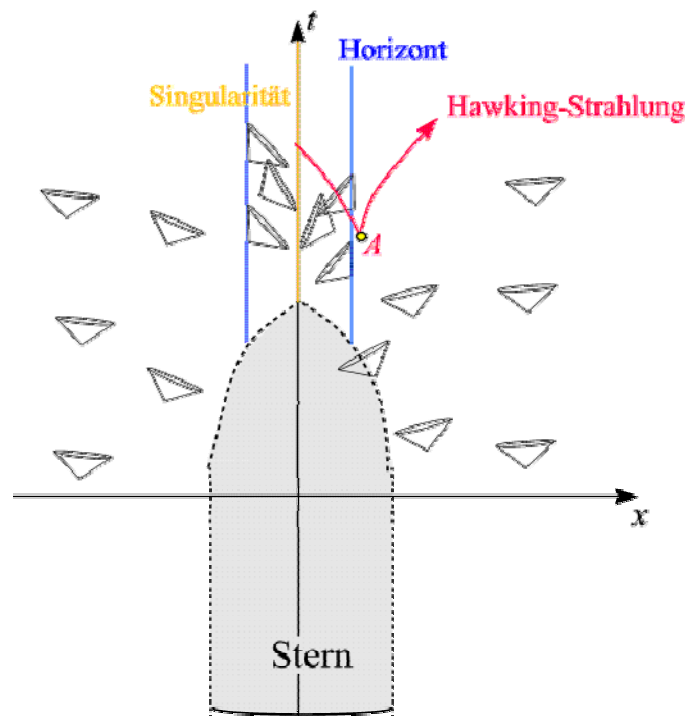


## Schwarze Löcher verdampfen – die Hawking-Strahlung

Eigentlich sind Schwarze Löcher nicht völlig schwarz. Die Quantentheorie sagt voraus, dass sie eine ganz bestimmte Strahlung abgeben. Sehen wir uns an, wie sie zustande kommt:

In der Quantenwelt geschehen eigenartige Dinge. So kann es passieren, dass sich *spontan* aus dem Vakuum ein Paar zweier zusammengehöriger Teilchen (z. B. zwei Photonen oder ein Elektron und ein Positron) bildet. Normalerweise vereinigen sich die beiden Partner gleich darauf und tauchen wieder im Vakuum unter. Wir müssen uns das Vakuum der Quantentheorie nicht als ein „ruhiges Nichts“ vorstellen, sondern eher als eine Art Gebrodel, in dem diese Prozesse an der Tagesordnung sind. Wir nennen die Teilchen, die daran beteiligt sind, „virtuell“, weil wir sie in unseren Messinstrumenten nicht registrieren.

Manchmal aber geschieht es, dass die zwei „virtuellen“ Partner eines solchen Pairs *auseinander gerissen* und „*reell*“ werden, d. h. physikalisch (z. B. in Detektoren) beobachtbare Teilchen darstellen. Ein Schwarzes Loch ist nun in der Lage, genau das zu bewirken!



Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit entsteht in der Nähe des Ereignishorizonts (Ereignis A) ein Paar virtueller Teilchen. An und für sich wollen sich die beiden Teilchen sogleich wieder vereinigen. Wenn sich aber nun in dieser kurzen Zeit eines der Teilchen dem Ereignishorizont nähert und ihn *überquert*, so ist es im Schwarzen Loch *gefangen*. Sein Partnerteilchen ist plötzlich auf sich allein gestellt und wird *reell*, d. h. physikalisch beobachtbar. Es tritt seinen Weg in die Außenwelt an. Für einen entfernten Beobachter stellt sich die Situation so dar, als ob ein Teilchen aus dem Schwarzen Loch herauskommt. (Die Weltlinien der beiden Teilchen sind im Diagramm dargestellt.) Da derartige Prozesse regelmäßig geschehen, beobachtet die Außenwelt eine kontinuierliche Strahlung, die vom Schwarzen Loch ausgeht. Sie ist allerdings sehr schwach – viel zu schwach, um mit heutigen Technologien nachgewiesen zu werden.

Der Entstehungsprozess dieser so genannten **Hawking-Strahlung** hat etwas *Paradoxes* an sich: Eigentlich kommen die Teilchen nicht wirklich *aus* dem Schwarzen Loch *heraus*. Im Gegenteil: einer der Partner ist durch den Ereignishorizont *hineingefallen*. Wenn aber entfernte Beobachter eine Strahlung registrieren, so muss das Schwarze Loch Energie verlieren, denn die Summe aus der Energie des Schwarzen Lochs und jener der Teilchen, die sich von ihm entfernen, ist konstant.

Bedenken wir dieses Dilemma genauer, so stellt sich heraus, dass sehr wohl *etwas* aus dem Schwarzen Loch herausgekommen ist: die Energie, die nötig ist, um ein Teilchenpaar zu erzeugen. Die Quantentheorie erlaubt es virtuellen Teilchenpaaren, für kurze Zeit das Gesetz der Energieerhaltung zu verletzen, sich gewissermaßen aus dem Vakuum Energie „auszuborgen“ und bei der Vereinigung wieder zurückzugeben. Da die Vereinigung aber aufgrund der Existenz eines Ereignishorizonts nicht möglich ist, bekommt das Schwarze Loch die verliehene Energie nicht wieder zurück – sie entweicht mit dem frei gewordenen Partnerteilchen.

Da Energie und Masse dieselbe Größe darstellen ( $E=mc^2$ ), verliert das Schwarze Loch durch das Aussenden der Hawking-Strahlung an *Masse*. Es wird immer leichter – es „verdampft“ – bis es schließlich in Nichts „verpufft“. Bis es soweit ist, dauert es allerdings sehr lange – für ein stellares oder galaktisches Schwarzes Loch viel länger als das Universum heute alt ist. Dann aber verschwindet es mit einer letzten Explosion aus der Welt.

Die Quantentheorie sagt also voraus, dass die Materie, die einst zu einem Schwarzen Loch kollabiert ist, in Form von Strahlung wieder aus ihm herauskommt und sich letztlich ganz in diese umwandelt. Nur, wenn wir diese Strahlung vernachlässigen, können wir ein Schwarzes Loch tatsächlich als schwarz ansehen.