

# Gravitationswellen-Detektoren

## Auf der Suche nach Spin-2 Teilchen

Philipp Schmakat

TU München  
Physik Department

02.02.2009

# Gliederung

## Grundlagen

- Gravitationswellen
- Detektor Anforderungen
- Optik

## Gravitationswellen Detektoren

- GEO600
- LIGO
- VIRGO
- LISA

## Zusammenfassung

# Allgemeine Relativitätstheorie

- Grundlegende Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind die Einstein Gleichungen:

$$G_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

- Sie verknüpfen Energie-Impuls Tensor der Raumzeit mit der Dynamik und Geometrie
- Energie (Masse) krümmt die Raumzeit und die Raumzeitkrümmung bestimmt die Bewegung von Massen

## Krümmungen der Raumzeit Metrik

- Allgemeine Relativitätstheorie sagt damit voraus:  
Zeitlich veränderliche Gravitationsfelder erzeugen Störungen in der Raumzeit Metrik  
(‘Beschleunigte Massen erzeugen Gravitationswellen’)
- Die Krümmung der Metrik ist im Allgemeinen ein sehr sehr kleiner Effekt
- Sehr groß war der Effekt bei Ereignissen nahe des Urknalls
- Stark ist die Krümmung in der Nähe des Ereignishorizonts von Schwarzen Löchern

## Wieso Wellen?

- Näherung der Einstein Gleichungen durch Annahme einer asymptotisch flachen Raumzeit (wenn die gekrümmte Metrik für große Abstände in die flache Minkowski-Metrik übergeht)

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Hier ist  $\eta_{\mu\nu}$  die Minkowski-Metrik und  $h_{\mu\nu}$  eine Störung der Metrik

- Einsetzen in die Einstein Gleichung und Umformen liefern:

$$\square h_{\mu\nu} - \square \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} h = -16\pi G T_{\mu\nu}$$

## Wieso Wellen?

- Mithilfe von Eich-Transformationen lässt sich die Gleichung schreiben als:

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}$$

- Im Vakuum des freien Raums ist die Energiedichte näherungsweise  $T_{\mu\nu} = 0$  und die Lösung z.B. eine ebene Welle:

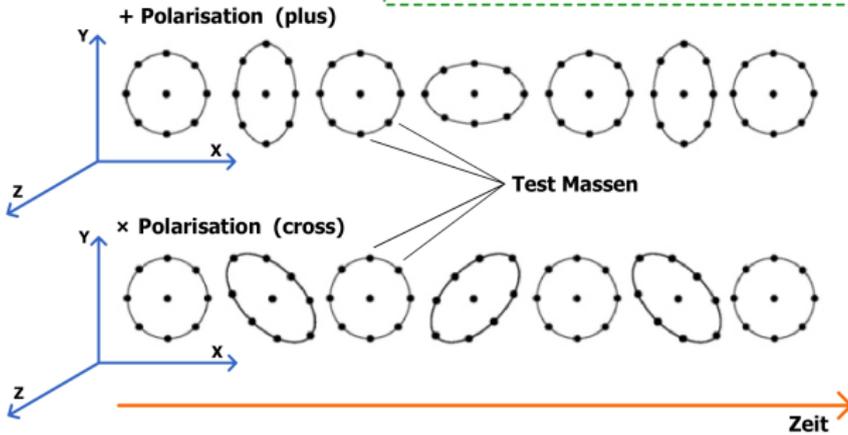
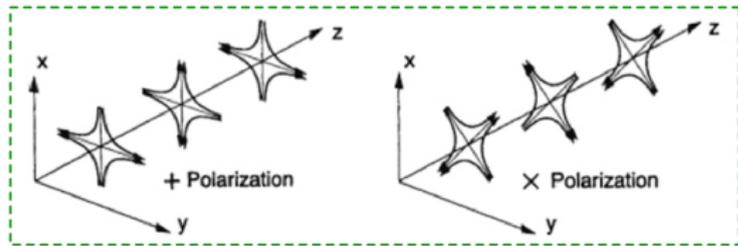
$$\bar{h}_{\mu\nu} = A_{\mu\nu} e^{ik^\alpha x_\alpha}$$

- Überlegungen zeigen: Gravitationswellen zeigen Quadrupol Charakter

# Gravitationswellen

- Gravitationswellen sind aus unserer Sicht Transversalwellen
- Bei einer ebenen Welle ergeben sich nur zwei unabhängige Matrixelemente in  $\bar{h}_{\mu\nu}$  darum zwei Polarisationsmoden ( analog zu elektromagnetischen Wellen )
- Die Polarisierungen sind invariant unter Drehung um 180 Grad, das Graviton wäre also ein Spin-2 Teilchen

# Polarisation der Gravitationswellen



## Woher kommen Gravitationswellen?

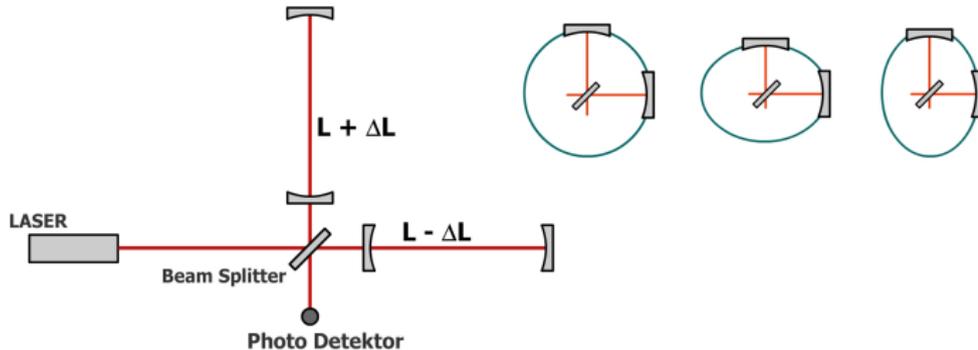
- Kollabierende Binärsysteme
- schnell rotierende Neutronensterne, Pulsare
- Supernovae, Gamma Ray Bursts
- Verschmelzende Schwarze Löcher
- Vibrationen des Urknalls

# Detektionsmethoden

- Resonanz Detektoren  
( Piezo Sensoren messen die Auslenkung )
- Interferometer Detektoren  
( Spiegel als Test Massen )



## Interferometer Detektoren



- detektierte Leistung  $P \sim \sin^2(2k\Delta L)$
- üblicherweise wird der Photo Detektor dunkel gehalten
- eine Längenänderung bewirkt eine Erhöhung der Licht Intensität



## Hohe Sensitivität

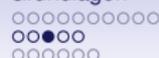
- Längenänderung  $\Delta L = L_1 - L_2$  ist sehr klein
- Interferometer Arme müssen sehr lang sein
- Relative Längenänderungen im Bereich von

$$h = \frac{\Delta L}{L} \approx 10^{-21}$$



## Erhöhung der Sensitivität

- Hohe Laser Leistung im Interferometer
- Licht in den Interferometer Armen speichern
- Phasen-Shift vergrößern durch längere Arme
- Störquellen erkennen und berücksichtigen



# Störeinflüsse

- Einflüsse durch äußere Kräfte
  - Thermisches Rauschen (Vibration durch Temperaturänderung)
  - Seismische Bewegung (Bodenvibrationen)
  - Strahlungsdruck von der Sonne und kosmischer Hintergrund
- Einflüsse der Detektor-Komponenten
  - Shot-Noise (Quantenfluktuationen bestimmen die Nachweisgrenze der Photo-Diode)
  - Laser Noise (unsauberes Strahl Profil, unerwünschte Moden)
  - Residual Gas Noise (wenn das Vakuum keines ist)

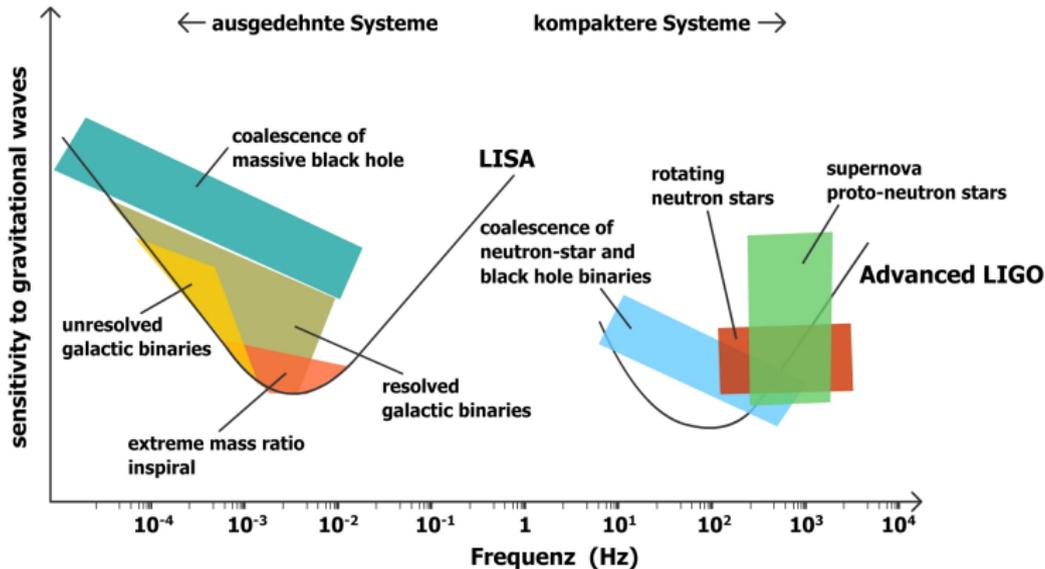


## Störeinflüsse verringern

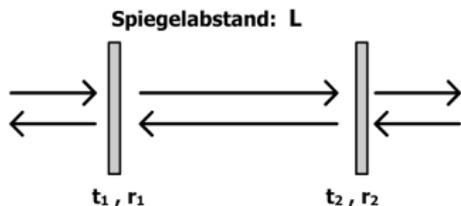
- Freie Testmassen als Pendel
- Im Weltall frei schwebende Testmassen
- Laser Strahl im Vakuum
- Hochreine optische Komponenten
- Aktive Regelungssysteme / elektronisches Feedback
- Störfrequenzen filtern und dämpfen



# Frequenzbereich



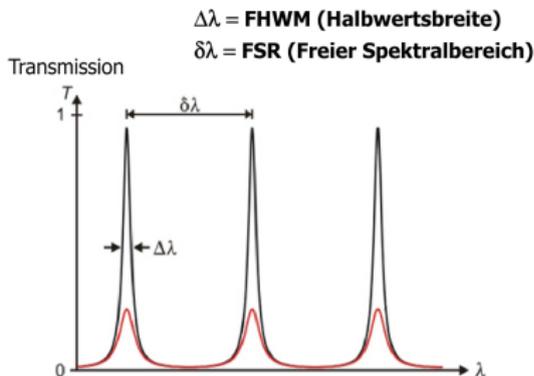
# Fabry Perot Anordnung



Resonanzfrequenzen bei  $f_N = (N + \frac{1}{2}) \frac{c}{2L}$

$$\text{Finesse } F = \frac{\delta\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\pi \sqrt{r_1 r_2}}{1 - r_1 r_2}$$

hängt nur von den Reflektivitäten ab



Es existieren mehrere Resonanzfrequenzen, nur ein Peak wird für das Interferometer verwendet.

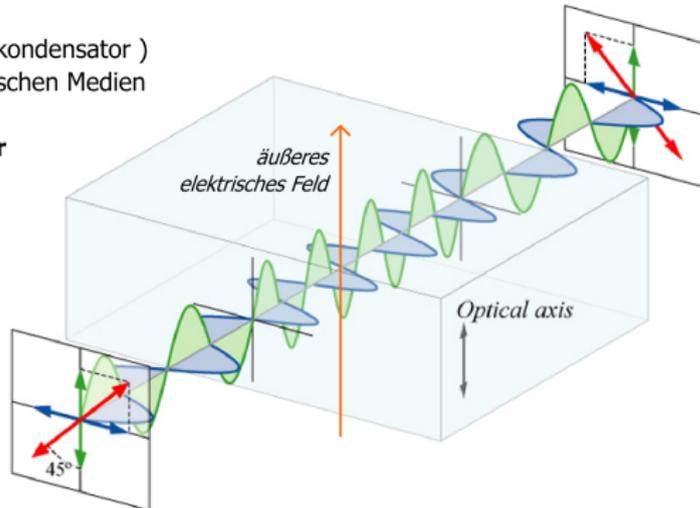
# Pockels Cell

**Pockels Cell** ( Elektro-Optischer Modulator )

Äußeres elektrisches Feld ( Plattenkondensator )  
verursacht Doppelbrechung in optischen Medien

**- dreht den Polarisationsvektor**

- Kann z.B. als  $\lambda/2$  Plättchen genutzt werden
- Mit Pockels Zellen lässt sich linear polarisiertes Licht in zirkular polarisiertes Licht umwandeln und vice versa
- Mit einem Polarisator entsteht ein schneller Shutter  
( geeignet zur Amplituden-Modulation )

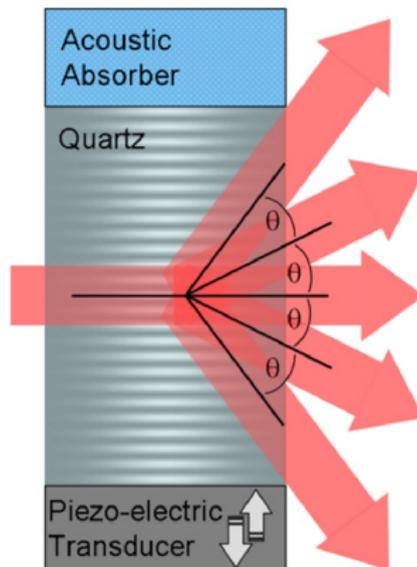


# Acousto-Optic Modulator

## Akusto-Optischer Modulator (AOM) nutzt den Akusto-Optischen Effekt

Mit einem AOM lässt sich Licht manipulieren:

- **Beugung des Lichtstrahls**  
( abhängig von der Wellenlänge des Schalls )
- **Intensitätsänderung**  
( über Schall Intensität variierbar )
- **Frequenz Shift**  
( Doppler-Verschiebung um die Schall Frequenz )
- **Phasen Shift**  
( um die Phase des Schall Signals verschoben )
- **Polarisation**  
( durch 'doppelbrechenden Phasen Shift' )



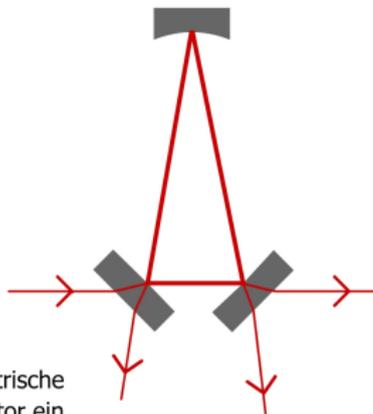
# Mode Cleaner

## Die Qualität des Laser Strahls von Hoch-Energie Lasern ist nicht perfekt

### Mode Cleaner 'bereinigen'

- das Phasen Profil und / oder
- das Intensitäts Profil des Laser Strahls

Das Strahlprofil wird durch die Resonanz verbessert



Resonanz tritt ein, wenn die geometrische Weglänge eines Umlaufs im Resonator ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$  beträgt



# Power Recycling

- Impedanz Anpassung des Lasers an das Interferometer
- Mit einem passenden Spiegel wird das Licht nicht in den Laser zurück reflektiert
- Damit wird die Lichtleistung im Interferometer erhöht, die Shot-Noise Grenze sinkt



# Signal Recycling

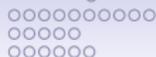
- Der Signal Recycling Spiegel soll Seitenbänder in Resonanz halten
- Er ist nur durchlässig für einen Teil des Lichts, das durch eine GW 'erzeugt' wird
- Durch die Signal Recycling Cavity kann der sensitive Frequenzbereich vor der Photodiode verändert werden
- So kann die Sensitivität im interessanten Frequenzbereich erhöht werden

# Der GEO600 Detektor



## Der GEO600 Detektor

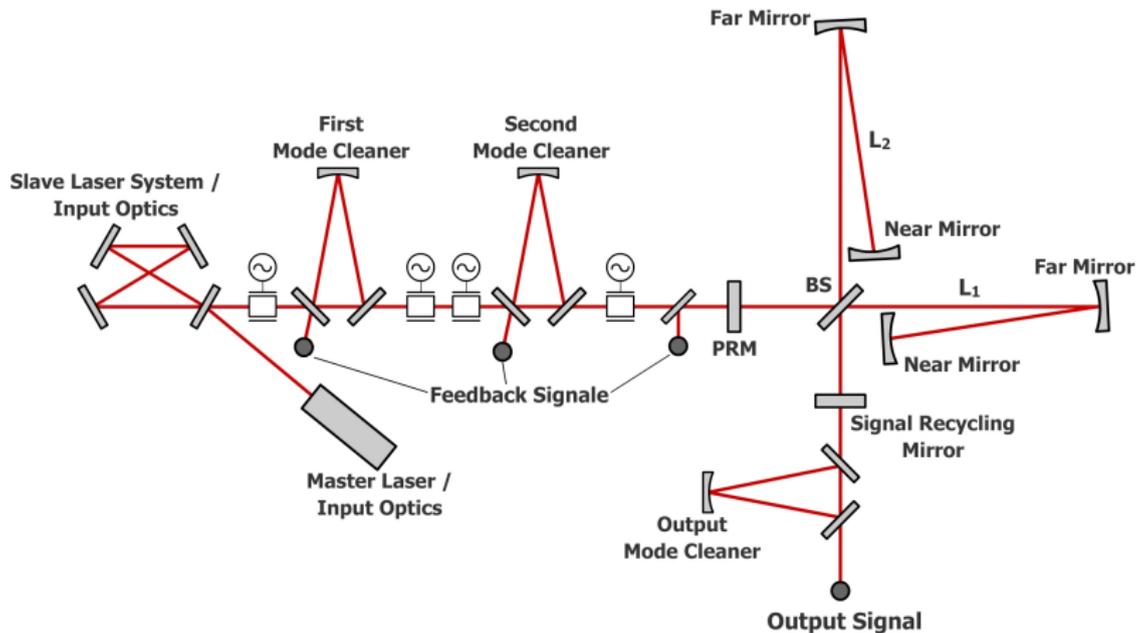
- GEO600 wurde 1995 in Ruthe bei Hannover eingerichtet und
- wird vom MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam gemeinsam mit den Universitäten Hannover, Cardiff und Glasgow betrieben
- Das Budget beläuft sich auf 6 Millionen Euro (etwa ein Zehntel der folgenden beiden Detektoren)



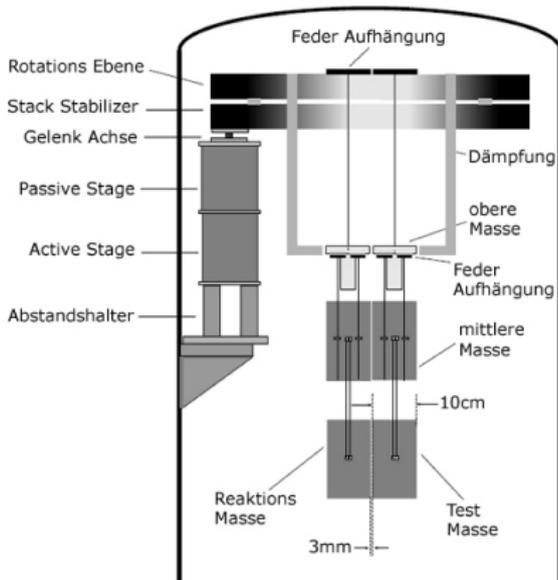
# GEO600 Spezifikationen

- Vakuumrohre:  $2 \times 600 \text{ m}$  Länge /  $60 \text{ cm}$  Durchmesser /  $p < 10^{-8} \text{ mbar}$
- diodengepumpter Nd:YAG-Laser bei  $1064 \text{ nm}$
- Laserleistung: **10 W** Ausgangsleistung
- Leistungsverstärkung in der Fabry Perot Anordnung: **bis zu 10 kW**
- Signalverstärkung: **bis zu 100-fach**
- Quarzglas Spiegel mit  $25 \text{ cm}$  Durchmesser
- Frequenzbereich: **50 Hz bis 2 kHz**, Bandbreite  $60 \text{ Hz}$  bis  $1 \text{ kHz}$
- Relative Empfindlichkeit:  $h \sim 10^{-21}$  für pulsformige Signale

# GEO600 Laser System



# Aufhängung der Spiegel



# Das LIGO Experiment



## Der LIGO Detektor

- 1992 wurde das LIGO Experiment ins Leben gerufen, etwa 1999 war die Anlage aufgebaut
- LIGO besteht aus zwei Detektoren, in Hanford (Washington) und in Livingston (Louisiana)
- Da die beiden Detektoren 3000 km Abstand voneinander haben, kann die Position der GW Quelle aus dem Laufzeitunterschied ermittelt werden

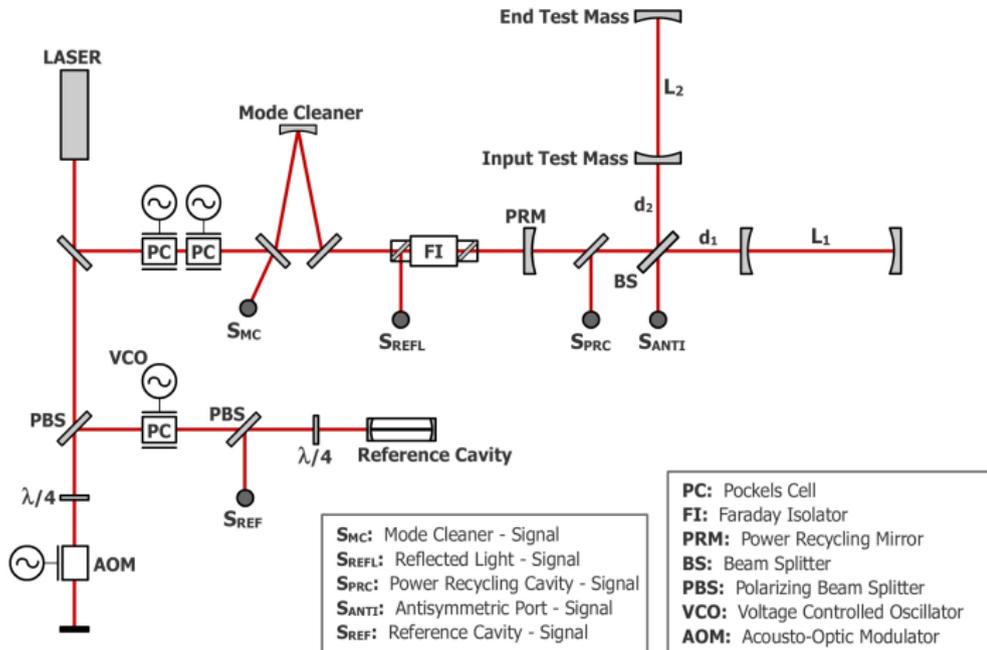
# LIGO Photos



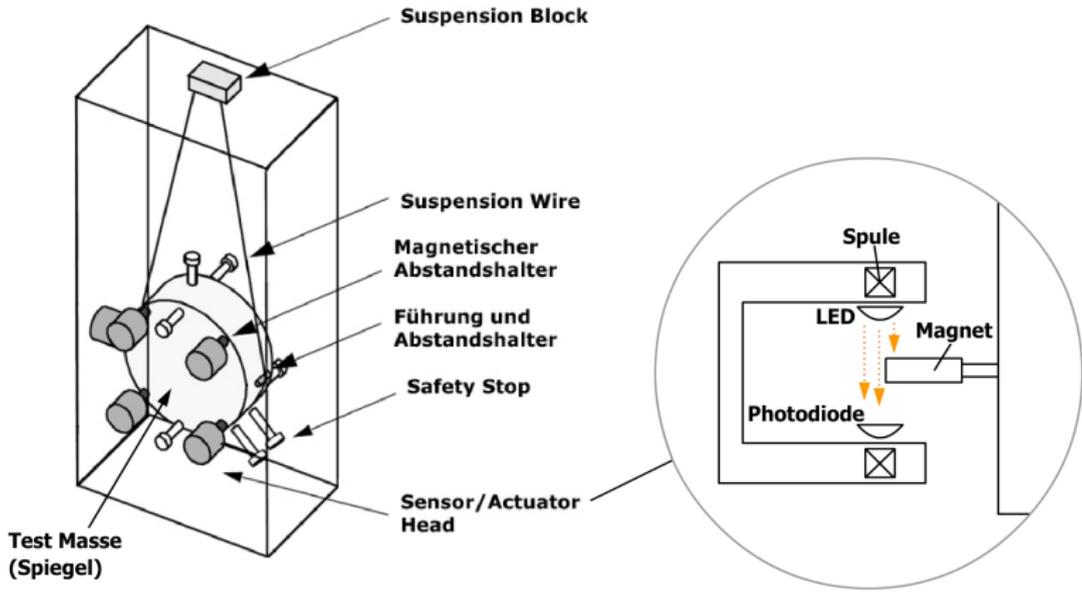
# LIGO Spezifikationen

	<b>H1 (Hanford)</b>	<b>L1 (Livingston)</b>
Arm Length	4 km	4 km
Finesse	220	220
Storage Time	0.95 msec	0.95 msec
Laser Type	Nd:YAG [ 1064 nm ]	Nd:YAG [ 1064 nm ]
Input Power at PRM	4.5 W	4.5 W
Power Recycling Gain	60	45
Power in Arm Cavities	20 kW	15 kW
Test Mass Size	d=25 cm , h=10 cm	d=25 cm , h=10 cm
Test Masses	10.7 kg	10.7 kg
Beam Radius	3.6 cm - 4.5 cm	3.6 cm - 4.5 cm
Pendulum Frequency	0.76 Hz	0.76 Hz

# Das LIGO System



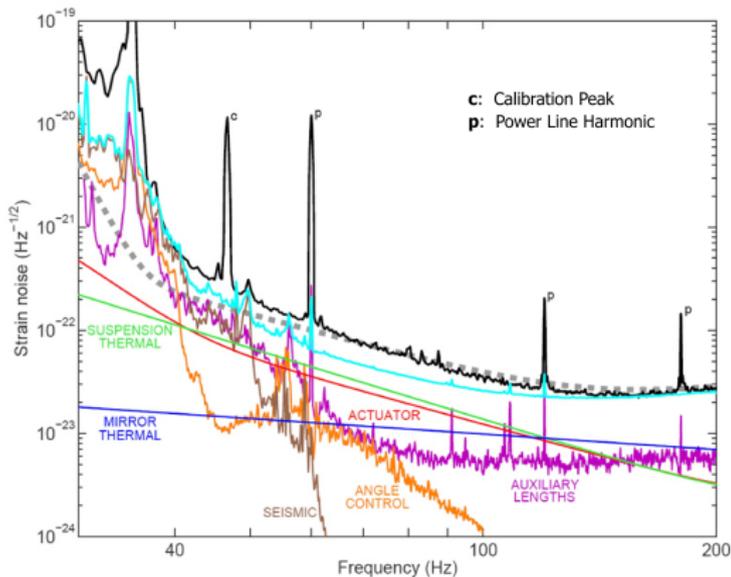
# Aufhängung der Test Massen



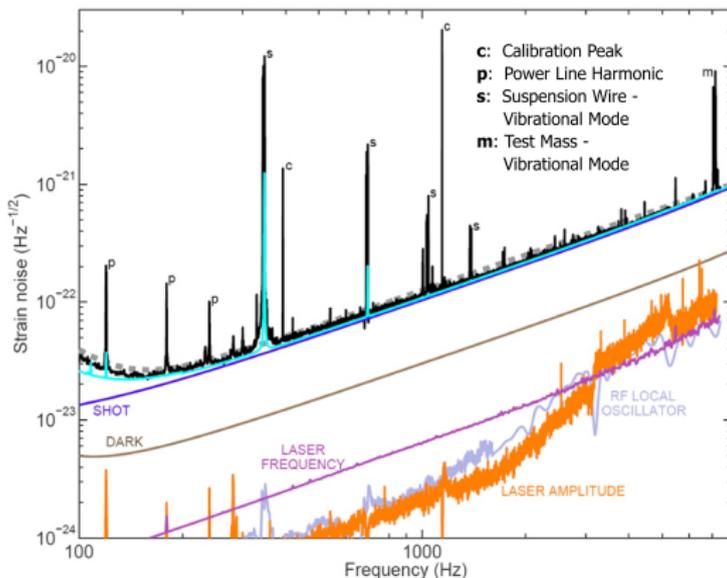
# Äußere Einflüsse

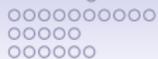


# Rauschen durch äußere Einflüsse

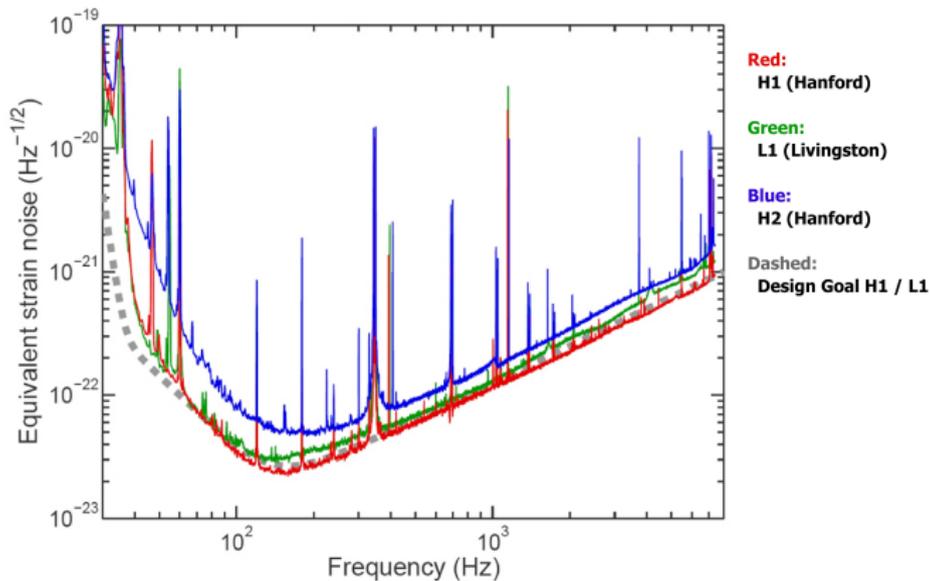


# Rauschen bei der Detektion





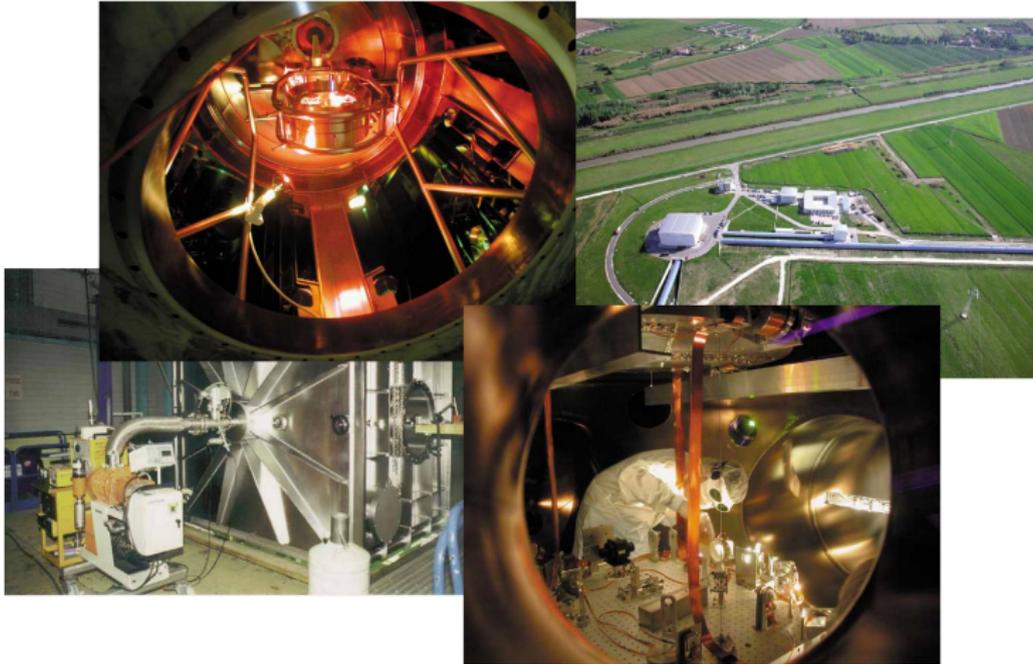
# Rauschen

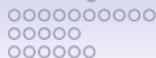


## Advanced/Enhanced LIGO Improvements

- Mehr Laser Leistung: 120 Watt (etwa die zehnfache Leistung)
- Aktive seismische Dämpfung (Grenze sinkt von 40 Hz auf etwa 10 Hz)
- Dämpfung in mehreren Pendel Stufen, neue Aufhängung: Quarzglasfasern
- Test Massen werden durch Strahlendruck oder elektrostatische Kräfte ausgerichtet
- Neues Material der Test Massen (40 kg Saphir Ein-Kristall Spiegel)

# Das VIRGO Experiment





## VIRGO Daten

Armlänge **3 km** / Durchmesser **120 cm** /  $p < 10^{-9}$  mbar

Laser: Nd:YAG diodengepumpt mit 1064 nm / Leistung **20 W**

Mode Cleaner: Länge **144 m**

Leistung in der Fabry-Perot Cavity: **15 - 50 kW**

Leistung in der Power Recycling Cavity: **1 kW**

Frequenz Bereich: **10 Hz - 10 kHz**

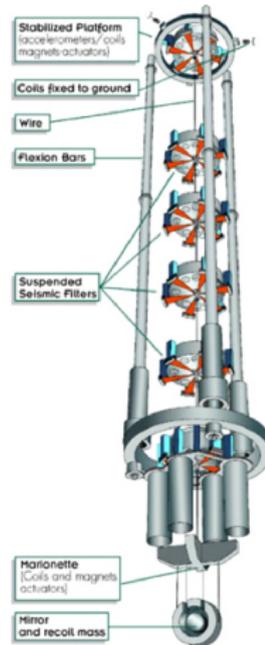
Sensitivität (bei 10 Hz):  $h \sim 3 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$

Sensitivität (bei 1 kHz):  $h \sim 3 \times 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$





# VIRGO Test Massen



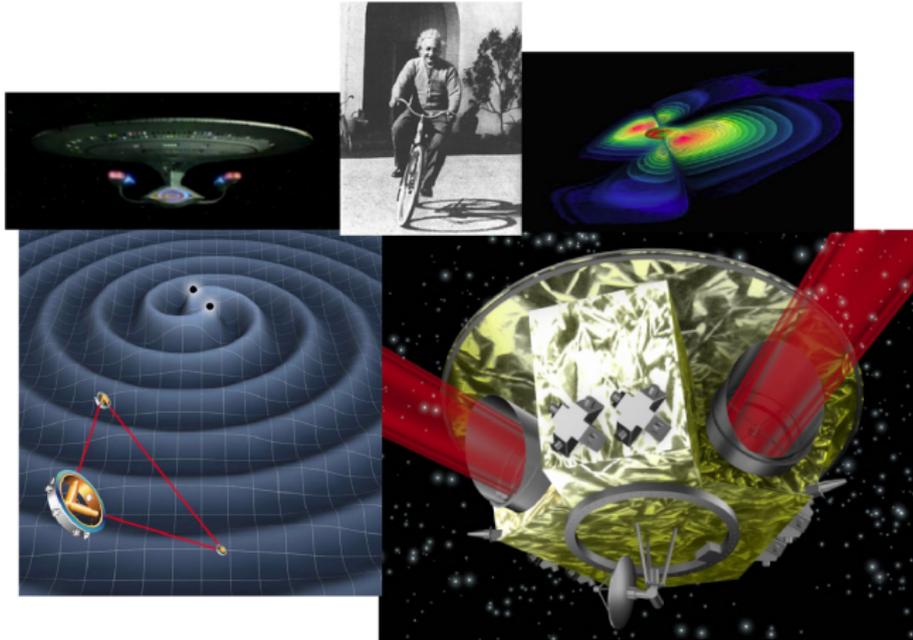
# VIRGO Test Massen



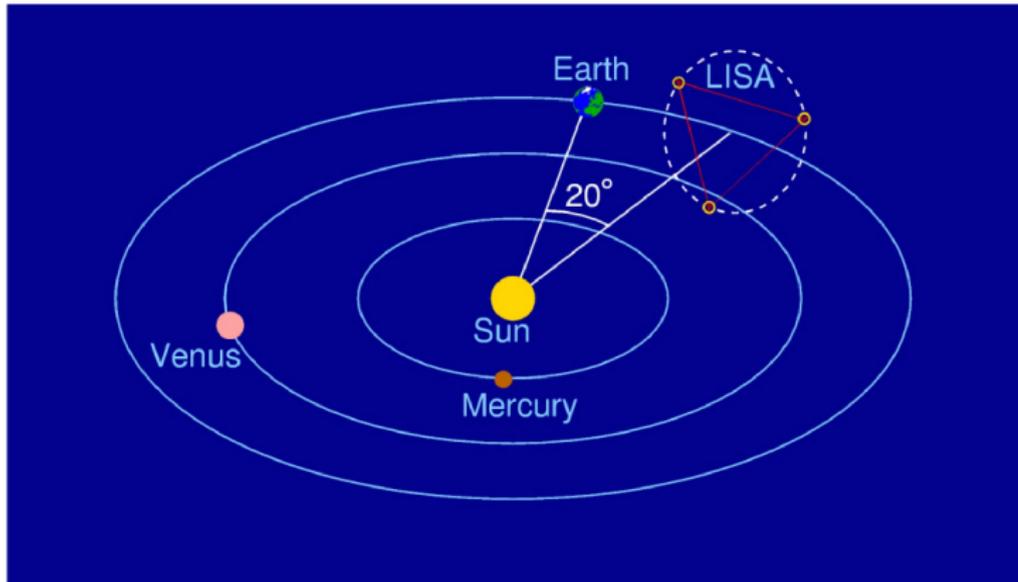




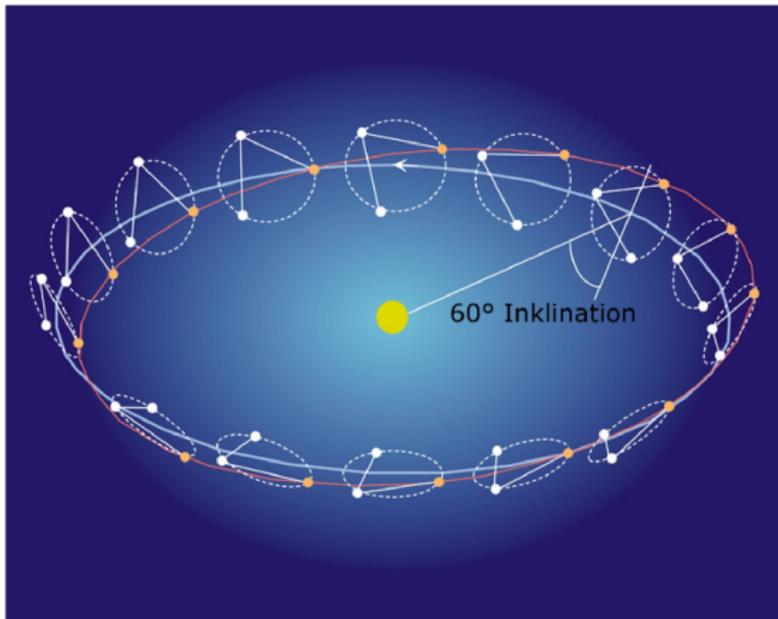
# Laser Interferometer Space Antenna



# LISA's Position



# LISA's Orbits



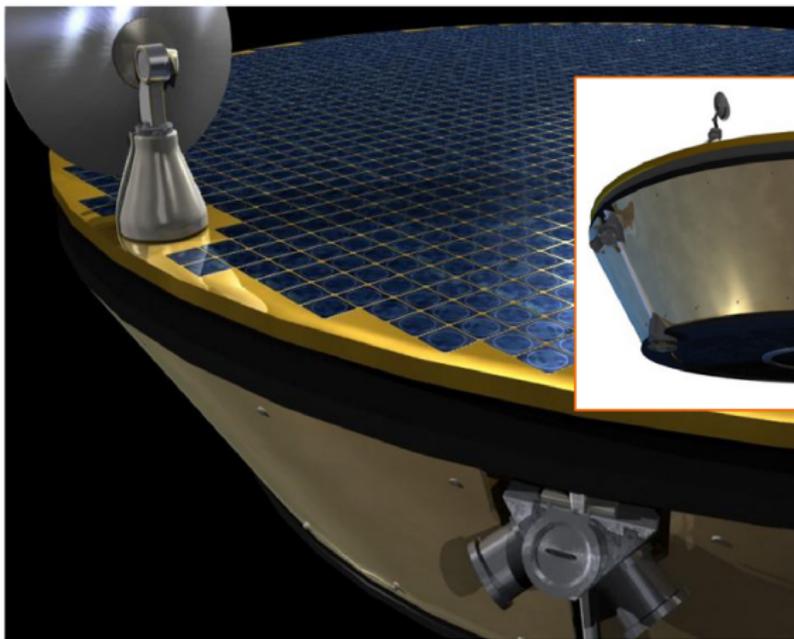
# Spacecraft Spezifikationen von LISA

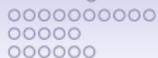
- Durchmesser: 2.8 m / Dicke 0.76 m
- Masse: 598 kg
- Leistung: 810 W aus Solarzellen
- Positionskorrektur: 3 Antriebs Module mit je 4 Mikro-Antrieben bis  $30 \mu N$

## Payload Spezifikationen von LISA

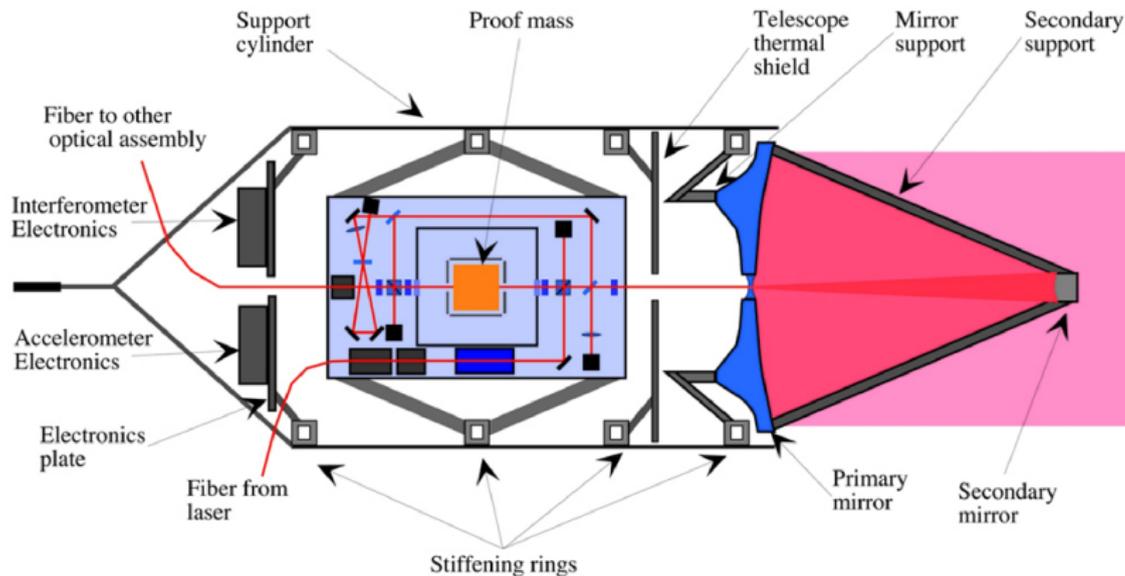
- Laser (zwei): 1 Watt diodengepumpt 1064-nm Nd:YAG, Frequenz-stabilisiert mit einer Referenz Cavity und den beiden Interferometer Signalen
- Test Massen (zwei): 2 kg Au-Pt Würfel mit 4.6 cm Seitenlänge / Elektrostatische Aktuatoren, Ladung über UV Strahlung kontrolliert
- Teleskope (zwei): 40 cm Durchmesser / sowohl zum Senden als auch zum Empfangen

# LISA Photos

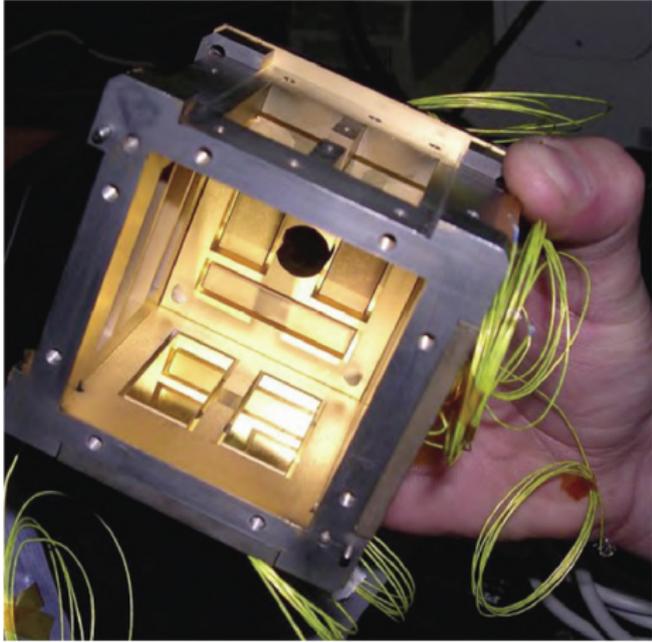




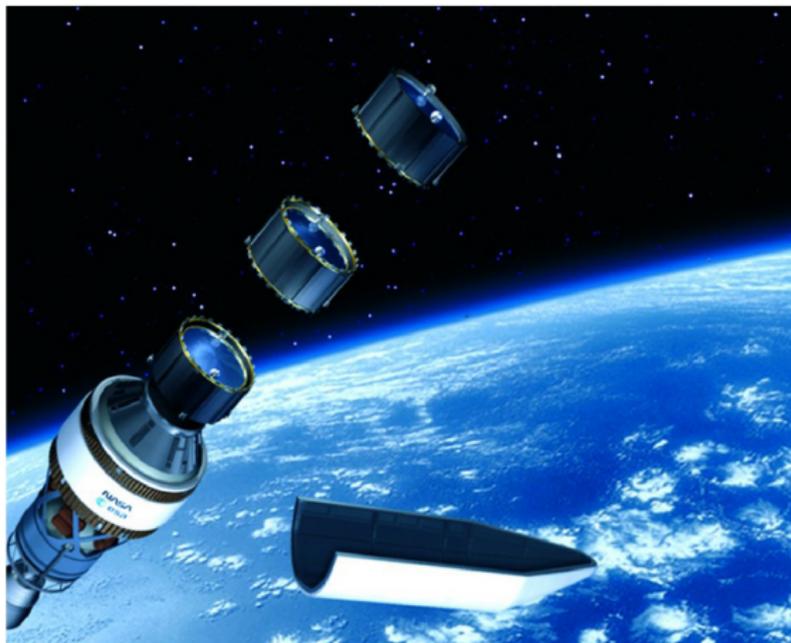
# Optisches System



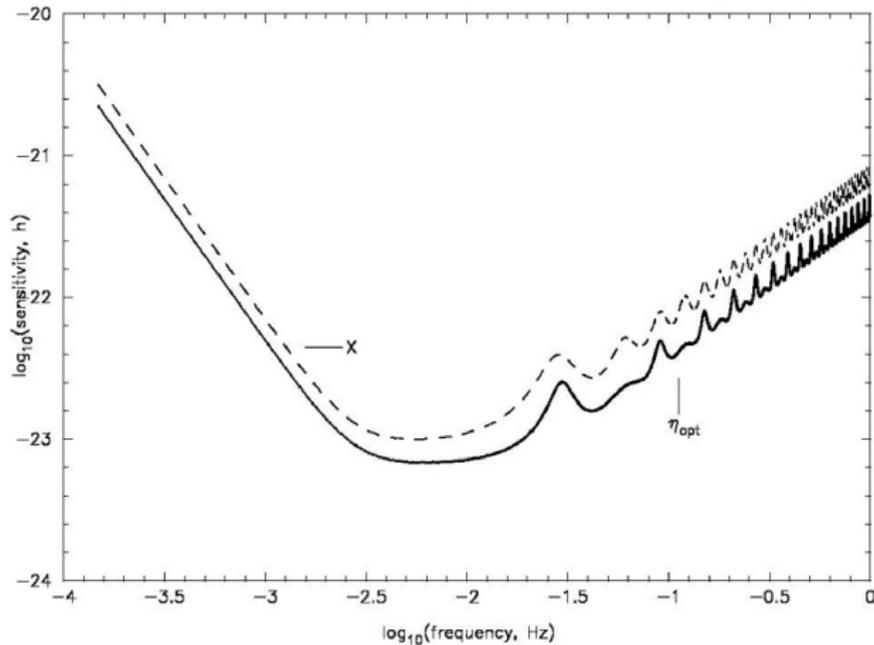
# Pathfinder Test Masse



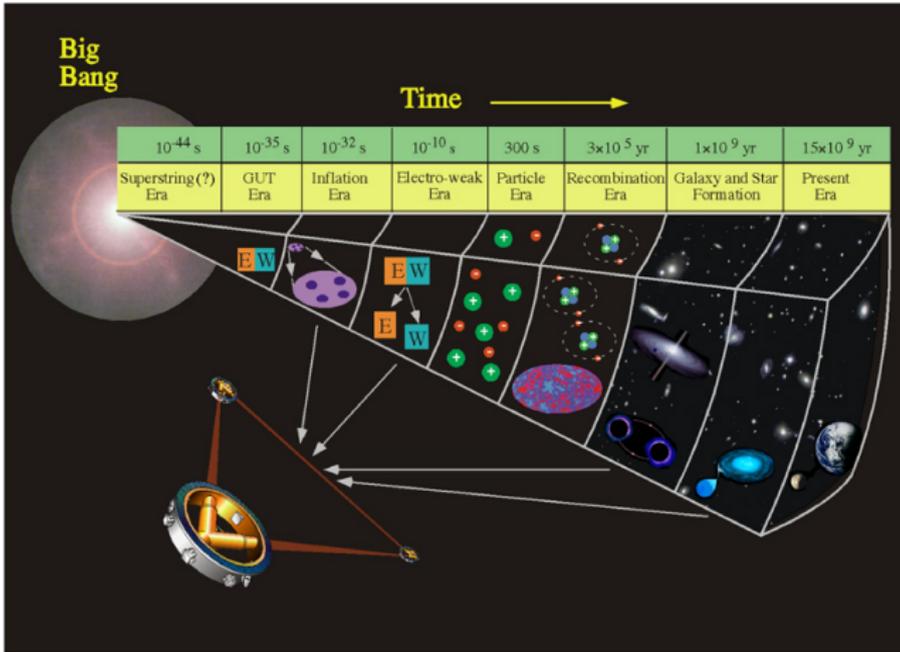
# Raketen Launch



# Sensitivität



# LISA's Möglichkeiten

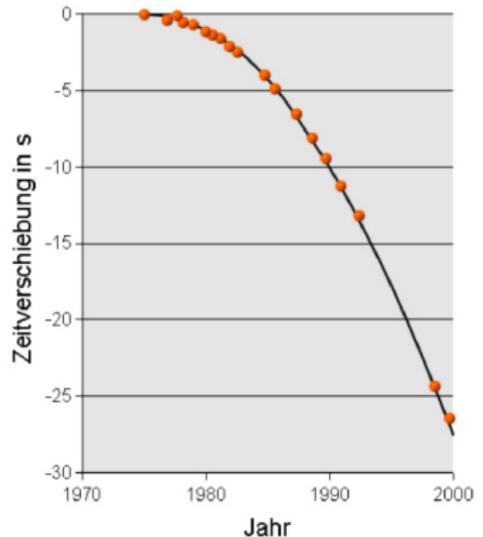


# Gibt es Gravitationswellen?

## Indirekter Hinweis auf die Existenz von Gravitationswellen:

- Russell Hulse und Joseph Taylor entdecken 1974 den binären Pulsar PSR\_1913+16 und errechnen die Bahndaten
- Die Änderung der Umlaufbahn dieses Binärsystems stimmt mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie nahezu exakt überein
- Demnach müsste die Energie des Systems in Form von Gravitationswellen abgegeben werden
- 1993 bekamen die beiden dafür den Nobelpreis in Physik

Bei einem vor kurzem im Quasar OJ 287 entdeckten binären Schwarzen Loch lässt sich der Effekt mittlerweile noch um ein Vielfaches stärker nachweisen. Bislang war PSR\_1913+16 der einzige indirekte Hinweis auf die Energie-Abnahme durch Gravitationswellen



# Interferometer Detektoren für Gravitationswellen

- Grundlegende Tests der Allgemeinen Relativitäts Theorie werden möglich
- Ein neuer Bereich der Astrophysik, ein Fenster zur Raumzeit des Universums
- Die Experimente erfordern High-Tech Materialien, höchste Präzision und enorme wissenschaftliche Leistungen