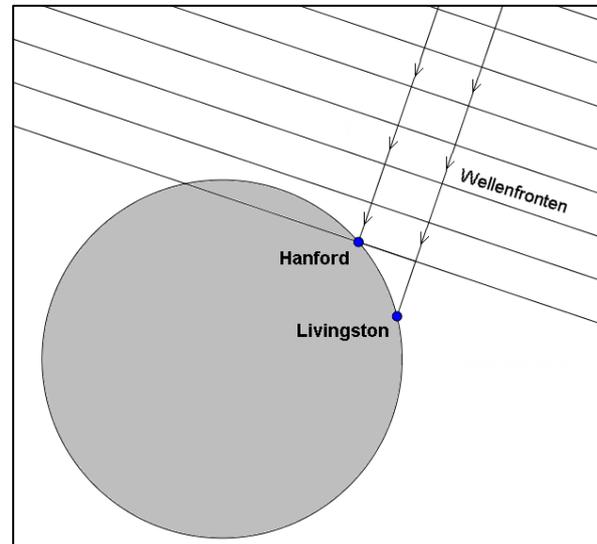


Arbeitsblatt 4:

Wo war die Quelle?

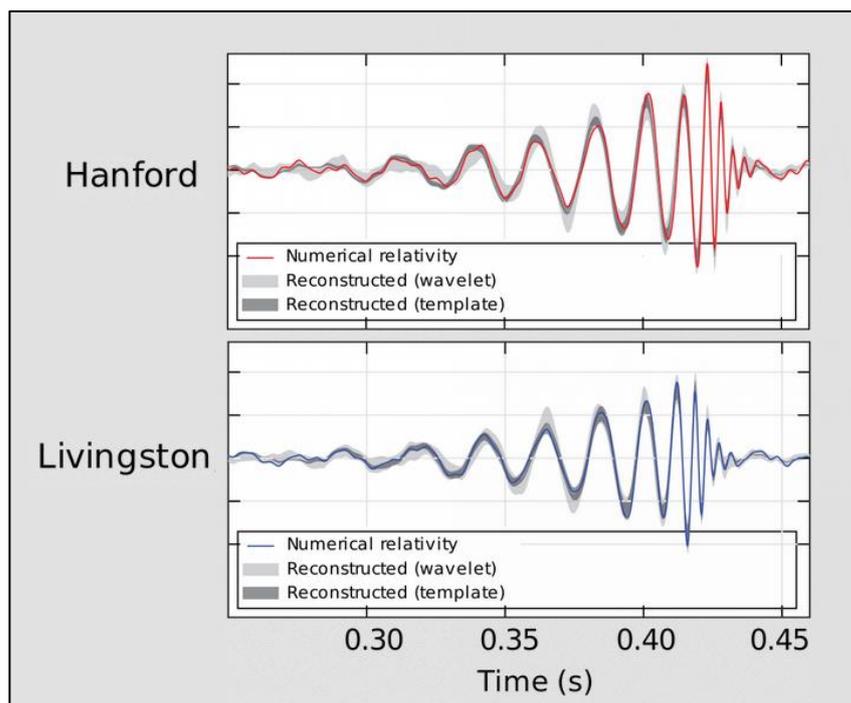
Die gegenseitige Umkreisung und anschließende Verschmelzung der beiden Schwarzen Löcher in einer Entfernung von etwa 1,3 Milliarden Lichtjahren war im elektromagnetischen Wellenbereich von der Erde aus völlig unsichtbar. Dennoch konnte eine grobe Lokalisierung der Quelle vorgenommen werden. Voraussetzung dafür war, dass das Signal von zwei weit auseinander liegenden Interferometern aufgezeichnet werden konnte.



Bildquelle: M. Borchardt

Die Abbildung zeigt, dass die Fronten der Gravitationswellen so auf die Erde treffen, dass sie zunächst auf das Interferometer in Hanford treffen und erst mit einer Zeitverzögerung im 3000 km weit entfernten Detektor der Livingston-Anlage (im Süden der USA) registriert werden. Aus diesem Zeitintervall lässt sich der Winkel, unter dem die Wellen auf die Erde auftreffen, berechnen.

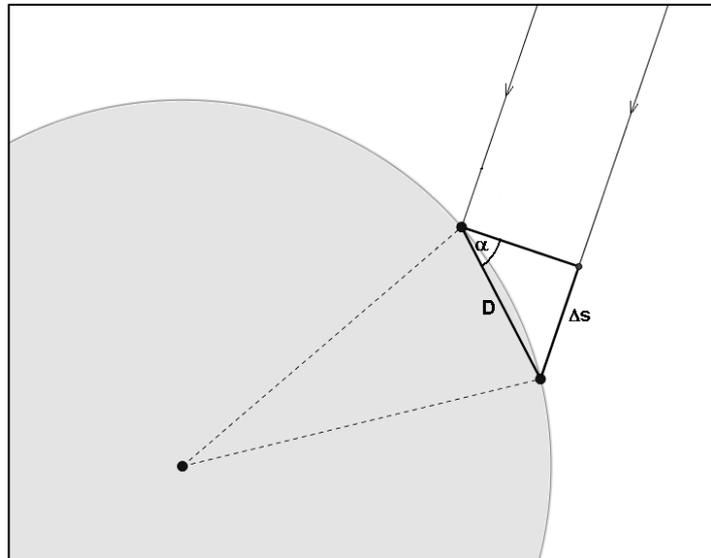
- a) Wenn Sie sich die Aufzeichnungen der Gravitationswellen in Hanford und Livingston anschauen, werden Sie feststellen, dass das Signal in Livingston zeitverzögert ankommt. Schätzen Sie, wie groß das Zeitintervall Δt ist.



Bildquelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LIGO_measurement_of_gravitational_waves.svg

b) Eine genaue Analyse hat einen Wert von $\Delta t = 6,9 \text{ ms}$ ergeben. Berechnen Sie den Gangunterschied Δs der Wellenfronten unter der Annahme, dass sich diese mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiteten.

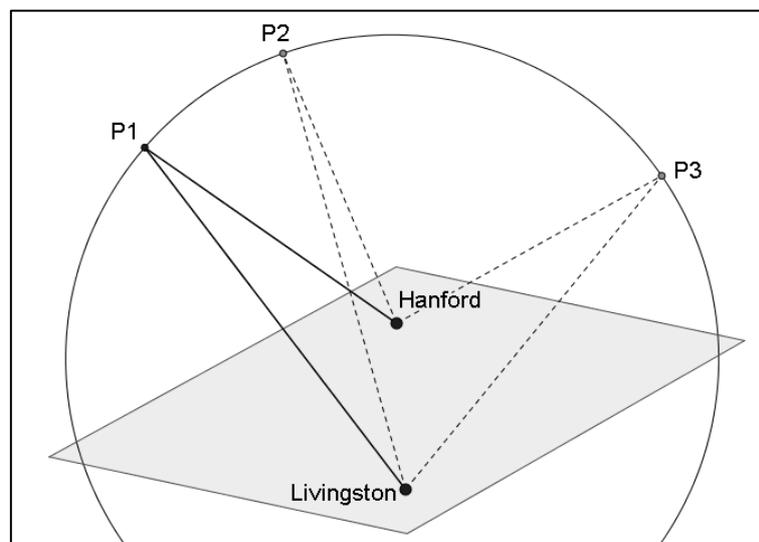
c) Der Abstand D der beiden Interferometer beträgt ziemlich genau 3000 km. Berechnen Sie mithilfe der Abbildung den Winkel α .



Bildquelle: M. Borchardt

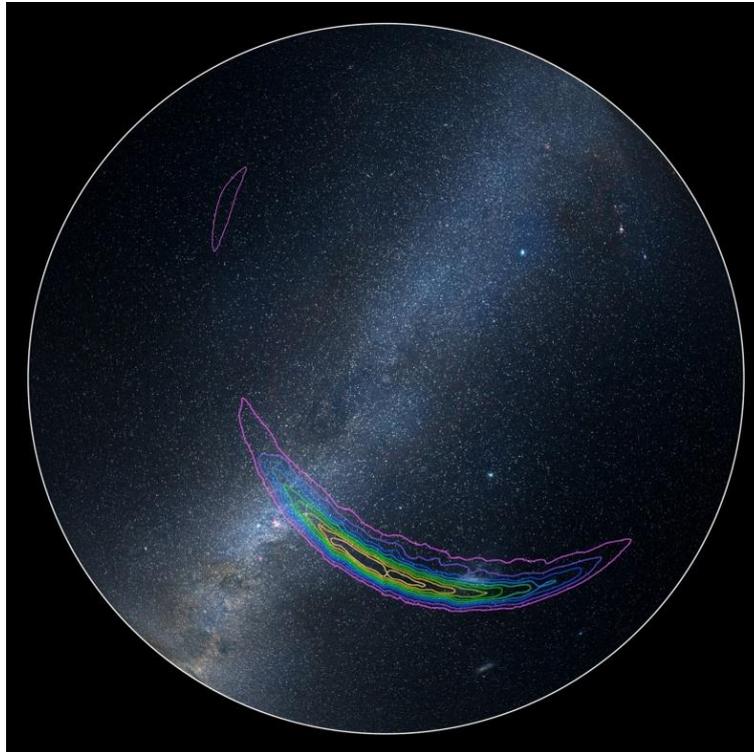
Anmerkung:

Wie die untere Darstellung zeigt, reicht der Winkel α allein nicht aus, um die Position der Quelle anzugeben. Man erhält einen kreis- oder bandförmigen Bereich am Himmel, von dem das Signal stammen könnte. Erst mit einem dritten Detektor ist es möglich, den Ort der Quelle stärker einzugrenzen. Die VIRGO-Anlage in Italien ist vor kurzem als drittes Interferometer vergleichbarer Größe in Betrieb genommen worden und konnte bei der jüngst entdeckten Gravitationsquelle GW170814 tatsächlich zu einer recht genauen Positionsbestimmung beitragen.



Bildquelle: M. Borchardt

Bei dem ersten Gravitationswellenereignis 2015 war eine Lokalisierung der Quelle mit nur zwei Interferometern noch ungenau, wie die untere Abbildung zeigt.



Lokalisierung der Quelle am Himmel

Bildquelle: <https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20160211b>

Weitere interessante Aspekte

Die Empfindlichkeit von interferometrischen Gravitationswellendetektoren hängt davon ab

1. aus welcher Richtung die Gravitationswellen auf den Detektor treffen sowie
2. von der Orientierung der Detektoren relativ zur Polarisation der Gravitationswelle.

Zu 1.:

Gravitationswellen, die von oberhalb oder unterhalb der Ebene der Detektorarme kommen, werden von der Anlage am besten „gesehen“, da die Stauchung und Streckung der Arme relativ zueinander am größten ist. Das Interferometer wird deutlich unempfindlicher, wenn die Wellen von der Seite kommen, die Ausbreitungsrichtung also in der Detektorebene liegt.

Außerdem gibt es vier blinde Flecken der Anlage: Wellen, die entlang der Winkelhalbierenden der L-förmigen Anordnung kommen, sind komplett unsichtbar, da sie beide

Detektorarme in gleichem Maße zur gleichen Zeit strecken oder stauchen und keine relative Verschiebung der Lichtwellen zueinander entsteht¹.

(Im Erklärvideo ist übrigens die Darstellung des Eintreffens der Gravitationswellen auf das Interferometer ungünstig gewählt, denn die Wellen scheinen aus Richtung einer Winkelhalbierenden zu kommen.)

Zu 2.:

Gravitationswellen sind polarisiert, das heißt sie strecken und stauchen die Raumzeit in zwei senkrecht zueinanderstehenden Richtungen. Diese sind zeitlich stabil. Wenn die Welle nun von oberhalb (oder unterhalb) der Ebene der Arme kommt und die Amplitudenrichtung der Welle genau in Richtung der Winkelhalbierenden der beiden Detektorarme zeigt, werden die Arme gleichermaßen verkürzt oder verlängert und eine Verschiebung der Lichtwellen zueinander entfällt.

Das dritte große Laser-Interferometer VIRGO in Norditalien ist daher bewusst so orientiert worden, dass es in einem Winkel von ca. 45° zu den beiden LIGO-Brüdern steht. Mit den drei Anlagen zusammen sollten daher in Zukunft auch Informationen über die Polarisationsrichtung von Gravitationswellen möglich sein.

¹ <https://www.ligo.org/science/Publication-GW170814/translations/science-summary-german.pdf>