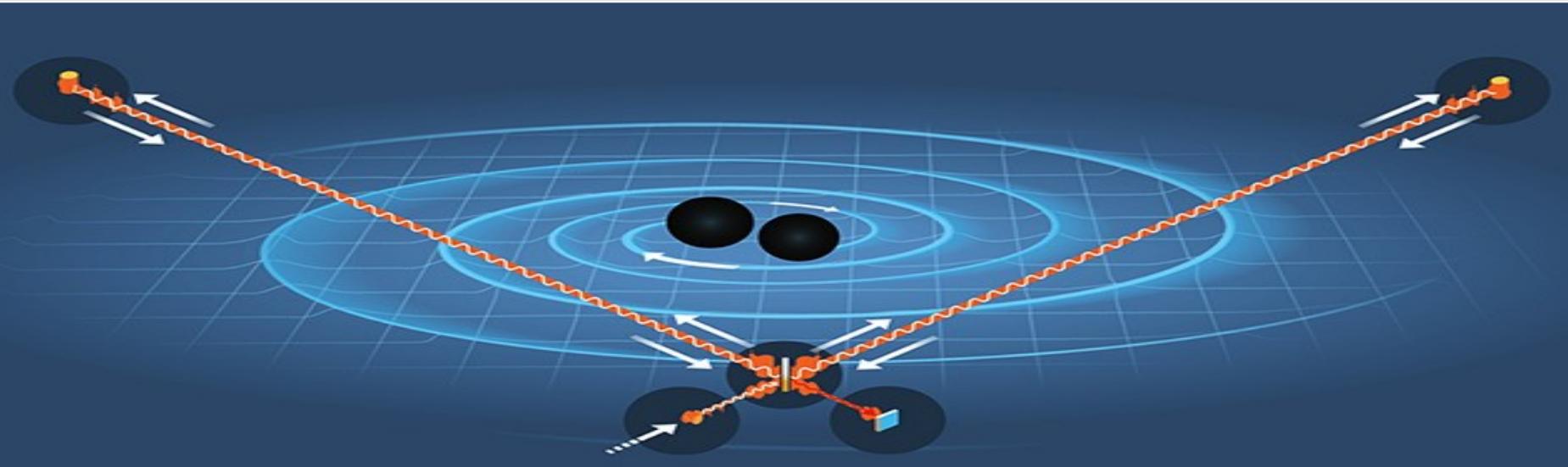


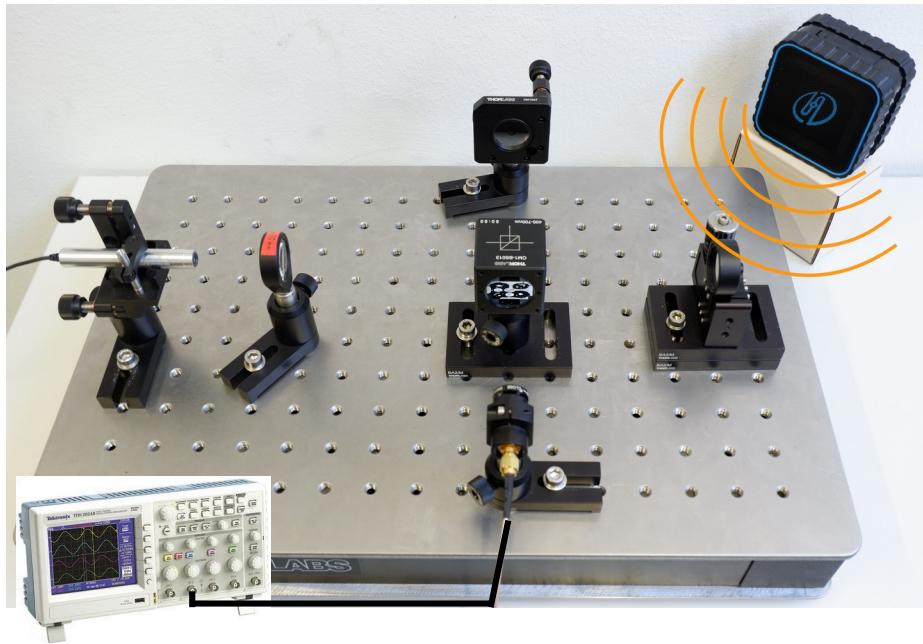
Analogieexperimente zur Gravitationswellendetektion

Michael Daam, Antje Bergmann, Max Winter, Ronny Nawrodt, Carsten Rockstuhl

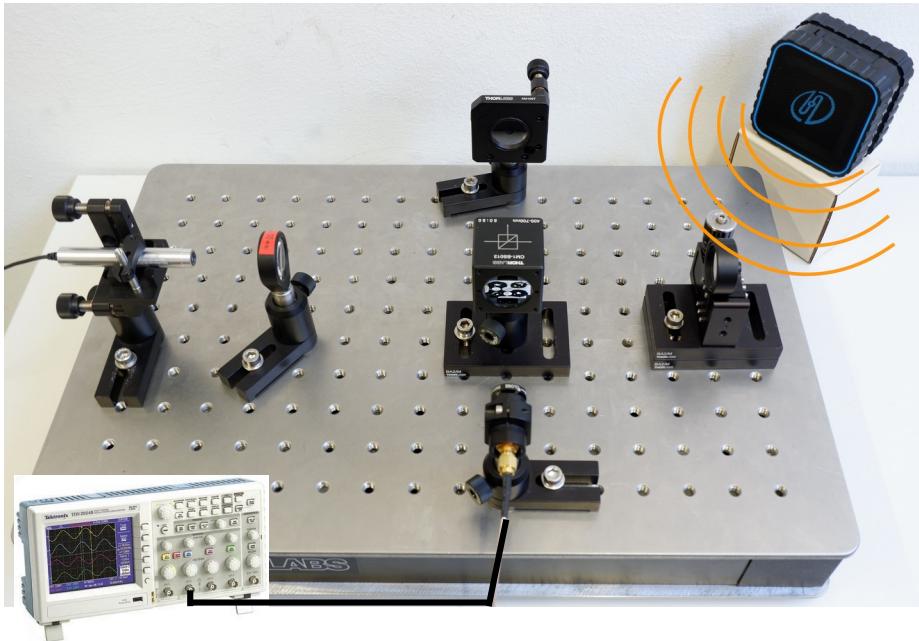
Karlsruher Institut für Technologie, Universität Stuttgart



Analogieexperimente zur Gravitationswellendetektion



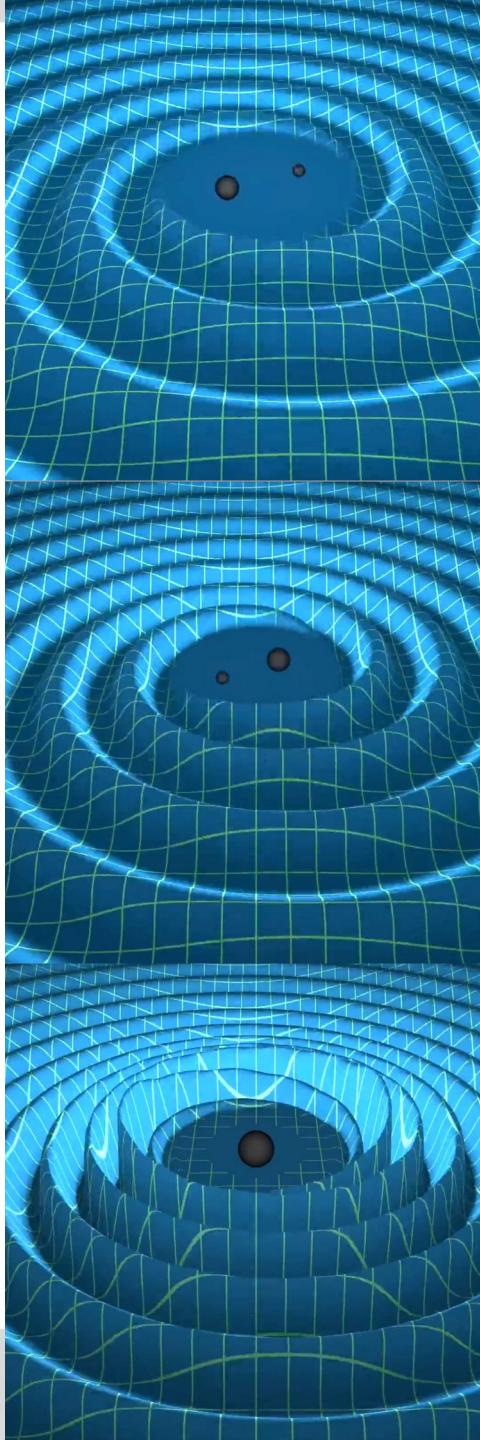
Analogieexperimente zur Gravitationswellendetektion



- Anwendung des Michelson-Interferometers
- Physik des 21. Jhdts. in der Schule
- Experiment im Unterricht zur Relativitätstheorie

Was sind Gravitationswellen

- Wellenförmige Störungen der Raumzeit (z.B. Strecken und Stauchen des Raumes)
- ausgelöst durch beschleunigte Massen



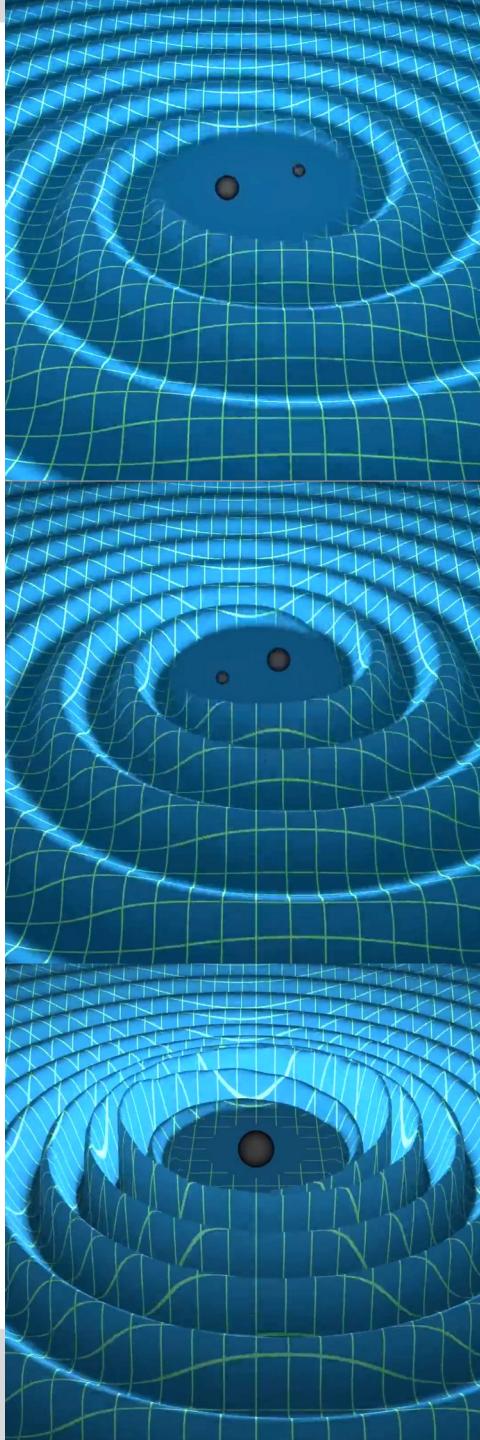
Was sind Gravitationswellen

- Wellenförmige Störungen der Raumzeit (z.B. Strecken und Stauchen des Raumes)
- ausgelöst durch beschleunigte Massen



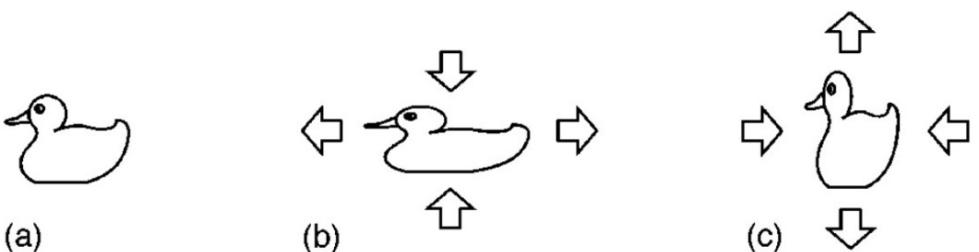
youtube.com/c/SteveMould

Gravitational Waves Work Like This Drill on Spandex



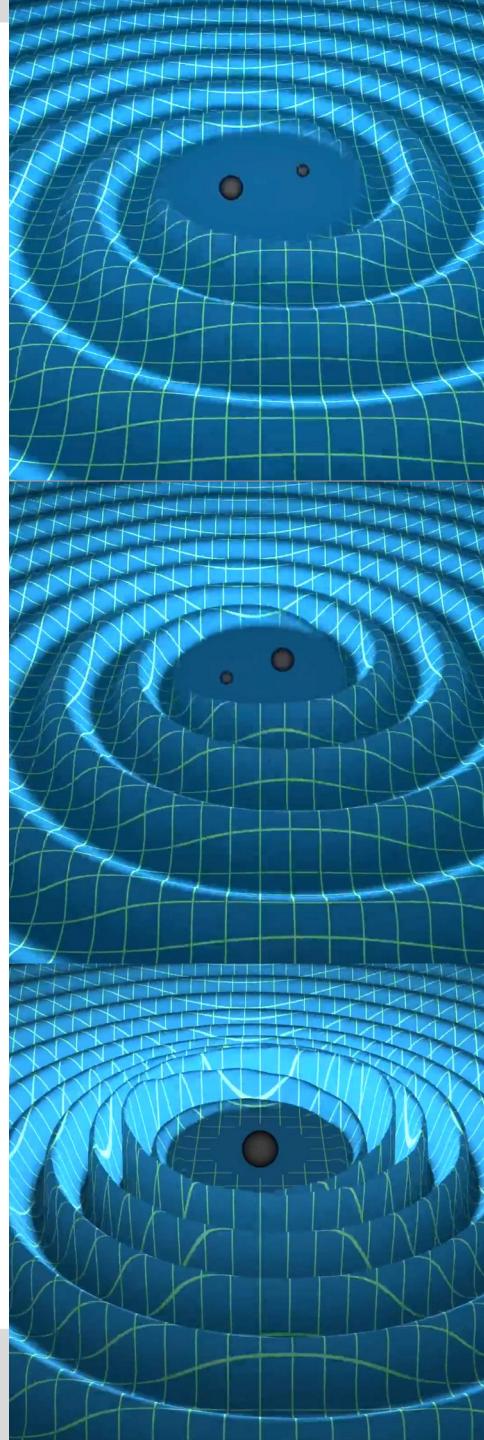
Was sind Gravitationswellen

- Wellenförmige Störungen der Raumzeit (z.B. Strecken und Stauchen des Raumes)
- ausgelöst durch beschleunigte Massen
- Amplitude (strain h):
relative Längenänderung
$$h = \frac{\Delta L}{L}$$
- extrem kleine Effekte:
$$h \approx 10^{-21}$$
- Quadrupolmoment dominiert:

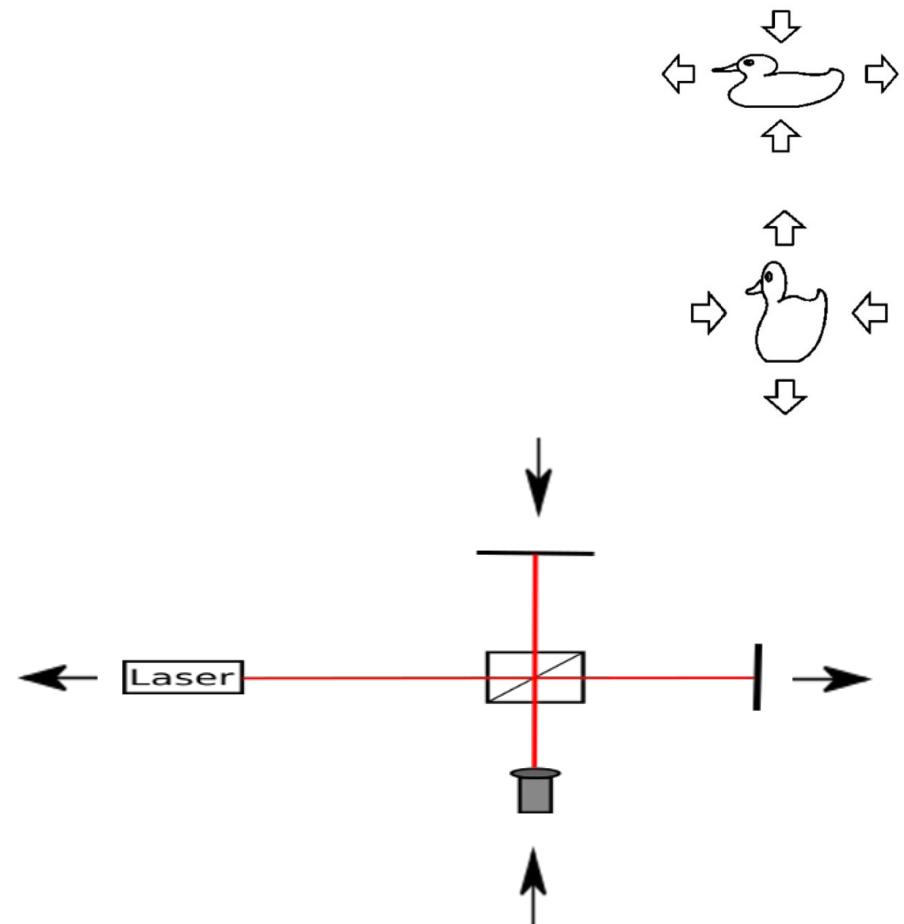


Aus Black und Gutenkunst 2003: An introduction to signal extraction in interferometric gravitational wave detectors.

Quelle: LIGO



LIGO – Detektor: Aufbau und Funktion



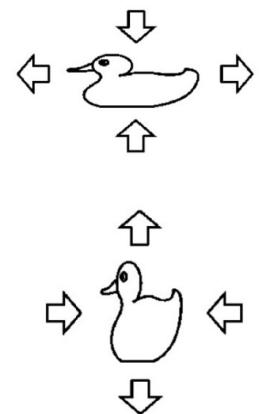
LIGO – Detektor: Aufbau und Funktion

- Michelson-Interferometer mit 4 km Armlänge

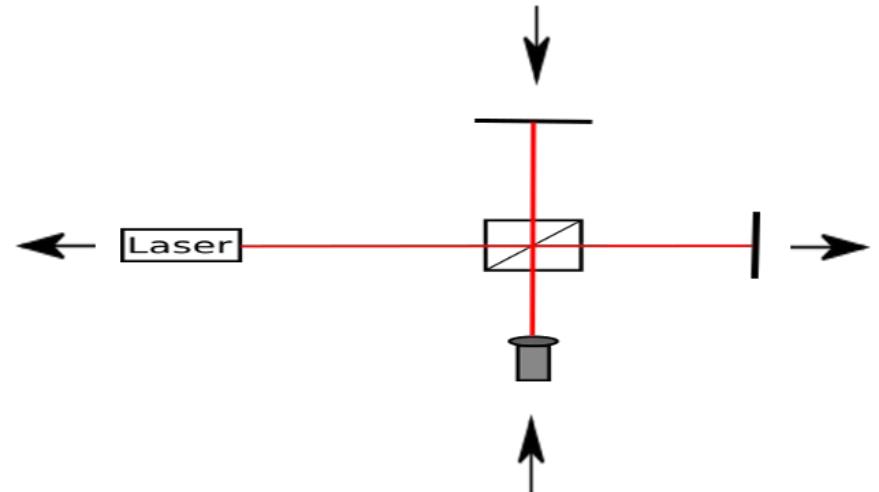
- Längenänderung:
etwa 1/1000 Protonendurchmesser

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

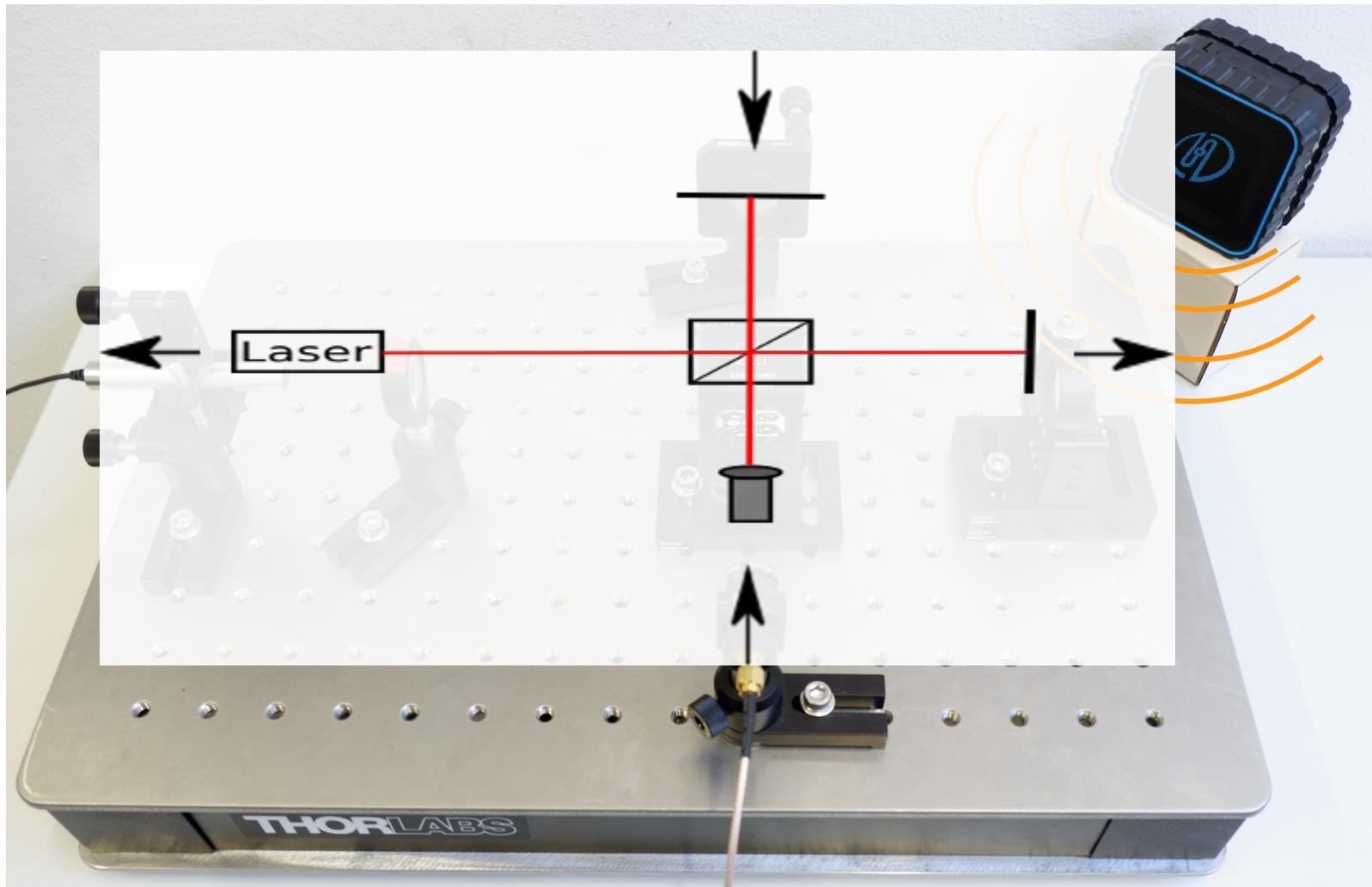
$$\Delta L \approx 4 \times 10^{-18} \text{ m}$$



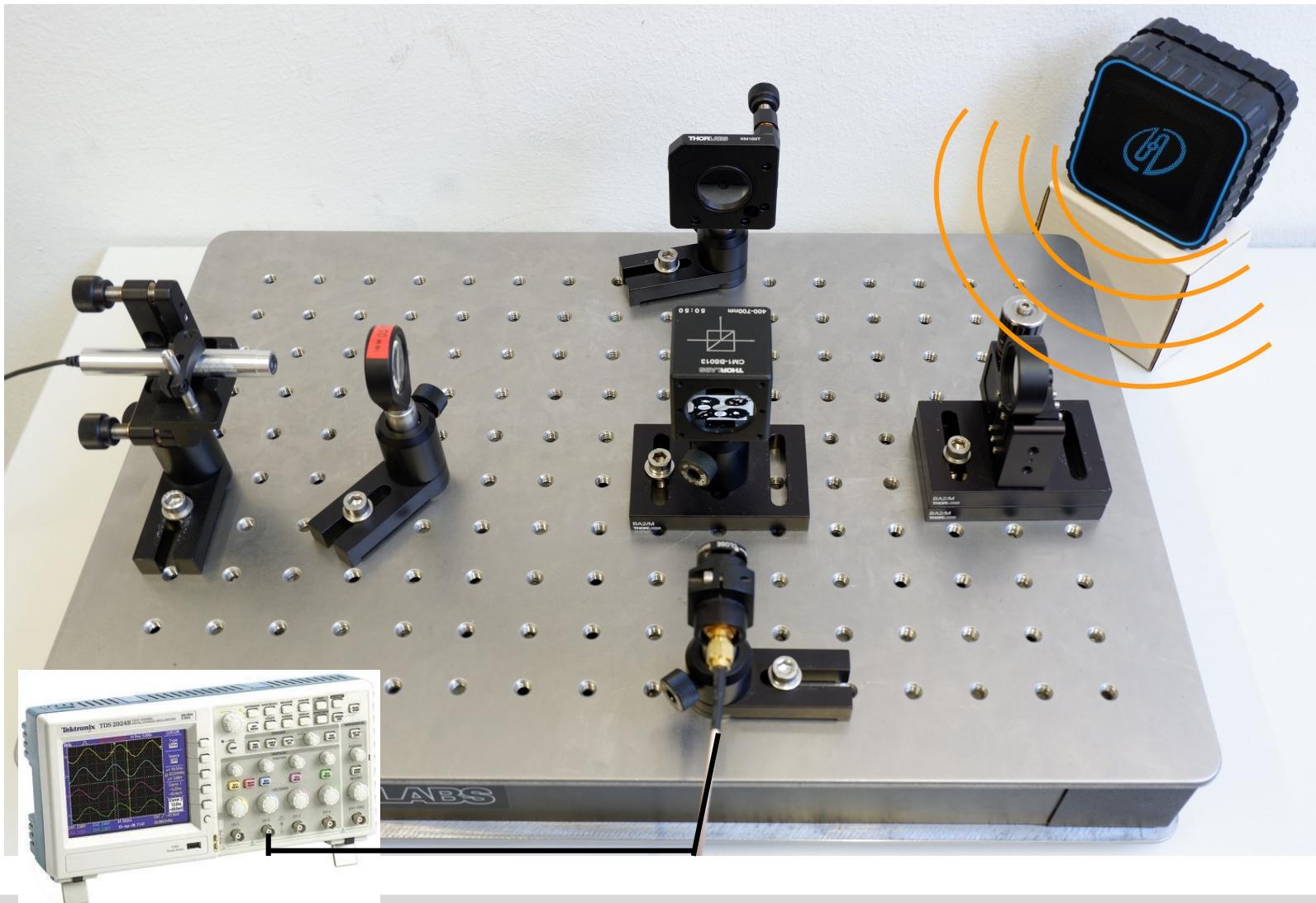
Livingston, Louisiana (US). Quelle: LIGO.



Analogie-Experiment: Aufbau



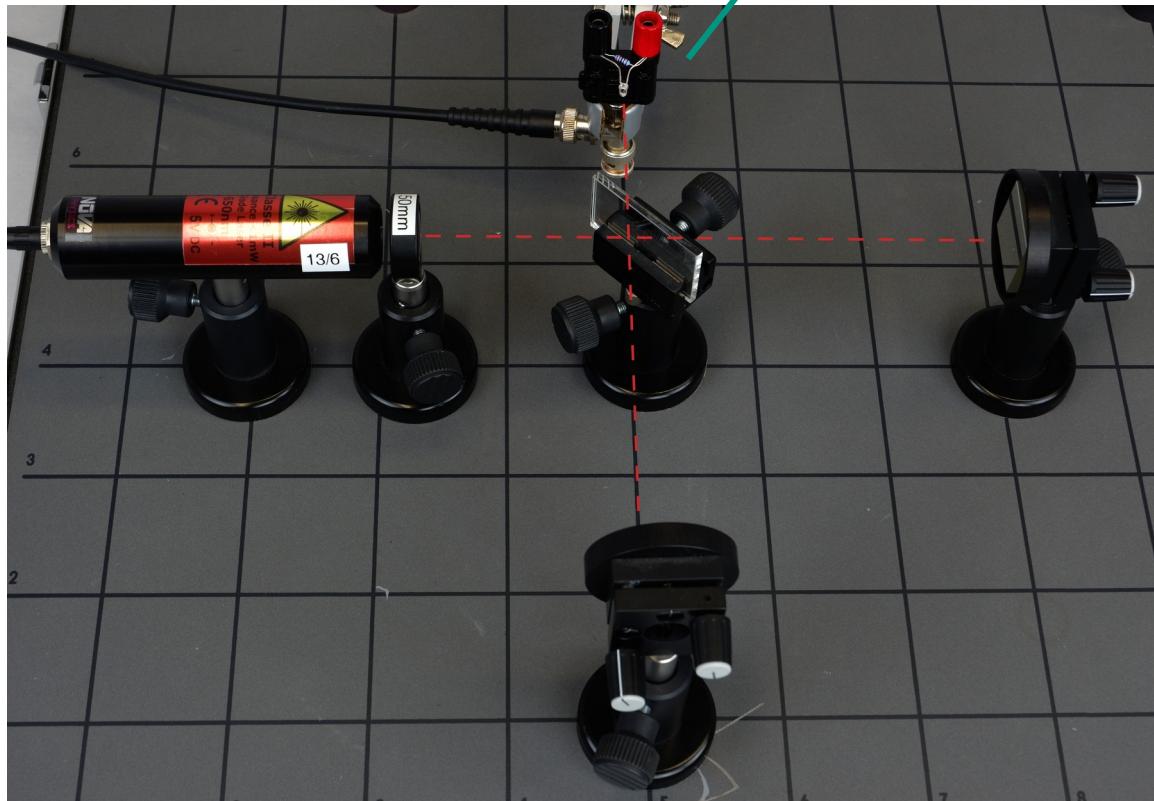
Analogie-Experiment: Aufbau



Analogie-Experiment: alternativer Aufbau

■ benötigtes Material:

- Michelson-Interferometer (mit Linse)
- Photodiode
- Oszilloskop mit FFT-Darstellung
- Lautsprecher (und Signalgenerator)

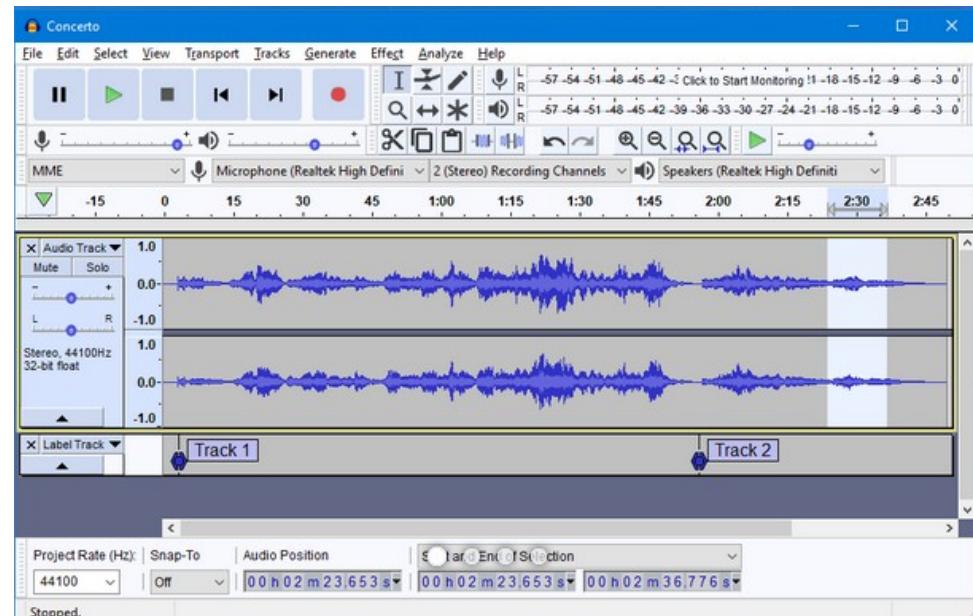
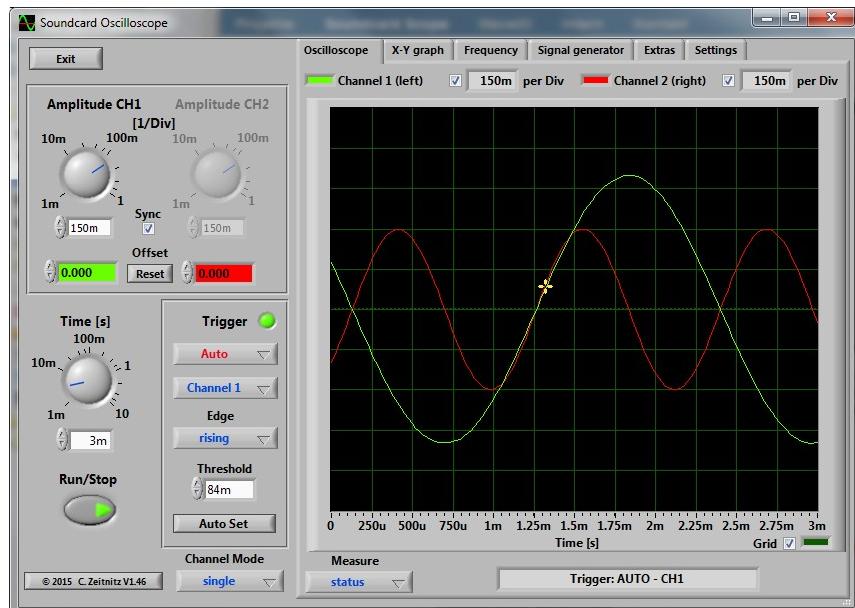


Datenaufnahme mit dem PC

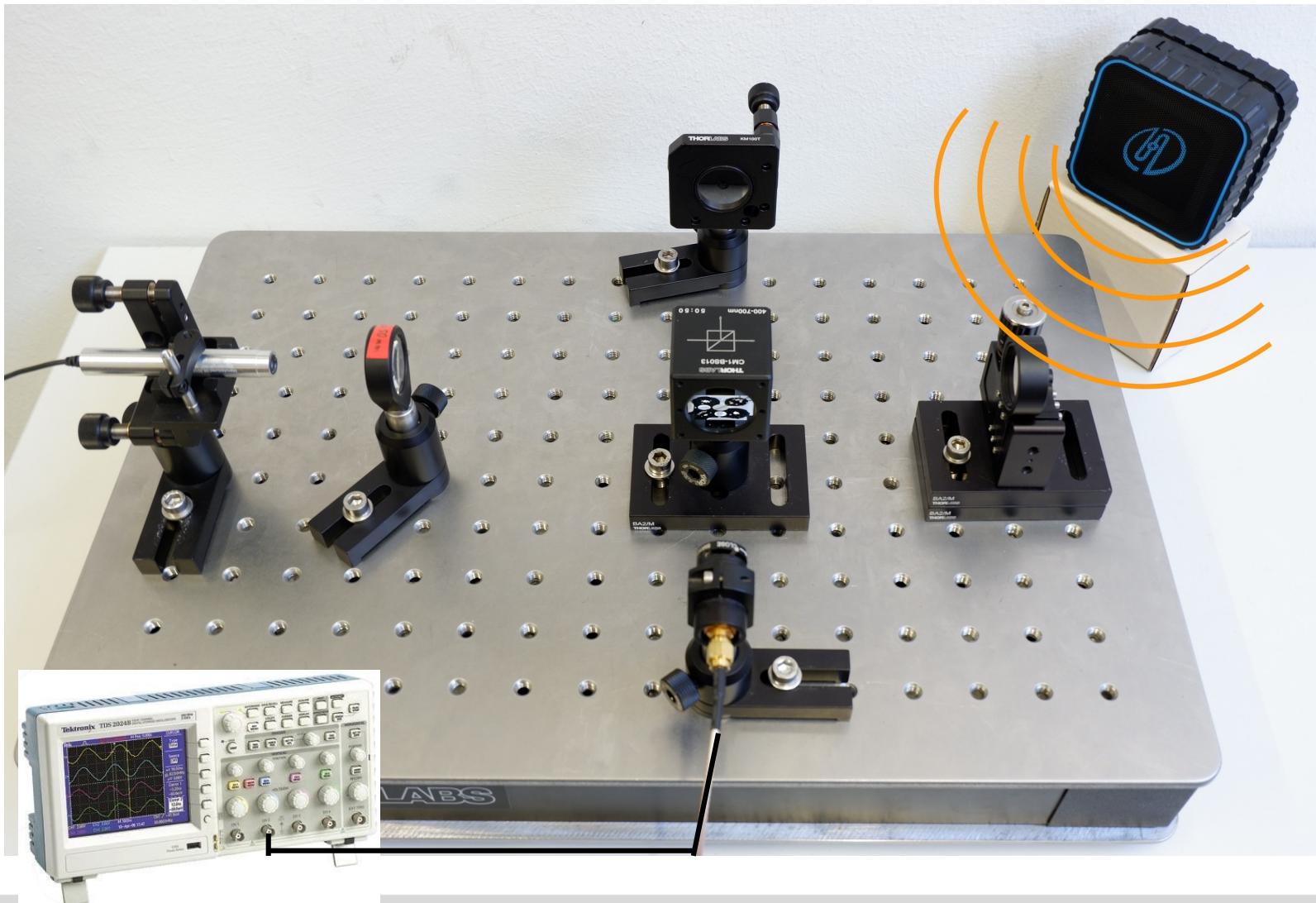
- USB-Oszilloskop, z.B. PicoScope (ab 100€)
- USB-Soundkarte mit Freeware (ca. 15€)
 - Scope (Oszilloskop)
 - Audacity (Datenlogger)



für 2 Kanäle
Stereo-Soundkarte benötigt



Analogie-Experiment: Aufbau



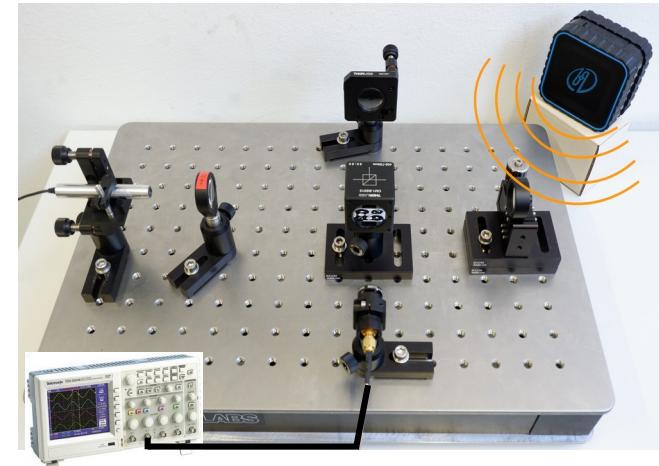
Detektierbare Signale / Störquellen

■ akustisch:

- Ton aus Lautsprecher
- gesprochenes Wort
- Knall eines Luftballons o.ä.

■ „seismisch“:

- Anklopfen des Breadboards
- Bewegung im Klassenzimmer
- Menschen und Türen im Gebäude
- Fahrzeuge vor dem Gebäude



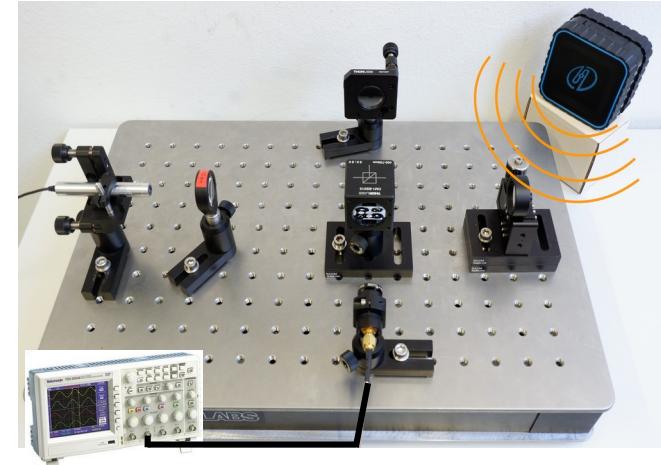
Detektierbare Signale / Störquellen

■ akustisch:

- Ton aus Lautsprecher
- gesprochenes Wort
- Knall eines Luftballons o.ä.

■ „seismisch“:

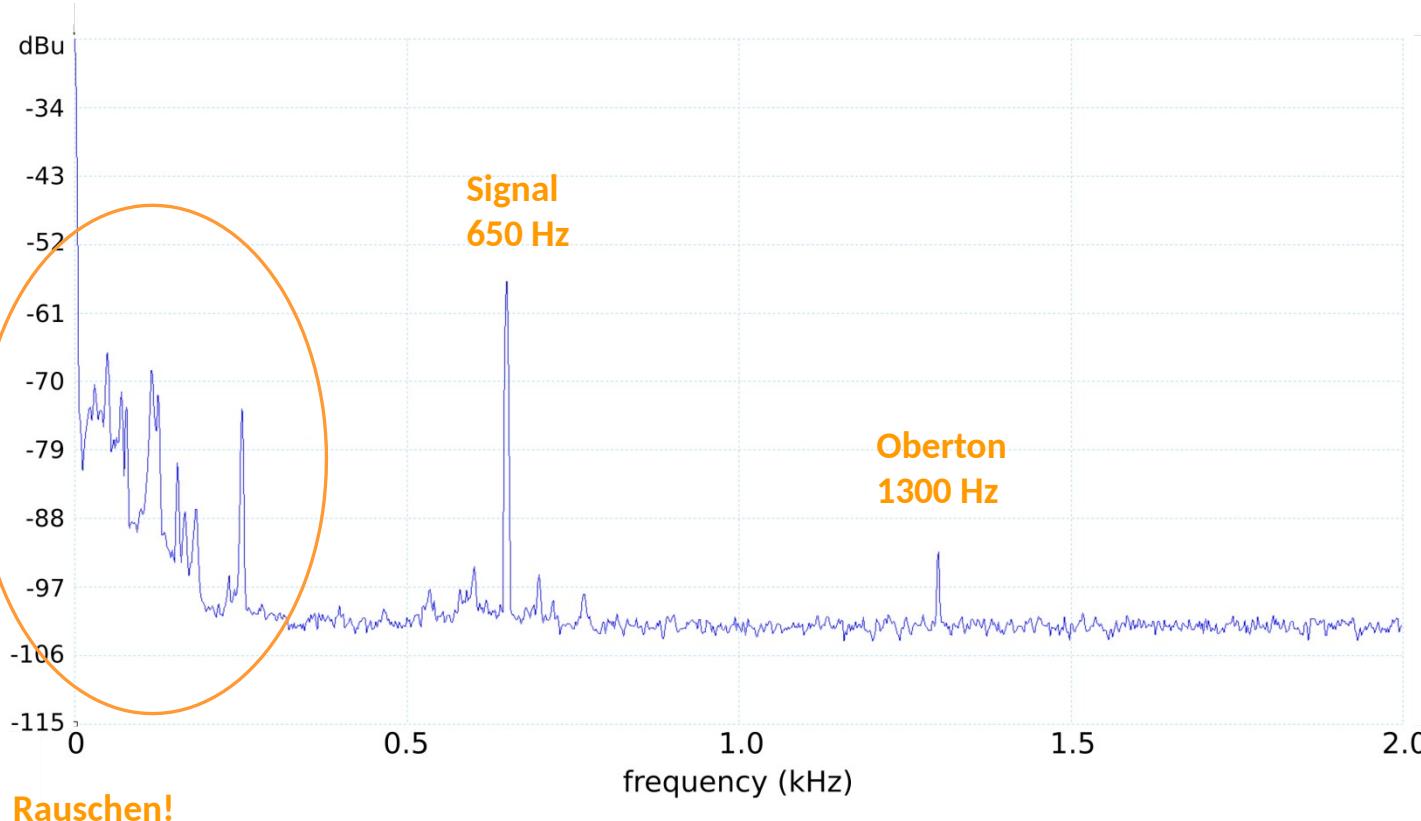
- Anklopfen des Breadboards
- Bewegung im Klassenzimmer
- Menschen und Türen im Gebäude
- Fahrzeuge vor dem Gebäude



analoge Störsignale bei LIGO:

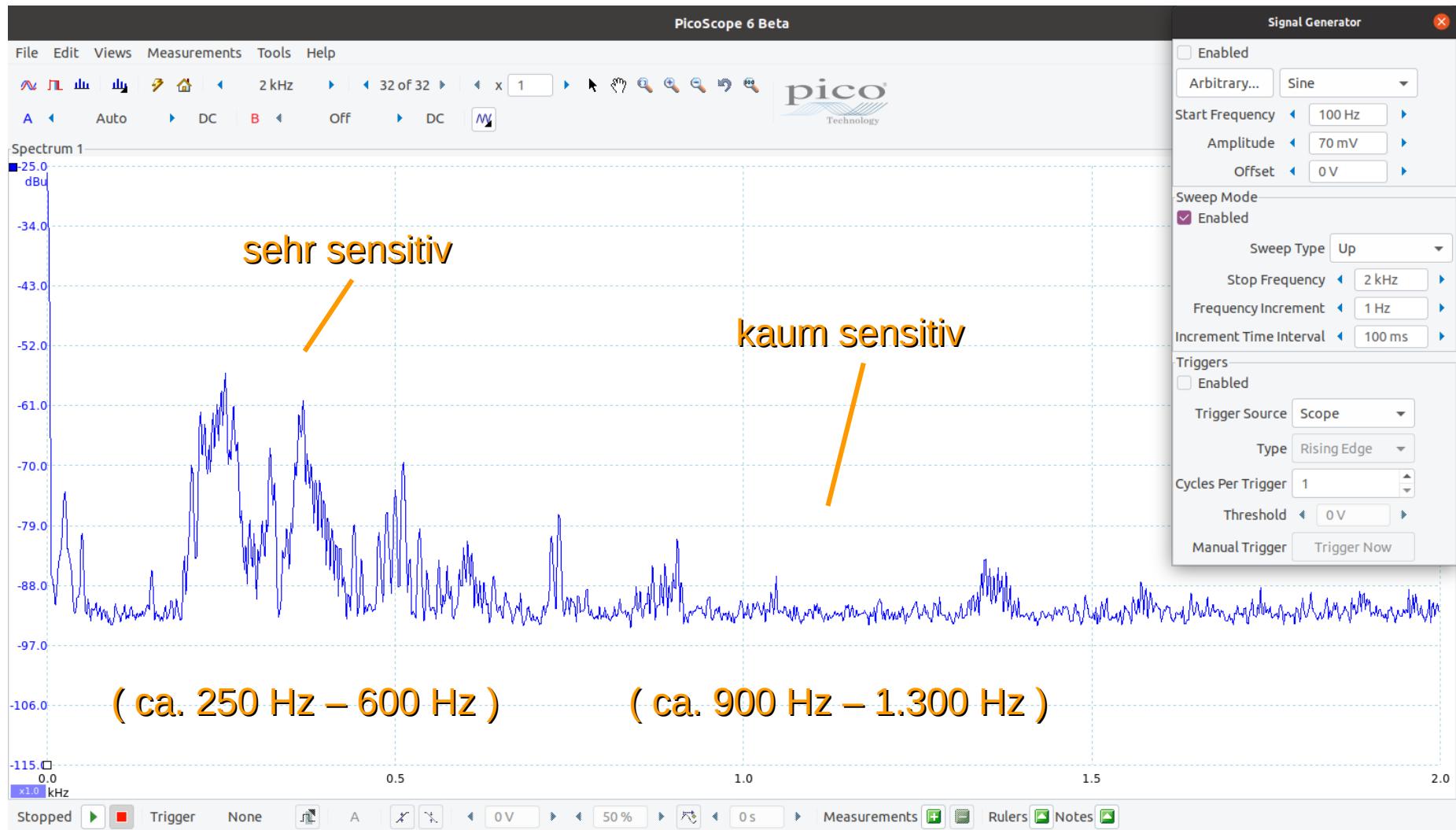
- **Wolkenfronten und Gezeiten**
- **minimale Erdbeben**
- **Verkehr und Baumfällarbeiten**
- **Gewitterzellen in den Tropen**
- **u.v.m.**

Messung im Frequenz-Raum (FFT)



Gemessen mit PicoScope (2207), FFT-Darstellung

Frequenzabhängigkeit der Sensitivität



Welleneigenschaften im Vergleich

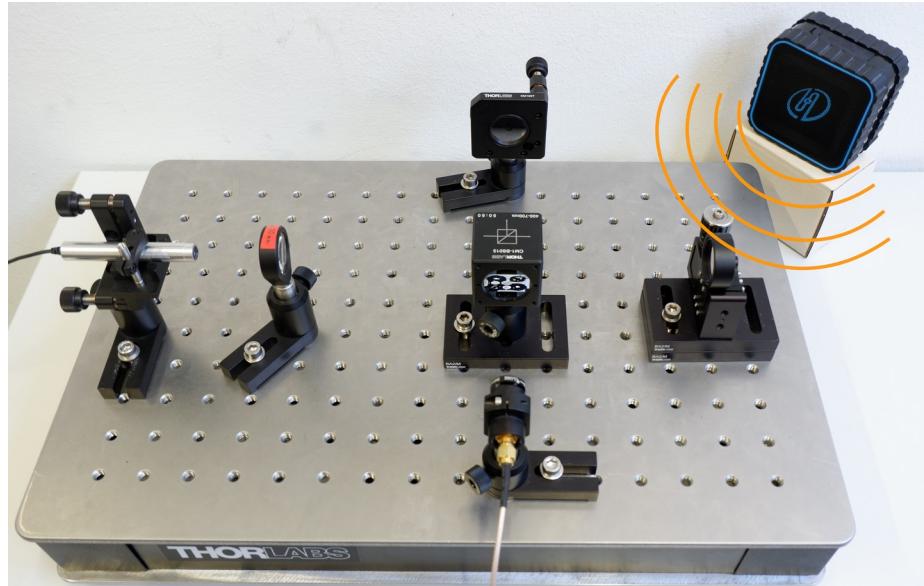
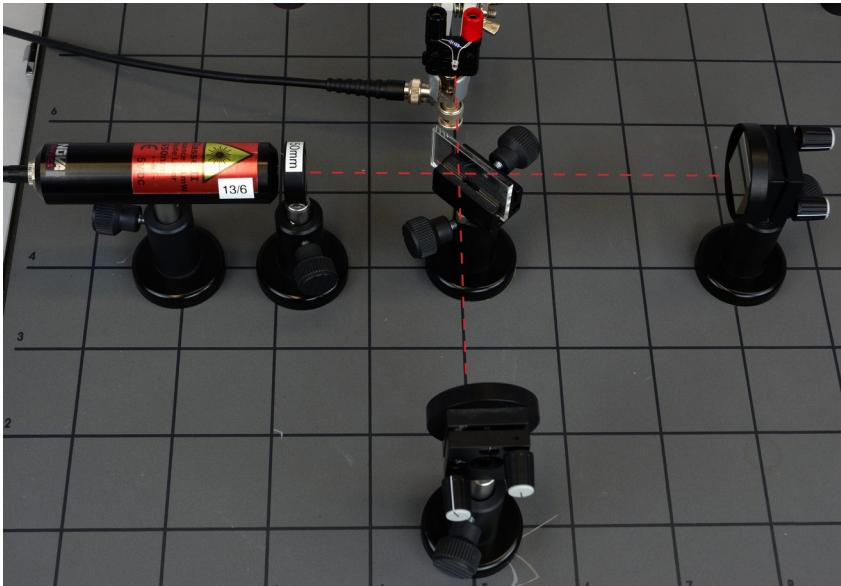
	Gravitationswellen (LIGO)	Schallwellen (Analogie)
Schwingungsrichtung	transversal, quadrupol	longitudinal
Wellen	Schwingungen der Raumzeit	Luftdruckänderungen
Medium	(Raumzeit)	Luft
Ausbreitungsgeschwindigkeit	Lichtgeschwindigkeit	Schallgeschwindigkeit
Amplitude und Wahrnehmung	extrem kleine Amplituden, nicht wahrnehmbar.	leicht zu detektieren, hörbar.

Detektoreigenschaften im Vergleich

	Gravitationswellen (LIGO)	Schallwellen (Analogie)
Schwingungsrichtung	transversal, quadrupol	longitudinal
Detektionsrichtung	ideal von oben (unten)	ideal von der Seite (eher egal)
Wellen	Schwingungen der Raumzeit	Luftdruckänderungen
Kopplung: Welle - Detektor	Veränderung des Abstands zwischen den unbewegten Spiegeln	Spiegel werden zu Schwingungen angeregt; bewegen sich vor und zurück
Resonanz im Detektor	Resonanz unerwünscht (\rightarrow Rauschen)	geringe Dämpfung benötigt; Resonanz hilfreich
Signal- aufnahme	indirekt, Regelsignal	direkt, Diodenspannung

Zusammenfassung

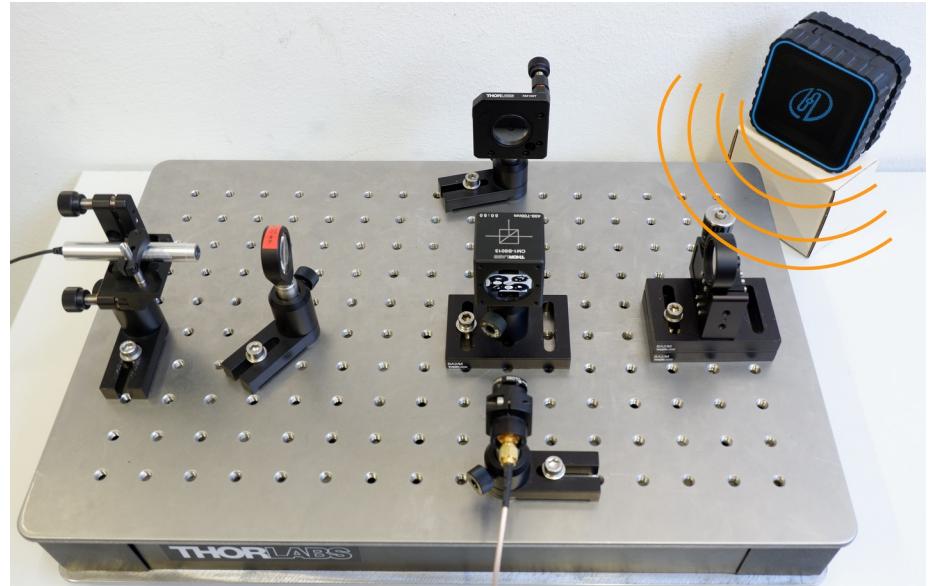
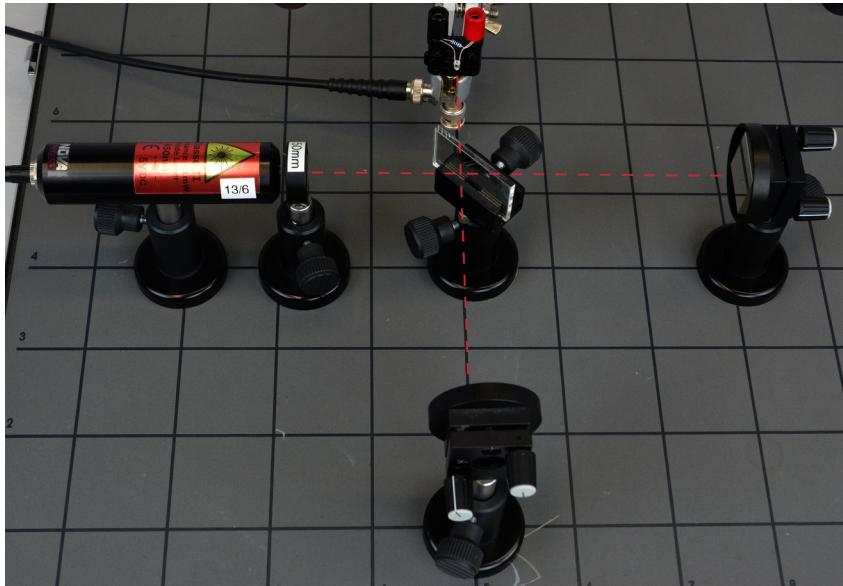
- Ein einfaches Michelson-Interferometer bringt die Gravitationswellendetektion in die Schule.



Zusammenfassung

- Ein einfaches Michelson-Interferometer bringt die Gravitationswellendetektion in die Schule.

vorauss. Anfang 2023
in *Unterricht Physik*



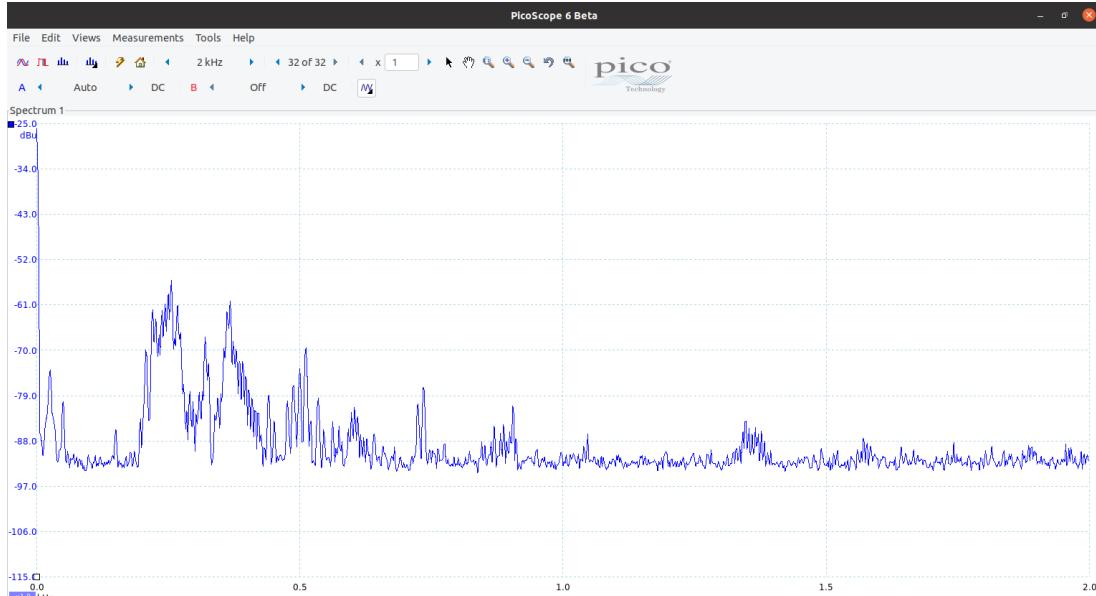
Ende

Warum Gravitationswellendetektion in Unterricht und Lehramtspraktika?

- zeitgenössische Physik im Unterricht
 - erste Messung 2015, Nobelpreis 2017
 - „neues Fenster“ ins Universum
 - erzielte Erfolge der GW-Astronomie:
 - Häufigkeit und Größe von schwarzen Löchern
 - Neutronenstern-Kollisionen als Quelle schwerer Elemente
 - Hoffnungen für die Zukunft:
 - Urknall („hinter kosmischen Hintergrund schauen“)
 - Verteilung dunkler Materie
 - ...
- faszinierende Anwendung des Michelson-Interferometers
 - Interferometrie zur Messung kleiner Längen

Frequenzabhängigkeit der Sensitivität

- Schallsignal durch die Frequenzen gefahren (100 Hz – 2.000 Hz)



- Vergleichsaufnahme ohne Schallsignal



LIGO: Nobelpreis (2017) für die Detektion von Gravitationswelle

- LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory.
- Gravitationswellen wurden durch ART vorhergesagt. (Einstein 1916)
- indirekte Nachweise seit 1974 (Energieverlust von Doppelsternsystemen u.a. Hulse & Taylor 1974)
- erstmals direkt gemessen 2015 (LIGO)
- Nobelpreis für Physik 2017 (Weiss, Barish, Thorne)



Livingston, Louisiana (US)



Hanford, Washington (US)

LIGO: Nobelpreis (2017) für die Detektion von Gravitationswelle

- LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory.
- Gravitationswellen wurden durch ART vorhergesagt. (Einstein 1916)



Livingston, Louisiana (US)



Hanford, Washington (US)

$$A = \frac{x}{24\pi} \sum_{\alpha\beta} \left(\frac{\partial^3 J_{\alpha\beta}}{\partial P} \right)^2. \quad (21)$$

Würde man die Zeit in Sekunden, die Energie in Erg messen, so würde zu diesem Ausdruck der Zahlenfaktor $\frac{1}{c^4}$ hinzutreten. Berücksichtigt man außerdem, daß $x = 1.87 \cdot 10^{-27}$, so sieht man, daß A in allen nur denkbaren Fällen einen praktisch verschwindenden Wert haben muß. “....in any case one can think of A will have a practically vanishing value.”

$$h \approx \frac{\Phi_{\text{Newton}}}{c^2} \frac{v^2}{c^2} = \frac{Gm}{Rc^2} \frac{v^2}{c^2} \quad S_g = \frac{c^3}{16\pi G} \left\langle \dot{h}_+^2 + \dot{h}_x^2 \right\rangle \quad \frac{c^3}{16\pi G} = 7.8 \times 10^{-36} \text{ erg sec/cm}^2$$

1916 examples: train collision

$$m = 10^5 \text{ kg}$$

$$v = 100 \text{ km/hr}$$

$$T_{\text{collision}} = 1/3 \text{ sec}$$

$$R_{\text{radiation}} = 300 \text{ km}$$

$$h \sim 10^{-42}$$



binary star decay

$$m_1 = m_2 = 1 \text{ solar mass}$$

$$T_{\text{orbit}} = 1 \text{ day}$$

$$R = 10 \text{ Kly}$$

$$h \sim 10^{-23} \text{ @ } 1/2 \text{ day period}$$



$$Q = \frac{2\pi E_{\text{stored}}}{\Delta E_{\text{1 period}}} \sim 10^{15} \quad \text{decaytime} \sim 10^{13} \text{ years}$$

$$A = \frac{x}{24\pi} \sum_{\alpha\beta} \left(\frac{\partial^3 J_{\alpha\beta}}{\partial P} \right)^2. \quad (21)$$

Würde man die Zeit in Sekunden, die Energie in Erg messen, so würde zu diesem Ausdruck der Zahlenfaktor $\frac{1}{c^4}$ hinzutreten. Berücksichtigt man außerdem, daß $x = 1.87 \cdot 10^{-27}$, so sieht man, daß A in allen nur denkbaren Fällen einen praktisch verschwindenden Wert haben muß. “....in any case one can think of A will have a practically vanishing value.”

$$h \approx \frac{\Phi_{\text{Newton}}}{c^2} \frac{v^2}{c^2} = \frac{Gm}{Rc^2} \frac{v^2}{c^2} \quad S_g = \frac{c^3}{16\pi G} \left\langle \dot{h}_+^2 + \dot{h}_x^2 \right\rangle \quad \frac{c^3}{16\pi G} = 7.8 \times 10^{-36} \text{ erg sec/cm}^2$$

1916 examples: train collision

$$m = 10^5 \text{ kg}$$

$$v = 100 \text{ km/hr}$$

$$T_{\text{collision}} = 1/3 \text{ sec}$$

$$R_{\text{radiation}} = 300 \text{ km}$$

$$h \sim 10^{-42}$$



binary star decay

$$m_1 = m_2 = 1 \text{ solar mass}$$

$$T_{\text{orbit}} = 1 \text{ day}$$

$$R = 10 \text{ Kly}$$

$$h \sim 10^{-23} \text{ @ } 1/2 \text{ day period}$$



$$Q = \frac{2\pi E_{\text{stored}}}{\Delta E_{\text{1 period}}} \sim 10^{15} \quad \text{decaytime} \sim 10^{13} \text{ years}$$

LIGO – Detektor: Aufbau und Funktion

- Michelson-Interferometer mit 4km Armlänge,

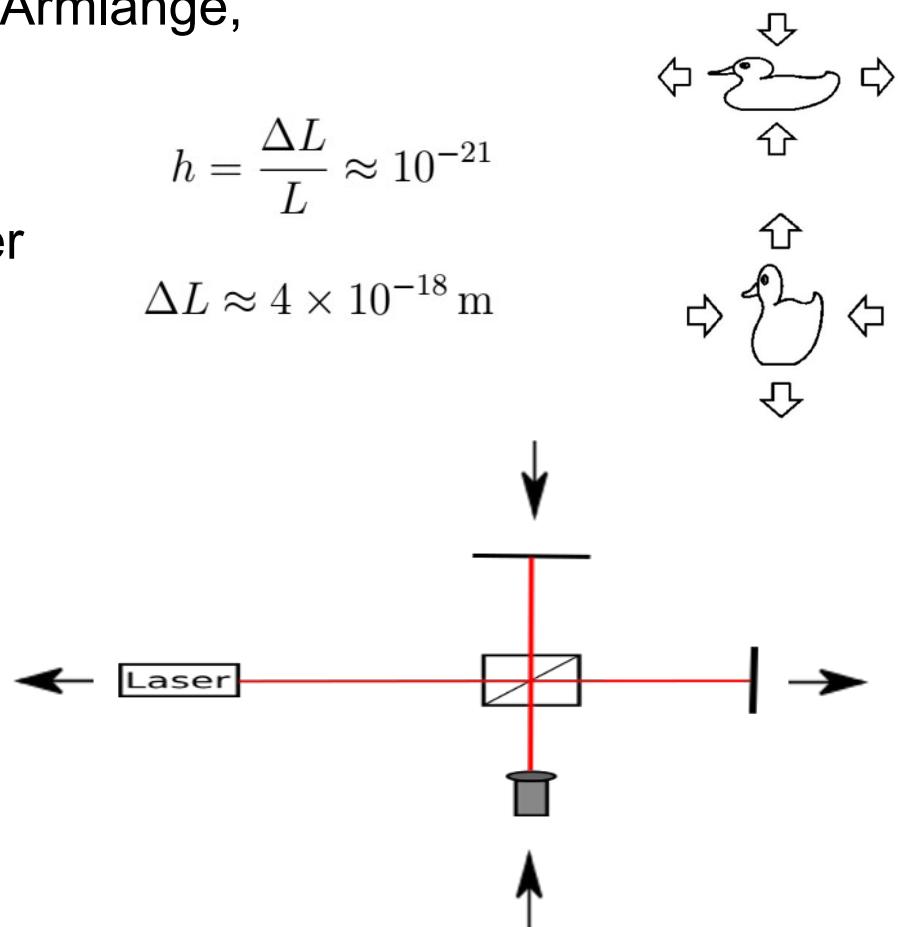
- Längenänderung:
etwa 1/1000 Protonendurchmesser

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

$$\Delta L \approx 4 \times 10^{-18} \text{ m}$$



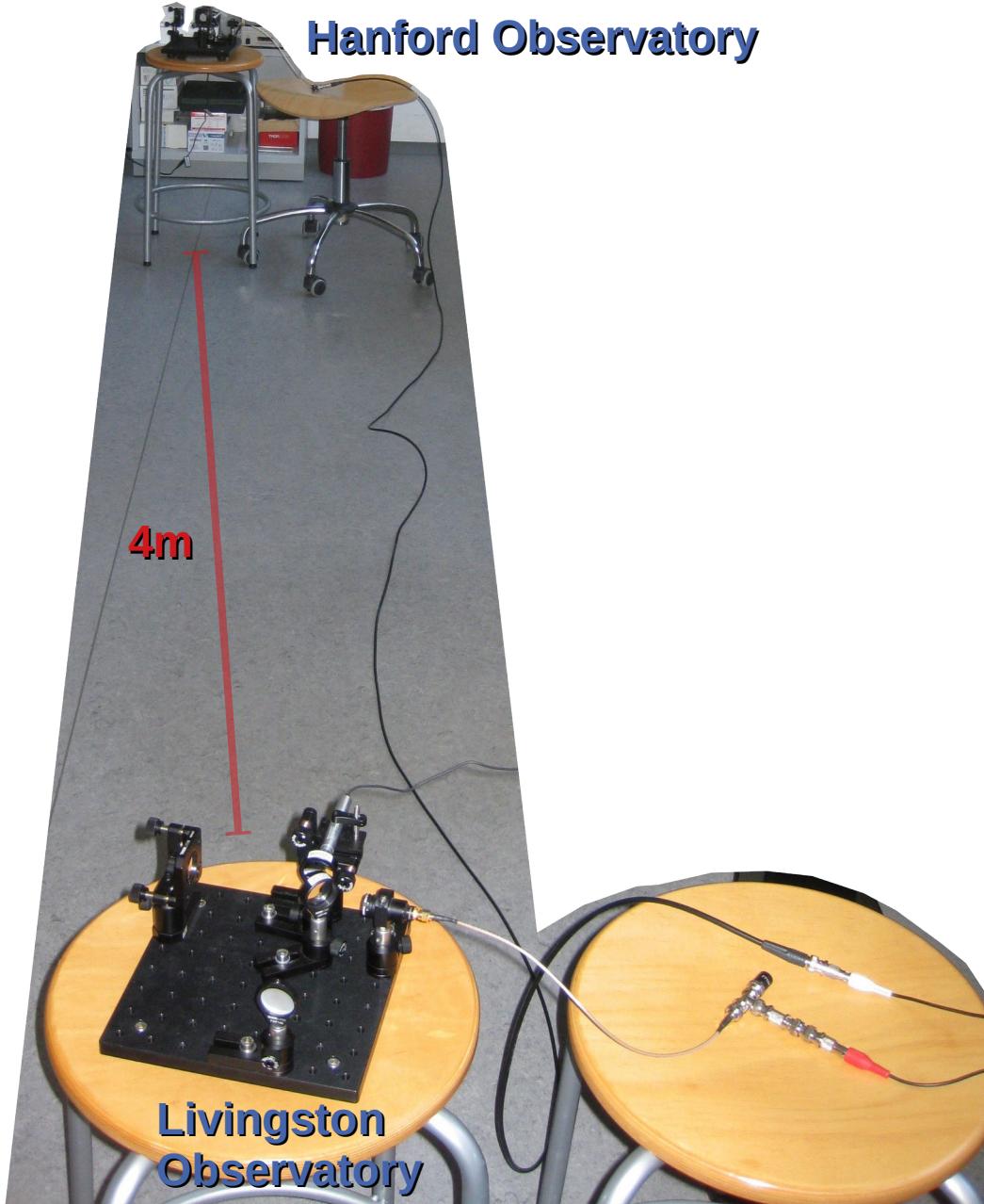
Livingston, Louisiana (US)



Wozu zwei Detektoren?



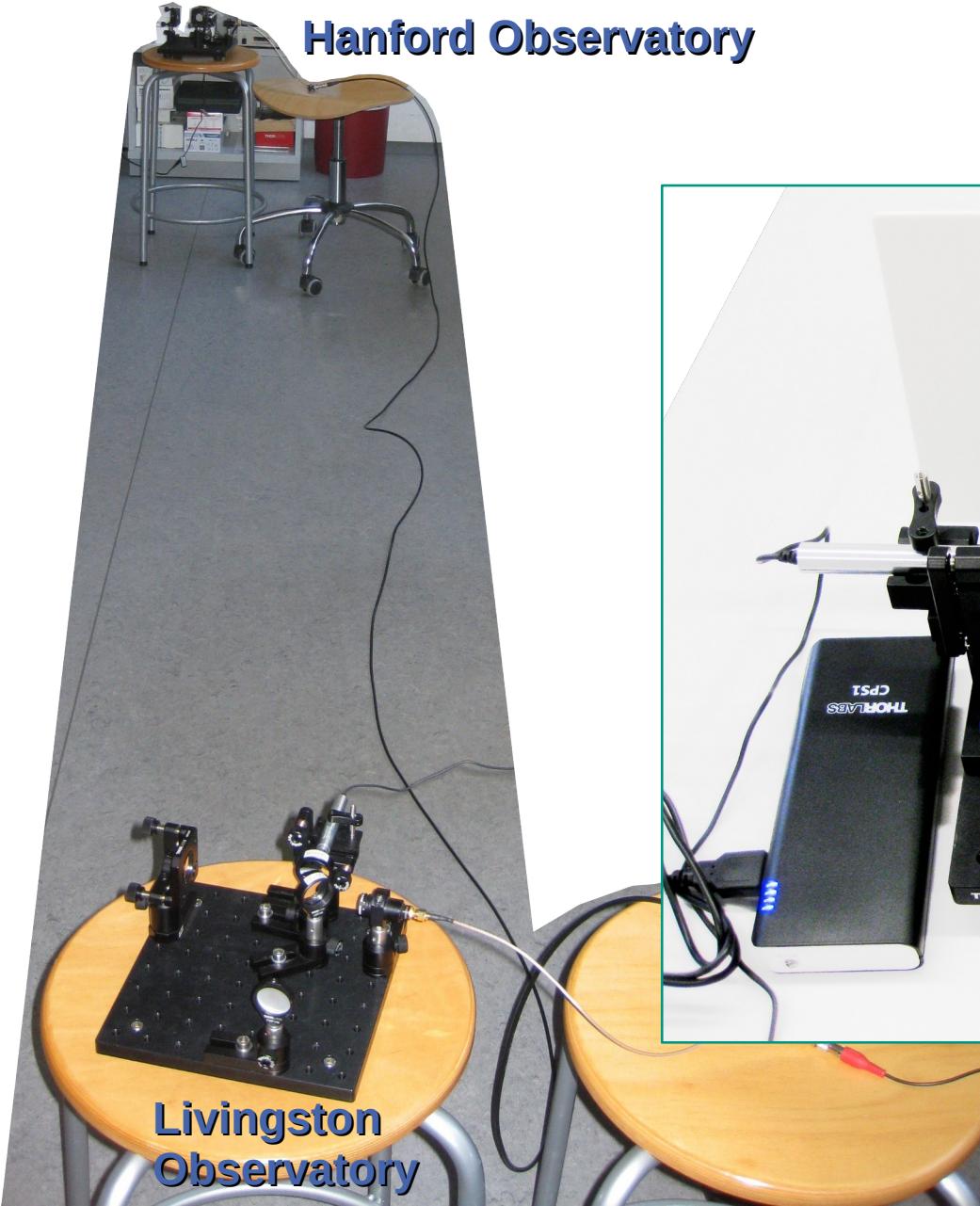
Hanford Observatory



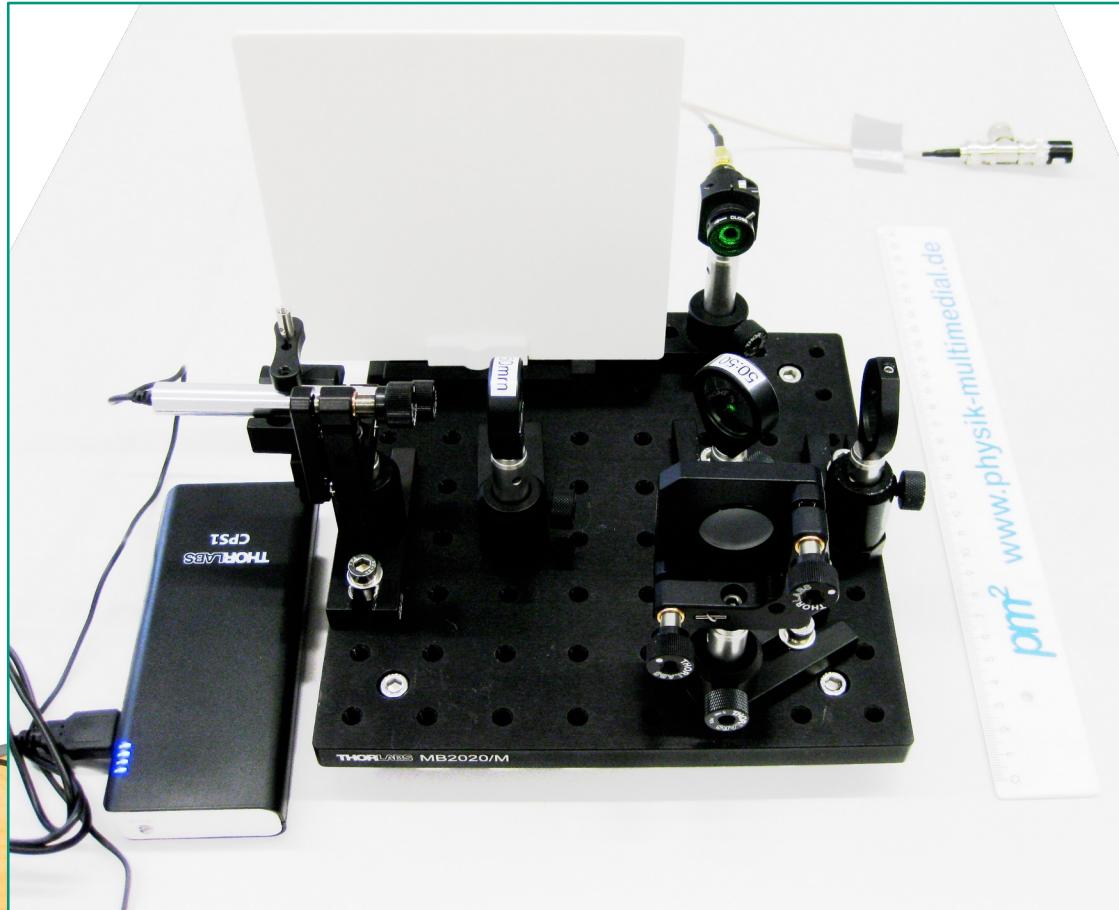
Livingston Observatory

→ **zum Rechenzentrum**

Hanford Observatory



**Livingston
Observatory**

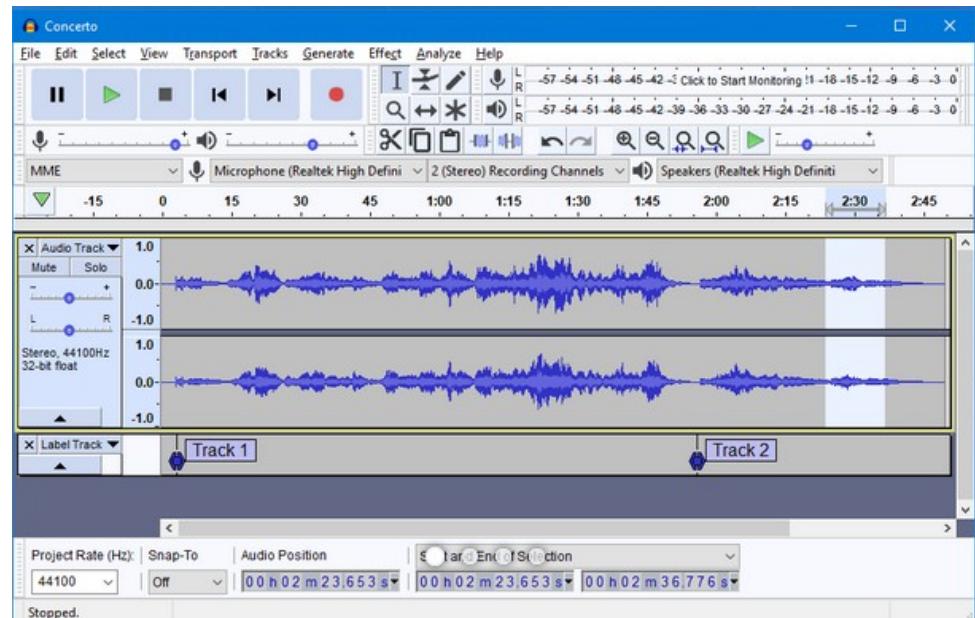
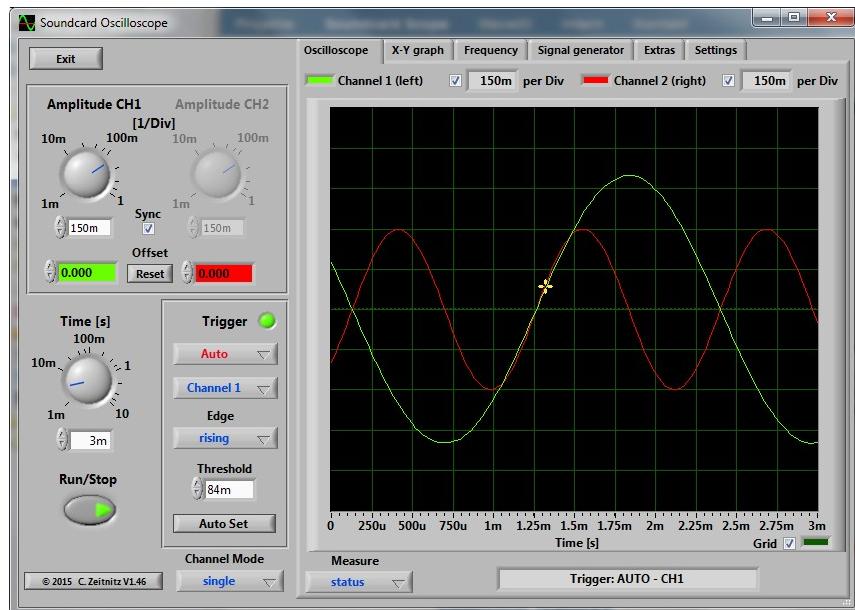


Datenaufnahme mit dem PC

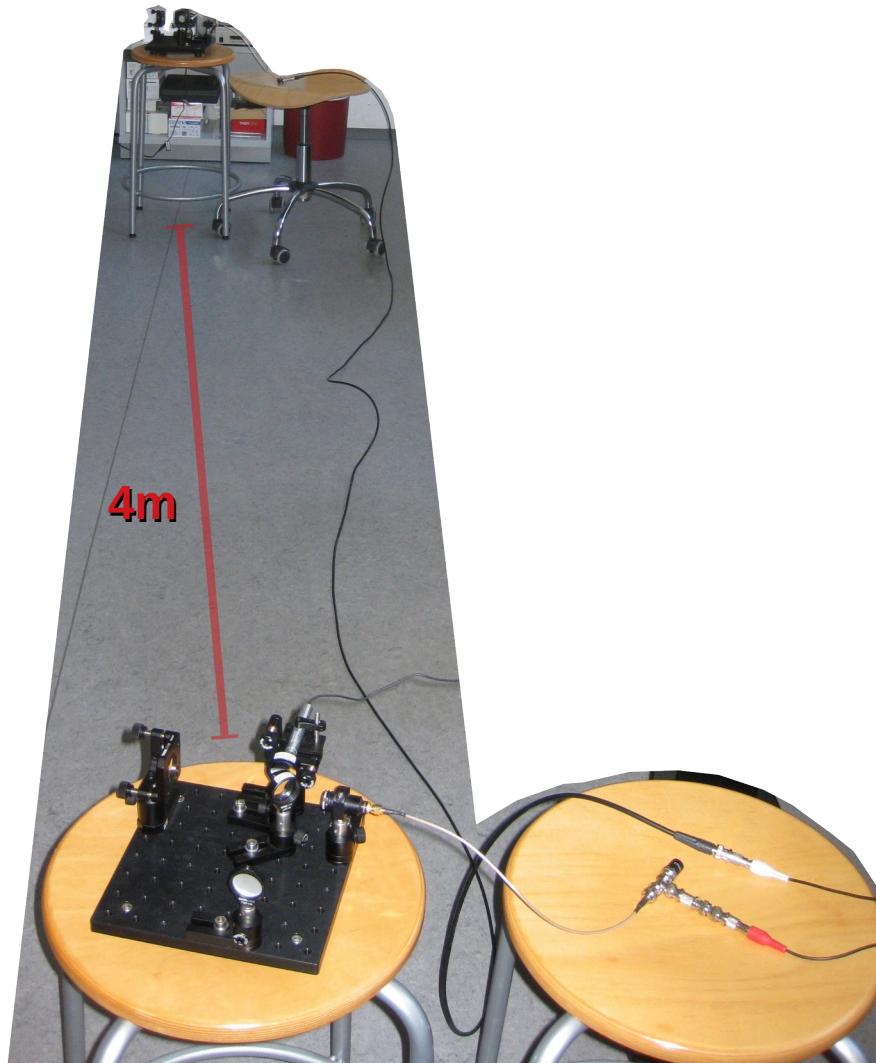
- USB-Oszilloskop, z.B. PicoScope (ab 100€)
- USB-Soundkarte mit Freeware (ca. 15€)
 - Scope (Oszilloskop)
 - Audacity (Datenlogger)



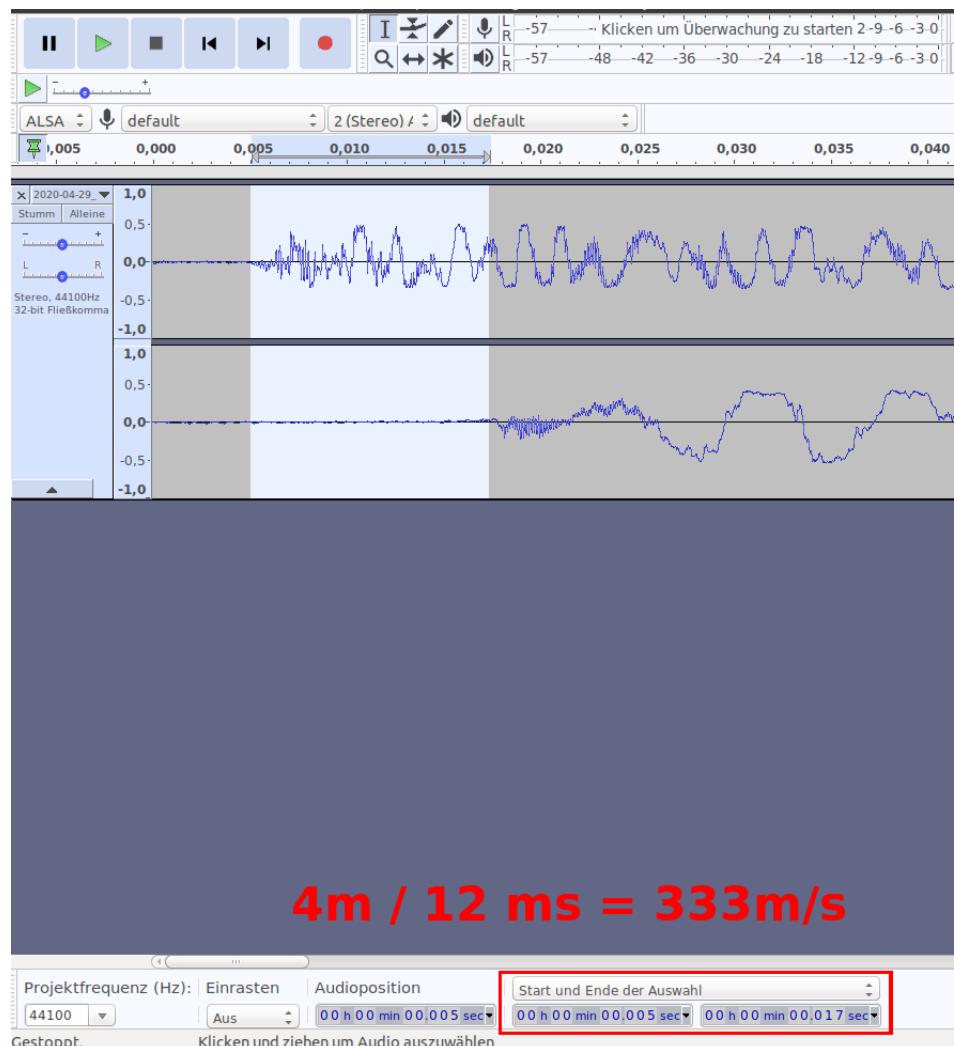
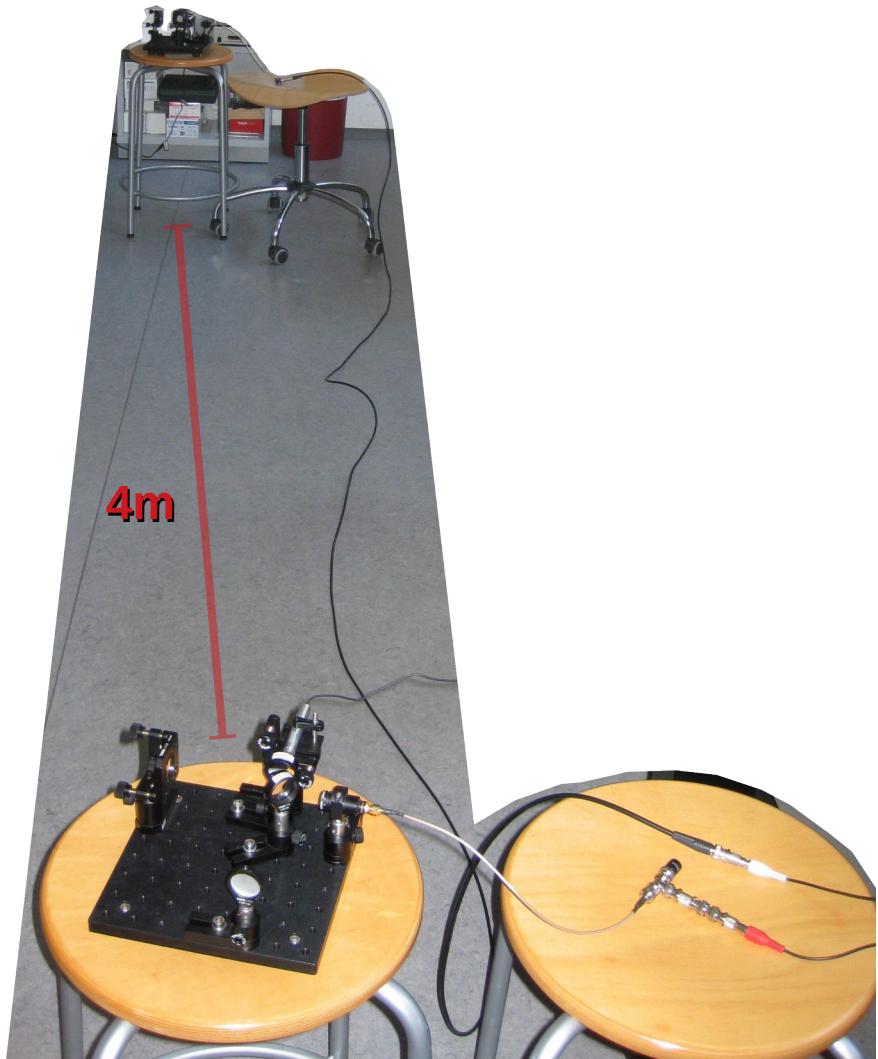
für 2 Kanäle
Stereo-Soundkarte benötigt



Signallaufzeit und Ausbreitungsgeschw.

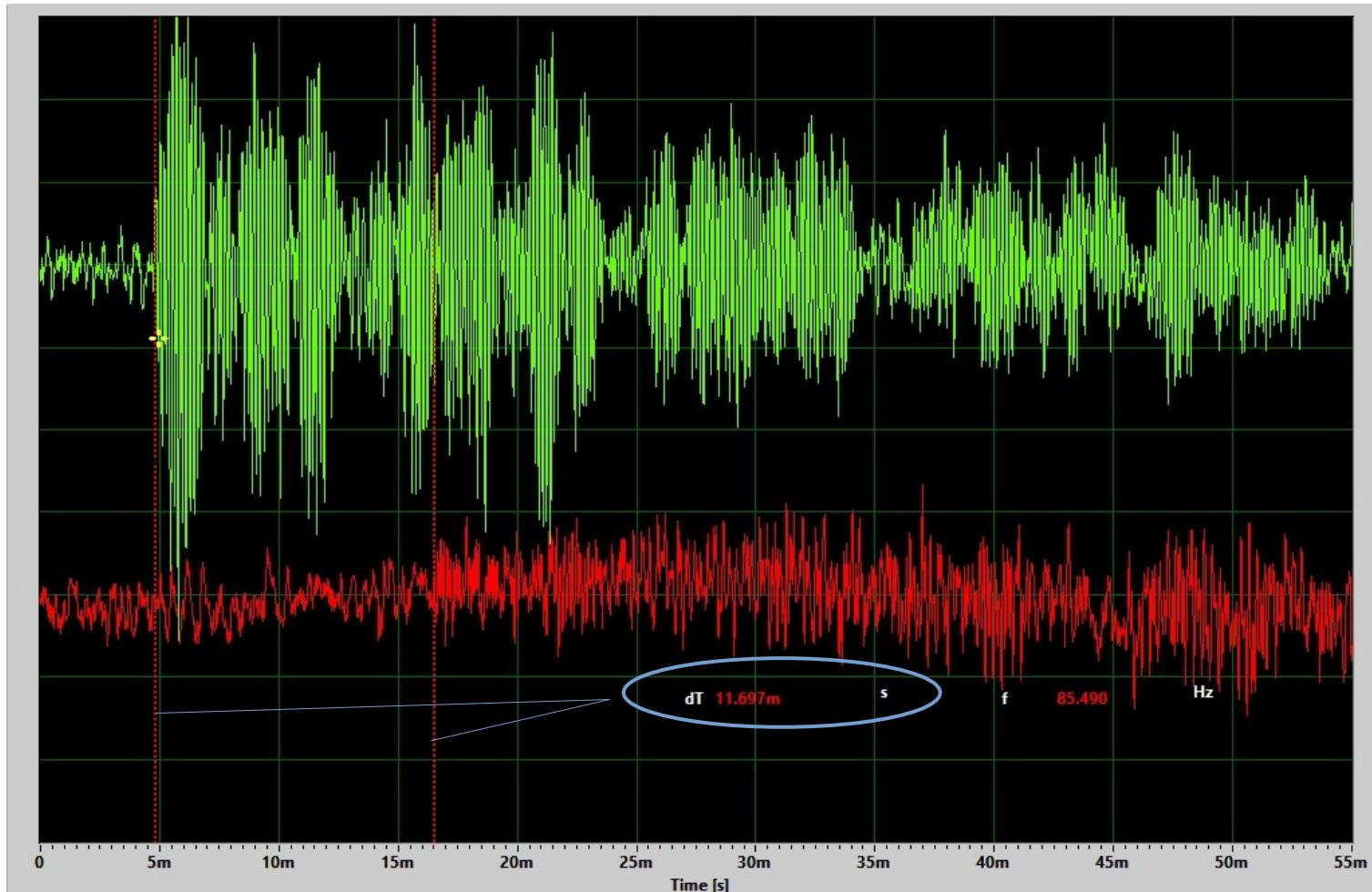


Signallaufzeit und Ausbreitungsgeschw.



erstellt mit Soundkarte und Software Audacity

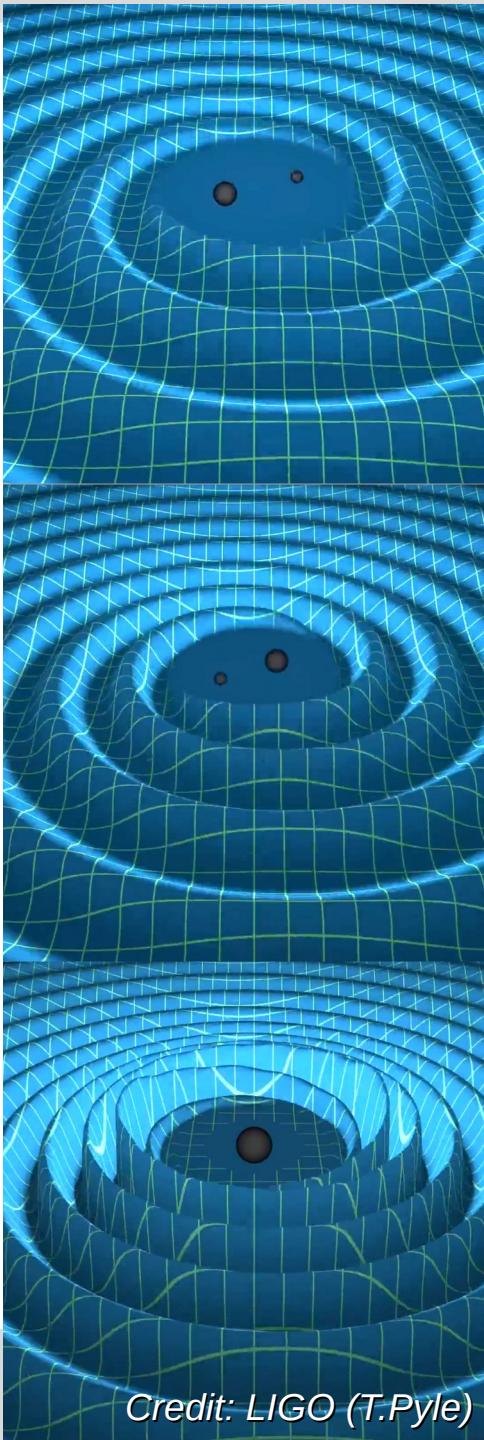
Signallaufzeit und Ausbreitungsgeschw.



erstellt mit Soundkarte und Software Scope

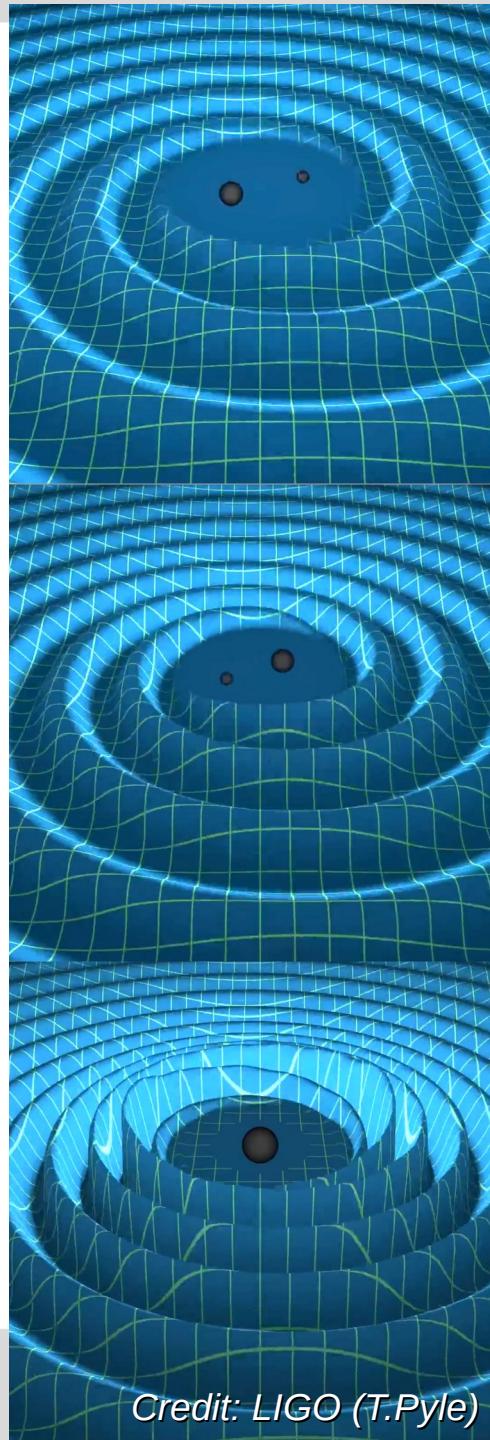
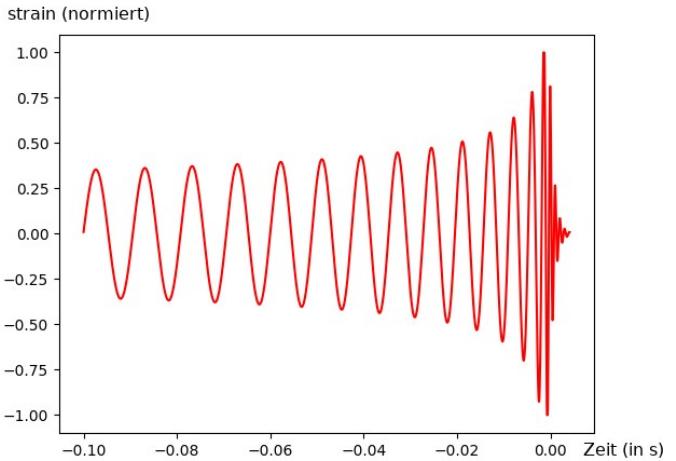
Gravitationswellen

- wellenförmige Verzerrungen der Raumzeit
- entstehen bei der Beschleunigung von Massen
 - Effekt extrem schwach
→ sehr große Massen/Beschleunigungen notwendig



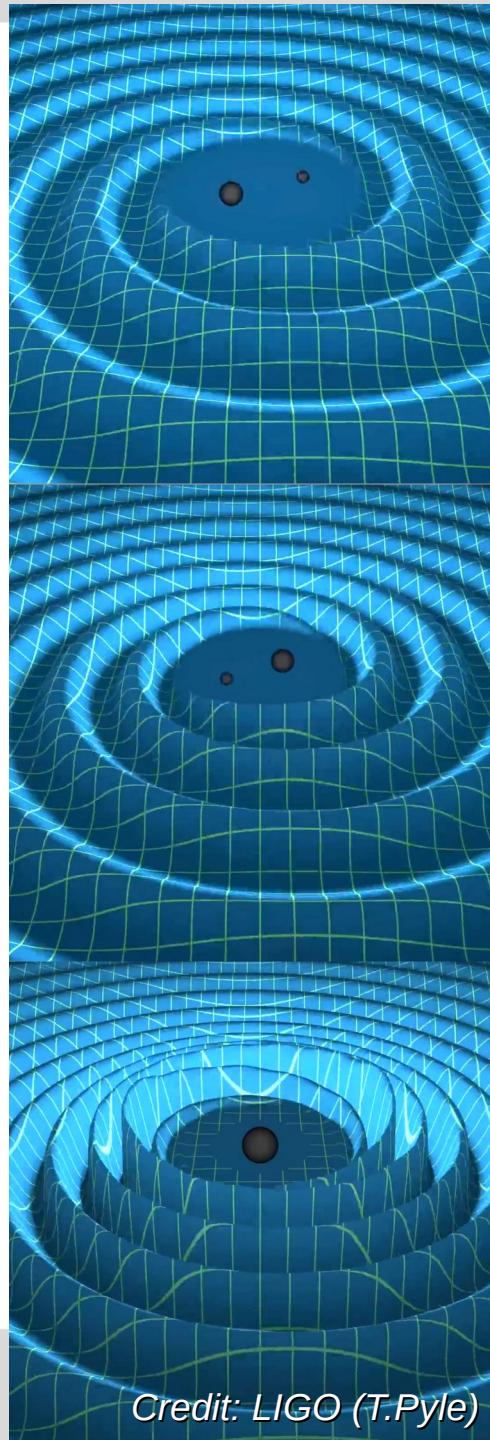
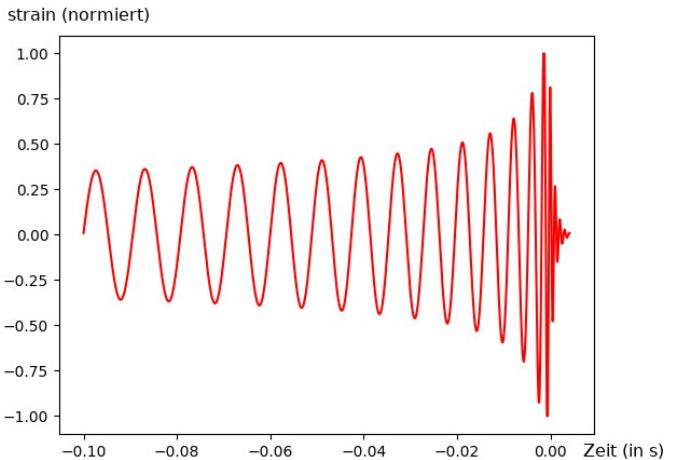
Gravitationswellen

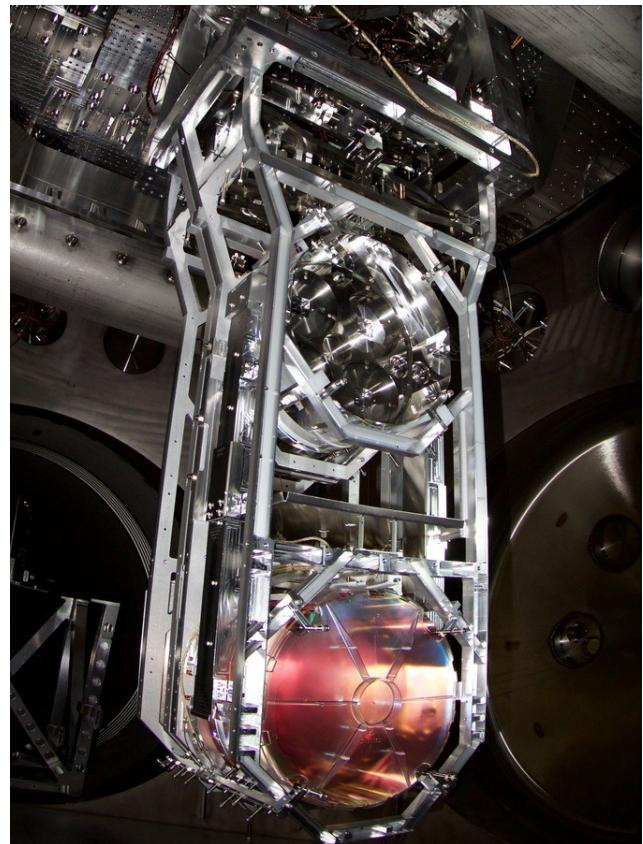
- wellenförmige Verzerrungen der Raumzeit
- entstehen bei der Beschleunigung von Massen
 - Effekt extrem schwach
→ sehr große Massen/Beschleunigungen notwendig
- z.B. Kollisionen schwarzer Löcher:
 - “chirp” (Steigerung von Frequenz und Amplitude)



Gravitationswellen

- wellenförmige Verzerrungen der Raumzeit
- entstehen bei der Beschleunigung von Massen
 - Effekt extr...
→ sel...
...ungen notwendig
- z.B. Kollision
 - “chirp” (Steigerung von Frequenz und Amplitude)





LIGO Testmasse (Spiegel)

<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20150731>