



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Schwarze Löcher gehorchen thermodynamischen „Gesetzen“ – ein neues Ergebnis erweitert sie auf heftig veränderliche Schwarze Löcher fernab des Gleichgewichts

Seit den 1970er-Jahren ist bekannt, dass Schwarze Löcher Gesetzen gehorchen, die der Thermodynamik entsprechen, doch die sauberste Fassung galt nur für ruhig im Gleichgewicht sitzende Schwarze Löcher. Eine neue Arbeit in Physical Review Letters erweitert den ersten und zweiten Hauptsatz auf Schwarze Löcher, die sich rasch verändern – Materie verschlingen, verschmelzen oder Strahlung aufnehmen –, indem sie lokal definierte „dynamische Horizonte“ verwendet. Damit lassen sich selbst einem heftig evolvierenden Schwarzen Loch Temperatur und Entropie zuordnen. Es ist ein mathematisches Ergebnis der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie, keine neue Quantengravitation, keine Beobachtung und keine Lösung des Informationsparadoxons Schwarzer Löcher.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium*, Abhay Ashtekar, Daniel E. Paraizo, Jonathan Shu, Physical Review Letters 136, 251405 (2026) · DOI: 10.1103/3c1r-v8f1

Schwarze Löcher besitzen „Gesetze“, die wie Thermodynamik aussehen. Die saubere Fassung funktionierte nur, wenn nichts geschah.

Eine der seltsamsten Tatsachen der Physik ist, dass sich Schwarze Löcher wie heiße Körper verhalten. Anfang der 1970er-Jahre bemerkten Bekenstein und Hawking, dass die Gleichungen für Schwarze Löcher Glied für Glied mit den Hauptsätzen der Thermodynamik übereinstimmen: Ein Schwarzes Loch besitzt eine Entropie proportional zur Fläche seines Horizonts und eine Temperatur proportional zu seiner Oberflächengravitation. Hawking zeigte anschließend, dass die Temperatur im tiefsten Sinn real ist – ein Schwarzes Loch leuchtet tatsächlich, wenn auch äußerst schwach, mit thermischer Strahlung.

Was ist Hawking-Strahlung?

Klassisch entkommt nichts aus einem Schwarzen Loch, daher müsste es vollkommen schwarz sein und überhaupt keine Temperatur besitzen. 1974 zeigte Stephen Hawking, dass sich dies ändert, sobald die Quantentheorie nahe dem Horizont berücksichtigt wird: Ein Schwarzes Loch sendet ein schwaches thermisches Leuchten aus und verliert dadurch langsam Masse, es „verdampft“. Das Spektrum ist bei der Hawking-Temperatur thermisch, während die Ausbreitung durch gekrümmte Raumzeit die Strahlung verändert, die im Unendlichen ankommt. In einem verbreiteten heuristischen Bild – nicht Hawkings eigentlicher Herleitung – erzeugen Quantenfluktuationen unmittelbar außerhalb des Horizonts Paare, von denen ein Partner als Strahlung entkommt und der andere hineinfällt.

Entscheidend ist, dass diese Temperatur *umgekehrt* proportional zur Masse des Schwarzen Lochs ist: Je kleiner das Loch, desto heißer ist es. Für jedes Schwarze Loch, das ein Teleskop sehen könnte, ist die Temperatur fantastisch niedrig – weit kälter als der leere Raum darum herum –, sodass das Leuchten praktisch vollkommen vernachlässigbar ist und nie direkt gemessen wurde. Seine Bedeutung ist konzeptionell: Hawking-Strahlung verwandelt die *Analogie* zwischen Mechanik Schwarzer Löcher und Thermodynamik in die reale Sache. Weil das Loch tatsächlich eine Temperatur besitzt, sind „Temperatur“ und „Entropie“ in diesen Gesetzen echte thermodynamische Größen und kein formaler Zufall. Dies ist Hintergrund zur aktuellen Arbeit, nicht eines ihrer Ergebnisse.

Diese Entsprechung wird durch ein Ergebnis verankert, das **erster Hauptsatz der Mechanik Schwarzer Löcher** heißt, von Bardeen, Carter und Hawking aus dem Jahr 1973. In Worten: Verschiebt man ein Schwarzes Loch geringfügig von einem stationären Zustand in einen benachbarten stationären Zustand, entspricht die Änderung seiner Masse seiner Temperatur mal der Änderung seiner Entropie plus einem Term für seinen Drehimpuls. Es ist die Version des Schwarzen Lochs von „zugeführte Wärme gleich Temperatur mal Entropieänderung“.

In der Formulierung *benachbarter stationärer Zustand* verbirgt sich ein Haken. Das saubere Gesetz von 1973 vergleicht zwei ruhig im Gleichgewicht sitzende Schwarze Löcher, die sich nur infinitesimal unterscheiden. Es beschreibt nie wirklich einen **Prozess** – ein Schwarzes Loch, das einen Stern

verschlingt, zwei verschmelzende Schwarze Löcher oder ein neugeborenes Loch, das nach einer heftigen Geburt ausschwingt. Genau diese Situationen wollen wir am dringendsten verstehen, und sie sind das Gegenteil von „ruhig sitzen“. Das saubere Gesetz verstummt genau dann, wenn das Schwarze Loch interessant wird.

Warum die naheliegende Lösung nicht funktioniert

Man könnte denken, die Lösung sei einfach: Man beobachtet, wie der Horizont wächst, während Materie hineinfällt. Das Problem ist: *welcher* Horizont?

Der Horizont, den sich die meisten vorstellen – der **Ereignishorizont**, der wahre Punkt ohne Rückkehr –, besitzt eine subtile und unbequeme Eigenschaft: Er wird durch die gesamte Zukunft des Universums definiert. Um zu wissen, wo sich der Ereignishorizont *jetzt* befindet, müsste man alles wissen, was jemals und für immer in das Loch fallen wird. Das ist keine technische Nebensächlichkeit. Ein Ereignishorizont kann in einer vollkommen leeren, flachen Raumregion zu wachsen beginnen, *bevor* die Materie, die ihn speisen wird, eintrifft – schlicht weil diese Materie später eintreffen wird. Seine Fläche kann dort zunehmen, wo lokal überhaupt nichts geschieht.

Wie kann ein Horizont wachsen, bevor die Materie eintrifft?

Der wissenschaftliche Name dieses Rätsels ist die **teleologische Natur des Ereignishorizonts**, auch seine **globale Definition** genannt. „Teleologisch“ bedeutet hier nicht, dass der Horizont einen Zweck besitzt, die Zukunft vorhersagt oder einen Einfluss rückwärts durch die Zeit sendet. Es bedeutet, dass erst aus der vollständigen zukünftigen Geschichte der Raumzeit entschieden werden kann, ob ein Ereignis innerhalb des Horizonts liegt.

Die formale Definition sagt dasselbe kompakter. Stellen Sie sich die **zukünftige lichtartige Unendlichkeit** – „I-plus“, geschrieben $\mathcal{I}^+$ – als das Ziel vor, das Licht erreicht, wenn es für immer in eine ansonsten leere, unendlich entfernte Zukunft entkommt. Der Ereignishorizont ist die Grenze zwischen Ereignissen, von denen ein nach außen gesendetes Lichtsignal dieses Ziel irgendwann erreichen kann, und Ereignissen, von denen kein solches Signal jemals entkommt. In der Standardschreibweise der Allgemeinen Relativitätstheorie ist er die Grenze der kausalen Vergangenheit der zukünftigen lichtartigen Unendlichkeit: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Weil das Wort *jemals* in diese Definition eingebaut ist, kann keine Messung ausschließlich hier und jetzt den Ereignishorizont exakt lokalisieren.

Eine kollabierende kugelförmige Schale macht die Seltsamkeit sichtbar. Bevor die Schale eintrifft, kann der Raum in ihrem Inneren leer und lokal flach sein. Sendet man vom Zentrum zu immer späteren Zeitpunkten Lichtstrahlen nach außen, entkommen die früheren, während die späteren auf die kollabierende Schale in einer Geometrie treffen, aus der sie nicht mehr herausgelangen. Der Ereignishorizont ist die Grenze zwischen diesen beiden Ergebnissen. Rückwärts verfolgt beginnt diese Grenze im Zentrum und breitet sich durch das noch leere, flache Innere aus, bevor die Schale es erreicht. Seine wachsende Fläche meldet dort keinen lokalen Materiefluss; sie hält fest, welche Fluchtwege in der vollständigen Raumzeit offen bleiben.

Nichts in diesem Bild wirkt rückwärts in der Zeit. Würde die Schale umgelenkt und kein Schwarzes Loch entstehen, wäre die vollständige Raumzeit anders, und jene frühere Region wäre nicht Teil eines Ereignishorizonts gewesen. Die Lehre lautet nicht, dass die Zukunft die Vergangenheit verändert, sondern dass ein Ereignishorizont eine **globale kausale Grenze** ist, keine Oberfläche, die ein naher Beobachter in einem Augenblick erkennen kann. Genau deshalb verwenden Physiker quasi-lokale oder dynamische Horizonte, wenn sie ein sich veränderndes Schwarzes Loch verfolgen müssen.

Das macht den Ereignishorizont als laufende Beschreibung des „Zustands“ eines Schwarzen Lochs unbrauchbar. In einer Computersimulation lässt er sich erst lokalisieren, nachdem die Simulation beendet ist, und gewiss nicht, um Temperatur oder Entropie von Moment zu Moment zu verfolgen.

Der Schritt: ein lokal definierbarer Horizont

Die neue Arbeit von Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo und Jonathan Shu baut auf einem anderen Horizontbegriff auf – einem **quasi-lokalen**, der ausschließlich durch die Geometrie seiner unmittelbaren Umgebung und ohne Bezug zur unendlich fernen Zukunft definiert wird. Diese „dynamischen Horizontsegmente“ sind die Oberflächen, mit denen numerische Relativisten Schwarze Löcher in Verschmelzungssimulationen bereits finden, gerade weil sie lokal und ehrlich sind: Ihre Fläche wächst nur dort, wo tatsächlich Energie sie überquert.

Darauf lösen die Autoren die schwierigere Hälfte des Problems. In gewöhnlicher Thermodynamik ist ein System weit vom Gleichgewicht notorisch schwer zu fassen: Eine einzige Temperatur oder einen einzigen Druck kann man ihm nicht sauber zuordnen, weil solche Größen erst definiert sind, nachdem sich alles eingependelt hat. Schwarze Löcher haben dasselbe Problem – bis man, wie die Autoren zeigen, eine besondere Eigenschaft der Allgemeinen Relativitätstheorie nutzt. Ein Schwarzes Loch *im* Gleichgewicht, ein Kerr-Schwarzes-Loch, ist durch nur zwei Zahlen festgelegt: seine Größe und seinen Drehimpuls. Die Autoren konstruieren daher eine Abbildung, die jeden wild evolvierenden Horizont außerhalb des Gleichgewichts nimmt und in jedem Augenblick die zwei Zahlen des Gleichgewichts-Schwarzen-Lochs ausliest, dem er momentan ähnelt. Über diese Abbildung lassen sich einem heftig veränderlichen Schwarzen Loch doch eine **zeitabhängige Temperatur und ein zeitabhängiger Drehimpuls** zuordnen.

Mit diesen Bausteinen – lokal definierter Energie, die den Horizont überquert, und momentanen intensiven Größen – erweitern sie den ersten Hauptsatz auf Schwarze Löcher beliebig weit vom Gleichgewicht. Entscheidend ist, dass das neue Gesetz **endliche Änderungen durch reale physikalische Prozesse** beschreibt, Materie und Gravitationswellen, die den Horizont überqueren, und nicht infinitesimale Schritte zwischen zwei eingefrorenen Zuständen. Sie verbinden es mit einem passenden zweiten Hauptsatz, dessen Aussage nun *quantitativ* ist: Die Horizontfläche wächst um einen Betrag, der direkt an die eingeströmte Energie gekoppelt ist. Zusammengenommen führen erster und zweiter Hauptsatz zu einer klaren Schlussfolgerung: Selbst bei einem Schwarzen Loch mitten im heftigsten denkbaren Ereignis bleibt seine Horizontfläche das richtige Maß der Entropie.

Was dies *nicht* beweist

- Es löst **nicht** die Quantengravitation. Dies ist ein Ergebnis der *klassischen* Allgemeinen Relativitätstheorie und verwendet die Standardidentifikation der Horizontfläche mit Entropie. Es leitet diese Entropie nicht aus etwas Fundamentalerem her.
- Es zählt **keine** Mikrozustände und erklärt nicht, *woraus* die Entropie eines Schwarzen Lochs besteht. Es erweitert die Buchführung der Thermodynamik Schwarzer Löcher; es öffnet nicht die Box und enthüllt die mikroskopischen Freiheitsgrade.
- Es löst **nicht** das Informationsparadoxon Schwarzer Löcher. Dieses Rätsel lebt in der Quantentheorie; die Arbeit berührt es nicht.
- Es ist **keine** Beobachtung oder Messung. Kein Teleskop, keine Daten und kein Gravitationswellensignal sind beteiligt – dies ist Mathematik. Die „Temperatur“ eines verschmelzenden Schwarzen Lochs ist hier eine präzise definierte Größe in den Gleichungen, nichts, was man an einem Thermometer ablesen könnte.
- Es widerlegt Bekenstein und Hawking **nicht**. Es *erweitert* ihr Bild in den dynamischen Bereich, zu dem das ursprüngliche, nur für Gleichgewicht geltende Gesetz nichts zu sagen hatte.

Wie belastbar sind die Belege?

Stark für das, was sie ist: ein sorgfältiges, intern konsistentes Stück mathematischer Physik einer führenden Gruppe des Fachgebiets, als *Editors' Suggestion* in *Physical Review Letters* veröffentlicht; eine Begleitarbeit führt die längeren Herleitungen aus.

Die ehrlichen Vorbehalte betreffen die *Art*, nicht die Qualität:

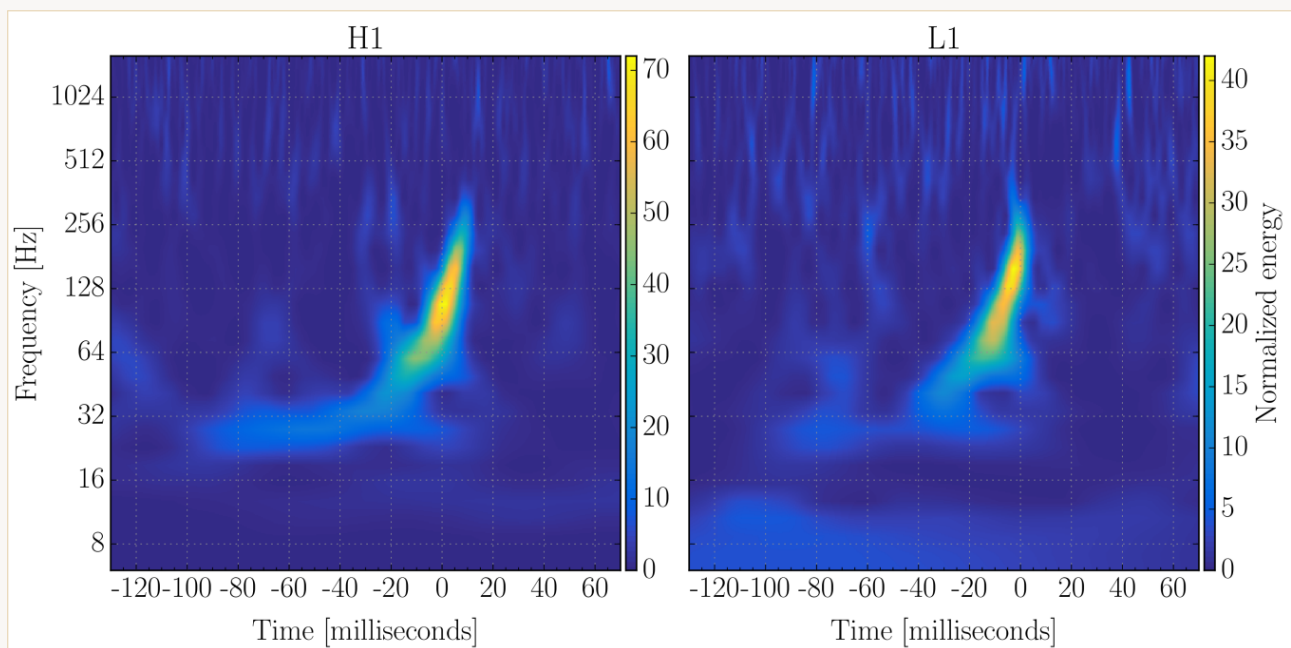
- Sie beruht auf der üblichen Annahme, dass Horizontfläche *Entropie ist* – Fläche geteilt durch viermal Newtonsche Konstante und Plancksches Wirkungsquantum. Sollte eine vollständige Quantengravitation diese Identifikation jemals revidieren, würde sich die Deutung entsprechend verschieben.
- Die hervorgehobenen Rechnungen werden für den häufigsten Fall ausgearbeitet, raumartige dynamische Horizonte mit Axialsymmetrie; die Autoren argumentieren, dass die Einschränkungen nicht wesentlich sind, doch die vollständig allgemeine Aussage stützt sich auf Ergebnisse an anderer Stelle.
- „Entropie gleich Horizontfläche, auch außerhalb des Gleichgewichts“ ist eine überzeugende *Identifikation*, die durch die neuen Hauptsätze natürlich wird, kein aus mikroskopischer Statistik bewiesenes Theorem.

Also: eine rigorose Erweiterung eines fünfzig Jahre alten Rahmens, keine experimentelle Entdeckung und kein neues Naturgesetz, das auf seine Prüfung wartet.

Warum es wichtig ist

Aus zwei Gründen, einem praktischen und einem konzeptionellen.

Praktisch verbringen die Schwarzen Löcher, die wir heute tatsächlich untersuchen – jene, deren Verschmelzungen LIGO und Virgo hören –, ihre wichtigsten Momente weit vom Gleichgewicht entfernt. Die Größen dieser Arbeit werden aus denselben lokal definierten Horizonten aufgebaut, die Simulationen bereits verfolgen. Damit entsteht eine prinzipiell saubere Weise, über Entropie und Temperatur eines Schwarzen Lochs *während* einer Verschmelzung oder eines Kollapses zu sprechen, nicht nur davor und danach.



GW150914, das erste direkt detektierte Gravitationswellensignal, stammte von zwei verschmelzenden Schwarzen Löchern. Diese Zeit-Frequenz-Karten zeigen das Signal in LIGO Hanford links und LIGO Livingston rechts: In beiden Detektoren steigt die helle Spur nach oben, während die Signalfrequenz zur Verschmelzung hin zunimmt. Dies ist ein reales Beispiel für ein Schwarzes-Loch-System weit vom Gleichgewicht; es liefert Kontext für den neuen thermodynamischen Rahmen, aber keine Beobachtungsevidenz dafür.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 3.0

Konzeptionell gehört das thermodynamische Verhalten Schwarzer Löcher zu den wenigen konkreten Hinweisen, die wir auf Quantengravitation besitzen – dort treffen Gravitation, Quantentheorie und Thermodynamik sichtbar zusammen. Genauer festzulegen, was „Entropie“ und „Temperatur“ für ein heftig veränderliches Schwarzes Loch bedeuten, schärft das Ziel, das jede zukünftige Quantentheorie treffen muss. Die tiefe Frage, was die Entropie eines Schwarzen Lochs wirklich ist, beantwortet es nicht. Es formuliert sie präziser – und das ist in diesem Winkel der Physik ein großer Teil der Arbeit.

Kurz zusammengefasst

Schwarze Löcher gehorchen Gesetzen, die der Thermodynamik entsprechen, doch der saubere „erste Hauptsatz“ von 1973 verglich nur ruhig im Gleichgewicht sitzende Schwarze Löcher und konnte keinen wirklichen Prozess beschreiben. Ashtekar, Paraizo und Shu erweitern ersten und zweiten Hauptsatz auf Schwarze Löcher beliebig weit vom Gleichgewicht – während Verschmelzung, Materieaufnahme oder Ausschwingen –, indem sie lokal definierte „dynamische Horizonte“ und eine Abbildung verwenden, die einem veränderlichen Schwarzen Loch eine momentane Temperatur und einen momentanen Drehimpuls zuordnet. Das Ergebnis lautet, dass Horizontfläche selbst während heftiger Ereignisse das richtige Maß der Entropie bleibt. Es ist ein rigoroses Ergebnis der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie, keine Quantengravitation, keine Beobachtung, keine Zählung von Mikrozuständen und keine Lösung des Informationsparadoxons.

Nüchtern geprüft

Was die Arbeit zeigt: Eine mathematisch konsistente Erweiterung des ersten und zweiten Hauptsatzes der Mechanik Schwarzer Löcher auf vollständig dynamische, weit vom Gleichgewicht entfernte Schwarze Löcher, aufgebaut auf quasi-lokalen dynamischen Horizonten. Sie definiert einen endlichen, prozessbasierten ersten Hauptsatz und einen quantitativen zweiten Hauptsatz und macht es natürlich, die Entropie eines dynamischen Schwarzen Lochs mit seiner Horizontfläche zu identifizieren.

Was echt, aber interpretativ ist: Die Identifikation „Entropie = Horizontfläche“ außerhalb des Gleichgewichts. Sie wird durch die neuen Gesetze überzeugend, übernimmt aber die klassische Standardannahme von Fläche und Entropie, statt sie herzuleiten.

Was sie nicht zeigt: Eine Quantentheorie der Gravitation; einen mikroskopischen Ursprung oder eine „Zählung“ der Entropie Schwarzer Löcher; eine Lösung des Informationsparadoxons; irgendein beobachtetes oder experimentelles Ergebnis; eine physisch messbare Temperatur.

Wichtigste Einschränkungen: Durchgehend klassische Allgemeine Relativitätstheorie; hervorgehobene Ergebnisse für den häufigen raumartigen, axialsymmetrischen Fall bewiesen, mit Allgemeinheit über Begleitarbeiten begründet; die Flächen-Entropie-Identifikation wird angenommen und nicht aus statistischer Mechanik bewiesen.

Wie viel Vertrauen sollte ein allgemeines Publikum haben? Hohes Vertrauen darin, dass dies ein solides, angesehenes theoretisches Ergebnis ist, das die Thermodynamik Schwarzer Löcher tatsächlich in den dynamischen Bereich erweitert. Ebenso hohes Vertrauen darin, dass es *keine* neue Beobachtung, keine Quantengravitation und keine Lösung des berühmten Informationsrätsels ist. Die richtige Haltung: ein echter Erkenntnissschritt, gemacht mit Kreide und nicht mit einem Teleskop.

Quellen

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)

<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>