

ASTROPHYSIK

Wellenfang im Weltraum

2035 soll das Gravitationswellen-Observatorium LISA seinen Betrieb im All aufnehmen.

Hans-Georg Grothues und Jens Reiche

Im Jahr 2015 registrierten bodengebundene Observatorien erstmals Gravitationswellen bei hohen Frequenzen. Ab 2035 soll LISA das Spektrum zu niederfrequenten Gravitationswellen unterhalb von 1 Hz erweitern. Dieses größte jemals betriebene Weltraumobservatorium soll auf diese Weise die energiereichsten Ereignisse im All beobachten und charakterisieren. Dies erfordert Laserinterferometrie höchster Empfindlichkeit und Präzision in einer dynamischen Konfiguration aus drei Satelliten, die 2,5 Millionen Kilometer voneinander entfernt sind. In der Vorbereitung geht es darum, alle relevanten Störquellen zu kennen und bestmöglich zu unterdrücken.

Im Februar 2016 verkündete die LIGO-Kollaboration nach sorgfältiger Überprüfung und Analyse ihrer Messdaten den ersten direkten Nachweis eines Ereignisses von Gravitationswellen durch die beiden LIGO-Interferometer (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Aufgezeichnet hatten sie das Ereignis am 14. September 2015 [1]. Von Dezember 2015 bis Mitte 2017 erprobte die Technologiemission LISA Pathfinder die Schlüsseltechnologien für die Laser Interferometer Space Antenna (LISA, **Abb. 1**). Diese wird komplementär zu den bodengebundenen Observatorien wie LIGO, Virgo und deren Nachfolger niederfrequente Gravitationswellen mit Frequenzen bis maximal 1 Hz nachweisen, die von der Erdoberfläche

aus nicht zu beobachten sind. Eine Abschätzung der charakteristischen Frequenzen von Gravitationswellen ergibt $f_{\text{GW}} \sim 10^4 \text{ Hz } (M_{\odot} / M)$ mit der Sonnenmasse M_{\odot} ($2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$) und der Masse M der Quelle der Gravitationswelle [2]. Typische Frequenzen, die LIGO und Virgo nachweisen können, liegen zwischen 30 Hz und einigen kHz; bei LISA werden es einige 10^{-5} bis etwa 1 Hz sein.

Die mit Laserinterferometern nachweisbaren Frequenzen sind wesentlich durch die Armlänge sowie die internen Rausquellen des Instruments und die seiner Umgebung bestimmt (**Tabelle**). Daher beobachten boden- und weltraumgebundene Observatorien Quellen sehr unterschiedlicher Massen und damit unterschiedlicher Natur. Während LIGO und Virgo Gravitationswellen erfassen, die durch stellare Massen hervorgerufen werden, sind es bei LISA auch Gravitationswellen von Quellen mit Massen von mehr als 1000 bis zu einigen 10^7 Sonnenmassen. LISA erweitert somit das Beobachtungsfenster für Gravitationswellen und ermöglicht zudem eine Triangulation, um die Richtung von Quellen, die permanent Gravitationswellen abstrahlen, präzise zu bestimmen. Damit ist oberhalb von etwa 10^{-4} Hz das gesamte Spektrum der Gravitationswellen abgedeckt. Die Lücke bei wenigen Hz sollen das geplante Einstein-Teleskop und die vorgeschlagene DECIGO-Mission, die ähnlich wie LISA konzipiert ist, schließen [3, 4] (**Tabelle**).

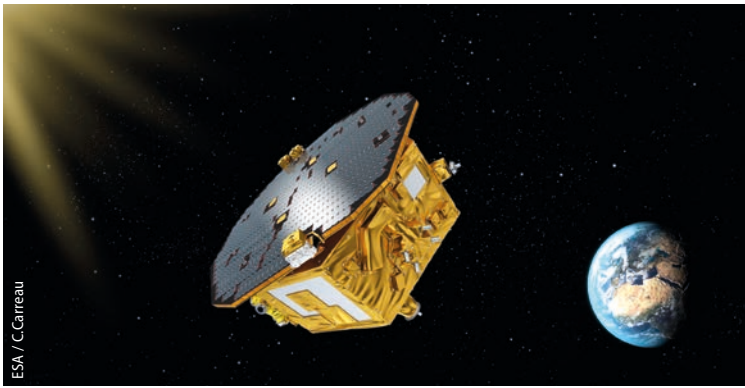


Abb. 1 LISA Pathfinder hat während seines Betriebs nahe dem Lagrange-Punkt L1 von Sonne und Erde Schlüsseltechnologien für LISA bei nahezu homogener Gravitation, konstanten Temperaturen und geringstmöglichen Störungen erprobt.

Eine lange Vorgeschichte

Die ersten Ideen zu weltraumgestützten Gravitationswellen-Observatorien stammen aus den 1970er-Jahren. 1985 gab es mit LAGOS (Laser Antenna for Gravitational-radiation Observation in Space) einen ersten Vorschlag, mittels Laserinterferometrie zwischen vier Sonden im Abstand von einer Million Kilometern zueinander nach niederfrequenten Gravitationswellen (einige 10^{-5} bis etwa 1 Hz) zu suchen. Eine Mission sehr ähnlich LISA schlug eine Gruppe europäischer Wissenschaftler unter Führung von Karsten Danzmann bereits 1993 vor [5]. Zur selben Zeit ist mit SAGITTARIUS in den USA ein ähnliches Konzept entwickelt worden. Dabei sollten vier bzw. sechs Satelliten Interferometer von fünf bzw. einer Million Kilometer Seitenlänge aufspannen. Beide Vorschläge wurden schließlich zu einem gemeinsamen europäisch-amerikanischen Konzept unter dem Namen LISA vereinigt.

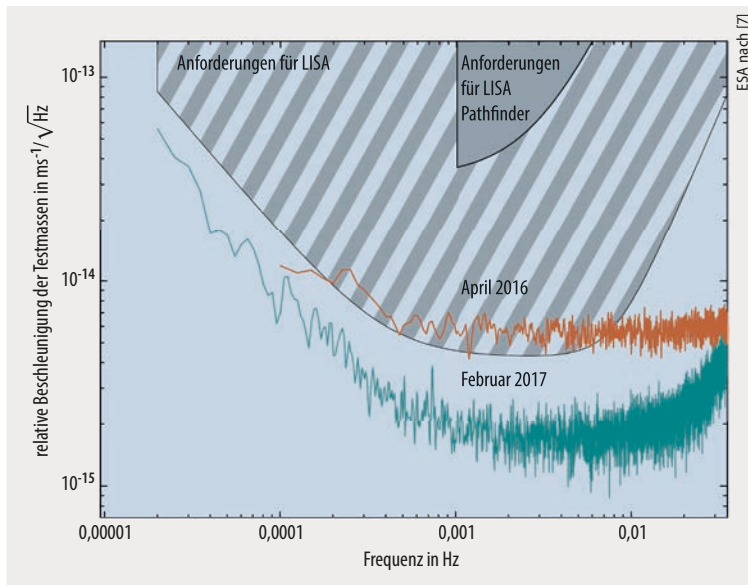


Abb. 2 Die Restbeschleunigungen der frei fliegenden Testmassen bei LISA Pathfinder verringerten sich zwischen April 2016 und Februar 2017 deutlich, da die Ausgasung der Sonde die Druckfluktuationen im Restgas um die Testmassen minimierte. Damit wurden die Anforderungen für LISA vollständig erfüllt und die um einen Faktor 10 geringeren angedachten Erwartungen an LISA Pathfinder übertroffen.

1995 wählte die ESA LISA als Kandidat für eine der „Cornerstone-Missionen“ aus, ab 1997 in enger Kooperation mit der NASA und einer Reduktion auf drei Sonden. In den 1990er-Jahren identifizierten Missionsstudien einige kritische Technologien, die sich auf der Erde aufgrund der Schwerkraft und weiterer Störeffekte nicht oder nur unzureichend testen ließen. Dazu zählten das Inertialsystem mit seinen frei fliegenden Testmassen (Spiegel im Interferometer) und den äußerst fein regelbaren Steuertriebwerken mit sehr geringer Schubkraft im Bereich von μN . Daher entstand 1998 die Idee einer vorbereitenden Mission, aus der schließlich LISA Pathfinder hervorging.

Diese Mission, die mehr als 600 Millionen Euro gekostet hat, demonstrierte die technische Machbarkeit von LISA. Getestet wurden vor allem die hochgenaue Lageregelung, das Inertialsensorsystem und die hochpräzise Laserinterferometrie. Dabei gelang es bereits, eine Restbeschleunigung der Testmassen von etwa $2 \times 10^{-15} \text{ m s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$ bei einigen mHz zu erreichen. Diese Störbeschleunigung bestimmt wesentlich die Empfindlichkeit des Interferometers gegenüber Gravitationswellen. Die erreichten Werte liegen sogar deutlich unterhalb der Anforderungen von LISA (**Abb. 2**) [6, 7, 8]. Seit 2017 ist LISA nun als L3-Mission der ESA zur Entwicklung und Implementierung vorgesehen.

Im September 2015 registrierten die LIGO-Detektoren das erste Gravitationswellen-Ereignis, ausgelöst durch die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher von stellaren Massen im fernen Universum [1, 9]. GW170817 war im August 2017 das erste beobachtete Ereignis, bei dem zwei Neutronensterne verschmolzen sind [10, 11]. Hierbei gelang es erstmals mittels gezielter Nachbeobachtungen mit erdgebundenen und Weltraumteleskopen, das gesamte elektromagnetische Spektrum vom Gamma- bis zum Radiobereich zu untersuchen (Multi-Messenger-Astronomie). Bis November 2021 fanden sich mehr als 90 weitere Kandidaten für Gravitationswellen-Ereignisse; mehr als 15 davon wurden bisher bestätigt und in größerem Detail charakterisiert [12 – 14, 18].

Gravitationswellen und Rauschquellen

Gravitationswellen entstehen durch (sehr schnelle) Änderungen des Quadrupolmoments Q einer Massenverteilung. Die Amplitude h (relative Längenänderung $\Delta L/L$ eines Maßstabs) beträgt $h = \Delta L/L \sim (1/r) \partial^2 Q / \partial t^2$, wobei r der Abstand des Beobachters von der Quelle ist. Die Wellen breiten sich als Schwingungen der Raumzeit mit Lichtgeschwindigkeit aus. Da der Raum der Verformung durch die Wellen jedoch erheblichen Widerstand entgegengesetzt, sind die Amplituden der angeregten Schwingungen äußerst klein und klingen umgekehrt proportional zur Entfernung ab. Amplituden typischer Quellen in kosmischen Entfernungen betragen daher für Beobachter auf der Erde nur etwa 10^{-21} [1]. Auf einer Messstrecke von vier Kilometern, entsprechend derjenigen der LIGO-Detektoren, ergeben sich Längenänderungen von nur wenigen 10^{-17} m. Dies entspricht dem Hundertstel des Protonendurchmessers!

Diese winzigen Längenänderungen sind bisher nur mittels hochempfindlicher Laserinterferometrie messbar

(Abb. 3). Das grundlegende Problem beim Nachweis – am Boden und im Weltraum – besteht darin, die Signale aus einem Hintergrund vielfältiger Rauschquellen herauszufiltern. Dazu existieren verschiedene Suchmethoden (Datenpipelines), die zunächst keine weitergehenden Annahmen über die Form des Signals, seine Quelle, deren Richtung sowie über den Zeitpunkt des Eintreffens erfordern. Schließlich erfolgt eine detaillierte Rekonstruktion der Form des Signals, die Bestimmung der Quellenparameter (z. B. Massen, Entfernung und Richtung der Quelle) und deren astrophysikalische Interpretation mithilfe einer umfangreichen Datenbank simulierter Modelle der Wellenform.

Zu den wichtigsten Rauschquellen zählen bei LISA neben mechanischen und Temperatureffekten die Brownsche Molekularbewegung der Restgase im Vakuum der Sonden, Frequenzschwankungen des Lasers und dessen statistisches Photonenrauschen (Schrotrauschen) an den Sensoren. Eine bedeutende Rolle bei einer Konfiguration wie LISA spielt auch die Einkopplung von Winkelinstabilitäten in optische Pfadlängenvariationen (Tilt-to-Length Coupling). Zudem sind die variable Eigengravitation der Raumsonden (verursacht etwa durch verbrauchten Treibstoff) und induzierte Magnetfelder zu berücksichtigen. Verschiedene Maßnahmen der Rauschunterdrückung helfen, die Störungen im Interferometer zu minimieren. Beispiele sind die Verwendung hochstabiler Laser und eine aktive Kompensation mechanischer, nicht-gravitativer Störungen durch eine hochempfindliche Lageregelung. Schließlich überlagert ein intrinsischer und nicht auflösbarer Gravitationswellen-Hintergrund, verursacht durch tausende kurzperiodische Doppelsterne in unserer Galaxis, die Signale.

Extreme Quellen der Erkenntnis

LISA erlaubt es beispielsweise, den Ursprung, das Wachstum und die Entwicklung von Doppelsystemen massereicher Schwarzer Löcher von einigen 10^5 bis zu einigen $10^7 M_{\odot}$ zu beobachten (Abb. 4). Insbesondere ist es möglich, die Verschmelzung solcher Doppelsysteme im überschaubaren Kosmos und damit über das gesamte Weltalter zu analysieren. Darüber hinaus wird LISA nach den „Samen“ (Seeds) für die supermassereichen Schwarzen Löcher in den Zentren von Galaxien suchen. Dazu wird die Mission nach Verschmelzungen Schwarzer Löcher mit Massen zwischen einigen 10^3 und $10^5 M_{\odot}$ im frühen Universum bis etwa 500 Millionen Jahre nach dem Urknall (entsprechend einer kosmologischen Rotverschiebung $z = 10 \dots 15$) Ausschau halten. Zusammen mit der Kosmologie und Beobachtungen des Universums bei elektromagnetischen Wellen ergibt dies ein umfassendes Bild des Ursprungs, des Wachstums und der Verschmelzungsgeschichte von supermassereichen Schwarzen Löchern und mithin der Entwicklung ihrer „Heimatgalaxien“ und des Universums als Ganzem.

Für die Existenz Schwarzer Löcher im mittleren Massenbereich zwischen einigen 100 bis etwa $10^5 M_{\odot}$ gibt es bisher nur indirekte Hinweise. Diese resultieren aus der Beobachtung von Gasbewegungen und Akkretionsscheiben in deren Umgebung. LISA wird auch diese Objekte, falls sie existieren, erfassen und charakterisieren. Eine weitere

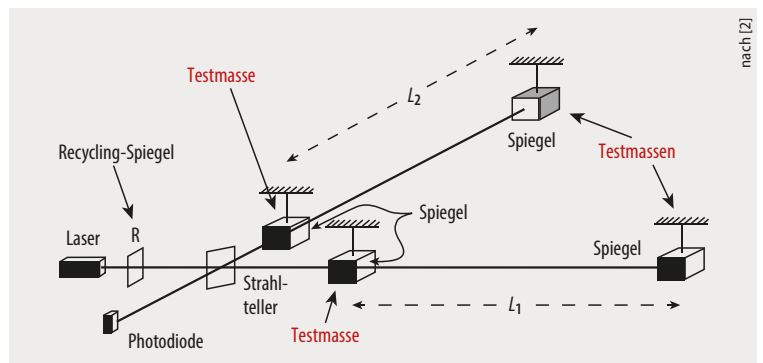


Abb. 3 Bodengebundene Detektoren weisen Gravitationswellen mittels Laserinterferometrie mit Strahlrecycling nach. Das Strahlrecycling sorgt dafür, dass der größte Teil des Lichts, das durch die halbdurchlässigen Spiegel entweicht, wieder in das System zurückreflektiert und so die Effizienz des Systems gesteigert wird.

Klasse von Messobjekten sind die „Extreme Mass Ratio Inspirals“ (EMRIs, Abb. 4). Bei diesen Quellen lassen sich Schwarze Löcher mit geringen Massen oder andere stellare Objekte beim Einspiralen in sehr viel massereichere Schwarze Löcher beobachten. Ein weiteres Ziel besteht darin, den Ursprung der anscheinend recht häufigen, binären Schwarzen Löcher mit stellaren Massen zu verstehen. Diese sollten sich Monate und Jahre vor einer Verschmelzung durch das Messband von LISA und hinein in das von erdgebundenen Gravitationswellen-Observatorien bewegen (Abb. 4). Damit lassen sich die Kenngrößen dieser Systeme mit sehr hoher Genauigkeit bestimmen und präzise Voraussagen für Nachfolgebeobachtungen vom Boden mittels hochfrequenter Gravitationswellen machen sowie für Simultan- und Nachfolgebeobachtungen im elektromagnetischen Spektrum.

Ein gänzlich anderer Quellentyp sind kompakte Doppelsystemen in unserer Galaxis, überwiegend Weiße

Gravitationswellen-Detektoren

| Interferometer | Armlänge in km | Frequenzen in Hz | Beteiligte Länder / Institutionen |
|--|------------------------|---------------------------------|--|
| LIGO / Virgo ¹⁾ | 3 / 4 | $\sim 30 \dots 5 \cdot 10^3$ | USA / Italien (in Betrieb) |
| Pulsar Timing Arrays ¹⁾ (EPTA, PPTA, NANO-Grav) | $\sim 10^{16}$ (kpc) | $\sim 10^{-9} \dots 10^{-7}$ | Europa / Australien / USA (in Betrieb) |
| KAGRA ¹⁾ | 3 | $\sim 10 \dots 5 \cdot 10^3$ | Japan (Inbetriebnahme) |
| Einstein-Teleskop / Cosmic Explorer ¹⁾ | 10 / 40 | $\sim 2 / 5 \dots 5 \cdot 10^3$ | Europa / USA (geplant) |
| LISA ²⁾ | $2,5 \cdot 10^6$ | $\sim 2 \cdot 10^{-5} \dots 1$ | ESA / NASA (in Entwicklung) |
| Taiji ²⁾ | $\sim 3 \cdot 10^6$ | $\sim 10^{-4} \dots 1$ | China (geplant / in Entwicklung) |
| TianQin ²⁾ | $\sim 1,7 \cdot 10^5$ | $\sim 10^{-4} \dots 0,1$ | China (geplant / in Entwicklung) |
| DECIGO ²⁾ | 10^3 | $\sim 10^{-2} \dots 10^2$ | Japan (geplant) |
| ALIA ²⁾ | $5 \cdot 10^5$ | $\sim 10^{-4} \dots 10$ | USA / UK (Vorschlag) |
| μ Ares ²⁾ | $2 \dots 4 \cdot 10^8$ | $\sim 10^{-6} \dots 0,1$ | ESA Voyage 2050 (Vorschlag) |

1) bodengebundenes Observatorium; 2) Weltraumobservatorium

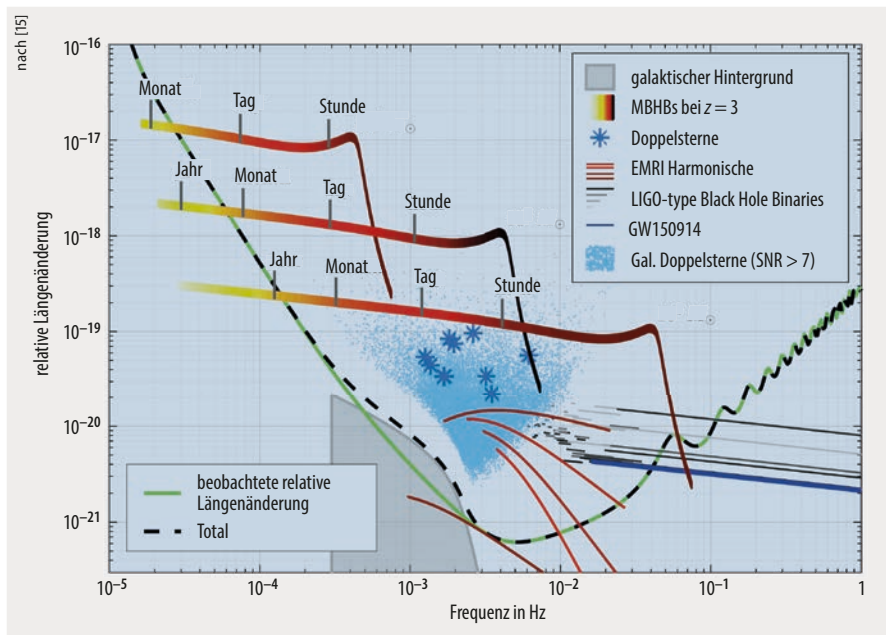


Abb. 4 LISA kann zahlreiche Quellen von Gravitationswellen beobachten. Die Empfindlichkeit des Instruments ist gestrichelt gezeigt. Dargestellt sind neben dem galaktischen Hintergrund (grau) und kurzperiodischen Doppelsternen in unserer Galaxis (blaue Punkte und Sterne) die zeitlichen Entwicklungen von Doppelsystemen aus massiven Schwarzen Löchern (MBHBs – Massive Black Hole Binaries) sowie das Einspiralen von Objekten geringerer Masse in massereiche Schwarze Löcher (EMRIs – Extreme Mass Ratio Inspirals). Außerdem ist die Entwicklung der ersten nachgewiesenen Quelle GW150914 gezeigt (blaue Linie), die vor langer Zeit aus dem Frequenzband von LISA heraus- und in das von LIGO hineingelaufen ist. Eine ähnliche Entwicklung zeigen die roten und grauen Linien.

Zwerge, die Umlaufzeiten von Minuten bis Stunden besitzen. LISA wird voraussichtlich etwa 25 000 davon als individuelle Systeme nachweisen können. Hinzu kommt ein nicht in individuelle Quellen auflösbarer Hintergrund (Abb. 4). Diese Systeme erlauben es, die Entstehung und Entwicklung der kompakten Objekte im Detail nachzuvollziehen. Einige der kurzperiodischen Doppelsterne sind gut aus elektromagnetischen Beobachtungen bekannt und können daher zur Kalibration dienen. Aus ihrer bekannten Bahnperiode P folgt eine charakteristische und stabile Gravitationswellen-Frequenz $f_{GW} = 2/P$. Darüber hinaus wird LISA maßgebliche Erkenntnisse zur Physik von Schwarzen Löchern, zur Allgemeinen Relativitätstheorie in sehr starken Gravitationsfeldern, zur Natur und Ausbreitung von Gravitationswellen sowie zu einer unabhängigen Bestimmung der Hubble-Konstanten liefern. Schließlich könnte LISA einen stochastischen Hintergrund von Gravitationswellen entdecken, der im frühen Universum noch vor Aussendung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes entstanden ist.

Eine komplexe Mission

Entscheidend für den Erfolg von LISA wird es sein, möglichst alle Störungen im Messprozess auszuschalten oder zu minimieren und die verschiedenen Komponenten dieses Rauschens so zu charakterisieren, dass sie in der Datenaufbereitung zuverlässig zu berücksichtigen sind. Die Satelliten von LISA werden ein Laserinterferometer mit etwa 2,5 Millionen Kilometer Armlänge bilden, aufgespannt durch drei Sonden an den Ecken eines nahezu gleichseitigen Dreiecks (Abb. 5). Jede der Sonden enthält nahezu kräftefrei schwebende Testmassen, die mit Restbeschleunigungen von wenigen $10^{-15} \text{ m s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$ Geodäten im Raum-Zeit-Kontinuum folgen. LISA lässt sich als drei miteinander gekoppelte Laserinterferometer mit um 60° zueinander geneigten Armen auffassen. Diese erlauben es, die Pfadlängenvariationen ihrer Arme, hervorgerufen durch Gravitationswellen, zu bestimmen. Wichtig für die

Auslegung des Systems ist die „Atmung“ der Konfiguration, also die Variation des Dreiecks infolge der Bahndynamik. Dabei variieren die Dreieckswinkel im Laufe des einjährigen Umlaufs um die Sonne um bis zu ± 1 Grad und die Armlänge um etwa $\pm 35\,000$ km. Dies erfordert eine aktive Kompensation durch ein Teleskop-Pointing (dazu unten mehr), um die Interferometerverbindungen aufrecht zu erhalten, sowie eine aufwändige Nachbereitung der Messsignale.

An Bord jeder Sonde werden sich zwei Teleskope mit etwa 30 cm Öffnung befinden, die als Sender und Empfänger des Lasersignals dienen. Deren Ausrichtungen passen sich aktiv an die sich ändernde Dreieckskonfiguration an (Abb. 6). Jedem Teleskop ist eine Testmasse aus einer Gold-Platin-Legierung zugeordnet, wie sie bereits bei LISA Pathfinder zum Einsatz gekommen sind. Diese würfelförmigen Testmassen von 46 mm Seitenlänge und rund 2 kg Masse (deren genaue Kenntnis spielt bei den Messungen keine Rolle) sind mit einer hochreflektierenden Goldbeschichtung versehen. Sie stellen analog zu bodengebundenen Interferometern die Spiegel an den Enden der Interferometerarme dar (Abb. 3). Die Testmassen werden während des Starts durch einen Haltemechanismus gesichert, der zu Beginn des Betriebs die Testmasse äußerst fein kontrolliert freigibt und später bei Bedarf wieder einfängt [8].

Die während des Betriebs in ihrem Gehäuse frei schwebenden Massen lassen sich mittels eines kapazitiv arbeitenden Inertialsensorsystems in ihrer Bewegung und Ausrichtung manipulieren. Dies schränkt die freie Bewegung auf einen Freiheitsgrad entlang der optischen Achsen des Interferometers ein, die allein für den Nachweis von Gravitationswellen relevant ist. Die störende elektrostatische Aufladung der Testmassen, etwa durch kosmische Strahlung, lässt sich mittels UV-Licht berührungslos kontrollieren und minimieren. Die äußeren Störungen auf die Sonden werden wie bei LISA Pathfinder mithilfe eines „Drag-Free Attitude Control Systems“ (DFACS) und μN -Triebwerken kompensiert. Diese mit Stickstoff betriebenen Kaltgas-Triebwerke

kamen auch bei der Astrometrie-Mission Gaia zum Einsatz. Deren Schubstabilität im Sub- μN -Bereich erlaubt es, die Änderungen der interferometrisch gemessenen, äußeren Störkräfte auf die Testmassen hinreichend zu kompensieren und auszuregeln.

Über die optische Bank eines Teleskops wird der Laserstrahl eines voll redundanten Lasersystems (Nd:YAG, 1064 nm) mit einer Ausgangsleistung von etwa 2 W in das interferometrische Messsystem eingekoppelt. Die hochgenaue Messung der Abstandsänderungen zwischen den entfernten, entlang der Sichtlinie eines Interferometerarms frei fallenden Testmassen an Bord zweier Sonden erfolgt in drei Teilmessungen zwischen Testmassen und optischen Bänken bzw. den optischen Bänken zweier Sonden (Abb. 6). Die typischen Abstandsänderungen zwischen den Testmassen eines Arms beim Durchgang einer Gravitationswelle liegen bei nur etwa 10^{-12} bis 10^{-9} m! Die maximale Empfindlichkeit erreicht LISA bei Frequenzen von 10^{-4} bis 1 Hz (Abb. 4). Die um viele Größenordnungen größere Atmung der Konstellation über Monate liegt damit außerhalb des Messbandes.

Die ungleichen Armlängen der Interferometer-Konfiguration und die Relativbewegung der Sonden zueinander während der Messungen (einige m/s) erfordern eine Heterodyn-Interferometrie mit unabhängiger Auslesung der Phasendifferenzen jedes Arms, um die notwendige Messgenauigkeit der Phasenänderungen ($\sim 10^{-5}$ Zyklen) zu erreichen. Insbesondere gilt es, die Laufzeit- bzw. Abstandsdifferenzen in den Armen untereinander über eine Phasenmodulation des Laserlinks zu messen und exakt zu korrigieren. Auf ähnliche Weise sind das differenzielle Phasenrauschen und die Offsets der Uhren jeweils zweier Sonden zu bestimmen. Damit lassen sich das dominierende Laserfrequenzrauschen im Signal sowie das Phasenrauschen der Uhren an Bord der Sonden messen und in der Nachbearbeitung am Boden kompensieren (Time Delay Interferometry, TDI) [16, 17]. Die Heterodyn-Frequenzen (Schwebungsfrequenzen) liegen bei 2 bis 20 MHz, abhängig von der Doppler-Verschiebung durch die orbitale Drift der Sonden, mit zusätzlichen Modulationsseitenbändern bei 2,4 GHz. Erst die TDI macht die wesentlich schwächeren Gravitationswellen-Signale „sichtbar“.

Schließlich lässt sich die Richtung von Quellen, die zumindest über einige Wochen zu beobachten sind, durch Ausnutzen der Rotation der Interferometerkonfiguration bestimmen. Über eine Entfernung von 2,5 Millionen Kilometer erreichen trotz der sehr guten Fokussierung des Laserstrahls nur noch wenige 100 pW an Laserleistung das Teleskop der empfangenden Sonde. Dies entspricht der scheinbaren Helligkeit eines schwachen, mit bloßem Auge gerade noch erkennbaren Sterns, der jedoch bei einer direkten Rückreflexion weit unter die Nachweisgrenze des empfangenden Teleskops abgeschwächt würde. Daher wird der Strahl nicht direkt reflektiert, sondern ein Transponder schickt einen phasengekoppelten, „frischen“ Strahl zurück.

Herausfordernd, aber machbar

Die technische Machbarkeit von LISA, insbesondere der nahezu störungsfrei schwebenden Testmassen, hat LISA Pathfinder demonstriert. Dennoch werden bis zum Start von LISA noch einige Herausforderungen technologischer und organisatorischer Art zu meistern sein. So ist sicherzustellen, dass nach dem Start die Interferometerkonfiguration eingenommen wird und die Laserverbindungen über die bisher nie dagewesene Entfernung etabliert werden. Bei LISA Pathfinder wurde „lediglich“ die Bewegung zweier rund 40 cm voneinander entfernter Testmassen entlang von Geodäten und deren Abweichungen davon vermessen. Weitere Bausteine der Laserinterferometrie zwischen Satelliten demonstrierte 2018 die amerikanisch-deutsche Mission GRACE Follow-On. Zu den kritischen Technologien, die trotz weitgehender Vorarbeiten noch im Detail zu untersuchen sind, gehören auch die Teleskopnachführung, die Phasenmessung und die kapazitive Kontrolle der Testmassen mithilfe einer sehr rauscharmen Elektronik, die Entwicklung der Lasersysteme mit entsprechender Leistung und die kompakten optischen Bänke mit vielen Elementen sowie der „Gravitational Reference Sensor“ zur Manipulation der Testmassen inklusive der Ladungskontrolle. Auch das DFACS ist noch weiterzuentwickeln. Mit Ausnahme der Teleskopnachführung lässt sich dabei auf wesentliche Erkenntnisse aus der Entwicklung von LISA Pathfinder zurückgreifen.

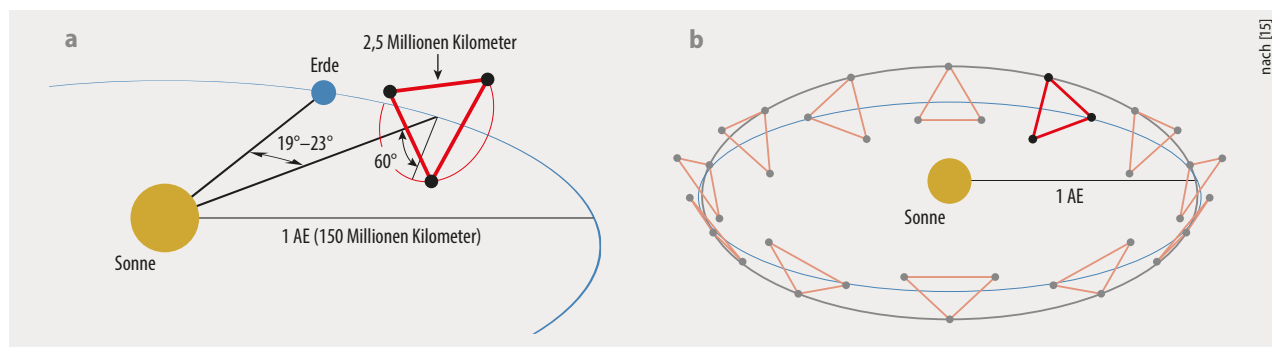


Abb. 5 LISA besteht aus drei baugleichen Sonden, die in einem (nahezu) gleichseitigen Dreieck angeordnet sind. Diese Konfiguration ist um 60 Grad gegen die Erdbahn geneigt und folgt der Erde in ihrem Umlauf um die Sonne in einem Abstand von etwa 50 bis 65 Millionen Kilometer (a). Dabei rotiert sie während des einjährigen Umlaufs mit der Erde um die Sonne einmal um sich selbst (b) und driftet infolge der Bahndynamik langsam von der Erde fort. Die Startmasse der Konfiguration wird rund 7200 kg betragen, bei Abmessungen einer Sonde von etwa $1,1 \times 4,8 \times 3,0 \text{ m}^3$.

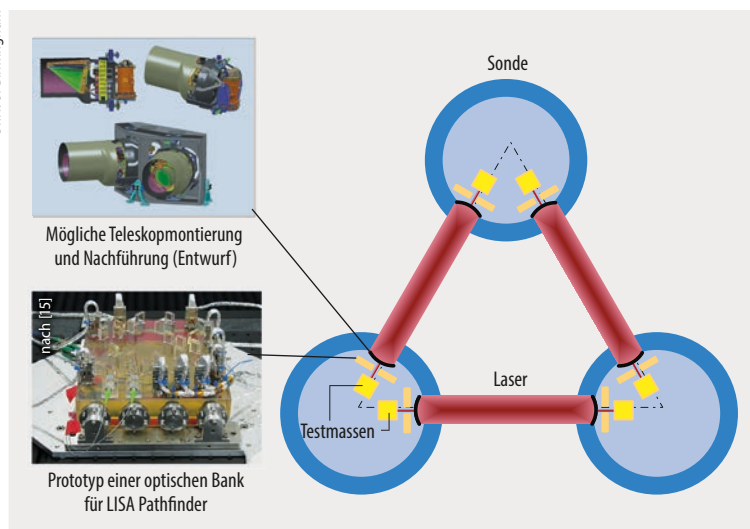


Abb. 6 Die Interferometrie in den drei LISA-Armen besteht jeweils aus drei separaten Messungen, um daraus die Variationen aller Armlängen beim Durchlauf von Gravitationswellen zu bestimmen. Innerhalb jeder Sonde erfolgt eine Messung über wenige Dezimeter zwischen der frei schwebenden Testmasse und der optischen Bank. Die hochgenaue Messung der Phasen- bzw. Abstandsschwankungen im langen Arm findet jeweils zwischen den optischen Banken zweier Sonden statt. Daraus leitet sich mittels „Time Delay Interferometry“ die Gravitationswellen-Amplitude ab.

Der Weg zur Mission

Herausfordernd ist auch die Organisation eines großen Konsortiums, das verantwortlich ist für die Entwicklung und den Bau des Messinstruments. Die unterschiedlichen Partner, also wissenschaftliche Institute, Unternehmen der (Raumfahrt-) Industrie und nationale Raumfahrtagenturen aus mehr als zehn Ländern, stellen Teile und Teilsysteme bereit. Das LISA-Konsortium ist verantwortlich für die Wissenschaft und die Entwicklung und Lieferung wesentlicher Komponenten des interferometrischen Messsystems und wird von Karsten Danzmann vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Hannover geleitet. Die Verantwortung für die gesamte Mission liegt bei der ESA mit maßgeblicher Beteiligung der NASA.

Zwischen Frühjahr 2018 und Ende 2021 fanden vertiefte Machbarkeitsstudien statt, um die Details zur Auslegung der Mission und der Nutzlast weiter zu untersuchen. Bis etwa 2024 sollen die noch offenen technischen Fragen geklärt und das grundlegende Design von LISA abgeschlossen sein. Zudem sind umfangreiche funktionale Tests der Messtechnik an Prototypen geplant, soweit diese auf der Erde möglich sind. Nach einer letzten formalen Entscheidung der ESA voraussichtlich Ende 2024 wird das Projekt im Detail entworfen. Anschließend erfolgen die Fertigung der Flughard- und -software sowie der Test ihrer Funktionen und die Einhaltung aller Anforderungen. Als Starttermin wird Ende 2035 angestrebt. Dies würde einen zeitlich großteils überlappenden Betrieb mit dem ebenfalls in Entwicklung befindlichen Röntgenteleskop Athena der ESA erlauben.

Mit dieser komplementären Beobachtungsmöglichkeit wird sich eine Gravitationswellen-Astrophysik etablieren, die zusammen mit der Astrophysik elektromagnetischer

Wellen vom Radiobereich bis zu den Gammastrahlen und der kosmischen Teilchenstrahlung das Fenster zu einer Multi-Messenger-Astronomie öffnet. LISA wird dabei, zusammen mit geplanten oder im Bau befindlichen Großteleskopen wie dem ELT der Europäischen Südsternwarte und dem James Webb Space Telescope, den Blick bis zu den Grenzen des beobachtbaren Universums erweitern.

Literatur

- [1] B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016)
- [2] K. S. Thorne, Gravitational Waves, in: E. W. Kolb and R. Peccei (Hrsg.), Proc. of the Snowmass 95 Summer Study on Particle and Nuclear Astrophysics and Cosmology (1995); arXiv:gr-qc/9506086
- [3] M. Maggiore et al., J. Cosmol. Astropart. Phys. **03**, 050 (2020)
- [4] S. Sato et al., J. Phys.: Conf. Ser. **840**, 012010 (2017)
- [5] Gravitational Observatory Advisory Team, The ESA-L3 Gravitational Wave Mission, Final Report (2016), sci.esa.int/s/8Y6DKZA
- [6] M. Armano et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 231101 (2016)
- [7] M. Armano et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 061101 (2018)
- [8] H.-G. Grothues und J. Reiche, Sterne und Weltraum, Juli 2014, S. 34
- [9] T. W. Baumgarte, Physik Journal, April 2016, S.16
- [10] B. P. Abbott et al., ApJL, **848**, L12 (2017)
- [11] G. Martínez-Pinedo et al., Physik Journal, Dezember 2017, S. 20
- [12] GRACE DB (2020), grace.db.ligo.org
- [13] LIGO Sci. Coll., Detections (2020), www.ligo.org/detections.php
- [14] B. P. Abbott et al., Phys. Rev. X **9**, 031040 (2019)
- [15] K. Danzmann et al., LISA, Laser Interferometer Space Antenna, A Proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts (2017), arXiv:1702.00786v3
- [16] M. Tinto und S. V. Dhurandhar, Living Rev. Relativity **17**, 6 (2014)
- [17] G. Heinzel et al., Class. Quantum Grav. **28**, 094008 (2011)
- [18] R. Abbott et al., Preprint arXiv:2111.03606v2 (2021)

Die Autoren



Hans-Georg Grothues (FV Extraterrestrische Physik) studierte Physik, Astronomie und Geophysik an der Uni Bochum, wo er auch promovierte. Von 1996 bis 2003 war er am DLR Institut für Planetenforschung in Berlin an der Entwicklung von Kamerasystemen für wissenschaftliche Raumfahrtmissionen beteiligt. Seit 2003 ist er bei

der DLR Raumfahrtagentur in Bonn Projektleiter für verschiedene wissenschaftliche Raumfahrtmissionen, u. a. für LISA Pathfinder und nun für LISA.

Jens Reiche hat Physik an der Uni Hannover studiert und dort auch promoviert. Nach verschiedenen Stationen in der Wirtschaft war er ab 2005 am MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut, AEI) in Hannover Projektleiter des deutschen Beitrags zu LISA Pathfinder und nimmt diese Rolle nun auch bei LISA wahr.



Dr. Hans-Georg Grothues, DLR Raumfahrtagentur, Königswinterer Str. 522-524, 53227 Bonn und **Dr. Jens Reiche**, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), Callinstr. 38, 30167 Hannover