

Die physikalischen Hintergründe von Schwarzen Löchern

A. Was sind Schwarze Löcher und wie können sie entstehen?

Im Universum sind im Laufe von Milliarden Jahren Sterne, Galaxien und ganze Galaxienhaufen entstanden – über einhundert Milliarden, die ihrerseits aus Abermillionen von Sternen bestehen, strahlen heute in einem Kosmos, der eine Größe von mehr als 10^{23} km überschritten hat.

1. Die Entwicklung zu unterschiedlichen Sterntypen und deren weiteren Verlauf in ihrem Lebenszyklus zeigen die **Abb. 1 a und b**.

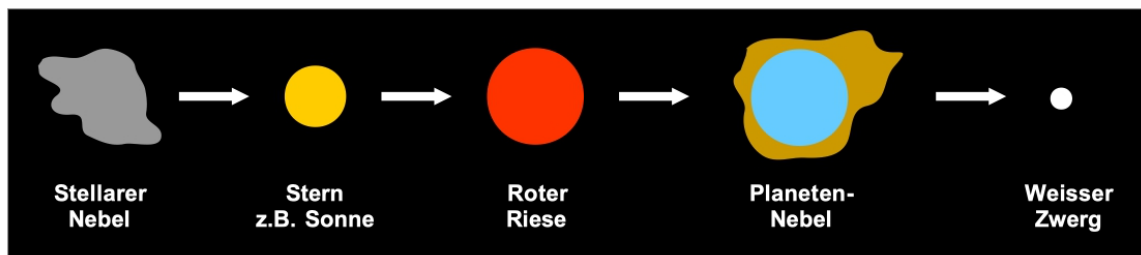


Abb. 1 a: Lebenszyklus eines kleineren Sterns (zum Beispiel Sonne) Quelle: W. Vogg

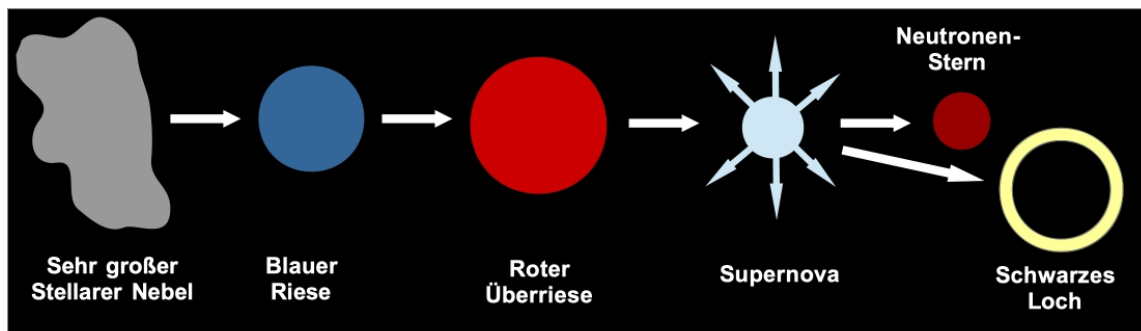


Abb. 1 b: Lebenszyklus eines Riesensterns. Quelle: W. Vogg

- a) Beschreiben und erläutern Sie den jeweiligen Lebenszyklus eines Sterns
 α) von einem kleinen stellaren Nebel zum weißen Zwerg (Abb. 1 a)
 β) von einem vielfach größeren stellaren Nebel bis zur Supernova (Abb. 1 b).
- b) Begründen Sie, warum aus einer Supernova ein Neutronenstern und unter bestimmten Bedingungen daraus ein schwarzes Loch entstehen kann.

Hinweis: Recherchieren Sie dazu in geeigneten Fachbüchern und/oder im Internet!

B. Wie kann man sich den Aufbau Schwarzer Löcher vorstellen?

Mit dem Begriff „**Schwarzes Loch**“ beschreibt man gigantische Massenzusammenquetschungen im Universum, die durch ihr Gravitationsfeld das so bezeichnete *Raum-Zeit-Gefüge* um sich herum so verzerren, dass weder Materie noch Licht aus diesem Gebiet nach außen gelangen können – somit sind diese Objekte auch nicht sichtbar!

Die im Jahr 1915 von **Albert Einstein** (1879-1955) veröffentlichte *Allgemeine Relativitätstheorie (ART)* besagt, dass massereiche Objekte durch ihr Gravitationsfeld die sie umschließende **Raumzeit** krümmen. Eindeutig belegt werden konnte Einsteins Vorhersage bei einer totalen Sonnenfinsternis im Jahr 1919, als Astronomen die Verschiebung der von den Sternen kommenden Lichtstrahlen maßen, während der Mond die Sonnenscheibe bedeckte.

Ein Schwarzes Loch umfasst so viel konzentrierte Masse, dass es die besagte Raumzeit vollständig zum Kollabieren bringt. Es war **Roger Penrose**, der nach vielen Jahren theoretischen Forschens im Jahr 1965 eine Arbeit veröffentlichte, die ihm letztendlich den Nobelpreis für Physik im Jahr 2020 bescherte. Mithilfe sogenannter topologischer Methoden und äußerst komplizierter Mathematik konnte er zeigen, dass bei der Implosion von Sternen am Ende ihrer Lebenszeit ein Punkt überschritten werden kann, bei dem nichts mehr der Schwerkraft entgegenwirkt und eine sogenannte **Singularität** entsteht.

Er entwickelte dabei das Konzept einer „gefangenen Oberfläche“, die man sich als zweidimensionales, geschlossenes Gebilde – ähnlich einem Ring – vorstellen kann und alle Strahlung nach innen, zum Zentrum hin, zwingt. Im Inneren des Rings befindet sich die punktförmige Singularität, in der Raum und Zeit nicht mehr definierbar sind.

Mit diesem Konzept erklärt Roger Penrose, warum Licht und Materie den **Ereignishorizont (auch Schwarzschild-Radius genannt)** eines Schwarzen Loches nur in eine Richtung – also nach innen – passieren können. Raum und Zeit tauschen im Inneren dieser Fläche ihre Rollen, wodurch die Bewegung nach innen zur Vorwärtsbewegung in der Zeit wird – genau diese Überlegung macht eine Rückkehr aus dem Schwarzen Loch unmöglich, denn das wäre eine Zeitreise in die Vergangenheit.

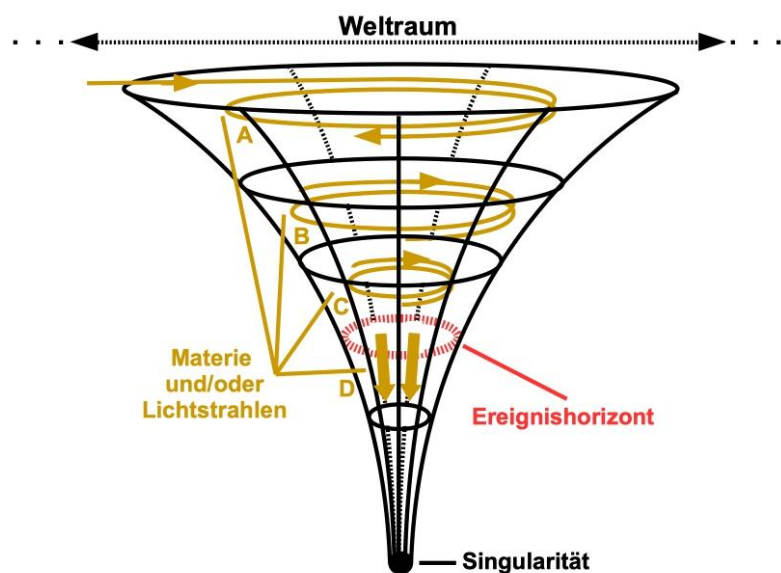


Abb. 2: Aufbau und Funktionsweise eines Schwarzen Lochs. Quelle: W. Vogg

2. In einer schematischen Darstellung zeigt **Abb. 2**, wie man sich den Aufbau hin zu einem Schwarzen Loch vorstellen kann – ausgehend vom bereits gekrümmten Gravitationsfeld im Weltraum über den Ereignishorizont hin zur Singularität.

- a) Erläutern Sie zunächst, was man unter den Begriffen Raumzeit, Ereignishorizont, Schwarzschild-Radius und Singularität versteht.
 - b) Beschreiben Sie nun anhand von Abb. 2 (A – D), wie der Einfang von Materie und Licht unter dem Einfluss einer immer stärker werdenden Gravitationskraft hin zur Singularität des Schwarzen Loches vonstattengeht.
3. Trotz der enormen Bedeutung der ART für die Beschreibung von Schwarzen Löchern kann man den Schwarzschild-Radius eines Schwarzen Lochs mithilfe der klassischen Physik eines kugelförmigen Körpers berechnen. Ein solcher Körper mit einer Masse M und einem Radius R besitzt ein radialsymmetrisches Gravitationsfeld. Will man das Gravitationsfeld eines solchen Körpers verlassen, benötigt man folgende Fluchtgeschwindigkeit (2. Kosmische Geschwindigkeit):

$$V_{\text{FI}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$$

- a) Leiten Sie die Gleichung für die Fluchtgeschwindigkeit her.
- b) Berechnen Sie die Formel für den Schwarzschild-Radius R_S , indem Sie die Lichtgeschwindigkeit c als größtmögliche Fluchtgeschwindigkeit berücksichtigen.
- c) Berechnen Sie den Schwarzschild-Radius R_S für die Sonne und die Erde, wenn man annimmt, dass beide Himmelskörper zu Schwarzen Löchern werden könnten.

Benutzen Sie für ihre Berechnungen folgende Werte:

Lichtgeschwindigkeit:	$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Masse der Sonne:	$m_{\text{So}} = 1,989 \cdot 10^{30} \text{kg}$
Masse der Erde:	$m_{\text{E}} = 5,972 \cdot 10^{24} \text{kg}$
Gravitationskonstante:	$G = 6,674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$

C. Der Nachweis von Schwarzen Löchern

Es war in den 1990er Jahren, als sich die Astrophysiker **Reinhard Genzel** und **Andrea Ghez** unabhängig voneinander dafür entschieden, sich das Zentrum unserer eigenen Galaxie – der Milchstraße – zum Forschungsobjekt zu machen mit dem Ziel, im Zentrum der Galaxie ein schwarzes Loch nachzuweisen.

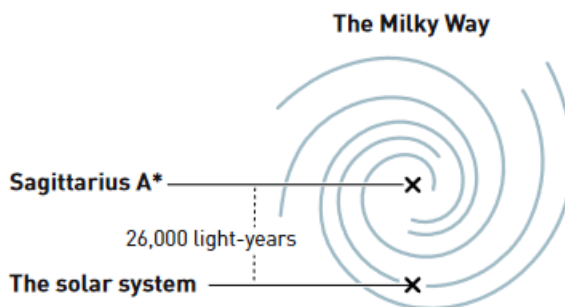
Zusammen mit ihren Forschungsgruppen konnten beide durch jahrelange Beobachtungen und Aufzeichnungen übereinstimmend die Bahnen mehrerer Sterne identifizieren, die sich mit sehr hoher Geschwindigkeit ellipsenförmig um ein Zentrum drehen – ein äußerst schwieriges Unterfangen, weil

das Zentrum im sichtbaren Licht durch Gas und Staubwolken verborgen ist und nur mit Großteleskopen im Infrarotbereich beobachtbar wird.

Abb. 3 stellt die Milchstraße in der Draufsicht dar - sie zeigt sich am Himmel als eine flache Scheibe mit einem gewaltigen Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren.

Ihre verschiedenen Spiralarme bestehen aus Gas und Staub sowie einigen hundert Milliarden Sternen – einer davon ist unsere Sonne mit den Planeten des Sonnensystems.

Sowohl Genzel als Ghez gelang es, nahe den Sternbildern *Schütze* und *Skorpion* ein extrem helles und kompaktes Objekt nachzuweisen, dem man den Namen **Sagittarius A* (SgrA*)** zuwies. Dazu hatten beide Teams über zwei Jahrzehnte hinweg mehrere Sterne verfolgt, die ihre Bahnen in der Nähe von SgrA* ziehen. Besonders interessant sollte dabei ein Stern mit der Bezeichnung S2 werden (**Abb. 4**).



The Milky Way, our galaxy, seen from above. It is shaped like a flat disc about 100,000 light-years across. Its spiral arms are made of gas and dust and a few hundred billion stars. One of these stars is our Sun.

©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Abb. 3: Die Milchstraße in der Draufsicht.
 Quelle: <https://www.nobelprize.org/uploads/2020/10/fig3-phy-en-milky-way.pdf>

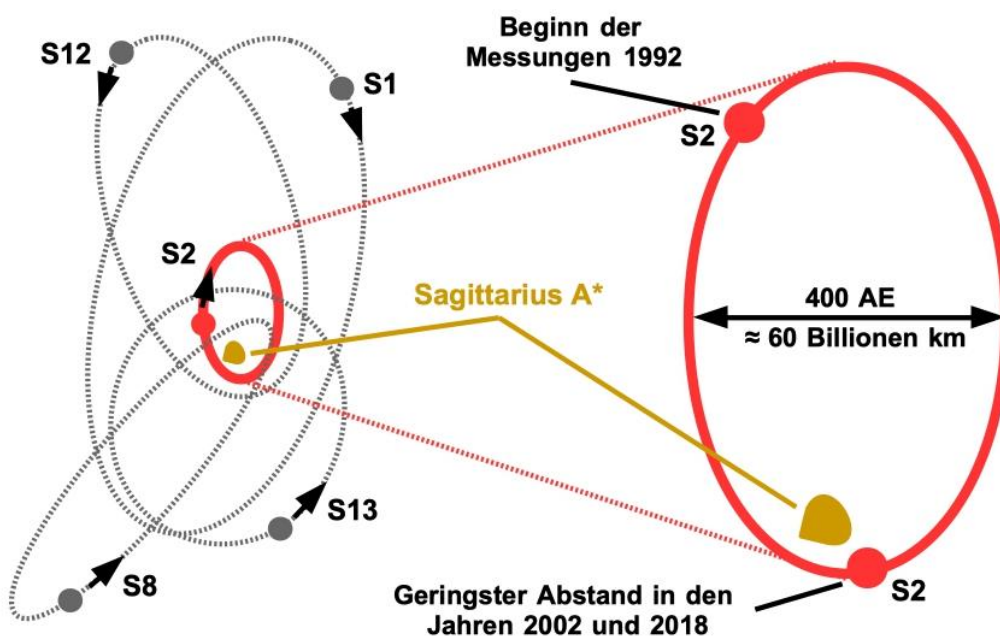


Abb. 4: Sagittarius A* und der Stern S2. Quelle: W. Vogg

Er benötigt für einen Umlauf um das galaktische Zentrum 16 Jahre und nähert sich diesem dabei bis auf 125 astronomische Einheiten (125 AE \approx 18,75 Billionen km). Aus den Geschwindigkeitsmessungen von Genzel und Ghez ergab sich, dass sich innerhalb der Umlaufbahn von S2 ein konzentriertes Objekt befinden muss, das eine *Masse von vier Millionen Sonnenmassen* haben muss.

4. Anhand des dritten Kepler'schen Gesetzes, welches die Umlaufzeiten verschiedener Planeten um den gleichen Zentralkörper vergleicht, kann man die Masse eines Zentralkörpers

berechnen, wenn man den Radius r (im Falle einer Kreisbewegung) oder die große Halbachse a (im Falle einer Ellipsenbewegung) kennt. Letzteres gilt für die Bewegung des Sterns S2 um den Zentralkörper SgrA*.

- a) Die für eine Kreisbahn und/oder Ellipsenbahn nötige Zentripetalkraft, die zum Mittelpunkt des Krümmungskreises gerichtet ist, entspricht dabei der Gravitationskraft des Zentralkörpers, in unserem Fall des Schwarzen Lochs SgrA*: $F_Z = F_{Gr}$

Leiten Sie daraus und mittels der Formel für die Bahngeschwindigkeit auf einer Ellipse

$$v_{B,E} = \frac{2\pi \cdot a}{T} \text{ zunächst das dritte Kepler'sche Gesetz her: } \frac{a^3}{T^2} = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2}$$

- b) Berechnen Sie nun aus dem dritten Kepler'schen Gesetz die Masse des Schwarzen Loches SgrA*, indem Sie für die große Halbachse den Wert $a = 1,526 \cdot 10^{14} \text{ m}$ und für die Umlaufdauer den Wert 16,05 Jahre verwenden.
- c) Wie viele Sonnenmassen enthält SgrA*?
- d) Berechnen Sie den Schwarzschild-Radius von SgrA* sowie seinen Durchmesser und vergleichen Sie ihn mit dem Sonnendurchmesser.

D. Die Bedeutung von Gravitationswellen

Albert Einstein postulierte bereits 1916 als direkte Folge seiner ART Gravitationswellen in Form von Verzerrungen der Raumzeit, die sich nach einer endlichen Zeit aufgrund ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit auf weit entfernte Orte auswirken können.

Im September 2015 gelang den Forschern des **LIGO-Projektes** (siehe Kasten) der erste direkte Nachweis – die amerikanischen Physiker **Rainer Weiss** (*1932), **Kip S.Thorne** (*1940) und **Barry C. Barish** (*1936) erhielten dafür 2017 gemeinsam den Nobelpreis für Physik.

LIGO ist das größte Gravitationswellen-Observatorium und eines der ausgeklügeltsten physikalischen Experimente weltweit. Bestehend aus zwei *Laserinterferometern*, die in den USA tausende Kilometer voneinander entfernt in *Livingston (Louisiana)* und *Hanford (Washington)* liegen, nutzt LIGO die physikalischen Eigenschaften des Lichtes und des Raumes selbst, um Gravitationswellen nachzuweisen.

Ein erstes Netzwerk von Interferometern stand in den frühen 2000er-Jahren bereit: TAMA300 in Japan, GEO600 in Deutschland, LIGO in den USA und Virgo in Italien. Gemeinsame Beobachtungen zwischen 2002 und 2011 konnten noch keine Gravitationswellen entdecken.

Nach grundlegenden Verbesserungen nahmen die LIGO-Detektoren 2015 als **Advanced LIGO** den Betrieb auf – die ersten in einem weit empfindlicheren weltweiten Netzwerk fortgeschrittener Detektoren.

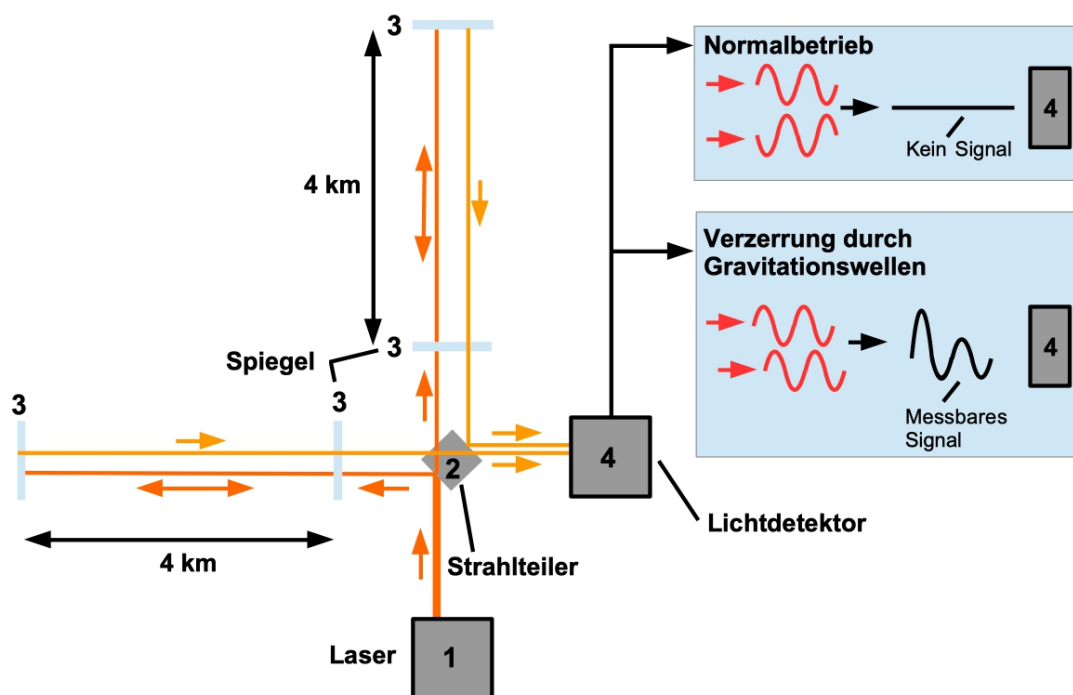
Im August 2017 konnten Astronomen von einem bestimmten Ereignis sowohl elektromagnetische Strahlung als auch Gravitationswellen empfangen. Das Ereignis kam von der 130 Millionen Lichtjahre

entfernten Galaxie NGC 4993 – dort waren zwei Neutronensterne zusammengestoßen und miteinander verschmolzen. Im Oktober 2020 schließlich veröffentlichten die amerikanische **Advanced Ligo-** und die **italienisch-französische Advanced Virgo-Kollaborationen** einen sogenannten Gravitationswellenkatalog, der mittlerweile fünfzig Gravitationswellensignale umfasst, die alle auf verschmelzende Schwarze Löcher zurückgehen.

5. **Abb. 5** zeigt eine schematische Versuchsanordnung zur Messung von Gravitationswellen des amerikanischen LIGO-Projektes.

Hinweis: Recherchieren Sie zur Beantwortung der folgenden Fragen im Internet!

- a) Beschreiben Sie anhand der Zahlenreihenfolge 1 bis 4 von Abb. 5, wie man sich den Versuchsaufbau zum Nachweis von Gravitationswellen vorstellen muss.



- b) Erläutern Sie kurz den Normalbetrieb der Anlage sowie die Messergebnisse durch Gravitationswellen (Abb. 5 rechts).

Abb. 5: Messanordnung zum Nachweis von Gravitationswellen. Quelle: W. Vogg

E. Ausblick

Allein in der Milchstraße befinden sich nach Schätzungen von Astronomen vermutlich mehrere hundert Millionen schwarzer Löcher – darunter sind *supermassereiche Schwarze Löcher* wie Sagittarius A* von 10.000 bis mehreren Milliarden Sonnenmassen, *mittelschwere Schwarze Löcher* von etwa 1.000 Sonnenmassen bis hin zu *stellaren Schwarzen Löchern* von rund 10 Sonnenmassen und *primordiale Schwarze Löcher* (vergleichbar mit der Masse des Erdmondes).

Letztendlich sind aber bis heute nur einige Dutzend entdeckt, nicht zuletzt deshalb, weil Schwarze Löcher mit den derzeit zur Verfügung stehenden technischen Methoden nur dann überhaupt entdeckt werden können, wenn im Einzugsbereich der Schwarzen Löcher viel an Materie existiert, die durch die Anziehung auf extrem hohe Temperaturen erhitzt wird und in der Folge Strahlung aussendet, die gemessen werden kann. Es wird vermutet, dass extrem viele stille Schwarze Löcher existieren, in deren Nähe keine Materie vorhanden ist, die Strahlung aussenden kann.

Zudem stellt sich natürlich auch die Frage, ob es sich bei allen dunklen Himmelsobjekten tatsächlich um klassische Schwarze Löcher handelt. Man darf durchaus skeptisch sein, ob alle angedachten Theorien von Astrophysikerinnen und Astrophysikern Realität werden können – vielmehr wird es in der Zukunft ebenso sein wie in der Vergangenheit:

Neue Theorien müssen sich bewähren und mit naturwissenschaftlichen Methoden bis ins kleinste Detail untersucht werden – wenn sie schlüssig sind und vollständig überzeugen, hat die Wissenschaft wieder einen Schritt nach vorne gemacht.

Schwarze Löcher mit ihren unvorstellbaren Wirkungen auf die Verknüpfung von Raum und Zeit werden noch lange geheimnisvoll und im wahrsten Sinne des Wortes undurchschaubar sein, aber auch enormer Ansporn für kreative Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler.