

# Eine Einführung in das Rauschen der LIGO-Virgo-Detektoren und das Aufspüren kurzlebiger Gravitationswellensignale

## Einleitung

Gravitationswellen sind äußerst winzige Kräuselungen der Raumzeit, die bei ihrer Ausbreitung den Raum minimal strecken und stauchen. Die zwei Advanced-LIGO-Detektoren in den USA und der Advanced-Virgo-Detektor in Italien messen diese Verformung als eine relative Längenänderung, indem sie die Interferenz von Laserlicht beobachten, das über mehrere Kilometer entlang rechtwinklig zueinander angeordneter Interferometerarme hin und her läuft. Selbst die lautesten Gravitationswellensignale verändern die Länge der Interferometerarme in den LIGO- und Virgo-Detektoren nur um ein Tausendstel der Größe eines Protons. Somit ist es eine große Herausforderung, diese kurzlebigen und äußerst schwachen Signale vom störenden Detektorrauschen zu unterscheiden.

Angesichts des gesteigerten Interesses der wissenschaftlichen Öffentlichkeit an der Gravitationswellenastronomie haben die LIGO Scientific Collaboration und die Virgo Collaboration mehrere Schritte unternommen, um eine breitere Teilnahme an der Analyse und Interpretation der LIGO-Virgo-Daten zu ermöglichen. Ein wesentlicher Beitrag dazu ist die Veröffentlichung eines neuen Einführungstextes, „A guide to LIGO-Virgo detector noise and extraction of gravitational-wave signals“. Das Ziel dieses Artikels ist es, eine leicht zugängliche Einführung in die Eigenschaften der Messdaten und des Rauschens unserer Detektoren zu bieten, sowie in die verschiedenen Datenanalysemethoden, die benutzt werden, um Gravitationswellensignale zu entdecken und auszuwerten. Alle Beispiele, die im Artikel gezeigt werden, nutzen öffentlich zugängliche Daten aus dem Gravitational Wave Open Science Center, [gw-openscience.org](http://gw-openscience.org). Auf jener Webseite finden sich auch Selbstlernmaterialien („Tutorials“) und Software zum Verarbeiten der Daten. Die LIGO- und Virgo-Kollaborationen veranstalten außerdem „Open Data Workshops“, bei denen Teilnehmer mit praktischen Beispielen in das Arbeiten mit relevanter Software, den Zugang zu und die Analyse von Daten der Gravitationswellendetektoren eingeführt werden.

## Signale und Rauschen

Die Methoden, um LIGO-Virgo-Daten zu analysieren, beruhen auf Arbeiten, die der französische Mathematiker Pierre-Simon Laplace und der deutsche Mathematiker Carl Friedrich Gauß vor über zweihundert Jahren verfassten. Laplace begründete die Wahrscheinlichkeitstheorie, die wir heute benutzen, um die Eigenschaften der Quellen von Gravitationswellen abzuschätzen – beispielsweise ihre Massen, Drehimpulse und Himmelsposition. Unabhängig von Laplace entwickelte Gauß eine Methode, um ein Modell so an Beobachtungen anzupassen, dass man die wahrscheinlichste Lösung erhält. Das darauf beruhende Konzept der statistischen Plausibilität (oder „Likelihood“) benutzen wir heute in LIGO-Virgo-Analysen. Es



Abbildung 1: Carl Friedrich Gauß (links) und Pierre-Simon Laplace (rechts) legten vor über zwei Jahrhunderten die Grundlagen für die heutigen LIGO-Virgo-Datenanalysemethoden.

bedeutet im Wesentlichen, dass die Residuen – was übrig bleibt, nachdem man das Modell von den Daten abzieht – statistisch verträglich mit den erwarteten Eigenschaften reinen Rauschens sein sollten. Gauß zeigte auch, dass die Verteilung des Störrauschens unter gewissen Bedingungen der berühmten Glockenkurve folgt – heute auch Gauß- oder Normalverteilung genannt. Laplace erweiterte Gauß' Arbeiten und zeigte, dass gemessenes Rauschen immer einer solchen Glockenkurve folgt, solange das Rauschen von einer großen Anzahl zufälliger Störungen erzeugt wird.

Die LIGO-Virgo-Daten auszuwerten, kann sehr herausfordernd sein, da sich die Eigenschaften des Rauschens mit der Zeit und Frequenz verändern und zusätzlich laute, vorübergehende Störungen, die sogenannten „Glitches“, dafür sorgen, dass die statistischen Eigenschaften vom Gaußschen Ideal abweichen. Der Datenanalyse-Einführungsartikel beschreibt die verschiedenen Methoden, die LIGO-Virgo-Wissenschaftler\*innen entwickelt haben, um solche Störsignale zu verfolgen und ihre Effekte auf die Datenanalyse zu beheben, damit wir robuste und verlässliche Aussagen über die statistische Signifikanz nachgewiesener Signale und die Eigenschaften ihrer astrophysikalischen Quellen liefern können.

Ein wichtiger Aspekt des LIGO-Virgo-Netzwerks ist, dass wir über mehrere Detektoren verfügen, die Tausende Kilometer voneinander getrennt sind. Dies ist von enormem Nutzen in der Datenanalyse, da es uns erlaubt, zu ermitteln, aus welcher Himmelsrichtung ein Signal kommt, indem wir seine unterschiedlichen Ankunftszeiten in jedem Detektor vergleichen. Auch um echte Signale vom Rauschen zu unterscheiden, hilft uns diese Tatsache: Astrophysikalische Gravitationswellen bewirken eine korrelierte Reaktion im gesamten Netzwerk, während das Rauschen in den einzelnen Detektoren unkorreliert sein sollte. So können wir Signale von „Glitches“ oder reinen Fluktuationen des Rauschens unterscheiden.

Von einigen externen Autoren wurden Einwände erhoben, dass die ersten veröffentlichten Gravitationswellensignale Anzeichen korrelierten Restrauschens in den beiden LIGO-Detektoren zeigten. Aber wenn die Signalmodelle korrekt von den Daten abgezogen werden, lassen sich keine statistisch signifikanten Korrelationen in den Residuen nachweisen; tatsächlich sind sie vollständig verträglich mit Gaußschem Rauschen.

## Wissenschaftliche Analyse

Der Datenanalyse-Einführungsartikel behandelt die wesentlichen Schritte einer typischen LIGO-Virgo-Datenanalyse: die Ausgabe der Längenmessungs-Kontrollsysteme der Detektoren wird zuerst kalibriert und in ein Maß der Gravitationswellen-Amplitude umgewandelt. Dann überprüfen wir die Qualität der Daten, um stark gestörte Abschnitte zu markieren, bevor die Daten an die Suchalgorithmen weitergegeben werden. Diese Algorithmen identifizieren interessante Signalkandidaten und berechnen ihre Signifikanz. Die vielversprechendsten Kandidaten werden intensiver untersucht, um Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die physikalischen Eigenschaften ihrer Quelle zu ermitteln. Nach weiterer Überprüfung und Validierung der Datenqualität werden diese Kandidaten dann in den Katalog bestätigter Quellen aufgenommen.

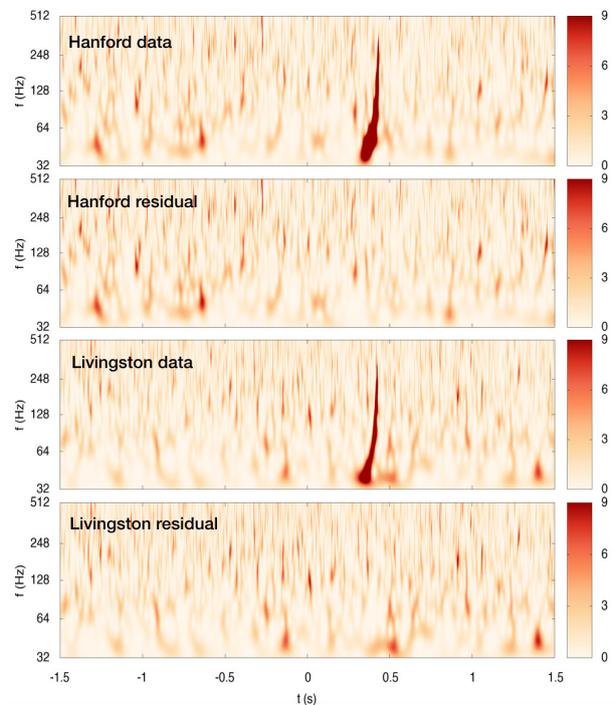


Abbildung 2: Zeit-Frequenz-Darstellungen der Daten von den Detektoren in Hanford und Livingston zum Zeitpunkt des Gravitationswellenereignisses GW150914. In den Darstellungen der Rohdaten im ersten und dritten Teilbild sieht man „kommaförmige“ Bereiche mit überschüssiger Leistung, verursacht durch das Gravitationswellensignal. Dagegen zeigen die zweite und vierte Abbildung, für die das best-angepasste Modell von den Daten abgezogen wurde, keine überschüssige Leistung. Diese sogenannten Residuen sind mit rein Gaußschem Rauschen verträglich.

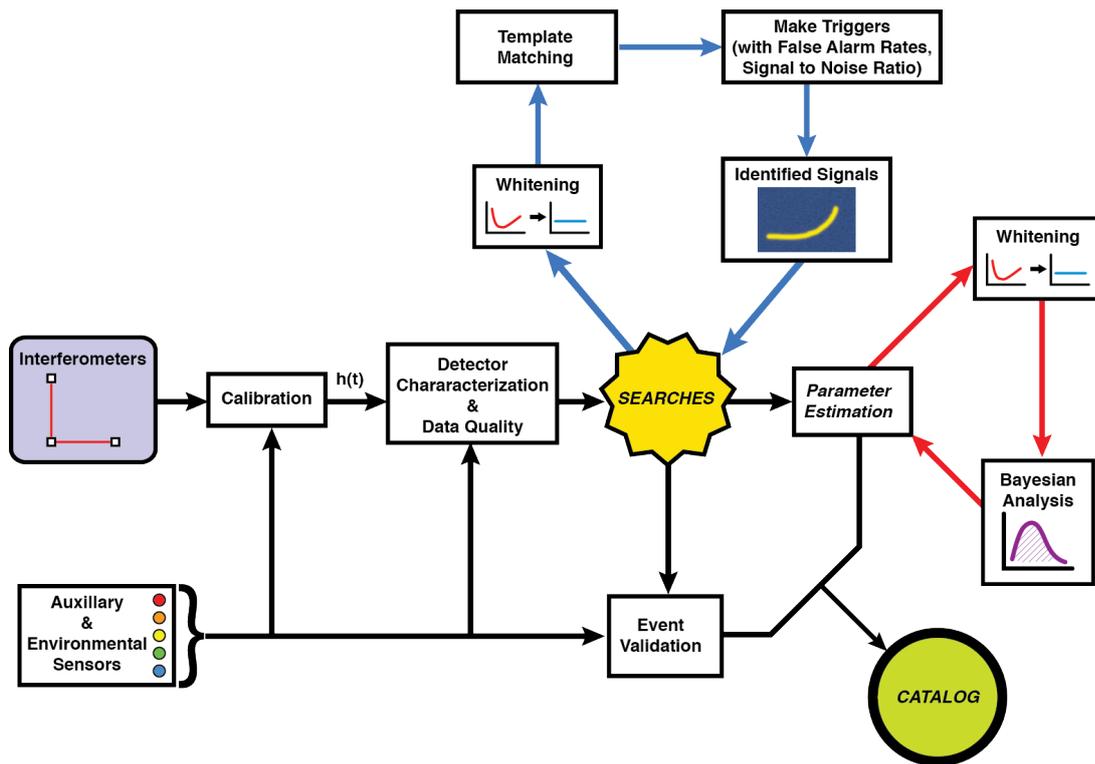


Abbildung 3: Eine vereinfachte Darstellung der wichtigsten Schritte in der Verarbeitung von LIGO-Virgo-Daten.

Der Artikel beschreibt auch einige der entscheidenden technischen Datenverarbeitungsmethoden, die wir in unseren Analysen benutzen, zum Beispiel das Anwenden von Fensterfunktionen, die Umrechnung der ursprünglich als Zeitreihen gemessenen Daten in den Frequenzraum, die Abschätzung der Leistungsspektren des Detektorrauschens, und die Berechnung der Wahrscheinlichkeit (Likelihood), dass die gemessenen Daten mit einem spezifischen Modell für astrophysikalische Gravitationswellensignale übereinstimmen.

## Weiterführende Informationen

- Unsere Webseiten (auf Englisch): [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- Frei zugängliche Daten im Gravitational Wave Open Science Center (auf Englisch): [gw-openscience.org](http://gw-openscience.org)
- Kostenloser Vorabdruck des Einführungsartikels (auf Englisch): [arxiv.org/abs/1908.11170](https://arxiv.org/abs/1908.11170)
- Seite mit interaktiven Selbstlernmaterialien (Tutorials): [gw-openscience.org/tutorials](http://gw-openscience.org/tutorials)  
Dort finden sich Links zu einem LIGO-Virgo-Online-Kurs („Gravitational Wave Open Data Workshop Web Course“) sowie interaktive Jupyter-Notebooks zum hier besprochenen Einführungsartikel.

## Glossar

- **Interferometer:** Ein Instrument, das in vielen Bereichen der Wissenschaft und Technik genutzt wird. Es werden zwei (oder mehr) Lichtstrahlen kombiniert, sodass ein Interferenzmuster entsteht, das vermessen werden kann und Informationen über die Unterschiede zwischen den Strahlen (z.B. ihre Laufzeiten) enthält, sodass wir etwas über die physikalischen Phänomene lernen können, die diese bewirken. Siehe auch die Illustrationen auf dieser Caltech-Seite (auf Englisch): [ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer](http://ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer).
- **Glitch:** Ein kurzzeitiger Anstieg des Störrauschens in einem Gravitationswellendetektor, ähnlich dem gelegentlichen lauten Knacken im Rauschen eines Lautsprechers. Solche Glitches können, wenn sie nicht sorgfältig behandelt werden, manchmal mit einem echten Gravitationswellensignal verwechselt werden, oder ein solches in den Daten überdecken.