



LIGO  
Scientific  
Collaboration



# Die erste Messung der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher und ihre Bedeutung

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914Astro/index.php>

## 1. Die Entdeckung von Gravitationswellen

Es dauerte nicht lange, bis die neuen [Advanced-LIGO](#)-Detektoren (aLIGO) die Astronomie und Astrophysik prägend beeinflussten. Die erste [Gravitationswellenquelle](#) GW150914 ([Originalveröffentlichung](#)), die durch die LIGO/Virgo Scientific Collaboration entdeckt wurde, kennzeichnet den Beginn einer neuen Epoche, in der wir auf ganz neue Weise Informationen über das Universum erwerben. Die Entdeckung von GW150914 ist bereits an sich eine beeindruckende Leistung, aber wirklich interessant wird es, wenn wir entschlüsseln, was die Daten uns alles lehren. Weitere Informationen über die Entdeckung von GW150914 bietet die [Zusammenfassung des Hauptartikels](#). Hier werden wir einige der ersten Lektionen zusammenfassen, die wir über GW150914 gelernt haben, und was diese für unser umfassenderes Verständnis der Astrophysik bedeuten.

## 2. Was verursachte die Gravitationswellen?

Sobald wir ein Gravitationswellensignal in den Daten identifiziert haben (mehr Details [hier](#) und [hier](#)) beginnen Supercomputer auf der ganzen Welt zu arbeiten, um die Ursache dieses entdeckten Signals herauszufinden. Wir tun dies, indem wir Millionen verschiedener Zahlen (*Parameter*) kombinieren, die ein Gravitationswellensignals beschreiben. Zum Vergleich: die Parameter, die eine Person beschreiben, sind Größe, Alter, Haar- und Augenfarbe, etc. Das Gravitationswellensignal von GW150914 kam aus zwei kompakten Objekten, die sich spiralförmig einander annäherten, bis sie miteinander verschmolzen. Die Parameter, die ein solches Ereignis beschreiben, beinhalten wie massiv die beiden Objekte sind, wie schnell sich jedes Objekt dreht, wo sie sich befinden, und wie sie - auf uns bezogen - ausgerichtet sind. Wenn wir sehen, welche Kombinationen dieser Parameter die Gravitationswellenform erzeugen, die am besten mit den Daten übereinstimmt, können wir so verschiedene Aspekte der wahren Quelle messen. Weitere Details über diese Parameterabschätzung von GW150914 finden sich [hier](#).

### 2a) Die Schwarzen Löcher von GW150914

Aus der Parameterschätzung wissen wir, dass GW150914 durch die Verschmelzung zweier „stellarer“ Schwarzer Löcher entstanden ist: den Überresten massiver Sterne. Die miteinander verschmolzenen Schwarzen Löcher hatten jeweils etwa 30 Sonnenmassen, und stellen hiermit die größten stellaren Schwarzen Löcher dar, die bisher beobachtet wurden. Stellare Schwarze Löcher bilden sich, wenn ein großer Stern in sich zusammenfällt, und möglicherweise eine [Supernova-](#)

Explosion auslöst. (Es gibt auch Schwarze Löcher, die millionenfach massereicher sind als die Schwarzen Löcher von GW150914 - sie entstehen im Zentrum von Galaxien - aber solche Objekte sind keine geeigneten Quellen für aLIGO.) Die in diesem Fall entdeckten Schwarzen Löcher befanden sich wahrscheinlich irgendwo über der Südhalbkugel der Erde, und die gemessene Entfernung beträgt ungefähr 1 Milliarde [Lichtjahre](#). Verschmelzungen von Schwarzen Löchern sind unglaublich energiereiche Ereignisse. Wenn die gesamte Energie, die durch die Verschmelzung freigesetzt wird, uns als sichtbares Licht erschiene, hätte sie für kurze Zeit den Vollmond überstrahlt, obwohl die Quelle eine Milliarde Lichtjahre entfernt war.

## **2b) Stellare Schwarze Löcher**

Bis zur Entdeckung von GW150914 wurden stellare Schwarze Löcher üblicherweise mittels der Beobachtung von [Röntgendoppelsternen](#) (aus dem Englischen als XRBs abgekürzt) untersucht. Bei einem Röntgendoppelstern fließt Material von einem weniger kompakten Stern in einen kompakteren Nachbarstern (oder in ein Schwarzes Loch), und hierbei werden Röntgenstrahlen abgestrahlt. Gegenwärtig gibt es 22 bekannte XRBs, die Schwarze Löcher beinhalten, deren Masse mittels optischen Lichts gemessen wurde. Die meisten haben Massen zwischen 5 und 10 Sonnenmassen, einige wenige auch bis zu 20 Sonnenmassen. Alle bis auf drei dieser XRBs wurden in unserer eigenen Galaxie gefunden. Die Schwarzen Löcher von GW150914 sind damit die klaren Rekordhalter sowohl bezüglich der Masse als auch der Entfernung zur Erde. Die relativ großen Massen der Schwarzen Löcher in GW150914 haben interessante Konsequenzen für unser Verständnis der Entstehung von Schwarzen Löchern.

Die Entstehung von Schwarzen Löchern aus zusammenbrechenden Sternen ist ein sehr komplexer physikalischer Prozess, und es gibt viele unbekannte Details, die das Endergebnis beeinflussen können: u.a. die Masse des Sterns bevor es zusammenbricht, wie schnell er rotiert, und Details des Ablaufs einer Supernova-Explosion. Das wichtigste Merkmal für die Vorhersage der Masse des verbleibenden Schwarzen Loches ist die „Metallizität“ des Sterns. Astronomen bezeichnen als Metallizität den Anteil eines Sterns nicht nur aus „Metallen“ im üblichen Sinne, sondern aus allen chemischen Elementen schwerer als Wasserstoff (H) oder Helium (He). Solche schwereren Elemente werden im Innern eines Sternes, oder während Supernova-Explosionen, gebildet. Ebenso wie die Masse von Objekten typischerweise mit der Masse der Sonne verglichen wird, wird die Metallizität von Sternen mit der Metallizität der Sonne verglichen. Um solch massive Schwarze Löcher zu bilden, wie jene von GW150914, müssen die Sterne, die die Schwarzen Löcher gebildet haben, maximal die Hälfte der Metallizität der Sonne besessen haben, vielleicht sogar nur ein Viertel. Messungen wie diese werden uns in Zukunft helfen, mehr über die Prozesse zu erfahren, mit denen Sterne während ihrer kosmischen Lebensdauer H und He in schwerere Elemente umwandeln.

## **2c) Wie Paare von Schwarzen Löchern entstehen**

Während die Massen des GW150914-Systems uns bereits Auskunft über die Entstehung von einzelnen Schwarzen Löchern geben, bleibt die Frage, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass zwei solcher Objekte miteinander verschmelzen. Die meisten massereichen Sterne sind Teil eines Doppelsystems (Binärsystems), und die meisten theoretischen Vorhersagen sagen seit langem die Existenz von Doppelsystemen Schwarzer Löcher voraus, obwohl bisher noch keines beobachtet wurde. Die Beobachtung von GW150914 bestätigt nicht nur, dass Doppelsysteme Schwarze Löcher

existieren, sondern auch, dass sie nahe genug beieinander entstehen, damit sie schließlich verschmelzen und Gravitationswellensignale erzeugen können, wie wir sie nun entdeckt haben. Es gibt zwei Möglichkeiten für die Entstehung eines Doppelsystems Schwarzer Löcher: Entweder ein Paar sich gegenseitig umkreisender Sterne, die in zwei Supernovae vergehen, die zwei Schwarze Löcher hinterlassen, die letztendlich miteinander verschmelzen. Oder zwei voneinander getrennt entstandene Schwarze Löcher in einem sehr dichten Sternhaufen, die zufällig nahe aneinander geraten und dann verschmelzen. Der ausschlaggebende beobachtbare Unterschied zwischen den beiden Möglichkeiten ist der Eigendrehimpuls („Spin“) der Schwarzen Löcher, den wir ebenfalls anhand des Gravitationswellensignals messen können.

## 2d) Eigendrehung von Schwarzen Löchern

So wie sich die Erde um ihre Achse dreht, während sie die Sonne umkreist, drehen sich möglicherweise auch Schwarze Löcher um sich selbst, während sie einander in einem Binärsystem umkreisen. Und genau wie die Erde in ihrer Umlaufbahn relativ zur Sonne geneigt ist, kann auch die Drehung Schwarzer Löcher gegenüber der Bahnebene geneigt sein. Wie schnell sich die einzelnen Schwarzen Löcher drehen, während sie einander umkreisen, und wie sie zueinander zueinander geneigt sind, ist eines der ersten Dinge, die wir über GW150914 erfahren wollten.

Die Erde dreht sich einmal pro Tag, während sie um die Sonne kreist. Schwarze Löcher können sich im Prinzip viel schneller drehen, aber auch nur bis zu einem gewissen Grad. Nach Einsteins [Allgemeiner Relativitätstheorie](#) gibt es einen maximalen Wert, mit dem sich ein Schwarzes Loch drehen kann. Der entsprechende maximale Drehimpuls eines Schwarzen Lochs hängt von seiner Masse ab. Wir messen den auf die Masse bezogenen „Spin“ Schwarzer Löcher *relativ* zum maximal zulässigen Wert. Ein Schwarzes Loch mit einem Spin von 1 dreht sich somit so schnell, wie es die physikalischen Gesetze maximal erlauben, während ein Drehimpuls von 0,2 bedeutet, dass sich das Schwarze Loch mit 20% des Maximalwertes dreht.

Wir sind auch sehr daran interessiert, in welche Richtung sich Schwarze Löcher drehen. Dies kann mit der „Rechte-Hand-Regel“ veranschaulicht werden: Wenn der abgespreizte Daumen in Richtung des geographischen Nordpols zeigt und man die übrigen Finger krümmt, entspricht deren Krümmung dem Äquator in Richtung der Erdrotation. Das gleiche könnte man für jedes der sich drehenden Schwarzen Löcher tun. Wir werden diese Richtungen „S1“ und „S2“ nennen – eine Richtung für jedes Schwarzes Loch. Wenn sich nun die Finger in die Richtung krümmen, in der sich die Schwarzen Löcher umkreisen, zeigt der abgespreizte Daumen in die *Orbitalrichtung*, welche wir mit „L“ bezeichnen. Wenn S1 und S2 in andere Richtungen zeigen als L, ähnelt die Umlaufbahn einer *Präzession* (wie ein schwankender Kreisel), sodass L sich hin und herbewegt, während die Schwarzen Löcher sich einander annähern. Nur wenn S1 und S2 in die gleiche Richtung wie L zeigen (oder genau entgegengesetzt zu L), bleibt die Umlaufbahn stabil.

Ob wir die Orbital-Präzession messen können oder nicht, ist ein wichtiger Hinweis darauf, wie sich die Schwarzen Löcher überhaupt gebildet haben. Wenn es keine Präzession gibt, ist es wahrscheinlicher, dass die Schwarzen Löcher zusammen entstanden sind. Wenn es viel Präzession gibt, ist es wahrscheinlicher, dass die Schwarzen Löcher sich getrennt gebildet haben, bevor sie zufällig aufeinander trafen. Für GW150914 konnten wir nicht definitiv sagen, wie groß oder klein die einzelnen Drehimpulse (Spins) waren, oder ob sie eine Präzession der Umlaufbahn verursachen. Wir können jedoch sagen, dass der *Gesamtdrehimpuls* (S1+S2) wahrscheinlich klein war. Die

Drehimpulsmessung für GW150914 legt daher nahe, dass die einzelnen Drehimpulse entweder beide klein waren, oder entgegengesetzt zueinander, in welchem Fall sie ihre Wirkung gegenseitig aufgehoben hätten. Wenn aLIGO weitere Verschmelzungen von Schwarzen Löchern entdeckt, werden wir sorgfältig nach Anzeichen von Präzession Ausschau halten, um herauszufinden, wie sich Doppelsysteme Schwarzer Löcher in der Natur typischerweise bilden.

### **3. Wie viele weitere Entdeckungen können wir erwarten?**

Gleich nach der Entdeckung von GW150914 begannen wir zu berechnen, wie wahrscheinlich es wäre, dass wir während des ersten Beobachtungslaufs (O1) von aLIGO noch weitere Signale finden würden. Die Wahrscheinlichkeit weiterer Entdeckungen vorherzusagen, gibt uns nicht nur etwas, auf das wir uns freuen können, sondern es ist auch eine Größe, die Auswirkungen auf unser Verständnis hat, wie es zum Verschmelzen von Schwarzen Löchern in der Natur kommt. Die Zahl, die wir berechnen wollen, ist die *Rate* von Verschmelzungen zweier Schwarzer Löcher, wie GW150914, im Universum. Unsere Berechnung dieser Rate wird [hier](#) im Detail beschrieben. Es gibt zwei ausschlaggebende Kriterien zur Berechnung der Rate: Die Anzahl der von uns bisher entdeckten Signale und die Empfindlichkeit unserer Detektoren. Wir messen die Empfindlichkeit als das Volumen des Universums, in dem wir eine Verschmelzung von Schwarzen Löchern hätten messen können, multipliziert mit der Beobachtungszeit. Wir nennen diese Menge das „Raum-Zeit-Volumen.“ Der Zeitraum der bisher analysierten Daten entspricht 16 Tagen, obwohl diese über den ersten Monat von O1 verteilt sind, weil die Detektoren nicht ständig laufen und beide gleichzeitig arbeiten müssen, um Gravitationswellen verlässlich nachweisen zu können. Sobald wir die Rate der Verschmelzung von Schwarzen Löchern berechnen haben, können wir die Zahl und unsere Erwartungen für die Empfindlichkeit von aLIGO während der nächsten Beobachtungsläufe (O2 und O3) verwenden, um Vorhersagen über die Anzahl von zukünftig zu beobachtenden Verschmelzungen zu treffen. Mehr über zukünftige Beobachtungskampagnen von aLIGO findet sich [hier](#).

#### **3a) Wie man verschmelzende Schwarze Löcher zählt**

Während GW150914 das einzige Ereignis während der ersten 16 Tagen von O1 war, dass wir als gesicherte „Entdeckung“ bezeichnen, war es nicht das einzige interessante Signal, das wir bisher untersucht haben. Ein weiterer Kandidat für eine Gravitationswelle, LVT151012, wurde in den Daten mit einer relativ hohen Fehlalarmwahrscheinlichkeit von ca. 2% gemessen. Er hat unsere Aufmerksamkeit bekommen, aber ist nicht solide genug, um als Entdeckung deklariert zu werden. LIGO/Virgo-Entdeckungen werden mit „GW“, gefolgt vom Datum im JJMMTT-Format nummeriert. LIGO/Virgo-Kandidaten beginnen mit einem „LVT“ für „LIGO/Virgo Trigger“, gefolgt vom Datum. LVT151012 ist also ein interessanter Kandidat, aber nicht signifikant genug, um mit einem „GW“ ausgezeichnet zu werden. Wir haben einige noch weniger bedeutende Ereignisse in den Daten ausgemacht, die meisten davon wahrscheinlich nur von Störungen an den Detektoren stammend, die alle mit geringer Gewichtung in die gemessene Gesamtzahl der möglichen Schwarzen Löcher eingehen.

#### **3b) Messung der Empfindlichkeit von aLIGO**

Um zu messen, wie empfindlich aLIGO in Bezug auf Signale von verschmelzendem Schwarzen

Löchern ist, analysieren wir Daten, in denen wir simulierte Gravitationswellensignale hinzugefügt haben, um zu sehen, wie weit die Quellen entfernt sein können, damit wir sie noch nachweisen könnten. Dies ist eine schwierige Angelegenheit, da die Gesamtmasse eines verschmelzenden Systems die maximale Entfernung bestimmt, für die wir es noch nachweisen können. Mit nur einem oder zwei beobachteten Signalen haben wir noch immer sehr wenige Richtwerte für die Vielfalt der möglichen Massenkombinationen. Um auf Nummer sicher zu gehen, probieren wir mehrere verschiedene Annahmen für unterschiedliche *Populationen* von verschmelzenden Schwarzen Löchern aus und kombinieren die Resultate in der Hoffnung, dass die Wahrheit irgendwo innerhalb des Bereichs liegt, den wir mit diesen Annahmen abdecken. Durch Kombination der typischen Entfernungen, aus denen aLIGO Signale nachweisen kann, mit der Zeit, die wir beobachtet haben, können wir das Raum-Zeit-Volumen der Beobachtungskampagne bestimmen. Mit der Anzahl der Entdeckungen Schwarzer Löcher und dem untersuchten Raum-Zeit-Volumen schätzen wir, dass **Gravitationswellen aus Verschmelzungen von Schwarzen Löchern - irgendwo im Universum - einmal alle 15 Minuten auf die Erde treffen!**

### 3c) Ein Blick in die Zukunft

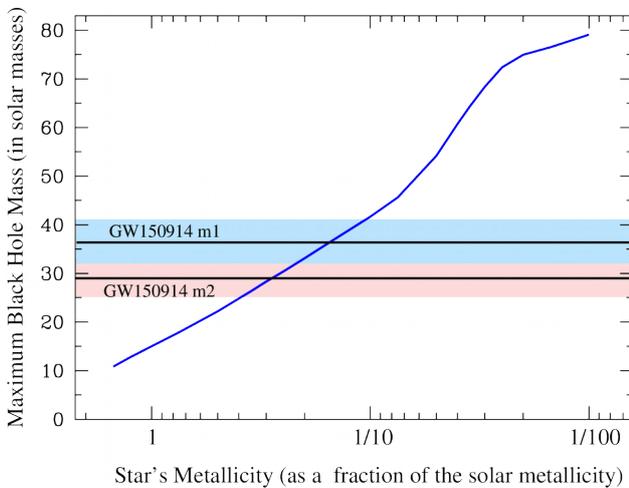
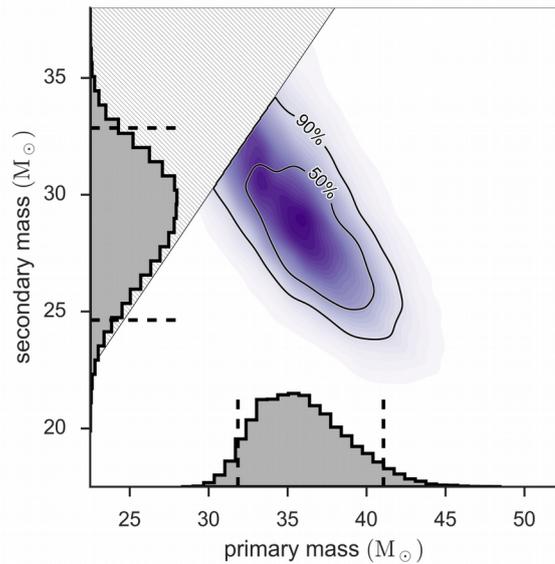
Mit der gezählten Anzahl von Verschmelzungen Schwarzer Löcher in den Daten, und der Empfindlichkeit von aLIGO bezüglich der produzierten Gravitationswellen, können wir also wie beschrieben die Rate der Verschmelzungen Schwarzer Löcher im Universum berechnen. Die von uns geschätzte Rate kann dann mit der erwarteten Empfindlichkeit der nächsten aLIGO-Beobachtungskampagnen kombiniert werden, um einen Einblick zu geben, auf wie viele Entdeckungen wir uns freuen können. Die Antwort ist sehr aufregend! Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Anzahl der erwarteten Entdeckungen sowie die Wahrscheinlichkeit, mehr als eine bestimmte Anzahl von Entdeckungen zu finden, wenn wir das von aLIGO untersuchte Raum-Zeit-Volumen nach und nach erhöhen. Das Raum-Zeit-Volumen der verschiedenen Beobachtungsläufe ist in den Darstellungen markiert. Die Vorhersagen sind noch sehr unsicher, weil (a) mit nur wenigen Entdeckungen die genaue Rate nicht präzise festgelegt werden kann und (b) die Empfindlichkeit zukünftiger Beobachtungsläufe davon abhängen wird, wie gut die geplanten Nachrüstungen der Observatorien in der Praxis verlaufen. Unter Berücksichtigung dieser Möglichkeiten **erwarten wir zwischen 3 und 90 sichere Entdeckungen verschmelzender Schwarzer Löcher** während des nächsten Beobachtungslaufs (O2) **und eine fast 100%-ige Chance, mindestens ein Signal aufzuzeichnen**. Wenn wir mehr Gravitationswellensignale entdecken, werden wir neuere und genauere Hinweise über die Anzahl von Doppelsystemen Schwarzer Löcher im Universum erfahren. Die Entdeckung von GW150914 ist nur ein Schritt in eine neue Ära der Astronomie und Astrophysik, und viele weitere spannende Entdeckungen warten auf uns.

## Weiterführende Informationen:

- [Fachartikel zur Parameterschätzung von GW150914](#)
- [Fachartikel zur astrophysikalischen Interpretation von GW150914](#)
- [Fachartikel zur Abschätzung von Verschmelzungsraten Schwarzer Löcher](#)
- [Allgemeiner Fachartikel zur Entdeckung von GW150914](#)

# Abbildungen aus den Fachartikeln:

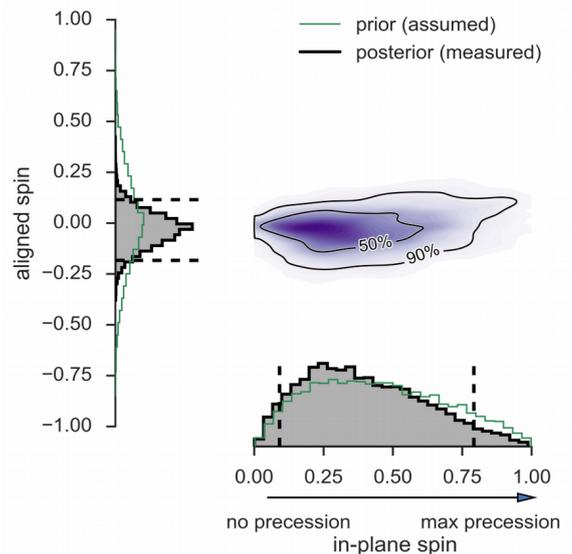
**Abbildung 1:** Dieses Bild zeigt die mit den Daten übereinstimmenden Kombinationen der Einzelmassen für die zwei Schwarzen Löcher, in Sonnenmassen. Dunklere Bereiche haben dabei eine höhere Wahrscheinlichkeit, korrekt zu sein. Wir messen eine 90%ige Wahrscheinlichkeit, dass das Quellsystem von GW150914 Massen hatte, die innerhalb der schwarzen Kontur (mit der Bezeichnung „90%“) liegen.

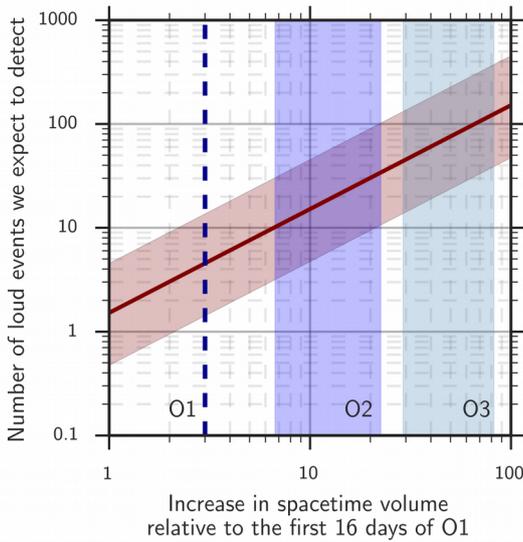


**Abbildung 2:** Die maximal erlaubte Masse der Schwarzen Löcher als Funktion der Metallizität der Vorgängersterne. Die für GW150914 ermittelten Massen erfordern Metallizitäten deutlich unter dem Wert der Sonne (1 in dieser Darstellung).

Angepasste Darstellung aus folgender Quelle: Belczynski et al. 2010 ApJ, 714, 1217.

**Abbildung 3:** Dieses Bild zeigt die Kombinationen des Eigendrehimpulses (Spins) der Schwarzen Löcher, die mit den Daten übereinstimmen, in Einheiten des maximal möglichen Drehimpulses.





**Abbildung 4:** Das rotbraune Band zeigt den Bereich der möglichen Anzahl von „lauten“ Gravitationswellensignalen, die wir erwarten, wenn wir das Raum-Zeit-Volumen in zukünftigen Beobachtungskampagnen erhöhen. Die vertikalen Bänder zeigen Vorhersagen für das beobachtete Raum-Zeit-Volumen (im Vergleich zu den ersten 16 Tagen von O1) für die nächsten beiden Beobachtungsläufe O2 und O3.

**Abbildung 5:** Unterschiedliche farbige Linien zeigen die prozentualen Entdeckungswahrscheinlichkeiten für mehr als 0, 10, 35 und 70 Signale von verschmelzenden Schwarzen Löchern, wenn wir das beobachtete Raum-Zeit-Volumen wie in Abb. 4 laufend erhöhen. Die vertikale gestrichelte Linie zeigt das erwartete Raum-Zeit-Volumen für das Ende des ersten Beobachtungslaufs O1 (relativ zu den ersten 16 Tagen). Die vertikalen Bänder zeigen die Vorhersagen für das Raum-Zeit-Volumen, die wir bis zum Ende der nächsten 2 Beobachtungsläufe O2 und O3 erwarten.

