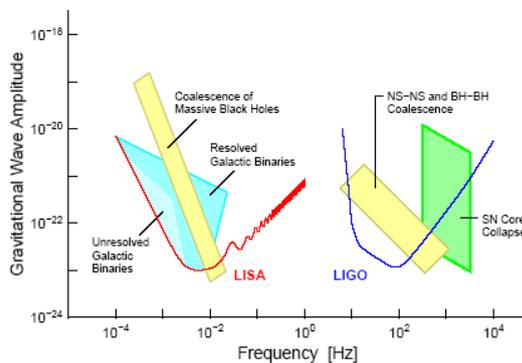




LISA Pathfinder und LISA: Missionsziele

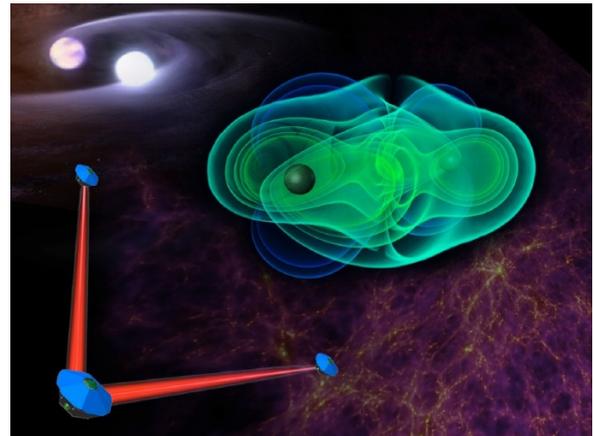
Die Mission **LISA Pathfinder (LISA-PF)** stellt eine notwendige Technologie-Demonstrations-Mission in Vorbereitung auf die **ESA-Wissenschaftsmission LISA (Laser Interferometer Space Antenna)** dar. LISA wird als L3-Mission im Cosmic-Vision-Programm 2015 – 2025 der ESA voraussichtlich 2034 starten und als Weltraumobservatorium niederfrequente **Gravitationswellen kosmischer Objekte** im Frequenzbereich zwischen 0.1 mHz bis 0.1 Hz beobachten. Damit wird LISA komplementär zu bodengebundenen Gravitationswellen-Observatorien wie Advanced LIGO (USA), GEO 600 (Deutschland / Großbritannien, u.a. AEI, Hannover), VIRGO (Frankreich / Italien), KAGRA (Japan) bzw. deren Nachfolger betrieben, die im Frequenzbereich zwischen etwa 10 und 10^4 Hz messen. Nach den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie verursachen beschleunigte Massen periodische Verzerrungen des Raumzeitkontinuums, die auch als Gravitationswellen bezeichnet werden. Auf zwei beschleunigungsfreie Testmassen wirkt diese Verzerrung der Raumzeit als Abstandsänderung. Die Verzerrungen sind allerdings so klein, dass nur die Effekte starker Beschleunigungen sehr großer Massen nachgewiesen werden können.

Kosmische Quellen von Gravitationsstrahlung, die sich durch LISA im genannten Frequenzbereich nachweisen lassen werden, sind kurzperiodische Doppelsternsysteme, enge bzw. kollabierende Systeme von Sternen, Neutronensternen und / oder Schwarzen Löchern, supermassive Schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien sowie ein stochastischer Hintergrund von Quellen innerhalb und außerhalb unserer Galaxis. Typische Amplituden (gravitational wave amplitudes), d.h. relative Längenänderungen ($h = \Delta L / L$) der interferometrisch vermessenen Strecken, die durch die Gravitationswellendetektoren nachzuweisen sind, liegen zwischen etwa 10^{-18} und 10^{-24} , abhängig von der Art der Objekte sowie der Frequenz und der Dauer der emittierten Signale. Lange Zeit konnte die Existenz von Gravitationswellen nur indirekt aus Beobachtungen einiger Pulsare erschlossen werden. Im September und Dezember 2015 gelangen dann aber mit Advanced LIGO endlich auch die ersten direkten Beobachtungen von Gravitationswellen von verschmelzenden Schwarzen Löchern mit stellaren Massen (GW150914 und GW151226)



LISA wird aus einem Cluster von drei Satelliten an den Ecken eines (nahezu) gleichseitigen Dreiecks mit rund 2.5 Mio. km Seitenlänge bestehen, dessen Schwerpunkt der Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne in einem Abstand von etwa 50 Mio. km folgt. Jeder der Satelliten enthält zwei freifliegende Testmassen, die möglichst frei von äußeren Störungen gehalten werden. Die gegenseitigen Abstände der Testmassen von Satellit zu Satellit werden durch hochpräzise **Heterodyn-Laser-interferometrie** vermessen, um die durch eine durchlaufende Gravitationswelle

hervorgerufenen minimalen Abstandsänderungen zweier Testmassen nachzuweisen. Die erforderliche Messgenauigkeit der Testmassenabstände beträgt dabei typischerweise einige Hundertstel des Durchmessers eines Wasserstoffatoms auf 2.5 Mio. km (d.h. 10^{-12} m). Die minimalen Bahn- und Lagekorrekturen der Satelliten, die für die Zentrierung auf die Testmassen notwendig sind, werden jeweils durch ein „Drag-Free Attitude Control System“ (DFACS) aus den Messungen von **Inertialsensoren** ermittelt und über **Mikro-Newton (μ N) Triebwerke** (Kaltgas- und Kolloidtriebwerke) umgesetzt.



Die notwendige Freiheit der Testmassen von Störkräften lässt sich jedoch auf der Erde wegen der Größe der dort auszuregelnden Störeffekte (insbesondere der Schwerkraft der Erde) nicht vollständig verifizieren. Daher verfolgte **LISA-PF** als notwendige technologische Vorgängermission von LISA das Ziel, die Schlüsseltechnologien des Systems, bestehend aus

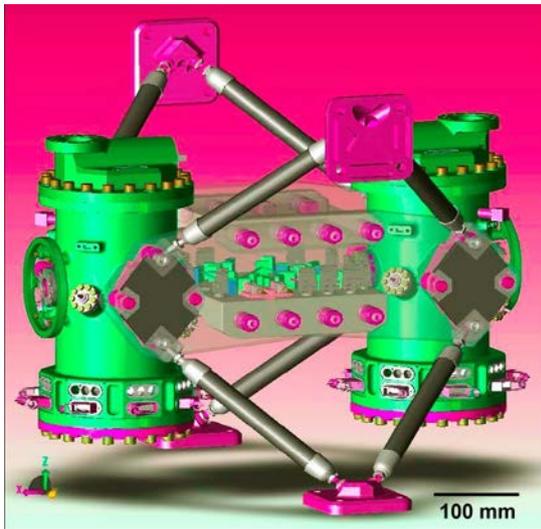
- den **Inertialsensoren** zur Messung der Positionen der Testmassen relativ zum Satelliten,
- dem **Drag-Free Attitude Control System** zur Steuerung der Kompensation von Störkräften mittels μ N-Triebwerken, und
- der **Laserinterferometrie**

im Weltraum zu testen. Dabei sollte sich das System bei Frequenzen oberhalb von 1 mHz den relevanten Spezifikationen für die Störungsfreiheit bei LISA (maximale spektrale Energiedichte der Störbeschleunigungen der Testmassen $< 3 \times 10^{-15} \text{ ms}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$ im Frequenzbereich 0.1 mHz bis 1 mHz) bis auf mindestens eine Größenordnung annähern. Diesem Ziel diente das unter Federführung der ESA entwickelte **LISA Technology Package (LTP)**. Die Entwicklung des zunächst vorgesehenen, zum LTP komplementären **Disturbance Reduction System (DRS)** des Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA ist inzwischen eingestellt worden. Lediglich die Kolloidtriebwerke wurden noch vom JPL beigestellt.

Dem **LTP-Team** gehören neben der ESA, als verantwortlicher Raumfahrtagentur für das Gesamtprojekt, Wissenschaftler und Ingenieure aus Deutschland, Italien, Großbritannien, Spanien, Frankreich, den Niederlanden und der Schweiz an. Als **industrieller Hauptauftragnehmer** war die EADS Astrium GmbH (Friedrichshafen, Deutschland; inzwischen Airbus Defence & Space GmbH) verantwortlich für die Bereitstellung der **LTP-Nutzlast** unter Einbeziehung der Beistellungen der Teammitglieder, während der **LISA-PF Satellit** durch die EADS Astrium Ltd. (Stevenage, Großbritannien) gebaut wurde. In Deutschland war das Albert-Einstein-Institut (AEI) in Hannover federführend an der Entwicklung des Interferometers beteiligt.

Die LISA Pathfinder Mission und ihr Messprinzip

Nach ihrem Start am 3. Dezember 2015 wurde LISA-PF zunächst in eine elliptische Transferbahn eingeschossen, deren Apogäum dann mit Hilfe eines eigenen Antriebmoduls in mehreren Phasen angehoben wurde, um schließlich in eine **Halobahn um den Lagrangepunkt L1**, rund 1.5 Mio. km von der Erde entfernt, einzuschwenken. Vor dem Einschwenken in die endgültige Bahn und dem Beginn des wissenschaftlichen (Drag-Free-) Betriebs unter möglichst geringen Störeinflüssen, wurde dann schließlich das Antriebmodul vom Nutzlastmodul abgetrennt, um dessen störende Einflüsse auf die Testmassen zu vermeiden. Die Halobahn um den L1 wurde ausgewählt, um die hohen Anforderungen an die Nutzlast im Hinblick auf dessen thermische Stabilität (konstante Sonneneinstrahlung und Temperatur) und geringe gravitative Störungen zu erfüllen, die nahe des Gravitationsgleichgewichtspunktes zwischen Erde und Sonne gegeben sind.



Das **LISA Technology Package** besteht im Wesentlichen aus einer optischen Bank (LTP Core Assembly, LCA), die in zwei Vakuumbehältern jeweils eine der beiden würfelförmigen Testmassen aus einer Gold-Platin-Legierung, die Inertialsensoren sowie den sog. Caging Mechanismus (CM) enthält. Die Inertialsensoren haben die Aufgabe, kapazitiv die Position und Ausrichtung der jeweiligen Testmasse zu bestimmen und die Messdaten an das Drag-Free-Control-System zur Lagekorrektur der Sonde weiterzugeben. Der CM hat die Testmasse während der Start- und Transferphase der Sonde zum L1 gesichert und sie zu Beginn der (Drag-Free-) Messphase kontrolliert freigegeben.

Zwischen den Vakuumbehältern befindet sich das Laserinterferometer, mit dessen Hilfe die Abstände zwischen den beiden Testmassen sowie ihre Beschleunigungen mit höchster Genauigkeit komplementär zu den Inertialsensoren gemessen werden. Das Licht des dazu notwendigen Nd:YAG-Lasers (Wellenlänge 1.064 μm) wird außerhalb des LCA durch zwei Akusto-Optischen Modulatoren moduliert und über Glasfasern in das LCA eingespeist. Eine Einheit zur Bestimmung der Phasendifferenz der interferierenden Laserstrahlen (Phasemeter), das darüber hinaus auch ein Feed-Back für die Frequenzstabilisierung und die Stabilisierung der optischen Weglängendifferenz (optical path difference, OPD) des Laserstrahls liefert, ist ein weiterer wichtiger Bestandteil des LTP. Verschiedene Sensoren und Systeme zur Überwachung und Steuerung der Umgebungsbedingungen, wie Temperatursensoren, Magnetometer, Radiometer, Elektromagneten, Heizelemente, eine Entladungseinrichtung für die Testmassen sowie eine eigene Datenverarbeitungs- und Kontrolleinheit (Data Management Unit) komplettieren das LTP.

Die Messungen der Inertialsensoren an den beiden Testmassen lieferten während des Betriebs pro Sekunde 10 Positionsdaten, die dazu dienen, über das Drag-Free Attitude Control System die μN -Triebwerke anzusteuern, um die LISA Pathfinder Sonde auf die Testmassen zu zentrieren. Die Laserinterferometrie erlaubt darüber hinaus, unabhängige Positionsdaten der Testmassen zu gewinnen (Messrate 100 Hz), die im Rahmen einer nachträglichen wissenschaftlichen Auswertung die Bestimmung der (Rest-) Störkräfte ermöglichten und damit eine Beurteilung des Missionserfolges erlauben. Insgesamt wurde das LTP am Ende der Mission etwa 15 Monate erfolgreich im Drag-Free-Modus betrieben.

Das LTP simulierte damit gewissermaßen einen Arm des LISA-Interferometers, der von etwa 2.5 Mio. km auf etwa 38 cm verkürzt worden ist, um die wesentlichen Technologietests für LISA auf einer konventionellen (und kostengünstigen) Satellitenplattform unterbringen zu können.

Der deutsche Beitrag zum LTP umfasste die Durchführung der Systemaufgaben während der Entwicklung des LTP (Industrial Architect) sowie darüber hinaus die Bereitstellung der optischen Bank (Interferometer) und des Lasersystems (Laser und Laser Assembly). Diese Aufgaben wurden durch die EADS Astrium GmbH (Friedrichshafen, nun Airbus Defence & Space), die Kayser-Threde GmbH (München, nun OHB) und die Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG (Backnang) im Auftrage des Albert-Einstein-Instituts (MPI für Gravitationsphysik, Hannover) ausgeführt und durch das DLR finanziert.

Kenndaten von LISA Pathfinder und des LTP

- | | | | |
|---------------------------|---|-----------------------------|---|
| • Beginn der Entwicklung: | September 2001 | • Kontrollzentrum: | ESOC (Darmstadt) |
| • Beginn der Mission: | 03. Dezember 2015, 5:04 MEZ | • Masse der Sonde: | 475 / 1900 kg
(Nutzlastmodul / Startmasse) |
| • Trägerfahrzeug: | Vega | • Abmessungen der Sonde: | \varnothing 2.1 m x 1.0 m (Nutzlastmodul) |
| • Startort: | Kourou, Französisch Guayana | • Masse des LTP: | 140 kg |
| • Missionsdauer: | 19 Monate (inkl. Verlängerung)
(15 Monate Drag-Free-Betrieb) | • Abmessungen des LTP: | 64 x 37.5 x 37.5 cm ³ |
| • Bahncharakteristik: | Halobahn um den L1
(Erdabstand etwa 1.5 Mio. km) | • El. Leistungsaufn. (LTP): | 150 W (typ.) |
| | | • Telemetrierate (Sonde): | 1.7 kbit/s (X-Band) |

Ansprechpartner

MPI für Gravitationsphysik
(Albert-Einstein-Institut)
Callinstraße 38
D-30167 Hannover
www.aei.mpg.de

DLR
Königswinterer Str. 522 - 524
D-53227 Bonn
www.dlr.de

ESA / ESTEC
Postbus 299
NL-2200 Noordwijk
Niederlande
www.sci.esa.int

Stand: Mai 2017