

**Blick in die Wissenschaft
Forschungsmagazin
der Universität Regensburg**

ISSN 0942-928-X

Heft 40

28. Jahrgang

Herausgeber

Prof. Dr. Udo Hebel

Präsident der Universität Regensburg

Redaktionsleitung

Prof. Dr. rer. nat. Ralf Wagner

Redaktionsbeirat

Prof. Dr. jur. Christoph Althammer

Prof. Dr. rer. nat. Bernd Ammann

Prof. Dr. rer. nat. Ferdinand Evers

Prof. Dr. rer. nat. Mark W. Greenlee

Prof. Dr. theol. Andreas Merkt

Prof. Dr. phil. Omar W. Nasim

Prof. Dr. rer. nat. Klaus Richter

Prof. Dr. rer. pol. Daniel Rösch

Prof. Dr. med. Ernst Tamm

Prof. Dr. paed. Oliver Tepner

Prof. Dr. phil. Isabella von Treskow

Editorial Office

Dr. phil. Tanja Wagensohn

Universität Regensburg

93040 Regensburg

Telefon (09 41) 9 43-23 00

Telefax (09 41) 9 43-33 10

Verlag

Universitätsverlag Regensburg GmbH

Leibnizstraße 13, 93055 Regensburg

Telefon (09 41) 7 87 85-0

Telefax (09 41) 7 87 85-16

info@univerlag-regensburg.de

www.univerlag-regensburg.de

Geschäftsführer: Dr. Albrecht Weiland

Abonnementservice

Andrea Winkelmayer

bestellung@schnell-und-steiner.de

Anzeigenleitung

Larissa Nevecny

MME-Marquardt

info@mme-marquardt.de

Herstellung

Universitätsverlag Regensburg GmbH

info@univerlag-regensburg.de

Einzelpreis € 7,00

Jahresabonnement

bei zwei Ausgaben pro Jahr

€ 10,00 / ermäßigt € 9,00

Für Schüler, Studierende und Akademiker/innen im Vorbereitungsdienst (inkl. 7% MwSt) zzgl. Versandkostenpauschale € 1,64 je Ausgabe. Bestellung beim Verlag.

Für **Mitglieder des Vereins der Ehemaligen Studierenden der Universität Regensburg e.V.**, des **Vereins der Freunde der Universität Regensburg e.V.** und des **Vereins ehemaliger Zahnmedizinstudenten Regensburg e.V.** ist der Bezug des Forschungsmagazins im Mitgliedsbeitrag enthalten.

Vielleicht geht es Ihnen ähnlich – wenn man dieser Tage an einem Samstagmorgen durch die Gemüsestanderl am Alten Kornmarkt, vorbei an Dom und Bischofshof, über den Rathausplatz mit dem noch immer imposanten Ratsturm und dem historischen Reichssaalbau in Richtung Gesandtenstraße schlendert, um dort bei einer Tasse Cappuccino noch ein paar Sonnenstrahlen einzufangen, dann erahnt man ansatzweise die Bedeutung, die Regensburg in der Vergangenheit im Konzert mittelalterlicher Metropolen gespielt haben muss.

Als »Metropolis Bavariae« beschrieb Bischof Ardeo von Freising die Stadt mit römischen Wurzeln schon 765, lange bevor Regensburg im 13. Jahrhundert den Status der freien Reichsstadt erhielt und sich ein paar Jahrhunderte später zu einer der führenden europäischen Metropolen mauserte, die Fernhandel über den ganzen Kontinent betrieb und sich als Zentrum von Hochfinanz und Politik innerhalb Europas verstand. Der Rathausplatz, dort wo sich heute vor dem alten Rathaus frisch vermählte Paare nach standesamtlicher Trauung feiern lassen, war damals einer der bedeutendsten Plätze Europas – Sitz des Immerwährenden Reichstag des Heiligen Römischen Reiches Deutscher Nation, an dem sich ab 1663 Kaiser, Fürsten und Herzöge regelmäßig trafen, bis sich 1806 die Türen ein letztes Mal schlossen und Regensburg politisch und wirtschaftlich an Bedeutung verlor.

Heute tummeln sich an historischen Plätzen Alteingesessene und Touristen, Studenten und Zugereiste. Mit der Ansiedlung der Universität Ende der 60er Jahre hat sich die Stadt vom Vergessen und verstaubten Provinzdasein befreit. Die Gründung der heutigen Ostbayerischen Technischen Hochschule und der Bau des Universitätsklinikums waren weitere Katalysatoren auf dem Weg zum wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Aufschwung unserer Stadt und spätestens mit der Öffnung nach Osten hat Regensburg an nationaler und internationaler Sichtbarkeit gewonnen.

So verwundert nicht, dass die Universität Regensburg das Thema »Metropolität« im Rahmen eines Graduiertenkollegs aufgreift: Ausgehend von der Beobachtung, dass gerade europäische Metropolen zwischen dem 16. und 18. Jahrhundert fast ausnahmslos auf römische Gründungen zurückgehen und weltweit die größten Einwohnerzahlen aufweisen fragt das von Professor Jörg Oberste als Sprecher vertre-



© UR/Editorial Office

tene interfakultäre Forschungsprogramm nach der *longue durée* der europäischen Metropole, nach Konstitution, Wirkung und Wandel des metropolitanen Status von der Antike bis zur Industrialisierung. Graduierte und Dozenten nehmen uns in dieser Ausgabe mit auf einen Streifzug durch die Entwicklung ausgewählter europäischer Metropolen, die Bedeutung der Lebensmittelversorgung, Implikationen des Schuldenmachens und Einsichten aus dem Studium historischer Rechnungsbücher.

Auch in dieser Ausgabe – wie gewohnt – ein Querschnitt durch unterschiedliche Fakultäten: So berichtet Professor Georg Rechenauer aus der klassischen Philologie über »Unschönes aus Hellas« und relativiert durch die Offenbarung der Schattenseiten das idealistisch verbrämte Bild der griechischen Antike. Ihr Interesse wecken dürften auch unsere Beiträge zu den unterschiedlichen Facetten der Natur- und Lebenswissenschaften. Über das »Leben und Sterben schwarzer Löcher«, ein Thema eng verknüpft mit dem Physiker Stephen Hawking, darüber wie »Sehen, Verstehen, Handeln« miteinander verknüpft sind und warum wir, 34 Jahre nachdem Rock Hudson seine AIDS-Erkrankung öffentlich gemacht hat, die Infektion zwar gut behandeln, aber nach wie vor nicht gegen HIV impfen können. Dies und weitere Beiträge laden Sie hoffentlich zur Lektüre ein.

Prof. Dr. Ralf Wagner
Redaktionsleitung

Inhalt

Europäische Metropolen – eine lange Geschichte 3

Jörg Oberste

Metropolität und Geschichtlichkeit 8

Arabella Cortese, Gregory Tucker

SPOTLIGHT

Auf Heller und Pfennig 13

Sebastian Pößniker

SPOTLIGHT

Metropolität und Mammon 14

Maria Weber

Die Bedeutung der Fora 16

Giulia Fioratto, Mercedes Och

INTERVIEW

Rom als Modell: Sible de Blaauw, Valentino Pace, Albert Dietl im Gespräch 22

Markus Löx

Mailand: Auf und Ab einer vormodernen Metropole 26

Markus Löx, A.-Claudio Schäfer

London auf dem Weg zur Metropole 32

Charlotte Neubert

Vom Leben und Sterben Schwarzer Löcher 36

Norbert Bodendorfer

Unschönes aus Hellas 40

Georg Rechenauer

Sehen, Verstehen, Handeln 45

Angelika Lingnau

SPOTLIGHT

Der Wolf und die Mikroben 49

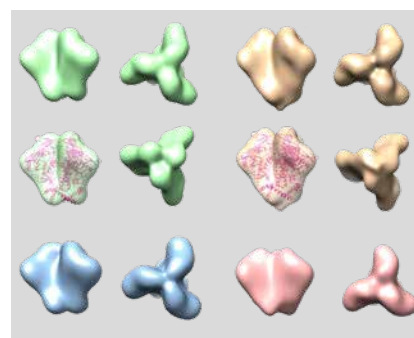
Erhard Strohm

35 Jahre HIV – Ist ein Ende der Pandemie in Sicht? 51

Benedikt Asbach, David Peterhoff, Ralf Wagner

Die Renaissance des Dorfs (in der Stadt) 59

Kristof Dascher



Vom Leben und Sterben Schwarzer Löcher

Zur Forschung von Stephen Hawking und der Zukunft des Themas

Norbert Bodendorfer

Stephen Hawking war bis zu seinem Tod im März 2018 fasziniert von Schwarzen Löchern und deren Schicksal. Während seiner ganzen Karriere arbeitete er an dafür relevanten Fragen, sein letzter Artikel über das Thema wurde nur wenige Tage vor seinem Tod fertig gestellt und im Oktober 2018 von seinen Koautoren veröffentlicht. Hawking lieferte insbesondere grundlegende Antworten auf die Frage, was mit einem Schwarzen Loch im Laufe seines Lebens geschieht.

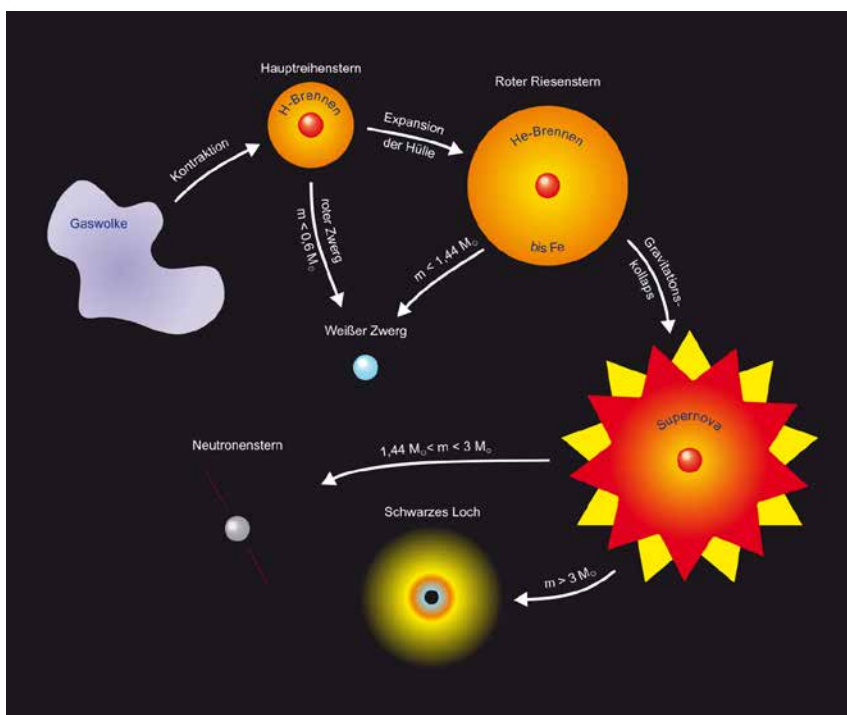
Genau dieser Fragestellung möchten wir hier nachgehen, dabei Hawkings Beiträge erläutern, und schließlich einen Ausblick darauf wagen, was zukünftig zum Thema gesagt werden könnte.

Das Schicksal von Sternen

Sterne, wie zum Beispiel unsere Sonne, existieren aufgrund eines delikaten Gleichgewichtes verschiedener physikalischer

Kräfte. Auf der einen Seite bewirkt die Gravitationskraft, dass sich ein Stern zusammenziehen möchte. Dabei erhöhen sich Druck und Temperatur in seinem Inneren, was schließlich dazu führt, dass Wasserstoff zu Helium – und später auch zu schwereren Elementen – verbrennt. Der dabei entstehende Gasdruck kompensiert die Wirkung der Gravitation und bewirkt ein Gleichgewicht.

Wenn alles brennbare Material aufgebraucht ist, dann hängt das weitere Schicksal des Sterns vor allem von seiner Größe ab. [1] Ursprünglich kleinere Sterne verbleiben als stabile, dunkle Himmelsobjekte zurück. Bei größeren Sternen kann es jedoch passieren, dass die Gravitationskraft mangels Kompensation überhandnimmt, so dass der Stern kollabiert und zum *Schwarzen Loch* mutiert. Wäre der Kollaps total, dann würde er weiter und weiter schrumpfen, um sich schließlich in einen Punkt zusammenzuziehen. In dieser *Singularität* sollten die bekannten physikalischen Gesetze ihre Gültigkeit verlieren. Ein solches Objekt fasziniert, und man würde es gerne näher untersuchen. Es gibt konkrete Hinweise, dass im Zentrum unserer Galaxie, der Milchstraße, ein Ding von solcher Sorte existieren könnte.



1 Typische Entwicklungsstadien eines Sterns. Materie, z. B. eine Gaswolke, zieht sich unter der Gravitationskraft zusammen. Der dadurch entstehende Druck im Inneren erlaubt es, dass leichte zu schwereren Elementen verbrennen können. Abhängig von der Größe und Zusammensetzung des Sternes kann nach dem Aufbrauchen des brennbaren Materials ein Schwarzes Loch entstehen.

Abbildung: N.N. (<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sternentwicklung.png>); Lizenz: GPL (<https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html>)

Gekrümmte Raumzeit

Schwarze Löcher sind nicht leicht zu untersuchen. Die Beschreibung des Kollapses und dessen, was danach verbleibt, benötigt Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie. Ihr zufolge kann die Gravitationskraft als *Krümmung der Raumzeit* beschrieben werden. Bei kleiner Krümmung, das heißt

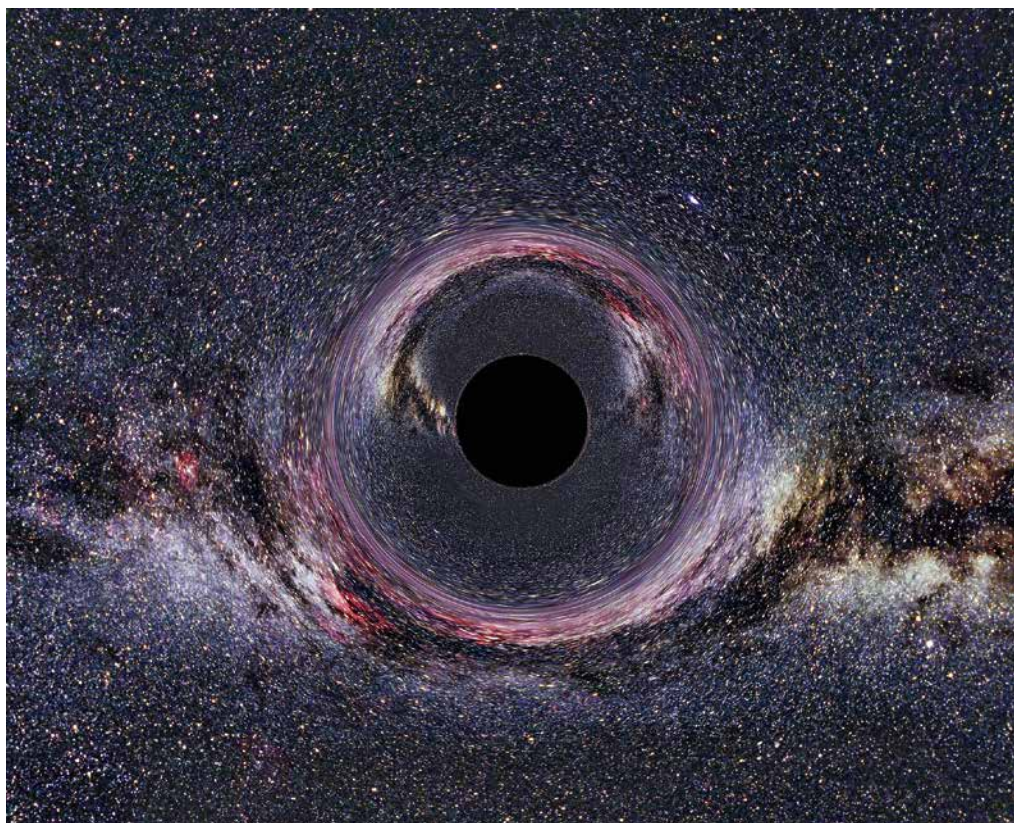
für Objekte wie zum Beispiel Planeten und ihre Monde, gilt das newtonsche Gravitationsgesetz als Grenzfall. Für sehr schwere und gleichzeitig sehr kompakte Objekte weicht Einsteins Theorie jedoch drastisch von Newtons Beschreibung ab: Die Schwarzen Löcher tauchen auf. [2]

Eine zentrale Implikation von Einsteins Theorie ist die *kosmische Zensur*. Sie impliziert für Schwarze Löcher, dass nichts, auch nicht das Licht, aus dem Inneren (speziell von der Singularität) eines Schwarzen Lochs entkommen kann. Die Außenwelt nimmt das Schwarze Loch als Horizont wahr, von dem nichts kommt und hinter den infolgedessen nicht mehr geschaut werden kann. Es sollte am Himmel komplett schwarz erscheinen. Daher rührt sein Name. Charakterisiert wird das Loch zum Beispiel durch die Größe des Horizontes. Bei einem Schwarzen Loch der Masse unserer Sonne (rund $2 \cdot 10^{30}$ kg) ergibt Einsteins Theorie einen Durchmesser von etwa sechs Kilometern.

Vom Leben Schwarzer Löcher

An dieser Stelle setzte Hawking an. Seine erste Frage war, ob Schwarze Löcher wirklich als typische Lösungen in der Allgemeinen Relativitätstheorie auftreten, oder eher als Artefakte ganz spezieller und wenig realistischer Lösungen angesehen werden sollten. Die Antwort lieferte Hawking zusammen mit Roger Penrose in den 60er Jahren in Form mathematischer Theoreme: Singularitäten treten in Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie unter sehr allgemeinen Voraussetzungen auf und die Theorie liefert keinen Hinweis darauf, warum sie nicht existieren sollten.

Nach diesem Durchbruch rückten Schwarze Löcher in den Fokus der Forschung. Es stellte sich im Folgenden merkwürdigerweise heraus, dass sie Gesetzen gehorchen, welche analog zu denen der Wärmelehre sind. Hawking leistete auch hier einen entscheidenden Beitrag durch sein Flächen-Theorem: Die Oberfläche Schwarzer Löcher kann nur zunehmen (durch Absorption nahegelegener Objekte) oder gleich bleiben. Diese Einsicht erlaubte es ihm und anderen später, die Größe der Oberfläche eines Schwarzen Loches mit einer thermodynamischen Entropie zu identifizieren. Genau wie die Entropie im Alltagsleben, so gehorcht auch die eines Schwarzen Loches dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und nimmt daher zeitlich niemals ab.



2 Simulation eines Schwarzen Loches und der naheliegenden Sterne. Vom Schwarzen Loch selbst erhalten wir keine Information, da selbst Licht dem Loch nicht entkommen kann. In der Region um das Schwarze Loch herum sehen wir aber dessen durch die Gravitationskraft ausgeübten Einfluss auf die Raumzeit als Verzerrung.

Abbildung: Ute Kraus, Institut für Physik, Universität Hildesheim, Tempolimit Lichtgeschwindigkeit (<https://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/>); Milchstraßenpanorama im Hintergrund: Axel Mellinger; (<https://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/galerie/galerie.html>); Lizenz: CC BY-SA 2.0.DE (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de/>)

Es war damit gezeigt, dass Schwarze Löcher im Laufe ihrer Lebenszeit nur wachsen können – jedenfalls im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Unsterblichkeit, zusammen mit unbegrenzt möglichem Wachstum, schien erwiesen. Es blieben aber wichtige Fragen offen. Insbesondere wunderte man sich, was mit Materie geschieht, wenn sie von einem Schwarzen Loch aufgesogen wird.

Als eine besondere Schwierigkeit wurde angesehen, dass beim Aufsaugen Information verloren geht. Jeder Gegenstand erzählt ja eine Geschichte. Er trägt seine Vergangenheit im Prinzip mit sich, wenn sie auch praktisch nicht leicht zu rekonstruieren sein mag. Wenn nun ein Gegenstand in ein Schwarzes Loch geworfen wird, beispielsweise ein Buch, dann ist nach dessen Durchgang durch den Horizont alles, wofür es steht, für die Außenwelt verloren. Von außen gesehen nähme lediglich die Oberfläche des Loches zu, für zwei verschiedene Bücher mit gleicher Masse jeweils um genau das gleiche Maß. Mehr sähe man nicht. Diese Beobachtung

folgt aus der Allgemeinen Relativitätstheorie und ist als »Glatzen-Theorem« bekannt: Ein Schwarzes Loch hat keine »Haare«, welche die darin enthaltene Information für die Außenwelt zugänglich machen könnten. Man sieht stattdessen nur eine schwarze, komplett homogene Oberfläche. Die Information in dem Buch schien somit für die Außenwelt verloren.

Vom Sterben Schwarzer Löcher

Doch das bis hierher gezeichnete Bild ist noch nicht das Ende. In einer weiteren grundlegenden Arbeit von 1974 hat Hawking es erschüttert. Es beruht auf Einsteins Relativitätstheorie, ignoriert jedoch die Quantenphysik von Heisenberg und Schrödinger. Hawking kombinierte beide in der Näherung, dass die Gravitation selbst nicht quantisiert ist. Er kam zu dem Schluss, dass die durch das Schwarze Loch erzeugte Raumzeitkrümmung dazu führt, dass das Schwarze Loch Elementarteilchen emittiert und dadurch ständig an Masse



Foto/Image-Credit: NASA / Paul. E. Alers

3 Professor Dr. Stephen Hawking im April 2008 bei einem Vortrag zum 50. Jahrestag der NASA an der Washington University in Washington.

verliert. Ohne kontinuierliche Zuführung neuer Materie würde das Schwarze Loch irgendwann zerstrahlen. Wie das Endprodukt aussehen würde, konnte Hawking aber nicht sagen, denn kurz vor dem tatsächlichen Eintreten des Exitus brach die für die Vorhersage gemachte Annahme zusammen.

Ebenso wie die Unsterblichkeit des Loches war damit auch dessen totale Schwärze widerlegt. Allerdings zeigte sich, dass die fortan als *Hawking-Strahlung* bekannte Emission Schwarzer Löcher exakt thermisch war und deshalb praktisch keine Information über sich selbst und die Materie, die es fortwährend verschluckt, freigibt. Das Problem der Informationsvernichtung war damit also nicht gelöst, sondern wurde weiter verschärft, da Schwarze Löcher nun sogar verschwinden konnten, ohne die zuvor aufgesogene Information je wieder preiszugeben. Für Hawking selbst – und viele seiner Zeitgenossen – war genau

dies der Stein des Anstoßes. Denn bis heute kennen wir keinen physikalischen Prozess, in dem Information im eigentlichen Sinne vernichtet wird. Das *Informationsparadoxon* war geboren.

Im Anschluss an Hawkings neuerlichen Durchbruch folgten ein Fülle von Arbeiten und Spekulationen über verschiedene Fragen: Wie konnte Hawkings Theorie weiter verbessert werden? Ist die Information vielleicht doch irgendwie in einer versteckten Form in der Hawking-Strahlung verborgen? Bleibt nach der schlussendlichen Zerstrahlung vielleicht doch ein Endprodukt übrig? Falls ja, welche Information enthält es dann?

Finale Antworten auf diese Fragen kennen wir bis heute nicht. Offenbar ist es so, dass ein umfassendes Verständnis Schwarzer Löcher nicht ohne eine Quantentheorie der Gravitation möglich ist, die wir bis heute nicht zur Verfügung haben. Bisher (partiell) fehlgeschlagene Versu-

che, das Informationsparadoxon zu lösen, könnten einfach daran gescheitert sein, dass falsche Annahmen über die globale Struktur der Raumzeit aus der klassischen, also nicht quantisierten, Allgemeinen Relativitätstheorie übernommen wurden. Wir werden später genauer auf diesen Punkt zu sprechen kommen.

Vernichter von Information?

Zuvor möchten wir jedoch noch einmal zurückblicken und genauer auf die Historie nach der Entdeckung der Hawking-Strahlung bis heute eingehen. Das Informationsparadoxon entwickelte sich zu einer zentralen Fragestellung, und eine Vielzahl von Vorschlägen für dessen Lösung wurde gemacht. Zu begründen versuchte man jeweils, wie Information der Vernichtung entgehen und irgendwie nach außen dringen kann; außerdem, wie diese Information am Horizont gespeichert werden kann. Dabei blieb stets unklar, ob die Erwartungshaltung, die auf den tradierten Theorien fußte, überhaupt gerechtfertigt war. War sie es nicht, dann existierte vielleicht gar kein Problem. Hawking war gerade dieser Ansicht. Er glaubte lange, dass Information tatsächlich von Schwarzen Löchern vernichtet werden würde. Diese Überzeugung führte 1997 zu einer berühmten Wette mit John Preskill, der behauptete, dass das Paradoxon durch Quantengravitationseffekte aufgelöst werden könnte. Zusammen mit Hawking hielt auch Kip Thorne dagegen, der 2017 für seine Arbeiten zu Gravitationswellen mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde.

In den Folgejahren erlebten verschiedene Zugänge zur Quantengravitation eine neue Blütezeit. Insbesondere das *holographische Prinzip*, nachdem die Physik der Quantengravitation an Oberflächen – wie zum Beispiel dem Horizont eines Schwarzen Loches – stattfindet, führten zu der Hoffnung, das Informationsparadoxon schließlich lösen zu können. Frühe Verfechter dieser Ideen waren Gerard 't Hooft und Leonard Susskind. Sie vertraten die Ansicht, Quantenmechanik und Allgemeine Relativitätstheorie müssten miteinander verträglich sein und sahen holographische Ideen als Schlüssel zur Vereinheitlichung an. Hawking selbst war nie ein starker Verfechter dieser Ideen, änderte aber seine Meinung bezüglich des Paradoxons in den folgenden Jahren. Auf einer Konferenz in Dublin verkündete er 2004, dass Schwarze

Löcher wohl doch Haare hätten. Er präsentierte dafür eine neue Rechnung basierend auf Techniken, welche er in den 80er Jahren zusammen mit James Hartle entwickelt hatte. Sein Lösungsvorschlag bleibt aber umstritten und führte bisher nicht zu dem erhofften Konsens.

Eine weitere Verschärfung des Paradoxons bzw. ein Lösungsvorschlag wurde 2012 von einer amerikanischen Forschungsgruppe präsentiert. Unter scheinbar unproblematischen physikalischen Annahmen – der Gültigkeit von Quantenfeldtheorie und dem Relativitätsprinzip – wurde aus dem Informationsparadoxon gefolgert, der Horizont eines Schwarzen Loches sei von einer »Feuerwand« umgeben, welche jegliche hereinfliegende Information schon dort »verbrennen« würde. Dieser Vorschlag wurde in den letzten Jahren viel diskutiert, konnte sich aber auch nicht durchsetzen.

Die Anzahl von Vorschlägen, die letztlich doch nicht überzeugten, proliferiert. Strukturell liegt dies daran, dass es sehr schwierig ist, Experimente zu machen, welche die Konsequenzen des Informationsparadoxons direkt testen können. Einerseits erlauben es höchst interessante Fortschritte in der Experimentalphysik, Schwarze Löcher und ihre Horizonte im Labor zu simulieren. Es bleibt aber unklar, bis zu welchem Grade die Simulation die Eigenschaften realer Schwarzer Löcher wirklichkeitsgetreu reproduziert. Wenn eine »Feuerwand« am Horizont Schwarzer Löcher tatsächlich existierte, dann könnte sie im Prinzip mit zukünftigen Teleskopen gesehen werden. Wie man aber konkurrierende Lösungsversuche, die ohne eine solche Wand operieren, weiter experimentell untersuchen würde, bleibt unklar. Diskussionen um das Informationsparadoxon werden damit auf absehbare Zeit vor allem theoretischer Natur sein.

Dieses Schicksal scheint auch Hawkings letztem Vorschlag zur Rettung der Informationserhaltung beschieden zu sein, der auf »weichen Haaren« beruht. Sein letzter Artikel, posthum erschienen im Oktober 2018, war einer Lösung des Paradoxons auf Basis dieser neuartigen und wenig anschaulichen Informationsträger gewidmet.

Wiedergeburt?

Kommen wir zum Schluss noch einmal auf die Singularitäten zurück, also auf Ereignisse in Raum und Zeit, an denen die

Allgemeine Relativitätstheorie ihre Gültigkeit verlieren sollte, weil Effekte der Quantenphysik wichtig werden. Um die Natur dieser Singularitäten richtig zu verstehen, muss letztlich eine Theorie der Quantengravitation entwickelt werden, die eine experimentelle Bestätigung zulässt. An der Lösung dieses Problems arbeiten wir auch hier in Regensburg. Unser Ansatz basiert auf der *Schleifenquantengravitation*, welche als besonders vielversprechender Kandidat für eine Theorie der Quantengravitation gilt. Damit können Rechnungen gemacht werden, die das Innere eines Schwarzen Loches quantenmechanisch beschreiben.

Diese Rechnungen zeigen, dass die Singularität tatsächlich durch Quanteneffekte aufgelöst wird. Der durch die Gravitation erzwungene Kollaps endet, sobald die Materie zu einer bestimmten (sehr hohen) Dichte komprimiert wurde. Danach fliegt die Materie wieder auseinander und das Schwarze Loch »explodiert«. Die Kraft dieser Explosion ist so gewaltig, dass man nicht in die Region der Explosion eindringen kann, egal wieviel Kraft man dafür aufwendet. Solch eine Situation ist genau invers zu der eines Schwarzen Loches, welches eine Region beschreibt, die man nicht mehr verlassen kann. Sie wird deshalb als *Weißes Loch* bezeichnet.

Betrachten wir nun noch einmal die Situation, in der ein Buch in ein Schwarzes Loch geworfen wird. Nach dem Eindringen in das Schwarze Loch und anschließendem

Verlassen des daraus entstandenen Weißen Lochs kann das Buch prinzipiell wieder gelesen werden, denn es ist nicht an einer Singularität oder einer Feuerwand verbrannt. Die darin enthaltene Information ist somit gerettet. Das Paradoxon wäre dadurch gelöst, dass das Buch nie vernichtet wurde. Stattdessen ist es aus einem Weißen Loch heraus wiedergeboren worden.

Es bleibt offen, ob sich Vorschläge dieser Art durchsetzen werden. Die Diskussion zeigt jedoch, dass Quantengravitation, auch wenn sie nur in sehr extremen Situationen relevant sein sollte, einen großen Einfluss auf unsere Raumzeit und damit auch auf das Paradoxon haben kann. John Preskill könnte deshalb bei seiner Wette Recht behalten. Hawking hatte er ja bereits überzeugt.

Literatur

Stephen Hawking, Eine kurze Geschichte der Zeit. 28. Auflage. Hamburg: Rowohlt, 2011.

Leonard Susskind, The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics. Reprint. New York: Black Bay Books / Little, Brown and Company, 2009.

Leonard Susskind, The Holographic Universe: An Introduction to Black Holes, Information and the String Theory Revolution. Singapur: World Scientific, 2004.

Norbert Bodendorfer, Fabio M. Mele, Johannes Münch, Effective Quantum Extended Spacetime of Polymer Schwarzschild Black Hole. Vorabdruck, verfügbar unter <https://arxiv.org/abs/1902.04542>



Foto © Christina Bodendorfer

Dr. **Norbert Bodendorfer** leitet seit September 2017 eine Nachwuchsgruppe zum Thema Quantengravitation am Institut für Theoretische Physik der Universität Regensburg. Nach seinem Studium in Erlangen und Regensburg im Forschungsstudiengang Physik und der Diplomarbeit am Albert-Einstein-Institut in Potsdam wurde er 2013 in Erlangen promoviert. Im Anschluss ging er als Postdoktorand an die Pennsylvania State University, USA, und an die Universität Warschau, Polen, sowie an die LMU München als Stipendiat der Alexander von Humboldt-Stiftung. Seine Forschungsgruppe in Regensburg wird über das Elitenetzwerk Bayern finanziert. Der Autor hat über 30 Forschungsarbeiten in Fachzeitschriften publiziert, darunter mehrere von den Editoren als Highlight ausgewählte. 2016 wurde er mit dem Förderpreis *Dozentur Professor Bernhard Heß* der Regensburger Universitätsstiftung ausgezeichnet und erhielt den START-Preis der Stiftung für die polnische Wissenschaft.