



LIGO  
Scientific  
Collaboration



# Überprüfung der Genauigkeit von Gravitationswellenmodellen für die erste Messung verschmelzender Schwarzer Löcher

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914NRSystematics/index.php>

Am 14. September 2015 beobachteten die LIGO- und Virgo-Kollaborationen mit den Advanced-LIGO-(aLIGO-)Detektoren zum ersten Mal Gravitationswellen von einem Paar zusammenstoßender Schwarzer Löcher. Die Beobachtung dieses beeindruckenden Ereignisses, genannt GW150914, markierte den Beginn einer völlig neuen Sichtweise auf und neuer Erkenntnisse über unser Universum. Mehr über diese Entdeckung und ihre Interpretation findet sich auf unseren übrigen „Science Summary“-Seiten. Hier betrachten wir unsere erste Analyse der Eigenschaften von GW150914 nochmals eingehend und untersuchen die Genauigkeit der verwendeten Gravitationswellen-Modelle, mit denen wir die Natur der Quelle bestimmen.

## Was verursachte die Gravitationswellen von GW150914?

Diese Gravitationswellen wurden von der Verschmelzung zwei umeinander kreisender Schwarzer Löcher, mit jeweils der rund 30-fachen Masse der Sonne, ausgestrahlt. Solche schweren Schwarzen Löcher bilden sich, wenn ein großer Stern nicht mehr gegen seine eigene Anziehungskraft anhalten kann und unter seinem eigenen Gewicht zu einem Schwarzen Loch kollabiert. Die Entfernung zu diesen Schwarzen Löchern wurde auf etwa eine Milliarde Lichtjahre geschätzt.

So wie sich die Erde um ihre eigene Achse dreht, während sie um die Sonne kreist, kann auch jedes der beiden Schwarzen Löcher um sich selbst rotieren, wenn sie einander umkreisen. Und ebenso wie die Rotationsachse der Erde relativ zur Ebene ihrer Umlaufbahn um die Sonne geneigt ist, können die Rotationsachsen der Schwarzen Löcher ebenfalls geneigt sein. Wir messen den Drehimpuls (Spin) von Schwarzen Löchern im Verhältnis zu seinem maximal zulässigen Wert. Ein Schwarzes Loch, das einen Spin-Wert von 1 hat, würde sich so schnell drehen, wie es die Gesetze von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie maximal erlauben. Ein Spin-Wert von 0,2 bedeutet, dass sich das Schwarze Loch mit nur 20% dieses Maximalwertes dreht. Die Richtungen der Drehimpulse der Schwarzen Löcher relativ zur Ebene, in der sie sich umkreisen, können zu interessanten Effekten in der Bewegung und bei den abgestrahlten Gravitationswellen führen. Die Umlaufbahn des Doppelsystems kann dabei wie ein schwankender Kreisel erscheinen; dies bewirkt, dass die ausgesandten Gravitationswellen moduliert werden. Hier gibt es mehr über den Drehimpuls von Schwarzen Löchern zu lesen.

Wir haben auch den Winkel gemessen, unter dem wir die beiden Schwarze Löcher sehen. Dieser Winkel könnte ein rechter Winkel sein, so dass wir direkt auf die Bahnebene schauen; in diesem Fall würde die Umlaufbahn uns als ein Kreis oder eine Ellipse erscheinen. Oder wir könnten die

Bahnebene von ihrer Seite sehen; in diesem Fall würde uns die Bahn sehr dünn, im Extremfall sogar nur als eine gerade Linie, erscheinen. Drittens könnte der Betrachtungswinkel irgendwo zwischen diesen beiden Extremfällen sein.

## Woher wissen wir das?

Zwei Schwarze Löcher werden durch eine Reihe von *Parametern* beschrieben, die beeinflussen, wie das Gravitationswellensignal aussieht, wenn es auf der Erde ankommt. Die Parameter, die einen Menschen beschreiben, sind z.B. das Gewicht und die Adresse; für Schwarze Löcher sind es ihre Massen, Drehimpulse (Spins), Lage und Orientierung. Sobald ein Gravitationswellensignal in den Daten identifiziert wird (weitere Informationen: siehe [hier](#) und [hier](#)), beginnen Supercomputer auf der ganzen Welt zu arbeiten, um zu bestimmen, was das entdeckte Signal erzeugt hat. Deshalb testen Supercomputer Millionen von Kombinationen von möglichen Massen, Rotationsraten und den Positionen der verschmelzenden Schwarzen Löcher. Für jede dieser Millionen von Kombinationen von Parametern wird das Gravitationswellensignal berechnet, das die Erde erreicht hätte. Durch eine systematische Auswertungen, welche Parameterkombinationen zu einer guten Übereinstimmung mit den gemessenen Daten führen, können wir verschiedene Aspekte der wahren Quelle ermitteln. Dieser gesamte Prozess wird als *Parameterschätzung* bezeichnet; mehr darüber ist [hier](#) zu erfahren.

## Was ist ein „Gravitationswellen-Modell“?

Modelle von Gravitationswellen kann man sich als ein Gerät mit einer Wählscheibe vorstellen, auf der man die Parameter der beiden Schwarzen Löcher auswählen kann. Sobald man sich für einen Satz von Parametern entschieden hat, kann man eine Taste drücken und die entsprechende Gravitationswellenform erscheint auf der Anzeige. Diese Wellenform ist eine Art Sinuskurve mit einer Frequenz (wie schnell die Welle schwingt) und Amplitude (Stärke der Welle), die beide mit der Zeit zunehmen, wenn sich die beiden Schwarzen Löcher einander immer mehr annähern, bis sie zu einem einzigen Schwarzen Loch verschmelzen. Dieses typische Wellenformmuster wird auch als „*Chirp*“ (Zwitschern) bezeichnet. Nach der Verschmelzung der beiden Schwarzen Löcher nimmt das Gravitationswellensignal sehr schnell ab, bis es vollständig erlöscht. Die von LIGO und Virgo tatsächlich verwendeten Gravitationswellen-Modelle sind ziemlich komplexe mathematische Beschreibungen, die in Computerprogrammen umgesetzt werden. Weitere Informationen zu Wellenformen finden sich auf Seite 6 [dieses LIGO-Magazins](#).

## Und, sind unsere Wellenform-Modelle gut genug?

### Welche Modelle haben wir benutzt?

Für einen gegebenen Satz von Parametern für zwei Schwarze Löcher ist die einzige völlig korrekte Methode, um die entsprechenden Gravitationswellenmuster zu berechnen, das mathematische Lösen von [Einsteins Feldgleichungen](#). Leider sind diese Gleichungen für so ein Doppelsystem sehr schwierig zu lösen. In der Praxis können die genauesten Wellenformen mit Simulationen der [Numerischen Relativitätstheorie](#) berechnet werden. Typischerweise erfordert bereits eine einzige numerische Wellenform eine großangelegte Supercomputer-Simulation, die mehrere Monate auf

hundertern von Rechenkernen läuft. Da die Erzeugung so lange dauert, wäre dieser Ansatz also viel zu langsam, um die Numerische Relativität an sich direkt als Gravitationswellen-Modell zu verwenden. Stattdessen greifen wir meistens auf vereinfachte Modelle zurück, die hochentwickelte Näherungen an die verfügbaren numerischen Simulationen verwenden.

### **Wie können wir unsere Modelle testen?**

In dieser Studie untersuchen wir, wie gut die angenäherten Wellenform-Modelle sind, und ob sie für Doppelsysteme mit ähnlichen Eigenschaften wie GW150914 die richtigen Antworten über die Parameter geben. Zur Beantwortung dieser Frage können wir wie folgt vorgehen: Anstatt die für GW150914 aufgezeichneten echten Daten zu analysieren, können wir ein simuliertes Signal betrachten, nämlich die Gravitationswellenform aus einer numerischen Relativitätstheorie-Simulation, die das echte Gravitationswellensignal mit ähnlichen Parametern nachahmt, und mit diesen Daten dann eine Parameterschätzung durchführen mit den Modellen. Damit sind wir in einer Situation, in der wir genau wissen, was die richtigen Parameter der simulierten Quelle sind, und können diese mit den Schätzungen aus den Modellen vergleichen. Dies verrät uns, wie gut unsere theoretischen Wellenform-Modelle darin sind, die wahren Parameter einer Quelle zu bestimmen.

Da unsere Wellenform-Modelle nur Näherungen sind, beschreiben sie nicht notwendigerweise alle physikalischen Aspekte korrekt. In unserer Analyse untersuchten wir verschiedene physikalische Effekte, die durch die Wellenform-Modelle nicht vollständig beschrieben werden: Wir untersuchten simulierte Signale von Doppelsystemen Schwarzer Löcher, die sich wie ein Kreisel bewegen (Präzession), von einem Doppelsystem mit exzentrischer Bahn (einer Ellipse ähnlicher als einem perfekten Kreis) und Gravitationswellensignale, in denen [Oberschwingungen](#) enthalten sind. Wir haben auch überprüft, wie gut die Modelle funktionieren, wenn wir direkt auf die Ebene der Umlaufbahn der Schwarzen Löcher blicken, oder wenn die Umlaufbahn mehr und mehr geneigt ist, so dass wir die Umlaufbahn von der Seite sehen, und die Schwarzen Löcher uns erscheinen als ob sie sich entlang einer geraden Linie hin und her bewegen.

### **Was wir gelernt haben.**

Auf diese Weise haben wir herausgefunden, dass unsere aktuellen Gravitationswellen-Modelle eine gute und hinreichend genaue Antwort auf die Frage nach den Parametern der Quelle von GW150914 geben. Die vollständigen Einzelheiten dieser Studie können [hier](#) abgerufen werden. Um sicherzustellen, dass unsere Modelle auch für zukünftige Gravitationswellen-Beobachtungen genau genug sind, müssen wir allerdings noch weiter an derartigen Studien arbeiten. Wir benötigen mehr Vergleiche mit Simulationen der Numerischen Relativitätstheorie, und müssen auch die Wellenform-Modelle weiterentwickeln, um diese genauer und komplexer zu machen.

## **Weiterführende Informationen über die numerische Relativitätstheorie:**

Einführungen in die Numerische Relativitätstheorie bieten folgende Artikel und Bücher:

- Lehrbücher: [Baumgarte und Shapiro](#) , [Alcubierre](#)
- Artikel in [Physics Today](#) (Baumgarte und Shapiro)
- Übersichtsartikel: [Sperhake 2015](#) und [Centrella et al 2007](#)

# Visualisierungen

Zwei Forschungsgruppen aus dem Bereich der Numerische Relativitätstheorien haben an dieser Studie teilgenommen. Sie haben außerdem die Dynamik und Gravitationswellen von GW150914-artigen Doppelsystemen Schwarzen Löchern anhand ihrer Simulationen visualisiert.

1. <https://youtu.be/Tb67tW2HgO0>

Dieser Film zeigt die numerische Simulation von zwei kollidierenden Schwarzen Löchern, ähnlich dem echten Gravitationswellenereignis GW150914, wie sie auch in der hier vorgestellten Studie verwendet wurde. Visualisierung mit freundlicher Genehmigung der Universität der Balearischen Inseln (Palma de Mallorca) und der Cardiff Universtiy.

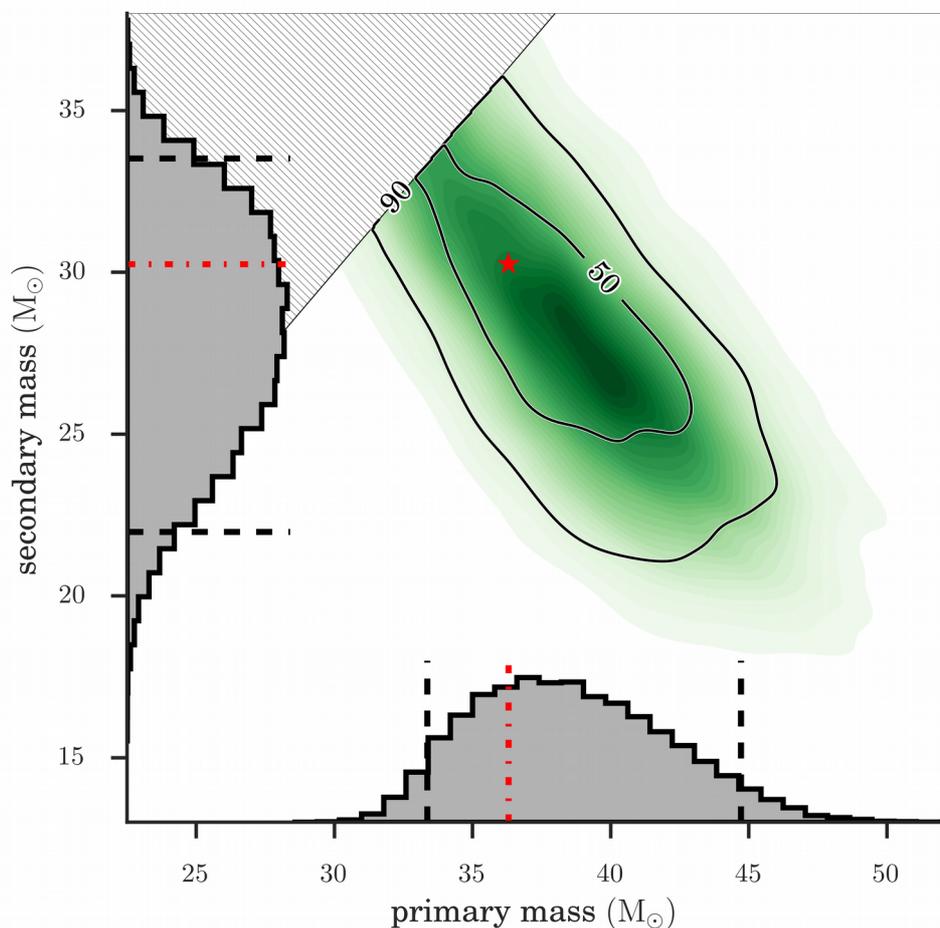
2. <https://youtu.be/c-2XIuNEgD0>

Dieser Film zeigt eine weitere numerische Simulation von zwei Schwarzen Löchern nach dem Vorbild des echten Ereignisses GW150914. Visualisierung mit freundlicher Genehmigung der SXS-Kollaboration.

## Abbildungen aus dem Fachartikel

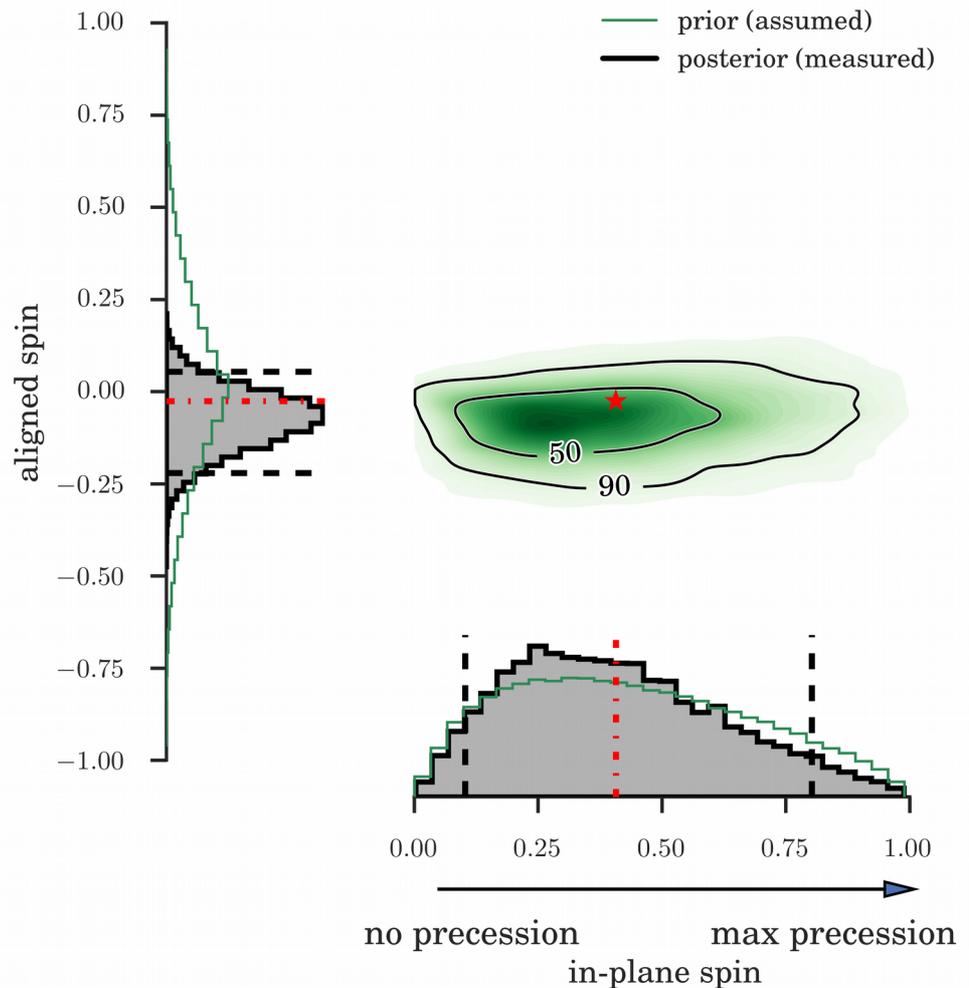
**Abbildung 1:** Diese Abbildung zeigt den Bereich von Massen der Schwarzen Löcher, in Einheiten der Masse unserer Sonne, die mit dem simulierten Signal aus der Numerischen Relativitätstheorie übereinstimmen.

Die Höhenlinienkarte rechts oben in der Abbildung zeigt die passenden Kombinationen von Massen der beiden Schwarzen Löcher (bezeichnet mit „primary“ und „secondary“). Regionen, in denen diese Karte dunkler ist,

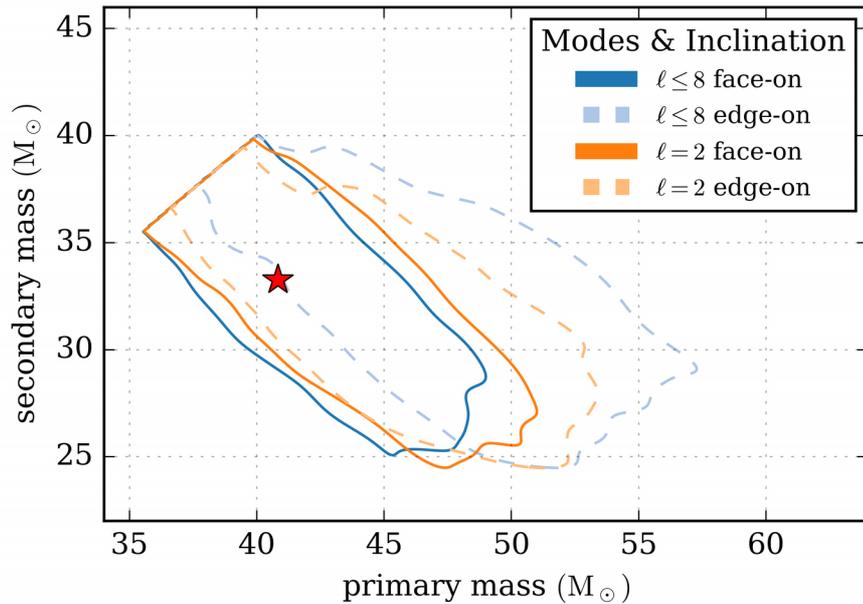


zeigen Massen-Kombinationen, die eine höhere Wahrscheinlichkeit aufweisen, korrekt zu sein. Die grauen „Hügel“ (genannt Histogramme) auf den beiden Achsen zeigen dagegen die relative Wahrscheinlichkeit, dass verschiedene Massen für jedes einzelne betrachtete Schwarze Loch korrekt sind. Wir messen eine 90%-ige Wahrscheinlichkeit, dass das simulierte Signal durch Schwarze Löcher mit Massen innerhalb der äußeren schwarzen Kontur, mit der Bezeichnung „90%“, erzeugt wurde. Die wahren Werte der Massen werden mit einem roten Stern in der Kontur-Darstellung und roten Linien in den Histogrammen angezeigt.

**Abbildung 2:** Dieses Bild zeigt die möglichen Drehimpulse der beiden Schwarzen Löcher, in Einheiten des maximal möglichen Drehimpulses, die mit dem simulierten Signal aus der Numerischen Relativitätstheorie übereinstimmen. Die wahren Werte der Drehimpulse werden durch einen roten Stern und rote Linien angedeutet – ähnlich wie in Darstellung 1.



**Abbildung 3:** Wie in Abbildung 1 zeigt dieses Bild, welche Kombinationen von Massen der beiden Schwarzen Löcher (in Einheiten der Sonnenmasse), mit dem simulierten Signal aus der Numerischen Relativitätstheorie übereinstimmen. Im Gegensatz zu Darstellung 1 zeigen wir hier Ergebnisse für Signale mit („ $l \leq 8$ “) oder ohne („ $l = 2$ “)



Oberschwingungen in der Wellenform. Die Quelle wird entweder „face-on“ (genau von oben auf die Bahnebene blickend) betrachtet, so dass wir die Umlaufbahn der beiden Schwarzen Löcher als Kreis sehen, oder „edge-on“ (genau von der Seite auf die Kante blickend), so dass die Umlaufbahn als eine Linie erscheint. Die wahren Massen sind mit einem roten Stern gekennzeichnet.

**Abbildung 4:** Wie in Abbildung 2 zeigt dieses Bild, welche Drehimpuls-Kombinationen für die beiden Schwarzen Löcher mit dem simulierten Signal aus der Numerischen Relativitätstheorie übereinstimmen. Wie in Abbildung 3 zeigen wir hier Ergebnisse für Signale mit („ $l \leq 8$ “) oder ohne („ $l = 2$ “) höhere Oberschwingungen. Wir stellen fest, dass falls das Binärsystem „edge-on“ betrachtet wird, die geschätzten Impulswerte weit von den wahren Werten entfernt sind, die mit dem roten Stern gekennzeichnet sind.

