/WelcomePage>

durchgeführten Reisen waren wissenschaftliche Besprechungen innerhalb der Kollaboration und zu Arbeiten an den Versuchsaufbauten bei Kooperationspartnern.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

<u>Übersicht</u>		
Teilprojekt Arbeitspaket	Stand zum Ende der Projektlaufzeit	Erläuterungen
He-Kälteanlagen:	He-Infrastrukturvorschlag veröffentlicht, Designstudienvergabe an Industriepartner in Planung	Designstudie wird vergeben werden können, sobald der Kälteleistungsbedarf auf den verschiedenen Temperaturniveaus genauer festgelegt werden kann.
He-II Kühlsystem:	Studien zur konzeptionellen Machbarkeit des stationären und instationären Betriebs wurden erfolgreich durchgeführt und entsprechende Ergebnisse veröffentlicht	Studien umfassen nicht nur He-II-Kühlung der zentralen Interferometerspiegel, sondern auch das darum angeordnete thermisches Schild
He-II Test-Design:	Designkonzept für Testkryostaten und entsprechende He-II-Kälteanlage kleiner Leistung fertiggestellt	Konstruktionsentwicklung des Testaufbaus ist Gegenstand eines neuen Projekts

Detaillierte Ausführung der Ergebnisse:

In der technischen Planungsstudie für das Einstein Telescope (ET) ist die zu erreichende Temperatur in den LF-Interferometerspiegeln während des Detektorbetriebs auf 10...20 K festgelegt, um durch Reduktion des thermischen Rauschens in den Spiegelaufhängungen die gewünschte Detektorsensitivität zu erreichen. Die Notwendigkeit der Erzielung dieses niedrigen Temperaturniveaus wurde über die ET Design Studie von 2011 (Update: 2020) hinaus auch weiterhin, während des Berichtszeitraums, in der Zusammenarbeit mit ET-Projektpartnern bestätigt. Die Verwendung von He-II, welches sich bei ca. 2 K bildet, bietet hierfür wesentliche Vorteil. So beträgt der während des Berichtszeitraums erarbeitete Sollwert der Kälteleistung für die kryogenen Interferometerspiegel (auch „Test Mass“, TM) 500 mW. Weiterhin wurde gezeigt, dass eine Annäherung an eine Spiegeltemperatur von 10 K unter Berücksichtigung der Wärmeleitlänge zur Wärmeabfuhr nur über eine Kühlung der lokalen Wärmesenke auf 2 K realisierbar ist. Die 2 K in der Wärmesenke lassen sich mit geringem Rauscheintrag über statische Wärmeleitung in ruhendem He-II erreichen. Das He-II kann die im Spiegel anfallende Wärmelast ohne signifikante Temperaturgradienten (d.h. $\leq 0,1$ K) zu einer ca. 20 m entfernt gelegenen Wärmesenke leiten, die sich auf dem systemweit niedrigsten Temperaturniveau befindet. Die große Wärmeleitlänge erlaubt die Dämpfung von Vibrationen aus der Umgebung des Kryostaten.

Als Teil des Designprozesses des zur He-II-Kühlung nötigen Gesamtsystems wurde zunächst ein konzeptionelles Grundfließschema erstellt. Dieses sieht vor, neben der TM-Kühlung bei 2 K auch Kälteleistung für thermische Schilde im TM-Kryostaten bei höheren Temperaturen bereitzustellen. Das Layout des Systems orientiert sich am Design der geteilten Kaltboxen des LHC (CERN): An der Erdoberfläche über den drei Eckkavernen von ET ist je eine Kompressorstation installiert und über Transferleitungen mit einer unterirdisch platzierten Coldbox verbunden. Diese verteilt über eine Ventilbox kalte Heliumströme an die verschiedenen Verbraucher im ET, u.a. an kryogene Versorgungsboxen, die in der Umgebung der TM-Kryostate die finale Abkühlung des Heliums gewährleisten. Das erstellte Schema lässt

sich auch auf die Bedingungen in ETpathfinder anwenden, mit dem Unterschied, dass dort eine Transferleitung den in einem separaten Gebäude zu installierenden Heliumverflüssiger mit den Kryostaten der Detektorhalle verbinden würde.

Auf Basis dieses Grundfließschemas wurde ein detaillierteres Verfahrensfleißbild erstellt. Die Funktionsweise des zugrunde liegenden Prozesses wurde in den Proceedings der *International Cryogenic Engineering Conference (ICEC) 2021* unter dem Titel „Conceptual layout of a helium cooling system for the Einstein Telescope“ veröffentlicht. Das Verfahrensfleißbild zeigt die fünf Hauptkomponenten: Kompressorsystem, Coldbox, Verschaltungseinheit, kryogene Versorgungsbox und einen der TM-Kryostate. Besonders in den Fokus tritt die kryogene Versorgungsbox, von der geplant ist, jeweils eine Einheit in der Nähe der ET-LF („low-frequency“) Kryostate aufzustellen. Dort werden dezentral Wärmesenken auf dem systemweit geringsten Temperaturniveau von ca. 1.7 K erzeugt. Ebenfalls als Kälteleistungsverbraucher berücksichtigt sind die thermischen Schilde und die zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Vakuumqualität in den ET-LF Kryostaten erforderlichen Kryopumpen.

Das entwickelte Verfahrensfleißbild eines Helium-Kühlsystems zeigt darüber hinaus die Verbindung über kleine Röhren, die im stationären Betrieb des ET die Wärmeabfuhr aus dem „Payload“ (beinhaltet sowohl einen Interferometerspiegel, als auch dessen letzte Aufhängungsstufe und die entsprechenden Reaktionsmassen) erlaubt. Diese Verbindung ermöglicht die Kühlung einer Kontaktstelle zum Payload auf $T \approx 2$ K und die Abfuhr der im Payload anfallenden Wärme über Entfernungen $L \leq 20$ m mit Temperaturgradienten der Größenordnung 0,1 K. Auf Basis des oben beschriebenen Kälteleistungswerts von 500 mW konnten unter anderem Konfigurationsmöglichkeiten für die langen He-II-Röhrenverbindungen entwickelt werden. Es wurden dabei besonders Konfigurationen mit mehreren Röhren berücksichtigt, da mit größerer Röhrenanzahl der benötigte Innendurchmesser und damit auch die Wandstärke sinkt. Dies eröffnet die Möglichkeit, eine insgesamt rauschärmere Verbindung zwischen Payload und Wärmesenke zu realisieren.

Ausgehend von den für den stationären Detektorbetrieb ausgelegten Konfigurationen der Röhren wurde das instationäre Kaltfahren über die o.g. Payload-Schnittstelle mittels erzwungener Konvektion mit einem einphasigen überkritischen Heliummassenstrom betrachtet, d.h. bei $p > 2.3$ bar(a). Zur detaillierten Modellierung dieses Prozesses wurden einige Vorarbeiten durchgeführt. Dazu gehörten Betrachtungen der Einspeisezustände des überkritischen Heliums in den Wärmeübertrager. Die dort erreichbaren Druckniveaus werden bei gegebenem Bereitstellungsdruck des überkritischen Heliums in der entfernt aufgestellten Coldbox durch die Druckverluste in den Röhrenverbindungen mit der Payload-Schnittstelle dominiert. Aus durchgeführten Berechnungen wurde ersichtlich, dass bei einem Bereitstellungsdruck von $p = 5.0$ bar(a) in der He-Kälteanlage Einspeisedrücke in der Schnittstelle von $p \geq 4.0$ bar(a) über den gesamten relevanten Temperaturbereich realisierbar sind. Dieser Wert lässt noch einen gewissen Spielraum in Bezug auf Betriebsparameter des Kaltfahrprozesses und die Zwischenschaltung von Dämpfungsgeometrien innerhalb der Röhrenverbindung.

Zentraler Bestandteil der Untersuchungen zum Kaltfahrprozess der kryogenen Payloads im ET ist die numerische Modellierung der erzwungenen Konvektion mit überkritischem Helium im Payload-Wärmeübertrager. Ziel ist die Beschreibung des Abkühlverhaltens der kryogenen Spiegel des ET. Der Payload-Wärmeübertrager kann als Kontaktfläche ausgeführt werden, welche sich am unteren Ende eines konzentrischen Doppelrohrs befindet. Insgesamt ergaben sich aus den Simulationen bei realitätsnahen Betriebsparametern der vorgeschalteten Heliuminfrastruktur Zeiten von $t \leq 14$ d für eine Abkühlung der Spiegel von Raumtemperatur auf die Betriebstemperatur von $T \leq 10$ K. Hierbei handelt es sich um die ersten Ergebnisse überhaupt im Rahmen von Abkühlstudien zu den kryogenen Payloads im ET.

Weitgehend parallel zu den obigen Untersuchungen wurde ein struktureller Aufbau für die TM-Kryostate entworfen. Diese Kryostate bilden die Basis der über 10 m hohen „Super Attenuators“, die die optischen Einheiten seismisch isolieren. Die Schnittstelle zum Kühlsystem wird an der letzten Aufhängungsstufe innerhalb des Payloads, oberhalb der Spiegel, angebracht werden, um eine ausreichend rauscharme Kühlung des Spiegels gewährleisten zu können. Um das Payload herum angeordnet sind mehrere aktiv

gekühlte thermische Schilde: ein inneres Schild bei 2 K und zwei äußere bei 5 K und 50...80 K. Auf einem ähnlichen Temperaturniveau betrieben werden die Kryopumpen, welche sich über die ersten 10 m bis 20 m Strahlrohr erstrecken. Insbesondere für das äußere Schild und die Kryopumpen ergeben sich hohe abgeschätzte Wärmelasten. Bezüglich des Schilds ist dies darauf zurückzuführen, dass innerhalb des Kryostaten aufgrund der hohen Ansprüche an die Vakuumqualität auf die Verwendung von Superisolation verzichtet werden muss. Die hohen Wärmelastwerte für die Kryopumpen werden maßgeblich durch ihre großen Dimensionen verursacht. Genauere Studien zum Leistungsbedarf dieser Pumpen sind Gegenstand laufender Arbeiten von Projektpartnern.

Die erforderlichen Kälteleistungen werden simultan über die o.g. Coldbox bereitgestellt, denn diese erlaubt Heliumstromabgriffe bei verschiedenen Temperatur- und Druckniveaus. Zur Erzeugung des 2 K-Temperaturniveaus und der damit einhergehenden Bildung von He-II ist eine finale Entspannung nötig. Dieser Prozessteil ist aus Effizienzgründen von der zentral aufgestellten Kälteanlage in kryogene Versorgungsboxen ausgelagert.

Ausgehend vom zunächst strukturellen TM-Kryostataufbau wurde weiterhin ein detaillierteres 3D-Modell entworfen. Dieses beinhaltet ein im Rahmen des Projekts neu entworfenes inneres thermisches Schild, das ebenfalls mittels He-II gekühlt wird. Dieses Schild umgibt ein vorläufiges, erstes kryogenes Payloadmodell für ET. Mit Hilfe dieses Modells konnten thermische Simulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode durchgeführt werden, die sowohl das stationäre Verhalten des Payloads während des Detektorbetriebs als auch das instationäre während des Abkühlvorgangs bei verschiedenen Randbedingungen beschreiben.

In den Simulationen wurde ebenfalls untersucht, welchen Einfluss sowohl unterschiedliche Durchmesser der TM-Aufhängungen aus Silizium, als auch der Verzicht auf eine Kontaktkühlung der Marionette auf den zeitlichen Verlauf der durchschnittlichen TM-Temperatur während der instationären Abkühlung haben. Es wurde ersichtlich, dass, bei ausschließlicher Kühlung über Wärmestrahlung, die Abkühldauer der Testmasse bis zur erwünschten Temperatur von $\leq 10...20$ K deutlich zu groß ist. Selbst nach 20 Tagen nach Abkühlungsbeginn ist die TM-Temperatur noch auf ca. 90 K. Ein signifikanter Unterschied zeigt sich nach Hinzuziehen einer Kontaktstelle mit dem Heliumkühlsystem auf 2 K. Selbst bei Verringerung der TM-Aufhängungsdurchmesser auf 2 mm und damit erschwerter Wärmeleitung aus der Testmasse zeigt sich eine Gesamtabkühldauer von ca. 16 Tagen. Für den Betrieb des Einstein-Teleskops sind hinreichend kurze Abkühlzeiten unerlässlich.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der kryogene Betrieb der Spiegel der niederfrequenten ET-Interferometer (ET-LF) bei $T = 10$ K bis 20 K ist unabdingbar, um das thermische Rauschen der Aufhängung (STN) auf das Niveau des Newtonschen Rauschens zu verringern². Daher erfordert die Planung von ET-LF die Entwicklung neuer Schlüsseltechnologien bezüglich extrem rauscharmer kryogener Kühlung, Kryopumpen und thermischer Abschirmung.

Die Entwicklung von kryogenen Payloads und eines Kryostaten für ET-LF wird im ET-ISB koordiniert. Eine wesentliche technische Herausforderung ist die molekulare Adsorption an den Oberflächen der kryogenen Spiegel. Dieses Risiko kann durch eine geeignete Konstruktion der Kryopumpen auf ein akzeptables Niveau reduziert werden³.

Während Kryopumpen für Wasser nur Temperaturen von 80 K benötigen, sind für das Kryopumpen von Wasserstoff 10 K (in Verbindung mit einem Sorptionsmittel) oder 3,7 K (auf metallischen Oberflächen)

² ET Science Team, Einstein Gravitational Wave Telescope conceptual design study (2011), <https://apps.et-gw.eu/tds/?content=3&r=8709>

³ S. Hanke, K. Battaes, X. Luo and C. Day: Cryopumps at the extremities of the beampipes: design and performance. Beampipes for Gravitational Wave Telescopes 2023, CERN, March 2023, <https://indico.cern.ch/event/1208957/>

erforderlich. Daher wird für ET zwingend eine kryogene Heliuminfrastruktur benötigt, deren Kälteleistungen hauptsächlich von den Kryopumpen bestimmt wird.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Erreichen der Designsensitivität des kryogenen ET-LF ist zum Erreichen der wissenschaftlichen Ziele des Einstein Teleskops von zentraler Bedeutung, insbesondere im Hinblick auf⁴:

- die Beobachtung von binären Neutronensternen, die lange Zeit in der entscheidenden (niederfrequenten) Frequenzbandbreite verbleiben
- die Detektion von „pre-mergers“, um den zentralen Mechanismus hinter Gammastrahlenausbrüchen zu untersuchen, und insbesondere um die Zusammensetzung des Jets, den Mechanismus der Teilchenbeschleunigung, die Strahlung an sich und die Mechanismen der Energie-dissipation zu verstehen
- den Nachweis einer großen Anzahl von Kilonova-Gegenständen
- den Nachweis primordialer Schwarzer Löcher bei Rotverschiebungen von $z > 30$
- die Entdeckung mittelschwerer Schwarzer Löcher im Bereich von 10^2 bis $10^4 M_{\odot}$

Dieser Zusammenhang wurde jüngst in einer umfangreichen Studie veröffentlicht⁶. Die durchweg erfolgreich geleisteten Konzipierungsarbeiten im Rahmen des Teilprojekts stellen eine unverzichtbare Basis für alle folgenden, detaillierteren Entwicklungen im Rahmen eines solchen Kühlsystems für ET dar.

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

Außerhalb der Arbeitsgruppe des Zuwendungsempfängers sind keine Arbeiten bekannt, die sich mit der Entwicklung einer kryogenen Infrastruktur und einer Heliumtechnologie für das Einstein-Teleskop befassen.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

- L. Busch and S. Grohmann, Conceptual layout of a helium cooling system for the Einstein Telescope, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1240, 012095 (2022).
- X. Korovesi et al., 2023. Cryogenic payloads for the Einstein Telescope – Baseline design with heat extraction, suspension thermal noise modelling and sensitivity analyses. (arXiv:2305.01419 [astro-ph.IM])
- L. Busch et al., Low-noise thermal shielding around the cryogenic payloads in the Einstein Telescope, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2023, akzeptiert)

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

Vorträge:

- L. Busch and S. Grohmann. "He-II cooling: Possibilities for ET". In 11th Einstein Telescope Symposium (ET 2020), Online, Dezember 2020.
<https://indico.in2p3.fr/event/20576/contributions/89060/>

⁴ Marica Branchesi et al JCAP07(2023)068, DOI: 10.1088/1475-7516/2023/07/068

- L. Busch, X. Korovesi and S. Grohmann. "Helium-based cooling concept of the ET-LF interferometer". In Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (GWADW 2021), Online, Mai 2021. <https://agenda.infn.it/event/26121/contributions/136476/>
- L. Busch and S. Grohmann. "Conceptual layout of a helium cooling system for the Einstein Telescope". In 23rd Joint Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (CEC/ICMC 2021), Online, Juli 2021.
- S. Grohmann, L. Busch and X. Korovesi. "Cryogenics for the Einstein Telescope (ET)". In European Cryogenics Course (2022), Twente, Netherlands, August 2022. <https://agenda.infn.it/event/28336/contributions/177982/>.
- L. Busch and S. Grohmann. "Thermal design of the He-II suspension tube for ET-LF: Status and outlook". In ECLoud and GWDVac Workshops (2022), Portoferraio, Italien, September 2022. <https://agenda.infn.it/event/28336/contributions/177982/>
- L. Busch, G. Iaquaniello, P. Rosier, M. Stamm and S. Grohmann. "Low-noise thermal shielding around the cryogenic payloads in the Einstein Telescope". In 25th Joint Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (CEC/ICMC 2023), Honolulu, United States, July 2023.

Poster:

- L. Busch and S. Grohmann. "Cool-down studies of the low-frequency interferometer in the Einstein Telescope". Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (GWADW 2022), Online, Mai 2022.
- L. Busch and S. Grohmann. "Development status of the inner thermal shielding for the ET-LF cryogenic payloads". 13th Einstein Telescope Symposium (ET 2023), Online, Mai 2023.
- L. Busch and S. Grohmann. "Development status of the inner thermal shielding for the ET-LF cryogenic payloads". Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (GWADW 2023), La Biodola, Italy, May 2023.
- L. Busch, X. Korovesi and S. Grohmann. "Cryogenic developments for the Einstein Telescope using superfluid helium". Helmholtz Program Days Matter and the Universe (2023), Karlsruhe, September 2023.

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

- Friedel, Julian: "Process studies of the helium-based cooling system for the Einstein Telescope", Bachelorarbeit, November 2021
- Turkic, Enes: "Numerical Modelling of the Helium Flow in the Marionette Suspension Tube of the Low-Frequency Interferometer in the Einstein Telescope", Bachelorarbeit, Dezember 2022

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Steffen Grohmann

Verbund: Third Generation Gravitational Wave Telescope

Thema: He-II cooling for the Einstein Telescope and ETpathfinder

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 höhere Empfindlichkeit erreichen, um damit das ganze beobachtbare Universum erfassen, in die dunklen Zeitalter des Universums zurückblicken, mehr unterschiedliche Typen von Quellen nachweisen 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 Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurden im Teilprojekt 8.1 folgende Ergebnisse erzielt:

Teilprojekt 8.1: He-II Cooling for the Einstein Telescope and ETpathfinder

- Erarbeitung des Sollwerts für die Kälteleistung zur Kühlung der kryogenen Spiegel in den niederfrequenten ET-Interferometern (ET-LF) auf 10...20 K von 500 mW und Etablierung dieses Referenzwertes in der Projektkooperation

- Konzeptionelle Ausgestaltung des zur adäquaten Spiegel- und Kryopumpenkühlung nötigen Helium-Gesamtsystems unter Berücksichtigung der geplanten ET-Infrastruktur
- Entwicklung von Konfigurationsmöglichkeiten für eine rauscharme thermische Anbindung der kryogenen Spiegel an entfernt aufgestellte Wärmesenken durch Nutzung von suprafluidem Helium (He-II)
- Bestätigung der Eignung des heliumbasierten Kühlkonzepts im Bezug auf Zeitkonstanten des instationären Kaltfahrtvorgangs der Spiegel: durch Nutzung erzwungener Konvektion mit Helium können Abkühlzeiten in der Größenordnung von 2 Wochen erreicht werden. Dabei handelt es sich um die ersten Ergebnisse überhaupt im Rahmen von Abkühlstudien zu den kryogenen Payloads in ET.
- Entwurf eines strukturellen Aufbaus der großen ET-LF Spiegelkryostate, die die Basis der darüber angeordneten seismischen Isolatoren („Super Attenuators“) bilden. Die Kryostate enthalten dabei folgende Hauptkomponenten:
 - „Payload“ (Spiegel, „Marionette“, Reaktionsmasse, Steueringsfilter)
 - Thermische Schilde zur Abschirmung zusätzlicher Wärmelasten auf die kalten Spiegel
 - Geometrie zur Abtrennung des Vakuums im Kryostaten vom Vakuum im darüberliegenden warmen Super Attenuator (höherer Restdruck)
 - Vakuumbehälter, der räumliche Anforderungen der ET-Infrastruktur einhält
- Ausgehend von o.g. Kryostatentwurf: Erstellung detaillierterer 3D-Modelle, die u.a. als projektweit berücksichtigte Grundlage für weitere Untersuchungen dienen

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.

Das Karlsruher Institut für Technologie hat die kooperative Leitung der Division IV – Vacuum and Cryogenics – im ET Instrument Science Board übernommen und ist an der Leitung von 3 der 5 Arbeitsgruppen der Division beteiligt.