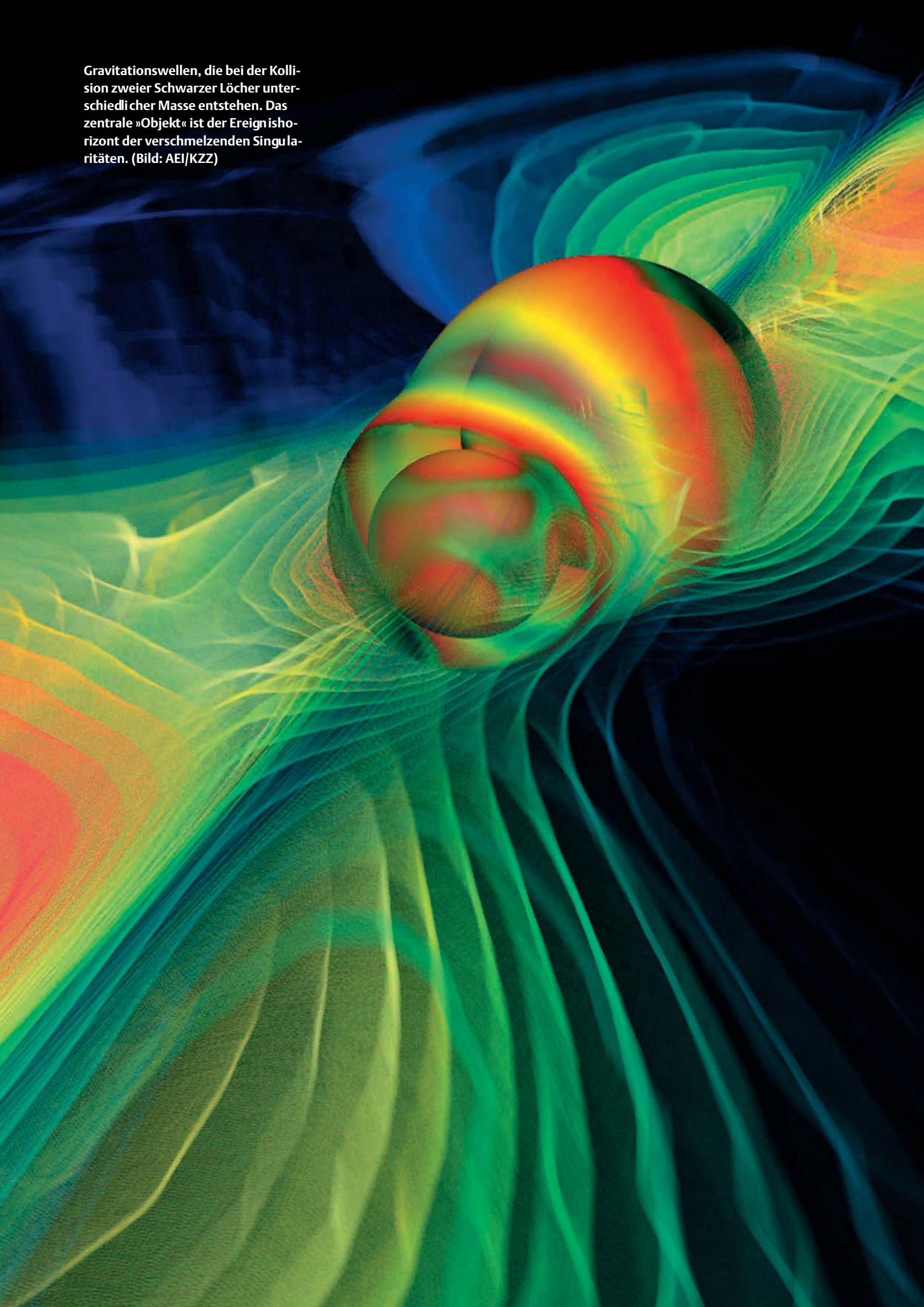
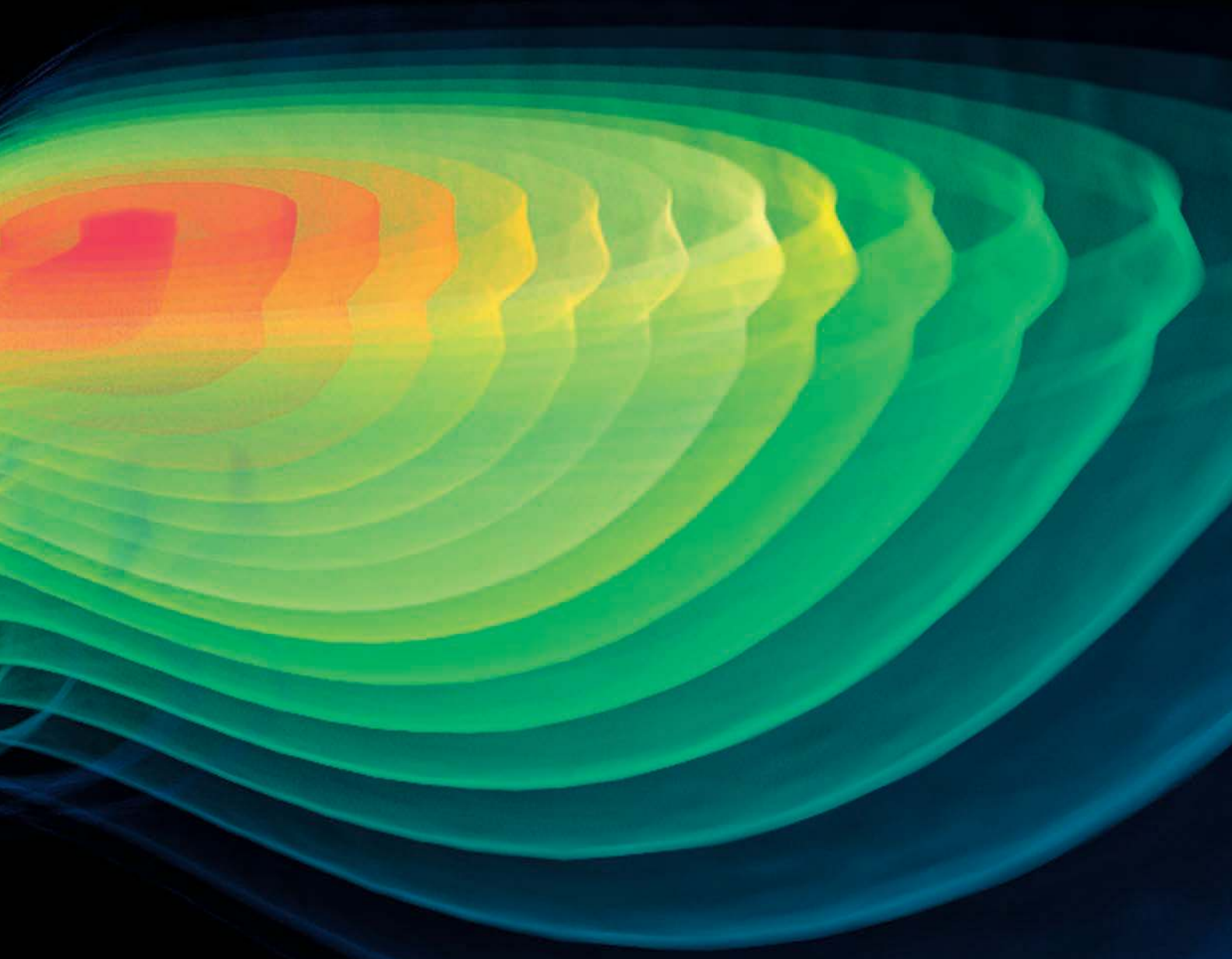


Gravitationswellen, die bei der Kollision zweier Schwarzer Löcher unterschiedlicher Masse entstehen. Das zentrale »Objekt« ist der Ereignishorizont der verschmelzenden Singularitäten. (Bild: AEI/KZZ)





Kollisionen Schwarzer Löcher

*Beobachtungen
im Datenraum*

Von Werner Benger

Verschmelzende Schwarze Löcher setzen starke Gravitationswellen frei. Ihre Simulation erfordert den Einsatz von Supercomputern und ausgefeilte Programmiertricks.

Ich erinnere mich noch lebhaft an den heißen Juni des Jahres 1999 – das Thermometer zeigte 105 Grad an – Fahrenheit, wohlgemerkt, denn ich war damals gerade in Illinois, USA. Das sind immerhin etwa 40 Grad Celsius, und die Straßen des kleinen Städtchens Champaign südlich von Chicago waren wie ausgestorben, alles flüchtete vor »the midsummer heat« in die klimatisierten Innenräume. Nur ich saß – noch immer etwas fröstelnd – in der prallen Sonne und wärmte mich. Was war geschehen?

Fröstelnd am Supercomputer

Ich hatte soeben einige Stunden im CAB, dem »Computing Applications Building«, verbracht, dem zentralen Rechenraum des NCSA, des *National Center for Supercomputing Applications* der Universität von Illinois in Urbana/Champaign (von dort stammt übrigens auch das bekannte NCSA Mosaic, der Vater der heute gängigen Webbrowser Netscape und Internet Explorer). In diesem »Allerheiligsten« des nationalen Supercomputercenters der USA stand die größte für zivile Zwecke verfügbare Rechenkapazität auf engstem Raum geballt zusammen: mehrere Reihen kleiderschranksgrößer dröhnender Kästen, jeder einzelne mit einer Rechenleistung, die über hundert PC's entsprächen, und einem Hauptspeicher, wie er noch nicht einmal auf den besser ausgestatteten Festplatten heutiger Personal Computer Platz fände.

Hunderte blinkender Lämpchen zeigten an, dass hier gerade auf Hochtouren gerechnet wurde. Damit die Maschinen dabei nicht heiß liefen, wurde dieser Raum selbst im heißen Hochsommer des mittleren Westens durch kräftige Kühlgebläse auf unter 20 Grad gehalten. Und mitten in diesem lauten, kalten, fensterlosen Raum, den nicht einmal »normale« Angestellte des NCSA üblicherweise betreten dürfen, lag nun mein Arbeitsplatz.

Denn in diesen Tagen im Juni 1999 sollten detaillierte, vollständig dreidimensionale Rechnungen allgemein-relativistischer Computersimulationen durchgeführt werden, wie sie zuvor noch nie möglich gewesen waren. Unsere Arbeitsgruppe »Numerische Relativitätstheorie«, des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik, auch Albert-Einstein-Institut

Die Milchstraße mit dem Sternbild Schütze. Das Kreuz markiert das Zentrum unserer Galaxis. Für dieses Bild verwendete Ralf Raab ein 50-Millimeter-Objektiv (Blende 2:8) und belichtete acht Minuten lang auf Kodak E 200.



(AEI) genannt, der ich seit Dezember 1997 angehöre, hatte für einige Tage – es sollten drei Wochen werden – exklusiv einen der damals schnellsten Rechner aus dem reichhaltigen Arsenal des NCSA zur Verfügung gestellt bekommen. Ein brandneues Modell, offiziell noch gar nicht auf dem Markt, und wir konnten es testen, bevor es offiziell der Allgemeinheit übergeben werden sollte. Es war eine ideale Gelegenheit, Computersimulationen, die bis dahin im Kleinen vorbereitet worden waren, erstmals in einer wirklich großen und damit physikalisch aussagekräftigen Größenordnung durchzuführen.

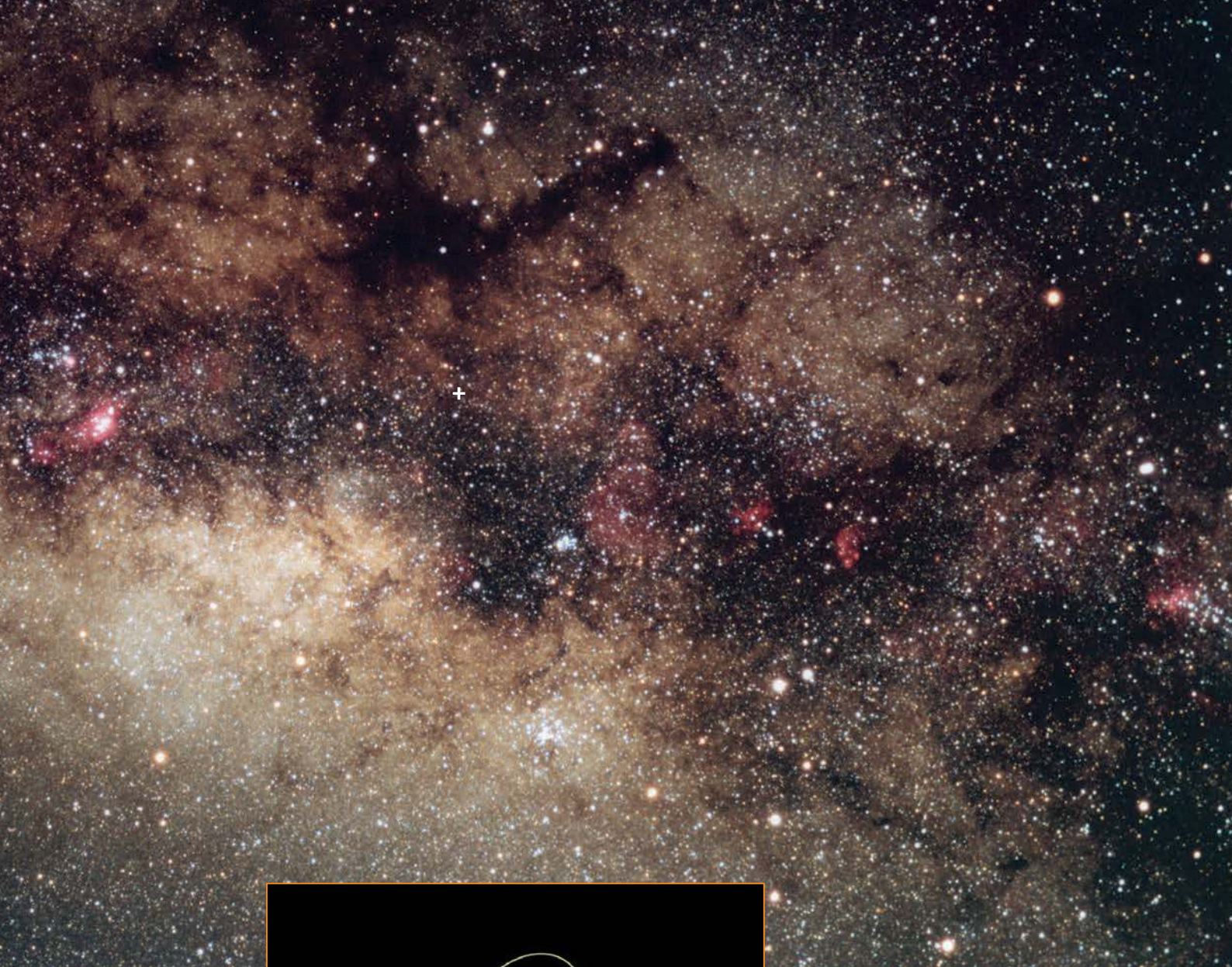
Weltweite Kooperation

Anfang Juli fand eine Konferenz in Japan statt. Bis dahin sollten die Ergebnisse vorliegen. Die daheim in Deutschland gebliebenen Kollegen arbeiteten für amerikanische Verhältnisse zu nachtschlafender Zeit an den Vorbereitungen der Simula-

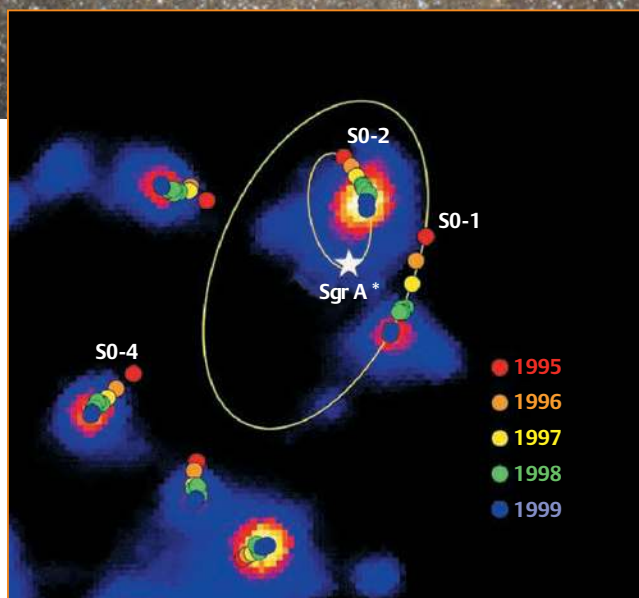
tionsläufe, am europäischen Nachmittag übernahmen unsere Kollegen in St. Louis und ich die Kontrolle, und wenn mir spät abends Illinoiser Zeit die Augen bereits zufielen, trafen auch schon die ersten Mails von Wai-Mo Suen ein, dem Leiter der St. Louiser Arbeitsgruppe, der sich zu dieser Zeit gerade in Hongkong aufhielt.

Wenn auch er seinen Part abgeschlossen hatte, war in Deutschland bereits wieder ein neuer Tag angebrochen und der Zyklus begann von vorne. Eine 24-Stunden-Arbeitsweise, wie sie in dieser Form nur im Rahmen einer internationalen Kooperation möglich ist. Denn das Problem, das wir angehen, ist zu groß, als dass es nur von einem Einzelnen oder auch nur einer einzelnen Gruppe gelöst werden könnte: Die Berechnung der Kollision Schwarzer Löcher im Computer und die Untersuchung der dabei entstehenden Gravitationswellen.

Die Ergebnisse derartiger Rechnungen, die oft auch als »grand challenges« be-



Über fünf Jahre haben Ghez et al. die Positionsänderungen von Sternen in unmittelbarer Nähe des Milchstraßenzentrums verfolgt. So offenbarten sich die hohen Geschwindigkeiten, die allein den Schluss auf ein Schwarzes Loch als Gravitationszentrum zulassen.



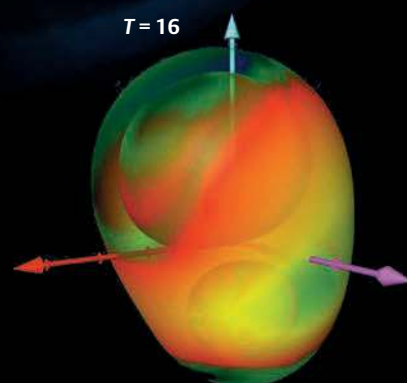
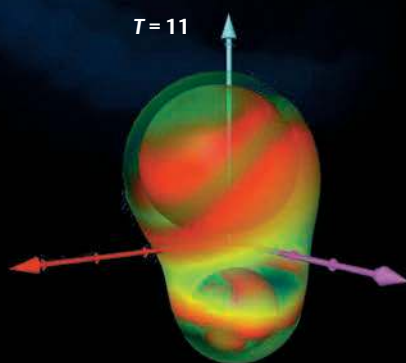
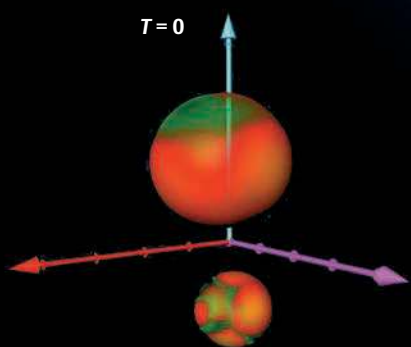
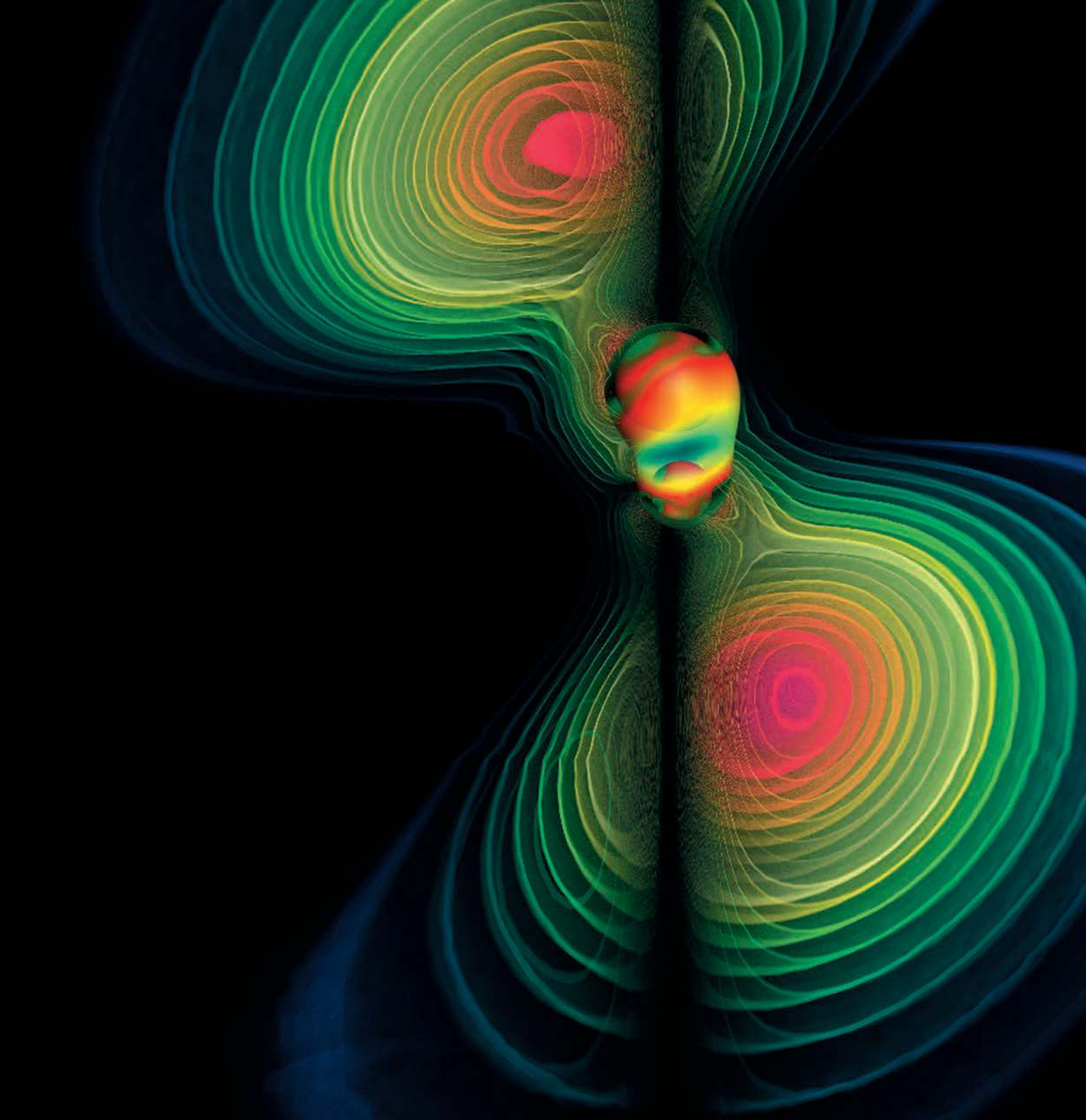
zeichnet werden, lassen sich nicht mehr einfach auf Papier ausdrucken und nach ihren Eigenschaften untersuchen, so wie dies Theoretiker mit analytischen Formeln machen können. Denn die von einem Supercomputer (wie z. B. einer der bekannten CRAYS) in tage- bis wochenlanger Dauerarbeitsberechnete Datenmenge erreicht leicht Größen bis in den Tera-

byte-Bereich. Ein Ausdruck würde mehrere Enzyklopädien füllen, und selbst auf CD-Roms gepresst würden die Daten mehr als 1000 Scheiben benötigen.

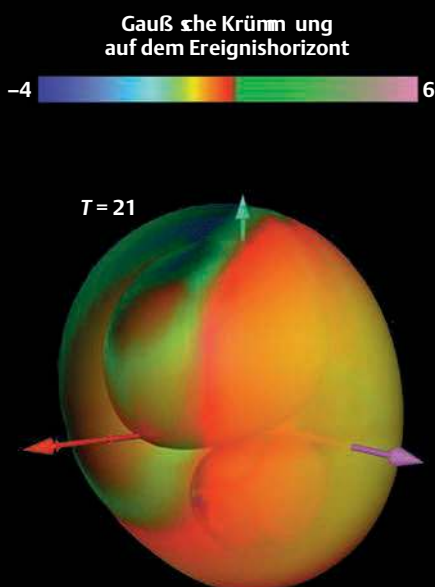
Diese Datenmenge lässt sich nur noch im Computer untersuchen – und genau deshalb musste ich ja damals auch in das heiß/kalte Illinois fliegen. Denn mein Anteil in dieser internationalen Kooperation

wissenschaftlicher Institute ist genau die visuelle Aufbereitung dieser riesigen Datenmengen. Es gilt, aus dem Wust an binär gespeicherten Zahlen diejenigen Strukturen herauszufinden, die wirklich von Relevanz sind. Diese Datenmengen waren einfach zu groß, um sie diesseits des Atlantiks noch angemessen untersuchen zu können. Wenn nun aber der Berg nicht zum Propheten kommt, so muss eben der Prophet zum Datenberg fliegen, ergo ich genau an den Ort wechseln, wo die Daten produziert wurden.

Während die verschiedenen Wissenschaftler, daheim in Deutschland und verteilt in St. Louis, damit beschäftigt waren, die richtigen Parameter einzustellen, letzte Korrekturen im Simulationscode einzubauen und die Simulationen schließlich zu starten, war ich der erste, der die neu gewonnenen Daten wirklich »sehen« konnte. Mit der von mir am Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB) mitentwickelten Visualisierungssoftware »Amira« konnte ich den virtuel-



Unten sind die Phasen der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher unterschiedlicher Masse, die dezentral miteinander kollidieren, dargestellt. Abgebildet sind die Ereignishorizonte, jenseits derer kein Licht mehr entweichen kann. Das große Bild stellt die Gravitationswellen dar, die diese kosmische Katastrophe freisetzt. (Bild: AEI/KZZ)



len Datenwürfel neuer, noch unbekannter und teils unerwarteter Phänomene untersuchen. Manchmal traten Strukturen auf, die so nicht sein sollten, und sobald ich die neuesten Bilder ins Internet gestellt hatte, setzte manchmal auf der anderen Seite des Ozeans das große Rätselraten ein, was denn da nun richtig und was falsch sei. Manchmal wurde die Rechnung dann wiederholt, um dann meist das richtige, erwartete Ergebnis zu liefern.

Meine Arbeit ist durchaus vergleichbar mit der eines beobachtenden Astronomen, der den zunächst unüberschaubaren wirklichen Kosmos mit dem Teleskop erforscht und zu ordnen versucht. Im Unterschied dazu finden meine Beobachtungen im Computer statt. Während der Astronom aber nur eine zweidimensionale Projektion der ihn interessierenden Objekte am Himmel sieht und zudem auf einzelne Momentaufnahmen angewiesen ist, steht mir ein dreidimensionaler Datensatz inklusive seiner zeitlichen Entwicklung zur Verfügung.

Vorarbeiten für GEO 600 und LISA

Kollidierende Schwarze Löcher gehören zu den stärksten Quellen von Gravitationswellen, die es nach den Vorhersagen der theoretischen Physik gibt. Die Astrophysiker hoffen, dass die im Bau oder in der Planung befindlichen Detektoren solche Wellen werden nachweisen können, auch wenn sie aus Entfernungen von etlichen Millionen Lichtjahren zu uns kommen.

Trotzdem können wir nicht erwarten, dass der Nachweis problemlos sein wird. Denn die von den Interferometern zu registrierenden Längenänderungen betragen nur etwa 10^{-22} Zentimeter – das sind nur Bruchteile eines Atomkerndurchmessers. Es wird ein erheblicher Aufwand notwendig sein, um die Signale vom Rauschen der Störquellen zu trennen. Dies wird umso leichter gelingen, je mehr über die Signalstruktur im Voraus bekannt ist. Hierin liegt die Bedeutung unserer Arbeit.

Was Einstein nicht glaubte

Einstein selbst glaubte nie an die Existenz Schwarzer Löcher. Er sah sie nur als mögliche mathematische Lösungen seiner Gleichungen an, glaubte aber nicht, dass sie in der Natur tatsächlich auftreten würden. Die beobachtende Astronomie der letzten Jahre hat Einsteins Pessimismus widerlegt. Zwar sind Schwarze Löcher,

wie der Name schon sagt, unsichtbar und daher nur indirekt nachzuweisen. Doch die High-tech-Teleskope auf dem Erdboden und im Weltraum haben eine ganze Reihe von Objekten aufgespürt, die mit großer Wahrscheinlichkeit Schwarze Löcher sind.

Zum Beispiel konnte man kürzlich die räumlichen Bahnen und die Geschwindigkeiten bestimmen, mit denen sich Sterne um den unmittelbaren Kern unserer Milchstraße bewegen. Die Bahnen sind so eng und die Geschwindigkeiten sind so hoch, dass auf ein sehr kompaktes und sehr massereiches Objekt im Kern geschlossen werden muss. Nur ein Schwarzes Loch kann auf so kleinem Raum soviel Masse vereinen.

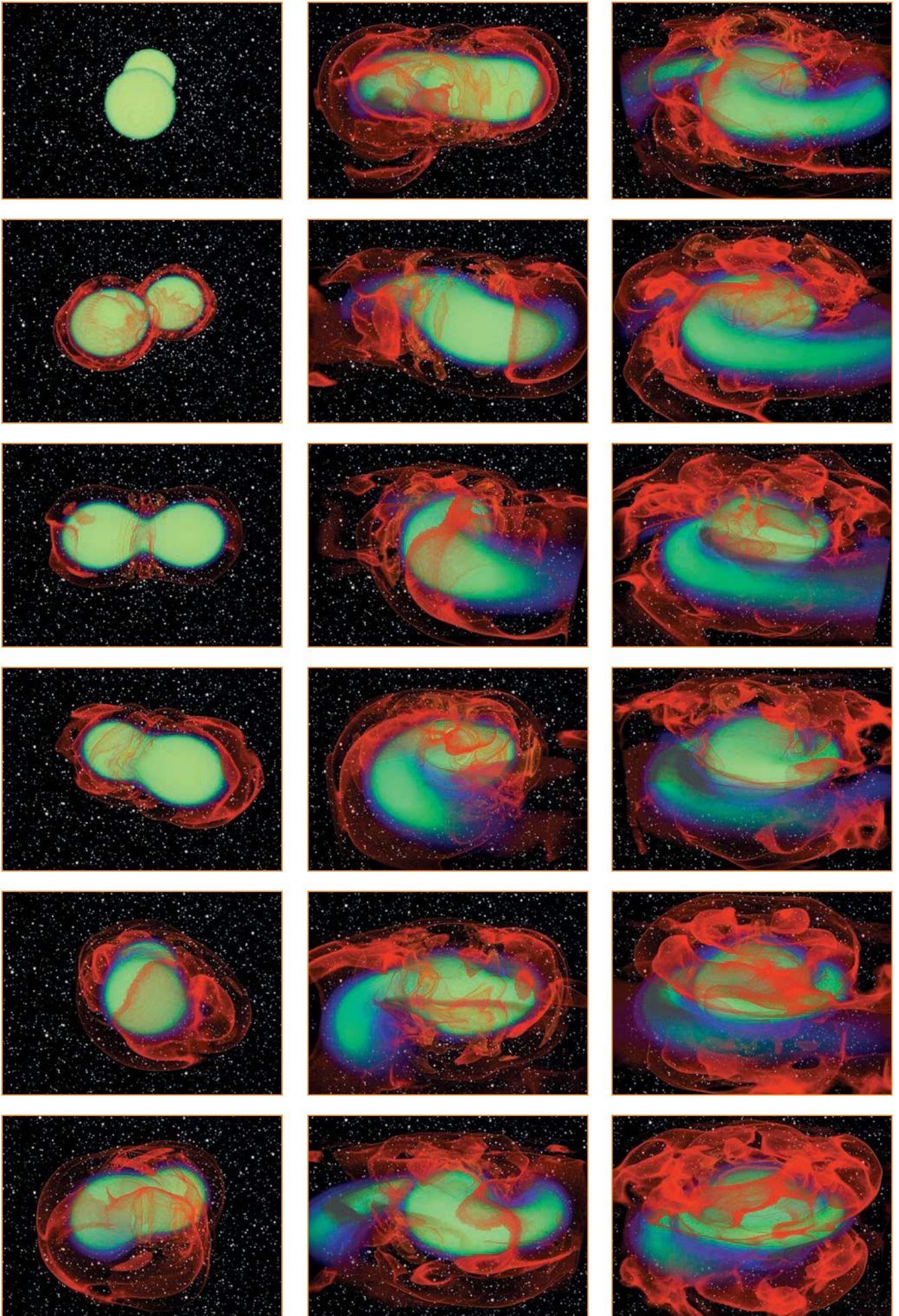
Das Zwei-Körper-Problem

Obwohl Albert Einstein die Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie bereits vor etwa 90 Jahren veröffentlichte und seither einige Generationen von Wissenschaftlern die Theorie vorangebracht haben, sind nach wie vor selbst elementar erscheinende Probleme ungelöst. Dazu gehört das so genannte Zwei-Körper-Problem, also die Situation zweier kompakter Massen, die sich gegenseitig durch ihre Schwerkraft beeinflussen.

Im Rahmen der klassischen Gravitationstheorie hat bereits Newton das Zwei-Körper-Problem vollständig gelöst, indem er zeigte, dass sich die beiden Massen auf Ellipsen- oder Hyperbelbahnen umeinander bewegen. Auf diese Art konnte er die von Kepler gefundenen Gesetze der Planetenbewegung aus dem Gravitationsgesetz ableiten. In der allgemein-relativistischen Variante hat sich das Zwei-Körper-Problem bisher hartnäckig jedem Versuch einer Lösung ohne Computerhilfe widersetzt.

Bereits aus prinzipiellen Überlegungen ist jedoch klar, dass es in der Allgemeinen Relativitätstheorie keine statische Lösung mit zeitlich unveränderlichen Bahnen wie bei Newton geben kann. Da die beiden Massen gegenseitig Kräfte aufeinander ausüben, führen sie beschleunigte Bewegungen aus, und analog zur Elektrodynamik senden beschleunigte Körper in der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Strahlung aus. Handelt es sich bei beschleunigten Ladungen um elektromagnetische Wellen, so emittieren beschleunigte Massen Gravitationswellen.

Was auf der Erde in jeder Rundfunkantenne geschieht, hat sein astronomisches Analogon in jedem Körper, der sich um einen anderen bewegt und seine Bewegungsenergie dabei in Form von



Gravitationsstrahlung nach und nach in den Kosmos abstrahlt. Im Laufe der Zeit müssen sich die zwei Massen daher immer näher kommen und schlussendlich miteinander kollidieren. Der Verlust an Gravitationsenergie ist allerdings nur bei sehr massereichen kompakten Körpern wie Neutronensternen oder Schwarzen Löchern, die sich sehr nah umeinander bewegen, von relevanter Größenordnung.

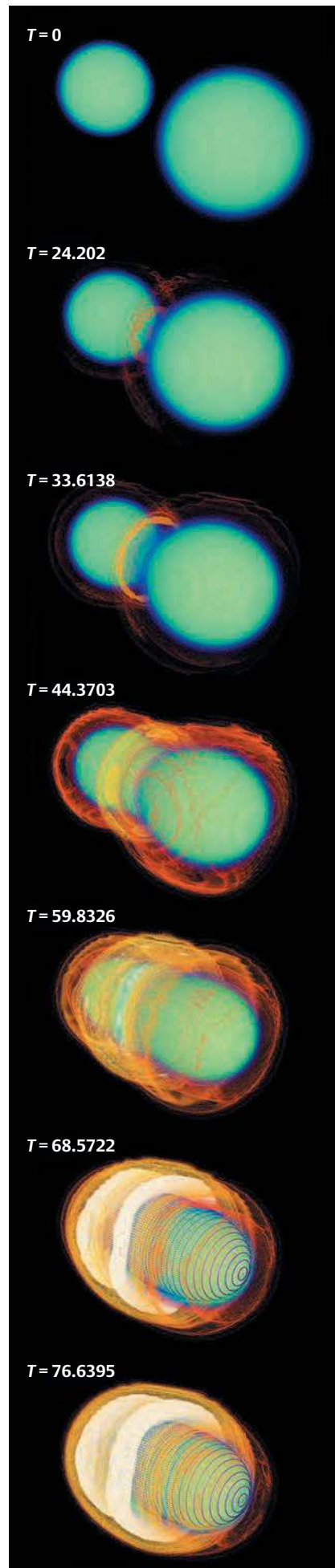
Die Richtigkeit der allgemein-relativistischen Vorhersage konnten die Astronomen bereits in der Natur überprüfen: Hulse und Taylor bestimmten die zeitliche Abnahme der Rotationsperiode des Doppelpulsars PSR1913+16. Ihre Resultate stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit mit der Theorie überein.

Riesige Datenmengen

Unsere Arbeit besteht darin, die Details des Zwei-Körper-Problems, insbesondere die Freisetzung der Gravitationswellen, zu berechnen. Wie gesagt, sind wir dazu unbedingt auf die Hilfe der schnellsten Computer angewiesen. Für den Moment des Verschmelzens zweier Schwarzer Löcher, bei dem besonders intensive Gravitationsstrahlung entsteht, gibt es noch nicht einmal Näherungsmethoden, wie man sie bei schwachen Gravitationsfeldern anwenden kann.

Links: Sequenz einer nicht zentralen Kollision und Verschmelzung zweier Neutronensterne. Simulation im Rahmen der Newtonschen Gravitationstheorie. In *blau* und *grün* ist die Materiedichte dargestellt. In *rot* und *orange* ist die Temperatur des Gravitationsfeldes gezeigt. Die Schwerpunkte der beiden superkompakten Sterne kommen sich auf Spiralbahnen immer näher. (Bild: AEI/KZZ)

Rechts: Sequenz einer zentralen Kollision und Verschmelzung zweier Neutronensterne. Simulation im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die dabei freigesetzten Schockwellen sind als *transparente ockerfarbene* Flächen dargestellt (*weiß*: höchste Energiedichte, *dunkelrot*: niedrigste Energiedichte). Zwei starke Wellen laufen in entgegengesetzter Richtung von dem katastrophalen Ereignis fort. Der Ereignishorizont des sich bildenden Schwarzen Loches ist in *violetten* Punkten dargestellt. Das wichtigste Ergebnis: Obwohl etwas von der Materie fortgeschleudert wird, endet der weitestgrößte Teil im Schwarzen Loch. (Bild: AEI/KZZ)



Aber mit geeigneten numerischen Methoden und mit Supercomputern können wir das Problem angehen.

Während es in der klassischen Theorie mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz nur eine zu lösende Gleichung gibt, haben wir es in der Allgemeinen Relativitätstheorie mit einem ineinander verwobenen System aus zehn Gleichungen zu tun. Wir unterteilen den Raum in einzelne Punkte und wenden Punkt für Punkt den Formalismus der Allgemeinen Relativitätstheorie an. Die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse hängt von der Anzahl der Punkte ab, mit denen wir rechnen. Je mehr, desto genauer.

Um wirklich aussagekräftige Resultate zu erzielen, müssen wir einen der schnellsten Hochleistungsrechner etliche Tage rechnen lassen. Das Resultat liegt dann in erster Linie als hochkomplexes Tensorfeld vor. Als ob Tensoren nicht an sich schon schwer durchschaubare Zahlengebilde wären, sind deren Werte auch noch an jedem Datenpunkt der berechneten Raumzeit unterschiedlich und ihre Menge ist zu groß, um alle Platz auf einer Festplatte oder gar im Hauptspeicher eines Rechners zu finden.

Ich muss daher nach geeigneten Verfahren suchen, um die Daten auf ein erträgliches Maß zu reduzieren, ohne die Informationen über die relevanten Strukturen zu verlieren. Eine solche Struktur ist zum Beispiel der so genannte »scheinbare Ereignishorizont«, also die Grenzfläche, jenseits derer kein Lichtstrahl mehr in die Außenwelt enttrinnen kann. Ereignishorizonte sind typische Merkmale von Schwarzen Löchern. Daneben betrachte ich die auslaufenden Gravitationswellen, die durch den sogenannten Weyl-Skalar beschrieben werden.

Digitale Täuschungen

Zu jeder Simulationsrechnung gehört eine so genannte Parameterdatei. Sie enthält die Werte für Anfangsdaten, aus denen der Computer eine numerische Raumzeit aufbaut und schließlich von einem Zeitschritt zum nächsten berechnet. Oft dauert es Tage und Wochen, bis die Berechnungen zu einer neuen Parameterdatei, wenn auch nur mit minimalen Änderung im Vergleich zu einer bereits bekannten, vorliegen.

Zwar kann ich auch mit geringer Rechenleistung, wie sie etwa ein einfacher PC bietet, einfache Abschätzungen erzielen, aber oftmals ist manche wichtige Struktur erst bei wirklich hoher Gitterauflösung sichtbar. Es ist daher spannend und überraschend, wenn ich das erste

Mal die Daten von einem großen Simulationsdurchlauf sehe, den ich bislang nur im Kleinen durchgeführt hatte.

Mal treten erwartete Strukturen auf, manchmal solche, die unerwartet waren. Manchmal sind auch Strukturen, die ich erwartet hatte, nicht sichtbar. Dann stellt sich die Frage: warum nicht? Meist ist dann etwas an dem Parametersatz falsch, in seltenen Fällen muss dann der Simulationscode noch einmal überarbeitet werden. Und nicht zuletzt müssen wir die ganze Rechnung wiederholen.

Bei sichtbaren Strukturen stellt sich die Frage, ob sie »echt«, das heißt physikalisch real, oder durch die beschränkten Möglichkeiten der Computertechnik hervorgerufene Artefakte sind. Natürlich gibt es mathematisch-numerische Verfahren, um bestimmte Ungenauigkeiten kontrollieren zu können. Wer weiß jedoch, was in einer völlig neuen, noch nie berechneten Raumzeit richtig und was falsch ist?

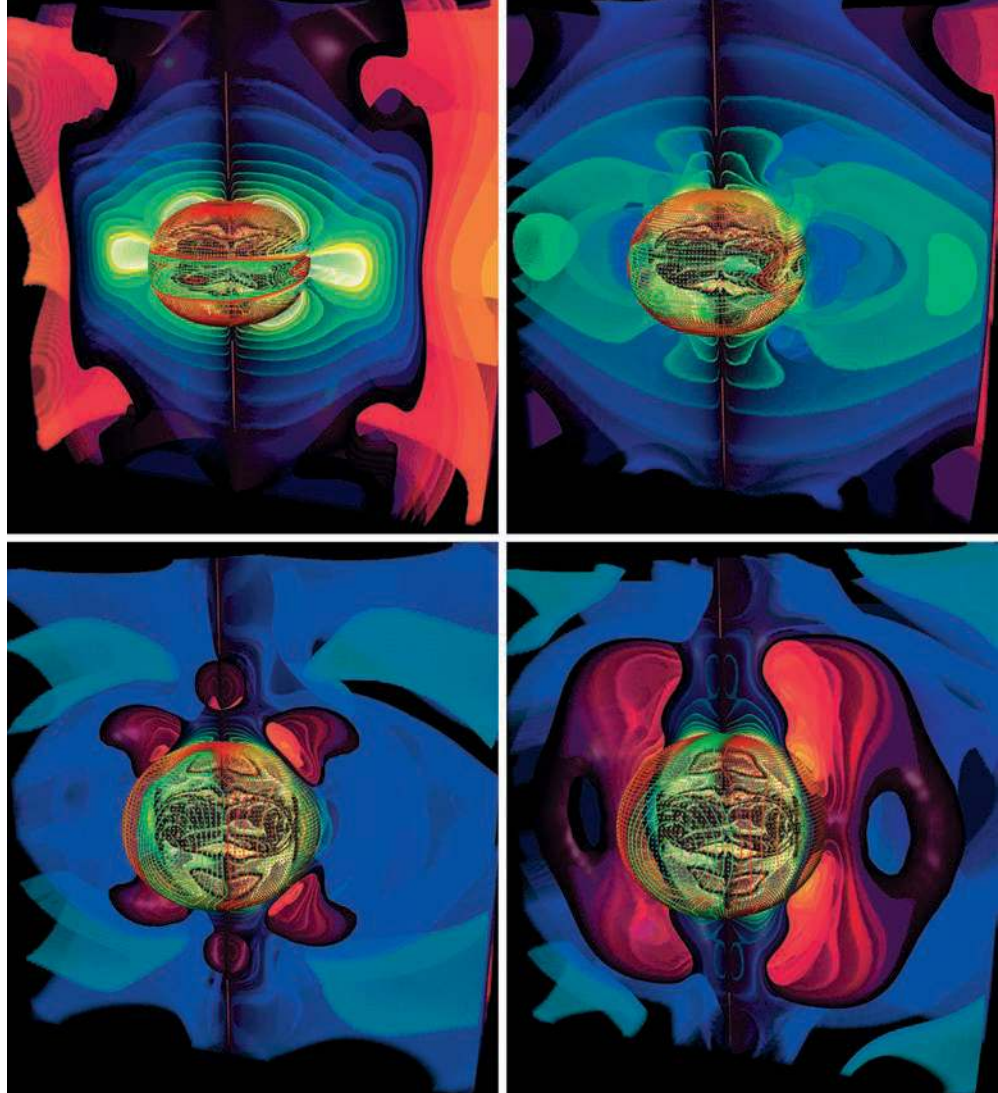
Numerische Singularitäten

Ein Problem der numerischen Relativitätstheorie sind die sogenannten Singularitäten. Von Singularitäten spricht man immer dann, wenn irgend ein Wert unendlich, also nicht mehr handhabbar wird. Es gibt mehrere Arten. Erstens die numerischen Singularitäten, die allein aufgrund der begrenzten Rechengenauigkeit zustande kommen. Beispiel: $(1 + 10^{-12}) - 1$ ergibt Null, wenn man nur mit elf Stellen Genauigkeit rechnet. Eine Division durch einen solchen Ausdruck hat fatale Folgen für die gesamte Rechnung. Durch geschickte Umformulierung $-(1 - 1) + 10^{-12}$ ergibt 10^{-12} , auch bei 11 Stellen Rechengenauigkeit – lassen sich solche numerischen Singularitäten in den Griff bekommen. Hierfür stehen viele Verfahren aus verwandten Wissenschaften, etwa der Hydrodynamik, zur Verfügung.

Koordinatensingularitäten

Zweitens gibt es die Koordinatensingularitäten, die man zum Beispiel aus der zuerst von Karl Schwarzschild berechneten Metrik des statischen Schwarzen Loches kennt. Am Ereignishorizont ist die Metrik singular: Mit einem Maßstab gemessene radiale Abstände sind unendlich groß (Umfangsmessungen hingegen zeigen sich davon unbeeindruckt).

Auch noch so gute Rechenverfahren zur Vermeidung von Unendlichkeiten helfen hier nichts, wenn schon die Daten an sich unendlich sind. Es hilft nur die



Suche nach einem besseren Koordinatensystem. Hierfür gibt es noch kein geeignetes Standardverfahren, die Wahl eines guten Koordinatensystems ist nach wie vor ein heißes Forschungsthema und gehört zu den Geheimrezepten einer physikalisch vertrauenswürdigen Simulation.

Physikalische Singularitäten

Aber auch das beste Koordinatensystem nützt nichts, wenn man auf den heiklen Punkt einer Raumzeit trifft: die physikalische Singularität, wie sie nun einmal nur in der Allgemeinen Relativitätstheorie auftritt. Keine andere Theorie oder Methodik kann hier helfen oder Ratschläge erteilen. Dieser Punkt ist *per definitionem* nicht berechenbar. Und hier hilft nur eines: diesen Punkt rechentechnisch mit allen Mitteln zu vermeiden.

So interessant auch das Zentrum eines Schwarzen Loches ist, es entzieht sich schon rein theoretisch, und daher auch mit noch so guten Methoden, jeder Möglichkeit einer Berechnung. Auch derartige Singularitätsvermeidungsverfahren gehören zu den aktuellen Forschungsthe-

men. Oftmals ist es so, dass eine Methode zwar an dem einen Ende hilft, aber dafür an einem anderen Ende krankt.

Kollidierende Neutronensterne

Physikalische Singularitäten treten nicht auf, wenn man »nur« Neutronensterne untersucht. Diese sind zwar wie Schwarze Löcher von einem extrem starken Gravitationsfeld umgeben, aus dem es auch dem Licht (und erst recht der Materie) schwer fällt, zu entkommen, aber die Feldstärke ist an keiner Stelle unendlich. Neutronensterne sind quasi riesige Atomkerne von einigen Kilometern Durchmesser, die allein aus Neutronen bestehen. Nur die abstoßenden Kräfte zwischen den Neutronen sind noch in der Lage, der gewaltigen Gravitation Einhalt zu gebieten.

Ein einzelner Neutronenstern ist noch Milliarden Jahre nach seiner Entstehung aus einer Supernova stabil. Allerdings treten einige von ihnen gepaart auf – wie der zuvor genannte Doppelpulsar. Da solch ein Doppelsystem allmählich Rotationsenergie durch Abstrahlung von Gravitationswellen abgibt, kommen sich die Komponenten mit der Zeit im-



Ein Gravitationsfeld kann eine so hohe Energiedichte haben, dass es aufgrund der Eigengravitation zu einem Schwarzen Loch kollabiert und dabei Gravitationswellen aussendet. Die Sequenz zeigt die zeitliche Entwicklung des Ereignishorizontes und der Gravitationswellen. (Bild: AEI/ KZZ)

mer näher und kollidieren unausweichlich. Dann können möglicherweise nicht einmal mehr die abstoßenden Kräfte zwischen den Neutronen den weiteren Kollaps verhindern, und ein Schwarzes Loch entsteht aus der Verschmelzung der beiden Neutronensterne. Solch ein Ereignis setzt etwa ebenso viel Energie in Form von Gravitationswellen frei wie die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher. Daher ist die Untersuchung kollidierender Neutronensterne ebenfalls wichtig zur Vorbereitung auf den Einsatz der Gravitationswellendetektoren.

Brillwellen

Doch zurück zu den Vakuumlösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, bei denen man sich die Komplexität der Materiegleichungen erspart, wie sie bei der Behandlung der Neutronensterne auftreten. Auch »reines Vakuum« kann wie ein Schwarzes Loch wirken. Diese auf den ersten Blick erstaunliche Tatsache konnte der Physiker Dieter Brill 1959 beweisen. Die Raumzeit, in der dieses Phänomen auftritt, wird daher nach ihm als Brillwellen bezeichnet.

Bei Brillwellen handelt es sich um extrem stark konzentrierte Gravitationsenergie, die wie jede Form von Energie ein Massenäquivalent hat (nach Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ zu berechnen), und somit selbst genauso anziehend wirkt wie ein materieller Körper. Der Selbstanziehungseffekt der Gravitationsenergie innerhalb der Allgemeinen Relativitätstheorie ist ein Grund dafür, warum der Umgang mit der Gravitation so schwierig ist.

Eigentlich ist Gravitation nichts als gekrümmte Raumzeit. In dieser Krümmung ist die Gravitationsenergie gespeichert. Auch wenn der Raum vollkommen materiefrei ist, kann er Gravitationsenergie enthalten. Und wenn diese groß genug ist, kann es geschehen, dass sich diese Krümmung nicht wie eine Wasserwelle im Ozean ausbreitet und verläuft, sondern in sich zusammenfällt. Auf diese Art entsteht ein Schwarzes Loch aus reiner Gravitationsenergie. Auch von diesen rein theoretischen Brillwellen hatte ich Simulationsdaten zur Verfügung, um daraus Bilder zu erzeugen, die das Verständnis der Entstehung Schwarzer Löcher vertiefen halfen.

Letztlich tragen alle diese Simulationen, seien es nun theoretische Fallbei-

spiele oder astrophysikalisch wahrscheinliche Situationen, dazu bei, einige der faszinierendsten Aspekte der Natur besser zu verstehen.

Es wird wohl noch Generationen von Menschen brauchen, bis wirklich einmal Personen oder Roboter zu einem Schwarzen Loch fliegen werden, um es vor Ort zu untersuchen. Bis dahin können wir diese Zukunftsvision im virtuellen Labor, das uns der Computer bietet, bereits vorwegnehmen. Auch mit digitalen Simulationen dringen wir in ungeahnte Welten und Dimensionen vor, die nie ein Mensch zuvor gesehen hat und womöglich auch nie sehen wird. ◀



Werner Benger studierte Astronomie an der Universität Innsbruck, bis er im Dezember 1997 an das Albert-Einstein-Institut in Golm bei Potsdam wechselte. Dort arbeitet er im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit dem Konrad-Zuse-

Zentrum für Informationstechnik Berlin an Computersimulationen zur Allgemeinen Relativitätstheorie und visualisiert sie eindrucksvoll.