



LIGO
Scientific
Collaboration



Kalibrierung der Advanced-LIGO-Detektoren für GW150914, die Entdeckung von zwei verschmelzenden Schwarzen Löchern

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:
<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914Calibration/index.php>

Am 14. September 2015 entdeckte das [Advanced Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory](#) (Advanced LIGO) das [Gravitationswellen](#)-Ereignis GW150914, das durch ein verschmelzendes Paar [Schwarzer Löcher](#) erzeugt wurde. Um die Eigenschaften gemessener Gravitationswellen zu bestimmen, müssen wir die Detektoren kalibrieren. Das Gravitationswellensignal ist in den vom Detektor ausgelesenen Rohdaten sozusagen verschlüsselt (kodiert), und die Kalibrierung ist der Prozess, bei dem das Gravitationswellensignal aus den Detektorrohdaten entschlüsselt (dekodiert) wird. Ohne dieses Wissen wäre es schwierig, eine Entdeckung zu beanspruchen! Bei guter Kalibrierung können wir die Amplitude (Höhe) und die Phase (Zeitpunkt entlang der Schwingungszyklen) einer Gravitationswelle genau abschätzen. Sobald diese Eigenschaften der Gravitationswellen bestimmt sind, wird die Allgemeine Relativitätstheorie verwendet, um die Massen der Schwarzen Löcher zu bestimmen, die GW150914 oder ähnliche Ereignisse hervorgebracht haben, sowie die Entfernung, Himmelsrichtung und andere Eigenschaften. (Weitere Details finden sich in der [Zusammenfassung der astrophysikalischen Interpretation](#).)

Die Kalibrierung ermöglicht es den Wissenschaftlern, die am Detektor ausgelesenen Rohdaten in die relative Armlängendifferenz umzuwandeln. (Aus dem Englischen auch „Strain“ genannt, die Dehnung der Raumzeit durch Gravitationswellen.) Wenn eine Gravitationswelle durch den Detektor erfasst wird, ändern sich die Armlängen um etwa 10^{-19} m (ein Zehntausendstel des Durchmessers eines Protons). Daraus folgt, dass die Detektorkalibrierung mindestens auf diesem Niveau präzise sein muss. Um solch eine Empfindlichkeit zu erreichen, werden die Advanced-LIGO-Detektoren sorgfältig durch eine Vielzahl von [Regelkreisen](#) gesteuert. Diese Regelkreise halten die Detektoren in einem Zustand, in dem sie in der Lage sind, passierende Gravitationswellen erfassen zu können. Der wichtigste dieser Regelkreise ist derjenige, der den Unterschied der Längen der Interferometerarme konstant hält. LIGO-Wissenschaftler verfügen über ein hoch entwickeltes Computermodell des Detektorverhaltens und viele Messungen der Detektoreigenschaften werden als Eingaben für dieses Modell verwendet. Die Messungen informieren die Wissenschaftler auch über die Unsicherheit am Detektorausgang, welche die Rekonstruktion der Parameter von GW150914 oder ähnlichen Ereignissen beeinflussen kann. Um eine genaue und präzise Bestimmung von astrophysikalischen Parametern, wie den Massen der Schwarze Löchern, zu ermöglichen, ist es daher wichtig, eine möglichst genaue und präzise Kalibrierung vorzunehmen.

Ein wichtiges Werkzeug in der Kalibrierung ist die Verwendung eines zusätzlichen Lasers, der auf

einen Endspiegel jedes Detektor gerichtet ist. Der Laser variiert in Leistung, wodurch eine Kraftänderung auf der Spiegeloberfläche verursacht wird (durch ein „Zurückprallen“ der Photonen). Dies wird als „Photonenstrahlungsdruckaktor“ bezeichnet. Die Kraft auf den Endspiegel bewirkt, dass sich der Spiegel um einen bekannten Betrag aus seiner Gleichgewichtsposition bewegt. Die Advanced-LIGO-Detektoren erfassen diese induzierte Längenänderung der Interferometerarme. Diese Längenschwankungen sind winzig - im gleichen Maßstab wie die passierenden Gravitationswellen, etwa 10^{-19} m. Bemerkenswert ist, dass die durch die Photonen eines kleinen Ein-Watt-Laserstrahls verursachte Kraft einen 40-kg-Spiegel um einen Betrag bewegen kann, der von den LIGO-Detektoren leicht messbar ist.

Für den Zeitraum um GW150914 wurden die Advanced-LIGO-Detektoren kalibriert, indem detaillierte Vergleiche zwischen den Computermodellen der Detektoren und den tatsächlichen Antworten der Detektoren auf die Photonenstrahlungsdruckaktoren durchgeführt wurden. Wissenschaftler stellten eine Unsicherheit im Gesamtniveau von weniger als 10% in der Wellenamplitude und 10 Grad in der Phase fest. Das letztendliche Ziel ist es, die Unsicherheiten der kalibrierten Detektordaten zu reduzieren, sodass mit weiteren Verfeinerungen und Verbesserungen des Kalibrierungsmodells die gemessenen astrophysikalischen Werte nicht durch die Kalibrierungsunsicherheiten begrenzt werden.

Weiterführende Informationen:

- Vollständiger Fachartikel: [Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914](#)

Glossar

- **Schwarzes Loch (Black hole)** : 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** oder **Rückkopplungsregelkreis**: 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.
- **Relative Längenänderung (Strain)**: Die relative Änderung des Abstandes zwischen zwei Messpunkten aufgrund der Verformung der Raum-Zeit durch eine passierende Gravitationswelle.

Abbildungen aus dem Fachartikel

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

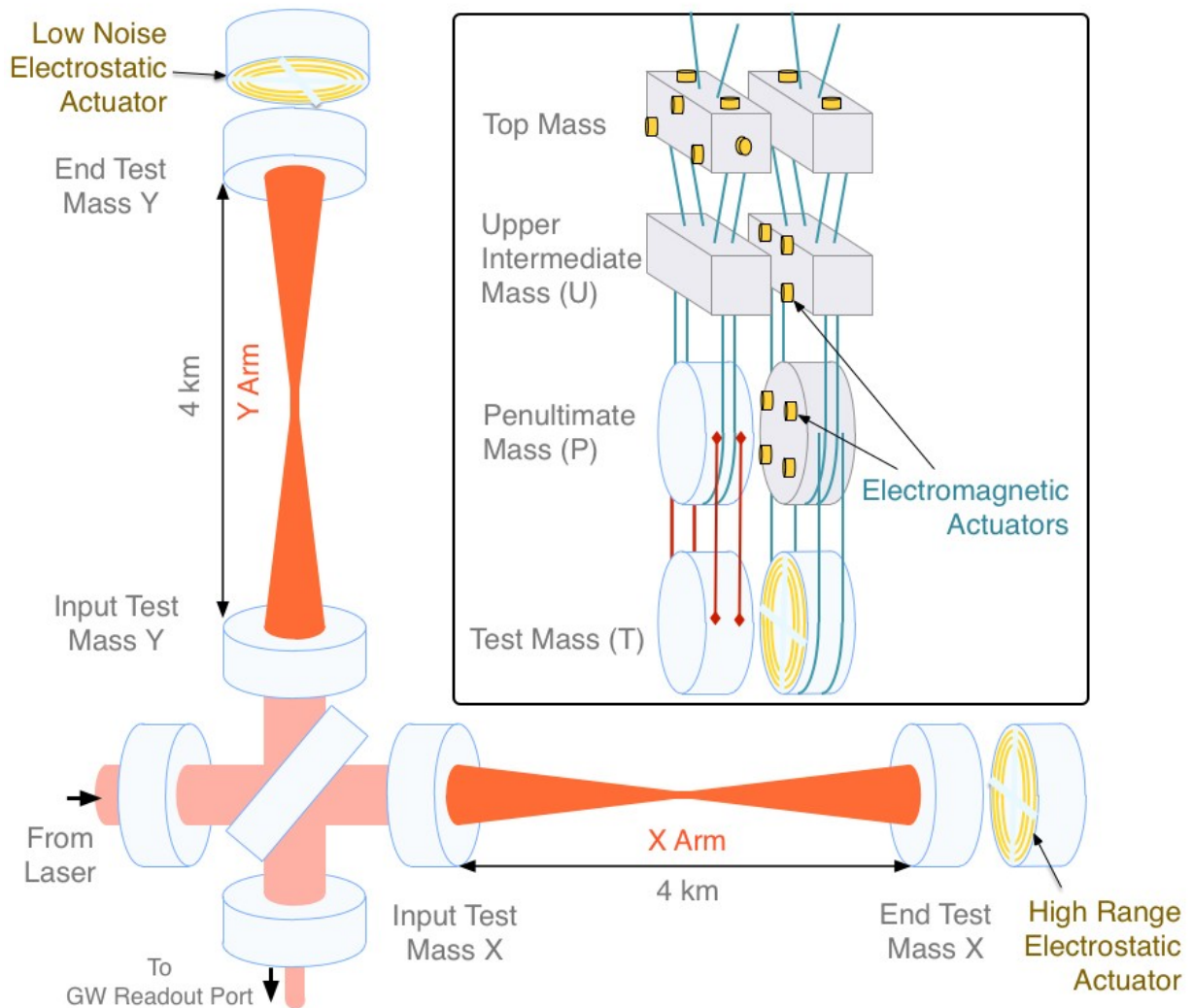


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung eines Advanced-LIGO-Interferometers. Vier stark reflektierende Testmassen bilden zwei Fabry-Perot-Resonatoren in den Armen, in der horizontalen Ebene (auf der Erde). Links unten: Der Power-Recycling-Spiegel ist zwischen dem Laser und dem Strahlteiler angeordnet, um die gespeicherte Leistung („Power“) in den Armen auf bis zu 100 kW zu erhöhen. Der Signal-Recycling-Spiegel ist zwischen dem Strahlteiler und dem Photodetektor, an dem die GW ausgelesen werden, eingebaut. Mit diesem Spiegel kann das frequenzabhängige Ansprechen des Interferometers auf differentielle Armlängenschwankungen verändert werden. Zur Klarheit der Darstellung wird nur die niedrigste Pendel-Aufhängungsstufe für die Optik gezeigt. Einschub: Eines der zweigliedrigen Pendelsysteme mit vierfacher Aufhängung („quadruple pendulum suspension“) in der vertikalen Ebene.

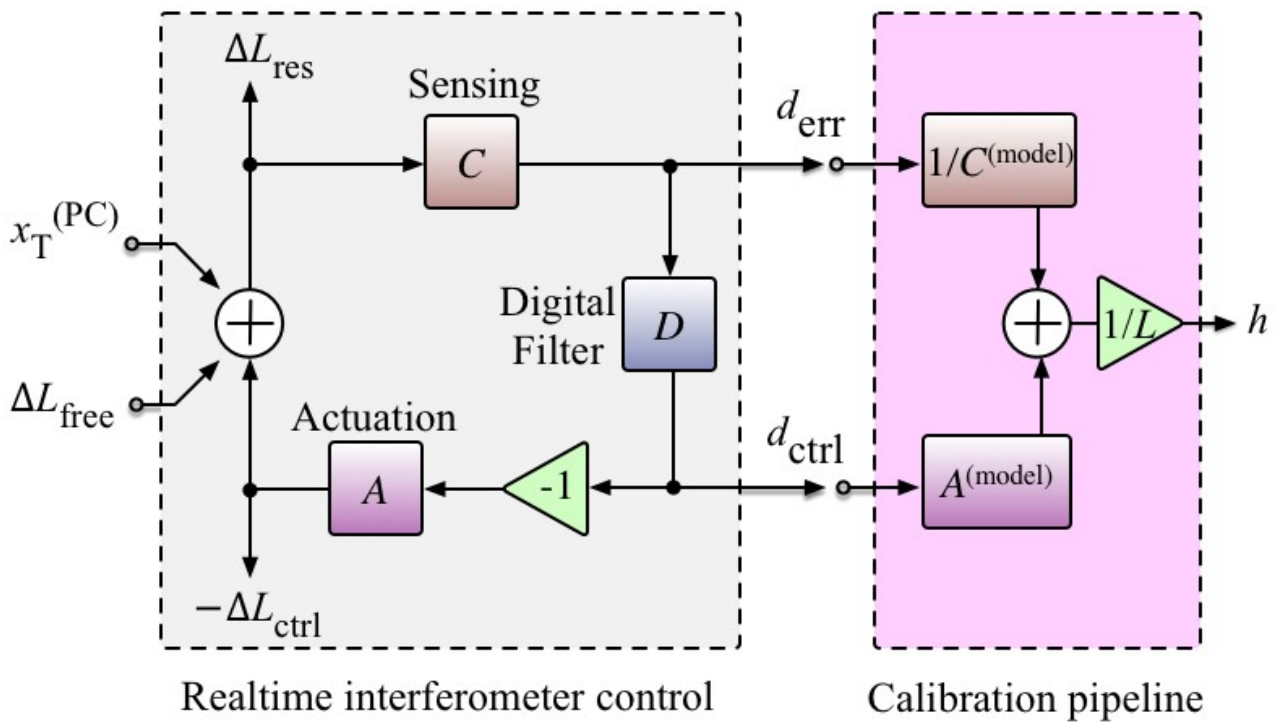


Abbildung 2: Blockschaubild des Rückkopplungsregelkreises für die differentielle Armlänge. Die Auslese-Funktion („Sensing“), digitale Filterfunktion, und eine Rückmeldungs-Funktion („Actuation“) bilden zusammen die Übertragungsfunktion für den offenen Regelkreis.