

Die Jagd nach den Gravitationswellen

**Vortrag im Rahmen des
Schwingungsphysikalischen Kolloquiums
Drittes Physikalisches Institut (DPI)**

Ireneusz (Irek) Iwanowski

30. Januar 2003

Übersicht

1. Historischer Kontext

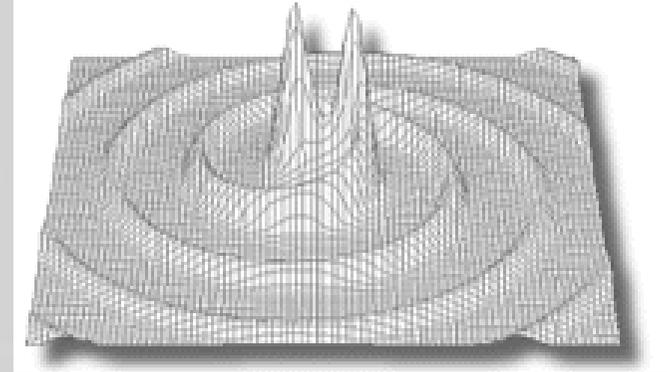
2. Theoretische Grundlagen

- Einsteinsche Feldgleichung
- Lösung im quellenfreien Raum
- Eigenschaften der Gravitationswellen
- Quellen der Gravitationswellen

3. Die Jagd

- Aus der Theorie resultierende Detektionsmöglichkeiten
- **Massenresonatoren**- Probleme- Lösungen
- **Laserinterferometer** - Probleme - Lösungen
- **Das LISA - Projekt**

4. Ziele, Aussichten, (Science-Fiction ?)



1. Historischer Kontext



1916 – Albert Einstein: theoretische Untersuchungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)

60er Jahre-Joseph Weber konstruiert den ersten Gravitationswellendetektor



1993 - indirekter Nachweis von Gravitationswellen von Russel A. Hulse und Joseph H. Taylor (Pulsar 1913+16)

2. Theoretische Grundlagen

Einsteinsche Feldgleichung

$$R_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\mu\nu} - \frac{T^\lambda{}_\lambda}{2} g_{\mu\nu} \right)$$

Der Newtonsche Grenzfall
 $\Delta\Phi(\vec{r}) = 4\pi G\rho(\vec{r})$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

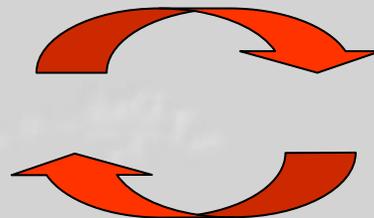
Ricci-Tensor (Krümmung)

Quelle des Gravitationsfeldes

Energie-Impuls-Tensor

Metrik-Tensor

Gravitationsfeld bestimmt
den Metrik-Tensor



Metrik-Tensor => Raumzeitkrümmung
=> Gravitationsfeld

Lösungen im quellenfreien Raum (1)

Die Einsteinsche-Feldgleichung:
eine nichtlineare, inhomogene,
gekoppelte Differentialgleichung
2. Ordnung

$$R_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\mu\nu} - \frac{T^\lambda{}_\lambda}{2} g_{\mu\nu} \right)$$

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

$$|h_{\mu\nu}| \ll 1$$

Lösungen ?

- Exakte Lösungen unter vereinfachten Annahme (Isotropie des Raumes, Zeitunabhängigkeit)
- Systematische Entwicklung der Feld- und Bewegungsgleichungen für schwache Felder und für langsam bewegte Teilchen
- Lösung der linearisierten Feldgleichung für schwache Felder

mit dem
Minkowski-Tensor
für schwache Felder

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$



$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta \right) h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} \left(T_{\mu\nu} - \frac{T^\lambda{}_\lambda}{2} \eta_{\mu\nu} \right)$$

Lösungen im quellenfreien Raum (2)

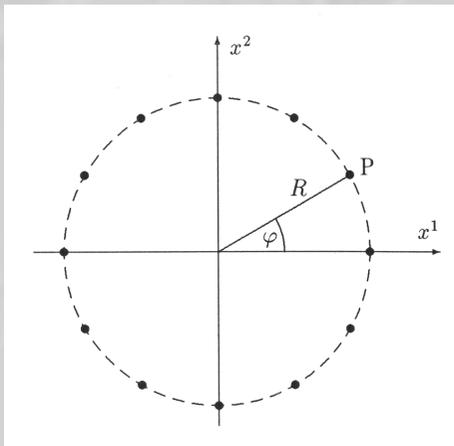
Quellenfreiheit

$$T_{\mu\nu} = 0 \Rightarrow \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta \right) h_{\mu\nu} = 0$$

Welle in $x^{(3)}$ Richtung

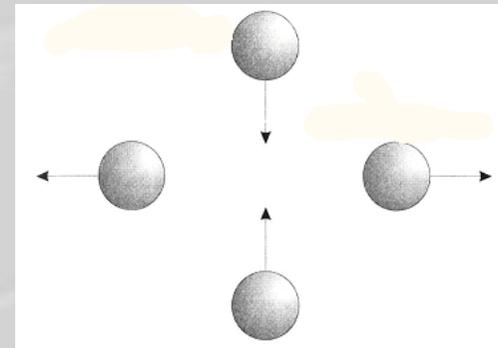
$$h_{\mu\nu} = h^0_{\mu\nu} \exp \left[ik \left(x^{(3)} - ct \right) \right] + c.c$$

Eigenschaften der Gravitationswellen(1)



$$x_P^1 = R \cos \varphi$$

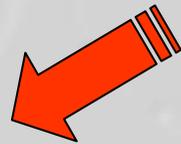
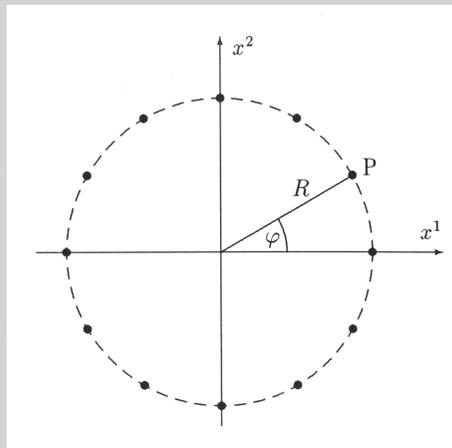
$$x_P^2 = R \sin \varphi$$



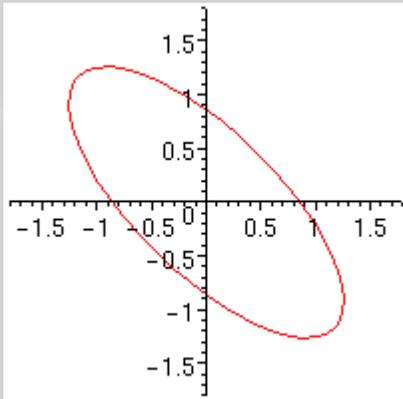
Teilchen im Feld der Welle

Eigenschaften der Gravitationswellen(2)

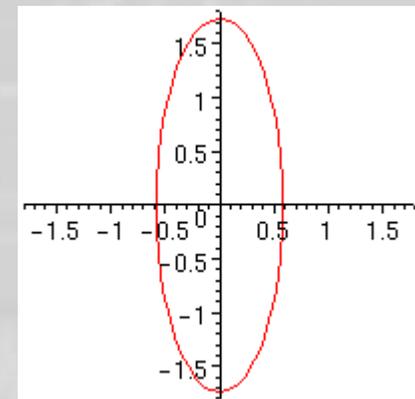
Bsp. Gravitationsstrahlung des Doppelsternsystems i Boo:
Realistische Auslenkung der Teilchen : 10^{-20}



Teilchen im Feld der Welle



*lineare
Polarisation*



*elliptische
Polarisation*

Eigenschaften der Gravitationswellen(3)

- Gravitationswellen werden nur extrem gering absorbiert
- auch bei großen Energiedichten enorm schwache Raumzeit-Krümmung (Kopplungskonstante)

wichtige Detektionsgröße h

- **Bezugsgröße:** zwei frei fallende Teilchen ändern im Feld der Gravitationswelle mit der **Amplitude h** ihren physikalischen Abstand:

$$\frac{\Delta R}{R} = h \cos(\omega t)$$

(senkrecht zu Einfallsrichtung der Welle)

Quellen der Gravitationswellen

$$P = \frac{32G\Omega^6}{5c^5} \varepsilon^2 I^2$$

$$\Phi_{GW} = \frac{\text{Energie}}{\text{Zeit} \cdot \text{Fläche}} = \frac{c^3}{8\pi G} \omega^2 h^2$$

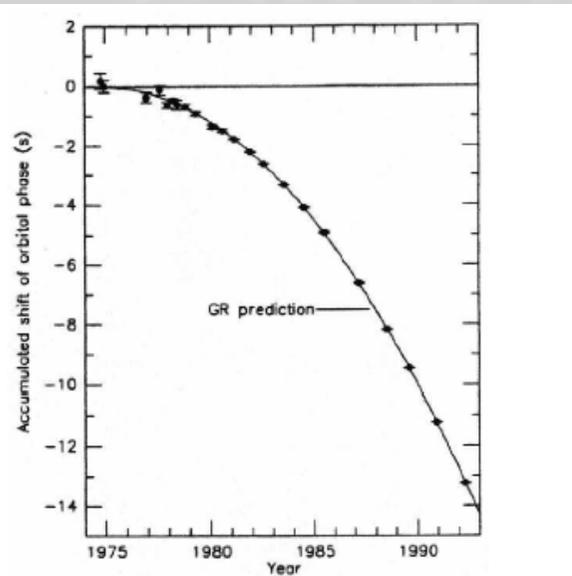
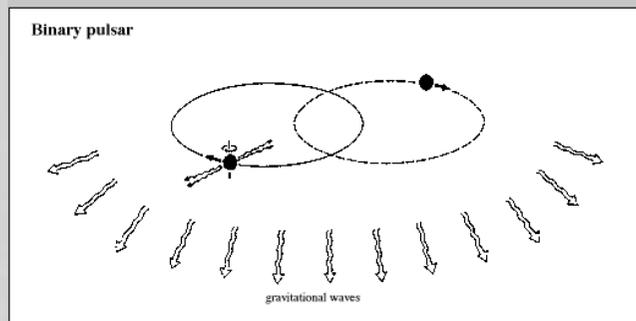
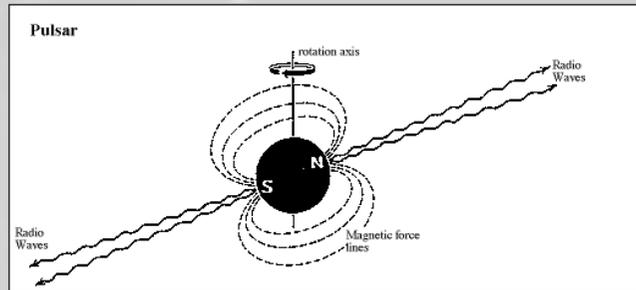


Quelle	Parameter	Strahlungsleistung in W	Energiestromdichte in W/m ²
Rotierender Balken	M=500t, L=20m Ω=30 1/s	2,4 · 10 ⁻²⁹	6 · 10 ⁻³²
Doppelsternsystem i Boo	M ₁ =1,35 M _☉ , M ₂ =0,68 M _☉ , T=0,268d	3,2 · 10 ²³	1,8 · 10 ⁻¹³
Hypothetischer Doppelstern (Kollaps)	M ₁ =M ₂ =M _☉ T=2ms	10 ⁴⁷	10 ⁷

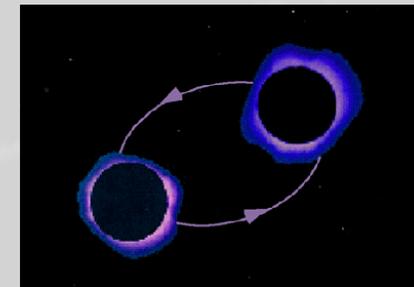
3. Die Jagd: Aus der Theorie resultierende Detektionsmöglichkeiten

- indirekter Nachweis
- resonanter Detektor
- nichtresonanter Detektor

Indirekter Nachweis

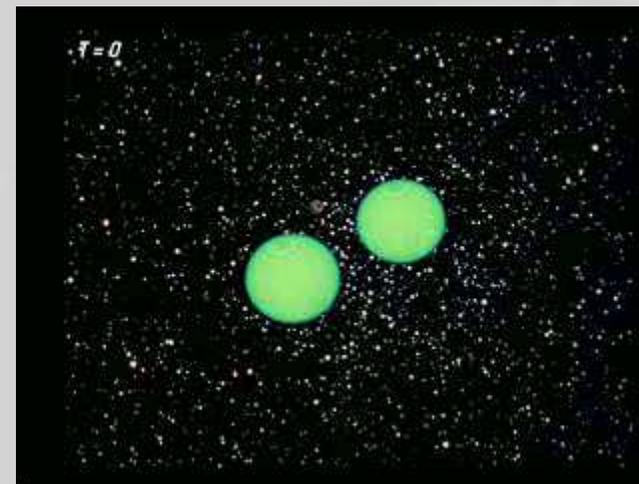


1993- indirekter Nachweis von Gravitationswellen von Russel A. Hulse und Joseph H. Taylor (Pulsar1913+16)

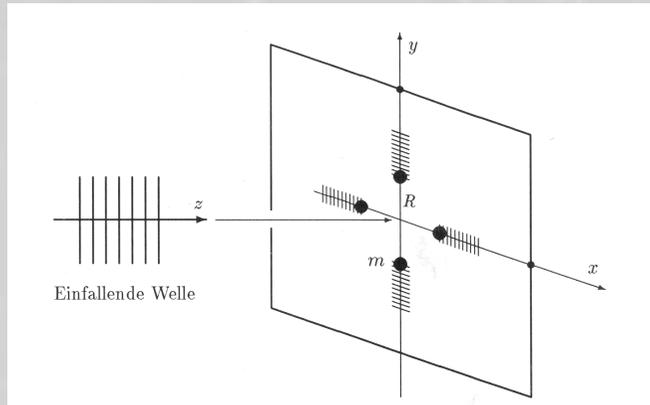


Abnahme der Umlaufzeiten von 75 ms pro Jahr kommt durch die Emission von Gravitationswellen.

Kollaps-Doppelsternensystem



Resonanter Detektor(1)



Eine in z-Richtung einfallende Welle regt Erzwungene Schwingungen an.

Massenresonator nach Weber

Aluminiumzylinder mit piezoelektrischen Kristallen, der durch Gravitationswellen zu Eigenschwingungen angeregt wird

=> Wechselstrom

Nachweisgrenze eines idealen Detektors $h = 10^{-22}$
Messzeit: 4 Monate

Zum Vergleich: h und die Quellen

Amplitude h	Quelle
10^{-34}	Balken
10^{-24}	Pulsar NPO 0532
10^{-20}	Doppelstern i Boo
10^{-17}	Hypothetischer Doppelstern

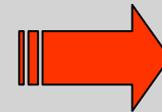
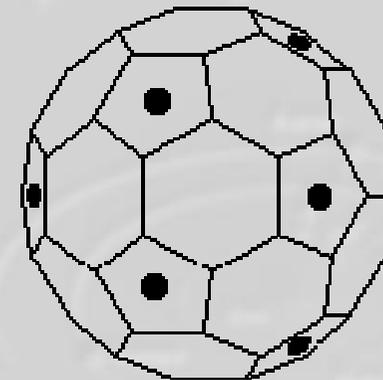
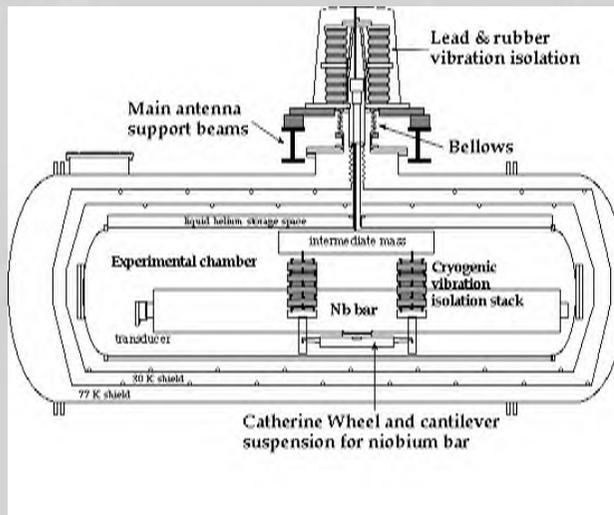
Resonanter Detektor(2)

Realität:

- Störungen durch Kopplung an den Sensor
- das thermische Rauschen
- Vibrationen
- Richtungssensivität
- geringe Frequenzbreite $\sim 10\text{Hz}$

weitere Entwicklung:

- vibrationsfreie Lagerung
- Kühlung auf wenige Kelvin
- sphärische Antennen



$$h = 10^{-18} \dots 10^{-20}$$

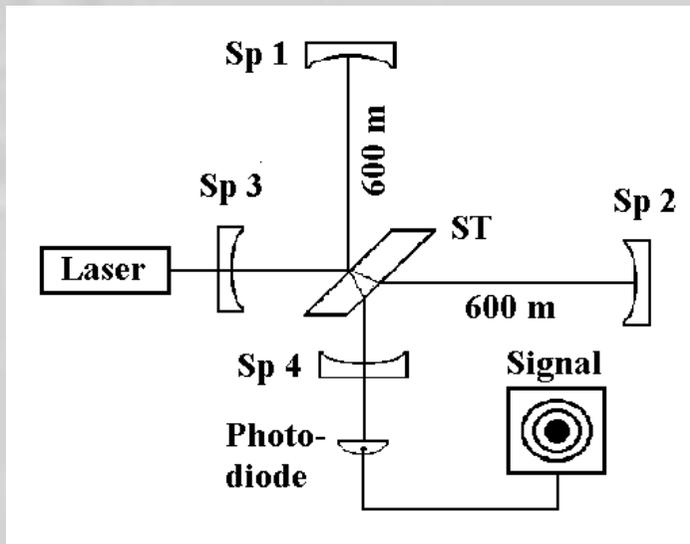
Resonanter Detektor(3)



**ALLERGO-
Massenresonator**

Nichtresonanter Detektor(1)

Interferometer vom Michelson-Typ



- Anfang der 70er Jahre erkannte man, daß ein Interferometer vom Michelson-Typ ideal geeignet ist, die von Gravitationswellen erzeugten Effekte nachzuweisen.

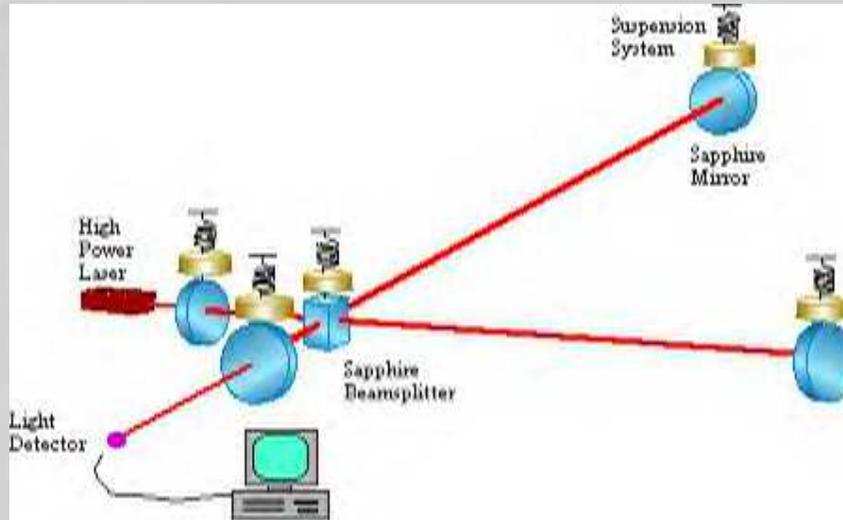
- destruktive Interferenz

- eine Gravitationswelle verändert die Länge der beiden Arme; Lichtwellen geraten außer Takt => Helligkeit

Nachweisgrenze eines idealen Detektors $h = 4 \cdot 10^{-22}$

Amplitude h	Quelle
10^{-34}	Balken
10^{-24}	Pulsar NPO 0532
10^{-20}	Doppelstern i Boo
10^{-17}	Hypothetischer Doppelstern

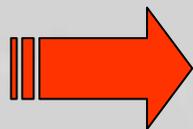
Nichtresonanter Detektor(2)



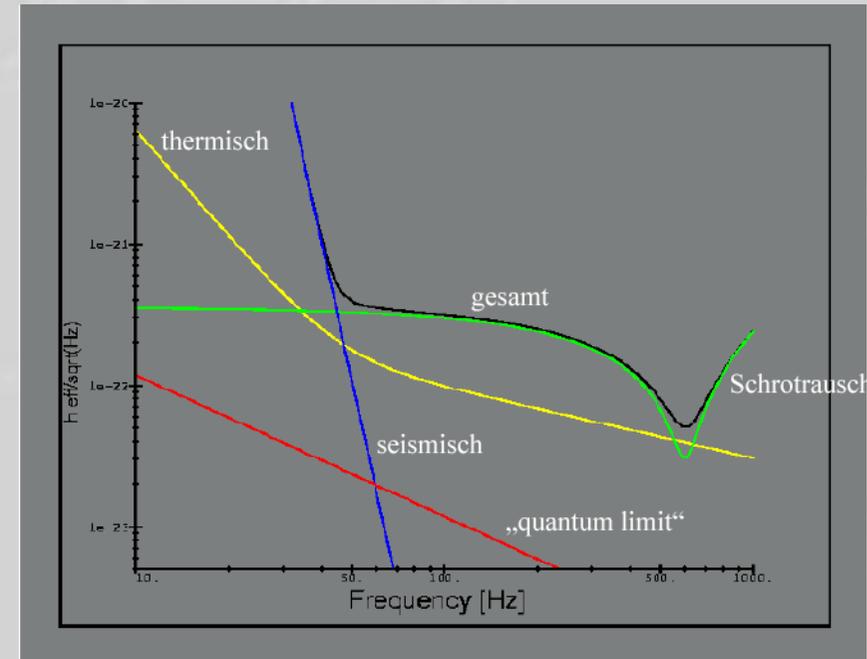
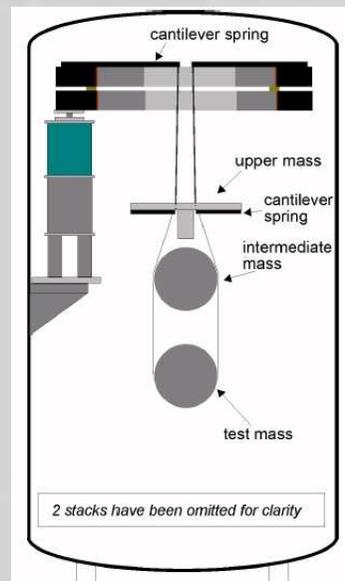
Störungen:

- das thermische Rauschen
- Vibrationen (seismische, Verkehr, Personen...)
- Strahlungsdruck (Laser-Spiegel, da freie Massen)
- elektrische Störungen

Lösung



GEO 600
 Dreifaches
 Pendelsystem
 mit aktivem elektro-
 mechanischen
 Anti-Vibrations-
 system



18.11.2010

Nichtresonanter Detektor(3)

weitere Lösungen

Kühlung

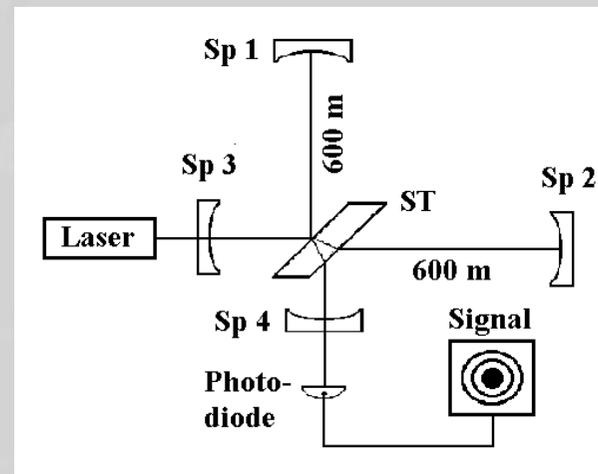
Power-Recycling

Spiegel im Eingang bewirkt optische Resonanz im Interferometer:

Bsp.:

GEO600

Eingang 10 W- Ausgang 10kW



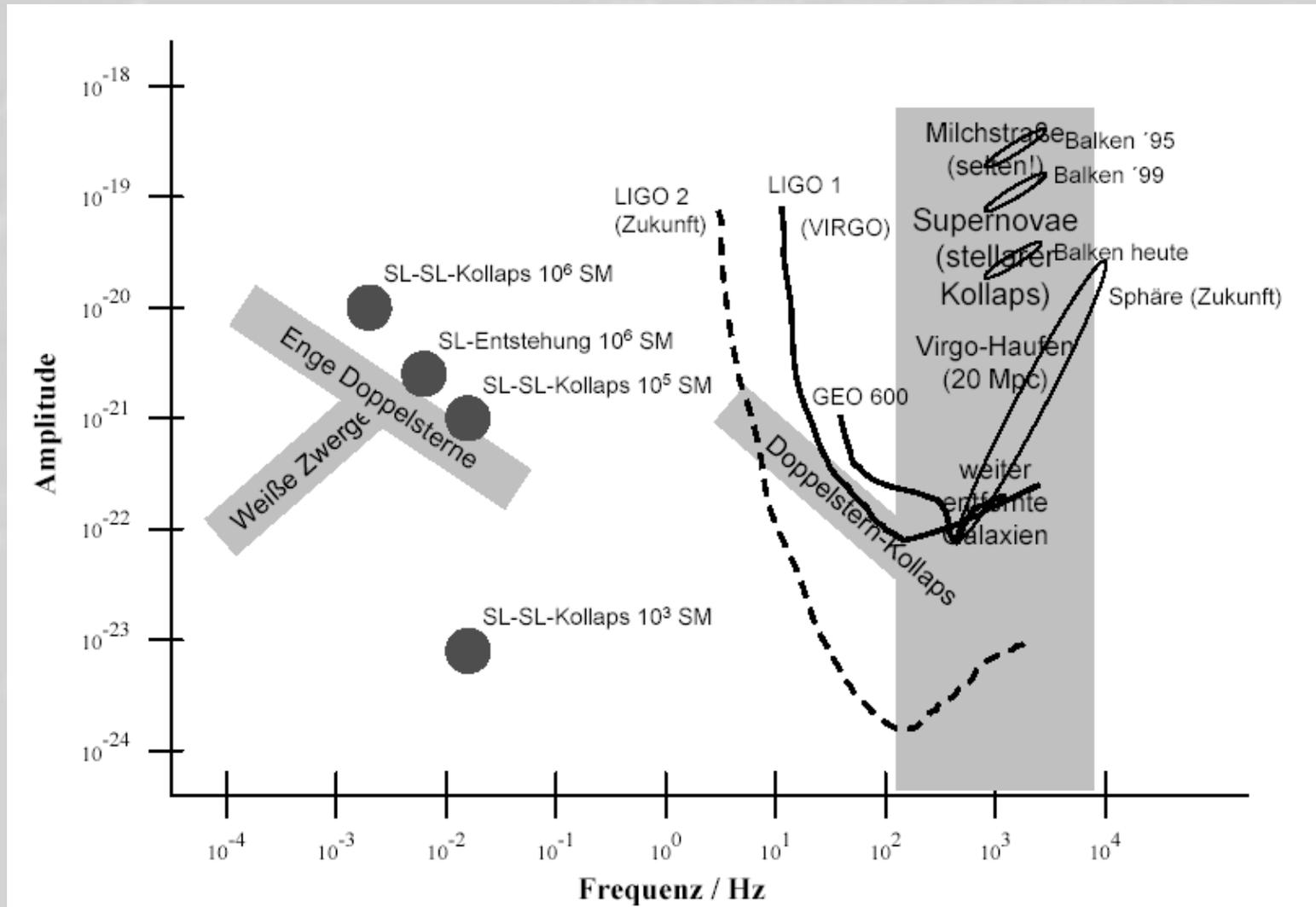
Nichtresonanter Detektor(4)



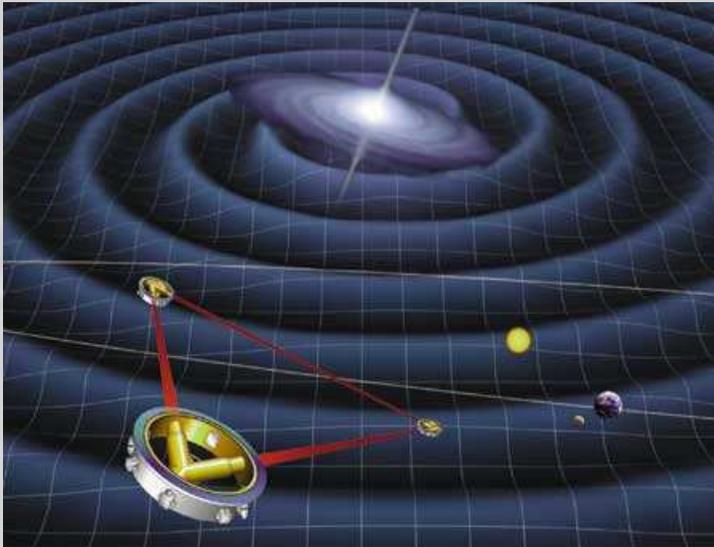
GEO 600 bei Hannover, Armlänge: 600 m

Für 1kHz -optimale Armlänge 75 km

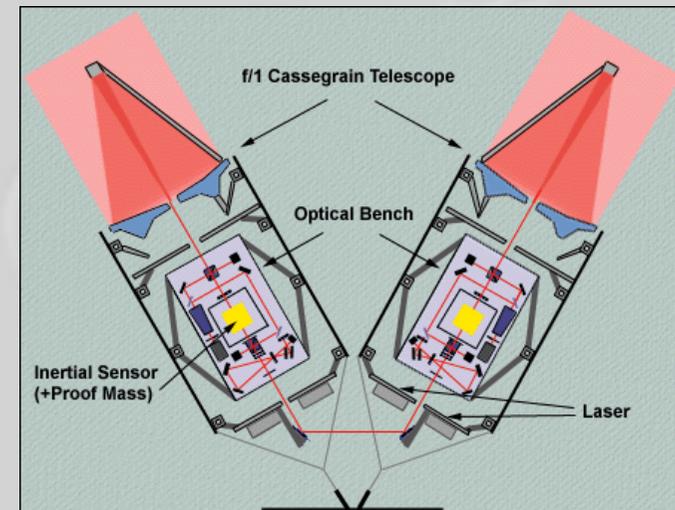
Spektrum der Detektionsmöglichkeiten Massenresonatoren + Laserinterferometer



Das LISA-Projekt(1)

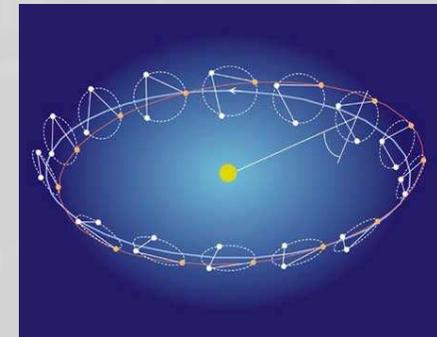
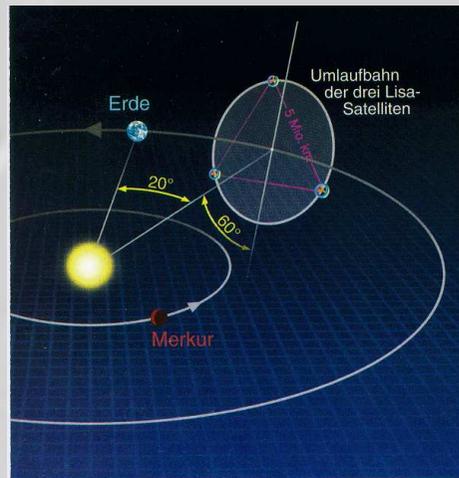
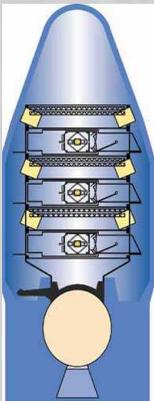


- drei Satelliten an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks mit 5 Millionen km Armlänge, enthalten Laser und abgeschirmte, frei fliegende Testmassen
- Mittelpunkt des Dreiecks auf Erdbahn, 20° hinter der Erde, Dreieck um 60° gegen Ekliptik geneigt
- Positionskorrekturen mittels kleiner Ionenstrahl-Triebwerken



18.11.2010

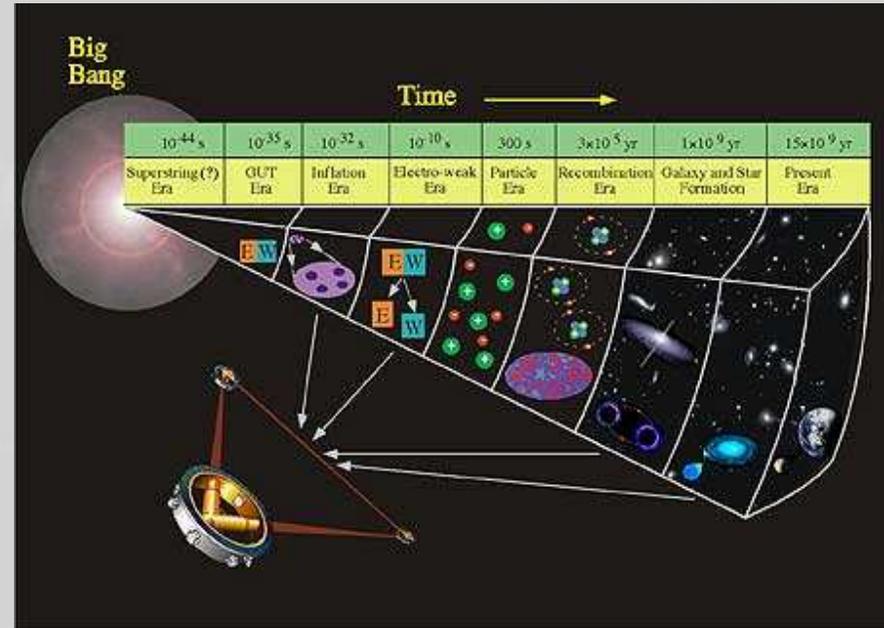
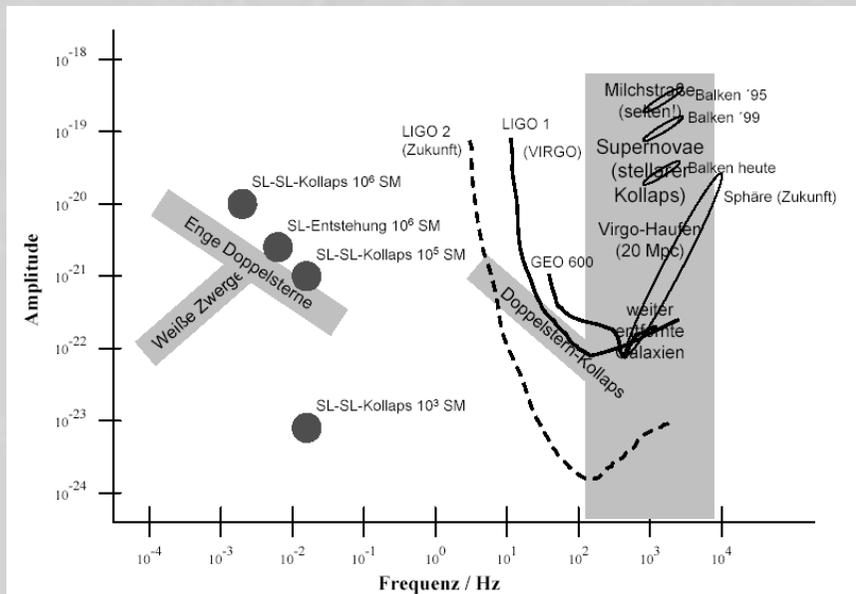
Das LISA-Projekt(2)



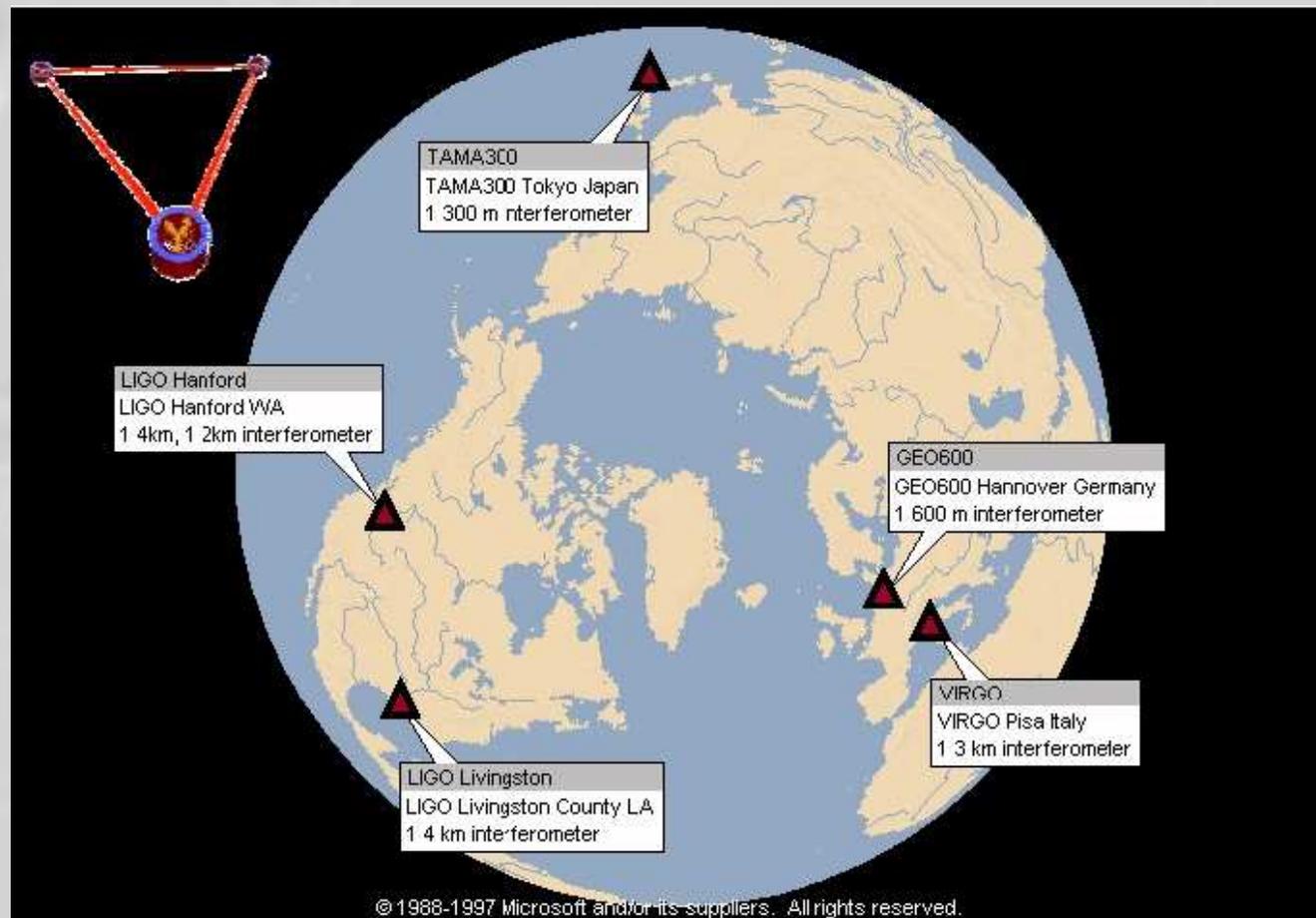
- **Beobachtung über ein Jahr**
- **Richtung und Polarisation der Welle**
- **Frequenzbreite 10^{-4} Hz ... 1Hz**
- **Test 2006; Mission 2011**

Das LISA-Projekt(3)

*tieferer Blick in die
Vergangenheit
des Universums*



Das Detektionsnetz



Ziele, Aussichten & Science-Fiction

Ziele, Aussichten

- **letzter Beweis der ART**
- **die Erweiterung des Untersuchungsspektrums der Signale aus dem All =>**
(Urknall, dunkle Materie usw.)

Vorrausichtlich
innerhalb der
nächsten acht Jahre
Entdeckung der
Gravitationswellen

Science-Fiction

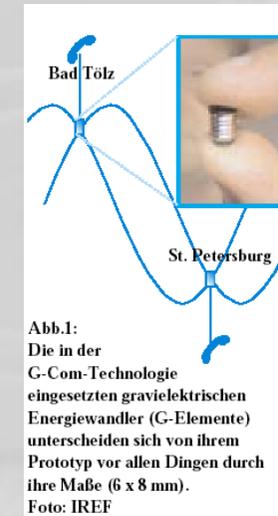
Raum-Energie-Forschung / Global Scaling

Epochale Entdeckung:

Telekommunikation ohne Elektromog!

IREF entwickelt G-Com: Die weltweit erste Technologie der Sprachmodulation stehender Gravitationswellen. Am 27. Oktober 2001 begann ein neues Zeitalter der Telekommunikation. Von Dr. rer. nat. Hartmut Müller, Leiter des Instituts für Raum-Energie-Forschung i.m. Leonard Euler.

nologie auch keine A
Satelliten, Verstärker
setzer. Damit beginnt
Ära der Telekomur



Quellen

Bücher&Artikel

- Torsten Fleißbach; Allgemeine Relativitätstheorie; *Spektrum-Verlag*
- Hubert Goenner; Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie; *Spektrum-Verlag*
- Gekrümmter Raum und Zeit
- Physik Journal (Januar 2002)

Internet

- <http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~q61/gravwave.html>
- <http://lisa.jpl.nasa.gov/grav>
- <http://zerla1.physik.uni-erlangen.de/~katz/ws01/atp>
- <http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~q61/gravwave.html>
- <http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~q61/gravwave.html>
- <http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~q61/gravwave.html>

