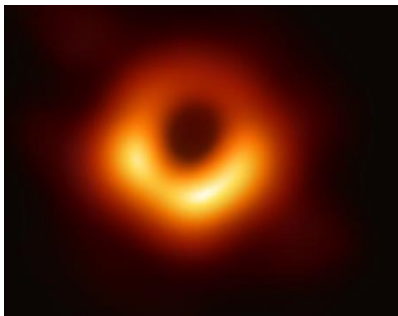


# Schwarze Löcher und das „Keine-Haare-Theorem“ (Teil 4 von 4)

## Direkte Nachweise Schwarzer Löcher

Da Schwarze Löcher (SL) selbst keine beobachtbare Strahlung abgeben, gestaltete sich ihr Nachweis als sehr schwierig. SL selbst können zwar nicht direkt beobachtet werden, wohl aber ihre gravitativen Auswirkungen auf Materie außerhalb des Ereignishorizontes. Äußere Materie, die von einem SL angezogen wird, wird spiralförmig in eine schnell rotierende Akkretionsscheibe hineingezogen, bevor sie den Ereignishorizont überschreitet. In der Akkretionsscheibe kommt es zu starker Reibung und damit verbundener intensiver elektromagnetischer Strahlung. Außerdem kann bei SL die Beschleunigung von Teilchen durch elektromagnetische Felder und die Aussendung hochenergetischer weitreichender Materiestrahlen, sogenannter Jets, senkrecht zur Akkretionsscheibe (**Bild 2** in Teil 2) erfolgen ([https://de.wikipedia.org/wiki/Jet\\_\(Astronomie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Jet_(Astronomie))). Die genannten Effekte können mit entsprechender hochauflösender Technik ebenso beobachtet werden wie die Bahnen und Geschwindigkeiten von Sternen, die ein SL umkreisen. Nach den Keplergesetzen ([Newsletter Juli 2021](#)) sind dann Position und Masse des SL berechenbar. Weitere Nachweismethoden sind unter [https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes\\_Loch#Beobachtungsmethoden](https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes_Loch#Beobachtungsmethoden) aufgeführt.



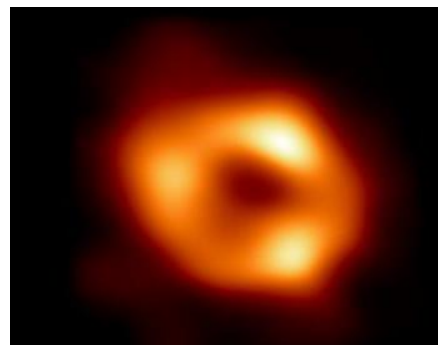
**Bild 3** Schwarzes Loch in der Galaxie Messier 87 (Foto: EHT Collaboration)

<https://www.mpg.de/13326591/bild-eines-schwarzen-lochs>

Hierbei handelt es sich um Sagittarius A\*, das supermassereiche SL im Zentrum der Milchstraße, um das sich nicht nur die Erde mit unserem Sonnensystem, sondern alle ca. 200 Milliarden Sonnen unserer Galaxis bewegen. Sagittarius A\* hat eine Masse, die etwa dem 4,3 Millionenfachen unsere Sonne entspricht und ist von der Erde ca. 27.000 Lichtjahre entfernt. Im Vergleich dazu ist das SL in der Galaxie M87 sogar etwa 1.500-mal so schwer aber auch glücklicherweise ca. 2.000-mal weiter entfernt. Das Datenmaterial für beide Abbildungen wurde im Rahmen des „Event Horizon Telescope“-Projektes vor ca. 5 Jahren mittels 8 aufeinander abgestimmter, über die Erde verteilter Radioteleskope gleichzeitig erfasst und seitdem von hunderten Wissenschaftlern weltweit ausgewertet. Trotz größerer Entfernung erwies sich die Bearbeitung des SL in M87 vergleichsweise einfacher, da das viel größere SL durch seine riesige Masse relativ ruhig im All sitzt und deshalb leichter abzubilden ist. Demgegenüber verhält sich Sagittarius A\* wesentlich unruhiger. Durch seinen im Vergleich kleinen Durchmesser von ca. 24 Millionen Kilometer brauchen die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit umlaufenden Gase nur Minuten für die Umrundung, was zum Flackern

2019 gelang der erste direkte Nachweis eines SL (**Bild 3**). Das Bild wurde aus einer gigantischen Datenmenge von vier Petabytes (ca.  $10^{15}$  Bytes) mittels eines Supercomputers am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn erstellt. Die kreisförmige Verdunklung, die auch als Schatten des SL bezeichnet wird, ist nicht etwa der Ereignishorizont selbst, sondern das etwa 2,5-mal so große Innere eines schon von Einstein vorhergesagten Photonengürtels. Nähere Details dazu können u.a. folgender Quelle entnommen werden: <https://www.scinexx.de/news/kosmos/schwarzes-loch-photonenring-als-zeitkapsel/>.

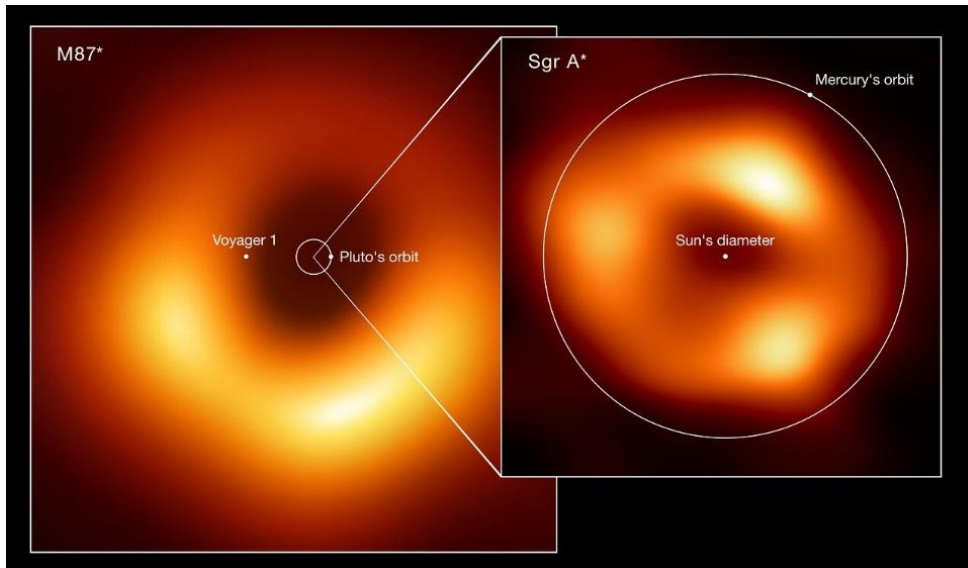
Am 12.04.2022 wurde von der Europäischen Südsternwarte das zweite Bild eines SL präsentiert (**Bild 4**).



**Bild 4** Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

<https://www.tagesschau.de/ausland/erster-blick-auf-schwarzes-loch-in-milchstrasse-101.html>

des Objektes und erswerter Datenauswertung führt. Deshalb mussten völlig neue Auswertungsmethoden entwickelt werden. Von uns aus gesehen befindet sich Sagittarius A\* übrigens hinter dichten Staubwolken und ist im sichtbaren Licht nicht beobachtbar, wohl aber mittels Radiowellen, die den Staub durchdringen können (<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2022/event-horizon-telescope-schwarzes-loch-in-der-milchstrasse-abgelichtet/>). **Bild 5** zeigt die gewaltigen Größenunterschiede der beiden bisher direkt nachgewiesenen SL. Während in das SL von M87 problemlos unser ganzes Sonnensystem passen würde, hätte Sagittarius A\* etwa innerhalb der Merkurbahn Platz.



**Bild 5**  
Größenvergleich  
der Schwarzen  
Löcher in M87  
und der  
Milchstraße  
<https://www.eso.org/public/austria/images/eso2208-eh-t-mwe/>

## Offene Probleme

Trotz einer Vielzahl neuer Erkenntnisse in den letzten Jahren bergen Schwarze Löcher nach wie vor viele ungeklärte Probleme, die auch Raum für Spekulationen bieten und oft zu erheblichen Verständnisproblemen führen, wie die folgenden Beispiele zeigen:

- Bewegt sich ein Körper auf ein SL zu, so zeigt sich für einen außenstehenden Beobachter, dass das Objekt bei Annäherung immer langsamer wird. Bis zum Erreichen des Ereignishorizontes würde unendlich viel Zeit vergehen. Dagegen erreicht und überschreitet ein sich auf das SL zubewegender Beobachter den Ereignishorizont aus seiner Sicht in endlicher Zeit. (<https://de.wikipedia.org/wiki/Ereignishorizont>). Der Widerspruch resultiert aus den verschiedenen Bezugssystemen und ist aus unseren Alltagserfahrungen kaum nachvollziehbar.
- Eine in der Theorie näher untersuchte Betrachtungsweise sieht einen Rollentausch von Raum und Zeit beim Überqueren des Ereignishorizontes vor. Das führt dazu, dass das SL von außen gesehen unendlich ausgedehnt in der Zeit, aber räumlich gesehen von endlicher Größe ist. Innen ist es genau umgekehrt, d.h. die Zeit wird endlich aber der Raum (in mindestens einer Dimension) unendlich (<https://www.einstein-online.info/spotlight/rollentausch-von-raum-und-zeit/>). Das könnte auch ein Weg zur Vermeidung von Singularitäten sein, allerdings entzieht sich diese Sichtweise jedem üblichen Verständnis.
- Noch spekulativer ist die Betrachtung von SL als räumliche bzw. zeitliche Brücken in andere Bereiche der Raumzeit oder sogar in Paralleluniversen (sogenannte Wurmlöcher: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wurmloch>). Für den Eintritt in diese anderen Sphären werden teilweise Weiße Löcher angenommen, die von ihren Eigenschaften her das Gegenstück zu SL bilden sollen ([https://de.wikipedia.org/wiki/Wei%C3%9Fes\\_Loch](https://de.wikipedia.org/wiki/Wei%C3%9Fes_Loch)).

SL sind für das Verständnis des Universums hoch interessant und werden die Wissenschaft auch weiterhin intensiv beschäftigen. Die Entwicklung einer Theorie der Quantengravitation könnte zur Klärung vieler offener Fragen beitragen, u.a. auch zu neuen Erkenntnissen über den Urknall, der ja auch aus einer Singularität entstanden sein soll.