



LIGO  
Scientific  
Collaboration



# Der erwartete Gravitationswellen-Hintergrund von GW150914-ähnlichen Verschmelzungen Schwarzer Löcher

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914Stoch/index.php>

## Einführung

Es ist eine erstaunliche Zeit für das Fachgebiet der Gravitationswellenastronomie – die erstmalige Beobachtung von Gravitationswellen aus der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher durch die [Advanced-LIGO](#)-Detektoren ist ein Ereignis von großer wissenschaftlicher Bedeutung. Vor einem Jahrhundert entwickelte Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie und sagte die Existenz von Gravitationswellen voraus. Dieser erste direkte Nachweis von Gravitationswellen, das sogenannte [GW150914](#)-Ereignis, ist eine Bestätigung für Einsteins Theorie und ist die erste direkte Beobachtung eines Paares von Schwarzen Löchern, die sich zu einem einzelnen Schwarzen Loch vereinigen. Die Beobachtung von GW150914 sowie zukünftige Beobachtungen von Verschmelzungen zweier Schwarzer Löcher werden neue Erkenntnisse über massereiche Schwarze Löcher aus dem relativen nahen Teil unseres Universums liefern.

GW150914 wird nicht das einzige Ereignis dieser Art im Universum sein. Es kann erwartet werden, dass Verschmelzungen von zwei Schwarzen Löchern immer wieder, mit einer gewissen durchschnittlichen [Rate](#), auftreten. Wenn diese Verschmelzungen innerhalb von „nur wenigen“ Milliarden Lichtjahren von der Erde stattfinden, werden sie wahrscheinlich direkt von Advanced LIGO (und bald von Advanced Virgo) beobachtet werden. Ereignisse, die weiter entfernt stattfinden, sind dagegen zu schwach, um einzeln direkt gemessen zu werden, und erscheinen nur als zufälliges Rauschen in den Gravitationswellendetektoren. (Wie das statische Rauschen in einem altmodischen Fernsehgerät.) Allerdings wird es möglich sein, die Summe aus all solchen Verschmelzungen zweier Schwarzer Löcher, die sich in der Geschichte unseres beobachtbaren Universum ereignet haben, zu messen.

## Was ist ein Gravitationswellen-Hintergrund?

[Gravitationswellen](#) sind Wellen in der Raumzeit, die von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagt werden. Gravitationswellen werden erzeugt, wenn Objekte jeder Größe beschleunigt werden, einschließlich uns Menschen. Die meisten dieser Wellen sind jedoch viel zu schwach, um sie experimentell nachzuweisen. Im Allgemeinen können wir nur auf die Beobachtung solcher Gravitationswellen hoffen, die von den massereichsten Objekten erzeugt werden, wenn diese sich mit beinahe der Lichtgeschwindigkeit bewegen - so wie bei den beiden Schwarzen Löchern, die GW150914 erzeugt haben.

Für jedes (kosmisch gesehen) nahe an der Erde stattfindende Ereignis, wie GW150914, gibt es viele weitere, die zu weit entfernt sind, um von Advanced LIGO einzeln erkannt zu werden. Die Gravitationswellen aus diesen weit entfernten Doppelsystemen Schwarzer Löcher lassen sich stattdessen zusammenfassen zu einem relativ leisen Hintergrundrauschen, auch „Popcorn“-Hintergrund genannt. Immer wenn ein Paar Schwarzer Löcher verschmilzt, erzeugt es einen kurzen Ausbruch von Gravitationswellen, der für unsere Detektoren nur wenige Zehntelsekunden dauert. Diese meist sehr leisen einzelnen Ausbrüche kommen zeitlich getrennt auf der Erde an, im Durchschnitt etwa einer alle 15 Minuten. Ihre genaue Ankunftszeiten sind jedoch zufällig, genau wie das zufällige Knallen der einzelnen Maiskörner, wenn man Popcorn zubereitet.

Ein Popcorn-Hintergrund ist ein Beispiel für eine allgemeinere Kategorie von Gravitationswellensignalen, die als [stochastischer Hintergrund](#) bezeichnet wird. Im Allgemeinen werden stochastische Hintergründe durch die Kombination von vielen nicht einzeln auflösbaren Quellen gebildet, also solchen Signalen, die wir nicht einzeln heraushören können, weil sie entweder zu leise sind (wie im oben beschriebenen Popcorn-Hintergrund) oder weil einfach zu viele auf einmal auftreten. Einen stochastischen Hintergrund nachzuweisen, ähnelt der Situation, in einem überfüllten Raum nur die Überlagerung aller Stimmen zu hören. Abgesehen von einzelnen besonders lauten Menschen und denen besonders nahe am Zuhörer, hört man die übrigen Gespräche als ein einziges überlagertes Gemurmel.

## Was sagt uns dies?

Es wird angenommen, dass Gravitationswellen während der gesamten Geschichte des Universums entstanden sind. Je nachdem, wann sie entstanden, können Gravitationswellenhintergründe in zwei Kategorien eingeteilt werden: *kosmologische* und *astrophysikalische*. Es wird vorhergesagt, dass kosmologische Hintergründe von Vorgängen erzeugt wurden, die bereits wenige Sekunden nach dem [Urknall \(Big Bang\)](#) im sehr frühen Universum stattfanden, während astrophysikalische Hintergründe durch Systeme von massereichen Sternen, wie [Neutronensterne](#) und [Schwarze Löcher](#) erzeugt werden, wie wir sie noch heute in unserer kosmischen Nachbarschaft finden. Für den gesamten Gravitationswellenhintergrund werden wahrscheinlich die Beiträge aus astrophysikalischen Quellen die kosmologischen dominieren. Das von einer Population von zwei Schwarzen Löchern, wie GW150914, erzeugte überlagerte Gravitationswellensignal ist also ein Beispiel für einen astrophysikalischen Hintergrund.

Die Stärke des Gravitationswellenhintergrunds bei unterschiedlichen Frequenzen hängt stark von der Art der Quellen ab, die ihn erzeugen. Abhängig von der Art eines beobachteten Gravitationswellenhintergrunds können wir somit etwas über den Zustand des Universums nur wenige Augenblicke nach dem Urknall erfahren, oder darüber, wie sich das Universum in jüngster Zeit entwickelt hat. Darüber hinaus können wir überprüfen, ob das Signal aus bestimmten Himmelsrichtungen stärker ist, oder überall gleichmäßig verteilt ist; dies gibt uns Auskunft über die Verteilung der Quellen, die den Hintergrund erzeugen, selbst.

## Was bedeutet GW150914 für den Gravitationswellenhintergrund? Warum ist das interessant?

GW150914 war ein einmaliges Ereignis. Die Gravitationswellen stammen aus der Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern, mit Massen von etwa der 29-fachen und 36-fachen Sonnenmassen, die ein einzelnes Schwarzes Loch mit einer Masse von etwa der 62-fachen Sonnenmassen bildeten. (Siehe [hier](#) für Details.) Die hohen Massen der beiden Schwarzen Löcher, aus denen GW150914 entstand, legen nahe, dass das „Popcorn“-Hintergrundsignal aus den unaufgelösten Signalen einer Population von binären Schwarzen Löchern wahrscheinlich stärker ist, als es die meisten Astrophysiker bisher annahmen. Dies bedeutet, dass wir eine bessere Chance haben, diesen Hintergrund mit den Advanced-LIGO- und Virgo-Detektoren zu messen. Wir werden dennoch Daten über mehrere Jahre analysieren müssen, aber es besteht die Möglichkeit, dieses Signal zu messen.

## Wie können wir diese Gravitationswellen nachweisen?

Obwohl die einzelnen Signale aus Verschmelzungen von zwei Schwarzen Löchern eine charakteristische Form haben, sind die Signale von entfernten Quellen zu schwach, um einzeln nachgewiesen zu werden, und die Ankunftszeit der Popcorn-artigen Ereignisse sind zufällig. Dies bedeutet, dass die Standardsuchmethode, die wir für einzelne Ereignisse wie GW150914 benutzen, nicht funktionieren wird, um das relativ leise Popcorn-Signal aus der Vielzahl von Verschmelzungen zweier Schwarzer Löcher im ganzen Universum nachzuweisen. Daher müssen wir einen anderen Ansatz wählen (siehe unten), um die Wellen von diesen nicht auflösbaren Quellen zu erfassen.

Es ist schwierig, nach einem schwachen Zufallssignal zu suchen, wenn man nur Daten von einem *einigen* Detektor benutzt, da das Störrauschen im Detektor selbst ebenfalls zufällig ist. Stattdessen vergleichen (korrelieren) wir Daten von *Paaren* von Detektoren, beispielsweise der beiden LIGO-Detektoren in Hanford (Washington) und Livingston (Louisiana). Das zufällige Gravitationswellensignal wird in beiden Detektoren das gleiche sein (also miteinander korreliert), für reines Detektorrauschen ist dies aber nicht der Fall, da die Detektoren weit voneinander entfernt sind und die meisten Rauschquellen von der Umgebung des Detektoren abhängen. Somit können wir diese Korrelation verwenden, um das Gravitationswellensignal von unerwünschtem Detektorrauschen zu unterscheiden.

Indem wir diese Korrelation über die *gesamte* Dauer eines Beobachtungslaufs (Monate bis Jahre) durchführen, steigern wir das gemessene Signal relativ zum Rauschen, indem wir die Beiträge all der Einzelereignisse, die durchschnittlich alle 15 Minuten auftreten, kombinieren. Je mehr Daten wir analysieren, desto besser funktioniert diese Art von Analyse.

## Schätzung des Gravitationswellenhintergrunds aufgrund dessen, was wir aus GW150914 gelernt haben

Eine Anzahl von Faktoren trägt dazu bei, wie viele Doppelsysteme Schwarzer Löcher sich im Universum gebildet haben. Eine wichtige Frage, die unsere Forschung langfristig beschäftigen wird, ist die nach dem Entstehungsweg von Systemen wie GW150914. Vielleicht entwickelten sich die beiden ursprünglichen Schwarzen Löcher aus einem Doppelsternsystem, in dem die beiden Sterne

einander umkreisten und sehr massereich waren. Oder vielleicht wurde das System in einem Kugelsternhaufen (eine Gruppe von Sternen, die durch ihre Schwerkraft eng aneinander gebunden sind) erzeugt, wo sich durch viele Wechselwirkungen zwei anfangs getrennte und kleine Schwarze Löcher zu größeren entwickelten und schließlich aufeinander trafen. Die massereichsten Sterne sind kurzlebig und produzieren oft nach ihrem Tod Schwarze Löcher. Daher ist es wichtig, die Geburtsrate von massereichen Sternen zu kennen. Diese Sternbildungsrate in einem Bereich des Universums hängt von der Menge der vorhandenen Materie und von ihrer Zusammensetzung ab: Waren nur Wasserstoff und Helium vorhanden, als der Stern gebildet wurde, oder gab es auch andere Elemente? Wie lange brauchten die beiden Schwarzen Löcher, um sich nahe genug zu kommen und letztendlich zusammenzustoßen? All diese Faktoren tragen zu den verschiedenen Entstehungsmodellen für GW150914 und ähnliche Ereignisse bei, die wir in Betracht gezogen haben.

Wenn wir eines Tages einen stochastischen Gravitationswellenhintergrund nachweisen, werden wir nicht in der Lage sein, zwischen verschiedenen Modellen zu unterscheiden, die beschreiben, wie die verantwortlichen Doppelsysteme Schwarzer Löcher erzeugt wurden. Wir werden jedoch in der Lage sein, dazu beizutragen, zu verstehen, wie oft diese Verschmelzungen im fernen Universum stattfanden. Künftige Messungen einzelner Verschmelzungen Schwarzer Löcher werden eine bessere Schätzung dafür liefern, wie oft diese Art von Ereignissen im nahen Universum stattfinden, sowie mehr Informationen über die Massenverteilung von Schwarzen Löchern. Die Kombination aus dem, was wir aus einem stochastischen Hintergrund lernen, mit Messungen von einzelnen Ereignissen kann somit letztlich helfen, zwischen verschiedenen Bildungswegen für Doppelsysteme aus Schwarzen Löchern zu unterscheiden.

## **Ausblick auf die Zukunft**

Die Beobachtung von GW150914 legt nahe, dass Bildungsraten und Massen von Schwarzen Löchern am oberen Ende des Bereichs liegen, den frühere Vorhersagen abdeckten. Dies bedeutet, dass ein Gravitationswellenhintergrund aufgrund der Verschmelzungen von Schwarzen Löchern ebenfalls lauter sein sollte als zuvor erwartet. Es gibt noch beträchtliche Unsicherheiten bezüglich der Stärke dieses Hintergrunds, aber ein erfolgreicher Nachweis kann mit den „Advanced“-Detektoren gelingen, sobald sie ihre geplante höchste Empfindlichkeit erreichen. Mit Blick auf die Zukunft könnte die nächste Generation von Gravitationswellendetektoren dann in der Lage sein, Messungen des Gravitationswellenhintergrunds mit Messungen von einzelnen Verschmelzungen von Schwarzen Löchern zu kombinieren, um eindeutig zu ermitteln, wie sich diese Doppelsysteme bilden.

# Glossar

- **Astrophysikalischer Hintergrund:** Ein stochastischer Hintergrund von Gravitationswellen, der von Quellen wie Neutronensternen und Schwarzen Löchern erzeugt wird.
- **Schwarzes Loch:** Ein Bereich der Raumzeit, der durch eine äußerst kompakte Masse verursacht wird, in der die Schwerkraft so stark ist, dass nichts, nicht mal Licht, entkommen kann.
- **Korrelation:** Mathematisch berechnete Übereinstimmung zwischen zwei Datensätzen. Zum Beispiel vergleichen wir Paare von Datensätzen zweier räumlich getrennter Gravitationswellendetektoren, um nach schwachen Signalen (wie einem stochastischen Hintergrund) zu suchen, die in beiden Instrumenten, also korreliert, auftreten sollten.
- **Kosmologischer Hintergrund:** Ein stochastischer Hintergrund von Gravitationswellen, der im sehr frühen Universum kurz nach dem Urknall erzeugt wurde.
- **Kugelsternhaufen:** Eine sehr dichte Gruppe von Sternen, die durch ihre wechselseitige Schwerkraft zusammengehalten werden.
- **Neutronenstern:** Ein extrem dichtes Objekt, das nach dem Zusammenbruch eines massereichen Sterns zurückbleibt.
- **Popcorn-Hintergrund:** Die kombinierten Effekte von kurzen Gravitationswellen-Ausbrüchen, die von allen Doppelsystemen Schwarzer Löcher erzeugt werden, die zu weit von uns entfernt sind, um einzeln direkt beobachtet zu werden. Diese Signale kommen zu zufälligen Zeiten auf der Erde an, wie das „Knallen“ einzelner Maiskörner beim Popcorn.
- **Raumzeit:** Raum und Zeit, wie sie gemeinsam von Einsteins Theorie beschrieben werden.
- **Stochastischer Hintergrund:** Ein Gravitationswellensignal, das aus der Kombination vieler einzelner nicht individuell auflösbarer Quellen gebildet wird. Quellen sind nicht auflösbar, wenn sie zu schwach sind, um direkt beobachtet zu werden, oder wenn zu viele auf einmal auftreten und sich wie Gespräche in einem lauten, überfüllten Raum überschneiden.
- **Stochastisch:** Durch Zufall bestimmt. Ein Prozess, der ein Zufallsmuster aufweist, das zwar statistisch analysiert werden kann, aber nicht genau vorhergesagt werden.

## Weiterführende Informationen:

- [Vollständiger Fachartikel](#), auf den sich diese Zusammenfassung bezieht
- Frei zugängliche [Rohdaten](#) von GW150914 für diese Analyse
- [Advanced LIGO](#)
- [Advanced Virgo](#)

# Abbildungen aus dem Fachartikel

Weitere Informationen darüber, wie diese Darstellungen erzeugt wurden und zu ihrer Bedeutung, finden sich im [Fachartikel](#).

Abbildung 1: Die erwartete Stärke des Gravitationswellenhintergrunds für ein Referenzmodell (in blau), verglichen mit der erwarteten Empfindlichkeit des Detektornetzwerkes aus Advanced LIGO und Virgo (in Schwarz) in den nächsten Jahren. Der gesamte Hintergrund für alle Paare von Schwarzen Löchern ist mit der durchgezogenen blauen Kurve dargestellt; der Hintergrund nur von nicht auflösbaren Signalen ist durch die gestrichelte blaue Kurve dargestellt. Der rosa-rot schraffierte Bereich zeigt die Unsicherheit der möglichen Signalstärken aufgrund der nur ungenau bekannten Verschmelzungsrate von Schwarzen Löchern, wie wir sie anhand von GW150914 bestimmt haben. Die drei schwarzen Kurven zeigen, wie sich die Empfindlichkeit der Korrelationsuche vom ersten Beobachtungslauf O1 bis zum geplanten fünften Beobachtungslauf O5 verbessern werden, wenn die beide Advanced-LIGO-Detektoren und der Advanced-Virgo-Detektor gleichzeitig Daten mit ihrer höchsten geplanten Empfindlichkeit aufnehmen. (Je niedriger eine dieser schwarzen Kurven ist, desto empfindlicher ist das Detektor-Netzwerk.) Wenn eine blaue Kurve eine schwarze Kurve schneidet, wie es für O5 (gestrichelte schwarze Kurve) der Fall ist, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, das korrelierte Gravitationswellenhintergrundsignal relativ zum Detektorrauschen zu messen.

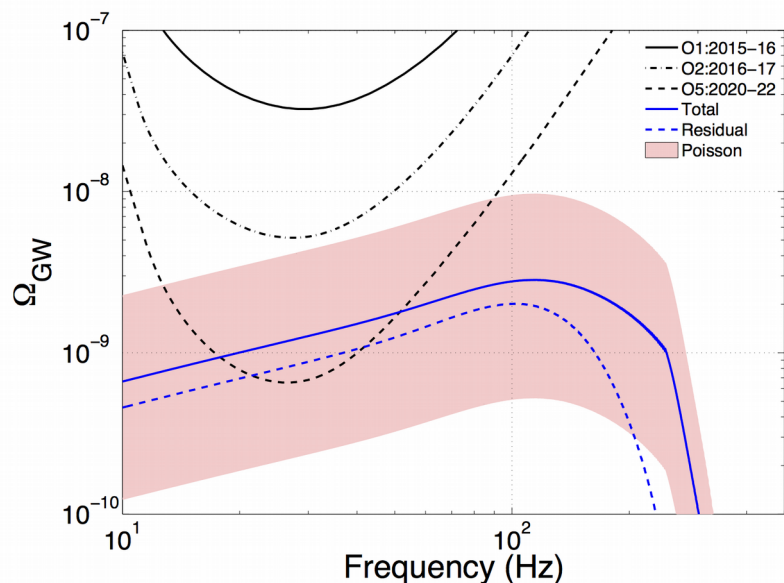
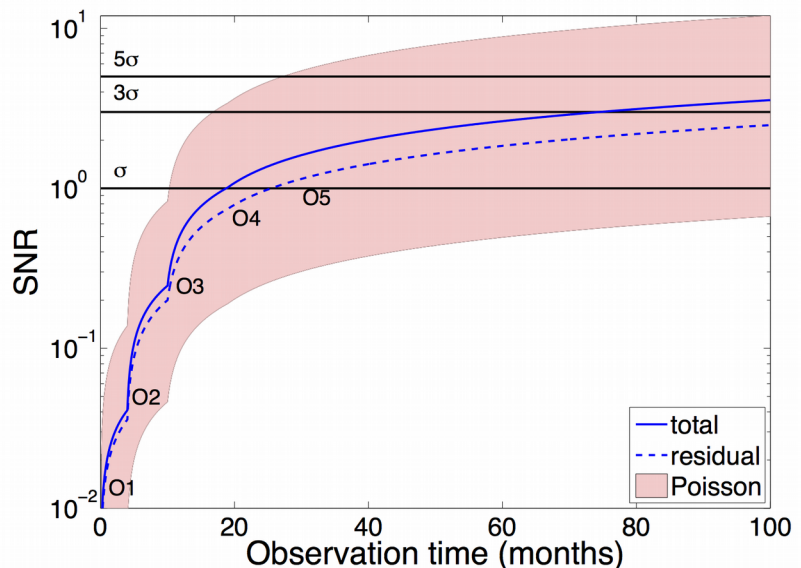
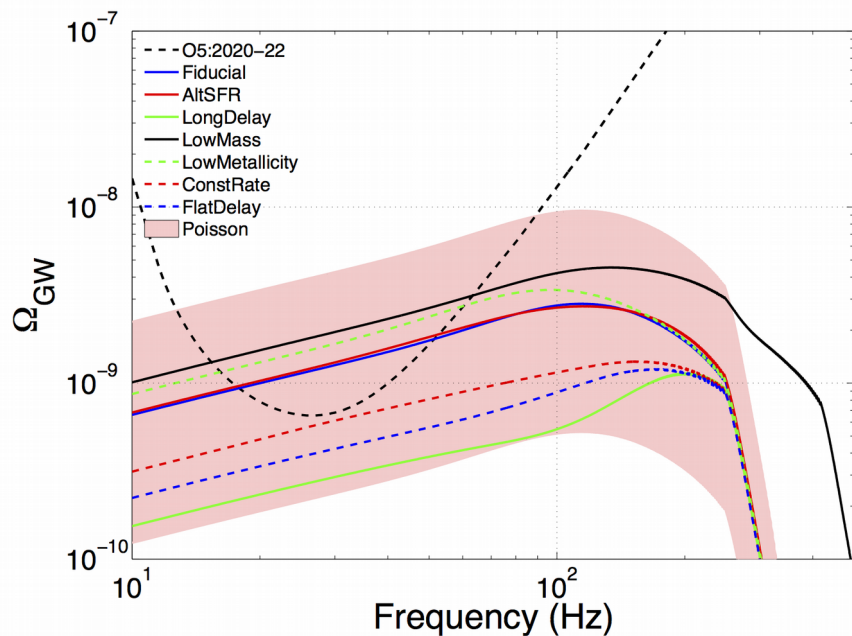


Abbildung 2: Die Stärke des korrelierten Gravitationswellensignals wird voraussichtlich im Laufe der Zeit relativ zum Detektorrauschen zunehmen; dies wird „Signal-zu-Rausch-Verhältnis“ oder SNR genannt. (Mehr Verschmelzungen zweier Schwarzer Löcher tragen zum korrelierten Signal bei, wenn über längere Zeit beobachtet wird.) Die blauen Kurven und der rosarote Bereich haben die gleiche Bedeutung wie



in Abbildung 1. Die Markierungen O1, O2, usw., geben die unterschiedlichen Beobachtungsläufe an. Die schwarzen horizontalen Linien entsprechen verschiedenen Werten der erwarteten SNR. Wir werden ziemlich sicher sein, dass wir den Gravitationswellenhintergrund beobachtet haben, wenn wir  $SNR=3$  messen. (Die Wahrscheinlichkeit, einen so großen SNR-Wert aus dem Rauschen allein zu erhalten, beträgt weniger als 0,3%). Für das Referenzmodell mit allen Doppelsystemen Schwarzer Löcher (die durchgezogene blaue Kurve) wird dies in ca. 6 Jahren (72 Monate) geschehen. Aber wenn wir Glück haben und die Rate am oberen Ende unserer aktuellen Schätzung liegt (entsprechend dem oberen Rand des rosa-roten Bereichs), dann können wir ein Niveau von  $SNR=3$  auch schon nach nur 1,5 Jahren bis 2 Jahren erreichen.

**Abbildung 3:** Wahrscheinlichkeit eines Nachweises des Gravitationswellenhintergrunds unter verschiedenen realistischen Modellen. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt die erwartete Empfindlichkeit des Advanced-LIGO-und-Virgo-Detektor-Netzwerks nach einigen Jahren der Datensammlung. Die durchgezogene schwarze Linie zeigt die Vorhersage des Referenzmodells und der schattierte rosa Bereich zeigt den Bereich der Vorhersage



aufgrund einer beträchtlichen Unsicherheit in unserer aktuellen Schätzung der Verschmelzungsrates. Die übrigen Linien zeigen eine Vielzahl von Modellen, die mit dem übereinstimmen, was wir über GW150914 wissen. Die meisten Modelle fallen in den schraffierten Bereich; dies bedeutet also, dass unsere Messungen auf die Unterschiede zwischen den Modellen nicht sehr empfindlich reagieren. Interessant ist auch, dass die gestrichelte schwarze Linie den schraffierten Bereich durchschneidet, es also eine Möglichkeit gibt, den Hintergrund mit den Advanced-LIGO- und Virgo-Detektoren nachzuweisen.