

Schwarze Löcher sind, wo Gott durch Null dividiert hat.

Steven Wright (geb. 1955)

Liebe Leserin, lieber Leser,

vor 230 Jahren wurde in England, im County Devonshire, Charles Babbage geboren. Der erfindungsreiche Mathematiker, Mitbegründer der Royal Astronomical Society und Mitglied der Statistical Society, starb 1871 in London. Vier Jahre vor Hermann von Helmholtz (1821–1894) erfand er den Augenspiegel, was unbeachtet blieb. Bekannt wurde Babbage durch die Konstruktion eines Rechenautomaten zur Erstellung von Funktionstabellen, seiner Differenzenmaschine. 1822 stellte er das Projekt der Königlich-Astronomischen Gesellschaft in London vor und erhielt 1700 £ Anschubfinanzierung für ein Pilotprojekt. Das war vor nunmehr 200 Jahren. Die Maschinerie bestand aus 25 000 Einzelteilen. Funktioniert hatte sie nie. Die Fertigungsgenauigkeit im viktorianischen England ließ¹ dies nicht zu. Babbage dachte weiter. Er träumte 1834 von einem Lochbandgesteuerten² Rechenautomaten mit einem 20-kByte-Speicher, der „Analytical Engine“, und er hatte auch bereits eine erste Programmier„kraft“ an der Hand. Die mathematisch begabte Tochter des romantischen Dichters Lord Byron (1788–1824), Lady Augusta Ada King, Gräfin von Lovelace (1815–1852), erkannte das Potenzial der Maschine, das weit über das rein Numerische hinausgeht. So ein Universalcomputer könne im Prinzip alles – sogar Musik komponieren! (Sie selbst schrieb ein Programm zur Berechnung von Bernoulli’schen Zahlen.) Heute ist eine Programmiersprache nach der Lady benannt. Anders als Alan Turing (1912–1954) ein Jahrhundert darauf, sprach sie dem programmierbaren Computer Kreativität ab. Künstliche Intelligenz (KI) war noch kein Thema, und der menschliche Geist schwebte noch unangefochten über den Dingen.

Ein Bild machte im Mai Schlagzeile. Unter der Rubrik „Aus Wissenschaft und Technik“ stieß man unweigerlich auf die 1,3-mm-Radioaufnahme des

¹Mit heutigen Präzisionswerkzeugen bringen Feinmechaniker ein solches Monstrum tatsächlich zum Laufen, wie in Londons Wissenschaftsmuseum zu bewundern ist.

²Lochkartensteuerung kannte man bereits – vom Jacquardwebstuhl.

innersten Kerns der Galaxis. Es handelt sich um die prominente Radioquelle Sagittarius A*, kurz Sgr A*. (Dass der Schütze eine himmlische Quelle von „Störstrahlung“ ist, war 1933 dem Radiopionier Karl Guthe Jansky (1905–1950) von den *Bell Telephone Laboratories* aufgefallen.) Das schwarze 4-Millionen-Sonnenmassen-Loch selbst ist unsichtbar. Aber seinen Schatten sieht man dank der hellen Umgebung. Letztere beweist, dass das schwarze Loch nicht von der Welt isoliert ist. Gewöhnlich einverleibt es sich gravitativ Materie aus der Umgebung. Da es vergleichsweise winzig ist, verdaut es nur drehimpulsarme Nahrung, d. h., Rotationsenergie muss im großen Stil „vernichtet“ (dissipiert) werden, damit Stoff nach Innen – ins Loch – und Drehimpuls nach außen abfließen kann. Es ist diese Energiedissipation durch eine viskose („zähe“) Akkretionsscheibe, welche die Umgebung eines schwarzen Lochs hell aufleuchten lässt. Mehr zu Sgr A* in diesem Newsletter,
Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Juni

Wir beginnen mit der Sonne. Am 1. Juni durchheilt die NASA Sonnensonde „Parker“ zum 12-ten Male das Perihel ihrer langgestreckten Ellipsenbahn. Sie kommt unserem Zentralgestirn auf $8\frac{1}{2}$ Millionen Kilometer nahe. Das sind gut zwölf Sonnenradien. (Zum Vergleich: Der Schwarzschildradius des schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxis misst 17,6 Sonnenradien.) Der Namensgeber, der Sonnenforscher Eugene Newman Parker, hatte den vergangenen Periheldurchgang im November noch erlebt. Er starb am 15. März 2022 im 95. Lebensjahr in Chicago.

Da wir gerade bei der Sonne sind: Am 21. Juni steht die Mittagssonne am höchsten in diesem Jahr. Um 11 Uhr 14 MESZ beginnt auf der Nordhalbkugel der Sommer!

Venus ist Morgenstern, wobei sie sich von uns aus gesehen der Sonne stetig nähert. Sie wird kleiner, aber der sonnenbeleuchtete Anteil im Fernrohrbild nimmt zu. Auch Mars, Jupiter und Saturn stehen immer früher auf, obwohl sie auf Distanz zur Sonne gehen. Am Monatsende ist Jupiter kurz nach der MEZ-Mitternacht über dem Horizont. Saturn schafft es sogar noch eine gute Stunde eher. Mit seinem Stillstand am 5. Juni beginnt seine diesjährige Oppositionsphase. Mars ist am Monatsanfang nur gut ein Grad östlich vom hellstrahlenden Jupiter. Der Abstand zwischen den beiden vergrößert sich im Laufe des Monats auf 19 Grad.

Sagittarius A*: das schwarze Superloch von nebenan

Am 12. Mai war es so weit. Der interessierten Öffentlichkeit wurde ein detaillierter Blick ins galaktische Zentrum gegönnt: Ein hochaufgelöstes Radiobild, fabriziert vom *Event Horizon Telescope* (EHT), zeigt den Schatten des schwarzen 4-Millionen-Sonnenmassen-Superlochs. Es ähnelt, wie nicht anders zu erwarten³, der EHT-Aufnahme des schwarzen Superlochs im Zentrum der Riesengalaxie M87, vorgestellt im April 2019. Obwohl letzteres etwa 2000-mal weiter von uns entfernt ist als ersteres, ist die Winkelausdehnung am Himmel vergleichbar klein. Der Grund ist folgender: Das Riesenloch in M87 übertrifft das im Zentrum unserer Galaxie an Masse wie Radius um das 1600-fache. Man fragt sich, warum hat es weitere drei Jahre gedauert, ein Bild von dem kleineren, aber dafür näheren schwarzen Loch zu schießen? Auch das hat mit den unterschiedlichen Größen zu tun. Die Umlaufzeit (auf der letzten stabilen Bahn) um das M87-Loch bemisst sich nach Tagen, die um das galaktische schwarze Loch nach Minuten. Das Aussehen des letzteren ändert sich noch während einer Messreihe⁴! Die EHT-Astronomen mussten erst lernen, mit chaotisch schnellen Schwankungen umzugehen. Es galt, wie immer in der Wissenschaft, das Zufällige und Ungefähre vom Wesentlichen zu scheiden. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich daraus, dass sich das Herz der Milchstraße hinter dichten Staubansammlungen und heißen⁵ Gasen verbirgt. Das Zentrum der Galaxis ist Tummelplatz für Hoch- und Niederenergie-Astrophysiker. Im Optischen, d. h. für traditionelle Stern-gucker, ist dort rein gar nichts zu holen.

Zunächst war es die Hochenergieastrophysik, nämlich die Röntgenspektroskopie, mit der man den schwarzen Löchern am dichtesten auf die Pelle rückte. Da gibt es eine merkwürdig gestaltete Eisenlinie bei 6,4 keV. Ging man davon aus, die Linie entsteht am Innenrand einer Akkretionsscheibe, also im Abstand von wenigen Schwarzschildradien, konnte man das seltsame Linienprofil deuten. Nun haben die Radioastronomen mit der direkten Abbildung der Quellen in M87 und in Sgr A* den Röntgenleuten die Show gestohlen. Ein Radiobild ist allemal überzeugender als eine Röntgenlinie.

Das EHT begann 2017 mit acht über den Globus vernetzten Teleskopen. Ei-

³Der Grund ist die Skalenfreiheit. Schwarzschildradius und Umlaufzeit nahe dem Ereignishorizont gehen einfach mit der Masse. Im M87-Zentrum ist halt alles 1 1/2-Tausendmal größer und dauert 1 1/2-Tausendmal länger als im galaktischen Zentrum.

⁴Da die Bilderzeugung beim EHT die Rotation der Erde nutzt, liefern Schnappschüsse nur unscharfe Bilder.

⁵Fluktuationen in der Elektronendichte sorgen selbst in der mm-Radioastronomie noch für Bildunschärfen.

nes davon operiert vom Südpol aus. Beteiligt sind auch die 64 Schüsseln des Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) in den chilenischen Anden. Das Erfolgsrezept besteht in der phasenrichtigen Verkopplung der Teleskope zu einem gigantischen Interferometer. Man spricht von VLBI: *Very Long Baseline Interferometry*. Inzwischen sind weitere Sub-mm-Teleskope an das Netzwerk angeschlossen. Eine Verbesserung der Winkelauflösung um 50% erhofft man sich durch eine drastische Verkürzung der Beobachtungswellenlänge von 1,3 mm auf 0,86 mm.

Bei 1,3 mm Wellenlänge hätte eine Parabolantenne vom Durchmesser der Erde eine Trennschärfe von $2,5 \cdot 10^{-5}$ Bogensekunden. Das entspricht dem Durchmesser eines Atoms, betrachtet aus einem Meter Abstand, oder aber etwa $2\frac{1}{2}$ Schwarzschildradien im Falle des Sgr A*-Lochs, betrachtet aus 27 000 Lichtjahren Entfernung. Man kann tatsächlich verfolgen, was sich in wenigen Schwarzschildradien Entfernung vom schwarzen Loch abspielt. Zum Vergleich: Die zentrumsnahen Sterne, deren Kepler-Ellipsen um das schwarze Loch man bislang im Infraroten hat verfolgen können, näherten sich diesem im Extremfall⁶ auf lediglich $1\frac{1}{2}$ -Tausend (!) Schwarzschildradien.

Zur Veranschaulichung der Verhältnisse versetzen wir die $4,15 \cdot 10^6$ Sonnenmassen an den Ort der Sonne. Der Schwarzschildradius⁷ betrüge 17,6 Sonnenradien oder ungefähr $\frac{1}{5}$ des mittleren Merkurabstands von der Sonne. Bei einem nicht-rotierenden schwarzen Loch markiert der Schwarzschildradius die Lage des sog. Ereignishorizonts.

Was wir vom Sgr A*-Loch zu sehen bekommen, ist nicht das Loch selbst, sondern nur der innere helle Teil einer das Loch sporadisch fütternden Akkretionsscheibe, diese allerdings durch die gravitative Lichtablenkung verzerrt. Hinzu kommt der Dopplereffekt⁸: Scheibenteile, die auf uns zu rasen, erscheinen heller, als solche, die sich von uns hinweg bewegen. Anscheinend sind die Daten mit den berechneten⁹ Bildern für rotierende schwarze Löcher (Kerr-Black-Holes) im Rahmen der Messgenauigkeit vereinbar.

Wie das EHT-Team versichert, sei eine nicht-ringförmige Struktur so gut

⁶Der Stern „S2“ hat eine Umlaufzeit von 16,0 Jahren.

⁷Der Schwarzschildradius beträgt 2,95 km pro Sonnenmasse. Karl Schwarzschild (1873–1916) war ab 1909 Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam. Er fand als erster eine exakte Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen, sehr zur Überraschung von Albert Einstein selbst.

⁸Der transversale Dopplereffekt spielt mit: In einem Gas, das sich schnell bewegt, gehen die Uhren langsamer. Die Gravitationsrotverschiebung wirkt in die gleiche Richtung.

⁹Das Aussehen einer Akkretionsscheibe nahe dem Ereignishorizont zu berechnen, ist zwar numerisch aufwendig, aber unproblematisch. Die Lichtausbreitung folgt Geodäten.

wie ausgeschlossen. Mit dem Nachweis einer zentralen Depression von fünf Schwarzschildradien Ausdehnung, dem „Schatten“, ist das Black-Hole-Modell alternativlos. Was weiterhin dafür spricht: Das schwarze Loch ist eine natürliche Konsequenz aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, der besten Schwerkrafttheorie, die wir haben. Man muss sich bloß daran gewöhnen, dass es etwas in der Wirklichkeit gibt, das dem platonischen Reich der reinen Mathematik entsprungen zu sein scheint. (Allerdings ist das letzte Wort in dieser Angelegenheit noch nicht gesprochen, wie Quantenphysiker nicht aufhören zu betonen.)

Am schwarzen Loch führt kein Weg vorbei. Es ist ein Trick der Natur, die (unphysikalische) Singularität, die bereits in der Newtonschen Theorie der Schwerkraft angelegt ist, dadurch unwirksam zu machen, indem sie sie „bemäntelt“. Es heißt im Jargon der Gravitationsfachleute, es gäbe keine „nackten“ Singularitäten. Damit kann die Physik leben. Die Erkennbarkeit der Welt wird zu einer Sache des Standpunktes (und Wagemuts). Wer wissen will, was hinter'm Ereignishorizont abläuft, kann sich ja (drehimpulsfrei) fallen lassen.

Was den Erkenntnistheoretiker freut: Ein schwarzes Loch wird durch drei Größen (fünf Zahlen) e r s c h ö p f e n d charakterisiert, Masse, Drehimpuls¹⁰ und elektrische Ladung. Da letztere im Großen keine Rolle spielt, verbleiben sogar nur zwei freie Parameter. (Vergleichsweise kompliziert und nicht frei von Annahmen ist indes die Modellierung der das schwarze Loch fütternden Akkretionsscheibe und ev. vorhandener Jets.) Lassen sich die Messungen nahe dem Ereignishorizont (im Rahmen der Messgenauigkeit) partout nicht durch ein Modell mit einer plausiblen Kombination aus Masse- und Drehimpulswert „erklären“, gibt es keinerlei Ausflüchte. Dann wäre Einstein widerlegt. Für den Epistemologen Sir Karl Popper (1902–1994) galt deshalb die Einsteinsche Theorie als das Paradebeispiel einer f a l s i f i z i e r b a r e n Theorie.

¹⁰drei Zahlen, da ein Vektor