



LIGO
Scientific
Collaboration



GW150914: Die Advanced-LIGO-Detektoren im Zeitalter der ersten Entdeckungen

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914Detector/index.php>

Am 14. September 2015 beobachteten die beiden Detektoren des [Advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory](#) (Advanced LIGO) erstmals [Gravitationswellen](#), die durch das Verschmelzen von zwei [Schwarzen Löchern](#) erzeugt wurden. Dieses Ereignis wurde als GW150914 benannt. Dieser Artikel beschreibt den Status und die Empfindlichkeit der Detektoren während zum Zeitpunkt von GW150914 und während des ersten Beobachtungslaufs (engl. „observing run“).

Die L-förmigen Advanced-LIGO-Detektoren sind Interferometer, die aus zwei senkrecht zueinander angelegten Armen bestehen, die jeweils 4 km lang sind. An jedem Ende befindet sich ein optischer Spiegel, der durch Aufhängungen gut gegen seismische Störungen isoliert ist. Während der ersten Hälfte jedes Wellen-Zyklus streckten die Gravitationswellen von GW150914 einen der beiden Arme leicht, während sie den anderen Arm leicht verkürzten, gefolgt von entgegengesetzten Effekten während der nächsten Hälfte des Zyklus. Die sich ergebende Längendifferenz zwischen den beiden Armen war winzig - nur 4 mal 10^{-18} hoch 18 Meter, oder etwa ein Zweihundertstel des Durchmessers eines [Protons](#). Dieser Längenunterschied wurde durch Überlagerung der Laserstrahlen bei der Rückkehr von beiden Armen ausgelesen, und das resultierende Licht mit einem Photodetektor aufgezeichnet. Eine Anzahl von zusätzlichen [optischen Resonatoren](#) (in den Armen sowie am Eingang und am Ausgang des Interferometers) sind nötig, um die Empfindlichkeit des Lichts gegenüber den Armlängendifferenzen zu verbessern.

Während der ersten Beobachtungslaufs (O1 genannt) arbeiteten die Advanced-LIGO-Detektoren noch nicht mit ihrer endgültig angestrebten („Design“-)Empfindlichkeit. Die Lichtquelle war ein Infrarotlaser, der mit 20 Watt betrieben wurde, was zu einer umlaufenden Leistung von 100 Kilowatt in dem Armen führte. Dies ist immer noch ein Faktor von 7,5 unter dem Designwert. Einmal bei der Design-Empfindlichkeit angelangt, wird ein Ereignis wie GW150914, abhängig von der Position am Himmel, mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von bis zu 100 gemessen werden können. Dies bedeutet, dass die Gravitationswellenform dann mit etwa 1% Genauigkeit gemessen werden kann.

Was begrenzt die Empfindlichkeit von Advanced LIGO?

Bei Frequenzen über 100 Hertz ist Advanced LIGO durch die Tatsache begrenzt, dass die Photodetektoren die Laserleistung nur in Schritten einzelner Quanten messen können, also einzelne Photonen. Die zufällige Ankunftszeit der einzelnen Photonen (also sozusagen einzelne „Schüsse“)

erzeugt ein Rauschen in der Messung, das sogenannte [Schrottrauschen](#). Unterhalb von 20 Hertz sind die Interferometer gegenwärtig durch das Rauschen von verschiedenen [Servo-Regelkreisen](#) begrenzt, die benötigt werden, um die Interferometer zu betreiben. Zwischen 20 und 100 Hertz gibt es noch einige weitere ungeklärte Geräuschquellen.

Weiterführende Informationen:

- Vollständiger Fachartikel: [The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries](#)

Glossar

- **Schwarzes Loch:** Ein [Schwarzes Loch](#) ist der Überrest eines massereichen Sterns, der das Ende seiner Lebensdauer erreicht hat. Wenn ein massereicher Stern seinen nuklearen Brennstoff aufgebraucht hat, stirbt er in einer katastrophalen Art und Weise - einer Supernova. Diese kann zur Bildung eines Schwarzen Lochs führen: einem Objekt, das so massiv und dicht ist, dass nichts aus seinem Inneren entweichen kann, nicht einmal Licht. Schwarze Löcher werden in der Regel nur durch ihre Gravitationswirkung auf nahe gelegene Objekte, wie Gas oder Sterne, beobachtet.
- **Servo-Regelkreis:** Ein [Regelkreis](#) ist ein System, um das Verhalten eines Gerätes zu verwalten und steuern. Ein übliches Beispiel für einen Servo-Regelkreis ist die Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat) in vielen Automobilen. Einmal eingestellt, hält die Regelanlage die Geschwindigkeit des Autos bei, ohne weitere „Eingaben“ vom Fahrer zu benötigen.
- **Optischer Resonator:** Ein [optischer Resonator](#) wird durch zwei Spiegel gebildet, zwischen denen ein Laserstrahl mehrmals hin- und her reflektiert wird. Wenn der Abstand zwischen den Spiegeln ein genaues Vielfaches der Laserwellenlänge ist, wird in diesem Resonator eine höhere Laserleistung aufgebaut, welche die Eingangsleistung weit übertreffen kann. Damit dies funktioniert, müssen die Länge des Resonators und Ausrichtung der Spiegel genau gesteuert werden. In Advanced LIGO wird dies ist mit einer Reihe von Servo-Regelkreisen erreicht.

Abbildungen aus dem Fachartikel

Weitere Informationen zur Bedeutung dieser Abbildungen finden sich im [vollständigen Fachartikel](#).

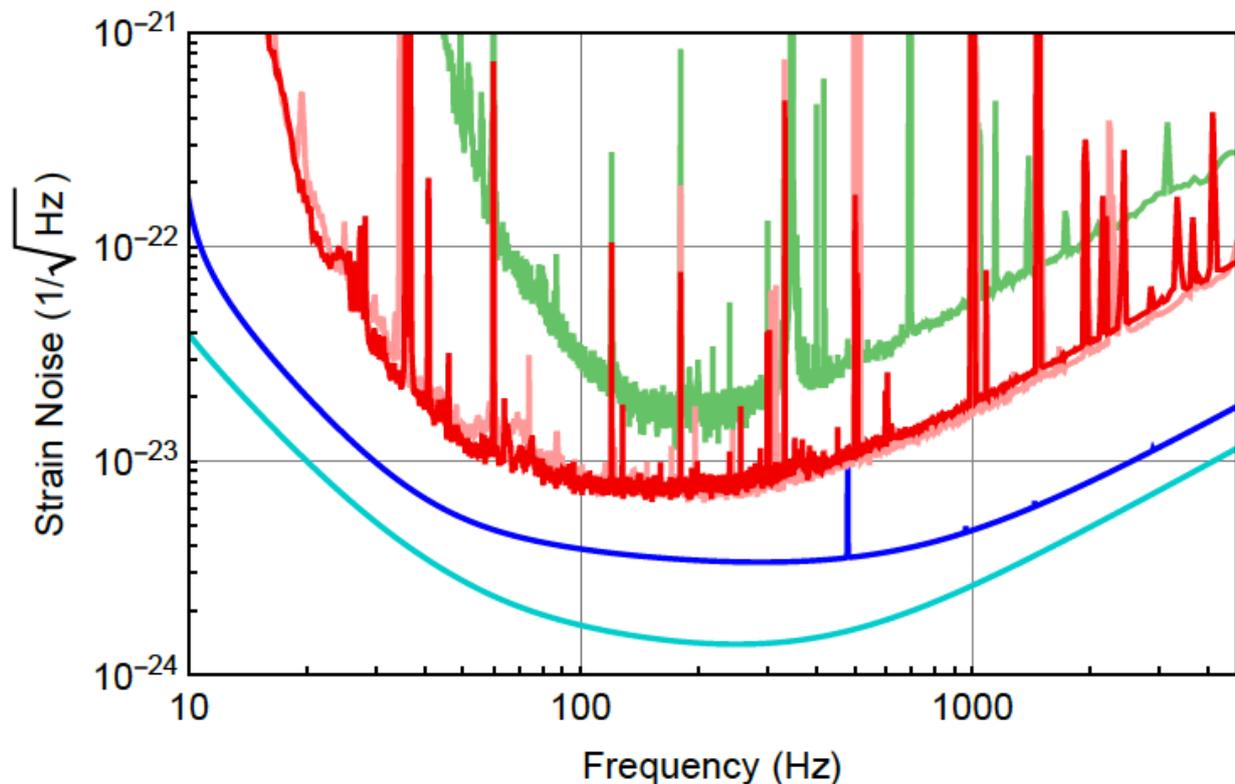


Abbildung 1: Die aktuelle Empfindlichkeit der beiden Advanced-LIGO-Detektoren gegenüber dem „Strain“ (Verformung), ausgedrückt als relative Längenänderung der Interferometerarme durch passierende Gravitationswellen, als Funktion der Frequenz. Die beiden roten Kurven stehen für die beiden Detektoren im ersten Beobachtungslauf. Ebenfalls gezeigt sind die beste Empfindlichkeit, die die ursprünglichen LIGO-Geräte (initial LIGO) erreicht hatten (grüne Kurve), die angestrebte Design-Empfindlichkeit von Advanced LIGO (blaue Kurve) sowie die erwartete Empfindlichkeit nach möglichen zukünftigen Upgrades von Advanced LIGO (türkise Kurve). Zu beachten ist, dass die Empfindlichkeit, oder auch die Stärke des sie beschränkenden Detektorrauschens, in Einheiten von „Strain (Deformation) geteilt durch Quadratwurzel von Hz“ gemessen wird. Dies bedeutet, dass die Stärke der Schwankungen des Rauschens in jedem Frequenzintervall berechnet werden kann, indem man die dargestellte Kurve quadriert, über das Frequenzintervall integriert und schließlich die Quadratwurzel zieht.

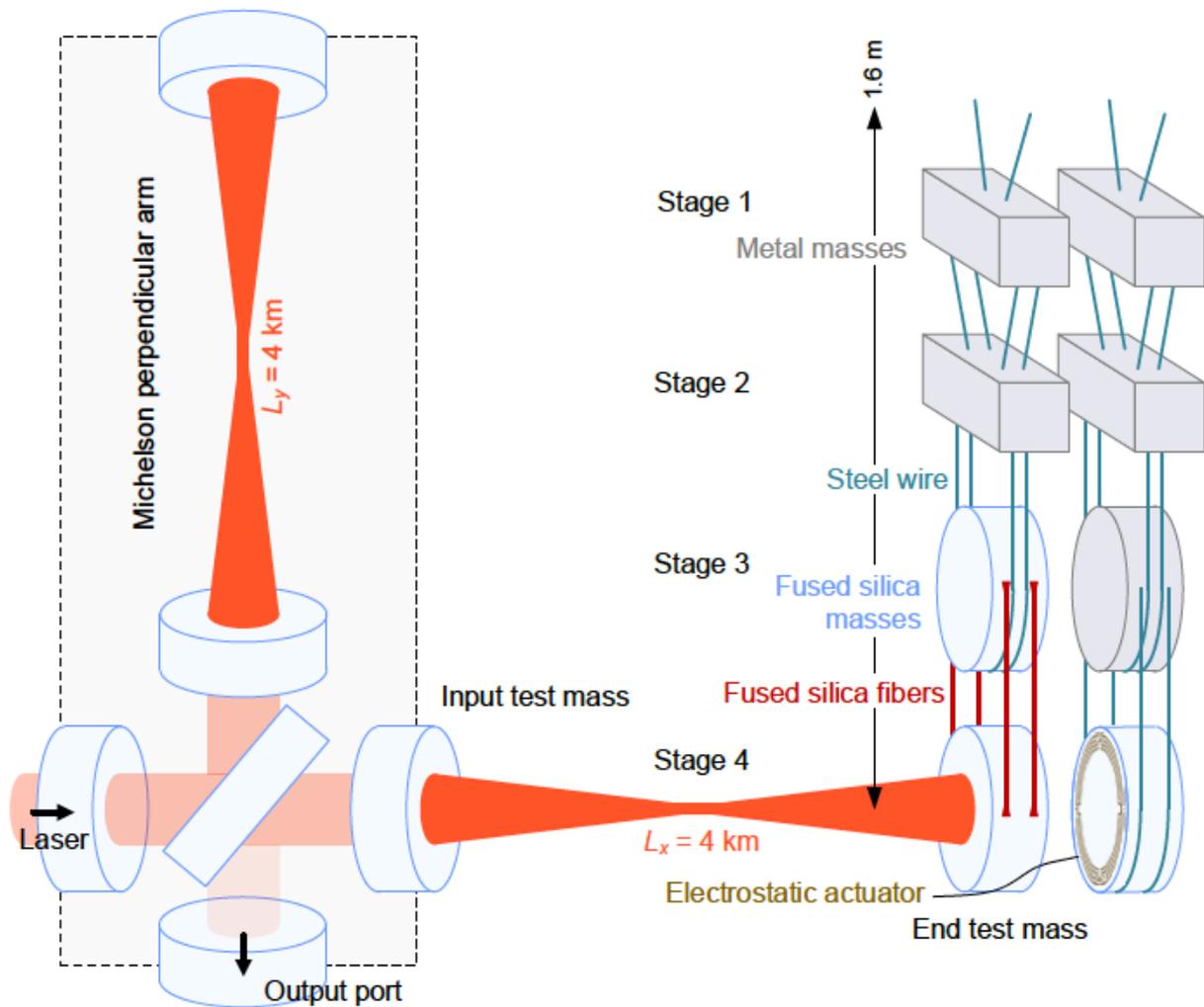


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung eines Advanced-LIGO-Interferometers. Vier stark reflektierende Testmassen bilden zwei optische Resonatoren in den Armen. Unten links ist ein Spiegel zwischen dem Laser und dem Strahlteiler angeordnet, und erhöht die in den Armen gespeicherte Energie auf 100 kW. Ein weiterer Spiegel ist zwischen dem Strahlteiler und dem Photodetektor („Output port“ zum Auslesen) eingebaut; dieser modifiziert das frequenzabhängige Ansprechen des Interferometers auf differentielle Armlängenänderungen. Die Hauptspiegel sind an vierstufigen Pendelsystemen aufgehängt, um sie gegen seismische Störungen zu isolieren.