

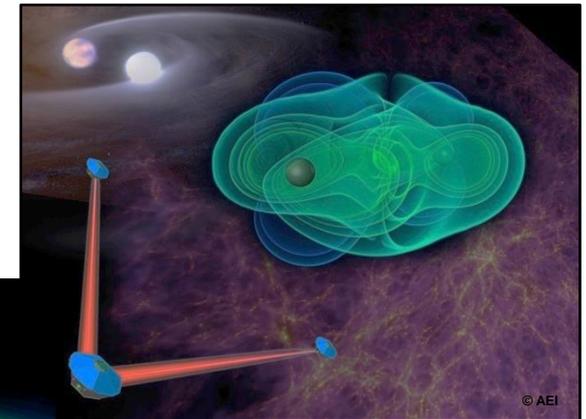
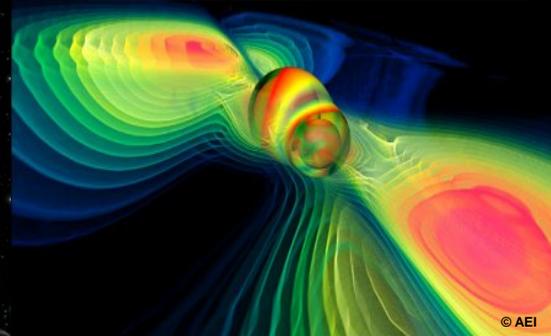
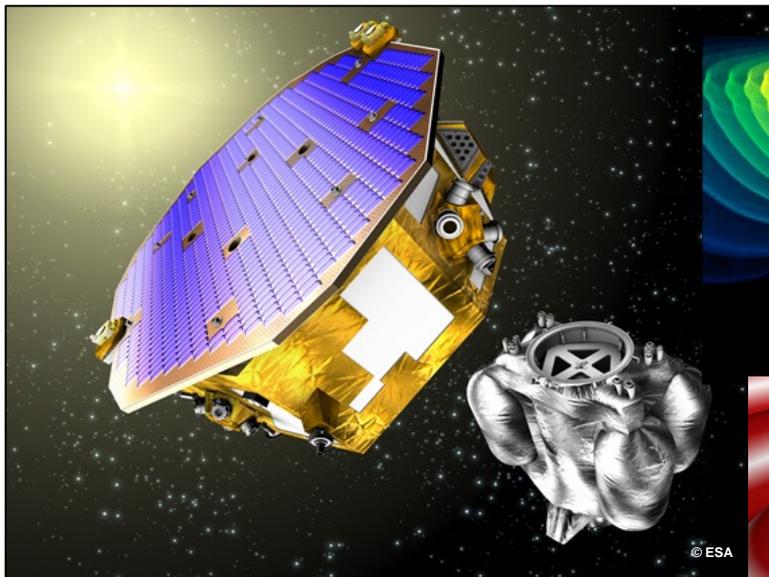


**lisa pathfinder**

# **LISA Pathfinder –**

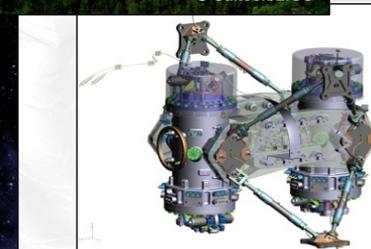
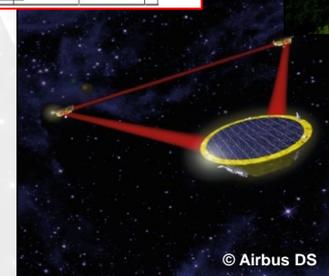
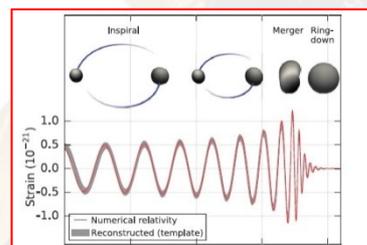
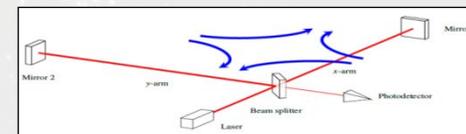
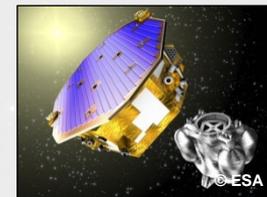
## **Auf dem Weg zum Gravitationswellen-Observatorium**

**Dr. Hans-Georg Grothues**  
**DLR Raumfahrtmanagement, Bonn**



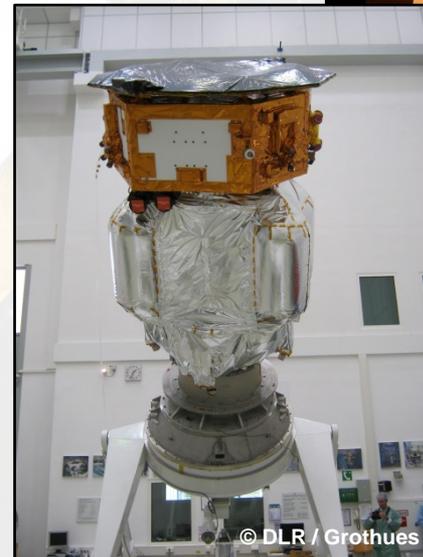
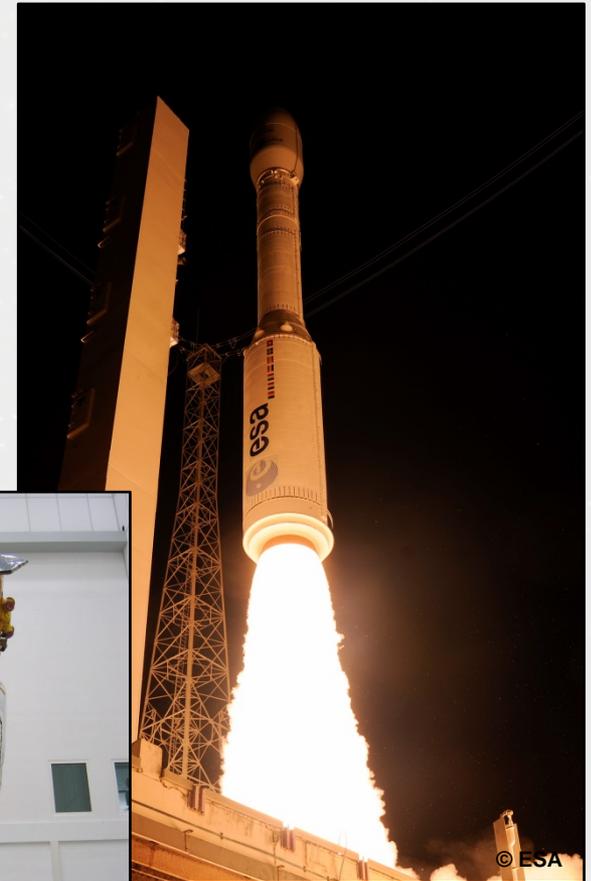
# LISA Pathfinder – Auf dem Weg zum Gravitationswellen-Observatorium

- **LISA Pathfinder** – Technologie Demonstration für eLISA
- Was sind **Gravitationswellen**?
- Wie lassen sich **Gravitationswellen messen**?
- **LIGO, VIRGO, GEO600** – Gravitationswellen-Observatorien auf der Erde
- **Erster direkter Nachweis von Gravitationswellen!**
- **eLISA** – Beobachtung von Gravitationswellen aus dem Weltraum
- Warum **LISA Pathfinder**?
- Wie geht es nach LISA Pathfinder weiter?



# LISA Pathfinder – Technologie Demonstration für eLISA

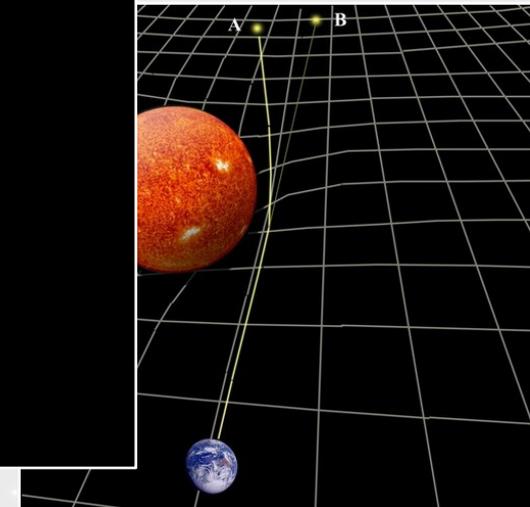
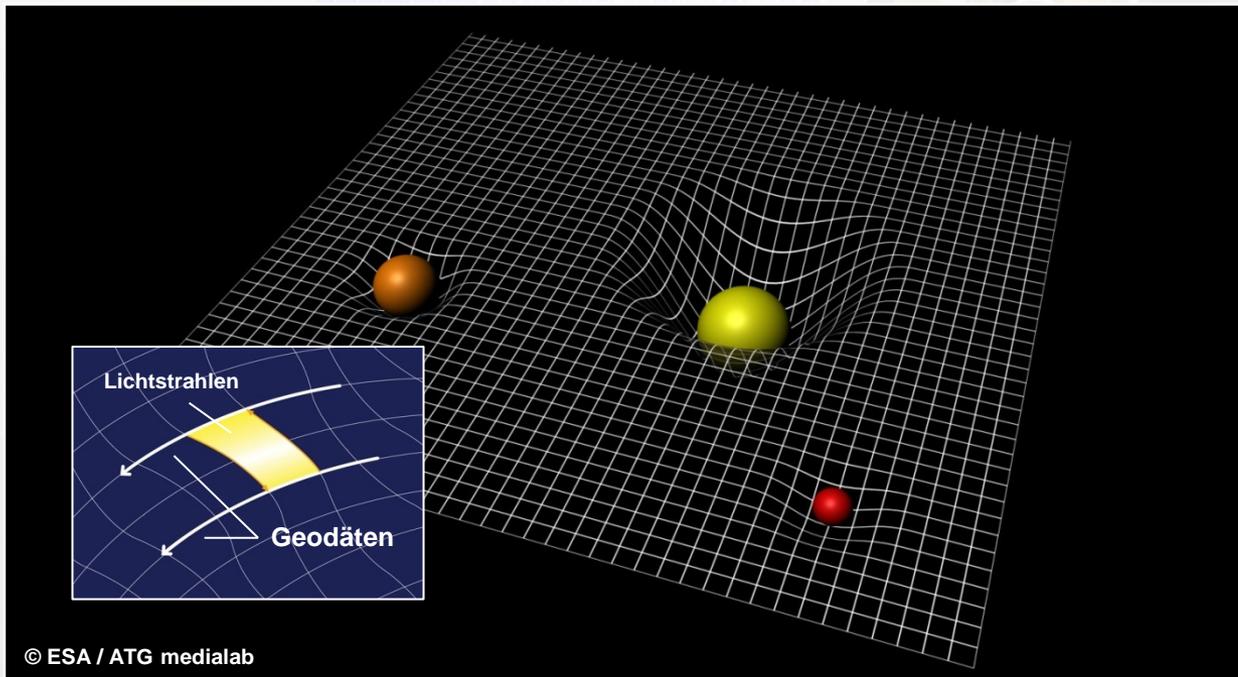
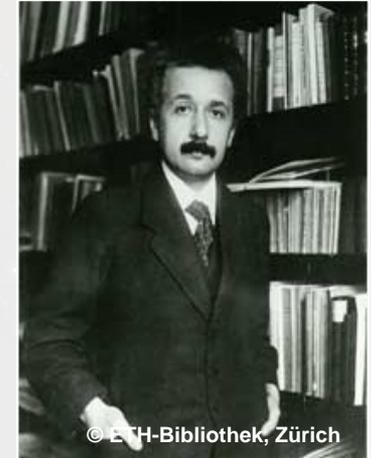
- **Technologie-Erprobung** für das **Gravitationswellen-Observatorium eLISA**  
(eLISA – evoled Laser Interferometer Space Antenna)
- **Wissenschaftsmision** der ESA
- **Zwei Nutzlasten:**
  - LISA Technology Package (LTP)
  - Disturbance Reduction System (DRS)
- **Start: 3. Dezember 2015 (Kourou)**



# Was sind Gravitationswellen?

(1)

- Albert Einstein (1915): **Allgemeine Relativitätstheorie**
- **Krümmung der Raum-Zeit** durch Massen
- Bewegung entlang von **Geodäten**



Lichtablenkung im Gravitationsfeld (© CENTweb)

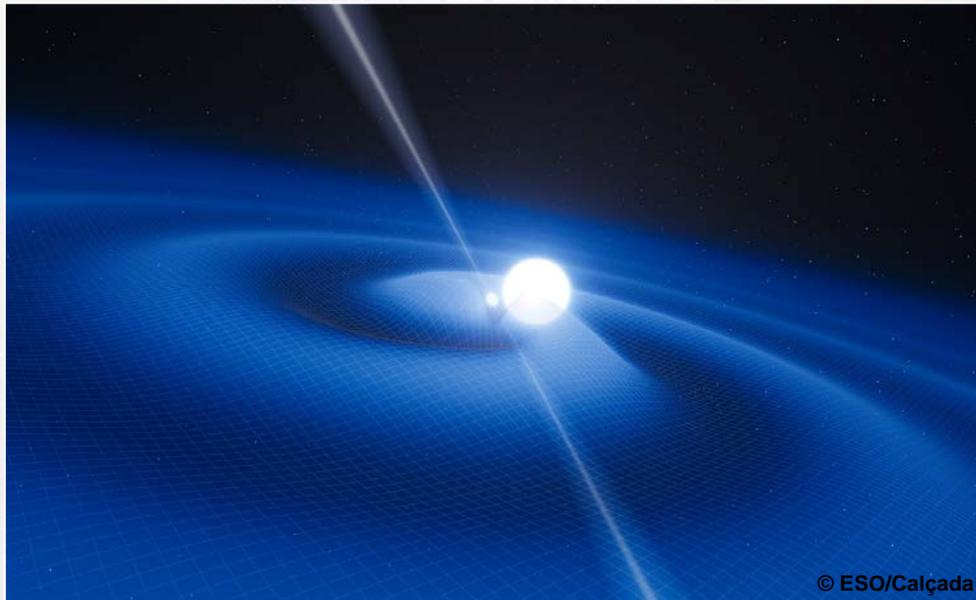


# Was sind Gravitationswellen?

(2)

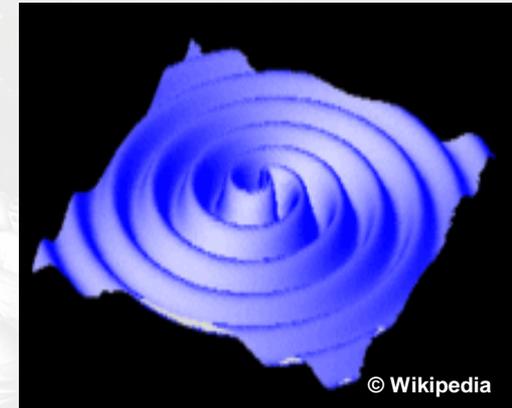
## ➤ Gravitationswellen (GW):

- **Schwingungen der Raum-Zeit**
- hervorgerufen durch (sehr) **schnelle Veränderungen großer Massen**
- Gravitationswellen breiten sich mit **Lichtgeschwindigkeit** aus (300.000 Kilometer pro Sekunde)
- von **Einstein** bereits **1916/18** vorausgesagt  
(Energieabstrahlung von Gravitationswellen hat „praktisch verschwindenden Wert“)



© ESO/Calçada

Doppelsystem aus Weißem Zwergstern und Pulsar (Neutronenstern)



© Wikipedia

© AEI

**GW sind charakterisiert durch:**

- **Amplitude (h)**
- **Schwingungsfrequenz (f)**



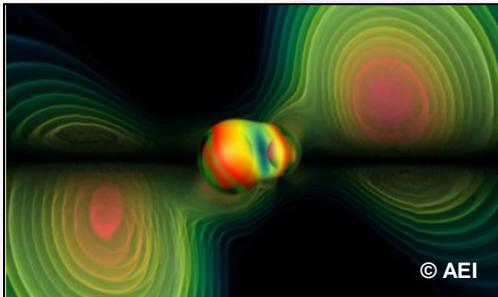
# Was sind Gravitationswellen?

(3)

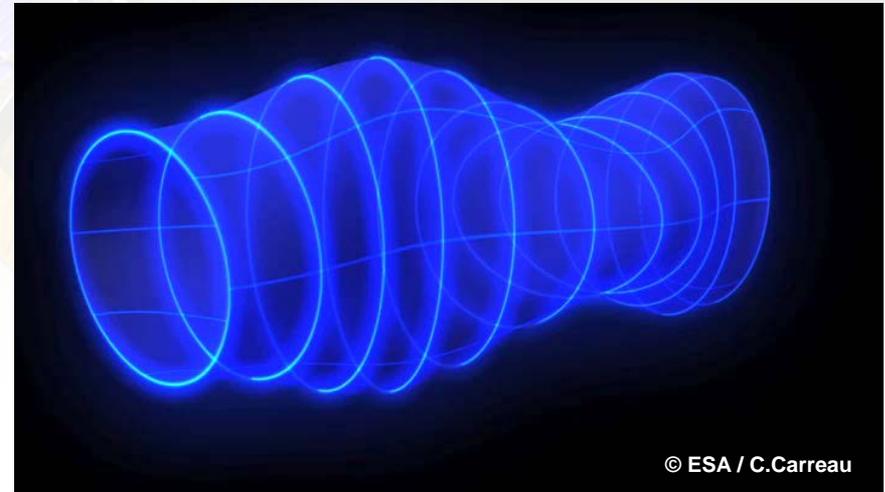
## ➤ Wie wirken Gravitationswellen?

### Ausbreitung von GW

### Erzeugung & Abstrahlung von GW



Abstrahlung von Gravitationswellen beim Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher (Computersimulation)



© ESA / C.Carreau

Abstand L



© AEI

### Nachweis von GW

⇒ Messung von (**relativen**) **Abstandsänderungen (Amplituden)  $\Delta L$** ,  
d.h.  $\Delta L/L = h$



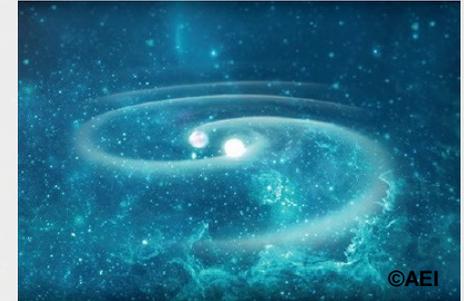
# Was sind Gravitationswellen?

(4)

➤ **Amplituden von GW:**  $h = \Delta L/L \approx 10^{-18} \dots 10^{-24} \dots$

(abhängig von Quelle und Entfernung)

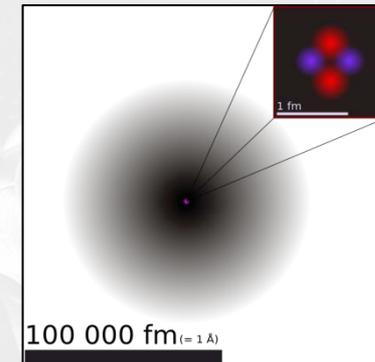
⇒ **typisch:**  $10^{-20} = 0.00000000000000000001$   
 (ein millionstel millionstel millionstel Prozent!)



Relative Längenänderung von  $10^{-20}$  entspricht absolut ( $\Delta L$ ):

Messstrecke	$\Delta L$	
4 km	0.04 fm = $4 \times 10^{-17}$ m	Advanced LIGO
2 Millionen km	20 pm = $2 \times 10^{-11}$ m	eLISA
1 Lichtjahr	0.1 mm	

Durchmesser eines Protons (Kern eines Wasserstoffatoms):  
 1.7 Femtometer (fm) ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ )



Heliumatom (© Wikipedia)



**Problem:** Beseitigung von Störeffekten (Rauschen)!



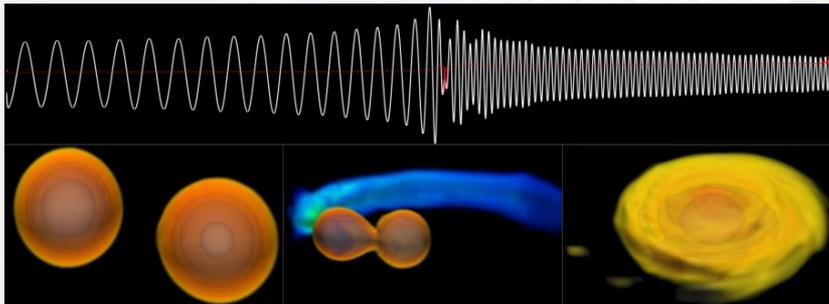
# Was sind Gravitationswellen?

(5)

## ➤ Charakteristische Frequenzen von GW:

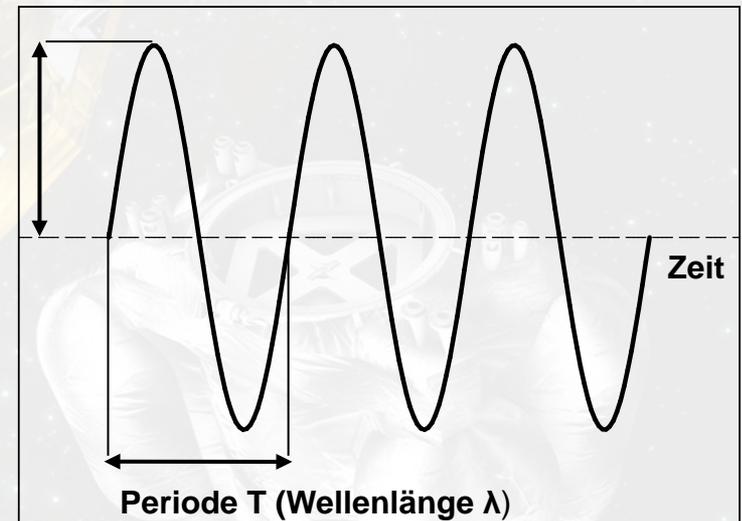
$$f \approx 10^{-18} (\approx 1 / \text{Weltalter}) \dots 10^{-5} (\approx 1 / \text{Tag}) \dots \sim 10^4 \text{ Hz}$$

$$f \approx 10^4 \frac{M_{\text{Sonne}}}{M} \text{ [Hz]}, \quad M - \text{Masse der Quelle}, \quad M_{\text{Sonne}} - \text{Masse der Sonne } (2 \times 10^{30} \text{ kg})$$



Kollision zweier Neutronensterne (© TPI/FSU, AG Brüggmann)

Amplitude  $h$



$$\text{Frequenz } f = 1/T = c/\lambda$$

[Einheit: 1 Hz (Hertz) = 1 Schwingung pro Sekunde]  
( $c$  – Wellengeschwindigkeit / Lichtgeschwindigkeit)

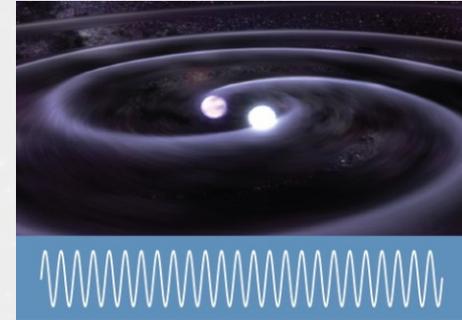


# Was sind Gravitationswellen?

(6)

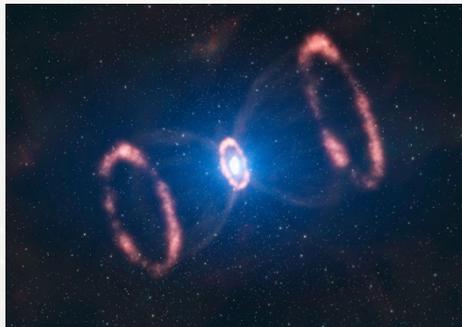
## Quellen von Gravitationswellen:

⇒ **plötzliche / kurzfristige Änderungen großer Massen (> Sonne)**



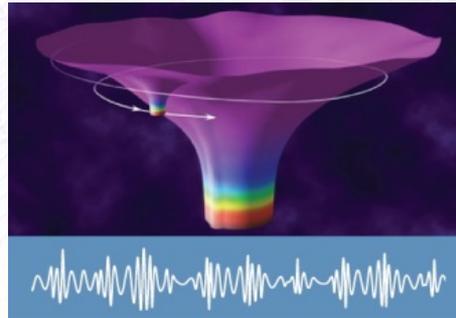
(© GSFC / D.Berry)

- **sehr kurzperiodische Doppelsternsysteme** (Umlaufzeit: ~Minuten); Doppelsysteme von **Weißen Zwerge** / **Neutronensternen**



(© ESO / L.Calçada)

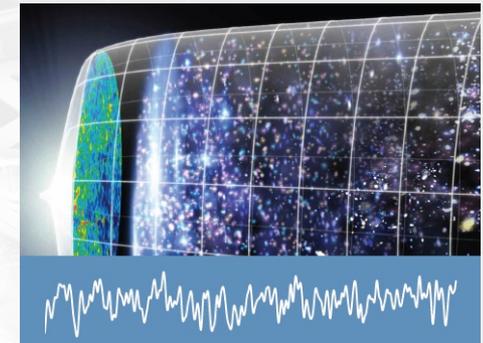
- **Supernova-Explosionen**



(© NASA)

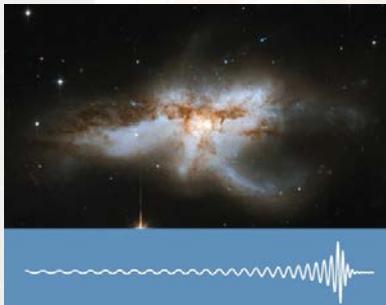
- **Kollisionen von Neutronensternen / Schwarzen Löchern** (Gamma-Ray-Bursts?)

- **Prozesse im frühen Universum** (Quantenfluktuationen, Phasenübergänge)



(© NASA / WMAP Science Team)

- **Einfall von Sternen** in massive Schwarze Löcher; **Verschmelzung** von supermassiven Schwarzen Löchern



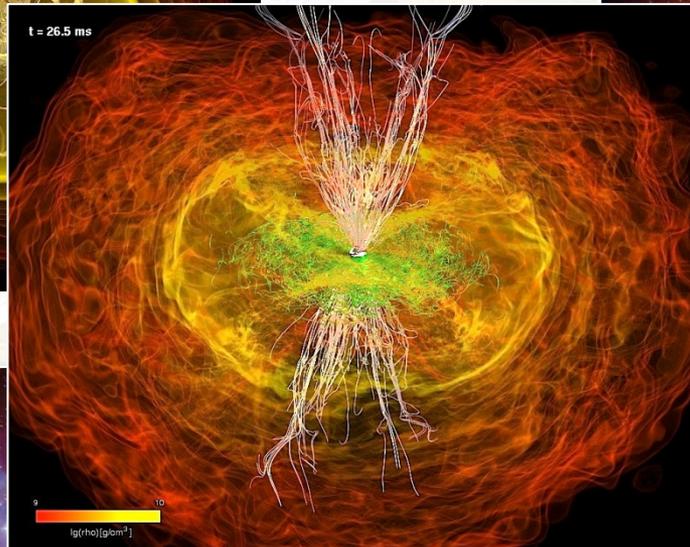
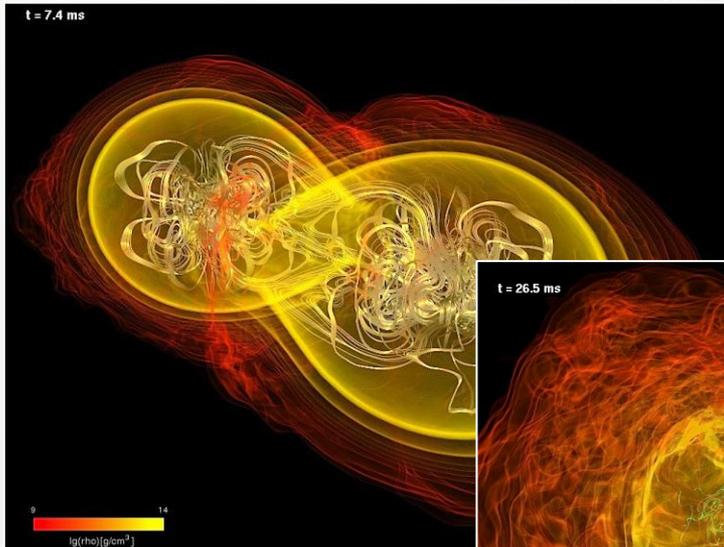
(© NASA/ESA/Hubble-Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble-Collaboration/  
A.Evans (Univ. of Virginia/NRAO/Stony Brook Univ.)

**Unbekannte Quellen???**

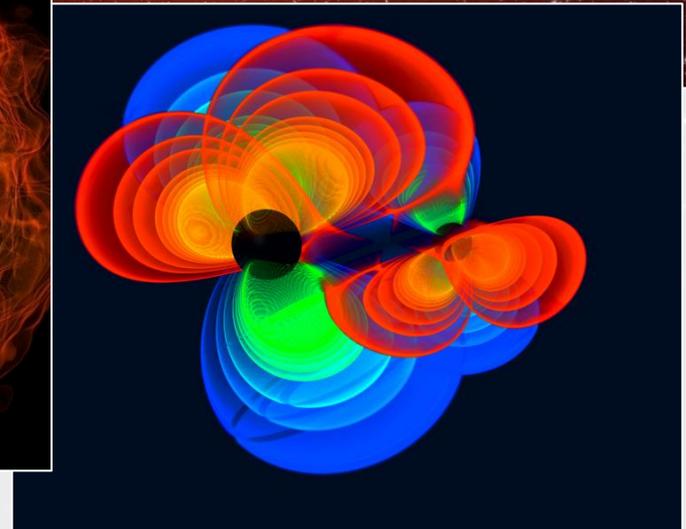
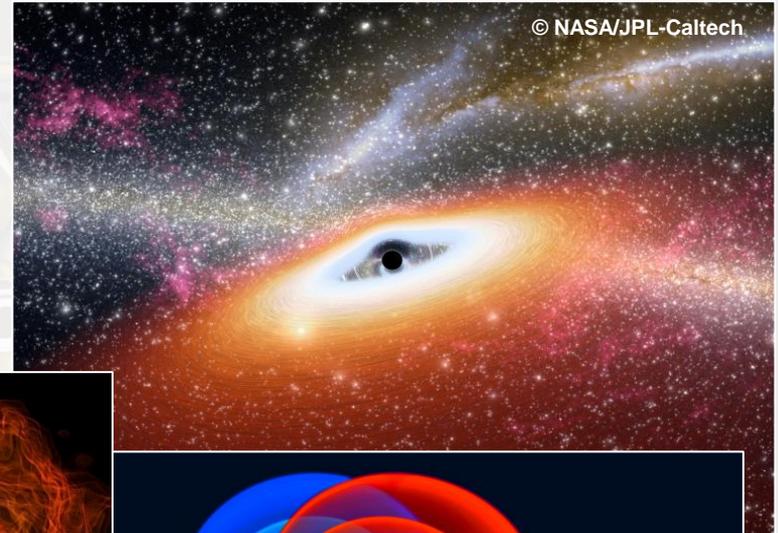
# Was sind Gravitationswellen?

(7)

## Quellen / Abstrahlung von Gravitationswellen:



**Zwei Neutronensterne verschmelzen zu einem Schwarzen Loch**  
(© L. Rezzolla (AEI) & M. Koppitz (AEI & ZIB))



**Verschmelzende Schwarze Löcher** (© AEI, Zuse-Institut Berlin)



© AEI



**Beobachtung der energiereichsten Phänomene im Weltall im Detail...**

# Wie lassen sich Gravitationswellen messen? (1)

## Indirekter Nachweis: Hulse-Taylor-Pulsar PSR B1913+16

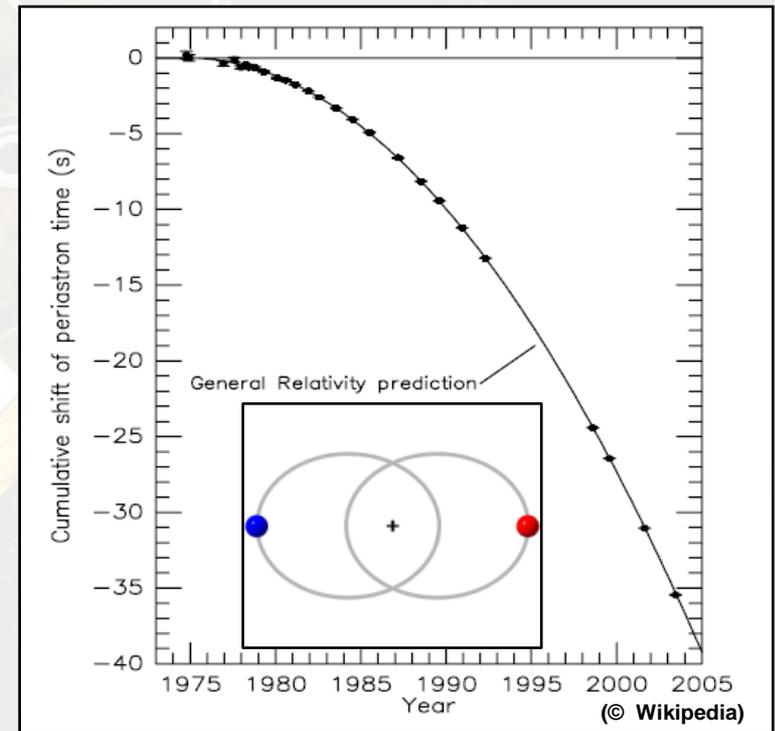
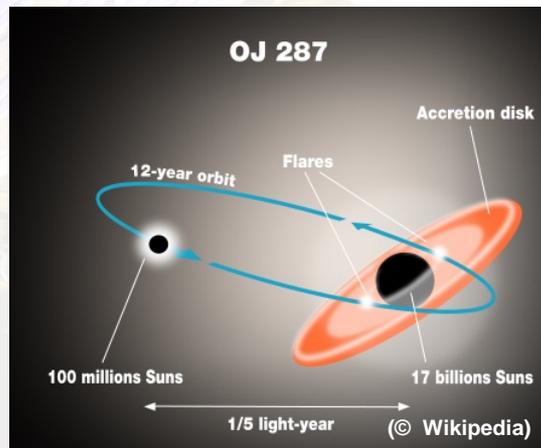
Physik-Nobelpreis 1993 für R.A. Hulse & J. Taylor!

- Doppel-Neutronenstern (entdeckt 1974)
- Pulsar liefert exakte Zeitmessungen (Rotation: 59 Millisek.)
- **Abnahme der Bahnperiode (~8 Stunden):**  
76 Mikrosekunden pro Jahr

⇒ **Abnahme der Bahnperiode kann durch Abstrahlung von GW gedeutet werden!**

## Weitere indirekte Nachweise:

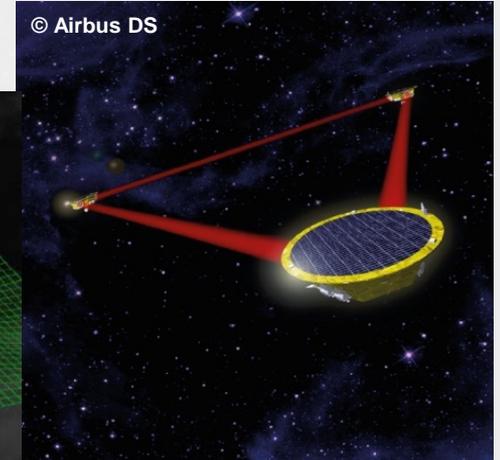
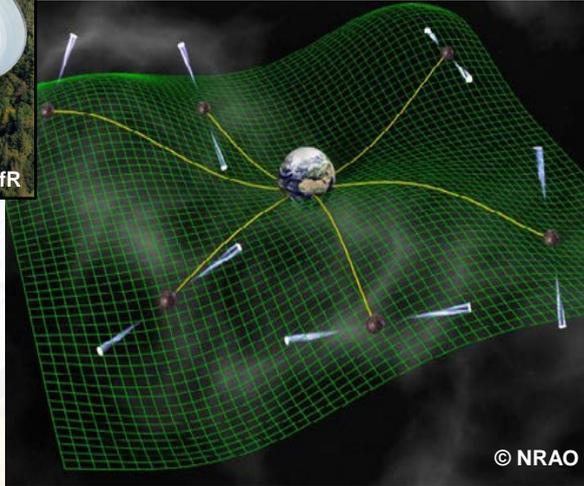
- Doppelpulsar  
PSR J0737-3039A/B
- Doppelsternsystem  
SDSS J0651+2844
- Quasar OJ287



Zerfall der Bahn von PSR B1913+16

**Erster direkter Nachweis von GW am 14. September 2015!**

# Wie lassen sich Gravitationswellen messen? (2)



Pulsar Timing Array

eLISA (Laserinterferometer)

Laserinterferometer **Virgo**, Italien

© AIP Emilio Segrè Visual Archives

Aluminiumzylinder-Detektor  
(Joseph Weber, ca. 1960)



MiniGRAIL  
(Univ. Leiden)

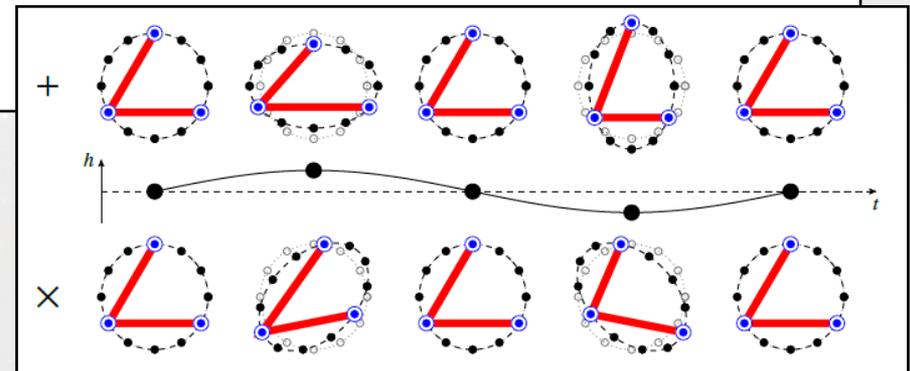
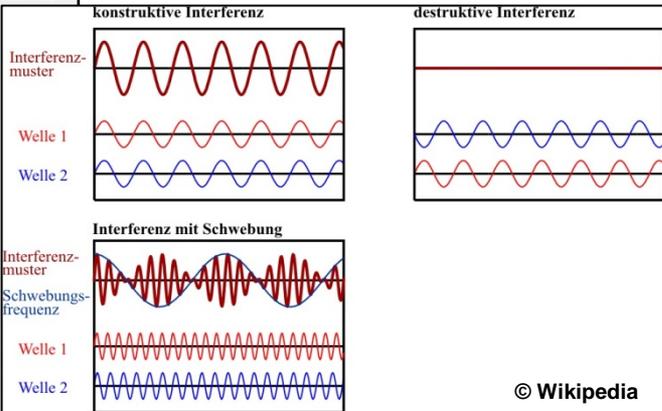
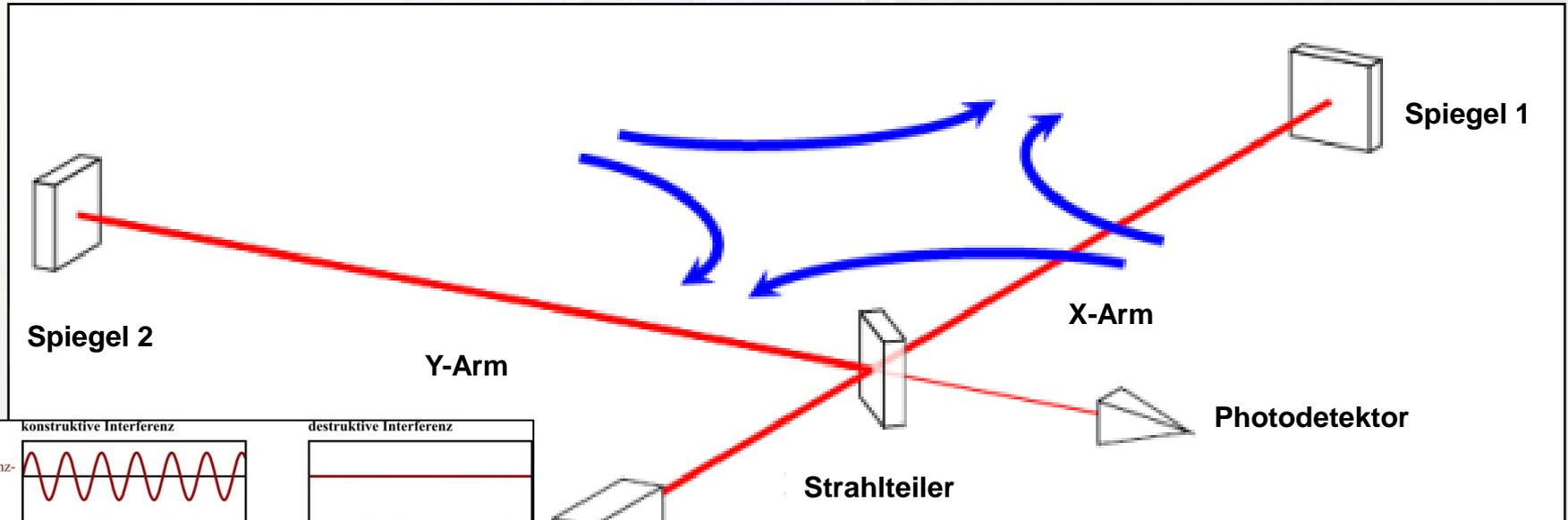


© EGO



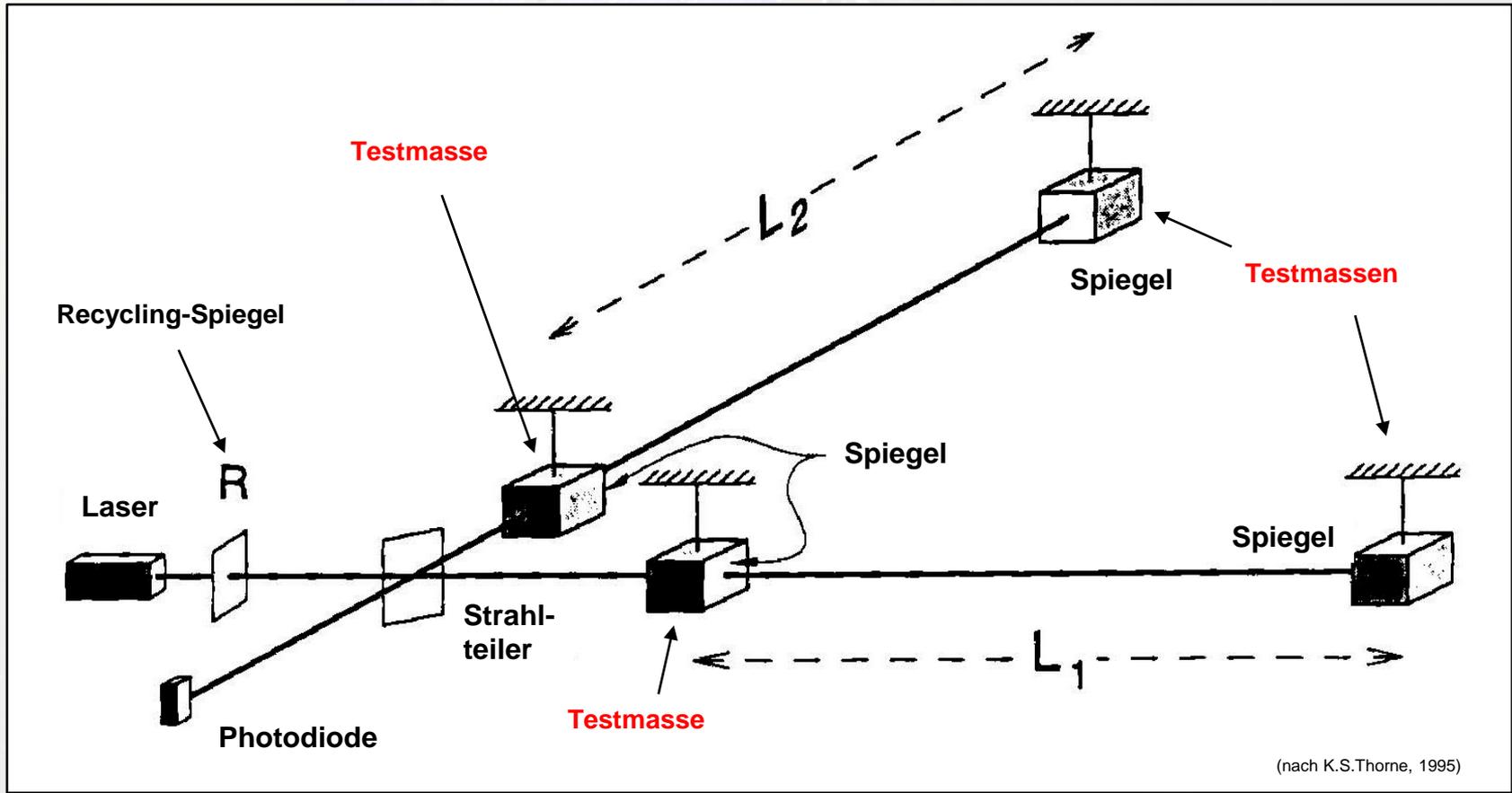
# Wie lassen sich Gravitationswellen messen? (3)

## Laserinterferometrie (bodengebunden / Weltraum): Prinzip eines Laserinterferometers



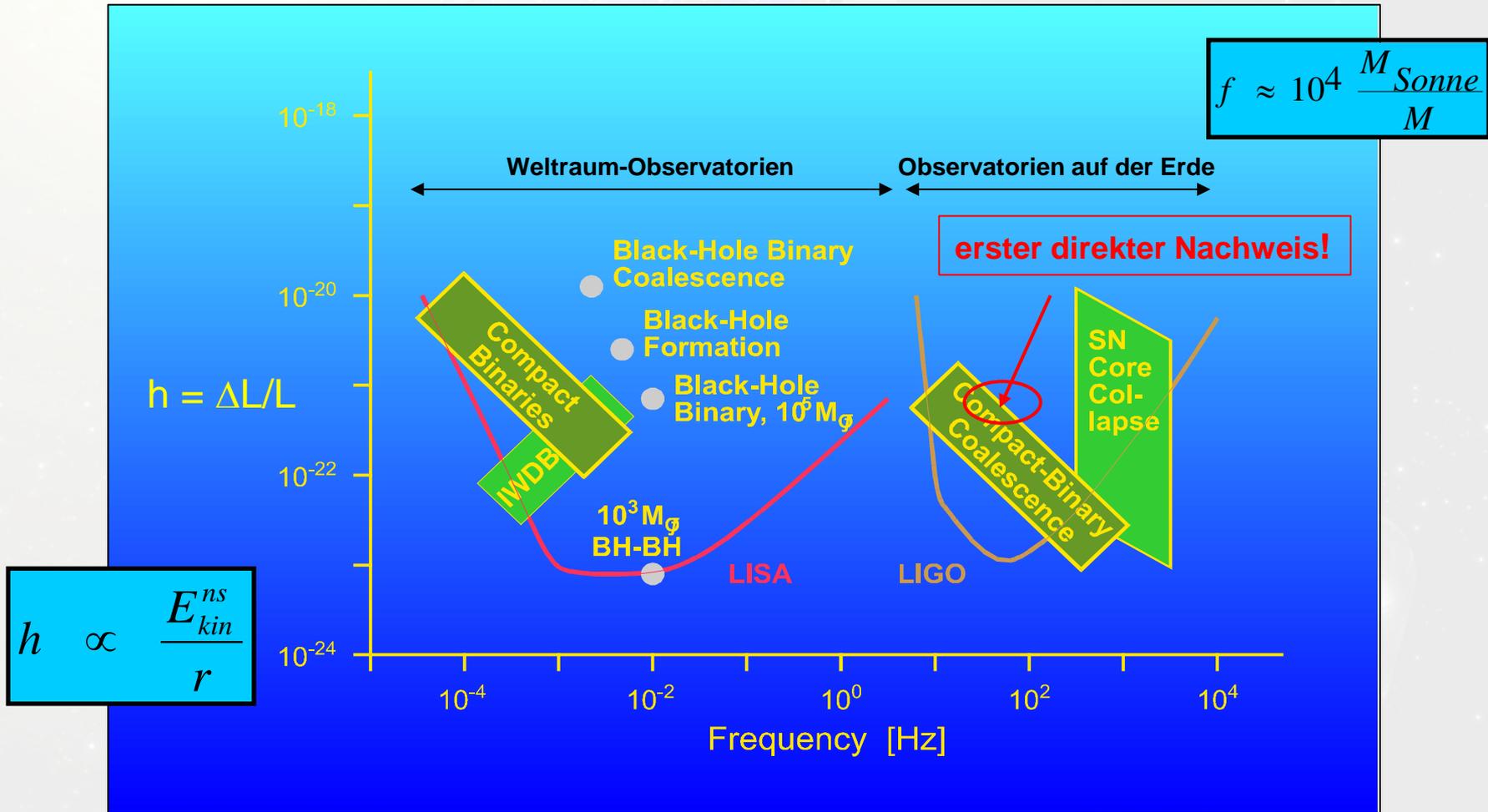
# Wie lassen sich Gravitationswellen messen? (4)

## Laserinterferometrie (bodengebunden / Weltraum): Grundlegender Aufbau & Techniken



# Wie lassen sich Gravitationswellen messen? (5)

(5)



# LIGO, VIRGO, KAGRA – Gravitationswellen-Observatorien auf der Erde (1)

➤ **LIGO** (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

– Standorte (Hanford & Livingston, USA); Armlängen: jeweils 4 / 2 km



LIGO Hanford, USA (seit 2002)

➤ **Virgo / EGO** (European Gravitational wave Observatory)

– Standort: Cascina bei Pisa (Italien); Armlänge: 3 km

➤ **Advanced LIGO & Advanced Virgo / Virgo+**



– voller **Wissenschaftsbetrieb von LIGO seit September 2015**; Armlängen s.o.

➤ **LCGT / KAGRA** (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

– Standort: Kamioka-cho, Hida-City (Kamioka-Mine), im Bau / Betrieb ab 2019?; Armlängen: 3 km (zwei Interferometer)



LCGT / KAGRA, Japan



Virgo, Italien (seit 2007)

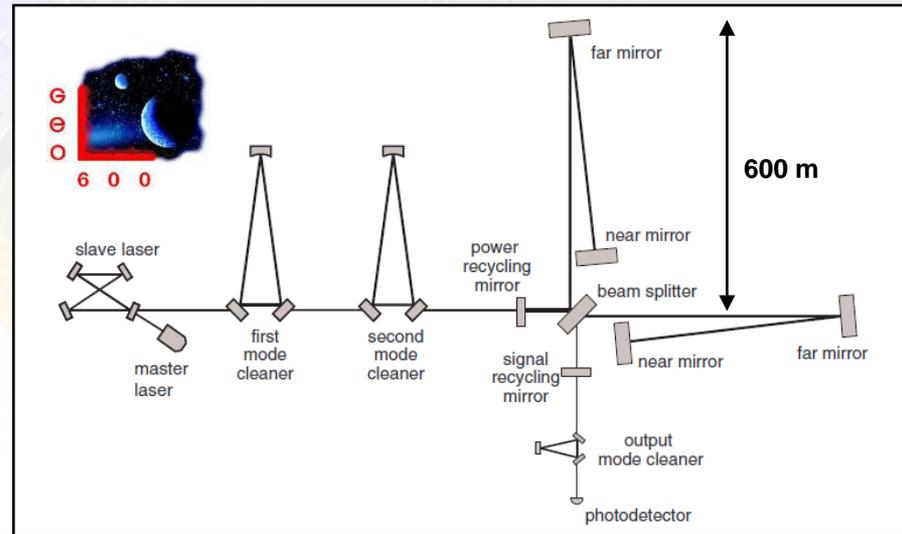
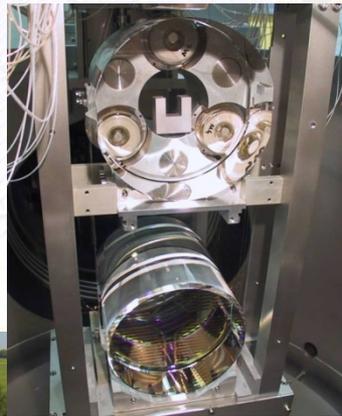
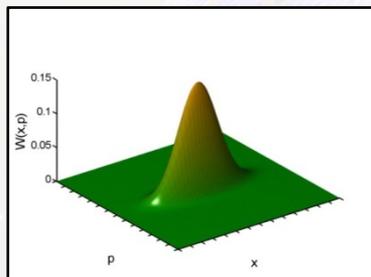


LIGO Livingston, USA (seit 2002)



# GEO600 – Gravitationswellen-Observatorien auf der Erde (2)

- **Lage:** 20 km südlich von Hannover (bei Ruthe)
- **Armlänge:** 2 x 600 m (optische Gesamtlänge 2400 m)
- **Technologie-Tests** für LIGO / Advanced LIGO z.B. hochstabiler Laser (Leistung 200 W)
- **Betrieb:** seit 2001 / 2002



Optischer Aufbau von **GEO600** (aus: P.Aufmuth & K. Danzmann (2005))



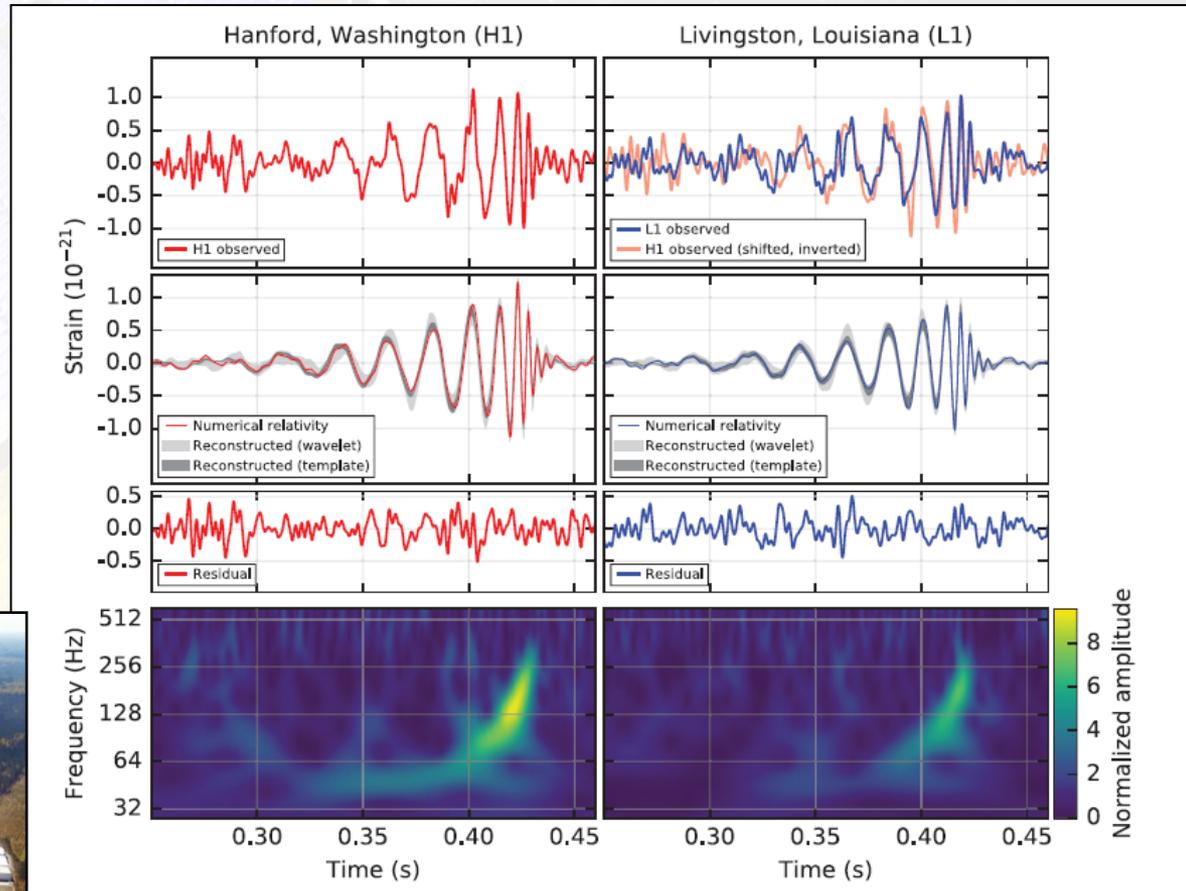
© AEI (alle Abb.)



# Erster direkter Nachweis von Gravitationswellen! (1)

## Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher am 14. September 2015: **GW150914**

- Bekanntgabe am 11. Februar 2016 (LIGO / Virgo Consortium)
- Nachweis mit **Advanced LIGO**
- **Dauer des Signals:** ~0.1 Sekunde
- **GW Amplitude:**  $h \approx 10^{-21}$
- **Massen:** 36 / 29 Sonnenmassen  
 ⇒ 62 Sonnenmassen nach Ereignis  
 ⇒ ~3 Sonnenmassen in GW!!!
- **Entfernung:** ~1.3 Mrd. Lichtjahre
- **Ort:** am Südhimmel
- **Gammastrahlungsausbruch** nach 0.4 Sekunden?



aus: PRL 116, 061102 (2016)

# Erster direkter Nachweis von Gravitationswellen! (2)



**Numerisch-relativistische Simulation von GW150914**

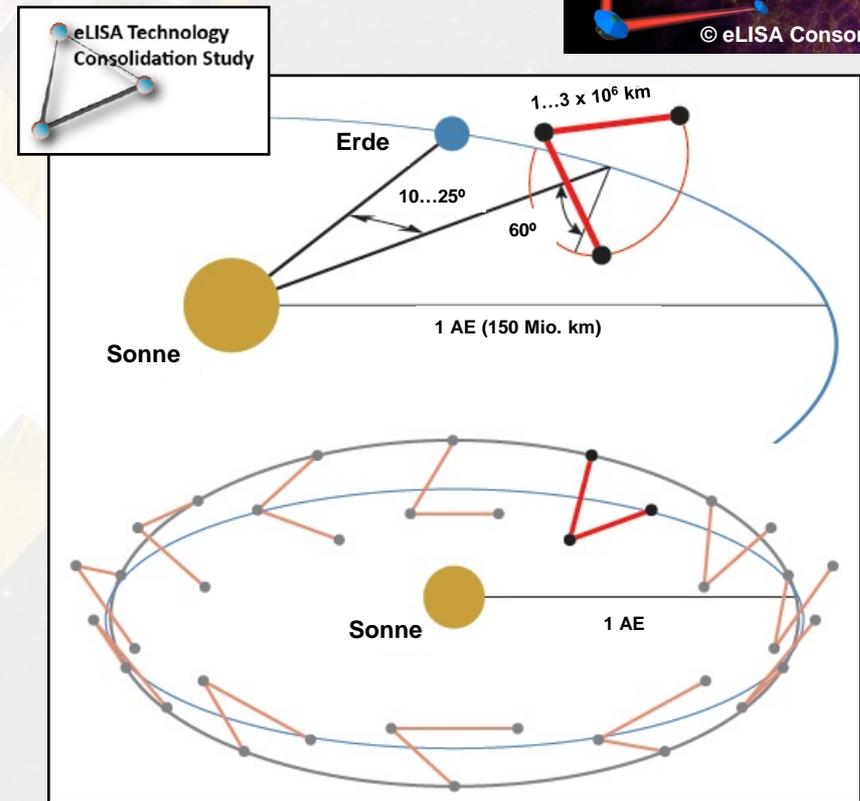
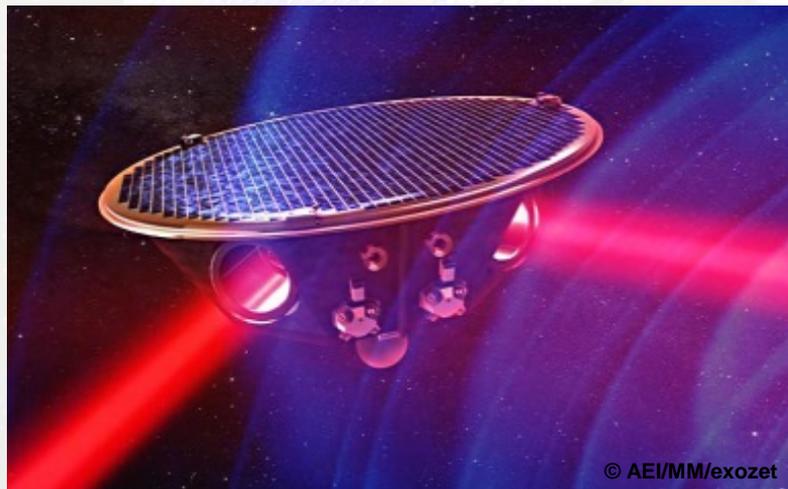
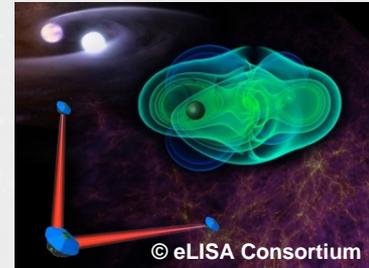
© S. Ossokine, A. Buonanno (MPI für Gravitationsphysik); wiss. Visualisierung: R. Haas (MPI für Gravitationsphysik)



# eLISA – Gravitationswellen-Observatorium im All

## Laserinterferometrie im Weltraum: LISA / eLISA – Missionskonzept

- **eLISA** – **e**volved **L**aser **I**nterferometer **S**pace **A**ntenna
- **L3-Mission der ESA**: Start 2034
- **drei Satelliten** bilden (annähernd) gleichseitiges Dreieck (Seitenlänge: ~1...3 Millionen km)
- **Hochgenaue Lageregelung** durch elektrische MikroNewton-Triebwerke
- **Teleskope**:  $\varnothing$  ~20 cm
- **Laserleistung**: ~2 W



aus K. Danzmann et al. (2013)



1 MikroNewton ( $\mu\text{N}$ ): Beschleunigung eines Autos auf 100 km/h in ~1.000 Jahren!



# Warum LISA Pathfinder?

(1)

➤ LISA Pathfinder testet **Schlüsseltechnologien für eLISA** im Weltraum

⇒ **Prinzip:** Positionsmessungen zweier freifliegender Testmassen („**Geodäten**“)

➤ **Technologien:**

– **Inertialsensoren**

⇒ Messung der Positionen der Testmassen relativ zum Satelliten

⇒ Abstand der Testmassen: 38 cm (eLISA: ~1...3 Millionen km)

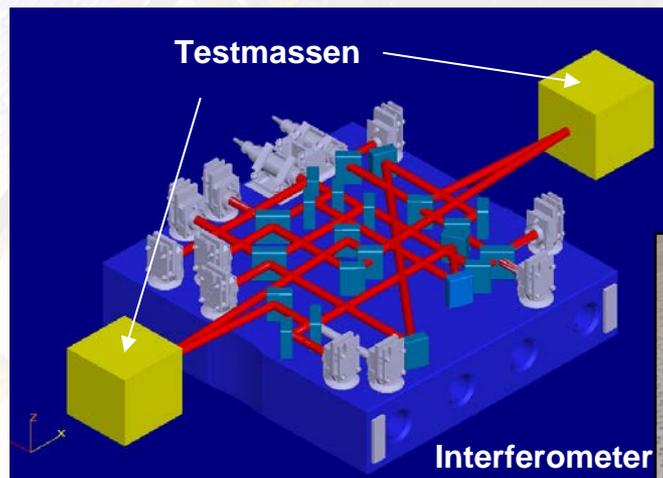
– **Drag-Free-Attitude-Control-System (DFACS)**

⇒ Steuerung der Kompensation von Störkräften mittels Inertialsensoren & MikroNewton-Triebwerken

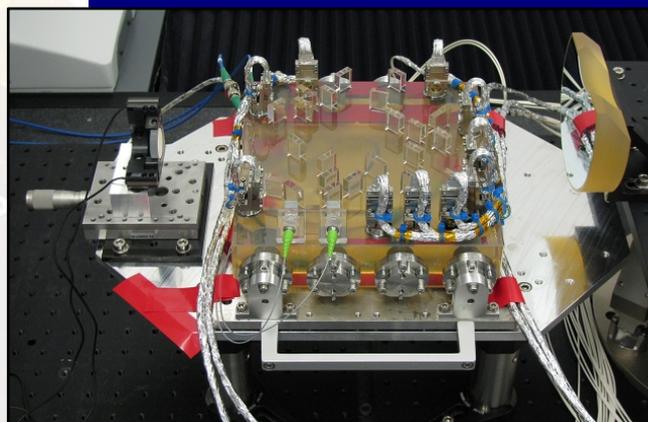
– **Laserinterferometrie**

⇒ Bestimmung gegenseitiger Positionen & Orientierung der Testmassen

⇒ Messgenauigkeit: < 10 Pikometer!  
(1 pm = 1 milliardstel mm)



LISA Pathfinder: Testmasse  
(46 x 46 x 46 mm<sup>3</sup>, 2 kg)



LISA Pathfinder: Optische Bank  
(© Univ. of Glasgow / Univ. of Birmingham)



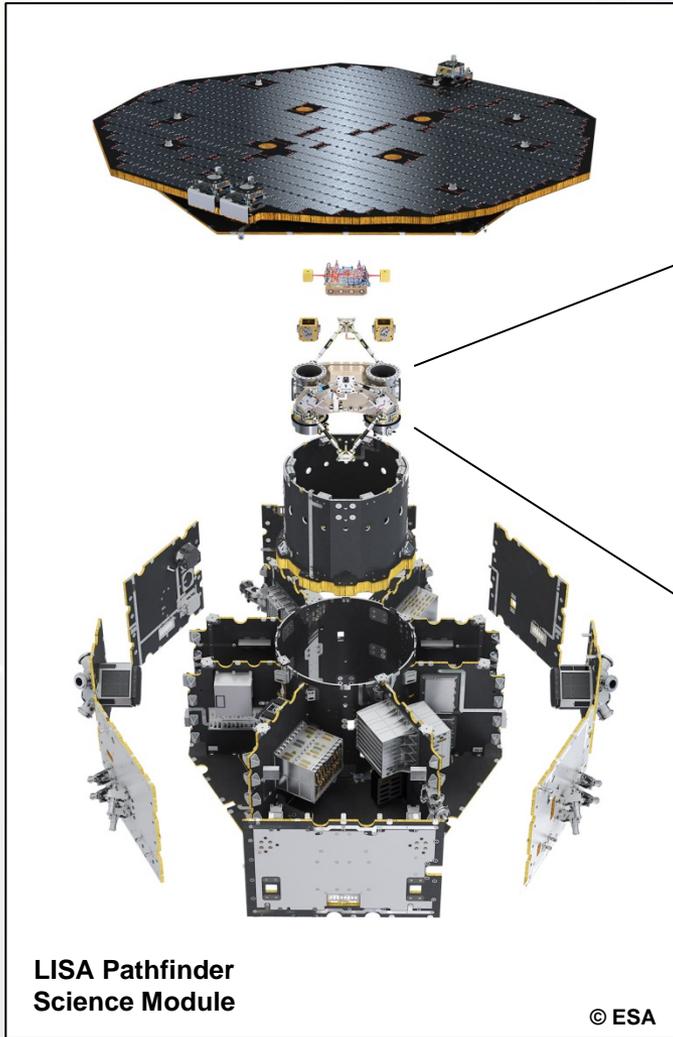


# Warum LISA Pathfinder?

(2)

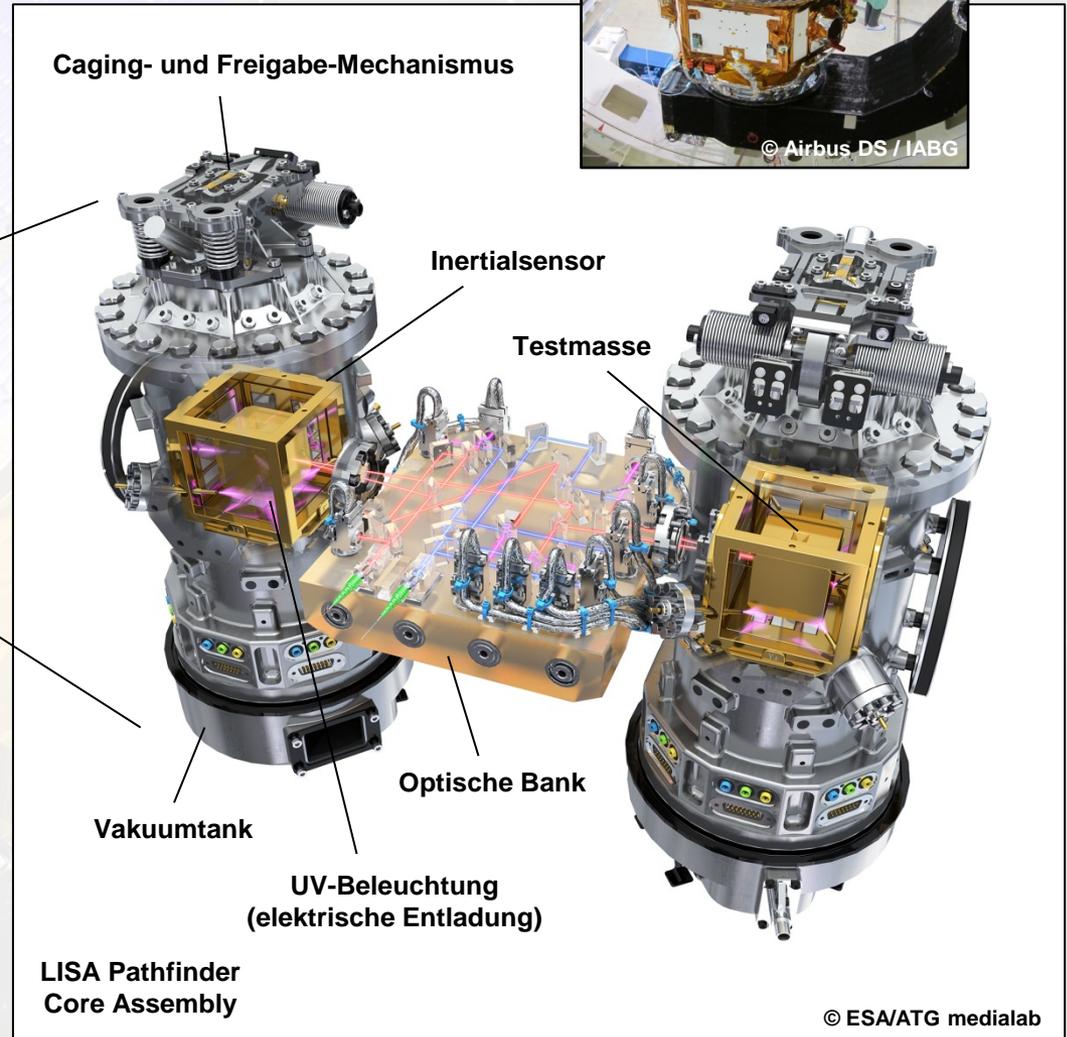


© Airbus DS / IABG



LISA Pathfinder Science Module

© ESA



LISA Pathfinder Core Assembly

© ESA/ATG medialab

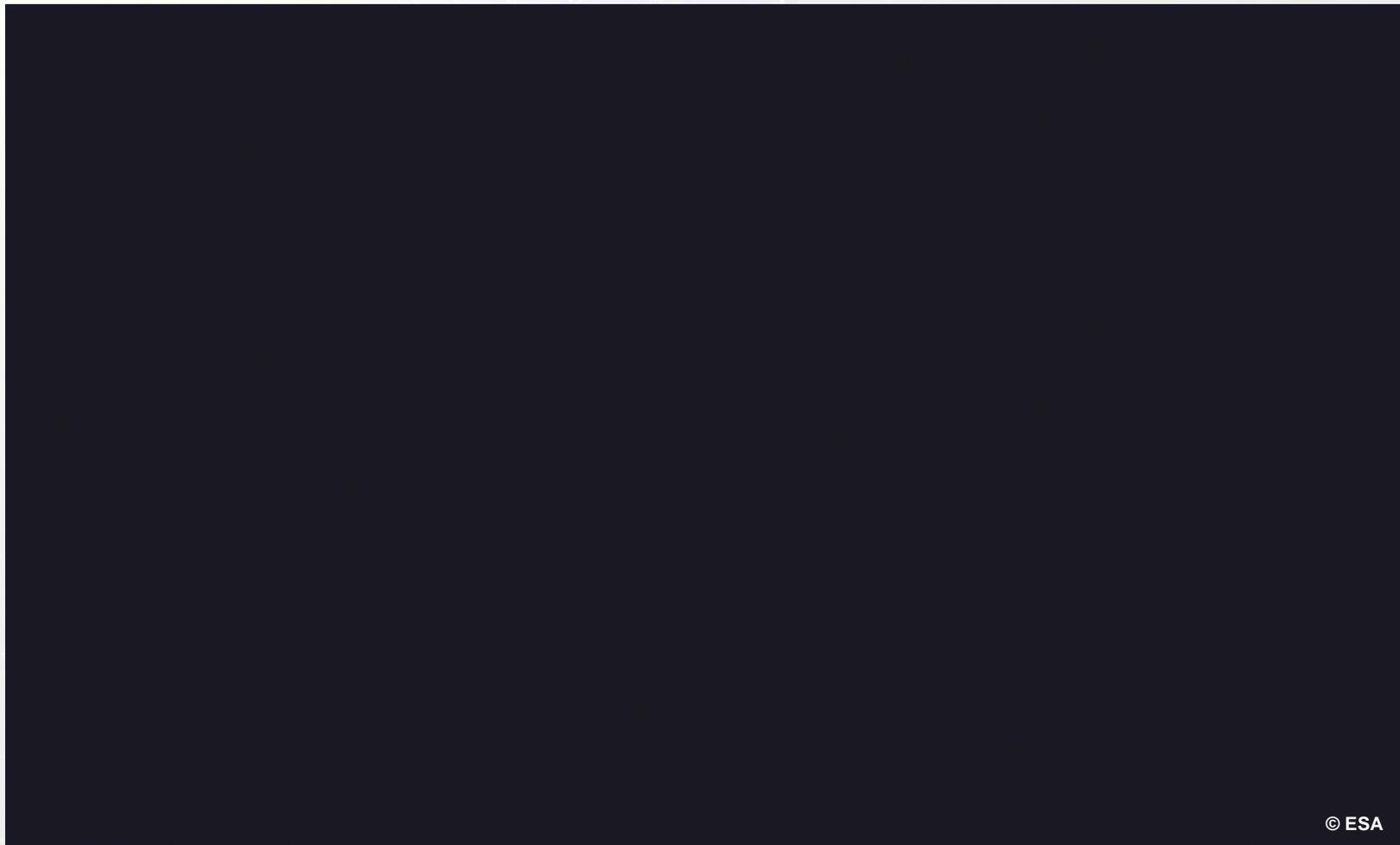




**lisa pathfinder**

# Warum LISA Pathfinder?

**(3)**



© ESA





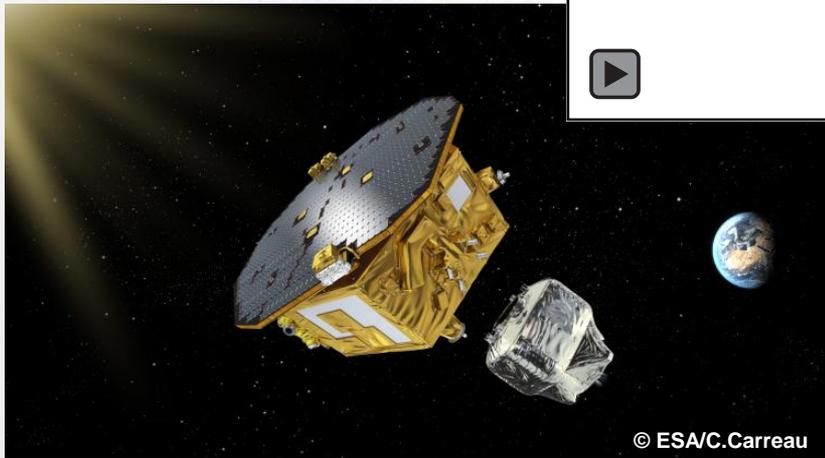
# Warum LISA Pathfinder?

(4)

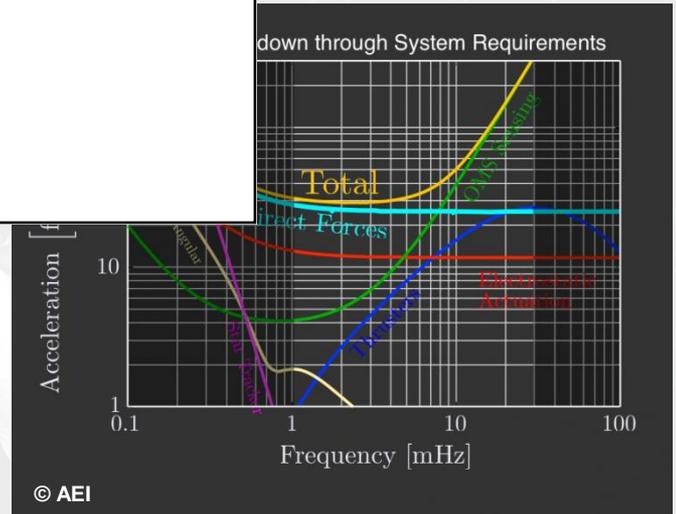
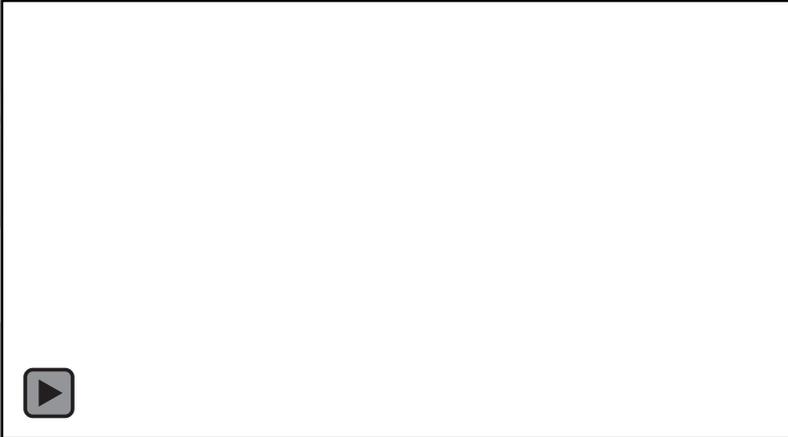
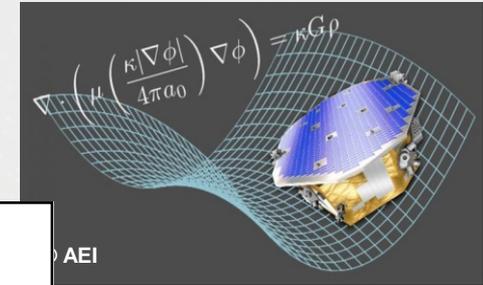
## LISA Pathfinder: Reise in den Lagrangepunkt L1



Start am 3. Dezember 2015



Abtrennung des Antriebsmoduls (rechts) am 22. Januar 2016; Ankunft im L1



Beginn des Wissenschaftsbetriebs im L1: Anfang März 2016 (Dauer: ~9 Monate)

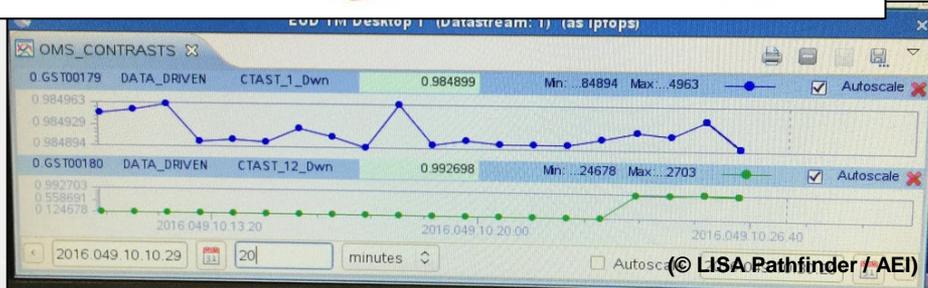
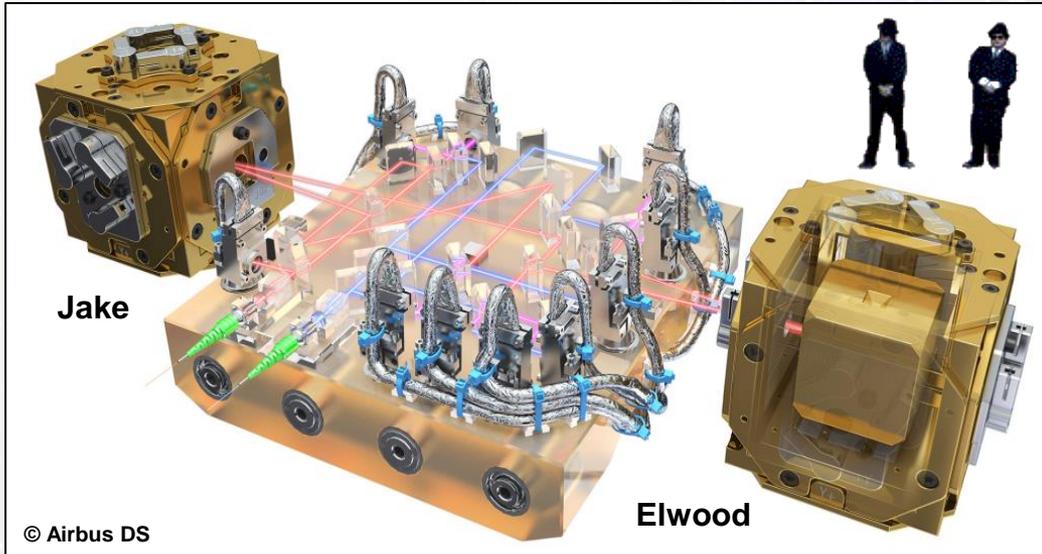




# Warum LISA Pathfinder?

(5)

## LISA Pathfinder: Erste Ergebnisse / Stand der Mission (15./16. Februar 2016)

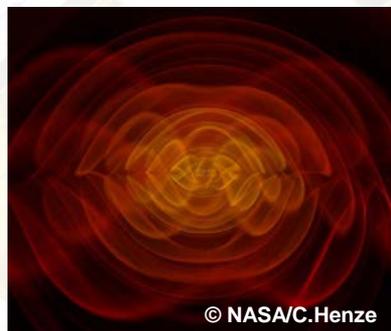
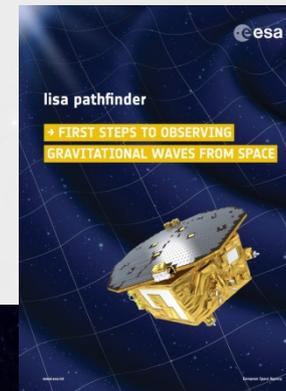


# Testmassen erfolgreich frei gegeben & unter Kontrolle!

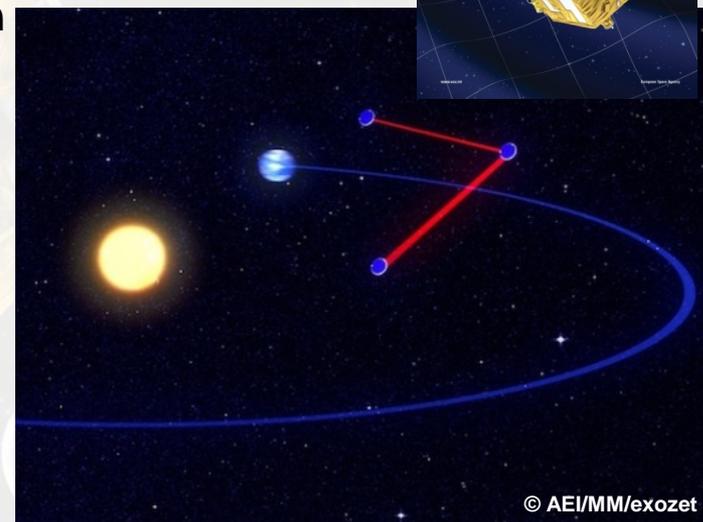


## Wie geht es nach LISA Pathfinder weiter?

- **2016:** wissenschaftlicher Betrieb von LISA Pathfinder
- **2000 bis heute:** technische Vorarbeiten zu LISA / eLISA
- **2001/02 – 2015:** Entwicklung von LISA Pathfinder
- **2016 – 2024:** weitere Technologieentwicklungen (ESA, DLR und andere)
- **2019 – 2023:** Bau eines Prototypen („Engineering Model“) für eLISA
- **2025 – 2034:** Entwicklung und Bau von eLISA
- **2034:** Start von eLISA



© NASA/C.Henze



© AEI/MM/exozet



**Viele Quellen von GW senden keine (oder nur wenig) elektromagnetische Strahlung aus und umgekehrt ⇒ komplementäre Informationen!**

**Neue Entdeckungen zu erwarten!**

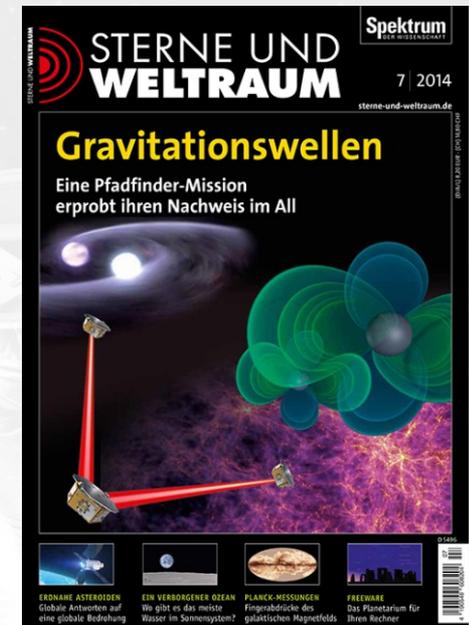
# LISA Pathfinder & eLISA: Wo finde ich mehr?

## LISA Pathfinder / eLISA:

- Thorne, K.S., *Gravitational Waves*, 1995 (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086>)
- Grothues, H.-G., Reiche, J., *LISA Pathfinder*, Sterne & Weltraum, Juli 2014
- LISA Pathfinder (DLR): [http://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2448/3635\\_read-5451](http://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2448/3635_read-5451)
- LISA Pathfinder (ESA): [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/LISA\\_Pathfinder\\_overview](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/LISA_Pathfinder_overview)  
<http://sci.esa.int/lisa-pathfinder>  
<http://www.cosmos.esa.int/web/lisa-pathfinder>
- LISA Pathfinder / eLISA (AEI): <https://www.elisascience.org>

## Gravitationswellen:

- GW allgemein: <http://www.einstein-online.info>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave)
- GEO600 (AEI): <http://www.geo600.org>
- LIGO: <https://ligo.caltech.edu>
- Virgo: <http://www.virgo-gw.eu>
- **Erster direkter Nachweis:** <http://www.aei.mpg.de/gwdetektion>  
<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160211>



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit...

## Gibt es **Fragen**?



Kontakt: Dr. Hans-Georg Grothues – [hg.grothues@dlr.de](mailto:hg.grothues@dlr.de)

[www.dlr.de](http://www.dlr.de)

