

Vom All aus

EIN WELTRAUMBASIERTES LASERINTERFEROMETER VERMISST DAS ERDSCHWEREFELD

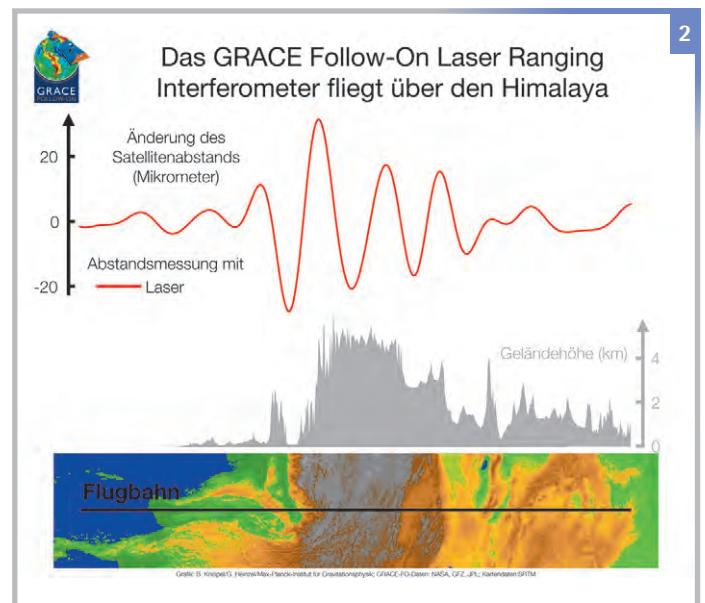
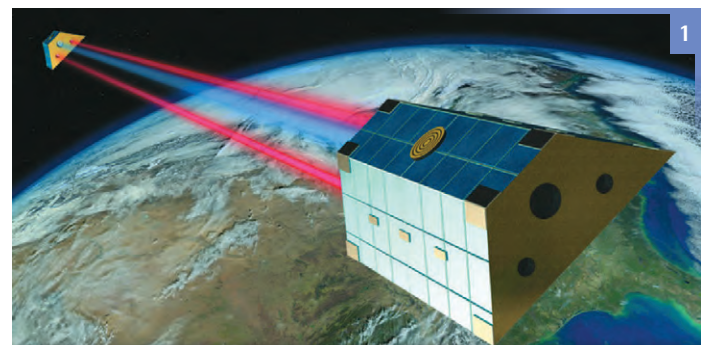
GRACE Follow-On ist eine gravimetrische Weltraummission, mit der anhand eines Satellitenpaares das Erdschwerefeld vermessen wird. Die monatlichen Karten des Erdschwerefelds, die aus den Daten von GRACE konstruiert werden, haben sich als wichtiges Werkzeug für Klima- und Geowissenschaftler etabliert. Ein Forschungsteam vom Institut für Gravitationsphysik stellt die Entwicklung neuer Sensoren für die Satellitengravimetrie vor.

Einleitung

Am Institut für Gravitationsphysik der Leibniz Universität und Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) beschäftigen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit der Detektion von Gravitationswellen. Das zugrunde liegende Messprinzip ist die Laserinterferometrie, die auf der Erde bereits erfolgreich zum Nachweis der von Einstein vorhergesagten Kräuselungen der Raumzeit eingesetzt wurde. Mit der Satellitenmission LISA-Pathfinder wurden darüber hinaus die Grundlagen für den zukünftigen Einsatz von Laserinterferometrie zur Gravitationswellendetektion im Weltall geschaffen. Die entwickelten Technologien lassen sich aber auch hervorragend auf andere Anwendung übertragen, bei denen hochpräzise Abstandsmessungen benötigt werden wie zum Beispiel die Vermessung des Erdschwerefeldes.

Das Laser Ranging Interferometer für GRACE Follow-On

Am 22. Mai 2018 ist das Satellitenpaar für die GRACE Follow-On Mission (siehe Abbildung 1) durch eine Falcon 9 Trägerrakete von Kalifornien aus ins All befördert worden, um schon wenige Minuten später den vorgesehenen Orbit in etwa 490 km Höhe zu erreichen. Beide Satelliten umkreisen mittlerer-



weile in Nord-Süd Richtung und mit etwa 220 km Abstand zueinander den Erdball, wobei die Erdrotation sicherstellt, dass die Bahnen bezüglich der Erdoberfläche stets verschoben werden, sodass die Satelliten bei jedem Umlauf unterschiedliche Gebiete überfliegen. Dadurch wird nach etwa einem

Monat die globale Abdeckung erreicht.

GRACE Follow-On ist wie die Vorgängermission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, 2002-2017) eine gravimetrische Mission, das heißt es wird das Erdschwerefeld vermessen. Dazu wird aus-

genutzt, dass räumliche und zeitliche Änderungen im Erdschwerefeld auch Veränderungen im Satellitenabstand verursachen, welcher wiederum interferometrisch sehr genau bestimmt werden kann (siehe *Abbildung 2*). Die Struktur des Erdschwerefeldes wird durch die Massenverteilung der Erde und ihrer Atmosphäre vorgegeben. Die Massenverteilung verändert sich, wenn zum Beispiel Eismassen in Grönland abschmelzen. Die monatlichen Karten des Erdschwerefeldes, die aus den Daten von GRACE konstruiert werden, haben sich als wichtiges Werkzeug für Klima- und Geowissenschaftler etabliert, sodass diese dringend auf eine Fortführung der Messungen durch GRACE Follow-On warten.

Diese Nachfolgemission besitzt neben dem bisherigen

Mikrowellen-Abstandsmessgerät auch ein neuartiges Laser Ranging Interferometer (LRI), welches die Abstandsänderungen noch genauer mittels Licht vermessen soll (siehe *Info-Kasten*). Das LRI ist ein Gemeinschaftsprojekt zwischen den USA und Deutschland und wurde auf deutscher Seite unter Federführung des Albert-Einstein-Institutes und der Leibniz Universität Hannover und mit einer Vielzahl von Universitäts- und Industriepartnern entwickelt. Es ist nach LISA Pathfinder das zweite welt-raumbasierte Laser-Interferometer, aber das erste zwischen zwei separaten Satelliten.

Das LRI wurde Mitte Juni aktiviert und die beiden Interferometer-Einheiten konnten bereits nach dem ersten Suchlauf eine optische Verbin-

dung herstellen. Diese initiale Ausrichtung des Systems ist ein komplexes Unterfangen, bei dem die Laserstrahlen bis auf etwa fünf Hundertstel Grad genau den entfernten Satelliten treffen müssen. Haben Sie schon einmal versucht, eine 1-Euro-Münze in 250 Meter Entfernung mit einem Laserpointer zu treffen? Die ersten vorläufigen Flugdaten des LRI deuten daraufhin, dass die geforderte Auflösungsgenauigkeit von 80 Nanometern in der Abstandsmessung sogar noch weit unterschritten werden kann. Der Erfolg dieser Mission ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu dem von der ESA entwickelten Weltraum-Gravitationswellenobservatorium LISA, welches ebenfalls auf Laserinterferometrie basieren, aber aus drei Satelliten bestehen wird.

Abbildung 1
Das Satellitentandem GRACE Follow-On vermisst den Satellitenabstand mit Lasern (in rot dargestellt) und mit Mikrowellen (in blau dargestellt).
(Quelle: Erde: NASA »Blue Marble«, Satelliten: D. Schütze/AEI)

Abbildung 2
Erste Messdaten des LRI bei einem Überflug der Himalaya-Region: Abstandsänderungen zwischen den Satelliten variieren um +/- 30 Mikrometer (*oberer Teil*); das Höhenprofil unter den Satelliten (*mittlerer Teil*); geographische Karte der Bodenspur (*unterer Teil*).
(Quelle: B. Knispel/G. Heinzl/Max Planck Institute for Gravitational Physics; GRACE FO data: NASA, GFZ, JPL; map data: SRTM)

Info-Kasten: Das Prinzip der laserinterferometrischen Abstandsmessung

Das Licht eines Lasers unterscheidet sich fundamental von Licht, wie wir es aus dem Alltag kennen. Der Schein der Sonne oder auch der einer herkömmlichen Glühbirne besteht aus vielen Lichtwellen mit unterschiedlichen Wellenlängen (Farben), die zu völlig zufälligen Zeiten ausgesendet werden. Im Gegensatz dazu kann Laserlicht nur aus einer einzigen Wellenlänge bestehen. Außerdem sind die verschiedenen Teile der Welle zueinander in Phase, sie werden also immer zu einem bestimmten Zeitpunkt und nicht zufällig angeregt. Diese Eigenschaften ermöglichen es, dass die Berge und Täler zweier Laserstrahlwellen sich gegenseitig verstärken oder abschwächen können. Dieser Effekt wird als Interferenz bezeichnet.

Bei der laserinterferometrischen Abstandsmessung macht man sich dies zunutze. Im einfachsten Fall wird ein Laserstrahl an einem halbdurchlässigen Spiegel aufgeteilt. Eine Hälfte des Laserstrahls dient als Referenz, während die andere zum Objekt gesendet wird, dessen Abstand gemessen werden soll. Die beiden Laufwege der Strahlen werden Interferometer-Arme genannt. Der Messstrahl wird am Objekt (der sogenannten Testmasse) reflektiert und an einem zweiten halbdurchlässigen Spiegel mit dem Referenzstrahl überlagert. Mithilfe eines Photodetektors misst man nun die Intensität dieser Überlagerung. Ändert das Objekt seinen Abstand, wird dadurch die Weglänge, die der Messstrahl zurücklegen muss, geändert. Dies führt dazu, dass sich die Berge und Täler der Lichtwelle relativ zu denen des Referenzstrahls verschieben und somit die Intensität auf dem Photodetektor geändert wird. Durch eine Kalibrierung auf die Wellenlänge des Laserlichts lässt sich die Intensitätsänderung auf eine Abstandsänderung zurückrechnen. Allerdings ist diese Form

der Messung auf maximale Weglängenänderungen von einer Wellenlänge limitiert, typischerweise etwa 1 Mikrometer, da sich bei Vielfachen der Wellenlänge das Signal ununterscheidbar wiederholt. Im gerade beschriebenen Fall spricht man von homodyner (altgr.: gleich bewegter) Interferometrie, da die Wellen von Mess- und Referenzstrahl die gleiche Frequenz haben. Im Gegensatz dazu wird bei der Heterodyn-Interferometrie mit zwei verschiedenen Frequenzen gearbeitet. Dadurch entsteht auf dem Signal ein Photodetektor eine Schwebung, ähnlich wie bei zwei Musikinstrumenten, die nicht exakt gleich gestimmt sind. Das eigentliche Längensignal wird dabei zunächst von der Schwebung maskiert, weshalb ein größerer technischer Aufwand notwendig ist, um es zu extrahieren. Ebenso ist die Erzeugung und Kontrolle von zwei Laserfrequenzen mit einem Mehr an Technik verbunden. Der Vorteil ist allerdings, dass die absolut messbare Abstandsänderung nicht mehr auf die Länge eines Wellenzuges limitiert ist. Aus diesem Grund hat sich die Heterodyntechnik in der interferometrischen Längemessung bei Satellitenmissionen durchgesetzt, da hier absolute Längeneänderungen im Bereich von Metern bis Kilometern auftreten.

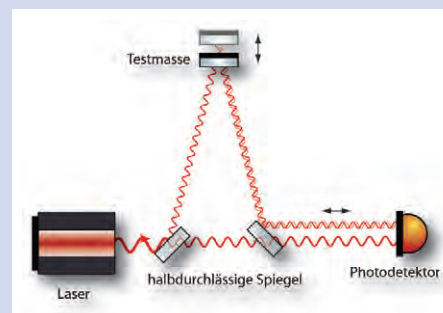


Abbildung
Schematische Darstellung eines einfachen Laserinterferometers.

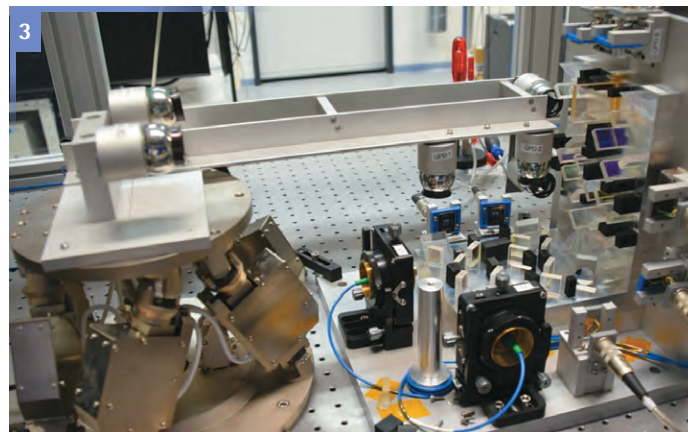
Im Hinblick auf zukünftige Satellitenmissionen bieten die Labore im neuen HITec Gebäude der Leibniz Universität eine optimale Umgebung sowohl für die Entwicklung von Komponenten und Algorithmen für die Laserausrichtung im Weltraum als auch für weitere Untersuchungen der derzeit limitierenden Störfaktoren mit dem Ziel, zukünftige Interferometer unempfindlicher für diese zu machen.

weise auf der sogenannten Heterodyn-Interferometrie (siehe Info-Kasten). Diese ermöglicht es, Abstandsänderungen auf langen Zeitskalen hochpräzise zu messen, während sich die Testobjekte über viele Wellenzüge (also viel mehr als 1 Mikrometer) bewegen. Wie die LISA Pathfinder Mission erstmals eindrucksvoll bewiesen hat, erreichen solche Interferometer im Weltraum Genauigkeiten, die mehr

frequency modulation, DFM). Diese Technik erfordert einen komplexen Auslesealgorithmus, vereinfacht den optischen Aufbau des Interferometers jedoch erheblich, ohne dabei die Vorteile der Heterodyn-Interferometrie aufzugeben. Zur Signalerzeugung wird der Laserstrahl in ein Interferometer mit ungleicher Armlänge geschickt, da sich die Frequenzmodulation bei gleicher Armlänge von Mess- und Referenzstrahl aufheben würde. Gleichzeitig vermisst der längere Arm den Abstand zur Testmasse. Mit derzeit erhältlichen Lasersystemen reichen bereits Armlängenunterschiede von wenigen Zentimetern aus. Dadurch können die Interferometer sehr kompakt als sogenannte Messköpfe aufgebaut werden. Durch die Installation mehrerer Messköpfe lassen sich die verschiedenen Freiheitsgrade eines Objekts auslesen. Zusätzlich wird ein einzelnes, stabiles Referenzinterferometer benutzt, um die Frequenzschwankungen der Messköpfe gegeneinander zu subtrahieren. Dieses Konzept wurde 2015 gemeinsam mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST) in Maryland, USA, entwickelt und dort erstmals experimentell untersucht.

Im Rahmen einer kürzlich an der Leibniz Universität abgeschlossenen Doktorarbeit wurde eine auf Prismen basierte Topologie für die Messköpfe vorgeschlagen. Hierbei wird das gesamte Interferometer mittels einer einzigen optischen Komponente realisiert (siehe Abbildung 4). Die Genauigkeit der DFM Interferometrie in Kombination mit solchen Prismen wurde erprobt, indem zwei Interferometer die Bewegung einer gemeinsamen Testmasse (ein bewegbarer Spiegel) vermaßen. Aus der Kombination der Messsignale von den beiden Seiten des Spiegels kann

Abbildung 3
Optischer Aufbau des Labor-experimentes mit einem Interferometer zur Messung von Bewegungen in sechs Freiheitsgeraden. Links im Bild das mechanische Rotations-Translation-System.
(Quelle: V. Müller/AEI)



Beispielsweise wird derzeit ein Laser-Interferometer getestet, welches die Bewegungen von kommerziell verfügbaren Rotations- und Translationsplattformen im Labor in allen sechs Freiheitsgeraden (drei Raumrichtungen und die drei Drehwinkel) präzise vermessen soll (siehe Abbildung 3), womit die sogenannte tilt-to-length-Kopplung besser quantifiziert werden kann. Die laserinterferometrische Messung von mehreren Freiheitsgeraden ist auch für neue Sensoren von Bedeutung, auf die in den folgenden beiden Abschnitten näher eingegangen wird.

Kompakte optische Testmassen-Auslesung mittels tiefer Frequenzmodulation

Laserinterferometrie für Satellitenmissionen wie GRACE Follow-On, LISA Pathfinder und LISA basiert typischer-

als 100-mal unter der Größe eines Wasserstoffatoms liegen (< 1 Pikometer).

Zukünftige Experimente und Missionen im Bereich der Geodäsie und Gravitationsphysik möchten sich diese Genauigkeiten zunutze machen und mehrere Testmassen und deren Freiheitsgrade erfassen. Die Herausforderung liegt darin, solche Auslesesysteme kompakt und skalierbar zu machen, ohne an Genauigkeit einzubüßen. Dies erfordert neben der Miniaturisierung der optischen Systeme, die Erforschung neuer Interferometer-Techniken, die im Vergleich zur Heterodyn-Interferometrie deutlich einfacher aufgebaut und somit besser skalierbar sind.

Hierfür wurde eine Technik entwickelt, bei der ein einzelner Laserstrahl sehr stark (tief) in seiner Frequenz moduliert wird (engl. *deep*

die Messgenauigkeit bestimmt werden. Ein stabiles Referenzinterferometer wurde ebenfalls entwickelt und vermessen. Ähnlich wie bei LISA Pathfinder wurden für die Experimente alle Komponenten auf eine thermisch stabile Glaskeramik aufgebracht. Die Komponenten wurden präzise vorjustiert und mittels UV-Licht-härtendem Klebstoff fixiert (siehe Abbildung 5). Die bisherigen Messungen zeigen,

Messung von Störkräften mit Hilfe eines Torsionspendels

Die satellitenbasierte laserinterferometrische Abstandsmessung zwischen Testmassen zur Bestimmung von Gravitationsfeldern liefert die wissenschaftlich wertvollsten Daten im sogenannten *drag-free* Modus. Dabei werden die Testmassen von allen Störkräften abgeschirmt und befinden sich im freien Fall; sie

Vorhandensein weitaus stärkerer Kräfte, insbesondere der Erdanziehungskraft. Im Vergleich zu den Bedingungen auf der Erde sind die Störungen im All etwa 10 Größenordnungen kleiner. Angesichts der dominierenden Wirkung der Schwerkraft entlang der Vertikalen ist der beste Ansatz, solche winzigen Kräfte auf der Erde nachzuweisen, Freiheitsgrade in der horizontalen Ebene auszunutzen.

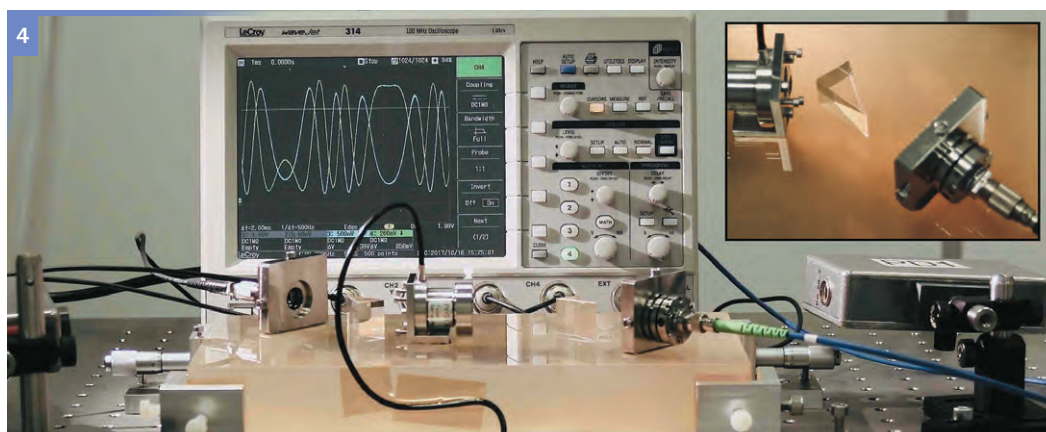


Abbildung 4
Foto des optischen Aufbaus und des auf dem Oszilloskop beobachteten Signals eines kompakten Interferometers zur Auslesung einer Testmasse von zwei Seiten mittels tiefer Frequenzmodulation (Ausschnitt: Messkopf mit Prisma von oben). (Quelle: K.-S. Isleif/AEI)

dass diese kompakten Ausleseverfahren durchaus vergleichbare Genauigkeiten zur konventionellen Heterodyn-Interferometrie erreichen können.

In den HITec Laboren wird diese optische Auslesetechnik nun in verschiedenen Experimenten zur Anwendung gebracht und entsprechend weiter verbessert. Unter anderem werden noch kompaktere Messköpfe entwickelt und auch deren Anzahl soll erhöht werden. Parallel dazu wird an den Auslesesystemen (sogenannten Phasenmetern) und den dafür relevanten Algorithmen geforscht. Damit soll der Weg geebnet werden, diese Techniken in zukünftigen Missionen zur Anwendung zu bringen. Allerdings sind viele weitere Untersuchungen notwendig, um ungewollte Störeinflüsse zu minimieren und die Weltraum-Tauglichkeit zu gewährleisten.

sind »schwerelos«. Dazu müssen die Satelliten, innerhalber der Testmassen schweben, diesen folgen und durch sanften Schub die Kräfte, die von außen auf sie einwirken, kompensieren, sodass die Testmassen stets zentriert bleiben. Im Vergleich zum umgekehrten Modus, bei dem die Testmassen aktiv zentriert gehalten werden, ist der *drag-free* Modus experimentell anspruchsvoller. Die messbaren Daten sind dafür aber auch frei von den Störungen, die bei der aktiven Kontrolle auftreten würden.

Im Satelliten müssen die Testmassen sorgfältig vor allen Störkräften wie etwa elektrostatischen Oberflächeneffekten, Magnetfeldern oder Gasdämpfungseffekten geschützt werden. Im Labor ist die größte Herausforderung bei der Entwicklung und Charakterisierung der Testmassen und deren Auslesesystemen das

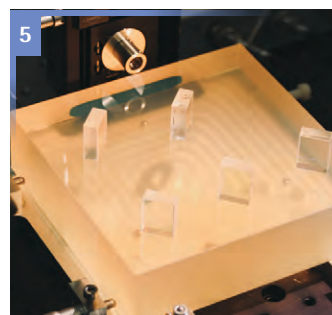
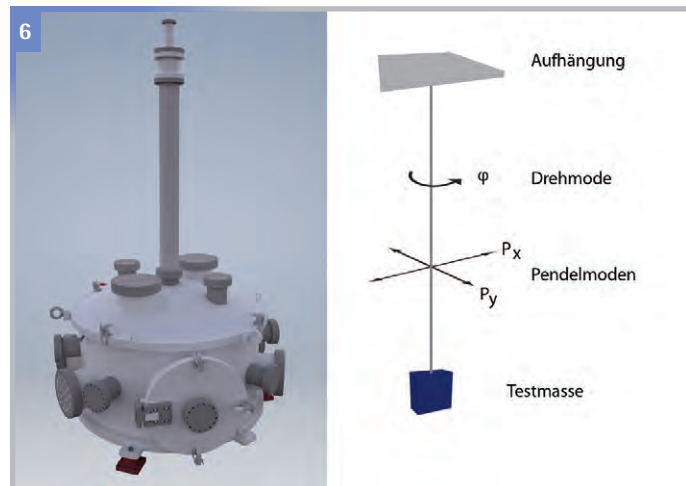


Abbildung 5
Foto eines Referenzinterferometers, welches in einer Mach-Zehner-Konfiguration realisiert und mithilfe von UV-Licht-härtendem Klebstoff auf einer Glasplatte mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten fixiert wurde. (Quelle: K.-S. Isleif/AEI)

Im neuen HITec-Gebäude wird dafür ein Torsionspendel gebaut, auch Dreh- oder Torsionswaage genannt. Ein Torsionspendel ist das geeignetste Werkzeug, um »Schwerelosigkeit« in der Horizontalen zu simulieren und erlaubt Messungen auf Femto-Newton-Niveau, wie sie für die Entwicklung und Erprobung neuartiger optischer Gravitationssensoren und Komponenten für zukünftige *drag-free* Weltraummissionen erforderlich sind. Unser Ziel ist es, eine extrem kraftarme Umgebung in der horizon-

Abbildung 6
3D-Darstellung der Vakuumkammer. Die Kammer besteht aus einer Bodenplatte, einem zylindrischen Mittelteil und einem Deckel mit Rohraufsatz zum Aufhängen der Torsionsfaser. Die Kammer hat zwei Türen und eine Vielzahl von Anschlussmöglichkeiten. Diese werden für die Installation von Pumpen, Druckmessgeräten und Durchführungen elektrischer und optischer Signale für den Betrieb der geplanten Experimente benötigt.



Rechts: Prinzipskizze des Torsionspendels. Die dünne Faser ist fest mit der Aufhängung verbunden. Eine Testmasse hängt am Ende der Faser. Die Pendelmoden müssen möglichst gut unterdrückt werden, da sich das eigentliche Mess-Signal in der Drehmode befindet.

(Quelle: V. Händchen, M. Mehmet/AEI)

talen Ebene zu erreichen, so dass wir die kleinen Störkräfte auf Testmassen untersuchen und rauscharme optische Sensoren, wie zum Beispiel die auf DFM basierenden Messköpfe, testen und weiterentwickeln können.

Das Prinzip unseres Torsionspendels ist einfach. Eine Test-

masse wird an einer 1 Meter langen und 50 μm dünnen Wolfram-Faser in einer Vakuumkammer aufgehängt (siehe Abbildung 6). Anschließend misst man die durch Störkräfte verursachte Drehung um die vertikale Achse. Bei entsprechender Materialauswahl und Pendelkonstruktion kann sich die aufgehängte Testmas-

se nahezu frei drehen. Zur hochpräzisen Messung dieser Bewegungen sollen spezielle Laserinterferometer und eine aktive Stabilisierung der Pendelaufhängung und der Pendelschwingung entwickelt werden.

Die Anforderungen an den experimentellen Aufbau und die Laborumgebung sind dabei sehr hoch. Unter anderem wird eine gute mechanische und thermische Stabilität über mehrere Tage benötigt, veränderliche Magnetfelder müssen abgeschirmt werden und der Betrieb muss bei sehr geringem Druck (Vakuum von 10^{-8} bis 10^{-9} mbar) stattfinden. Das neue HITec Labor bietet mit seinem speziellen Fundament, konstanten klimatischen Bedingungen und einer Infrastruktur, die das Auslagern von vibrierenden Geräten aus dem Labor erlaubt, optimierte Bedingungen für dieses Experiment.



Dr. Moritz Mehmet

Jahrgang 1978, arbeitet am MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut). Sein Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung und Charakterisierung neuer Sensoren für die interferometrische Messung der Bewegung von Testmassen und die Erzeugung von gequetschtem Licht für erdgebundene Gravitationswellendetektoren. Kontakt: moritz.mehmet@aei.mpg.de



Dr. Katharina-Sophie Isleif

Jahrgang 1989, promovierte 2018 an der Leibniz Universität und arbeitet am Institut für Gravitationsphysik in der Abteilung Weltrauminterferometrie. Ihre Forschungsschwerpunkte sind die Miniaturisierung von Interferometern, neue Interferometertechniken und die Charakterisierung optischer Phasenreferenzen für LISA. Kontakt: katharina-sophie.isleif@aei.mpg.de



Dr. Vitus Händchen

Jahrgang 1987, ist Postdoc in der Abteilung Weltrauminterferometrie am Institut für Gravitationsphysik. Er arbeitet an der Realisierung einer hochsensiblen Torsionswaage für die Charakterisierung neuer interferometrischer Sensoren. Kontakt: vitus.haendchen@aei.mpg.de



Dr. Vitali Müller

Jahrgang 1986, arbeitete während und nach seinem Physik-Studium an der Leibniz Universität und am MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) für Gravitationsphysik in der Abteilung Weltrauminterferometrie mit Schwerpunkt »gravimetrische Satellitenmissionen« wie GRACE Follow-On. Kontakt: vitali.mueller@aei.mpg.de



Dr. Oliver Gerberding

Jahrgang 1986, arbeitet seit 2015 als Postdoc am MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in der Abteilung Weltrauminterferometrie. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt in der Erforschung neuer Interferometrie Techniken und in der Entwicklung kritischer Technologien für den weltraumbasierten Gravitationswellendetektor LISA. Kontakt: oliver.gerberding@aei.mpg.de