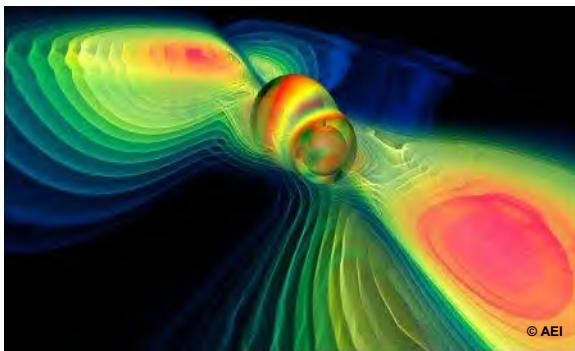




Ziele der Mission

Die Mission **LISA** (Laser Interferometer Space Antenna) der ESA wird voraussichtlich ab 2035 niederfrequente Gravitationswellen aus dem Weltraum nachweisen und deren Quellen mit großer Genauigkeit charakterisieren. **Gravitationswellen** (GW) stellen Schwingungen der Raumzeit dar, hervorgerufen durch schnelle zeitliche Änderungen in der räumlichen Verteilung sehr großer Massen, wie z.B. die Verschmelzung zweier stellarer oder auch supermassiver Schwarzer Löcher. GW breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus und weisen ein für ihre Quelle charakteristisches Schwingungsmuster (Frequenzverlauf) auf. Die mit LISA beobachtbaren **Frequenzen von GW** liegen dabei zwischen einigen 10^{-5} und rund 1 Hertz. Dies erlaubt es, Quellen mit sehr großen Massen (größer als 10^4 bis 10^7 Sonnenmassen) zu beobachten. Im Gegensatz dazu sind bodengebundene GW-Observatorien wie LIGO in den USA und Virgo in Italien bei deutlich höheren Frequenzen empfindlich, von etwa 30 bis zu einigen 10^3 Hertz. Sie beobachten daher andere Quellen als LISA, mit Massen, die typischerweise kleiner als wenige 100 Sonnenmassen sind. LISA wird damit komplementär zu den bodengebundenen Observatorien betrieben.



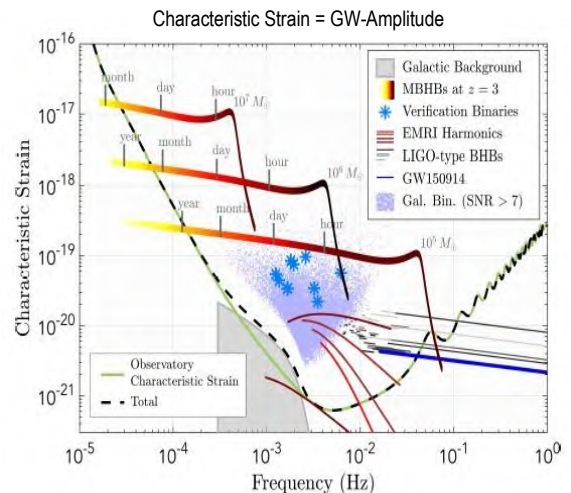
GW machen sich als winzigste, periodische Änderungen von Abständen auf der Erde und im All bemerkbar. Die relativen Längenänderungen (**Amplituden von GW**), hervorgerufen durch die Abstrahlung charakteristischer Quellen, liegen bei typischerweise nur etwa 10^{-21} , d.h. einem zehntel Millionstel Millionstel Millionstel Prozent! Eine (Mess-) Strecke von vier Kilometern, entsprechend derjenigen der LIGO-Detektoren, wird daher um nur einige Hundertstel Femtometer, oder ein Hundertstel des Durchmessers eines Wasserstoffkerns (Proton) gedehnt und gestaucht.

Die wichtigsten wissenschaftlichen Ziele von LISA sind:

- Untersuchung der Entstehung und der Entwicklung kompakter Doppelsternsysteme in der Milchstraße mit Umlaufzeiten von wenigen Minuten; einige dieser Doppelsterne lassen sich als Kalibrationsquellen nutzen, da sie sehr regelmäßige GW bei konstanter Frequenz abstrahlen.
- Verfolgung des Ursprungs, des Wachstums und der sukzessiven Verschmelzung („Merger“) von massereichen Schwarzen Löchern (SL, größer als etwa einige 1.000 Sonnenmassen) bei sehr großen Entfernungen im frühen Universum; dadurch soll das Wachstum hin zu supermassiven SL mit 10^7

Sonnenmassen und mehr, wie sie in den Zentren von Galaxien zu finden sind, nachvollzogen werden.

- Untersuchung der Dynamik von stellaren SL in dichten Sternhaufen nahe der Zentren von Galaxien mittels des Einspiralen von stellaren Objekten in sehr viel massenreichere SL (EMRIs – Extreme Mass Ratio Inspirals).



- Verbesserung des Verständnisses der Astrophysik von SL mit stellaren Massen wie sie mit LIGO ab 2015 als SL-SL-Merger nachgewiesen wurden; diese SL umkreisen einander auf immer engeren Bahnen, verlieren dabei Bahnenergie durch die Abstrahlung von GW und laufen Monate und Jahre vor dem Verschmelzen aus dem Frequenzband von LISA heraus, um wenige Minuten oder Sekunden vor dem Verschmelzen für bodengebundene GW-Antennen beobachtbar zu werden; auf diese Weise lassen sich stellare SL-SL-Merger vorhersagen.
- Untersuchungen zur fundamentalen Natur der Gravitation und zur Physik der SL sowie zur Expansion des Universums (Bestimmung der Hubble-Konstanten).
- Verständnis des stochastischen GW-Hintergrundes im frühen Universum und des hochenergetischen Hintergrundes kosmischer Teilchenstrahlung im TeV-Bereich.
- Nachweis noch unbekannter Quellen von GW.

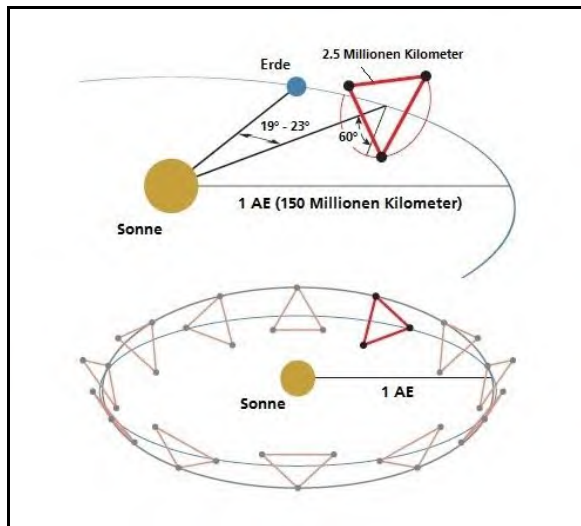
Von großer Bedeutung für die Forschung von LISA ist die **Multi-Messenger-Astronomie**. Dabei sollen (Nach-) Beobachtungen von GW-Ereignissen und permanenten GW-Quellen über möglichst das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Strahlung vom Gamma- und Röntgenbereich, über die UV-, visuelle und Infrarotstrahlung bis hin zum Radiobereich über möglichst lange Zeiträume durchgeführt werden. Schließlich soll auch nach Neutrinos Ausschau gehalten werden. Ziel ist es, auf diese Weise eine möglichst große Datenbasis für die astrophysikalische Interpretation der Quellen von GW zu erstellen.

Die LISA-Mission und ihre wissenschaftliche Nutzlast

Die winzigen Amplituden einer GW lassen sich nur durch eine höchst empfindliche Laserinterferometrie nachweisen. Bei LISA wird dieses **Laserinterferometer** durch drei baugleiche Sonden aufgespannt, die ein nahezu gleichseitiges Dreieck mit rund 2,5 Millionen Kilometer Seitenlänge bilden. Diese Konfiguration ist um 60 Grad gegen die Bahnebene der Erde geneigt und wird dieser

auf ihrer Umlaufbahn in etwa 50 bis 65 Millionen Kilometer Abstand folgen (Drift-Orbit). Dabei rotiert sie innerhalb eines Jahres einmal um sich selbst, so dass die Positionen (Richtung) permanenter Quellen von GW über eine Triangulation mit guter Genauigkeit lokalisiert werden können.

Wichtig für die Auslegung der Sonden und des Interferometers von LISA ist die geringfügige „Atmung“ der Konfiguration, das heißt die Variation des im Idealfalle gleichseitigen Dreiecks infolge der Bahndynamik. Dabei ändern sich die Armlängen quasi-periodisch um $\pm 35,000$ Kilometer und die Innenwinkel des Dreiecks um maximal etwa ± 0.9 Grad. Dies erfordert eine aktive Kompensation und Korrektur sowie eine besondere Kalibration der Messdaten am Boden (TDI, s. unten).



An Bord einer jeden Sonde werden sich jeweils zwei **Teleskope** befinden, die gewissermaßen die Laserstrahlen aufspannen. Jedem der Teleskope ist eine verspiegelte Testmasse zugeordnet, wie sie bereits bei der Technologiedemonstrationsmission LISA Pathfinder (2015 – 2017) zum Einsatz gekommen ist. Die während des Messbetriebs in einem Gehäuse frei schwebenden **Testmassen** stellen die Spiegel an den Enden der jeweiligen Interferometerarme dar. Die äußeren Störungen auf die Sonden, verursacht etwa durch den Strahlungsdruck der Sonne, Magnetfelder oder wechselnde Gravitationskräfte, werden durch den Aufbau der Sonden weitgehend eliminiert, oder aber mit Hilfe eines sogenannten „**Drag-Free Attitude Control Systems**“ (DFACS) und Kaltgas-Mikronewton-Triebwerken kompensiert. Diese äußeren und auch internen Störsignale („Rauschen“) überlagern das GW-Signal zum Teil sehr deutlich, wenn nicht weitere Maßnahmen zu deren Unterdrückung bzw. Charakterisierung ergriffen würden. Dazu zählen Effekte wie die kosmische Teilchenstrahlung, die für eine elektrostatische Aufladung der Testmassen sorgt, das Rauschen der Messelektronik, Intensitäts- und Frequenzschwankungen des Laserlichts und andere Störungen innerhalb der Messapparatur wie z.B. die Brownsche Molekularbewegung im Restgas des Hochvakuums um die Testmassen und Einkopplungen von Winkeländerungen beweglicher Teile in Schwankungen optischer Pfadlängen (Tilt-To-Length Coupling).

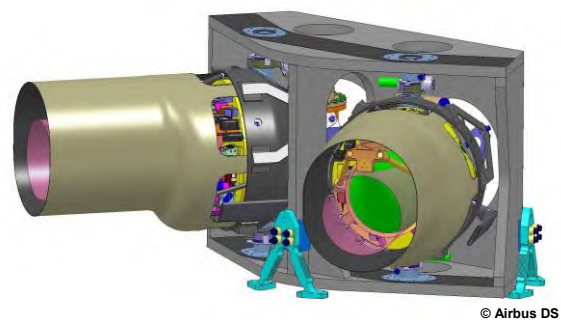
Das **Nutzlastkonzept** von LISA sieht jeweils zwei **Teleskope** pro Sonde mit Öffnungen von jeweils etwa 30 Zentimetern vor. Diese dienen sowohl als Sende- als auch Empfangsteleskope für das im Interferometer zwischen den Sonden verwendete Laserlicht, welches eine Wellenlänge von 1,064 Nanometer aufweist. Die als Laserquellen vorgesehenen **Nd:YAG-Laser** haben eine Ausgangsleistung von etwa 2 Watt. Fest verbunden mit den Teleskopen sind jeweils **optische Bänke** (OB), die die eigentliche („wissenschaftliche“) Interferometeroptik und Photodioden für die Signalerfassung zur hochgenauen Phasenmessung mittels eines komplexen **Phasenmeter-Systems** (PMS) enthalten.

Ebenfalls fest verbunden mit jeder Teleskopeinheit ist ein „**Gravitational Reference System**“ (GRS), das in einem speziellen Vakuumgehäuse jeweils eine der **Testmassen** (TM) enthält, die als Endspiegel des Interferometers dienen. Diese würfelförmigen, verspiegelten TM werden aus einer besonderen Gold-Platin-

Legierung gefertigt und haben bei einer Kantenlänge von 46 Millimetern eine Masse von etwa zwei Kilogramm. Das Design von GRS und TM einschließlich des komplexen Mechanismus zur Startisierung und der feinfühligsten Freigabe, Positionierung und des Wiedereinfangs der TM hat sich bereits bei LISA Pathfinder bewährt. Wichtig ist außerdem die berührungslose Kontrolle der elektrostatischen Auf- und Entladung der TM mittels UV-Licht („**Charge Management**“). Zusammen mit der notwendigen, rauscharmen Steuer- und Nachweiselektronik (u.a. das PMS) bilden die beschriebenen Elemente das „**Moving Optical SubAssembly**“ (MOSA). Teleskop, OB und GRS werden in einer beweglichen Montierung so nachgeführt, dass die Laserverbindung zur jeweils gegenüberliegenden Sonde des Interferometers stets erhalten bleibt. Eine direkte, phasenerhaltende Rückreflektion des Laserstrahls über 2,5 Millionen Kilometer ist selbst bei geringer Divergenz wegen der sehr geringen Strahlungsenergie am Empfänger (nur wenige 10^{-10} Watt) und der bei weitem nicht ausreichenden Kohärenzlänge nicht sinnvoll; vielmehr wird deshalb von der empfangenden Sonde jeweils ein phasengekoppelter „frischer“ Strahl zurückgeschickt.

Um die erforderliche hohe Präzision der Phasenmessungen zu erreichen, wird bei LISA eine **Heterodyn-Interferometrie** angewandt. Dabei wird die Phaseninformation aus einer Schwebungsfrequenz im Giga-Hertz-Bereich im Vergleich mit einem „Lokalen Oszillator“ bestimmt. Die Messung wird somit von der hohen Frequenz der Laserstrahlung (3×10^{14} Hertz) in den Mikrowellenbereich transformiert, in dem elektronisch einfacher gemessen werden kann. Dieses Messprinzip wurde und wird bereits bei LISA Pathfinder und LIGO sehr erfolgreich angewandt.

Bei der Erzeugung der Schwebungsfrequenz besteht allerdings die Herausforderung, dass auf Grund der Neigung der Sonden bzw. der Teleskope zueinander, die Wellenfront des zu vermessenden Strahls in der Regel unter einem kleinen Winkel eintrifft, der sich dazu im Laufe der Missionsdauer noch stetig verändert. Dieser Winkel muss kompensiert werden, bevor die Schwebungsfrequenz mit Hilfe des Referenzlasers erzeugt werden kann. Dabei kommt ein sogenanntes „**Differential Wavefront Sensing**“ (DWS) zum Einsatz.

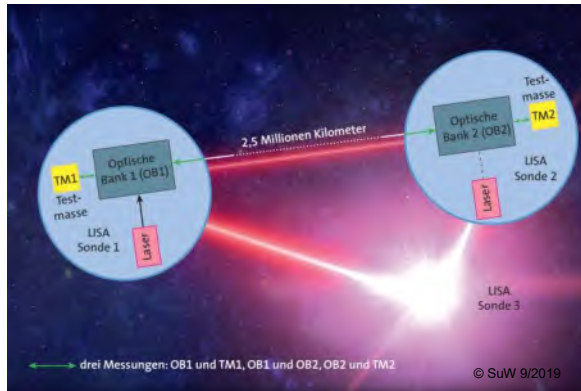


© Airbus DS

Ebenfalls erforderlich, um die hohen Präzisionsanforderungen zu erfüllen, ist die Eliminierung des Laserfrequenzrauschens. Bei einem Interferometer mit gleich langen Armen löscht sich das Frequenzrauschen bei der Überlagerung beider Teilstrahlen des Interferometers aus. Bei unterschiedlichen Armlängen, wie es bei LISA der Fall sein wird, benötigt man dagegen ein Verfahren, das als „**Time Delay Interferometry**“ (TDI) bezeichnet wird. Dabei wird das gemessene Lasersignal mit einem Referenzstrahl verglichen, der dem ursprünglich ausgesandten äquivalent ist. Auf diese Weise lässt sich das Frequenzrauschen in einer Nachbearbeitung vollständig eliminieren und auch berücksichtigen, dass sich die Sonden während der Messung relativ zueinander mit einigen Metern pro Sekunde bewegen (Dopplereffekt).

Darüber hinaus wird jede **Messung der Abstandsänderung zwischen den freischwebenden TM zweier Sonden** in drei separate Teilmessungen zerlegt. Zunächst wird der Abstand der TM zum Teleskop auf der ersten Sonde gemessen; anschließend

der Abstand dieses Teleskops zum gegenüberliegenden Teleskop auf der zweiten Sonde, also die lange Strecke zwischen den beiden Sonden im Weltraum, mit einer Lichtlaufzeit von mehr als acht Sekunden; und zuletzt der Abstand zwischen dem Teleskop auf der zweiten Sonde zur zugehörigen TM. Diese dreiteilige Messung wird fortlaufend zwischen allen Sondenpaaren in jeweils beiden Richtungen durchgeführt. Insgesamt ergeben sich daher allein durch diese Abstandsmessungen $3 \times 2 \times 3 = 18$ Messungen, die in der Nachbearbeitung berücksichtigt werden müssen.



Diese aufwändige Nachbearbeitung umfasst alle hier genannten Fehlerquellen und Messungen sowie weitere, um schließlich die gesuchten Gravitationswellensignale aus den gewonnenen Daten extrahieren zu können.

Als **L3-Mission im Wissenschaftsprogramm der ESA** wird LISA unter Beteiligung der NASA und mit Beistellungen zur Nutzlast aus mehr als zehn europäischen Ländern entwickelt und gebaut. Ein wissenschaftliches **LISA-Konsortium** ist maßgeblich an dieser Entwicklung beteiligt und baut zudem die Datenverarbeitung und –archivierung der Mission auf. Der deutsche Beitrag zu LISA besteht wesentlich aus dem Management und der Systemführung des interferometrischen Detektionssystems (IDS) und der Beistellung des zentralen Phasensensors der Nutzlast durch das **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik / Albert-Einstein-Institut (AEI)** in Hannover. Außerdem wird das AEI in Zusammenarbeit mit niederländischen Partnern einen kritischen, optomechanischen Mechanismus für die Nutzlast liefern. Schließlich unterstützt das AEI die Mission auch bei vielen Fragestellungen zum Systemdesign. **Prof. Karsten Danzmann** vom AEI ist zudem **Principal Investigator** für die Mission. Die Beteiligung des AEI an LISA wird durch Zuwendungen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), vertreten durch das DLR, maßgeblich unterstützt.

Kenndaten von LISA

- | | | | |
|---------------------------|---|---|--|
| • Beginn der Entwicklung: | 2017 (erste Studien seit 1993) | • Kontrollzentren: | ESOC, Darmstadt (Missionsbetrieb) |
| • Start der Mission: | August 2035 | | ESAC, Madrid, Spanien (wissenschaftlicher Betrieb) |
| • Trägerfahrzeug: | Ariane 6.4 | • Startmasse der (3) Sonden: | 8,300 kg |
| • Startort: | Kourou, Französisch Guayana | • Abmessungen einer Sonde: | 4.8 m x 3.0 m x 1.1 m |
| • Missionsdauer: | min. 6.25 Jahre (inkl. 4.5 Jahre nomineller Betrieb) / 6 Jahre Missionsverlängerung | • Masse der Nutzlast: | 830 kg (pro Sonde) |
| • Bahncharakteristik: | heliocentrischer Drift-Orbit (Erdabstand > 50 Mio. km) | • El. Leistungsaufnahme (Sonde mit Nutzlast): | 2,300 W (voller Nutzlastbetrieb) |
| | | • Telemetrierate (Konfig.): | ~270 kbit/s (X-Band, Downlink) |

Ansprechpartner

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut)
 Callinstraße 38
 30167 Hannover
www.aei.mpg.de/2772/de

Deutsche Raumfahrtagentur im DLR
 Königswinterer Str. 522 - 524
 53227 Bonn
www.dlr.de/de/ar

ESA / ESTEC
 Keplerlaan 1
 Postbus 299
 2200 AG Noordwijk
 The Netherlands
sci.esa.int

Stand: September 2024