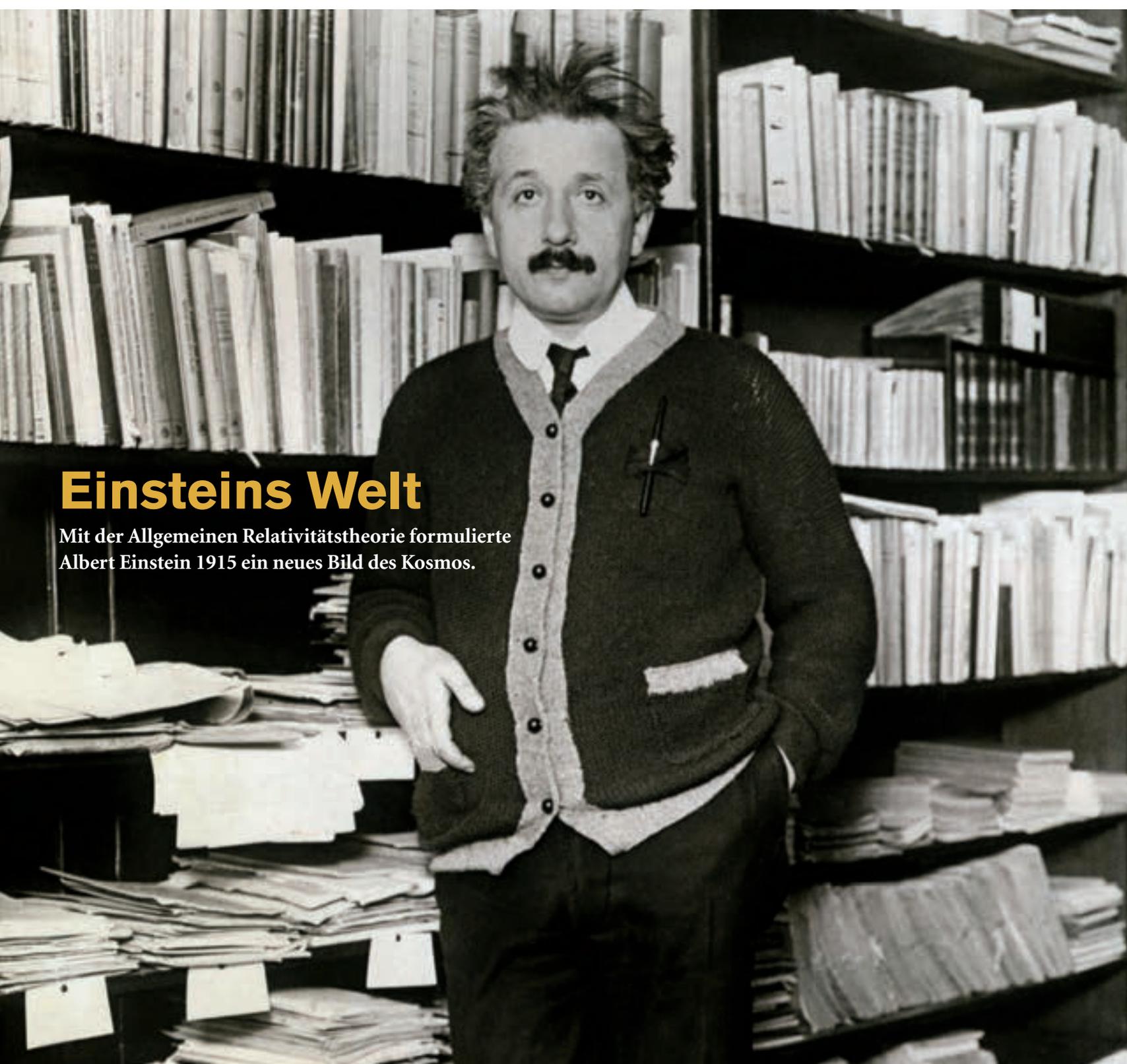


Von verbogenen Räumen und krummen Zeiten Albert Einsteins Weg zur Allgemeinen Relativitätstheorie

Das große Rauschen Die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung hat unser Weltbild verändert

Allerbeste Freunde Seit fünfzehn Jahren unterstützt der Freundes- und Förderkreis das Deutsche Museum

KULTUR & TECHNIK



Einsteins Welt

Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie formulierte Albert Einstein 1915 ein neues Bild des Kosmos.

NOMOS
GLASHÜTTE



Völlig klar, wunderschön: die neue
Metro 38 Datum mit NOMOS-Swing-System

Fridrich
JUWELIER SEIT 1864

TRAURINGHAUS · SCHMUCK · JUWELEN · UHREN · MEISTERWERKSTÄTTEN
J. B. FRIDRICH GMBH & CO. KG · SENDLINGER STRASSE 15 · 80331 MÜNCHEN
TELEFON 089 260 80 38 · WWW.FRIDRICH.DE



**Liebe Leserin,
lieber Leser,**

hundert Jahre ist die Allgemeine Relativitätstheorie mittlerweile alt. An Aktualität hat sie nichts eingebüßt. Einsteins Theorien haben nicht nur die Wissenschaft beflügelt. Sie haben unser Weltbild verändert. Begonnen hat das schon mit Nikolaus Kopernikus, der seine Zeitgenossen mit der These verstörte, die Erde kreise um die Sonne. Immerhin war der Kosmos bei Kopernikus noch einigermaßen geordnet, seine Ausdehnung begrenzt. Doch es sollte noch schlimmer kommen: Giordano Bruno war überzeugt, das Weltall sei unbegrenzt. Für diesen »Frevler« musste er auf dem Scheiterhaufen sterben. Heute nehmen wir an, dass sich das Universum seit einem Urknall grenzenlos ausdehnt. Auch das hielten die meisten Menschen vor hundert Jahren für pure Spinnerei. Und heute? Kosmologen diskutieren über Wurmlöcher, Paralleluniversen oder Dunkle Energie. Alles scheint möglich und sicher ist nur eines: Unsere Erde ist im Verhältnis zum Kosmos auf Nanogröße geschrumpft. »Gott würfelt nicht«, hat Albert Einstein noch gehofft. Die Existenz von Menschen sei im großen Plan der Dinge das Ergebnis eines Glücksspiels, konstatierte 2013 Stephen Hawking. »Wir sind das Produkt von Quantenfluktuationen im sehr frühen Universum. Gott würfelt wirklich.«

Wie es auch sei – Albert Einstein hat mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie keinen geringen Anteil an unserem neuen, grenzenlosen Blick auf den Kosmos. Einfacher hat er es uns mit seinen Ideen nicht gemacht. Und daher muten wir Ihnen in diesem Magazin durchaus schwere Kost zu. Aber es ist mit der Allgemeinen Relativitätstheorie wie mit vielem anderen im Leben auch: Manches mag zunächst unverständlich erscheinen und erschließt sich später doch. Das sind dann die besonders beglückenden Erlebnisse.

Wenn Sie lieber etwas lockerer einsteigen wollen, dann empfehle ich Ihnen diesmal, als Erstes die MikroMakro-Seiten zu lesen. Thomas Bürkke, Wissenschaftsautor und Physiker, erklärt hier den Kern von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Und da sich das im Magazin schlecht illustrieren lässt, hat sich die Redaktion etwas Besonderes einfallen lassen: Auf den MikroMakro-Seiten im Internet gibt es einen Film, in dem die wichtigsten Phänomene genauer erklärt werden. Den dürfen sich selbstverständlich auch Erwachsene ansehen!

Mit diesem Magazin »feiern« wir im Übrigen ein zweites Jubiläum. Unser Freundes- und Förderkreis begleitet das Deutsche Museum nun schon seit fünfzehn Jahren. Ein Anlass, um all jenen, die sich hier engagieren, ein herzliches Dankeschön zu sagen. Übrigens: Der Freundes- und Förderkreis des Deutschen Museums steht jedem offen, der sich in besonderer Weise für das Deutsche Museum einsetzen möchte. Auch Sie können Mitglied werden.

Einen bunten Herbst wünscht Ihnen Ihr

Professor Dr. Wolfgang M. Heckl
Generaldirektor



6
Wir schreiben das Jahr 2215. Der Autor begleitet Captain Arthur Kobo auf einer Reise zu dem Exoplaneten Tiberius 10 b. Auf seiner Reise wird das Raumschiff auch ein Wurmloch passieren müssen.



10
Nach einigen Umwegen formulierte Albert Einstein die Feldgleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie. Unterstützt haben ihn dabei Freunde und Kollegen.



16
Mit Radioteleskopen scannen Wissenschaftler das All auf der Suche nach Schwarzen Löchern.



20
Albert Einstein verwarf die Idee einer kosmologischen Konstante. Was er wohl zu ihrer Renaissance sagen würde?



28
Auch die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung im Jahr 1965 hat unser Weltbild nachhaltig verändert.



32
Dank Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ist Satellitennavigation so genau, dass wir sie im Alltag kaum noch missen mögen.



36
Eine kleine Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie. Mehr dazu im Internet:



41
Geschichten und Gesichter aus dem Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum.



15 Jahre
Freundes- und Förderkreis
Deutsches Museum

EINSTEINS WELT

- 6** Flug zu Tiberius 10b
Mit der »Einstein 6« unterwegs zu Exoplaneten | Von Bernd Flessner
 - 10** Von verbogenen Räumen und krummen Zeiten
Weg zur Allgemeinen Relativitätstheorie | Von Jürgen Renn, Michel Janssen
 - 16** Jagd auf Schwarze Löcher
Kosmologen auf der Suche nach einem Mysterium | Von Andreas Müller
 - 20** Die dunklen Kräfte des Universums
Renaissance der kosmologischen Konstante | Von Helge Kragh
 - 28** Das große Rauschen
Die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung | Von Christian Sicka
 - 32** Himmlische Begleiter
Die Allgemeine Relativitätstheorie ermöglicht GPS | Von Christian Rauch
-

15 Jahre Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum

- 42** Grußwort zum Geburtstag | Von Isolde Würdehoff
 - 43** Schatzinsel inmitten der Isar
Isolde Würdehoff im Gespräch mit Wolfgang M. Heckl
 - 45** Ein Museum zum Verlieben
Mitglieder über »ihr« Deutsches Museum
 - 50** Der Bettelmönch und seine Freunde
Oskar von Miller setzte auf ein Netzwerk aus Freunden | Von Wilhelm Fühl
 - 53** Engagierte Fliegerin
Isolde Würdehoff im Porträt | Von Laura Pöhler
 - 54** Junioren im Freundes- und Förderkreis
Ein Samstag im Deutschen Museum | Von Johanna Schwöbel,
Martin Höpfner, Johannes Liebertseder
 - 58** Ein Herz für besondere Wünsche
Geförderte Projekte 2000 bis 2015 | Von Laura Pöhler
-

STANDARD

- 3** Editorial
- 36** MikroMakro
Die Seiten für junge Leser
- 61** Deutsches Museum intern
- 64** Schlusspunkt
- 66** Vorschau, Impressum



Flug zu Tiberius 10b

Seit zehn Jahren erforscht die »Einstein 6« Exoplaneten.

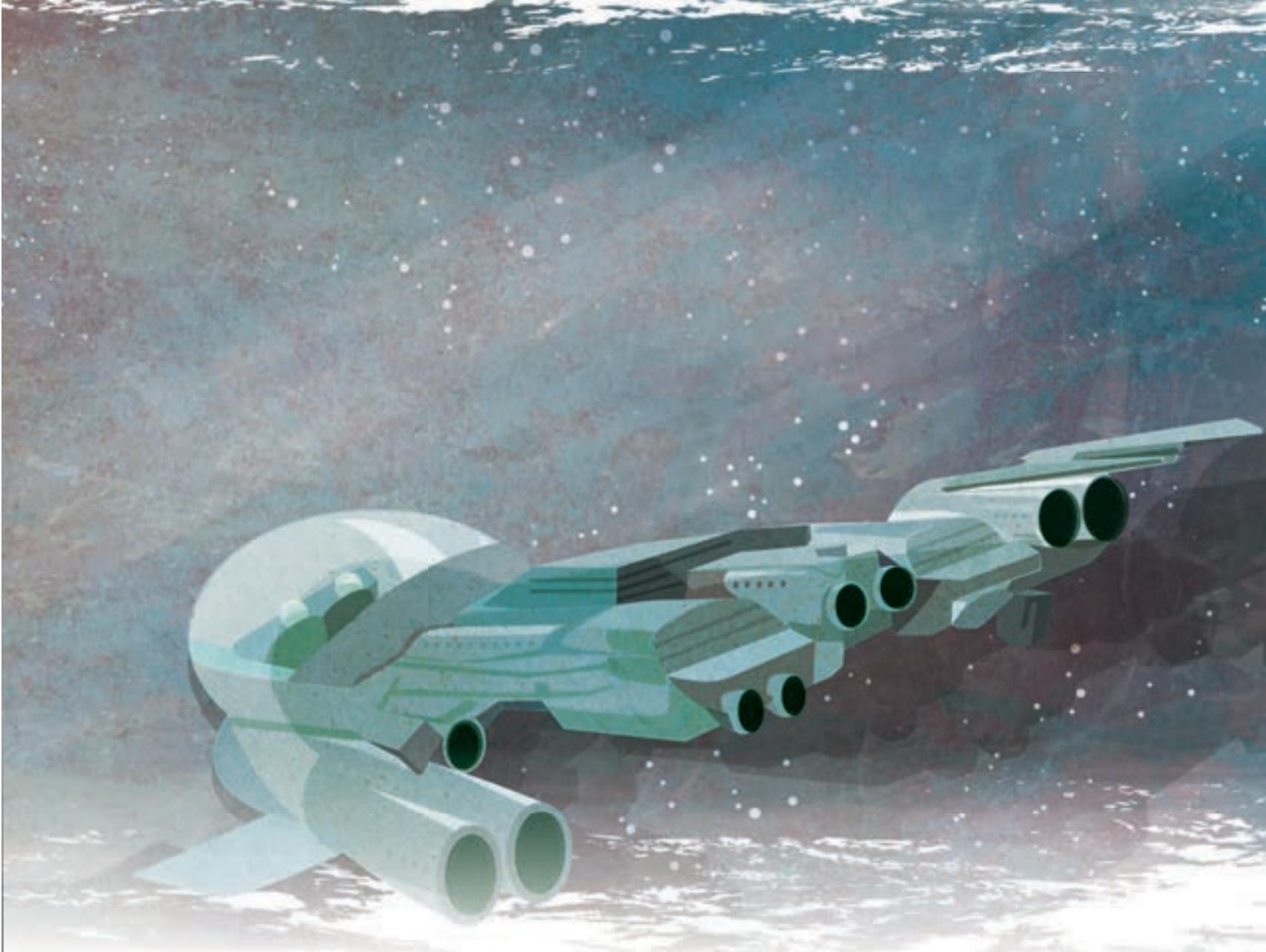
Eine visionäre Reise, protokolliert von Bernd Flessner im Jahr 2215. Illustriert von Claudia Lieb.

Die Erde ist zu einer blauen Murmel geschrumpft, der Sicherheitshorizont erreicht. »Wir erzeugen jetzt das Wurmloch«, erklärt Captain Arthur Kobo ohne spürbare Emotionen und berührt mit dem Finger ein altertümlich anmutendes Display. »Das war alles«, lächelt der Vierzigjährige. »Den Rest erledigen die Quantenrechner. Die zarte Berührung haben uns die Konstrukteure gelassen. Die menschliche Komponente. Eine der wenigen Entscheidungen an Bord, die keine künstliche Intelligenz treffen kann und darf.«

Vor der »Einstein 6« geraten plötzlich die Sterne in Bewegung und scheinen sich neu zu formieren. Ihr Licht ist nicht mehr punktförmig, sondern bildet konvex gekrümmte Linien, die ein kugelförmiges Gebilde um-

schließen. Eine Art Linse expandiert, in der wie aus dem Nichts einige unbekannte Sterne auftauchen. Der Anblick ist faszinierend und beängstigend zugleich, zumindest für einen Reporter, währt aber nur kurz. Kaum ist die Linse stabil, angezeigt durch ein grünes Symbol auf dem antiquierten Display, verschlingt sie das Schiff wie ein riesiges Maul. »Beim ersten Mal haben wir alle laut aufgeschrien«, kommentiert der Captain. »Dabei passiert eigentlich nicht viel.«

Das virtuelle Display zeigt nach wenigen Sekunden einen Blick nach achtern, wo die Linse, die das Schiff bereits wieder ausgespuckt hat, implodiert und verschwindet. »Das war's auch schon. Zweiundsechzig Lichtjahre. Weiter nichts, ein Katzensprung.« Zweiundsechzig Lichtjahre



dank Albert Einstein, dem Schöpfer der Allgemeinen Relativitätstheorie, zu dessen Ehren diese Reise unternommen wird. Denn vor genau 300 Jahren hat er seine berühmte Theorie der Öffentlichkeit präsentiert. Auch wenn sie sich im Laufe der Zeit als unzureichend erwiesen hat, bildet sie doch noch immer die Basis der heutigen Raumfahrt. Auch die »Einstein 6«, das neueste Raumschiff mit Einstein-Rosen-Antrieb, verdankt ihm seinen Namen. Der Antrieb wiederum geht auf die von ihm und Nathan Rosen 1935 beschriebene Einstein-Rosen-Brücke zurück, einer Krümmung der Raumzeit, die später Wurmloch genannt wurde.

Beschrieben wurde der interstellare Flug mittels eines Wurmlochs übrigens schon im 20. und 21. Jahrhundert. Damals hatten die Autoren allerdings nur äußerst vage Vorstellungen von einer Wurmloch-Passage, wobei jene der Physiker auch nicht wesentlich präziser waren. Das trifft sogar auf Autoren zu, die selbst Physiker waren, etwa auf den US-Amerikaner Carl Sagan (1934–1996), der in seinem einzigen Roman *Contact* (1985) die Reise durch ein Wurmloch schildert. Ausgangspunkt ist die damalige

Quellen:

Stephen Hawking, *Das Universum in der Nussschale*, Hamburg 2001.

Michio Kaku, *Die Physik des Unmöglichen. Beamer, Phaser, Zeitmaschinen*, Reinbek bei Hamburg 2008.

Kip S. Thorne, *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*, München 1994.

Angela u. Karlheinz Steinmüller, *Visionen. 1900 - 2000 - 2100. Eine Chronik der Zukunft*, Frankfurt am Main 1999.

Suche nach intelligenten, außerirdischen Lebensformen mit Hilfe des SETI-Programms (Search for Extraterrestrial Intelligence). Eines Tages wird tatsächlich ein Signal aufgefangen, das aus einer Sequenz aus Primzahlen besteht und den Bauplan für eine unbekannte Maschine enthält, die Wurmloch-Passagen ermöglicht. Die Maschine wird gebaut und fünf Reisende bestimmt, die in der Transportkapsel Platz haben. Dazu gehört auch die Wissenschaftlerin Eleanor Arroway, die Protagonistin des Romans.

Das Experiment gelingt, die Reisenden landen auf einem unbekanntem Planeten. Die Außerirdischen begrüßen sie in Gestalt von Menschen und eröffnen ihnen, das Wurmloch-Transportsystem nicht entwickelt, sondern vorgefunden zu haben. Ansonsten beschränken sie sich auf den ersten Kontakt, ohne viel über sich preiszugeben. Nach ihrer Rückkehr zur Erde stellen die Reisenden fest, dass dort keine Sekunde vergangen ist, weshalb man ihnen ihre Erlebnisse nicht glaubt. Der Roman wurde 1997 verfilmt (in ein zweidimensionales, visuelles Medium übertragen).

Der Autor stützt sich voll und ganz auf Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie. Die Wurmloch-Passage erfolgt also ohne Zeitdilatation; bei ihrer Rückkehr auf die Erde ist keine Zeit vergangen. Bei einem Raumschiff, das sich mit annähernder Lichtgeschwindigkeit bewegt, wäre dies hingegen der Fall, wie die Spezielle Relativitätstheorie belegt. Das ist auch der Grund, warum derartige Schiffe nie entwickelt wurden. Lange Zeit wurde auch der Warp-Antrieb diskutiert, der für die Star-Trek-Serie und -Filme von Gene Roddenberry (1921–1991) erdacht wurde. Auch beim Warp-Antrieb handelt es sich um einen Eingriff in die Raumzeit, die vor dem Raumschiff kontrahiert und hinter dem Raumschiff wieder expandiert, während sich das Schiff selbst in einer Warp-Blase befindet. Da sich die Raumzeit laut Einstein überlichtschnell ausbreiten darf, wären Flüge über große Entfernungen in kurzer Zeit ohne Zeitdilatation möglich. Das hatten zumindest führende Physiker wie Miguel Alcubierre, Sergei Krasnikov oder Van den Broeck seinerzeit berechnet. Allerdings wurde schnell deutlich, dass die benötigte Energiemenge für die Erzeugung einer Warp-Blase nicht bereitgestellt werden kann. Abgesehen von einer Vielzahl weiterer negativer Faktoren wie etwa der Strahlenbelastung oder der Problematik, die Flugbahn der Warp-Blase zu bestimmen.

Bekanntlich hat die Raumfahrt nach vielen Krisen im 21. und 22. Jahrhundert einen anderen Weg beschritten. Entscheidend war letztendlich der Durchbruch bei der Suche nach einer Theory of Everything (TOE), die alle vier Grundkräfte involviert. Albert Einstein und Werner Heisenberg hätten große Augen gemacht, denn die Lösung für die von ihnen gesuchte »Weltformel« ist so ganz anders, als sie und viele Physiker sich es vorgestellt hatten. Vergleichbares gilt auch für das Universum, vor allem für die damaligen Vorstellungen von einer Dunklen Energie und Materie. Eine Form der Materie ermöglichte indes den Bau des Einstein-Rosen-Antriebs, nämlich jene, die zur Gruppe der Exotischen Materie gehört. Sie liefert bekanntlich die



Energie, um ein temporäres Wurmloch zu generieren. Die zielgerichtete Deformation der Raumzeit, die nichts mehr mit klassischer Navigation zu tun hat, basiert wiederum auf der Multifil-Theorie.

Ansonsten würde man, wie John Crichton, Held der australischen Science-Fiction-Serie *Farscape* (1999–2004), in ein Wurmloch fliegen und an unbekannter Stelle irgendwo im Universum wieder zum Vorschein kommen. Nach seinen diversen Abenteuern nutzt Crichton die Einstein-Rosen-

Technologie, um eine Wurmlochwaffe zu konstruieren. Die setzt er jedoch nur ein, um die beiden kriegführenden Parteien, Peacekeeper und Scarraner, zu einem Friedensschluss zu zwingen. Der Bau einer derartigen Waffe, die ganze Planeten verschlingt, wäre allerdings nicht einmal heutigen Konstrukteuren und ihrer künstlichen Intelligenz möglich.

Die Größe unserer Wurmlöcher sowie deren Offenhaltung, sobald Raumschiffe sie passieren, erfordern Energiemengen, die im 21. Jahrhundert noch utopisch waren. Selbst für den Fall, dass ein vorhandenes Wurmloch von einem Raumschiff genutzt wird, wie etwa in dem Film *Interstellar* (2014), benötigt man große Energiemengen für die Offenhaltung. Obwohl der damals bekannte amerikanische Astrophysiker Kip Thorne als Berater fungierte, ist diese betagte Vision noch sehr weit von einer tatsächlichen Wurmloch-Passage entfernt. Im Film wird ein fiktives Wurmloch in der Nähe des Planeten Saturn genutzt, um Raumschiffe auf die Suche nach bewohnbaren Planeten außerhalb des Sonnensystems zu schicken. Dabei wird die Wurmloch-Passage als visuelles Spektakel gezeigt und somit weitaus spannender dargestellt, als sie tatsächlich ist. Andererseits beschreibt der Film den prinzipiellen Vorgang verblüffend gut, auch wenn nicht einmal angedeutet wird, wie kompliziert die Passage tatsächlich ist.

Aber es geht noch einfacher, wie der Film *Galaxy Quest* (1999) zeigt. Denn die Helden kommen hier ganz ohne Raumfahrzeug aus. Um von einem Ende der Galaxie zum anderen zu gelangen, wird jeder Raumfahrer von einer Transportvorrichtung in eine gallertartige Masse einge-

gossen, bevor er durch ein Wurmloch geschossen wird. Erreicht er sein Ziel, etwa die Transportvorrichtung eines anderen Schiffs, wird die Masse wieder automatisch entfernt. Wie der Prozess funktioniert, wird indes nicht einmal ansatzweise erwähnt. Betont wird lediglich, dass der Transfer ohne Zeitdilatation absolviert wird.

Zu den Gründen, eine Einstein-Rosen-Brücke zu wählen, zählten damals natürlich vor allem dramaturgische. Für viele Serien und Filme wäre eine Zeitdilatation eine Katastrophe gewesen, hätten sie doch den Erzählfluss gehemmt oder gar unmöglich gemacht. Ohne Zeitdilatation sind Romane wie *Der Planet der Affen* von Pierre Boulle aus dem Jahr 1963 und deren zahlreiche Verfilmungen gar nicht denkbar. In der Filmversion von 1968 landet der Astronaut George Taylor nach einem 18-monatigen Raumflug auf einem unbekanntem Planeten. Wie sich später herausstellt, ist dieser Planet die Erde, die er im Jahr 1972 verlassen hat. Gelandet ist er jedoch im Jahr 3978. Nur so ist die Evolution der Affen und ihrer Machtübernahme überhaupt erklärbar.

Benötigt man jedoch eine universelle Zeitgleichheit, sind Wurmlöcher unverzichtbar, wie etwa in dem 1994 von Roland Emmerich gedrehten Film *Stargate*. Der titelgebende Mechanismus ist ein kreisrundes Artefakt, das von Archäologen in Gizeh geborgen wurde und sich als Wurmlochgenerator erweist. Das Sternentor wird aktiviert und ein irdisches Kommando ohne Zeitverlust zu einem weit entfernten Planeten entsandt. Dort kommt es, wie damals in Filmen dieser Art üblich, zu einer Konfrontation mit einer außerirdischen Macht, aus der die Menschen selbstverständlich als Sieger hervorgehen. Der Film war so erfolgreich, dass ihm eine Serie für die damals weit verbreiteten, flachen Heimdisplays folgte.

Die gezeigte Wurmlochtechnologie, die von Aliens stammt, ist nach dem Stand unserer Wissenschaft nicht möglich, da die Einstein-Rosen-Brücke auf einer Planetenoberfläche ohne Sicherheitshorizont generiert wird. Die Folgen wären fatal. Außerdem verschweigen die Autoren, wie zu erwarten, die Energieversorgung des Stargates sowie die technische Lösung für die Stabilität und Offenhaltung des Wurmlochs. Aber man darf nicht vergessen, dass es sich lediglich um Unterhaltungsangebote gehan-

delt hat und nicht um astrophysikalische Seminare.

»Wir nähern uns Tiberius 10b«, meldet sich Captain Arthur Kobo. »Wir schwenken in den berechneten Orbit ein.« Vor uns rotiert eine neue, unerforschte Welt. Der Planet ist 1,3-mal so groß wie die Erde und einer ihrer vielen Geschwister, eine sogenannte Supererde. Er kreist in der habitablen Zone um einen sonnenähnlichen Stern. Das heißt, so unerforscht ist Tiberius 10b nun auch wieder nicht, denn autonome Wurmlochsonden haben ihn längst besucht. Die Resultate waren so überzeugend, dass der Planet für diese Mission ausgewählt wurde. Denn hier ist Leben entstanden. Kein intelligentes, aber es gibt höhere Lebensformen. Und die wollen wir mit eigenen Augen sehen. Aber warum eigentlich? Wir haben doch die Sonden?

»Das ist auch wieder die menschliche Komponente«, erklärt unser Captain. »Unsere KI kann viel, aber wir haben ihr nicht alles überlassen. Außerdem fehlt ihr die für unsere Spezies so typische Neugier. Wir müssen diese Planeten einfach höchstpersönlich besuchen. Daran führt kein Weg vorbei. Das haben die Science-Fiction-Autoren vor 200 Jahren schon richtig gesehen. Auch wenn der Rest oft großer Unsinn ist. Einstein, Heisenberg, Hawking, Deutsch und die anderen Physiker haben, wie man damals sagte, den Nagel auch nicht auf den Kopf getroffen.«

Aber sie haben dem Einstein-Rosen-Antrieb den Weg geebnet, der es der »Einstein 6« heute ermöglicht, ohne Zeitdilatation Exoplaneten zu besuchen und wieder zur Erde zurückzukehren. Die atemberaubenden Entdeckungen, die dabei in den letzten zwanzig Jahren gemacht wurden und die unser bisheriges Bild vom Universum erneut und wieder einmal entscheidend korrigiert haben, rechtfertigen den hohen ökonomischen und energetischen Aufwand.

Tiberius 10b. Was für ein Anblick. Wenn Einstein das sehen könnte. Eine blaugrüne Perle im schwarzen, aber keineswegs leblosen All. Atemberaubend. Faszinierend. ■■

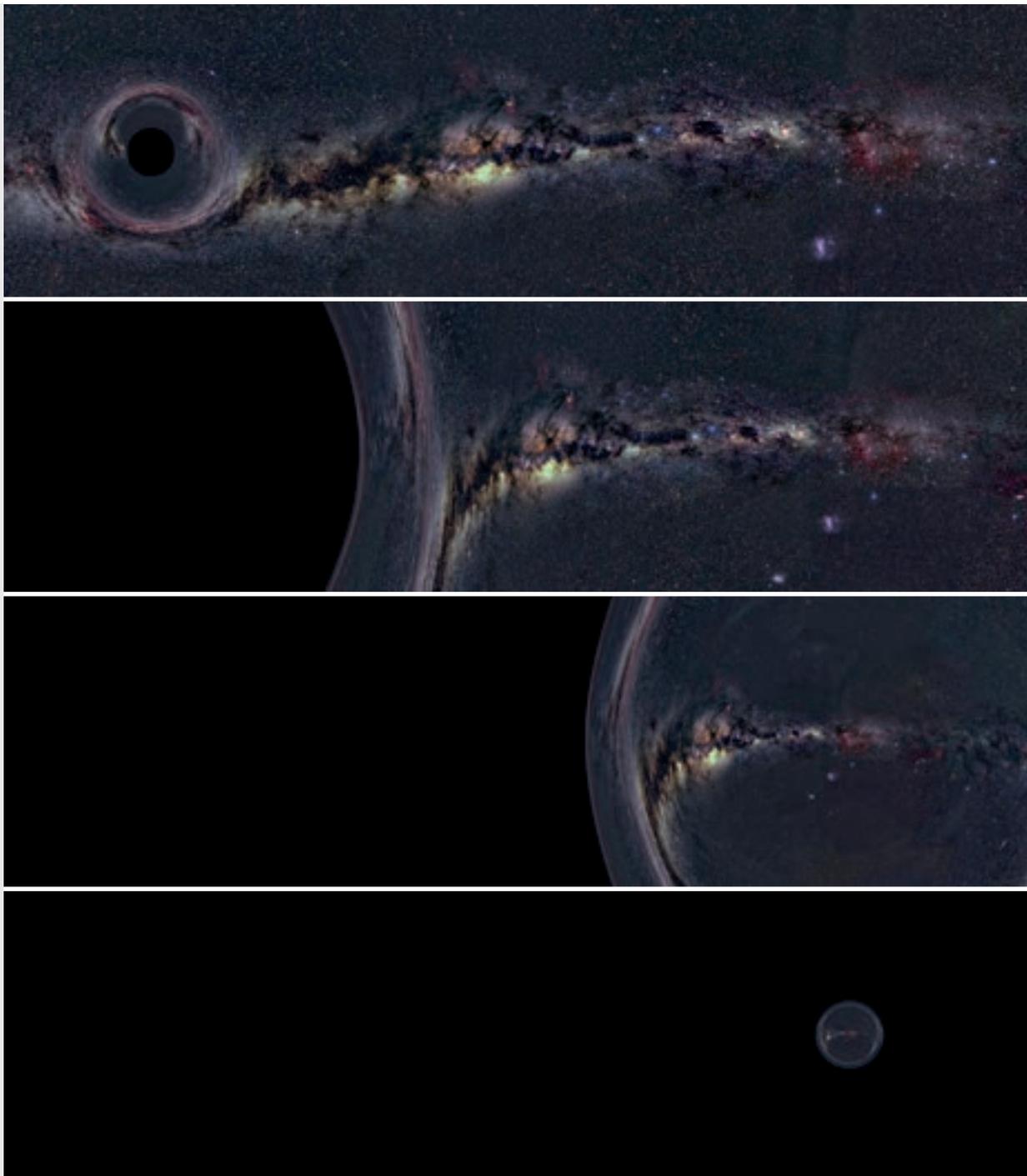


DER AUTOR

Dr. Bernd Flessner
Zukunftsforscher und
Wissenschaftsjournalist,
lehrt am Zentralinstitut für
angewandte Ethik und
Wissenschaftskommuni-
kation der Friedrich-
Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg.

Schwarzes Loch vor der Milchstraße

Vor 100 Jahren war die Messung der Lichtablenkung an der Sonne eine enorme Herausforderung für Astronomen. Gut sichtbar wäre dagegen der Einfluss eines erdnahen Schwarzen Lochs auf die Lichtstrahlen. Die Bilder zeigen ein 3/4-Panorama der Milchstraße, von der Erde aus. Das Schwarze Loch befindet sich zwischen Beobachter und Milchstraße. In der Sequenz verringert sich (von oben nach unten) der Abstand des Beobachters zum Schwarzen Loch. Obwohl der Standpunkt auch beim letzten Bild nicht innerhalb, sondern immer noch außerhalb des Horizonts liegt, wird das Bild fast vollständig vom Schwarzen Loch dominiert. Nur in Rückwärtsrichtung, genau vom Schwarzen Loch weg, gibt es einen kleinen Bereich, in dem noch Licht zum Beobachter gelangen kann – in diesem Bereich sieht man das gesamte Universum! Schwarze Löcher können als Endprodukt der Entwicklung eines Sterns entstehen. Im Zentrum von Galaxien gibt es supermassive Schwarze Löcher, mit einigen Hundert Millionen bis einigen Milliarden mal der Masse der Sonne.



Von verbogenen Räumen und krummen Zeiten

Mit seinen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie setzte Albert Einstein den Schlussstein seines Gedankengebäudes, an dem er bereits seit 1907 mit Unterbrechungen gearbeitet hatte. Von Michel Janssen und Jürgen Renn

Wie eine extrem verbogene Raumzeit aussehen würde, kann man erst seit kurzem mit Großrechnern simulieren. Die Bilder auf den folgenden Seiten geben einen Eindruck von den Möglichkeiten dieser Visualisierung. Mehr dazu erfahren Sie in *Kultur & Technik* 1/2016.

Die Allgemeine Relativitätstheorie war eine neue Theorie der Gravitation und zugleich eine Verallgemeinerung der Speziellen Relativitätstheorie von 1905. Einstein veröffentlichte sie bei einem Vortrag vor der Preußischen Akademie der Wissenschaften am 25. November 1915. Auf ihrer Grundlage werden heute wesentliche Züge unseres naturwissenschaftlichen Weltbildes erklärt. Dazu gehört die Tatsache, dass wir in einem expandierenden Universum leben, dass es derart merkwürdige Objekte wie Schwarze Löcher und sonderbare Phänomene wie die Ablenkung von Licht durch die Schwerkraft gibt.

Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie führt die im Weltall verteilte Masse und Energie zu einer Krümmung von Raum und Zeit. Was bedeutet das? Raum und Zeit stellen im Sinne der klassischen Physik den festen Rahmen dar, in dem sich alle physikalischen Ereignisse abspielen. Dieser Rahmen ist unveränderlich und unabhängig von den Ereignissen. Was den Raum betrifft, so lässt er sich mit den Mitteln der Euklidischen Geometrie beschreiben. In der Allgemeinen Relativitätstheorie hingegen wird dieser Rahmen gewissermaßen verbogen und deshalb spielen hier die gekrümmten Räume der nichteuklidischen Geometrie eine Schlüsselrolle. Die Verbiegung dieser Räume ist ein neuer physikalischer Effekt, durch den der ehemals feste Rahmen nunmehr selbst physikalischen Wechselwirkungen unterliegt.

In der Allgemeinen Relativitätstheorie sind Raum und Zeit keine feste Bühne mehr, auf der sich das physikalische Geschehen zuträgt. Sie bilden vielmehr ein dynamisches Feld, das an diesem Geschehen teilhat, das physikalischen Wirkungen unterliegt und solche auch verursacht. Dieses Feld beschreibt die bereits genannte Verbiegung von Raum und Zeit. Jedoch hat es darüber hinaus eine weitere wichtige Funktion. Es ist die Ursache für zwei Erscheinungen, die in der klassischen Physik völlig unterschiedlichen Kräften zugeschrieben werden, der gegenseitigen Anziehung von Massen durch die Schwerkraft sowie den Effekten, die bei beschleunigten Bewegungen, wie etwa in einem Karussell, auf die sogenannten Trägheitskräfte zurückgeführt werden. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie sind Schwerkraft und Trägheit wesensverwandt, etwa so wie elektrische und magnetische Kräfte im Elektromagnetismus als zwei verschiedene Aspekte desselben Feldes aufgefasst werden.



Albert Einstein beim Patentamt in Bern.

DIE AUTOREN

Diese Darstellung der Entstehung der Allgemeinen Relativitätstheorie beruht auf der gemeinsamen Arbeit der Autoren John Norton, Tilman Sauer, John Stachel sowie weiterer Kollegen am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte.

Die umfangreichen Ergebnisse dieser Kooperation sind in *The Genesis of General Relativity* dokumentiert.

Kürzlich erschienen sind auch *The Road to Relativity* von Hanoach Gutfreund und Jürgen Renn und *The Cambridge Companion to Einstein* von Michel Janssen und Christoph Lehner (Hg.).

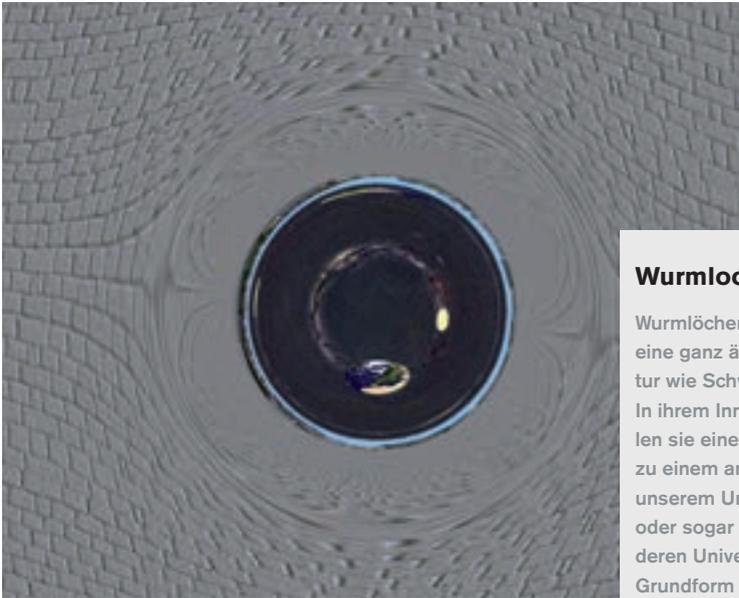
Eine neue Definition der Gleichzeitigkeit

Die Spezielle Relativitätstheorie zog die Konsequenzen aus einem Spannungsverhältnis zwischen den Gesetzen der Mechanik einerseits und den Gesetzen der Optik und des Elektromagnetismus andererseits, welches die klassische Physik schon seit längerem auszuhalten hatte. Während es für die Mechanik keinen Unterschied zwischen einem ruhenden und einem gleichförmig bewegten Bezugssystem gibt, schien es für Optik und Elektromagnetismus nahezuliegen, von der Existenz eines absolut ruhenden Mediums, des sogenannten Äthers, auszugehen, in dem sich das Licht als Welle fortbewegt. Nach der Speziellen Relativitätstheorie kann das Relativitätsprinzip der Mechanik auch auf elektromagnetische Erscheinungen ausgedehnt werden, allerdings um den Preis einer Veränderung der klassischen Begriffe von Raum und Zeit. Zu dieser Veränderung gehört insbesondere eine neue Definition der Gleichzeitigkeit, die dazu führt, dass die Feststellung der Gleichzeitigkeit von zwei entfernten Ereignissen vom Bezugssystem abhängt, in welchem sie vorgenommen wird.

Bereits zwei Jahre nach der Aufstellung der Speziellen Relativitätstheorie, während Einstein und seine Kollegen damit beschäftigt waren, die Konsequenzen dieser Umwälzung der klassischen Begriffe von Raum und Zeit auszuloten, begann Einstein eine noch weitergehende Veränderung dieser Begriffe in Angriff zu nehmen, die schließlich acht Jahre später zur Allgemeinen Relativitätstheorie führen sollte.

Die Entstehung dieser Theorie ist eine der erstaunlichsten Episoden der Wissenschaftsgeschichte. Denn für eine neue Theorie der Schwerkraft gab es kaum eine ernste zu nehmende empirische Begründung. Newtons Theorie konnte, bis auf einen winzigen Effekt, die astronomischen Tatsachen mit großer Präzision erklären. Und für diesen winzigen Effekt, eine minimale zusätzliche Drehung der Merkurbahn, die Einstein im November 1915 schließlich aufgrund der Allgemeinen Relativitätstheorie berechnen konnte, hätte es möglicherweise andere Erklärungen geben können als eine Modifikation des Newton'schen Gravitationsgesetzes.

Alle anderen beobachtbaren Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie, wie die Lichtablenkung oder die durch die Gravitation bewirkte Rotverschiebung von Licht, lagen hingegen noch weit in der Zukunft. Was also bewog Einstein 1907, das eben erst errichtete Gebäude der Spezial-



Wurmloch

Wurmlöcher haben außen eine ganz ähnliche Struktur wie Schwarze Löcher. In ihrem Inneren aber stellen sie eine Verbindung zu einem anderen Ort in unserem Universum dar oder sogar zu einem anderen Universum. In ihrer Grundform sind Wurmlöcher aber nicht stabil. Sie ziehen sich so schnell zusammen, dass man keine Chance hätte, sie zu durchqueren – man würde in dem kollabierenden Wurmloch zerquetscht! Um ein Wurmloch offen zu halten, bräuchte man sogenannte exotische Materie – das ist Materie mit negativer Masse bzw. Energie. Derartige merkwürdige Materie ist im Rahmen von Quantentheorien der Gravitation zwar möglich, technisch dürfte sie aber in absehbarer Zeit nicht realisierbar sein. Bis auf Weiteres werden wir also keine Wurmlöcher bauen können. Es gibt auch keinerlei Hinweis aus astronomischen Beobachtungen, dass Wurmlöcher im Universum natürlich vorkommen.

Das hindert uns aber nicht daran, Wurmlöcher auf dem Computer zu simulieren. Die Bilder zeigen ein Wurmloch, das eine Verbindung vom Tübinger Marktplatz zu einem Punkt auf der Mondbahn darstellt. Betrachtet man ein Wurmloch aus verschiedenen Richtungen (hier: von oben und von der Seite), erkennt man, dass dieses keine schlauch-, sondern eine kugelförmige Struktur hat.

len Relativitätstheorie noch einmal zu erweitern und umzugestalten? Und auf welcher Grundlage schuf er eine Theorie, deren empirische Konsequenzen erst sehr viel später bestätigt werden konnten?

Beschleunigte Bezugssysteme

Die Geschichte der Entstehung der Allgemeinen Relativitätstheorie weist noch weitere Merkwürdigkeiten auf. Bereits 1907, als Einstein noch am Schweizer Patentamt arbeitete, konnte er eines ihrer grundlegenden Prinzipien formulieren, das »Äquivalenzprinzip«, das die Wesensgleichheit von Gravitations- und Trägheitskräften anschaulich zum Ausdruck bringt: In zwei Laboren, von denen das eine gleichförmig und geradlinig beschleunigt wird, während das andere in einem homogenen Schwerfeld entsprechender Stärke ruht, herrschen die gleichen physikalischen Gesetze. Ein Beobachter kann also lokal nicht zwischen der Trägheitskraft im beschleunigten Labor und der Schwerkraft im ruhenden Labor unterscheiden. Beschleunigte Bezugssysteme treten damit ruhenden oder gleichförmig bewegten Bezugssystemen gleichberechtigt an die Seite: Sie können als ruhend aufgefasst werden, wenn man nur annimmt, dass in ihnen ein Gravitationsfeld bestimmter Art wirksam ist. In dieser Zulassung beschleunigter Bezugssysteme sah Einstein die Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips, die seiner Theorie den Namen gab. Später stellte sich allerdings heraus, dass diese Verallgemeinerung nicht zu einem Relativitätsprinzip im gleichen Sinne führt, wie es für die klassische Mechanik und die Spezielle Relativitätstheorie gilt.

Erst vier Jahre später, 1911, publizierte Einstein, inzwischen Professor an der Karls-Universität in Prag, erneut zum Thema der Gravitation, und zwar einen Vorschlag zur Beobachtung der Lichtablenkung im Gravitationsfeld während einer Sonnenfinsternis. Von da an ging es Schlag auf Schlag: Erst beschäftigte er sich intensiv mit dem Spezialfall des statischen Gravitationsfeldes, um dann, 1913, zusammen mit

seinem Freund Marcel Grossmann, eine vollständige Theorie vorzulegen. Diese Arbeit trug den Titel: Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und Theorie der Gravitation.

Die »Entwurftheorie« hatte fast alle wesentlichen Eigenschaften der späteren Allgemeinen Relativitätstheorie. Wie die endgültige Theorie beschreibt sie das Gravitationspotential durch einen metrischen Tensor, ein kompliziertes mathematisches Objekt mit zehn unabhängigen Komponenten, das die metrischen Eigenschaften einer im Allgemeinen gekrümmten Raumzeit bestimmt. Die Bewegung einfacher Teilchen in einer solchen Raumzeit wird durch die Bewegungsgleichung bestimmt, für die es eine einfache Interpretation gibt: Wenn keine anderen Kräfte wirken, beschreibt sie die Bewegung entlang der geradestmöglichen Linie in der gekrümmten Raumzeit, der »Geodäte«. Die Krümmung selbst ist durch eine Feldgleichung gegeben, die vorschreibt, wie Masse und Energie das Verhalten des metrischen Tensors festlegen. Zusammengenommen machen Feld- und Bewegungsgleichung das innere Getriebe einer solchen Theorie aus.

Über Umwege zum richtigen Ergebnis

Allerdings ist die Feldgleichung der Entwurftheorie eine andere als die der späteren fertigen Theorie. Insbesondere genügt sie dem allgemeinen Relativitätsprinzip in dem Sinne nicht, dass die Entwurftheorie bestimmte Bezugssysteme bevorzugt, statt alle als gleichberechtigt zuzulassen. Auch blieb ihre Interpretation im Sinne des absoluten Differenzialkalküls zweifelhaft. Einstein brauchte noch mehr als drei Jahre, um die endgültige Feldgleichung zu finden. Die Geschichte erscheint mehr als paradox, denn zusammen mit Grossmann war Einstein im Winter 1912/13 der richtigen Feldgleichung schon sehr nahegekommen, verwarf sie jedoch zugunsten der aus heutiger Sicht irrigen Entwurfgleichung. Erst Anfang November 1915 kehrte Einstein zu Gleichungen zurück, wie sie die elegante Mathematik von Gauss, Riemann usw. bereits drei Jahre zuvor nahegelegt hatte.

Wie konnte Einstein bereits 1907 ein erfolgreiches Forschungsprogramm auf der Grundlage eines verallgemeinerten Relativitätsprinzips entwerfen, es dann 1913 wieder stark einschränken, um es schließlich zwei Jahre später doch vollständig zu realisieren? Kehren wir noch einmal in das Jahr 1907 zurück. Einstein schrieb damals einen Überblicksartikel zu seiner Speziellen Relativitätstheorie und ordnete eine Vielzahl von physikalischen Phänomenen in das von dieser Theorie etablierte neue Raumzeit-Schema ein, darunter auch die Gravitation. Ihm fiel auf, dass ein einfaches Experiment, das Galilei bereits um 1610 durchgeführt hatte, im Rahmen der neuen Theorie nicht mehr so ausfiel, wie man infolge der klassischen Physik erwarten würde.

Eine relativistische Theorie der Gravitation

Schießt man aus einer bestimmten Höhe ein Wurfgeschoss in die Horizontale und lässt gleichzeitig einen Stein aus der gleichen Höhe fallen, dann erreichen beide gleichzeitig den Erdboden. Es ist jedoch ebenfalls möglich, sich in ein mit dem Wurfgeschoss horizontal mitbewegtes Bezugssystem zu begeben. Für einen Beobachter in diesem Bezugssystem fällt das Wurfgeschoss schnurgerade herunter, während jetzt der Stein die Rolle des Wurfgeschosses übernimmt, weil ihm in diesem Bezugssystem nun eine horizontale Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung zukommt. Kommen auch in diesem Bezugssystem beide Körper gleichzeitig auf dem Boden an? Nach der klassischen Physik ja, nach der Speziellen Relativitätstheorie hingegen nicht, denn nach ihr hängt die Gleichzeitigkeit vom Bezugssystem ab. Während also für einen Beobachter im ursprünglichen Bezugssystem Stein und Projektil gleichzeitig den Boden erreichen, gilt dies für einen Beobachter in dem mit dem Projektil bewegten Bezugssystem nicht. Das aber widerspricht dem Relativitätsprinzip, da beide Bezugssysteme gleichberechtigt sein sollten. Der einzige Ausweg ist die Annahme, dass die Horizontalbewegung die senkrechte Fallbeschleunigung beeinflusst, und zwar für beide Beobachter gleichermaßen. Dann können beide Beobachter behaupten, dass das Objekt, das für den jeweils anderen ruht, den Boden später als ihr eigenes erreicht. Diese Aussage ist vollkommen symmetrisch und mit dem Relativitätsprinzip vereinbar. Sie wirft jedoch ein anderes Problem auf, da sie anscheinend ein fundamentales Prinzip der klassi-

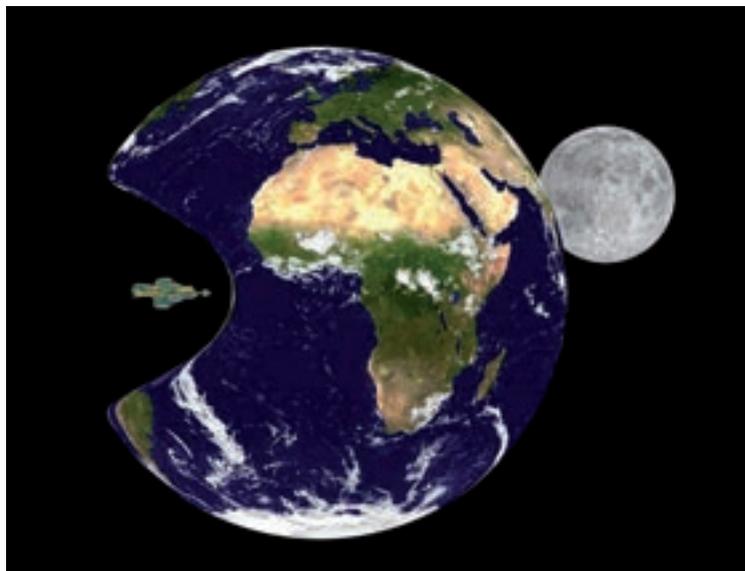


Mit seinem *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und Theorie der Gravitation* publizierte Einstein 1913 einen Vorschlag zur Beobachtung der Lichtablenkung im Gravitationsfeld während einer Sonnenfinsternis.

schen Physik verletzt, das Galilei'sche Prinzip, nach dem alle Körper unabhängig von ihren sonstigen Eigenschaften auf die gleiche Weise fallen. Einstein schloss daraus, dass man das Problem einer relativistischen Theorie der Gravitation grundsätzlich neu durchdenken müsse, und stieß bei seinem Nachdenken auf das schon erwähnte Äquivalenzprinzip. Den Ausgangspunkt seiner Überlegungen bildete also nicht eine bisher unerklärte Beobachtungstatsache, sondern, wie schon im Falle der Speziellen Relativitätstheorie, eine innere Spannung im Theoriegebäude der Physik, diesmal die Spannung zwischen der Relativitätstheorie und dem Galilei'schen Prinzip.

Die Spannung zwischen mathematischem Formalismus und physikalischer Interpretation prägte auch Einsteins weiteres Vorgehen. Dieses Vorgehen können wir im Einzelnen genau nachvollziehen, da sich das sogenannte Züricher Notizbuch aus der Zeit der Kooperation mit Grossmann im Winter 1912/13 erhalten hat. Nach jahrelanger Analyse der oft kryptischen Aufzeichnungen Einsteins haben sich die meisten Rätsel, die mit seiner Suche nach der Feldgleichung verbunden waren, lösen lassen. Insbesondere konnte geklärt werden, warum Einstein und Grossmann den korrekten Ansatz zu diesen Gleichungen schließlich zugunsten der Entwurftheorie verwarfen, um erst im November 1915 wieder auf diesen Ansatz zurückzukommen.

Einstein und Grossmann verfolgten einerseits eine mathematische Strategie, die von der Mathematik des absoluten Differenzialkalküls ausging, um daraus Kandidaten für die Feldgleichung zu gewinnen, die dann anhand physikalischer Kriterien überprüft wurden. Sie verfolgten andererseits eine physikalische Strategie, die von Kandidaten für die Feldgleichung ausging, die offensichtlich der Forderung nach dem Newton'schen Grenzfall genügten und durch Modifikation auch der nach der Gültigkeit der Erhaltungssätze. Als es ihnen nach einigen gescheiterten Versuchen nicht gelungen war, einen mathematischen Kandidaten zu finden, der die unabwiesbaren physikalischen Kriterien erfüllte, entschieden sie sich schließlich definitiv für die physikalische Strategie und formulierten mit ihrer Hilfe die Entwurftheorie, die sie im Frühjahr 1913 veröffentlichten. Nicht nur der Mathematiker Marcel Grossmann half Einstein. Beim Ausbau der Entwurftheorie spielte auch sein Freund Miche-



le Besso eine entscheidende Rolle. Er war es, der ihm half, im Sommer 1913 die Drehung der Merkurbahn auf der Grundlage der Entwurftheorie zu berechnen. Das Ergebnis lag zwar wesentlich unterhalb der zu erklärenden Abweichung. Entscheidend aber war die Methode, die Einstein und Besso gemeinsam entwickelten, und die Einstein dann Ende 1915 auf die richtige Theorie anwenden konnte und so das gewünschte Ergebnis erzielte. Was brachte Einstein im November 1915 dazu, die Entwurftheorie aufzugeben und sich erneut Kandidaten zuzuwenden, die einen direkten Bezug zum absoluten Differenzialkalkül haben? Wie wir sehen werden, spielte der weitere Ausbau der Entwurftheorie dabei eine Schlüsselrolle.

Die Einbettung der Entwurftheorie in einen Variationsformalismus, die Einstein und Grossmann in einer zweiten, 1914 veröffentlichten Arbeit vornahmen, hatte zum Aufbau einer komplexen mathematischen Maschinerie geführt, in deren Rahmen sich wesentliche neue Einsichten gewinnen ließen, die Einstein schließlich auch bei der Überwindung dieser Theorie zugutekamen. Zu diesen Erkenntnissen gehörte insbesondere eine bequeme Möglichkeit, die Erhaltung von Energie und Impuls im Rahmen einer solchen Theorie zu beweisen. Das aber war genau eines der Probleme, an denen die mathematischen Kandidaten im Winter 1912/13 gescheitert waren. Durch den Ausbau der Entwurftheorie im Laufe des Jahres 1914 hatte Einstein nun zwar gelernt, wie man dieses Problem lösen konnte, aber inzwischen war er ja von der Entwurftheorie so überzeugt, dass es vorläufig keinen Grund für ihn gab, auf die verworfenen mathematischen Kandidaten zurückzuschauen.

Ein weiteres Problem, das Einstein im Verlauf seiner Arbeit an der Entwurftheorie löste, ohne es zu bemerken und Verwendung dafür zu haben, war der Newton'sche Grenzfall, das andere große Problem, an dem die mathematischen Kandidaten des Züricher Notizbuches gescheitert waren. Durch seine gemeinsam mit Besso durchgeführte Berechnung der Periheldrehung des Merkur lernte Einstein schließ-

lich, genauer mit solchen Grenzfällen umzugehen. Im November 2015 realisierte er, dass in der Bewegungsgleichung im Grenzfall schwacher statischer Felder nur eine der zehn Komponenten des metrischen Tensors eine Rolle spielt, während die anderen vernachlässigt werden können.

Das bedeutete, dass es gleichgültig war, ob im Grenzfall der Feldgleichung solche anderen Komponenten übrig bleiben, da sie nicht in die Bewegungsgleichung eingehen. Dies war jedoch für die von Einstein betrachteten mathematischen Kandidaten des Züricher Notizbuches der Fall. Einer der Gründe, sie zu verwerfen, bestand nämlich in der scheinbaren Verletzung des Newton'schen Grenzfalls, die Einstein meinte dadurch feststellen zu können, dass sich der metrische Tensor in der Feldgleichung nicht auf eine einzige, dem Newton'schen Gravitationspotenzial entsprechende Größe reduzieren lässt. Dass diese Reduktion für den Grenzfall nicht notwendig ist, gehörte zu den überraschendsten Entdeckungen der letzten Woche seiner Arbeit an den Feldgleichungen im November 1915.

Im Herbst 1915 kamen Einstein erste Zweifel an der Feldgleichung der Entwurftheorie. Er hatte gedacht, sie ließe sich mit Hilfe des Variationsformalismus als einzig mögliche Feldgleichung der Gravitation auszeichnen. Und er war überzeugt, dass sie das Relativitätsprinzip so verallgemeinerte, dass ein rotierendes Bezugssystem als ruhend aufgefasst werden könne. Beide Überzeugungen stellten sich als irrig heraus. Damit war die Entwurftheorie zwar nicht widerlegt, aber in ihrer Überzeugungskraft geschwächt. Während mehr als eines Jahres konnte Einstein den Eindruck haben, dass seine physikalische und seine mathematische Strategie zum selben Ergebnis führten, der physikalisch plausiblen Entwurftheorie, die sich vermeintlich als mathematisch eindeutig herausgestellt hatte. Die Einsicht, dass sie in Wirklichkeit mathematisch nicht ausgezeichnet war und dass sich vielmehr im Rahmen ihres Variationsformalismus auch andere Theorien behandeln ließen, war allerdings nicht nur eine Enttäuschung. Sie eröffnete zugleich die Möglichkeit, auch andere

Zum Weiterlesen

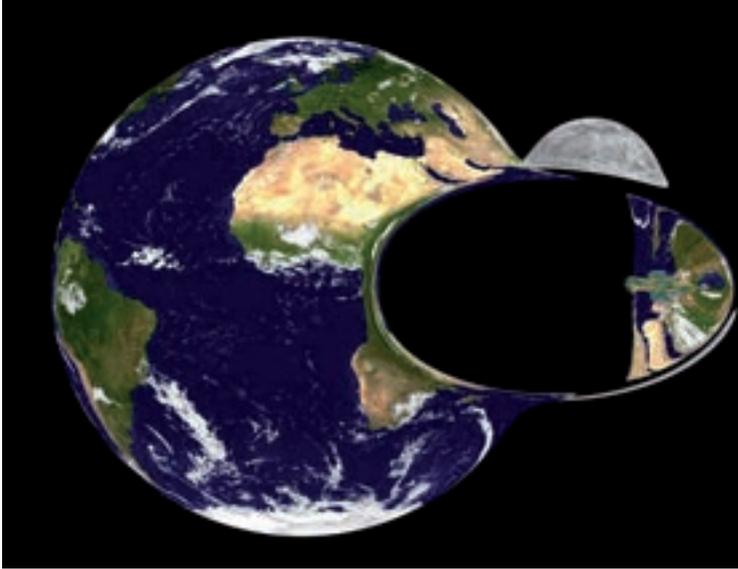
Hanoch Gutfreund, Jürgen Renn: *The Road to Relativity: The History and Meaning of Einstein's »The Foundation of General Relativity«*, 2015.

Michel Janssen, Christoph Lehner, *The Cambridge Companion to Einstein*, 2014.

Diana Buchwald et al., *Collected Papers of Albert Einstein*, sämtliche Bände I-XIII sind online verfügbar: einsteinpapers.press.princeton.edu, 2014.

Jürgen Renn, *Auf den Schultern von Riesen und Zwergen. Einsteins unvollendete Revolution*, 2007.

Einsteins Nachlass befindet sich in den Einstein Archives der Hebräischen Universität Jerusalem; zahlreiche Dokumente sind online verfügbar: www.alberteinstein.info



Reisen mit der Warp-Drive

Science-Fiction, die im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie wenigstens grundsätzlich möglich ist: Die Warp-Drive. Dabei bewegt sich nicht ein Raumschiff durch den Raum, sondern ein kleiner Raumbereich mit dem Raumschiff darin (Warp-Blase) befindet sich erst in der Nähe des Abreiseortes und wird dann in die Nähe des Zielortes »gezerrt« – ungefähr so, wie dies bei einem sehr elastischen Tuch möglich wäre. Diese Verzerrung des Raums kann beliebig schnell erfolgen. Die Lichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit spielt dabei keine Rolle. Zur Realisierung einer Warp-Drive benötigt man eine große Menge exotischer Materie. Damit hören die technischen Probleme aber nicht auf: Wahrscheinlich müsste man diese exotische Materie mit Überlichtgeschwindigkeit verteilen können. Man bräuchte also schon eine Warp-Drive, um eine Warp-Drive konstruieren zu können. Ein Raumschiff könnte das Verhalten der Warp-Blase nicht steuern, möglicherweise könnte es mit einem konventionellen Antrieb weder in die Warp-Blase hinein- noch aus ihr herausfliegen. Die Warp-Drive wird also wohl Theorie bleiben. In dieser Bilderserie bewegt sich eine Warp-Blase mit einem Raumschiff an Erde und Mond vorbei.

Kandidaten zu überprüfen, nun vor dem Hintergrund eines wesentlich erweiterten Verständnisses des Zusammenhangs zwischen mathematischem Formalismus und physikalischer Interpretation.

Eine neue mathematische Sprache

Der während der Arbeit an der Entwurftheorie erzielte, aber gewissermaßen unbemerkt gebliebene Fortschritt ging jedoch über die Erweiterung technischer Möglichkeiten noch hinaus. Es war, als bildete die ausgearbeitete Entwurftheorie eine Art von Gerüst, das es nun erlaubte, das eigentliche Gebäude zu errichten. Auch die Form des Gebäudes war durch dieses Gerüst bereits weitgehend vorgezeichnet. In der Entwurftheorie hatte Einstein die Feldgrößen der Gravitation durch eine einfache Ableitung des metrischen Tensors gewonnen. Im November 1915 wurde ihm klar, dass er zu einer plausiblen Alternative zur Entwurftheorie gelangen konnte, indem er im Wesentlichen nur eine andere Ableitungsoperation heranzog, die zudem durch den absoluten Differenzialkalkül nahegelegt wurde und zu den sogenannten Christoffelsymbolen führte.

Auf diese Weise kam er zu einem Kandidaten für die Feldgleichung, der sich zum einen aus der mathematischen Strategie herleiten ließ und auf den zum anderen der gesamte, für die Entwurftheorie entwickelte Formalismus passte. Nun konnte er endlich die neue mathematische Sprache mit den unabwiesbaren Forderungen der Physik verbinden. In dieser Verbindung bestand die eigentliche Leistung der neuen Theorie. Zunächst gelang es Einstein zu zeigen, dass das Kriterium der Erhaltungssätze erfüllt war. Dann machte er sich an die erneute Berechnung der Drehung der Merkurbahn. Diese Berechnung führte ihm schließlich vor Augen, dass er durch seine Erfahrungen mit der Entwurftheorie auch ein neues Verständnis des Newton'schen Grenzfalles erlangt hatte, das ihm jetzt zugutekam. Durch eine weitere Modifikation erhielt Einstein schließlich die Feldgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie, die er am 25. November 1915 vorlegte.

ILLUSTRATIONEN

Illustrationen Seite 10:
Ute Kraus, Institut für Physik, Universität Hildesheim (www.tempolimitlichtgeschwindigkeit.de);
Seite 12: Thomas Müller; Seite 14: Daniel Weiskopf, beide VISUS Universität Stuttgart.

Die Erläuterungen zu den Illustrationen verfasste PD Dr. Hans-Peter Nollert, Universität Tübingen.

Sie barg noch eine weitere Überraschung: Während die Forderungen nach Erfüllung des Newton'schen Grenzfalles und der Energieerhaltung für die vorangegangenen Kandidaten stets zu Einschränkungen der zulässigen Bezugssysteme geführt hatten, folgten jetzt umgekehrt die Erhaltungssätze aus der Tatsache, dass die neue Feldgleichung keinen solchen Einschränkungen unterliegt. Einstein war damit auf einen Spezialfall jener Theoreme gestoßen, in denen die Mathematikerin Emmy Noether später die Zusammenhänge zwischen Erhaltungssätzen und Symmetrien aufklärte.

Was also machte die Entstehung der Allgemeinen Relativitätstheorie möglich, lange bevor die meisten ihrer empirischen Konsequenzen bekannt waren? Die Voraussetzungen lagen in Erkenntnissen, die sich in verschiedenen Teilen der klassischen Physik, der Astronomie und der Mathematik des 19. Jahrhunderts angehäuft hatten, und die durch die Herausforderung einer relativistischen Feldtheorie der Gravitation in ein neues Spannungsverhältnis gesetzt wurden. Die Auflösung dieses Spannungsverhältnisses gelang nur durch die Auslotung einer Vielzahl von Möglichkeiten, diese Erkenntnisse miteinander in Beziehung zu setzen.

An dieser Auslotung waren nicht nur Einstein und seine engsten Mitarbeiter, sondern eine Vielzahl bekannter und weniger bekannter Wissenschaftler beteiligt. Eine so komplexe und dennoch stabile Konstruktion wie die der Allgemeinen Relativitätstheorie erforderte darüber hinaus die Errichtung eines Gerüsts, das die wechselseitige Anpassung physikalischer Einsichten und der mathematischen Formulierung dieser Einsichten ermöglichte. Dieses Gerüst lieferte die von Physikern heute vergessene Entwurftheorie, die deshalb zu Recht im Zentrum des Interesses der Wissenschaftsgeschichte steht. Erst vor ihrem Hintergrund werden die scheinbaren Irrungen und Wirrungen der Entstehung der Allgemeinen Relativitätstheorie als ein rationaler Prozess verständlich, in dem schließlich ein neues Weltbild der Physik entstand. ■■

Jagd auf Schwarze Löcher

Schwarze Löcher sind ein wahrhaft dunkles Mysterium in Einsteins Gravitationstheorie. Mit Radioteleskopen scannen Wissenschaftler das All, um ihnen auf die Schliche zu kommen. Von Andreas Müller

Eine Milliarde Kilometer pro Stunde: So schnell ist Licht im Vakuum, und das ist nach Einsteins Spezieller Relativitätstheorie das Schnellste im ganzen Universum. Könnte es ein Objekt geben, das klein und massereich genug ist, dass ihm nicht einmal das Licht entkommen könnte? Die verblüffende Antwort lautet Ja, und das Objekt heißt Schwarzes Loch. Wenige Monate nachdem Einstein die Feldgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) veröffentlicht hatte, fand der deutsche Astrophysiker Karl Schwarzschild im Januar 1916 die ersten Lösungen. Nicht schlecht für eine Nebenbeschäftigung, während der Erste Weltkrieg tobte.

Schwarzschilds erste Lösung, heute »äußere Schwarzschild-Lösung« genannt, beschreibt relativistisch die Gravitation einer Punktmasse. Das ist eine Masse ohne Ausdehnung und Zusammensetzung. So idealisiert und komisch das klingen mag, ist es in der ART möglich, dass eine unendlich gekrümmte Raumzeit äquivalent zu Masse ist. Jede Masse kann zu einem Schwarzen Loch werden, sofern sie unterhalb einer charakteristischen Grenze zusammengequetscht wird. Das ist der Schwarzschild-Radius. Die Erdmasse müsste man auf Murmelgröße und die Sonnenmasse auf Stadtgröße schrumpfen lassen, um aus ihnen Schwarze Löcher zu machen. Weil die Fluchtgeschwindigkeit am Schwarzschild-Radius der Lichtgeschwindigkeit entspricht, »schnürt« sich die Masse gewissermaßen von der Außenwelt ab und wird unobservierbar. Der Schwarzschild-Radius markiert deshalb einen Beob-

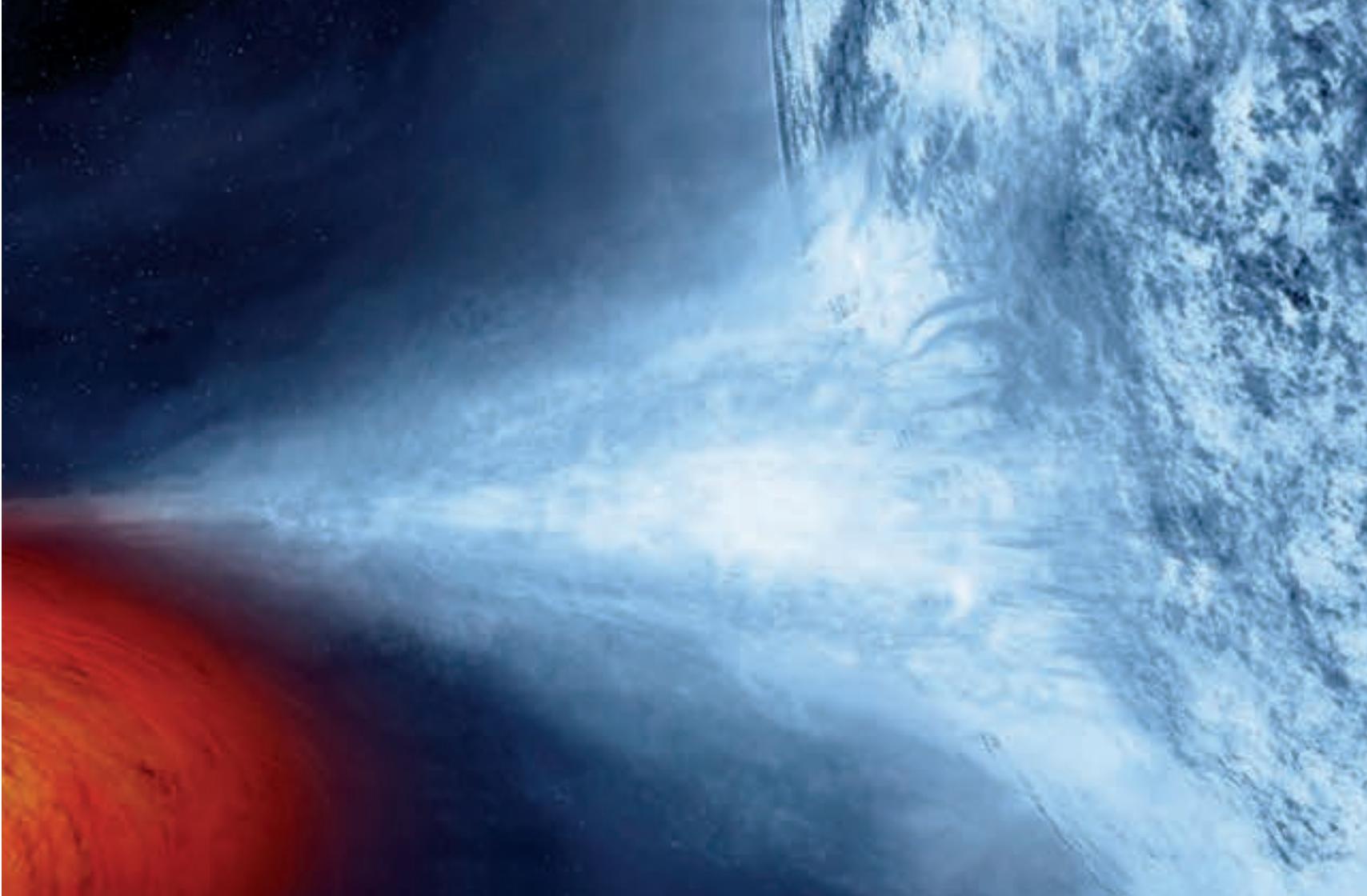
Grafische Darstellung des Schwarzen Lochs in Cygnus X-1. Es zieht Materie eines benachbarten großen, blauen Sterns an. Um das Loch bilden sich eine rotierende, leuchtende Gasscheibe und ein Jetstrahl.

achtungshorizont, den man in der Theorie Schwarzer Löcher den Ereignishorizont nennt.

Schwarzschild veröffentlichte im Februar 1916 noch eine zweite Lösung von Einsteins Feldgleichung: die innere Schwarzschild-Lösung. Sie beschreibt die Gravitation einer statischen (nicht rotierenden) Flüssigkeitskugel. Das stellt ein erstes, sehr simples, relativistisches Sternmodell dar, bei dem der Stern jedoch nicht rotiert und innen eine konstante Dichte hat. Interessanterweise endet die Sternoberfläche dort, wo sich bei der äußeren Schwarzschild-Lösung der Ereignishorizont befindet. Für Abstände größer als der Schwarzschild-Radius stimmen äußere und innere Schwarzschild-Lösung überein.

Eine kurze Geschichte der Schwarzen Löcher

Von Schwarzen Löchern war um 1916 herum noch lange nicht die Rede. Zunächst sprach man von »Singularitäten«, weil die Krümmung der Raumzeit am Ort von Schwarzschilds Punktmasse »singulär«, also unendlich groß wird. Eine Behandlung des elektrischen Feldes im Rahmen der ART offenbarte 1916, dass eine Punktmasse mit elektrischer Ladung eine weitere Form eines Schwarzen Lochs darstellt: die Reissner-Nordström-Lösung. Viel später, im Jahr 1963, fand der neuseeländische Mathematiker Roy Patrick Kerr eine weitere Lösung. Diese Kerr-Lösung beschreibt die Gravitation eines Objekts mit Masse und Rotation. Im Unterschied zu den statischen Schwarzschild-Lösungen dreht sich die Kerr-Raumzeit. Das hat



ganz ungewöhnliche Konsequenzen, weil der Raum selbst rotiert. In großer Entfernung zur Zentralmasse ist jedoch weder die Krümmung der Raumzeit noch ihre Rotation zu spüren. Alles, was sich der rotierenden Masse nähert, wird jedoch unweigerlich in Drehung versetzt – sogar Licht.

Wenn man im Strudel der Raumzeit gefangen ist, sieht man vor Ort daher den entfernten Fixsternhimmel rotieren – wie bei einer wilden Fahrt im Karussell, das sich fast mit Lichtgeschwindigkeit dreht.

Noch später wurde die bislang allgemeinste Form eines Schwarzen Lochs gefunden, nämlich eines mit drei Eigenschaften: Masse, Rotation und elektrischer Ladung. Das ist die Kerr-Newman-Lösung von 1965. Erst im Jahr 1968 prägte der Relativitätstheoretiker John Archibald Wheeler den Begriff »black hole«, den er zufällig auf einer Konferenz aufschnappte.

Könnten sich die Schwarzen Löcher tatsächlich in der Natur bilden? In den 1930er Jahren berechneten Theoretiker um Julius Oppenheimer erstmals den relativistischen Kollaps eines Sterns unter seinem eigenen Gewicht. Sie konnten zeigen, dass der als Flüssigkeitskugel beschriebene Stern im Prinzip zu einem Schwarzen Loch wird. Heute gehen die Astrophysiker davon aus, dass dies mit massereichen Sternen ab etwa 25 Sonnenmassen geschieht.

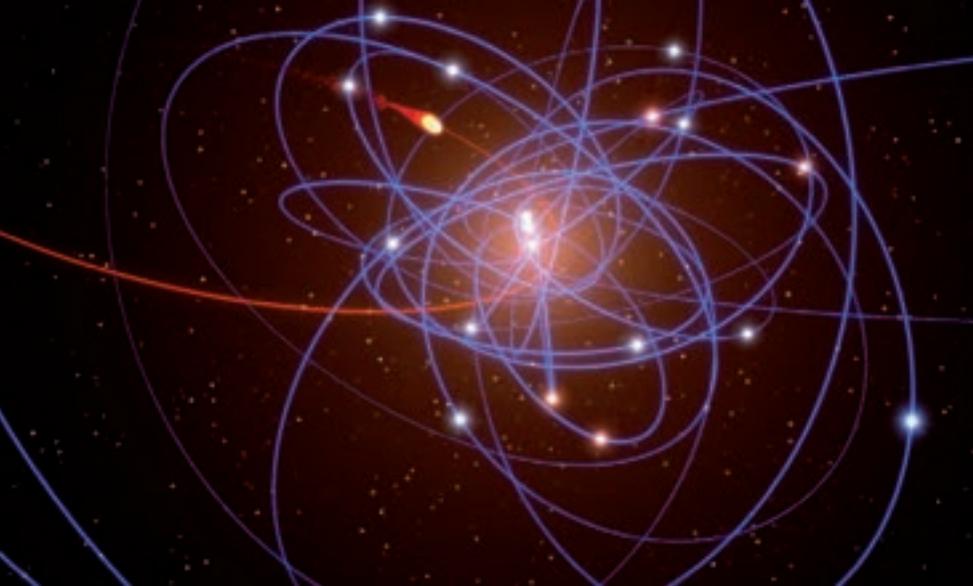
Die Astronomie Schwarzer Löcher nahm immer mehr an Fahrt auf: Im Jahr 1959 veröffentlichten britische Astronomen von der University of Cambridge den Third

Cambridge Catalogue (3C-Katalog). Dieser enthielt einige rätselhafte Himmelsobjekte, die Quasare. Sie erschienen sternartig, aber wie Maarten Schmidt 1963 entdeckte, mussten sie unglaublich weit entfernt sein – so weit, dass man sie nicht mehr als Sterne sehen würde. Quasare mussten demnach extrem leuchtkräftig sein. Welche Höllenmaschine könnte sie antreiben? Die Kernfusion der Sterne ist dafür bei weitem zu ineffizient. Ein anderer Mechanismus musste her. Paradoxerweise stehen die hellsten Objekte des Universums in Verbindung mit dem Dunkelsten, was man sich vorstellen kann, nämlich mit Schwarzen Löchern. Wenn Material in ein Schwarzes Loch hineinstürzt, wandelt sich potenzielle Energie (Lageenergie) über Zwischenstufen letztendlich in Strahlungsenergie um. Die Gravitation treibt den Quasar-Motor an!

1972 wurde die Röntgenquelle Cygnus X-1 im Sternbild Schwan entdeckt. Ein massereicher Stern mit rund dreißig Sonnenmassen verliert einen Teilchenwind, der in ein nahes Schwarzes Loch mit etwa zehn Sonnenmassen stürzt. Da die Schwarzen Löcher so kompakt und klein sind, heizt sich das Material beim Fall in das »Nadelöhr« stark auf. Typisch sind Temperaturen zwischen einem und zehn Millionen Grad Celsius, also vergleichbar mit dem Zentrum unserer Sonne. So heißes Material gibt Wärmestrahlung ab, die besonders hell im Röntgenbereich ist. Cygnus X-1 war ein erster sehr guter Kandidat für ein »stellares Schwarzes Loch«, also eines, dessen Masse mit der eines Sterns vergleichbar ist.



Computersimulation: Eine rotierende, leuchtende Gas-scheibe dient als Lichtquelle und macht das zentrale, rotierende Schwarze Loch als schwarzen Fleck sichtbar.



Das größte Schwarze Loch der Milchstraße ist rund 26 000 Lichtjahre entfernt und rund vier Millionen Sonnenmassen schwer. Es heißt »Sagittarius A*« Von uns aus gesehen befindet es sich im Sternbild des Schützen (Sagittarius). Die Grafik zeigt die Bahnen der Sterne, die um das Schwarze Loch kreisen.

Ein Foto vom Abgrund

Wie sieht ein Schwarzes Loch im Kosmos aus? Das ist eine Aufgabe für einen theoretischen Astrophysiker. Ein Schwarzes Loch wird erst durch seine Interaktion mit Lichtquellen in der Umgebung sichtbar. Diese lässt sich berechnen. Dazu muss der Theoretiker für die Raumzeit des Lochs (z.B. Kerr-Lösung) die Geodätengleichung lösen. Mit Integrationsverfahren lässt sich für jeden einzelnen Lichtstrahl sein Weg in der gekrümmten Raumzeit herausfinden. Dieses Verfahren heißt Ray Tracing (Strahlenverfolgung). Einige Strahlen werden vom Loch verschluckt, andere können entkommen und weitere werden kaum oder gar nicht beeinflusst. Viele Strahlen zusammen formen dann das Bild, wie ein Schwarzes Loch aussehen muss.

Die Herausforderung für den Beobachter besteht darin, diesen winzigen Schwarzen Fleck am Himmel ausfindig zu machen. Für sternartige Schwarze Löcher mit zehn bis hundert Sonnenmassen durchmisst der schwarze Fleck nur sechzig bis sechshundert Kilometer (Schwarzschild-Radius). Keine Chance, den Fleck aus einigen Hundert oder Tausend Lichtjahren Entfernung mit aktuellen Teleskopen aufzulösen.

Bislang ist es nicht gelungen, ein derartiges Foto von der Schwärze des Lochs zu schießen. Es wäre ein wissenschaftlich sehr brauchbarer Schnappschuss, weil die Größe des Flecks (der doppelte Schwarzschild-Radius bei statischem Loch) mit der Lochmasse linear wächst. Bei bekannter Entfernung des fotografierten Objekts folgt somit direkt die Lochmasse. Aus Verformungen des schwarzen Flecks lässt sich sogar etwas über seine Rotation aussagen. Diese Methode nennt man auch den obskurativen Nachweis Schwarzer Löcher. Die Radioastronomen haben zurzeit die »schärfsten Telekopaugen« in der Astronomie und dringen in den Mikrobogensekundenbereich vor. Das heißt, dass sie Winkelskalen am Himmel räumlich auflösen können, die so groß sind wie zehntel milliardstel Grad! Zurzeit unternehmen Radioastronomen enorme Anstrengungen, um mit einem Zusammenschluss von Radioantennen im Submillimeterbereich dieses erste Sensationsfoto eines Schwarzen Lochs zu knipsen. Das Projekt heißt passenderweise Event Horizon Telescope (EHT).

Zum Weiterlesen

Andreas Müller, *Schwarze Löcher – Die dunklen Fallen der Raumzeit*. Heidelberg 2010.

Andreas Müller, *Zeitreisen und Zeitmaschinen – Heute Morgen war ich noch gestern*. Heidelberg 2015.

Thomas Bührke, *Einsteins Jahrhundertwerk: Die Geschichte einer Formel*. 2015.

Lorenzo Iorio, *Long-term classical and general relativistic effects on the radial velocities of the stars orbiting Sgr A**. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 411; 453-463, 2011.

Julius R. Oppenheimer, Hartland Snyder, »On Continued Gravitational Contraction« in: *Physical Review*, Vol. 56, Issue 5, pp. 455-459.

Im Internet

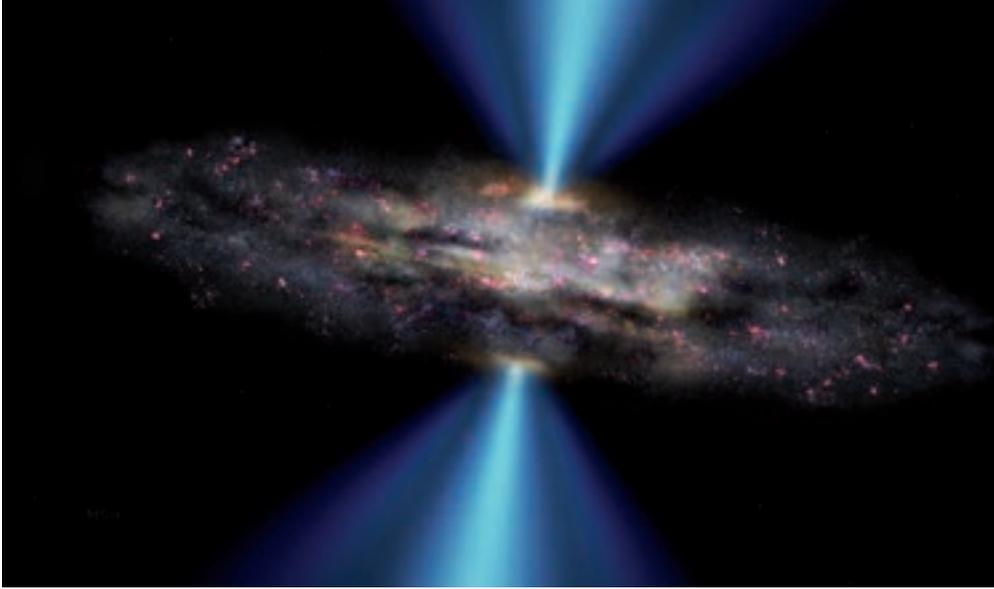
www.astronomiewissen.de
eventhorizontelescope.org

Die größten Schwarzen Löcher

Je größer die Lochmasse, umso größer der Fleck. Im Zentrum der Milchstraße oder in nahen Galaxien gibt es superschwere Schwarze Löcher mit einigen Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Zwar sind auch sie weiter weg, aber da die Masse linear in den Schwarzschild-Radius eingeht, sind die Verhältnisse günstiger als bei stellaren Löchern. Eines von zwei exzellenten Zielobjekten ist das größte Schwarze Loch der Milchstraße. Es ist rund 26 000 Lichtjahre entfernt und rund 4 Millionen Sonnenmassen schwer. Von uns aus gesehen befindet es sich im Sternbild des Schützen (Sagittarius) und trägt den radioastronomischen Namen Sgr A*. Das zweite, lohnende Zielobjekt befindet sich mit circa 50 Millionen Lichtjahren deutlich weiter weg, es ist dafür aber auch etwa sieben Milliarden Sonnenmassen schwer. Es ist das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum des Messier-Objekts M87, einer aktiven, elliptischen Galaxie im Sternbild Jungfrau.

Die Masse des Lochs bei Sgr A* ermittelten Astronomen genau mit derselben Methode, mit der sie die Sonne wiegen können: Das dritte Kepler-Gesetz setzt nämlich die Umlaufperiode eines Planeten und seinen Abstand zur Sonne (genauer: die große Halbachse seiner Bahnellipse) mit der Sonnenmasse in Beziehung. Es lautet: Das Verhältnis des Quadrats der Umlaufzeit über der dritten Potenz der großen Halbachse ist konstant. Diese Konstante hängt nur von der Zentralmasse ab. Die Bewegung der Sterne im Herzen der Milchstraße – der S-Sterne – ist ebenfalls ein identisches Zentralkraftproblem. So folgt aus der Bewegung der S-Sterne um Sgr A* die Masse von vier Millionen Sonnenmassen. Diese Masse bei Sgr A* konzentriert sich in einem Gebiet nicht viel größer als unser Sonnensystem. Dort ist nichts Auffälliges zu sehen, so dass die beste Erklärung ein supermassereiches Schwarzes Loch ist.

Auch andere Galaxien – so die erwähnten Quasare –, enthalten in ihren Zentren mindestens ein Schwarzes Loch im XXL-Format. Im Unterschied zu unserer Milchstraße, wo das große Schwarze Loch hungert, sind die Löcher in Quasaren, Blazaren, Radio- sowie Seyfertgalaxien aktiv. Diese Löcher werden ständig mit Unmengen von Material gefüttert und erzeugen enorme Leuchtkräfte; manchmal sogar fast lichtschnelle, gebündelte Materieausflüsse



Grafische Darstellung eines aktiven Galaxienkerns, z. B. eines Quasars, dessen zentrales Schwarzes Loch einen Materiestrahl (Jet) herausschießt.

(Jets). Der Oberbegriff für derartige aktive, superschwere Schwarze Löcher sind die aktiven Galaxienkerne (active galactic nuclei, AGN).

Die Astronomen sind mittlerweile in der Lage, die Beobachtungen der S-Sterne um Sgr A* in eine neue Ära von ART-Tests zu bringen, weil die Instrumente immer besser werden. Der Stern S2 befindet sich bei seiner größten Annäherung rund 12 000 Schwarzschild-Radien von Sgr A* entfernt. Das ist verhältnismäßig weit weg, nichtsdestotrotz sind die S-Sterne enormen Beschleunigungskräften ausgesetzt. Mit bis zu 5000 Kilometern pro Sekunde (ca. ein Prozent der Lichtgeschwindigkeit) gehören sie zu den schnellsten Sternen der Milchstraße.

Merkurs anomale Bewegung im Sonnensystem (Periheldrehung) birgt einen der relativistischen Zusatzeffekte. Die S-Sterne unterliegen ebenso dieser Anomalie, die auch als gravitoelektrischer Effekt bezeichnet wird. Er tritt bei nicht rotierenden Massen und damit auch in der Schwarzschild-Lösung auf. Bei rotierenden Massen hingegen zieht die rotierende Kerr-Raumzeit Testkörper wie die Sterne mit. Das wird als Lense-Thirring-Effekt oder gravitomagnetischer Effekt bezeichnet. Die rotierende Raumzeit wird durch Zentrifugalkräfte deformiert, so dass sie nicht mehr kugelsymmetrisch ist. Physiker nennen dies ein Massen-Quadrupol-Moment, das auch bei der Kerr-Lösung auftritt. Dieses Moment beeinflusst die Bewegung entfernter Testmassen (z. B. Sterne), die um die rotierende Masse kreisen. Der Quadrupol-Effekt ist allerdings außerordentlich schwierig zu messen.

Die Geschichte wiederholt sich also hundert Jahre nach der Entdeckung von Einsteins Gravitation: So wie die Abweichung in der Periheldrehung des Merkurs eine unerklärliche Anomalie in der Newton'schen Gravitation war, könnten nun »Gravitationsanomalien reloaded« in der Bewegung der S-Sterne zu einer neuen Gravitationstheorie führen, die über Einsteins Theorie hinausgeht.

Schwarze Löcher als Schlüsselobjekte der Fundamentalphysik

Wenn die Merkuranomalie demonstrierte, dass Newtons Theorie nicht das Ende in unserem Verständnis der Gravitation sein kann, könnten dann nicht neue Anomalien uns

den Weg von Einsteins ART zu einer ganz neuen Gravitation weisen? Anders gefragt: Was innerhalb von Einsteins Theorie erscheint merkwürdig oder welche Phänomene sind unerklärlich? Tatsächlich gibt es da ein paar Punkte:

Die relativistische Kosmologie erfordert zur befriedigenden Erklärung der Beobachtungsdaten die Dunkle Energie und die Dunkle Materie, zwei physikalisch unverstandene Komponenten. Ein weiteres Rätsel kommt aus der Teilchenphysik: Weshalb ist die Gravitation verglichen mit den anderen drei Naturkräften (elektromagnetische, schwache und starke Kraft) um viele Zehnerpotenzen schwächer? Dieses sogenannte Hierarchie-Problem ist aktuell nicht verstanden. Schließlich fällt beim Vergleich der Naturkräfte auch auf, dass die Gravitation als Einzige nicht durch eine Quantenfeldtheorie, sondern durch eine klassische, unquantisierte Feldtheorie beschrieben wird. Das ist seltsam, aber vielleicht ist die Natur so. Natürlich wurden bereits Quantengravitationstheorien vorgeschlagen. Die beiden prominentesten sind die Stringtheorie und die Schleifenquantengravitation. Ob sie der richtige Weg sind, um über Einstein hinauszugehen, ist bislang nicht entschieden, denn im Unterschied zu Einsteins Gravitation haben sie sich noch nicht in Experimenten bewährt.

Die Schwarzen Löcher erweisen sich im Ringen um eine neue Gravitationstheorie als Schlüsselobjekte, sind sie doch Orte extremer Gravitation. Sehr klar tritt an ihnen der Widerspruch zwischen Quantentheorie und Relativitätstheorie auch im Verständnis des Informationsbegriffs zutage. Das war Anlass, dass Stephen Hawking, Kip Thorne und John Preskill in den 1970er Jahren eine Wette darüber abschlossen, ob die Information über hineinstürzende Objekte tatsächlich im Loch vernichtet werde (gemäß dem relativistischen Standpunkt von Hawking und Thorne) oder irgendwie erhalten bleiben könnte (gemäß der Quantenphysik im Sinne Preskills). Im Jahr 2004 gab Hawking seine Wette als verloren, obschon die Klärung der Wette noch aussteht.

Bei allen Erfolgen, die uns die ART in den letzten hundert Jahren beschert hat, leben wir in einer spannenden Zeit der Gravitationsforschung. Ich erwarte, dass uns die Schwarzen Löcher und die Gravitationswellen in den nächsten Jahren zu weiteren Durchbrüchen verhelfen werden. ■



DER AUTOR

Dr. Andreas Müller

Der Astrophysiker und Wissenschaftsautor koordiniert als Wissenschaftsmanager die Forschung am Exzellenzcluster Universe der Technischen Universität München.



Erde im Zentrum

Das geozentrische Weltbild definierte die Erde als absolutes Zentrum der Welt. Sonne, Mond, die Planeten und sogar die Sterne kreisen um sie herum, während die Erde selbst unbewegt im Mittelpunkt steht. Diese Sicht auf die Welt wurde von den Mathematikern und Astrologen der Spätantike bis ins Hochmittelalter hinein vertreten.

Die Illustration von 1496 zeigt die Titelseite des *Epitoma in almagestum Ptolemaei* – die lateinische Übersetzung des griechischen *Almagest* von Ptolemäus durch Johannes Regiomontanus. Der bedeutende Mathematiker, Astronom und Verleger bereitete mit seinen Forschungen und Publikationen den Weg für die kopernikanische Wende.

Die dunklen Kräfte des Universums

Warum fällt der Kosmos nicht in sich zusammen? Einstein postulierte 1917 eine »vorläufig unbekannt universelle Konstante«, die dafür verantwortlich sein könnte. Später verwarf er diesen Gedanken. Seit der Entdeckung der Dunklen Energie erlebt die Einstein'sche »kosmologische Konstante« aber eine ungeahnte Renaissance.

Von Helge Kragh (Übersetzung: Michaela Grabinger)

Der Beginn der modernen Kosmologie lässt sich im Wesentlichen auf einen Aufsatz aus dem Jahr 1917 datieren, in dem Albert Einstein die Struktur des Universums mittels seiner neuen Allgemeinen Relativitätstheorie analysierte. Um theoretisch ausschließen zu können, dass der Kosmos aufgrund der Anziehungskraft der Gravitation in sich zusammenfällt, führte er einen »kosmologischen Term« ein, der eine über sehr große Entfernungen wirkende Abstoßungskraft repräsentiert. Die kosmologische Konstante, die dieser Term beinhaltet, hat eine bemerkenswerte Geschichte. Um sie zu verstehen, genügt es nicht, nur das Universum zu betrachten. Man muss sich darüber hinaus ansehen, wie die Physiker zu erklären versuchten, dass der scheinbar leere Raum mit Quantenenergie gefüllt ist. Die kosmologische Konstante ist eine kosmische Kraft und gleichzeitig ein Maß für die Energiedichte im leeren Raum. Es dauerte lange, bis Physiker und Astronomen die beiden Aspekte miteinander verknüpften und so zum modernen Verständnis von Einsteins Konstante gelangten.

Von der kosmologischen Konstante zur Dunklen Energie

Anfangs galt die kosmologische Konstante als notwendig für ein Universum, wie es die Gesetze der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben. Nachdem aber entdeckt worden war, dass sich das Universum ausdehnt, verlor sie ihre Daseinsberechtigung und man verbannte sie in eine abgelegene Ecke der Kosmologie. In der Folgezeit tauchte sie immer wieder auf, wurde allerdings jedes Mal wenig



Alles kreist um die Sonne

Andreas Cellarius illustrierte um 1660 das heliozentrische Weltbildes nach Kopernikus. Die nebenstehende Zeichnung »Planisphaerium Copernicanum« ist Teil des *Atlas coelestis seu harmonia macrocosmica*. Kopernikus stellt die Sonne in den Mittelpunkt seiner Betrachtungen über den Kosmos. Er erkennt: Die Erde dreht sich um ihre eigene schiefe Achse und bewegt sich – wie die anderen Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn um die Sonne. Der Mond kreist um die Erde. Die kugelförmigen Planeten bewegen sich für Kopernikus auf exakten Kreisbahnen.

später erneut für tot erklärt. Seit Ende der neunziger Jahre aber gilt sie aufgrund neuer astronomischer Beobachtungen als eine reale und überaus wichtige physikalische Größe. Die Entdeckung der durch sie bedingten sogenannten Dunklen Energie stellte zwar einen großen Fortschritt dar, zog aber auch theoretische Probleme nach sich. Bis heute lässt sich die Größe der kosmologischen Konstante mit den Mitteln der Grundlagenphysik nicht erklären.

»Eine vorläufig unbekannt universelle Konstante«

Ende 1915 hatte Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie vollendet und formulierte nun die Feldgleichungen seiner neuen Gravitationstheorie. Diesen Gleichungen zu-

folge entscheidet der Materieinhalt in einem bestimmten Bereich des Raums über die jeweilige Raumgeometrie. So ist der Raum in Sonnennähe nicht »flach«, sondern positiv gekrümmt, weshalb Lichtstrahlen durch die Sonne abgelenkt werden. Damals dachte Einstein noch nicht daran, die Allgemeine Relativitätstheorie auf das gesamte Universum anzuwenden, stellte aber nach Gesprächen mit dem niederländischen Astronomen Willem de Sitter 1916 schon bald kosmologische Erwägungen an. Das Ergebnis seiner intensiven Überlegungen in Bezug auf das Universum präsentierte er im Februar 1917 in einem Vortrag vor der Preußischen Akademie der Wissenschaften, der heute als Grundstein der modernen theoretischen Kosmologie gilt.

Das von Einstein auf der Basis der Allgemeinen Relativitätstheorie entwickelte Modelluniversum war ein geschlossener Raum, daher sowohl nach Ausdehnung als auch nach Masse endlich und dennoch unbegrenzt. Man stelle sich die zweidimensionale Oberfläche einer Kugel mit konstantem Radius vor: Sie hat keine Grenzen, sehr wohl aber eine endliche Fläche. In Analogie zu dieser Oberfläche lässt sich mathematisch ein konstant gekrümmter, geschlossener, dreidimensionaler Raum formulieren. Einstein ging bei seinen kosmologischen Überlegungen des Jahres 1917 von so einem Raum aus. Er musste aber erkennen, dass ein statisches und endliches Universum mit den Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht darstellbar ist. Um ein statisches Universum beschreiben zu können, musste er die Gleichungen um einen Term erweitern. Dieser von ihm zunächst als »eine [...] vorläufig unbekannte [...] universelle [...] Konstante« bezeichnete neue Term wurde bald als »kosmologische Konstante« bekannt. Einstein wies ihr als Symbol den griechischen Buchstaben Lambda (λ) zu, der bis heute für sie steht.

Die Lambda-Konstante sollte es vor allem ermöglichen, weiterhin mit einem statischen Modelluniversum zu arbeiten. Dazu musste sie einen präzisen Wert aufweisen, der sich aus der mittleren Massendichte des Universums ergab. Diese war damals jedoch nur ungenau bekannt. Da das Universum ohne den Lambda-Term unter dem Einfluss der Schwerkraft theoretisch in sich zusammenfiel, repräsentiert der Term eine über sehr große Entfernungen wirkende kosmische Abstoßungskraft oder Anti-Gravitation.

Nur wenn sich die durch Lambda gegebene Abstoßungskraft und die gravitationsbedingte Anziehungskraft genau ausgleichen, bleibt das Universum stabil. Welche Größe hatte nun die neue Konstante? Einstein war damals nur klar, dass sie verschwindend klein sein und die Dimension einer reziproken Fläche aufweisen musste (entsprechend beispielsweise der Einheit cm^{-2}). Einsteins Freund Willem de Sitter schätzte ihre Größe auf 10^{-50} cm^{-2} oder noch kleiner.

In der Zeit von 1917 bis etwa 1930 wurde Einsteins Modell des Universums als eines statischen Kugelraums mit positiver kosmologischer Konstante von vielen Astronomen und Physikern anerkannt, unter ihnen auch der berühmte britische Astronom Arthur Eddington, der die kosmologische Konstante für absolut notwendig und ebenso fundamental hielt wie andere Naturkonstanten, etwa die Elektronenladung und die Lichtgeschwindigkeit. Eddington betrachtete Einsteins Konstante nicht nur als Maß für den Radius des Universums, sondern als absolutes Maß für jede Entfernung. Ohne die kosmologische Konstante, sagte er 1924, »hätte kein Elektron je gewusst, wie groß es sein soll«. Darüber hinaus war Eddington ähnlich wie die heutigen Physiker davon überzeugt, dass mit Hilfe der kosmologischen Konstante die Geheimnisse der Elementarteilchen ergründet und Kosmologie und Atomphysik vereint werden könnten. Er setzte die kosmologische Konstante in Beziehung zu anderen Naturkonstanten wie Protonenmasse und Elektronenladung und gelangte zu der Feststellung, dass rein theoretisch $\text{Lambda} = 10^{-54} \text{ cm}^{-2}$ sei, ein Wert, der sich nicht allzu sehr von de Sitters Schätzung unterschied.

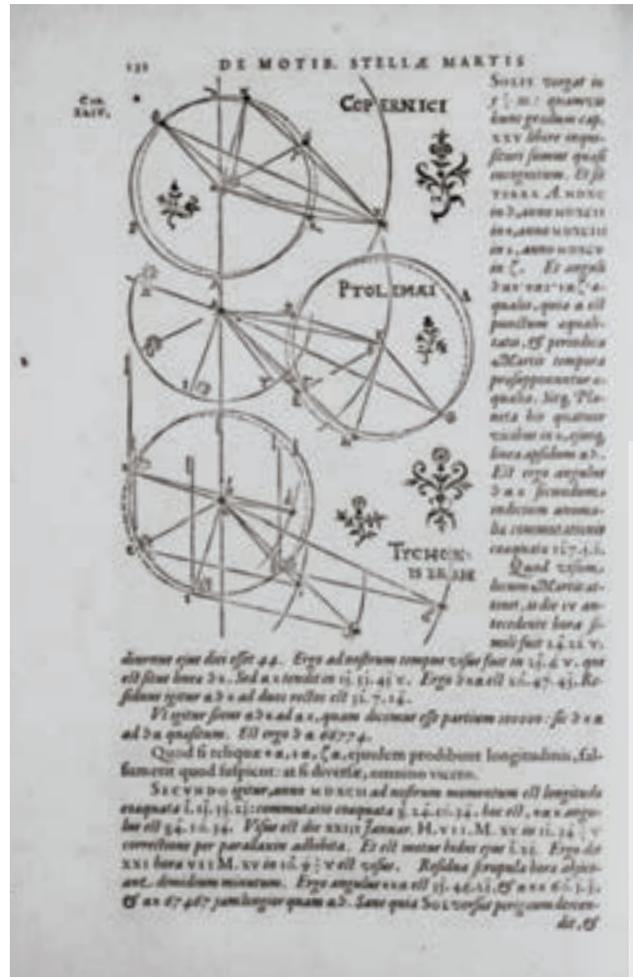
Einstein selbst zeigte sich weit weniger enthusiastisch als Eddington. Bereits 1917 hatte er in einem Brief an de Sitter geschrieben, die Frage, ob Lambda existiere oder nicht, könne nur durch astronomische Beobachtung beantwortet werden, und hatte außerdem zu bedenken gegeben: »Überzeugung ist eine gute Triebfeder, aber ein schlechter Richter!« Nur zwei Jahre später behauptete er, die Einführung der kosmologischen Konstante sei »ein besonders schwerwiegender Schönheitsfehler der Theorie« gewesen. Seiner Ansicht nach verkomplizierte die Konstante die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitäts-

theorie und minderte ihre Eleganz. Er hätte sie also aus ästhetischen Gründen gern verworfen, benötigte sie aber, um die Vorstellung vom statischen Universum aufrecht erhalten zu können, und sah zum damaligen Zeitpunkt keine Alternative. Erst zwölf Jahre später verabschiedete er sich endgültig von der Idee der kosmologischen Konstante.

Das expandierende Universum

Auf der Grundlage der theoretischen Arbeiten des belgischen Physikers Georges Lemaître und der astronomischen Beobachtungen, die Edwin Hubble in den Vereinigten Staaten gemacht hatte, kamen führende Astronomen wie Eddington und de Sitter 1930 zu dem Schluss, dass sich das Universum ausdehnt. Die Abstände zwischen den Galaxien wachsen, das Universum wird größer und dünnt aus. Innerhalb von ein, zwei Jahren wurde das herkömmliche Denkmodell eines statischen Kosmos verworfen und durch ein neues Paradigma ersetzt: das expandierende Universum. Da die kosmologische Konstante in Einsteins Augen damit überflüssig wurde, fehlte sie in den kosmologischen Modellen, die er 1931 und 1932 entwickelte. Bis zu seinem Tod 1955 betrachtete er die 1917 erfolgte Einführung von Lambda in die Feldgleichungen als einen Fehler. Dem Physiker George Gamow zufolge bezeichnete er die kosmologische Konstante sogar als »die größte Eselei« seines Lebens.

Dabei hatte es wohl kaum an der positiven kosmologischen Konstante gelegen, dass Einstein die Ausdehnung des Weltalls nicht bereits 1917 vorhersagte, denn Anfang der dreißiger Jahre stand fest, dass die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie das expandierende Universum sowohl mit als auch ohne die Erweiterung durch den kosmologischen Term beschrieben. Wie die kosmologische Konstante beschaffen sein sollte, wenn sie real war, also einen Wert ungleich null besaß, war zwar unklar, aber de Sitter zufolge stand die Antwort auf diese Frage in engem Bezug zur Expansion des Universums. Nicht nur verhindere die Konstante die Ausdehnung des Kosmos nicht, sondern sei vielleicht gerade die Ursache der Expansion. Obwohl de Sitter wusste, dass die Ausdehnung auch im Fall von $\Lambda = 0$ möglich ist, schrieb er 1931 in einem berühmten Artikel: »Erst das Vorhandensein von Lamb-



Elliptische Planetenbahnen

Johannes Kepler (1571–1630) verbesserte mit seinen Berechnungen das heliozentrische Weltbild. Seine Überlegungen dazu veröffentlichte er 1609 in *Astronomia Nova*: Die Planeten ziehen in elliptischen Bahnen um die Sonne. Die Sterne befinden sich in unterschiedlichen Abständen zur Erde verteilt im Raum. In drei Gesetzen formulierte Kepler die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten für die Bewegung der Planeten. Bis heute haben die Kepler'schen Gesetze Gültigkeit.

da, Einsteins »kosmologischer Konstante«, in den Feldgleichungen [...] eröffnet die Möglichkeit, dass das Universum seine Größe verändert. Warum es sich ausdehnt, anstatt zu schrumpfen, wissen wir nicht. [...] Jedenfalls hängt die Expansion ausschließlich von Lambda ab.«

Lemaître und einige andere Astronomen und Physiker sprachen sich weiterhin für die kosmologische Konstante aus, doch die meisten Wissenschaftler folgten ab den späten 1930er Jahren Einstein in seiner Entscheidung, Lambda gleich null zu setzen. Es herrschte damals allgemein die Ansicht, dass innerhalb der Kosmologie keine Notwendigkeit für die Konstante bestehe und sie wahrscheinlich auch für andere Bereiche der Physik irrelevant sei. Dennoch tauchte sie immer wieder auf und spielte bis Mitte der 1950er Jahre eine Rolle bei einem der großen Probleme der Kosmologie, nämlich bei der Frage, warum das Universum allem Anschein nach jünger war als die Erde. Einerseits wusste man, dass das Alter der Erde mindestens drei Milliarden Jahre betrug, andererseits deuteten Hubbles astronomische Beobachtungen in Verbindung mit Einsteins kosmologischen Gleichungen auf ein Alter des Universums von weniger als zwei Milliarden Jahre hin. Wie ließ sich diese Ungereimtheit beseitigen? Eine Möglichkeit bestand darin, Einsteins Theorie ihre Gültigkeit abzuspreehen. Die wesentlich reizvollere Alternative aber war die Idee, sich die kosmologische Konstante zunutze zu

machen. Lemaître berechnete, dass der Kosmos mit einem positiven Lambda zwanzig oder mehr Milliarden Jahre alt sein konnte, je nach dem Wert von Lambda. Nachdem Astronomen 1952 einen Fehler in Hubbles früheren Beobachtungen entdeckt hatten, war das Problem mit dem Alter des Universums im Großen und Ganzen gelöst. In den Jahren vor 1960 legten neueste Beobachtungen ein Alter des Universums von zehn bis fünfzehn Milliarden Jahren nahe, wodurch die kosmologische Konstante scheinbar überflüssig wurde.

Lemaître war aber nicht nur deshalb ein großer Verfechter der kosmologischen Konstante, weil sie zur Lösung des Zeitskalenproblems geführt hatte, sondern auch weil sie die relativistische Kosmologie mit erweitertem empirischen Gehalt versorgte. Vergeblich versuchte er Einstein von der Notwendigkeit eines Lambda-Werts ungleich null zu überzeugen. In einem Brief an Lemaître aus dem Jahr 1947 hatte Einstein zugegeben, dass seine Einwände auf ästhetischen Überlegungen beruhten: »Ich fand es widerwärtig, annehmen zu müssen, dass die Gleichung für das Gravitationsfeld aus zwei logisch unabhängigen Termen zusammengesetzt sein sollte [...]. Es ist schwierig, Argumente zur Rechtfertigung solcher Gefühle zu geben [...]. Ich kann mich aber nicht dagegen wehren, sie mit aller Kraft zu empfinden und ich bin nicht im Stande zu glauben, dass eine so widerwärtige Sache in der Natur verwirklicht werden könnte.« Fünfzig Jahre später stellte sich heraus, dass diese »widerwärtige Sache« sehr wohl in der Natur verwirklicht wurde.

Das Gewicht des Nichts

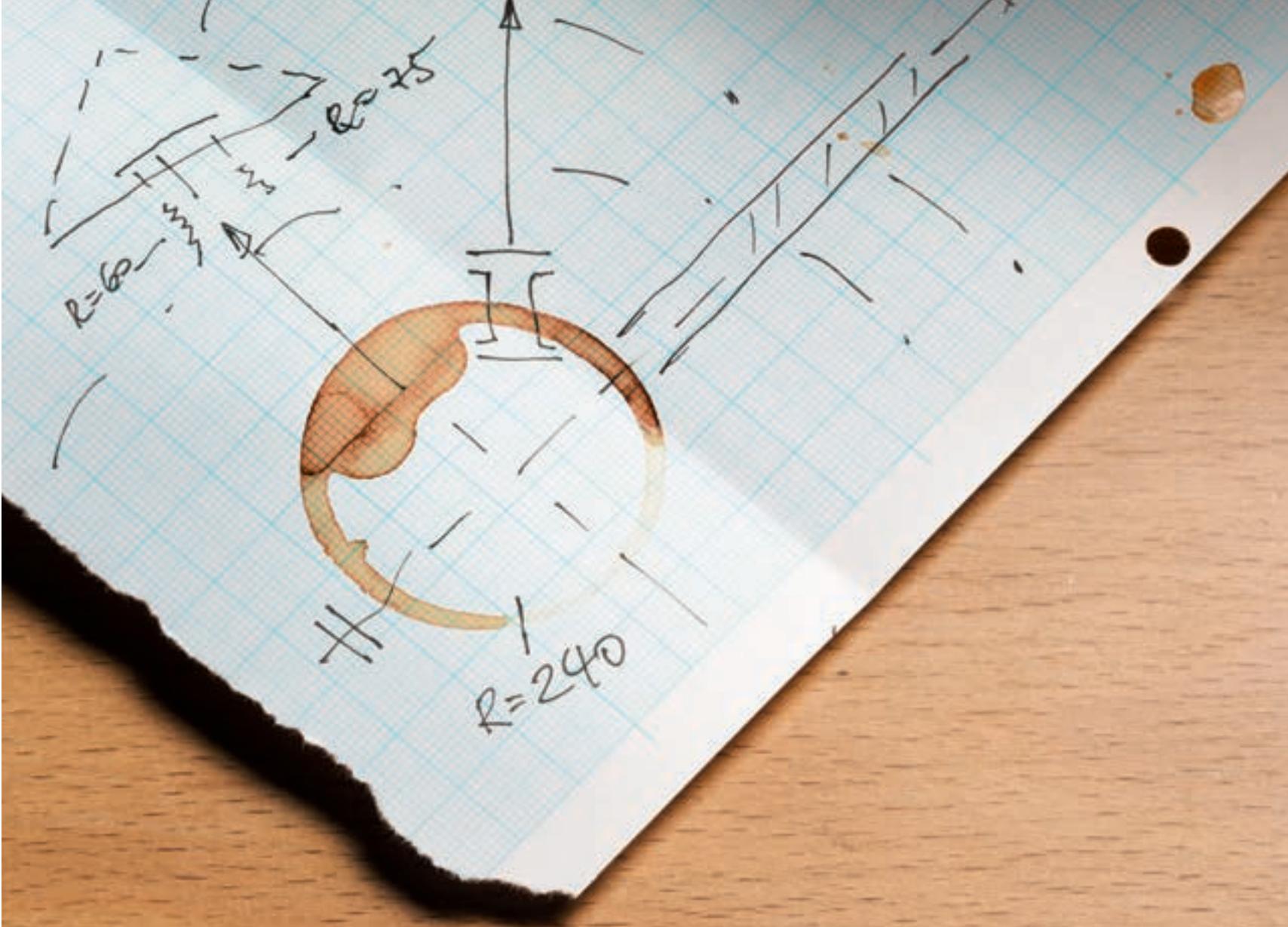
Die kosmologische Konstante ist nicht nur eine die Entwicklung des Universums beeinflussende Größe, sondern auch ein Maß für die Energiedichte des leeren Raums oder Vakuums. Energie ist notwendig positiv, und 1917 erkannte Einstein anhand seiner kosmologischen Feldgleichungen, dass sich der Lambda-Term als die Energiedichte des leeren Raums begreifen lässt. Das klingt merkwürdig, denn wie kann ein Raum leer sein, wenn er Energie enthält? Kurz gesagt lautet die Antwort: Gemäß der modernen Physik kann ein Raum nie leer im wörtlichen Sinn sein, das heißt er ist nie »nichts«, sondern muss Energie enthalten.

Einstein erkannte zwar den Zusammenhang zwischen der Vakuumenergie und der kosmologischen Konstante, hielt ihn aber nicht für wichtig. Erst viele Jahre später wurde dieser Zusammenhang eindeutig festgestellt und definiert.

In einem Vortrag wies Lemaître 1933 nicht nur darauf hin, dass Lambda der Vakuumenergiedichte entspricht, sondern erklärte darüber hinaus, die Vakuumenergie sei mit einem negativen Druck verbunden. Mit Hilfe von Einsteins Formel über die Äquivalenz von Masse und Energie $E = mc^2$ (wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist), gelangte er zu der Annahme, dass die durch Lambda gegebene Vakuumenergiedichte einer Massendichte von 10^{-27} g/cm^3 entspricht. Allerdings verhält sich die so definierte Materie sehr eigenartig und erzeugt einen negativen Druck. »Negativer Druck« klingt sonderbar, weil der Druck gewöhnlicher Materie immer positiv ist. Lemaître wusste, dass der negative Lambda-Druck eine Ausdehnung von leerem Rauminhalt bewirkt. Wenn gewöhnliche Materie, etwa ein Gas, expandiert, vergrößert sich der Rauminhalt, während die Energie in dem Rauminhalt unverändert bleibt. Die Lambda-Vakuumenergie verhält sich dagegen völlig anders: Bei expandierendem Vakuum bleibt die Energiedichte unverändert, das heißt die Vakuumenergie nimmt zu. Gewöhnliche Energie bleibt unverändert, Vakuumenergie bzw. Lambda-Energie aber wird aufgrund der vom Negativdruck hervorgerufenen Ausdehnung spontan erzeugt. Ein durchaus seltsamer Befund!

Der Gedanke, sogenannter leerer Raum sei keineswegs leer, sondern mit Energie gefüllt, war nicht neu. Um 1900 hatten noch so gut wie alle Physiker an die Existenz des hypothetischen Äthers geglaubt, einer immateriellen Substanz, die angeblich den gesamten Raum füllte. Dieser klassische Äther fiel zwar der von Einstein hervorgerufenen wissenschaftlichen Revolution zum Opfer, doch es bestand eine gewisse Ähnlichkeit zwischen ihm und der auf der Allgemeinen Relativitätstheorie basierenden Vorstellung vom leeren Raum. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie, so Einstein im Jahr 1920, »ist ein Raum ohne Äther undenkbar«.

Der Äther des englischen Physikers Oliver Lodge beispielsweise unterschied sich von Einsteins Äther, enthielt aber ebenso wie der Äther der Allgemeinen Relativitäts-



Kann man mit ein paar Litern Kaffee Millionen Liter Sprit sparen? MAN kann.

Seit Rudolf Diesel 1897 bei MAN den ersten Dieselmotor entwickelt hat, arbeiten unsere Ingenieure ständig daran, ihn immer noch effizienter zu machen. Ihr Antrieb dabei sind Neugier, Forscherdrang – und jede Menge Kaffee. Das Ergebnis sind unzählige schlaflose Nächte, tonnenweise Skizzen – und geniale Innovationen, die den Dieselmotor immer sauberer und immer sparsamer machen. Wie wir mit Innovationen nicht nur Trucks und Busse, sondern auch Schiffe und sogar ganze Kraftwerke nachhaltig effizient machen, erfahren Sie auf www.man.eu/mankann

theorie Energie. Die von Lodge 1907 berechnete Energiedichte des klassischen Äthers wies einen unglaublich hohen Wert auf – um das 10^{37} -fache höher als die von Lemaître 1933 geschätzte Vakuumenergiedichte. Ohne jede Kenntnis der kosmologischen Konstante hatte Lodge die Existenz einer Art Vakuumenergie angenommen – das, was die heutigen Physiker als Dunkle Energie bezeichnen.

Das Quantenvakuum

Weder Einstein noch Lemaître kam der Gedanke, die kosmologische Konstante mit der Quantentheorie zu verknüpfen. Es gab jedoch Wissenschaftler, die sogar schon vor Einsteins Einführung der kosmologischen Konstante glaubten, dass man dem Vakuum Energie im Sinne der Quantentheorie zuordnen könne. Der Quantentheorie zufolge kann ein schwingender Körper, etwa ein Elektron oder ein Molekül, niemals aufhören zu schwingen. Er besitzt eine eigenartige Energieform, die sogenannte Nullpunktsenergie, die selbst im niedrigsten Quantenzustand vorhanden ist. Der deutsche Chemiker (und Nobelpreisträger des Jahres 1920) Walther Nernst übertrug 1916 den Gedanken der Nullpunktsenergie von den Teilchen auf elektromagnetische Felder und stellte die Behauptung auf, leerer Raum sei eine Art Quantenäther mit sehr hoher Energiedichte. Diese Hypothese geriet jedoch praktisch in Vergessenheit und spielte in der späteren Entwicklung keine Rolle.

Auf der neuen Quantenmechanik basierende Berechnungen hatten zwar eine Nullpunktsenergie des Vakuums ergeben, doch führende Physiker wie Pascual Jordan und Wolfgang Pauli hielten sie für rein formal und wollten ihr keine physikalische Realität zuschreiben. Darin sollten sie sich irren. Der erste sichere Beweis für das reale Vorhandensein von Nullpunktsenergie im Vakuum stammt von dem niederländischen Physiker Hendrik Casimir, der 1948 mit Hilfe der Quantenmechanik ein schon bald als »Casimir-Effekt« bekanntes experimentelles Ergebnis vorhersagte. Zehn Jahre später wurde der Casimir-Effekt erstmals durch Messungen untermauert, und die Existenz des Quantenvakuums fand bei den Physikern nach und nach Anerkennung. Es gab demnach offenbar zwei Varianten der Vakuumenergie – die eine stand in Bezug zur Quantenmechanik, die andere zur Allgemeinen Relativitätsthe-

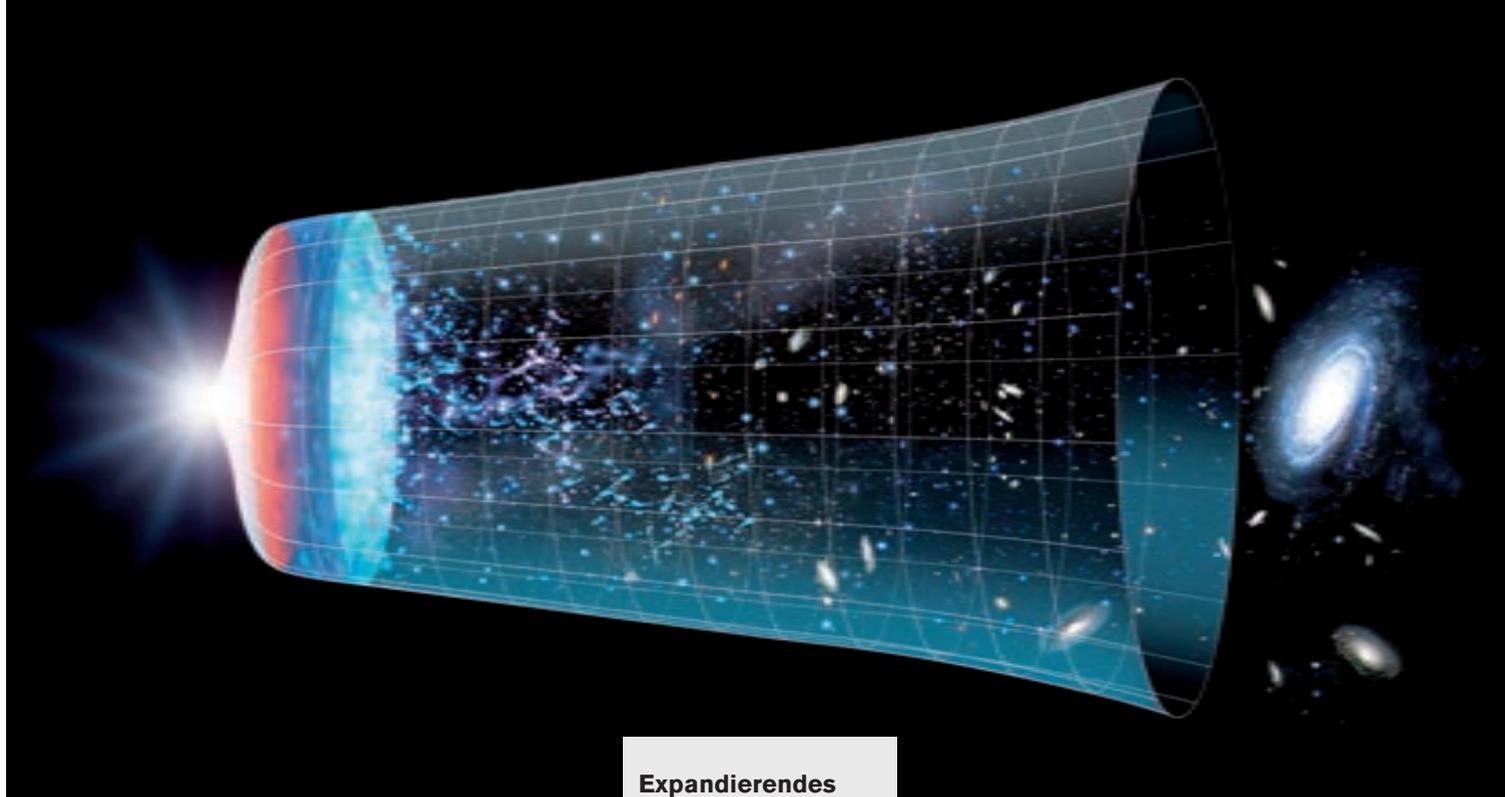
orie und zur kosmologischen Konstante. Nun stellte sich die Frage, ob die beiden Vakuumenergien zusammenhängen bzw. ob die kosmologische Konstante mittels Quantenmechanik beschrieben werden könnte.

Zwei Physiker aus der damaligen Sowjetunion, Erast Gliner aus St. Petersburg (damals Leningrad) und Jakow Seldowitsch aus Moskau, beschäftigten sich als Erste ernsthaft mit diesen Fragen. Seldowitsch war ein Pionier der Urknall-Kosmologie und bestens mit der kosmologischen Konstante vertraut, die damals unter Astronomen wie Physikern als überholt galt. 1968 veröffentlichte Seldowitsch einen Aufsatz, in dem er Lemaîtres Verbindung zwischen der kosmologischen Konstante und der Vakuumenergiedichte gewissermaßen wiederentdeckte, dann aber einen Schritt über den belgischen Kosmologen hinausging, indem er auch die Größen auf Basis der Quantenmechanik berechnete. Er kam dabei auf einen Quantenwert der kosmologischen Konstante, der erheblich höher ausfiel als der, den man auf der Grundlage astronomischer Beobachtungen geschätzt hatte. Damit begann das berühmte »Problem der kosmologischen Konstante«, das nicht nur bis jetzt ungelöst ist, sondern im Gegenteil sich noch verschärft hat.

Das Problem besteht darin, dass die grundlegende und äußerst zuverlässige Theorie der Quantenmechanik für die Vakuumenergie (bzw. für die kosmologische Konstante) ein Ergebnis liefert, das der physikalischen Realität komplett widerspricht. Manchen Berechnungen zufolge ist das theoretische Resultat 10^{120} -mal größer als das Beobachtungsergebnis! Der berühmte amerikanische Physiker Steven Weinberg bemerkte dazu in den späten achtziger Jahren, dies sei »die schlechteste Vorhersage in der gesamten Geschichte der Physik«, und konstatierte aufgrund der Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung »eine veritable Krise« innerhalb seiner Wissenschaft. Zum damaligen Zeitpunkt war noch immer unklar, ob die kosmologische Konstante null betrug oder nur extrem klein ausfiel. Zehn Jahre später änderte sich die Situation drastisch.

Die Entdeckung der Dunklen Energie

Mitte der neunziger Jahre behaupteten einige Physiker und Kosmologen, es gebe im Universum eine große Menge



Expandierendes Universum

Heute vermuten Kosmologen den Beginn des Universums im Urknall, der vor etwa 13,8 Milliarden Jahren stattfand. Seither expandiert das Universum. Die Grafik zeigt diesen Prozess beginnend beim Urknall bis heute von links nach rechts.

»Dunkler Energie« und diese neue Energieform sei wahrscheinlich die auf Einsteins kosmologischer Konstante beruhende Vakuumenergie. 1995 erschien ein Artikel mit dem Titel »Die kosmologische Konstante ist wieder da«, und wenige Jahre später tauchte der Begriff »Dunkle Energie« auf. Von der Ausdehnung des Weltalls wusste man seit 1930, aber mit welcher Geschwindigkeit sie erfolgt, war bis vor kurzem ungewiss. 1998 lieferten zwei internationale Forscherteams aufgrund präziser Supernova-Messungen starke Hinweise darauf, dass sich das Universum seit mindestens fünf Milliarden Jahren mit zunehmender Geschwindigkeit ausdehnt. Um die Beobachtungsdaten zu erklären, gingen die Forscher der Supernova-Projekte davon aus, dass ca. 69 Prozent des Masse-Energie-Gehalts des Universums in Form einer abstoßenden Dunklen Energie vorliegen, die restlichen 31 Prozent in Form von Materie. Davon wiederum sind etwa 27 Prozent Dunkle Materie, nur vier Prozent bestehen aus Protonen, Neutronen und Elektronen. 2011 erhielten die drei führenden Wissenschaftler des Supernova-Projekts gemeinsam den Physik-Nobelpreis für »die Entdeckung der beschleunigten Ausdehnung des Universums«.

Die kosmische Dunkle Energie, auf die man im Zuge dieser Entdeckung gestoßen war, wurde allgemein mit der durch die kosmologische Konstante gegebenen Vakuumenergie gleichgesetzt. Einsteins alte, umstrittene Konstante erlebte somit ein bemerkenswertes Comeback und gilt heute als realer und überaus wichtiger Bestandteil der Grundlagenphysik. Gegenwärtig herrscht Konsens darüber, dass Lambda für die im Universum dominierende Vakuumenergie verantwortlich ist und dessen immer schneller erfolgende Expansion bewirkt. Aufgrund von astronomischen Beobachtungen ergab sich als Wert der kosmologischen Konstante ungefähr 10^{-56} cm^{-2} entsprechend einer Vakuumenergiedichte von $10^{-29} \text{ g/cm}^{-3}$. Nachdem die kosmologische Konstante nunmehr physikalisch real ge-

worden war, wandten sich viele Physiker erneut dem Problem zu, ihren Wert innerhalb des Standardmodells der Teilchenphysik zu erklären. Bislang war keiner der vielen Versuche erfolgreich. Allgemein wird angenommen, dass man die Lösung erst dann finden wird, wenn es der Physik gelingt, eine korrekte Theorie der Quantengravitation zu entwickeln, also die Schwerkraft mit den anderen Elementarkräften der Natur zu vereinigen.

Ein neues Weltbild

Die Entdeckung des expandierenden Universums und der Dunklen Energie hat zu einem radikal neuen Bild von unserem Kosmos und zu einem Paradigmenwechsel geführt, der mit der kopernikanischen Wende vergleichbar ist. Kopernikus verbannte ja nicht nur die Erde aus dem Zentrum des Universums und wies ihr die Stellung eines um die Sonne kreisenden Planeten zu: Er und seine Anhänger behaupteten zudem, dass die Materie des Himmels keine andere als die der Erde sei. Heute wissen wir, dass die gewöhnliche Materie nur einen unbedeutenden Teil der gesamten Materie und Energie unseres Universums darstellt.

Das neue Weltbild befindet sich in völliger Übereinstimmung mit der Entstehung des Universums durch den Urknall vor etwa 13,8 Milliarden Jahren, entwirft jedoch ein neues Szenario in Bezug auf den Zustand des Kosmos in ferner Zukunft. Im Verlauf der Ausdehnung des leeren Raums wird die Menge an Dunkler Lambda-Energie zunehmen und zu einer noch stärkeren Expansion führen, bis dereinst die Dunkle Energie im Universum für alle Zeit dominiert. Stimmt die aktuelle Theorie, so wird das Universum zwar niemals aufhören zu existieren, sich aber unwiderruflich in ein unendliches Meer aus Dunkler Energie verwandeln, in dem kein Leben möglich ist.

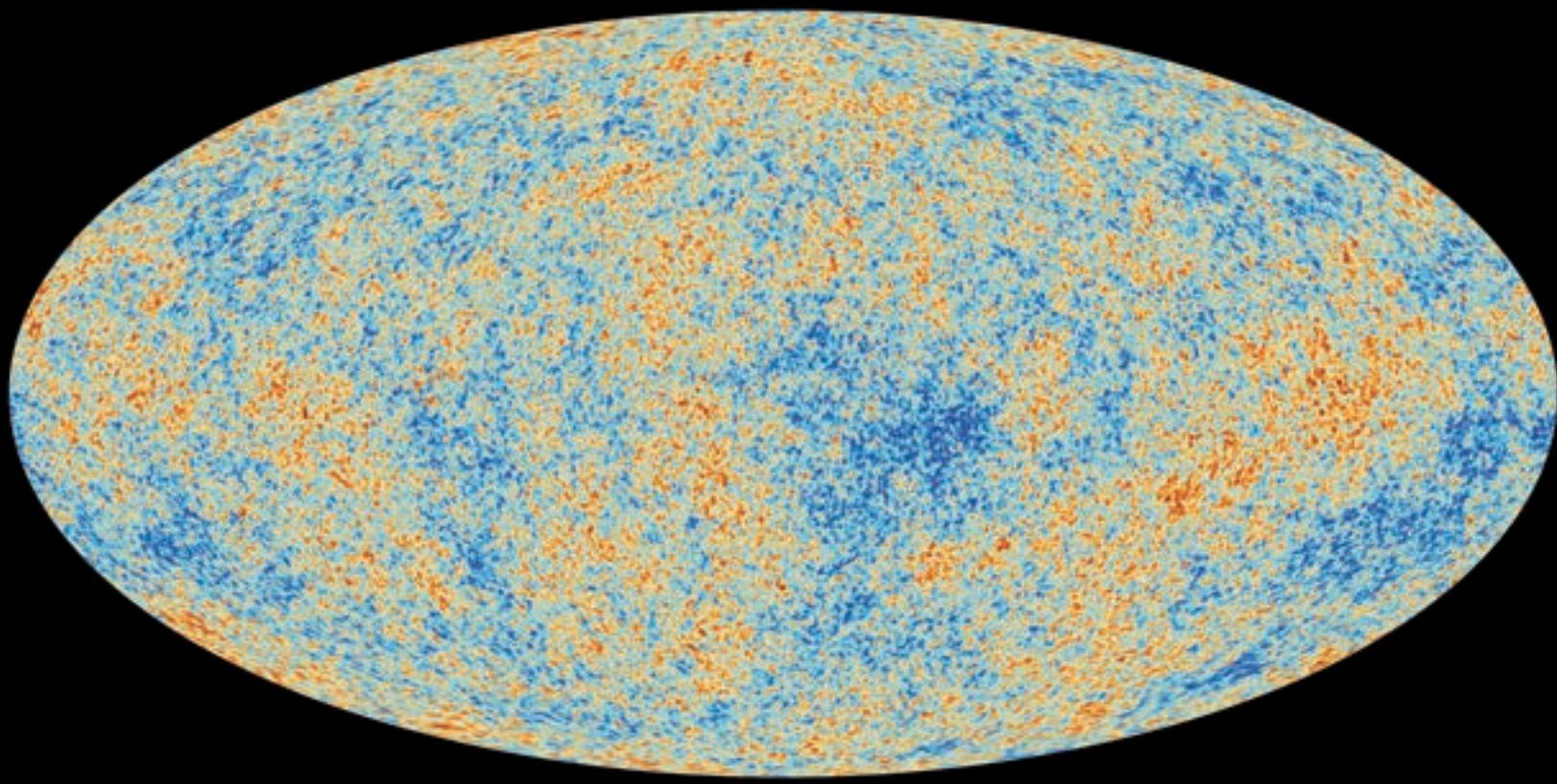
Was wohl Einstein von der Renaissance der kosmologischen Konstante halten würde, die er einst als »widerwärtige Sache« und seine »größte Eselei« verworfen hatte? ■



DER AUTOR

Prof. Dr. Helge Kragh

ist emeritierter Professor des Niels Bohr Instituts in Kopenhagen und ehemaliger Professor für Wissenschaftsgeschichte an der Universität Aarhus in Dänemark. Als Autor hat er zahlreiche Bücher über die Geschichte der Kosmologie und andere wissenschaftshistorische Themen publiziert.



Das große Rauschen

Neben dem Jubiläum der Allgemeinen Relativitätstheorie gibt es in diesem Jahr ein zweites Jubiläum zu feiern: die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Beide Ereignisse haben unser Weltbild nachhaltig verändert. Von Christian Sicka

Die Allgemeine Relativitätstheorie hat einen neuen Denkraum geschaffen, in dem sich globale Modelle des Kosmos entwickeln lassen – die Entdeckung der Mikrowellenhintergrundstrahlung hat zum Durchbruch des Urknall-Modells geführt. Aus heutiger Sicht ist es nicht übertrieben, die Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie durch Albert Einstein und die Entdeckung der Mikrowellenhintergrundstrahlung durch Arno Penzias und Robert Wilson als die zwei wichtigsten Schritte hin zu unserem heutigen Verständnis vom Kosmos zu sehen. Zusammen betrachtet zeigen die beiden Ereignisse, auf wie unterschiedliche Art und Weise wissenschaftlicher Fortschritt entsteht, denn die Protagonisten der Entdeckungen sind von Grund auf verschieden: Einstein, der kühne Theoretiker, der oft von Tatsachen ausgeht, die noch nicht experimentell bewiesen sind – und Penzias und Wilson, die beiden Experimentatoren, für die nur die Messung zählt und die mit akribischer Genauigkeit jeden Messfehler auszumergen versuchen.

Einsteins erstes Modell vom Kosmos

Vor hundert Jahren veröffentlichte Albert Einstein in Berlin die Allgemeine Relativitätstheorie. Sie wurde zur Grundlage aller Berechnungen über das größte System, das wir kennen, den Kosmos. Einstein war zur Zeit der

Veröffentlichung der Allgemeinen Relativitätstheorie schon kein Unbekannter mehr, wenn auch noch nicht der Star der Wissenschaft, der er in den 1920er Jahren werden sollte. Der Kosmos als Ganzes hat ihn schon auf dem Weg zur Relativitätstheorie beschäftigt. Dabei wurde er stark von dem österreichischen Physiker und Philosophen Ernst Mach inspiriert. Mach ging davon aus, dass sich die Trägheit einzelner Körper auf den Einfluss aller im Universum verteilten Massen zurückführen lässt. Um das willkürliche Setzen von Randbedingungen zu vermeiden, sollte der Kosmos nach Einsteins Überlegungen endlich sein. Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie und der mathematischen Formulierung gekrümmter Räume war erstmals ein selbstkonsistentes Denkmodell möglich, in dem kein Randproblem auftritt und der Kosmos dennoch endlich ist. Das erkannte Einstein und er veröffentlichte am 8. Februar 1917 den Artikel »Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie« in den *Annalen der Physik*. Einstein ging dabei von zwei Grundpostulaten aus: Bei der Beschreibung des gesamten Kosmos kann man vereinfachend annehmen, dass erstens die Materie gleichmäßig verteilt ist und dass zweitens sich diese Materie nicht bewegt, also der Kosmos sein Aussehen für alle Zeiten bewahrt. Einstein konnte das zweite Postulat nur halten, indem er einen zusätzlichen Term in die Gleichungen der

Bild oben: Diese Karte des Mikrowellenhintergrundes wurde mit Hilfe des 2009 gestarteten Forschungssatelliten »Planck« erstellt. Sie zeigt mit der bisher größten Genauigkeit heiße und kalte Bereiche im Mikrowellenhimmel und ist damit das schärfste Foto vom noch jungen Universum.

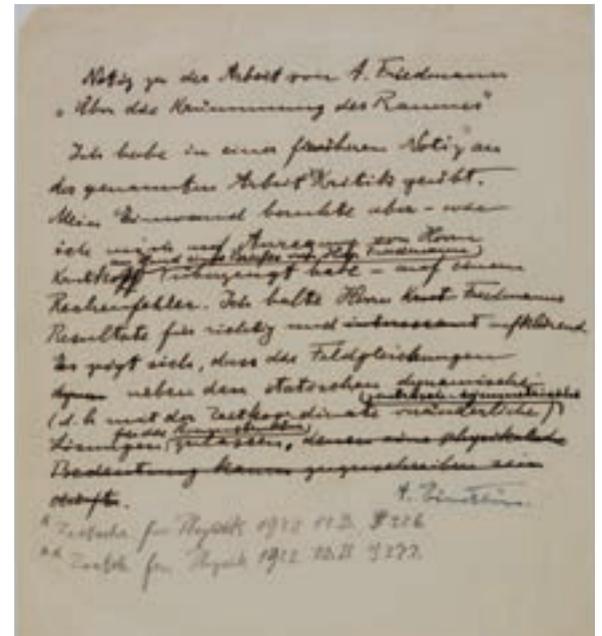
Allgemeinen Relativitätstheorie einführte. Dieser Term, den er Lambda-Term nannte, verhinderte nach seinen Berechnungen das Zusammenstürzen der Materie und sollte den Astronomen noch viele Rätsel aufgeben (siehe Beitrag Helge Kragh, S. 22-27). Es gab um 1917 allerdings zu wenige auf astronomischen Beobachtungen basierende Erkenntnisse, um dieses kosmologische Modell zu bestätigen oder zu widerlegen.

Von Einsteins Kosmos zum expandierenden Universum

Einstein hatte über seinen Freund Paul Ehrenfest, mit dem er in ständigem Briefkontakt stand, eine enge Verbindung zur niederländischen Universität Leiden. Die Allgemeine Relativitätstheorie fiel dort auf fruchtbaren Boden und wurde nicht nur von Ehrenfest mit Begeisterung aufgenommen. Der Astronom Willem de Sitter, Professor in Leiden, war der Erste, der ein vollkommen anderes Bild vom Kosmos als Einstein entwarf. Die größte Überraschung bei seiner kosmologischen Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen war, dass er von einem leeren Kosmos ganz ohne Materieinhalt ausgehen konnte, ohne auf Widersprüche zu stoßen. Obwohl de Sitter sein Modell anfangs als statisch betrachtete, stellte sich später heraus, dass sich damit mathematisch ein expandierendes Universum beschreiben lässt. In den frühen 1920er Jahren hatte sich die Allgemeine Relativitätstheorie unter Wissenschaftlern in der ganzen Welt verbreitet und die fähigsten Physiker und Mathematiker suchten spezielle Lösungen der komplexen Feldgleichungen.

Der russische Mathematiker Alexander Friedmann erkannte, dass die Annahme von Homogenität und Isotropie der Materieverteilung im Kosmos eine ganze Klasse verschiedener Lösungen zulässt. Darunter auch solche, die einen sich verändernden, dynamischen Kosmos beschreiben. In einem Brief teilte er Einstein sein bedeutendes Resultat mit. Allerdings konnte sich Einstein anfangs nicht von seinem zweiten Postulat, einem statischen Kosmos, lösen. In einer ersten Bemerkung an die *Zeitschrift für Physik* zur Arbeit von Friedmann am 18. September 1922 schrieb er: »Die [...] Resultate bezüglich einer nichtstationären Welt erscheinen mir verdächtig. In der Tat zeigt sich,

Handschriftliche Notiz von Einstein an die Redaktion der *Zeitschrift für Physik*: »Es zeigt sich, dass die Feldgleichungen neben den statischen dynamische [...] Lösungen für die Raumstruktur zulassen.«



dass jene gegebene Lösung mit den Feldgleichungen nicht verträglich ist.« Erst später bemerkte Einstein, dass er sich verrechnet hatte, und er schrieb eine Berichtigung an die Redaktion der *Zeitschrift für Physik*, sie lautet: »Es zeigt sich, dass die Feldgleichungen neben den statischen dynamische [...] Lösungen für die Raumstruktur zulassen.« Die dynamischen Lösungen von Friedmann blieben in der Folgezeit nahezu unbeachtet. Der Mathematiker überließ die von ihm gefundenen Resultate den Astronomen und Physikern und die kümmerten sich nicht weiter darum. Einstein hielt vorerst an seinem statischen Kosmos fest und schrieb der Lösung von Friedmann keine physikalische Bedeutung zu.

Parallel zur Entwicklung der frühen relativistischen Weltmodelle gab es entscheidende Fortschritte bei der Klärung der Natur der am Himmel beobachteten Nebelstrukturen. Der amerikanische Astronom Edwin Hubble konnte mit Hilfe veränderlicher Sterne im Jahr 1923 zeigen, dass viele der Nebelstrukturen ferne Sternsysteme sind – Galaxien, die unserer Milchstraße ähnlich aus Milliarden von Einzelsternen bestehen. Schon 1913 hatte Vesto Slipher am Lowell-Observatorium in Arizona im Spektrum einer damals noch nicht als Galaxie identifizierten Nebelstruktur erstmals eine Verschiebung des Spektralliniennusters nach größeren Wellenlängen hin zum langwelligen, rötlichen Bereich entdeckt – deshalb der Name Rotverschiebung.

Bis 1917 hatte Slipher diesen Effekt bei 25, bis 1923 bei 36 Galaxienspektren gefunden und ihn als Dopplereffekt (Fortbewegung der Lichtquelle) gedeutet. Das bedeutete, dass sich die Galaxien von unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, fortbewegen. 1925 schlug der Kieler Astronom Carl Wirtz vor, dass der Grund für diese Galaxienflucht nicht eine tatsächliche Bewegung der Galaxien, sondern die Ausdehnung des Raumes ist.



Bild links: Albert Einstein und Georges Lemaître 1932.

Bild rechts: Albert Einstein (links), Edwin Hubble (Mitte) und Walter Adams (rechts) am Mount-Wilson-Observatorium.



Im Jahr 1927 betrat der belgische Theologe, Priester und Astrophysiker Georges Lemaître die Bühne der Kosmologie. Anders als der Mathematiker Friedmann war Lemaître an der Vereinbarkeit der beobachteten Rotverschiebung der Spektrallinien ferner Galaxien mit einer bestimmten Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen interessiert. Er fand, wie vor ihm eigentlich schon Friedmann und de Sitter, eine Lösung, bei der das Universum expandiert. Da Lemaître, im Gegensatz zu seinen Vorgängern, auf diese Weise die Galaxienflucht erklären konnte, gilt er heute als Vater der Urknall-Theorie.

Die Datenlage bezüglich der gemessenen Rotverschiebungen von Galaxien sollte sich in den Jahren nach 1927 noch entscheidend verbessern. Hubble fand in den späten 1920er Jahren am Observatorium auf dem Gipfel des Mount Wilson in Kalifornien weitere Rotverschiebungen von Spektrallinien ferner Galaxien und hatte 1929 genügend Daten, um seine berühmte Arbeit über die lineare Beziehung zwischen Entfernung und Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien zu veröffentlichen. Der logische Schluss daraus war, dass sich die Galaxien wie Rosinen in einem aufgehenden Rosinenkuchen voneinander entfernen. Einstein hielt an seinem statischen Kosmos über zehn Jahre fest und begann erst um 1930, expandierende Weltmodelle physikalisch ernst zu nehmen. Zu seinem Meinungsumschwung dürfte eine Reise nach Kalifornien im Jahr 1930 beigetragen haben. Danach schreibt er an seinen Freund und ehemaligen Studienkollegen Michele Besso: »Die Leute vom Mount-Wilson-Observatorium sind ausgezeichnet. Sie haben in letzter Zeit gefunden, dass die Spiralnebel räumlich annähernd gleichmäßig verteilt sind und einen ihrer Distanz proportionalen mächtigen Dopplereffekt zeigen, der sich übrigens aus der Relativitätstheorie zwanglos folgern lässt (ohne kosmologisches Glied). Der Haken ist, dass die Expansion der Materie auf einen zeitlichen Anfang schließen lässt, der 10^{10} bzw. 10^{11} Jahre zurückliegt.« Den »Haken«, dass unser Kosmos einen zeitlichen Anfang hat, konnten viele Forscher wie Einstein anfänglich nur schwer akzeptieren. Aber es sollten neue Beweise für das Urknall-Modell dazukommen. Wenn das Universum expandiert, muss es früher kleiner gewesen sein und letztlich einen fast punktförmigen, ultradichten Anfang

gehabt haben. Damit und mit thermodynamischen Überlegungen folgt, dass zu Beginn unser Kosmos aus extrem dichter und heißer Materie bestand, die im Laufe der Expansion langsam abkühlt. Die Energie der Atome sollte am Anfang so groß gewesen sein, dass Kernreaktionen möglich sind. Das erkannte eine Forschergruppe um den Physiker George Gamow an der George Washington Universität. In ihrer 1948 veröffentlichten Theorie von der Entstehung der Elemente im Urknall (die sich letztlich als nur zum Teil richtig herausstellte, denn nicht alle chemischen Elemente wurden im Urknall erzeugt) zogen sie eine weitere Schlussfolgerung: Vom heißen Urknall sollte Reststrahlung übrig bleiben. Diese Reststrahlung kühlt mit der Expansion des Kosmos langsam ab und erfüllt bis heute den ganzen Raum. Nach ihren Berechnungen sollte diese Reststrahlung heute eine Strahlungstemperatur von 5 bis 50 Kelvin aufweisen (diese Werte liegen, wie wir heute wissen, etwas zu hoch). Eigenartigerweise prüfte niemand diese Vorhersage, Gamow und seine Kollegen widmeten sich anderen Forschungsthemen, und keiner dachte mehr an den Mikrowellenhintergrund – bis 1965.

Die Entdeckung der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung

Vor fünfzig Jahren, am 13. Mai 1965, reichten Arno Penzias und Robert Wilson beim *Astrophysical Journal* einen Artikel mit der Überschrift: »A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s« ein. Der nur knapp zwei Seiten lange Artikel zeugt von der Bescheidenheit der beiden Radioastronomen, ihr Artikel legt kurz und knapp die experimentellen Fakten dar: Die Angestellten der Bell Laboratories hatten bei Messungen mit einer großen Hornantenne, die auf den Empfang von Strahlung der Frequenz 4080 Megahertz eingestellt war, ein verstärktes Rauschen festgestellt.

Ursprünglich hofften Arno Penzias und Robert Wilson, mit ihrer Antenne Radiowellen aus dem Halo der Milchstraße zu empfangen, um damit den Aufbau unserer Heimatgalaxie zu entschlüsseln. Das Radorauschen der Milchstraße ist aber schwer zu unterscheiden von dem unvermeidlichen elektrischen Rauschen, das von der Antenne, der Verstärkeranlage und der Atmosphäre erzeugt



Arno Penzias (rechts) und Robert Wilson (links) vor der Hornantenne, mit der die Radioastronomen den kosmischen Mikrowellenhintergrund entdeckten. Die Messapparatur war in der Kabine links untergebracht und steht heute im Deutschen Museum.

wird. Deshalb mussten Penzias und Wilson zuerst die verschiedenen Rauschquellen identifizieren. Nachdem sie ein Jahr lang versucht hatten, diese zusätzliche Strahlung auf bekannte Quellen zurückzuführen, kamen sie zu dem Ergebnis: Die Ursache für das Rauschen ist eine zusätzliche Strahlung, die aus allen Richtungen aus dem Kosmos auf die Erde trifft. Die Strahlungstemperatur dieser Strahlung lässt sich zu 3,5 Kelvin bestimmen – mit einer Unsicherheit von einem Kelvin. Lediglich ein einziger Satz deutete in ihrer Veröffentlichung von 1965 auf die Bedeutung hin, die diese Messung erlangen sollte – er lautet übersetzt: »Eine mögliche Erklärung für die beobachtete, zusätzliche Rauschtemperatur wird von Dicke, Peebles, Roll und Wilkinson (1965) in einem begleitenden Artikel in dieser Zeitschriftenausgabe gegeben.«

Die Erklärung, die die Autoren des besagten Artikels fanden, hat unser Modell vom Kosmos nachhaltig verändert. Robert Dicke und seine Studenten James Peebles, David Wilkinson und Peter Roll waren Astrophysiker an der Princeton Universität und arbeiteten an Theorien zur Entstehung unseres Kosmos. Auch sie waren, wie zuvor schon Gamow, darauf gestoßen, dass der Kosmos eine sehr heiße Anfangsphase durchlaufen haben sollte, und interpretierten die Strahlung, die von Penzias und Wilson gemessen wurde, als Temperaturstrahlung aus der Frühphase unseres Universums. Durch die Expansion des Universums haben sich auch die Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung gedehnt, so dass man heute nur noch eine Strahlungstemperatur wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt messen kann.

Nachdem das Spektrum der Mikrowellenhintergrundstrahlung in den Folgejahren der Entdeckung weiter vermessen wurde, war man sich unter Kosmologen einig: Die Übereinstimmung zwischen der mit dem Urknall-Modell vorhergesagten Mikrowellenstrahlung und den gemessenen Werten ist so groß, dass die Messung der Mikrowellenhintergrundstrahlung als der tragende Beweis für die Richtigkeit der Entstehung des Kosmos aus einem heißen Urknall gelten kann. Viele Kosmologen, die vorher Anhänger der »Steady-State-Theorie« oder einer anderen kosmologischen Theorie waren, wechselten daraufhin ins Lager der Vertreter des Urknall-Modells. Anfang der 1970er Jahre wurde das

Urknall-Modell zum Standardmodell der Kosmologie. Für ihre bahnbrechende Entdeckung erhielten Penzias und Wilson 1978 den Nobelpreis für Physik. Als Penzias nachträglich von der ursprünglichen Voraussage der Hintergrundstrahlung durch Gamow und seine Kollegen hörte, bat er Gamow in einem versöhnlichen Brief um weitere Information. Dieser war verständlicherweise etwas verstimmt und bemerkte in seinem Antwortschreiben: »Sie sehen also, die Welt hat nicht mit dem allmächtigen Dicke begonnen«.

Der nächste Schritt war die genauere Untersuchung von Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund. Die Temperaturunterschiede sind jedoch so klein (1/100 000 Grad Celsius), dass es bis 1992 dauerte, bis sie im Weltraum gemessen wurden. Danach setzte sich die Erfolgsgeschichte der Erforschung des Mikrowellenhintergrunds fort. Ballongestützte Messungen brachten in den 1990er Jahren eine bessere Auflösung bei der Kartierung bestimmter Himmelsbereiche. Anfang des 21. Jahrhunderts konnten Astronomen eine hochaufgelöste Karte des gesamten Mikrowellenhimmels erstellen. Messungen aus diesen Satellitenmissionen bilden die momentan wichtigste Datengrundlage in der kosmologischen Forschung. Die Beobachtung der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung hat damit nicht nur zum Durchbruch des Urknall-Modells geführt, sondern ermöglicht es auch, Parameter dieses Modells wie das Alter des Universums oder den Beginn und das Ende bestimmter Epochen in der Geschichte des Kosmos genau vorherzusagen.

Die Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie durch Einstein vor hundert Jahren und die Entdeckung des Mikrowellenhintergrundes vor fünfzig Jahren haben eine Fülle von Entdeckungen nach sich gezogen. So viele, dass Kosmologen schon vom Zeitalter der Präzisionskosmologie sprechen. Sie glauben, dass – sieht man von einigen Unklarheiten wie der rätselhaften Dunklen Materie oder der Dunklen Energie ab – die Geschichte des Kosmos ab dem Bruchteil einer Sekunde nach dem Urknall bis jetzt bekannt ist und auch seine zukünftige Entwicklung vorhergesagt werden kann. Aber vielleicht gibt es irgendwann wieder eine große Überraschung, ein paar Tüftler bekommen das Rauschen nicht aus ihrer Messanordnung und alles muss noch einmal umgeschrieben werden. ■■



DER AUTOR

Dr. Christian Sicka
ist Physiker und Kurator für Schiffahrt, Maß und Gewicht, Zeitmessung und den Bereich Atom-, Kern- und Teilchenphysik am Deutschen Museum.



Himmliche Begleiter

Moderne Navigationssysteme nutzen die Erkenntnisse der Allgemeinen und der Speziellen Relativitätstheorie. Von Christian Rauch

Als die USA am 2. Mai 2000 das für militärische Zwecke entwickelte GPS-Satellitensystem öffneten, begann ein ungeahnter Boom: Satellitennavigation erscheint in nur fünfzehn Jahren unverzichtbar. Weltweit gibt es Milliarden miniaturisierter GPS-Empfänger. Bis auf ein paar Meter genau ermitteln sie die Position überall auf der Erde und lenken ihren Benutzer auf Urlaubsreisen, Radtouren und beim Einkaufsbummel. Zukünftig werden auch die Daten des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo miteinfließen, das nach Fehlschlägen weiter im Aufbau ist.

Ohne Einsteins Gleichungen würde die Genauigkeit der Satellitennavigation nicht erreicht werden. »Ohne die Effekte der Relativitätstheorie zu berücksichtigen, können sich rasch Positionsfehler von Hunderten Metern erge-

ben«, erklärt Dr. Kristian Pauly, der beim Raumfahrtunternehmen OHB in Bremen seit sechs Jahren an der Entwicklung der Galileo-Satelliten arbeitet. Solch ein Fehler kann entstehen, da sich Navigationssatelliten zum einen schnell (mehr als 3500 Meter pro Sekunde), zum anderen in großer Entfernung von der Erde (mehr als 20000 Kilometer) bewegen. Für erstere Eigenschaft, die Geschwindigkeit, lehrt die Spezielle Relativitätstheorie, dass die Zeit bei schneller Bewegung langsamer läuft. Was die zweite Eigenschaft, die Entfernung von der Erde angeht, folgert die Allgemeine Relativitätstheorie, dass eine Uhr schneller läuft, je weiter sie von einem Massezentrum entfernt ist. Beide Effekte sind also gegensätzlich, sie heben sich zum Teil auf, es bleibt jedoch ein Einfluss der Allgemeinen Relativitätstheorie übrig. Das heißt, die Uhr im Satelliten geht gegen-



Navigationssatelliten helfen uns im Alltag. Doch ohne die Berücksichtigung relativistischer Effekte wären sie nicht so genau.

mationen zur relativistischen Korrektur«. Gerade einmal vier Millihertz macht die Frequenzkorrektur aus. »Da die momentan besten Atomuhren in Navigationssatelliten, die passiven Wasserstoff-Maser-Uhren in den Galileo-Satelliten, bis auf rund ein Billiardstel (10^{-15}) genau funktionieren, ist dies durchaus signifikant.«

Software korrigiert Fehler

Weitere bedeutsame relativistische Effekte werden im Empfänger auf der Erde durch Software korrigiert, zum Beispiel ein Effekt, der durch die leicht exzentrische Umlaufbahn der Satelliten verursacht wird. Obwohl die Navigationssatelliten sich in einer Fast-Kreisbahn bewegen, sind selbst kleine Abweichungen von der idealen Kreisform (also eine leichte Exzentrizität) relevant, da auch sie zu einem relativistischen Fehler führen. Des Weiteren gibt es den sogenannten Sagnac-Effekt. Er berücksichtigt die Tatsache, dass sich der Empfänger auf der Erde auch bewegt. Zwar wirkt sich die verhältnismäßig langsame Bewegung des Nutzers selbst, beispielsweise im Auto, kaum aus. Jedoch rotiert gleichzeitig die Erde mit rund 500 Metern pro Sekunde am Äquator und auch diese Geschwindigkeit erzeugt einen minimalen relativistischen Effekt, der mit den anderen zusammenwirkt.

Daneben gibt es zweitrangige relativistische Effekte, wie den sogenannten Shapiro-Effekt. Denn gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie wirkt das Schwerfeld der Erde wie ein »Medium«, welches die Satellitensignale in ihrem Verlauf ein klein wenig verlangsamt. »Shapiro« wirkt sich allerdings um Größenordnungen kleiner als die anderen Effekte aus und wird im Normalfall nicht berücksichtigt. »Empfänger, die eine sehr hohe Genauigkeit erzielen wollen, könnten ihn freilich einrechnen, wenn man genügend Rechenleistung investieren will«, so Pauly. Das Gleiche gilt für die Schwerkraft anderer Himmelskörper, wie Sonne, Mond oder gar die Nachbarplaneten. Auch ihre relativistischen Effekte sind prinzipiell berechenbar, aber so gering, dass ihre Korrektur für die Positionierung auf der Erde nicht lohnt.

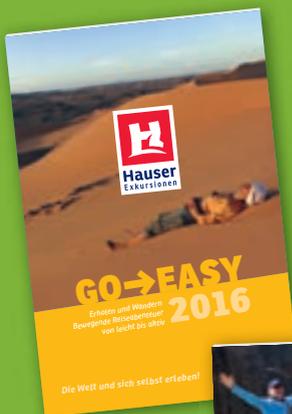
Selbst wenn eines Tages Navigationssatelliten noch viel präziser »ticken«, müsste man erst andere Störquellen auf das Signal, wie die Atmosphäre, exakter verstehen und

über der Uhr im Empfänger auf der Erde unter dem Strich ein klein wenig vor. Dieser Zeitunterschied ist natürlich äußerst gering, denn sowohl die Satellitengeschwindigkeit als auch die Erdmasse sind in kosmischen Maßstäben recht klein. Doch arbeiten Navigationssatelliten mit höchster Präzision: Der Empfänger auf der Erde misst aus dem Satellitensignal den Uhrzeitunterschied, also die Laufzeit, und kann damit die Entfernung zum Satelliten ausrechnen. Macht er dies für vier Satelliten, kann er aufgrund des Schnittpunkts eindeutig seine Position ermitteln. Dabei dürfen allerdings die verschiedenen relativistischen Effekte nicht übersehen werden, da sie sonst zu einer Verfälschung der Lageinformation beitragen würden. Glücklicherweise können die Ingenieure diesen Fehler recht leicht korrigieren. »Da der relativistische Effekt eindeutig und exakt bestimmt werden kann, wird die Uhrenfrequenz in den russischen Glonass-Navigationssatelliten von vornherein ein klein wenig langsamer gestellt«, erklärt Kristian Pauly. »In Galileo enthält das Signal, das vom Satelliten kommt, diese Information für den Frequenzfehler nebst anderen Infor-



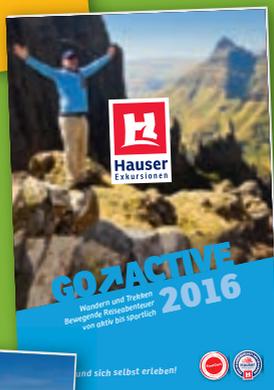
Die Welt und sich
selbst erleben!

Die neuen Hauser sind da:



GO→EASY
ist der Richtige für
alle, die entspannt
wandern und
genussvoll die
Welt entdecken
möchten.

GO↗ACTIVE
ist die beste Wahl,
wenn Sie fordernde
Wanderetappen
weltweit suchen oder
technisch einfache
Gipfelziele anpeilen.



GO↑ALPINE
steht für die ganze
Palette alpiner Sport-
arten inklusive alpiner
Kursprogramme, für
Traumwochenenden,
Biketouren bis hin
zu Expeditionen.



Jetzt alle neuen Reisen im Web
oder Kataloge anfordern unter
Telefon: 089 / 23 50 06 - 0

hauser-exkursionen.de



Bei der Firma OHB in Bremen
arbeiten Techniker an der
Satellitennavigation der
Zukunft. Nach einigen Rück-
schlägen hoffen sie, mit der
europäischen Galileo-Techno-
logie künftig einen neuen
Standard setzen zu können.

herausfiltern, ehe zweit- und dritrangige relativistische Effekte korrigiert würden, sind sich die Experten einig. Außerdem kann für besonders sensible Anwendungen die Genauigkeit der Positionsbestimmung längst durch sogenannte Differentialsignale bis in den Zentimeterbereich gesteigert werden. Bei diesem sogenannten DGPS-Verfahren berücksichtigt ein Empfänger zusätzlich zu den Satellitensignalen die Signale zahlreicher Bodenstationen mit.

Die massenhaft genutzte Satellitennavigation ist heute einer der besten Beweise für Einsteins Relativitätstheorie. Dank Galileo soll die Technologie künftig noch zuverlässiger werden und unabhängiger von dem GPS-System der USA, das nach wie vor militärisch genutzt wird. »Nach den Verzögerungen im letzten Jahrzehnt ist das europäische Satellitennavigationsprogramm nun auf Kurs«, weiß Kristian Pauly. »Hier bei OHB liefern wir alle sechs Wochen einen neuen fertiggestellten Satelliten aus. In den nächsten zwei bis drei Jahren werden sie schrittweise ins All gestartet werden.« Doch da zukünftige GPS-Empfänger Signale aller Navigationssysteme empfangen sollen – neben GPS und Galileo auch das russische Glonass und das im globalen Ausbau befindliche chinesische Beidou –, wird sich die Empfangsqualität bereits in naher Zukunft kontinuierlich verbessern. »Besonders in den Straßenschluchten der Städte sollte es dann mit Multi-Konstellations-Empfängern keine Empfangslücken mehr geben«, so Pauly.

Und selbst wenn Starts von Navigationssatelliten scheitern, können Forschungen zur Relativitätstheorie profitieren. Zwar ist noch nicht sicher, ob die Galileo-Satelliten FM-1 und FM-2, die im August 2014 von einer russischen Sojus-Rakete in einen unvollständigen, stark exzentrischen Orbit gebracht wurden, nicht doch noch für die operationelle Betriebsphase genutzt werden können. Aber selbst wenn sie als endgültig »gestrandet« erklärt werden, haben Physiker bereits ihr Interesse bekundet, mit den extrem genauen Atomuhren die relativistischen Effekte des Erdgravitationsfelds genauer als je zuvor zu vermessen. ■■



Prof. Dr. Claus Lämmerzahl ist fasziniert von der Relativitätstheorie.

An den Grenzen des Erfahrbaren

Claus Lämmerzahl weiß, warum die Relativitätstheorie für die Grundlagenforschung und manches Alltagsprodukt unverzichtbar ist. Der Institutsleiter am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen arbeitet seit Jahrzehnten mit Einsteins berühmten Gleichungen. **Interview: Christian Rauch**

Spielt die Relativitätstheorie in unserem Alltag überhaupt eine Rolle?

In den meisten Bereichen nicht, denn unsere Verkehrsmittel oder Gebäude sind nicht annähernd schnell oder schwer genug, um Raum oder Zeit relevant zu verzerren. Und das sind nun mal die Effekte der Theorie: Bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit und bei großen Massen wie Sternen verändern sich Raum und Zeit.

Allerdings müssen wir die Relativitätstheorie berücksichtigen, wenn schnell bewegte Satelliten in größerem Abstand vom Massezentrum der Erde fliegen und hochpräzise Messungen durchführen. Genau das ist bei der Satellitennavigation, beim amerikanischen GPS- und europäischen Galileo-System, der Fall.

Gibt es neben GPS noch weitere technische Anwendungen?

In der Kathodenstrahlröhre (Braun'schen Röhre) eines alten Fernsehgeräts waren relativistische Effekte wichtig, da die Elektronen auf eine sehr hohe Geschwindigkeit beschleunigt werden. Auch bei der Internationalen Atomzeit (TAI), der Basis für die Weltzeit UTC, berücksichtigen die nationalen Institute, wie die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig, die minimalen relativistischen Abweichungen, die z.B. durch ihre jeweilige Höhe über dem mittleren Meeresspiegel verursacht werden.

Umgekehrt wird relativistische Geodäsie bald extrem exakte Höhenmessungen ermöglichen. Die genauesten Atomuhren der Welt können heute auf rund 10^{-18} genau messen, das heißt sie würden in rund dreißig Milliarden Jahren nur eine Sekunde falsch gehen. Damit können sie mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie die Zeitdifferenz zu einer Uhr messen, die einen Zentimeter höher liegt, also einen Zentimeter weiter vom Gravitationszentrum der Erde entfernt.

Wer braucht derart exakte relativistische Höhenmesser?

Heutzutage beträgt der Fehler in der Höhenbestimmung innerhalb Europas bis zu einem Meter. Mit den neuen Höhenmessern kann man ein sehr genaues ein-

heitliches Höhensystem der Erde definieren. Damit werden auch weltweite kontinuierliche und exakte Messungen des Meeresspiegels, des Wasserhaushalts oder tektonischer Aktivitäten in der Erdkruste möglich. Für die Wetter- und Klimaforschung wäre das ein großer Fortschritt.

Wie hilft die Relativitätstheorie den Astronomen und Kosmologen?

Das Prinzip der Lichtablenkung aus der Allgemeinen Relativitätstheorie, also die Ablenkung von Licht bzw. elektromagnetischer Strahlung im Gravitationsfeld von Himmelskörpern, kann Dunkle Materie identifizieren. Mit dieser Methode, auch Gravitationslinsen genannt, werden auch Planeten in anderen Sonnensystemen (Exoplaneten) entdeckt. Die Lichtablenkung ist zu einem alltäglichen Handwerkszeug der Astrophysik geworden.

Wo in der Naturwissenschaft spielen relativistische Effekte noch eine Rolle?

In der Chemie! Dort können Effekte der Relativitätstheorie die Elektronenkonfiguration in Atomen und damit ihre chemischen Eigenschaften verändern. Zum Beispiel erklärt die Relativitätstheorie, warum Quecksilber bei Zimmertemperatur flüssig ist oder wie die Farbe von Gold entsteht.

Was fasziniert Sie persönlich an der Relativitätstheorie?

Zuerst die Art und Weise, wie Albert Einstein seine Theorie aus reinen Überlegungen gewonnen hat und diese bisher immer und überall bestätigt worden ist. Dann die Phänomene, die so ganz und gar nicht unserer Alltagserfahrung entsprechen und bei denen man an die Grenzen seiner Vorstellungskraft gelangt. Auch dass die Allgemeine Relativitätstheorie bei den Schwarzen Löchern ihre eigenen Grenzen der Erfahrungsmöglichkeiten vorhersagt, ist doch höchst erstaunlich. Eine rundum faszinierende Theorie. ■■



Prof. Dr. Claus Lämmerzahl ist fasziniert von der Relativitätstheorie.

An den Grenzen des Erfahrbaren

Claus Lämmerzahl weiß, warum die Relativitätstheorie für die Grundlagenforschung und manches Alltagsprodukt unverzichtbar ist. Der Institutsleiter am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen arbeitet seit Jahrzehnten mit Einsteins berühmten Gleichungen. **Interview: Christian Rauch**

Spielt die Relativitätstheorie in unserem Alltag überhaupt eine Rolle?

In den meisten Bereichen nicht, denn unsere Verkehrsmittel oder Gebäude sind nicht annähernd schnell oder schwer genug, um Raum oder Zeit relevant zu verzerren. Und das sind nun mal die Effekte der Theorie: Bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit und bei großen Massen wie Sternen verändern sich Raum und Zeit.

Allerdings müssen wir die Relativitätstheorie berücksichtigen, wenn schnell bewegte Satelliten in größerem Abstand vom Massezentrum der Erde fliegen und hochpräzise Messungen durchführen. Genau das ist bei der Satellitennavigation, beim amerikanischen GPS- und europäischen Galileo-System, der Fall.

Gibt es neben GPS noch weitere technische Anwendungen?

In der Kathodenstrahlröhre (Braun'schen Röhre) eines alten Fernsehgeräts waren relativistische Effekte wichtig, da die Elektronen auf eine sehr hohe Geschwindigkeit beschleunigt werden. Auch bei der Internationalen Atomzeit (TAI), der Basis für die Weltzeit UTC, berücksichtigen die nationalen Institute, wie die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig, die minimalen relativistischen Abweichungen, die z.B. durch ihre jeweilige Höhe über dem mittleren Meeresspiegel verursacht werden.

Umgekehrt wird relativistische Geodäsie bald extrem exakte Höhenmessungen ermöglichen. Die genauesten Atomuhren der Welt können heute auf rund 10^{-18} genau messen, das heißt sie würden in rund dreißig Milliarden Jahren nur eine Sekunde falsch gehen. Damit können sie mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie die Zeitdifferenz zu einer Uhr messen, die einen Zentimeter höher liegt, also einen Zentimeter weiter vom Gravitationszentrum der Erde entfernt.

Wer braucht derart exakte relativistische Höhenmesser?

Heutzutage beträgt der Fehler in der Höhenbestimmung innerhalb Europas bis zu einem Meter. Mit den neuen Höhenmessern kann man ein sehr genaues ein-

heitliches Höhensystem der Erde definieren. Damit werden auch weltweite kontinuierliche und exakte Messungen des Meeresspiegels, des Wasserhaushalts oder tektonischer Aktivitäten in der Erdkruste möglich. Für die Wetter- und Klimaforschung wäre das ein großer Fortschritt.

Wie hilft die Relativitätstheorie den Astronomen und Kosmologen?

Das Prinzip der Lichtablenkung aus der Allgemeinen Relativitätstheorie, also die Ablenkung von Licht bzw. elektromagnetischer Strahlung im Gravitationsfeld von Himmelskörpern, kann Dunkle Materie identifizieren. Mit dieser Methode, auch Gravitationslinsen genannt, werden auch Planeten in anderen Sonnensystemen (Exoplaneten) entdeckt. Die Lichtablenkung ist zu einem alltäglichen Handwerkszeug der Astrophysik geworden.

Wo in der Naturwissenschaft spielen relativistische Effekte noch eine Rolle?

In der Chemie! Dort können Effekte der Relativitätstheorie die Elektronenkonfiguration in Atomen und damit ihre chemischen Eigenschaften verändern. Zum Beispiel erklärt die Relativitätstheorie, warum Quecksilber bei Zimmertemperatur flüssig ist oder wie die Farbe von Gold entsteht.

Was fasziniert Sie persönlich an der Relativitätstheorie?

Zuerst die Art und Weise, wie Albert Einstein seine Theorie aus reinen Überlegungen gewonnen hat und diese bisher immer und überall bestätigt worden ist. Dann die Phänomene, die so ganz und gar nicht unserer Alltagserfahrung entsprechen und bei denen man an die Grenzen seiner Vorstellungskraft gelangt. Auch dass die Allgemeine Relativitätstheorie bei den Schwarzen Löchern ihre eigenen Grenzen der Erfahrungsmöglichkeiten vorhersagt, ist doch höchst erstaunlich. Eine rundum faszinierende Theorie. ■■

Einstein und die Schwerkraft

Ein Glas voll Wasser entgleitet der Hand, fällt zu Boden und zerspringt in tausend Teile. Ein ärgerliches Missgeschick, und wer ist schuld? Die Schwerkraft. Sie sorgt dafür, dass alles nach unten fällt. Ohne die Schwerkraft wären wir ohne Halt, und es gäbe keine Sterne und Planeten wie unsere Erde. Sie ist verantwortlich dafür, dass der Mond die Erde und die Erde die Sonne umkreist. Gründe genug, sich über diese wichtige Naturkraft im Universum Gedanken zu machen.

Von Thomas Bürke

Schon Ende des 17. Jahrhunderts entwickelte der britische Physiker Isaac Newton (1643–1727) eine Theorie, die wir noch heute in der Schule lernen: Körper jeder Art ziehen sich mit einer unsichtbaren Kraft an. Das gilt für Erde und Wasserglas ebenso wie für Sonne und Erde.

Newtons Theorie der Schwerkraft bewährte sich über mehr als 200 Jahre hinweg. Absolut perfekt schien sie Vorgänge in unserem Sonnensystem zu beschreiben. Manche Physiker verglichen das Universum sogar mit einem Uhrwerk. Doch als Wissenschaftler mit immer besseren Fernrohren den Weltraum erforschten, erkannten sie, dass sich manche Himmelskörper ein wenig anders bewegen, als man das mit der Newton'schen Formel berechnet hatte. Im Umlauf des Planeten Merkur um die Sonne waren die Abweichungen besonders deutlich.



Dem berühmten Physiker Albert Einstein fielen noch andere Ungereimtheiten auf. So schien die Schwerkraft jeden Ort im All ohne Zeitverzögerung erreichen zu können. Das widersprach aber einem Gesetz, das Einstein schon 1905 gefunden hatte: Einstein stellte fest, dass sich kein Körper und keine physikalische Wirkung schneller als Licht bewegen oder ausbreiten kann. Irgendetwas musste an Newtons Theorie fehlen. Doch wie findet man eine neue Theorie der Schwerkraft?

Im Jahr 1907 kam Einstein ein Gedanke, der ihn nicht mehr losließ: Er erkannte, dass es einen Zusammenhang zwischen beschleunigter Bewegung und Schwerkraft geben müsse.

Stellen wir uns zwei Situationen vor. In der einen befindet sich eine Physikerin in einem Labor. Sie nimmt einen Apfel in die Hand und lässt ihn los. Der Apfel fällt dann, so wie Newton es sagt, mit beschleunigter Geschwindigkeit zu Boden, das heißt, er wird während des Falls immer schneller. Nun versetzen wir die Physikerin in ein Raumschiff, in dem Schwerelosigkeit herrscht. Wenn sie dort den Apfel loslässt, wird er nicht zu Boden fallen, sondern im Raum schweben. Dann zünden die Triebwerke, das Raumschiff



beschleunigt. Bei diesem Vorgang wird die Astronautin an den Boden gepresst, so wie wir in die Sitze gedrückt werden, wenn der Wagen einer Achterbahn losrast. Wenn die Astronautin während der Beschleunigung den Apfel loslässt, wird er zu Boden fallen.

Einsteins Schlussfolgerung: Wir können physikalisch nicht unterscheiden, ob wir uns auf der Erde unter dem Einfluss der Schwerkraft befinden oder in einem beschleunigenden Raumschiff. Alle Vorgänge laufen in beiden Fällen auf dieselbe Weise ab. Das hat Folgen.

Denken wir uns einen Lichtstrahl, der von einer Wand des Raumschiffs zur anderen Wand hinüberfliegt. In der Schwerelosigkeit soll der Strahl parallel zum Boden verlaufen. Der Lichtstrahl ist zwar mit 300 000 Kilometer pro Sekunde unvorstellbar schnell, dennoch benötigt er eine gewisse Zeitspanne, um das Raumschiff zu durchqueren. Nun beschleunigt das Raumschiff – und was passiert? In dem Zeitraum, in dem der Strahl das Raumschiff durchquert, fliegt dieses beschleunigt nach oben. Das hat zur Folge, dass der Lichtstrahl etwas weiter unten auf die Wand trifft als im schwerelosen Zustand. Wenn die Astronautin den Strahl sichtbar machen könnte, zum Beispiel, indem sie Rauch hineinbläst, würde sie einen leicht gebogenen Strahl erkennen.

Jetzt kommt Einsteins entscheidender Gedanke: Wenn die Vorgänge in einem beschleunigten Raumschiff sich nicht von denen in der Schwerkraft unterscheiden, dann muss ein Lichtstrahl auch unter dem Einfluss der Schwerkraft wie im Raumschiff auf einer krummen Bahn laufen.

Diese Schlussfolgerung allein ist aber noch keine physikalische Theorie. Sie erfordert Formeln, mit denen sich alle bekannten Vorgänge richtig beschreiben und berechnen lassen. Acht Jahre lang suchte Einstein danach und gestand später, dass er sich in seinem Leben noch nie so geplagt habe. Vor hundert Jahren war er am Ziel: Am 25. November



1915 trug er seine Allgemeine Relativitätstheorie vor der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin vor.

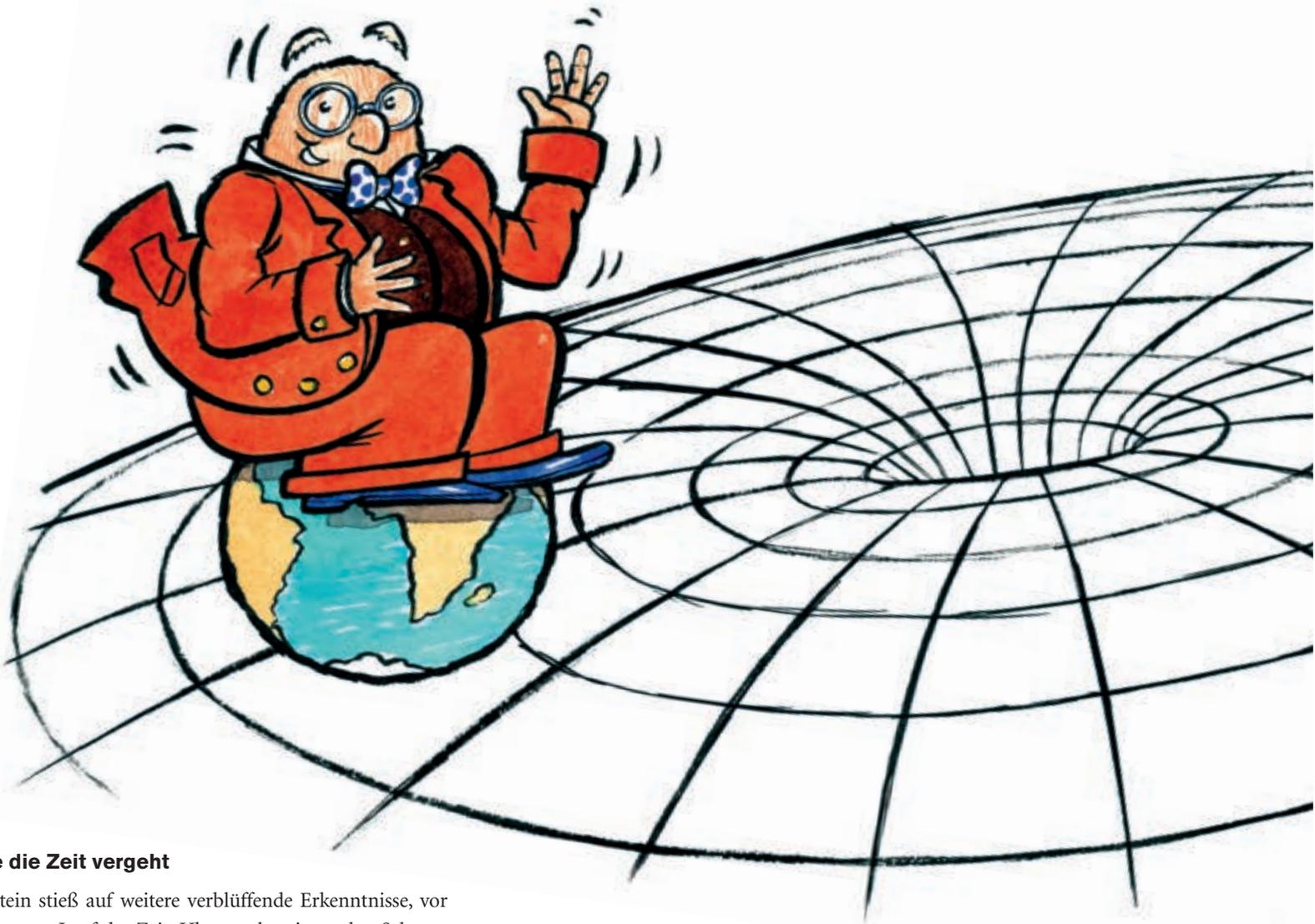
Einstein meinte, dass die Schwerkraft gar keine Kraft im bisherigen Sinne sei, sondern eine Eigenschaft von Raum und Zeit. Ein Lichtstrahl läuft in der Nähe eines Himmelskörpers tatsächlich auf einer krummen Bahn. Er tut das aber nicht, weil eine Kraft wie mit unsichtbaren Händen an ihm zieht, sondern weil der Raum verbogen ist.

Jede Art von Materie krümmt den Raum um sich herum, und andere Körper sowie Lichtstrahlen müssen diesen Verbiegungen folgen, denn sie können aus dem Raum nicht heraus. Der Mond umkreist die Erde, weil die beiden Himmelskörper den umgebenden Raum eindellen wie schwere Kugeln ein gespanntes Gummiband und sich Mond und Erde in diesen Mulden umeinander bewegen.

Die Schwerkraft bestimmt das Geschehen im All in gleicher Weise wie auf der Erde. Deshalb gilt: Auch eine Tasse, die zu Boden fällt, folgt der Raumkrümmung. Die Schwerkraft – Physiker sagen Gravitation – ähnelt einem elektrischen Feld. Aber sie ist kein Feld im Raum, sondern sie ist der Raum.

Ein Kollege Einsteins, Max von Laue, schrieb dazu einmal: Der gekrümmte Raum »ist keineswegs eine mathematische Erfindung, sondern eine allen physikalischen Vorgängen zugrunde liegende Realität. Diese Erkenntnis ist Albert Einsteins größte Leistung.«





Wie die Zeit vergeht

Einstein stieß auf weitere verblüffende Erkenntnisse, vor allem zum Lauf der Zeit. Uhren gehen in starker Schwerkraft langsamer als in schwacher. Weil die Schwerkraft mit wachsendem Abstand von der Erde abnimmt, würde ein Mensch, der in der obersten Etage eines Hochhauses wohnt, nach 80 Jahren rein rechnerisch um rund eine zehntausendstel Sekunde älter sein als sein Zwillingenbruder, der dieselbe Zeit im Erdgeschoss gewohnt hat.

Mit Kindern und Atomuhr auf 1646 Meter Höhe

Dieser Effekt ist auf der Erde extrem klein, lässt sich aber messen. So wählte ein Hobbyforscher in den USA aus seiner Sammlung an Cäsium-Atomuhren die drei besten aus, packte sie in einen Mini-Van und fuhr zusammen mit seinen drei Kindern auf einen 1646 Meter hohen Berg. Dort blieb er für zwei Tage und fuhr dann wieder nach Hause. Daheim stellte er fest, dass die Atomuhren auf dem Berg um rund 20 milliardenstel Sekunden schneller gelaufen waren als die am Boden – genauso wie es die Allgemeine Relativitätstheorie vorschrieb –, eine überzeugende Demonstration für die unvorstellbare Verlangsamung der Zeit.



Ungleiches Geschwisterpaar

In der Relativitätstheorie muss man immer Raum und Zeit gleichzeitig betrachten. Sie gehören zusammen wie Geschwister.

Was ist ein »Raum«?

Um sich den wirklichen dreidimensionalen Raum verborgen vorstellen zu können, muss man wissen, was »Raum« ausmacht. Der uns umgebende Raum hat nichts mit der Luft oder der Atmosphäre zu tun. Eigentlich beschreibt »Raum« nur eine Vorschrift, wie man Abstände berechnet. In der Schule lernen wir nach den Regeln des Euklid den Satz des Pythagoras, nach dem in rechtwinkligen Dreiecken die Summe der Kathetenquadrate gleich dem Hypotenusenquadrat ist ($a^2 + b^2 = c^2$). Damit lassen sich Abstände berechnen. Ein anderer grundlegender Satz der Geometrie besagt, dass die Winkelsumme im Dreieck normalerweise 180 Grad beträgt.

Diese Gesetze gelten nur für ebene Flächen, auf der Oberfläche einer Kugel oder eines beliebig anders geformten Körpers aber nicht. Zeichnet man auf der Erdoberfläche ein Dreieck, dessen eine Seite auf dem Äquator liegt und dessen beide anderen Seiten sich in einem der Pole treffen, so ist darin die Winkelsumme größer als 180 Grad. Der Satz des Pythagoras gilt in diesem Dreieck nicht. Hier benötigt man eine »nichteuclidische« Geometrie, wie Mathematiker sagen.



EIN TISCHTUCH MIT DELLE

Der Raum, in dem wir leben, besitzt drei Dimensionen: Länge, Breite und Höhe. Stark vereinfacht lässt sich der gekrümmte Raum durch ein verformtes Tischtuch darstellen. In dem Bild mit dem eingedellten Tuch haben wir zur Vereinfachung die Dimension Höhe weggelassen. In der Mulde mittendrin liegt die Sonne versteckt. Auch die Erde, auf der Professor Eule reitet, würde eigentlich eine kleine Delle verursachen.

Du willst mehr über Einsteins Theorie erfahren? Dann besuche die MikroMakro-Seiten im Internet. Dort findest du einen kurzen Film.

<http://www.deutsches-museum.de/verlag/kulturtechnik/mikromakro/>



Eine neue Theorie für Räume

Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte der Mathematiker **Bernhard Riemann** (1826–1866) eine Geometrie, mit der man auf beliebig gekrümmten Oberflächen und auch in drei oder mehr Dimensionen Abstände messen oder Winkelsummen berechnen kann. Diese Mathematik bildete die Grundlage für Einstein, als er seine Allgemeine Relativitätstheorie entwickelte. Mit ihr konnte er einen beliebig gekrümmten dreidimensionalen Raum berechnen.

Die Sonne krümmt den Raum

Die Sonne steht im Zentrum unseres Planetensystems und formt um sich herum eine Raummulde. Je schneller ein Planet um die Sonne kreist, desto näher ist er ihr, oder anders gesagt, umso tiefer kreist er in der Mulde. Doch wie stark verbiegt die Sonne den Raum überhaupt? Mit einem trickreichen Experiment gelang es dem amerikanischen Physiker **Irwin Shapiro** (geb. 1929), die Größe der von der Sonne erzeugten Raumdelle zu messen. Im Jahr 1970 zogen die beiden Marssonden Mariner 6 und 7 von der Erde aus gesehen hinter der Sonne vorbei. Die Raumschiffe sendeten in regelmäßiger Folge Radiosignale aus, die auf der Erde empfangen wurden. Als sich die Sonden der Sonne näherten, mussten diese Signale der Raumkrümmung folgen und gewissermaßen einen Umweg machen. Dadurch kamen die Signale etwas verspätet auf der Erde an. Aus dieser Laufzeitverlängerung und der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radiosignale von 300 000 Kilometer pro Sekunde konnte Shapiro den Weg durch die Raummulde genau berechnen. Er betrug 36 Kilometer. Das veranschaulicht den Grad der Raumkrümmung an der Sonnenoberfläche – und bestätigt die Vorhersage der Relativitätstheorie.

www.ueberreiter.de



WIR SCHÄTZEN
INDIVIDUALISTEN,
JEDEN EINZELNEN,
JEDEN TAG

Staatlich genehmigtes Ganztagsgymnasium

- Aufnahmegespräch statt Notenschnitt
- Intensive Hausaufgabenbetreuung
- Allgemeine Hochschulreife (Abitur)
- Aufnahme während des Schuljahres möglich – auch für Realschüler

mint
FREUNDLICHE SCHULE



DR. FLORIAN ÜBERREITER
PRIVATGYMNASIUM

EINE EINRICHTUNG DER MÜNCHNER SCHULSTIFTUNG ERNST V. BORRIES



15 Jahre

Freundes- und
Förderkreis

Deutsches Museum

Wünsche und Wirklichkeit

Ein Grußwort zum 15. Geburtstag

*Die Zeit, die ist ein sonderbar' Ding
Wenn man so hinlebt, ist sie rein gar nichts.
Aber dann auf einmal,
da spürt man nichts als sie:
sie ist um uns herum, sie ist auch in uns drinnen.
In den Gesichtern rieselt sie, im Spiegel da rieselt sie,
in meinen Schläfen fließt sie.
Und zwischen mir und dir da fließt sie wieder.
Lautlos, wie eine Sanduhr.*

Richard Strauß, *Der Rosenkavalier*, Libretto von Hugo von Hofmannsthal



Einen lebensgroßen Oskar von Miller aus Pappe mit ermutigender Botschaft an den Freundes- und Förderkreis ließ die Grafikabteilung des Deutschen Museums zum zehnten Geburtstag des »FFK« anfertigen. Seither begleitet »Oskar« die Veranstaltungen und Aktivitäten der Museumsfreunde.

»Die Zeit, die ist ein sonderbar' Ding ...« Im November 2010 wurde im noblen Ehrensaal des Deutschen Museums ein rauschendes Fest gefeiert. Selbst »Oskar« war mit von der Partie, in voller Größe, milde lächelnd, auf einem standfesten Fotoplakat und mit einem Schild in Händen: »...bin stolz auf Euch!« Eine grandiose Idee der Grafikabteilung des Deutschen Museums, angefertigt für den Freundeskreis. In der Versteigerung wurde damals um »ihn« gerungen. Seither begleitet uns »Oskar« – als Empfangsherr vor der Generaldirektion oder als Behüter unseres Sommerfestes. Bei jeder Mitgliederversammlung steht er als »Vorstandsmitglied kraft Geist« mit auf dem Podium. Das hätte Oskar von Miller gefallen.

Fünf Jahre liegt dieser zehnte Geburtstag zurück. In der Erinnerung so nah, als sei es gestern gewesen. Das Gründungsjahr 2000 liegt in der Wahrnehmung jedoch viel weiter zurück als die realen fünfzehn Jahre. Gezahlt wurde mit D-Mark, in den Büros standen noch Schreibmaschinen und Faxgeräte. Die Zahl stolzer Handy-Besitzer war überschaubar. Fotos wurden »entwickelt«. Auch in unserem Technikmuseum. Das lag im Dornröschenschlaf, nostalgisch, verstaubt und etwas aus der Zeit gefallen. Als große Freundin des Hauses hat Christiane Kaske damals mit Gleichgesinnten den Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum gegründet. Mutig.

2015 steht das Deutsche Museum mitten in der größten Herausforderung seit seiner Gründung. Handys sind Museumsexponate, E-Mails der Alltag und die Generalsanierung kann virtuell auf dem Smartphone verfolgt werden. Der Freundeskreis steht mitten im Geschehen und mehr denn je unterstützend an der Seite seines Museums. In fünfzehn überaus erfolgreichen Jahren hat er sich prächtig entwickelt. 310 Mitglieder sind Botschafter für ein faszinierendes Haus. Sie verfolgen die Generalsanierung und die Neukonzeption der Sammlungen neugierig, liebevoll,

aber auch kritisch. Sie sind kämpferisch, wenn sie ihr Museum durch fremde Begehrlichkeiten in Gefahr wännen.

Die Mitglieder wissen um die Bedeutung des Freundeskreises innerhalb des Gründerkreises der Zukunftsinitiative. Sie unterstützen mit ihren Beiträgen und Spenden sehr große und auch kleine Projekte, die ohne dieses Engagement nicht realisiert werden könnten.

Der Dank für das Engagement unserer Mitglieder sind die gemeinsamen Reisen mit dem Generaldirektor zu befreundeten Museen europaweit. Sie schärfen den Blick für die Qualitäten des eigenen Hauses. Bei Firmenbesuchen wird um die freien Plätze gerungen, weil die Ankündigung eines Besuchs der Freunde des Deutschen Museums die obersten Manager auf den Plan ruft und Türen öffnet. Die hochkarätigen wissenschaftlichen Vorträge nach den Mitgliederversammlungen sind Tradition und immer Sternstunden.

Für die Zukunft des Freundeskreises wünsche ich mir, dass er allzeit mit der neuen Museums-Zeit geht und damit die gleiche Qualität behält wie in der Vergangenheit. Ich wünsche mir aber auch, dass sich die Politik ein Beispiel nimmt an den Freunden und unser Museum noch viel stärker in seine Fürsorge aufnimmt.

Möge allzeit ein guter Stern über dem Deutschen Museum und dessen Freundeskreis stehen.

Isolde Würdehoff
Vorsitzende Freundes- und Förderkreis
Deutsches Museum e. V.



Schatzinsel inmitten der Isar

Die Vorsitzende des Freundeskreises, Isolde Würdehoff, und Generaldirektor Wolfgang M. Heckl erzählen über ihre Zusammenarbeit. Interview: Sabrina Landes

Im Jahr 2004 wurde Professor Wolfgang M. Heckl zum Generaldirektor des Deutschen Museums ernannt. Zu dieser Zeit gab es den Freundeskreis schon seit vier Jahren. Erinnern Sie sich noch an die erste Begegnung?

Würdehoff: Unvergesslich bleibt mir die erste Sitzung des Freundeskreises mit dem neuen Generaldirektor am 26. Oktober 2004. Das Lampenfieber war auf beiden Seiten groß. Da kam dann ein wunderbarer, fröhlicher junger Mann in unsere Sitzung und wir waren alle angetan. Als wir zu den Förderungsanträgen kamen, haben Sie, Herr Heckl, den Antrag gestellt, dass Sie gerne ein Gläsernes Labor einrichten wollten. Den Antrag hatten Sie als Tischvorlage mitgebracht. Die Fördersumme belief sich auf eine Zahl im hohen fünfstelligen Bereich.

Wolfgang M. Heckl (schmunzelt): Wozu sind Freunde da, habe ich mir damals gedacht ...

Würdehoff: Erstmal haben wir geschluckt aber dann dachten wir, was für ein tougher, junger Mann. Schließlich haben wir dieses Projekt einstimmig gefördert. Sie erklärten uns, es solle die Nanotechnologie anhand des Rastertunnelmikroskops auch für Besucher anschaulich gemacht werden. Wir konnten uns das damals alle nicht vorstellen.

Heckl: Mittlerweile ist dieses Gläserne Labor etabliert, nicht nur bei uns im Zentrum Neue Technologien, wo die Studenten und Doktoranden in der Öffentlichkeit ihre Forschungsarbeit betreiben können, während ihnen Besucher über die Schulter schauen. Das Projekt wird nun auch von der EU gefördert.

»Oskar von Miller wäre wohl selbst Mitglied des Freundes- und Förderkreises geworden, hat unser Mitglied, Monika Czernin einmal geschrieben, denn er hätte dessen Philosophie gemocht. Ehrenamtliches Engagement als Verantwortung der Gesellschaft gegenüber, Spenden sammeln und festliche Zusammenkünfte aller Art: All dies entsprach dem Gründer des Deutschen Museums, und für all dies steht auch der Freundeskreis.«
Isolde Würdehoff

Sie haben mit dem Freundeskreis seit 2000 mehr als 150 Projekte gefördert. Dabei haben Sie mehrere Millionen an Fördergeldern vergeben. Wie läuft so eine Förderung ab?

Würdehoff: Alles beginnt mit der Idee eines Mitarbeiters, des Generaldirektors oder eines Bereichsleiters. Ein Antrag wird eingereicht und dann setzt das Controlling von unserer Seite ein. Die Idee wird intern im Freundeskreis besprochen und vom Hauptabteilungsleiter des Deutschen Museums beurteilt. Ankäufe müssen von drei unterschiedlichen Instanzen im Haus begutachtet werden. Die Förderanträge werden dann bei den Vorstandssitzungen eingereicht und abgesegnet oder auch nicht.

Heckl: Für unser Haus ist das wunderbar: Jeder Mitarbeiter, der eine gute Idee hat, bekommt die Chance, sich für sein Vorhaben einzusetzen. Wenn in der Werkstatt eine CNC-Fräsmaschine gebraucht wird oder wenn ein Mitarbeiter in der Ausstellungsgestaltung einen ungewöhnlichen Drucker benötigt, der im normalen Budget des Deutschen Museums nicht vorgesehen ist, dann kann er oder sie sich an den Freundeskreis wenden.

Würdehoff: So empfinden wir das auch im Vorstand des Freundeskreises. Wir freuen uns über die Ideen, und eigentlich ist jedes Projekt am Ende auch ein Lieblingsprojekt. Aus diesem Grund sind wir auch immer gespannt auf die Abschlussberichte: Manchmal erhalten genau die geförderten Projekte Auszeichnungen oder Nennungen in der Presse. Als Beispiel sei hier das Buch über das Deutsche Museum zur Zeit des Nationalsozialismus genannt, das eine hervorragende Presseresonanz erhalten hat.

Heckl: Mit diesem Buch leisten wir einen Beitrag zur Aufarbeitung der eigenen Geschichte. Wir waren eine der ersten Institutionen, die ein derartiges Projekt realisiert haben, das hat also auch Vorbildcharakter und wäre nicht möglich gewesen ohne die großzügige Förderung des Freundeskreises.

Gibt es auch Konflikte, oder sind Sie sich immer einig?

Würdehoff: Es gab zwar schon heftige Diskussionen, aber wir haben immer eine Lösung gefunden. Man muss die unterschiedlichen Meinungen hören, darüber diskutieren, und auch einmal kämpfen – aber ich kann mich nicht erinnern, dass wir je im Zwist auseinandergegangen wären. Und ich bin auch der Meinung, dass das nicht sein darf.

Heckl: Sobald ein wissenschaftliches Projekt auf den Weg gebracht wurde, reden weder der Freundeskreis noch der Generaldirektor mit. Die Wissenschaft ist frei. Das Deutsche Museum ist ein Forschungsmuseum. Dazu gehört es auch, unterschiedliche Meinungen auszuhalten. Das Entscheidende ist meines Erachtens die innere Haltung. Hier haben wir Menschen an Bord, die Herzblut und sogar Freizeit in die Projekte stecken. Die ein Teil des Hauses und der Idee Oskar von Millers sind.

Wördehoff: Ich kann Herrn Heckl nur zustimmen, da im Freundeskreis von Beginn an ein guter und freundschaftlicher Geist zum Tragen gekommen ist. Die Mitglieder des Freundeskreises lieben das Haus über alles, allerdings wollen wir niemandem hineinreden, sondern das Haus mit seinen fünfhundert hervorragenden Mitarbeitern unterstützen.



»Dankbar bin ich dafür, dass es Menschen gibt, die an meiner Seite und an der Seite des Museums stehen. Wenn ich etwas brauche, wenn ich jemanden brauche, mit dem ich reden oder mit dem ich mich beraten kann, dann ist jemand da.«

Wolfgang M. Heckl

Gab es ein Lieblingsprojekt in den letzten Jahren?

Wördehoff: Im Grunde ist jedes Projekt mein Lieblingsprojekt, weil ich mich damit befasse und auch identifiziere. Aber wenn ich ein Projekt herausgreifen soll, dann ist es das Gläserne Forschungslabor – und das sage ich jetzt nicht, weil Sie hier sitzen, Herr Professor Heckl, sondern weil ich von dem Ergebnis begeistert bin: Da ist eine Vision explodiert. Ich habe natürlich auch andere Lieblingsprojekte. Die Turmuhr zum Beispiel. Ich bin in München geboren und als junges Mädchen öfter auf die Frauentürme gelaufen, an der Uhr vorbei. Heute steht diese Uhr im Eingangsbereich zur Bibliothek, und das finde ich toll. Auch die Kinderprojekte liebe ich sehr.

Wie wichtig ist ehrenamtliches Engagement für das Deutsche Museum?

Heckl: Das Deutsche Museum hat über 150 ehrenamtliche Mitarbeiter, ohne die der Betrieb des Museums in dieser Form nicht aufrechtzuerhalten wäre. Diese Menschen wollen ihren Beitrag leisten für eine gute Sache. Das ist ein beiderseitiges Nehmen und Geben: Seitens des Museums erfahren unsere Ehrenamtlichen Wertschätzung. Wir schätzen ihre Talente und lassen sie – als Führer oder Vortragende – Teile ihrer Lebensgeschichte erzählen.

Wördehoff: Seit 1991 mache auch ich Führungen in der Luftfahrtabteilung hier auf der Museumsinsel und kann nur bestätigen, was Herr Heckl eben sagte. Die Leute sind hingerissen, wenn sie persönliche Geschichten hinter den Exponaten hören, wenn sie nicht nur die Konstruktionsdaten erfahren, sondern die Eingebundenheit eines Exponats in die damalige Zeit. Aus dieser Erfahrung resultiert auch meine Liebe zum Haus.

Heckl: Wir sollten an dieser Stelle vielleicht auch einmal die jungen Mitglieder des Freundeskreises erwähnen. Wir haben vor zwei Jahren begonnen, einen Juniorenkreis zu bilden.

Wördehoff: Richtig! Auch das ist eine der wunderbaren Sachen, die sich in den letzten Jahren ereignet haben. Vor zwei Jahren kam aus dem Haus die Anfrage, ob wir die Lange Nacht der Museen fördern würden. Die wenigen jungen Mitglieder, die wir bis dahin hatten, haben sich bei dieser ersten Langen Nacht vor zwei Jahren engagiert. Sie haben ein Bewerbungsprogramm ausgearbeitet, eine Bar organisiert und Kontakt zu jungen Leuten geknüpft. Wer sich für eine Juniormitgliedschaft

interessierte, konnte das Bewerbungsformular ausfüllen. Aus der großen Anzahl der Bewerber wurden zehn Leute ausgewählt, die sehr überzeugend in ihren Aussagen waren. Auf unserer Mitgliederversammlung haben wir Paten für diese jungen Leute geworben. Aber wir haben ja nicht nur die Jungen. Zu Beginn des Freundeskreises hat Gräfin Podewils von Miller, die Enkelin Oskar von Millers, die Seniorenführungen eingeführt. Das war damals einmalig in Deutschland. Inzwischen gibt es viele Nachahmer.

Das Deutsche Museum wird in den nächsten Jahren aufwendig saniert. Auch hier spielt der Freundeskreis eine wichtige Rolle ...

Wördehoff: Herr Professor Heckl hat immer die Erneuerung des Hauses im Blick gehabt. Dazu mussten Finanzmittel akquiriert werden. Bund und Land hatten gefordert, dass wir zunächst einmal einen Grundstock für die Sanierung bilden müssten, bevor wir öffentliche Gelder bekämen. Vierzig Millionen Euro sollten erworben werden. Das muss man sich einmal vorstellen. Ein junger Generaldirektor, der auch ganz andere Sorgen innerhalb des Hauses hatte, hat dieses Paket auf sich genommen. Und ich glaube, wir waren die ersten, die Sie damals angefragt hatten, ob und wie wir Sie unterstützen könnten.

Heckl: Es handelt sich hier tatsächlich um eine Maßnahme von gigantischen Dimensionen. Nicht nur die Gebäude, auch zahlreiche Ausstellungen sollen generalsaniert werden. Und wir sprechen hier von einem denkmalgeschützten Gebäudekomplex mit insgesamt 150 000 Quadratmeter Bruttogeschossfläche. Das ist größer als die Museumsinsel in Berlin. Um so etwas zu stemmen, braucht man viele Helfer.

Frau Wördehoff, was wünschen Sie sich für die Zukunft des Museums?

Wördehoff: Wenn ich Wünsche offen hätte, dann möchte ich, dass das Deutsche Museum als ein Museum des Staunens der Welt und uns diese Schatzinsel inmitten der grünen Isar erhalten bleibt. Weiter wünsche ich mir, dass das Deutsche Museum seine herausragende Stellung unter den Technikmuseen dieser Welt auch in Zukunft bewahren kann.

Wofür ist das Deutsche Museum dem Freundeskreis besonders dankbar?

Heckl: Für viele Kleinigkeiten, für alles. Am meisten bin ich dankbar dafür, dass ich weiß, dass es Menschen gibt, die an meiner Seite und an der Seite des Museums stehen. Wenn ich etwas brauche, wenn ich jemanden brauche, mit dem ich reden oder mit dem ich mich beraten kann, dann ist jemand da. Geld, Reisen, das ist alles schön, aber das Wichtigste sind die Menschen dahinter.

Ein Museum zum Verlieben

Aus einem Gründerkreis von vierzig Personen ist in den letzten fünfzehn Jahren ein Freundes- und Förderkreis mit über dreihundert engagierten Mitgliedern gewachsen. Sie alle verbindet der Wunsch, das Deutsche Museum in seiner Arbeit zu unterstützen. Welche Motivation die »Freunde« antreibt und wie sie ihr Ehrenamt erleben, erzählen einige von ihnen auf den folgenden Seiten.



»» **Christiane Kaske**
Gründerin Freundes- und Förderkreis
Deutsches Museum e.V.

Mein Mann war als Physiker in den 1980er Jahren bis zu seinem Tod 1998 Verwaltungsratsvorsitzender des Deutschen Museums. Er hat sich in dieser Zeit immer wieder einen Freundes- und Förderkreis für das nahezu hundertjährige Deutsche Museum gewünscht. Am 7. November 2000 konnte ich im Rahmen der Gründungsversammlung seinen Wunsch realisieren. Mit Hilfe eines wunderbaren Vorstandes habe ich den Freundeskreis bis 2009 mit großer Freude geleitet. Es waren schöne, erfolgreiche, harmonische und freundschaftliche Jahre. Mein eigener Werdegang ist nicht naturwissenschaftlicher Natur. Ich habe Geschichte und Literatur studiert und mit dem Magister abgeschlossen. Die Ehrenämter bedeuten mir sehr viel, vor allem im humanitären Bereich. Die Jahre im Freundeskreis habe ich mit Freude erlebt, und sie haben mein Leben bereichert. Mit den Lesern der Zeitschrift *Kultur & Technik* teile ich die Liebe zum Deutschen Museum und möchte sie ermuntern, Mitglied im »Freundes- und Förderkreis« zu werden.



»» **Dr. Gerhard Mahler**
Jurist

Dem Deutschen Museum bin ich schon aus Schülerzeiten verbunden. Damals habe ich sehr gerne die Vorträge von Professor Auer in Physik verfolgt. Das war ein Spektakel wissenschaftlicher Art, das an einer Schule überhaupt nicht möglich gewesen wäre. Professor Auer hat Physik gezaubert.

Ich war zwar damals ganz gut in Physik und Chemie, habe aber dann doch etwas anderes studiert: Rechtswissenschaften. Aber ich bin dem Museum und seiner Leitung im Laufe der Jahre immer verbunden geblieben, später wurde ich ins Kuratorium berufen. Als der damalige Generaldirektor, Professor Fehlhammer, mit der Bitte an mich herantrat, ob ich dabei behilflich sein könne, einen Freundes- und Förderkreis für das Deutsche Museum

ins Leben zu rufen, habe ich gleich zugesagt. Zur Gründungsversammlung am 13. November 2000 kamen viele Persönlichkeiten aus Wissenschaft, Kultur und Technik. Es war eine lebhafte Veranstaltung, die ich gemeinsam mit Herrn Fehlhammer und Frau Kaske leiten durfte. Wir Gründungsmitglieder durften uns anschließend in das Goldene Buch des Museums eintragen, das sogar die Unterschrift des Deutschen Kaisers enthält. Als Schatzmeister habe ich das Rechnungswesen aufgebaut. Inzwischen wurden weit über hundert Förderprojekte bewilligt. Mir persönlich waren die Schüler- und Ferienprogramme immer sehr wichtig. Auch bei mir waren ja die Vorträge von Professor Auer der Zündfunke für eine lebenslange Verbindung. Auch einem Juristen muss klar sein, dass wir unsere Wirtschaftskraft nur mit naturwissenschaftlichen und technischen Leistungen erhalten können. Deswegen ist die Heranführung der Jugend an diese Themen so wichtig. Nicht alle Kinder, die ins Deutsche Museum gehen, müssen später auch ein naturwissenschaftliches oder technisches Fach studieren, aber der Museumsbesuch soll Begeisterung wecken und den Wunsch verstärken, sich näher damit zu beschäftigen. Das Kinderreich ist deshalb etwas Wunderbares.

Damals hatten wir gehofft, dass wir irgendwann über dreihundert Mitglieder zusammenbringen, um mit dieser Substanz das Museum entsprechend unterstützen zu können. Dieser Wunsch ist im Jahr 2015 in Erfüllung gegangen. Ich bin sehr glücklich, dass ich mithelfen konnte, diesen Verein ins Leben zu rufen.



» Prof. Dr. Otto Meitinger
ehemaliger Präsident der Technischen Universität München
Ehrenbürger von München

Das Deutsche Museum bedeutet ungeheuer viel für die Stadt München, für Bayern, für Deutschland. Es ist ein Schmuckstück, das sehr zum Ansehen Münchens beiträgt. Ich hatte immer schon eine enge Verbindung zum Deutschen Museum, nicht nur in meinen zehn Jahren als Präsident der Technischen Universität. Frau Kaske rief mich damals an und bat mich, im neu gegründeten Freundeskreis mitzumachen. Ich habe es gerne getan. Inzwischen habe ich mit Erstaunen festgestellt, dass ich sogar Ehrenmitglied bin! Es ist recht erfreulich, wie viele interessante und bedeutende Leute aus den verschiedensten Bereichen inzwischen den Freundes- und Förderkreis unterstützen. Dass dieser Freundeskreis so gut funktioniert, ist nicht zuletzt Christiane Kaske, Isolde Wördehoff und Prof. Dr. Wolfgang Heckl zu verdanken. Fast jede namhafte Institution hat sich ja mittlerweile einen Freundeskreis angelacht, aber der Freundes- und Förderkreis des Deutschen Museums ist etwas Besonderes. Natürlich leistet der Freundeskreis in erster Linie einen wichtigen finanziellen Beitrag. Aber die Menschen im Freundeskreis sind nicht nur zahlende Mitglieder, sondern sie fühlen sich dem Museum verpflichtet, wenn sie gebraucht werden. Es besteht hier eine enge, institutionalisierte Verbindung. Als Mitglied des Freundeskreises hat man das Gefühl, zum Deutschen Museum dazuzugehören und in wichtigen Angelegenheiten gefragt zu werden.



» Monika Czernin
Autorin und Filmemacherin

Erstens, ich liebe das Deutsche Museum seit meiner Kindheit. Und zweitens, ich kannte es trotzdem nicht besonders gut. Und das, obwohl ich eine Urenkelin des Gründers Oskar von Miller bin. Seitdem ich Mitglied im Freundeskreis bin und dort eine Vorstandsrolle bekleide, hat sich dieser Missstand geändert und aus meiner Vorliebe für das Bergwerk, indem wir als Kinder Geisterbahn gespielt haben, ist umfassendes Staunen geworden. Heute gehe ich stets voller Erwartung vom Parkplatz am freundlichen Portier vorbei, dann die Treppen des Bibliotheksgebäudes hinauf, dort wo das administrative Herz des Museums schlägt.

Auf dem Weg grüße ich meinen stets leicht grimmigen Urahn mit den charakteristischen buschigen Augenbrauen – er hängt in Öl im Foyer über dem Klavierflügel, dort wo die Mitgliederversammlungen des FFK stattfinden – und hoffe, dass ihm mein Tun in seinem Haus gefällt. Anschließend verschwinde ich in Sitzungen oder im Archiv, zu einem Informationsgespräch mit Wilhelm Füßl, diesem wandelnden Gedächtnis des Museums, oder in die »Katakomben« – also die Untergeschosse, wo in den hauseigenen Werkstätten und Depots (dem Teil, der nicht ausquartiert wurde) die pulsierenden und der Öffentlichkeit nicht zugänglichen Versorgungsadern des Museums liegen.

Als Mitglied des Freundeskreises kann man sogar hinter die Kulissen der großen Umbauarbeiten schauen, die im Zuge der »Zukunftsinitiative« in Angriff genommen wurden, schließlich gehören die Freunde zum Gründerkreis dieser Mammutaufgabe. Museumsfreund zu sein ist ein wenig wie am Set des Films »Nachts im Museum« zu stehen und Regieanweisungen zu geben. Denn uns Freunden »gehört« das Haus durch unser Engagement ein bisschen. Auch Oskar von Miller hat seine Museumsidee auf die Schultern seiner – ebenso zahlreichen wie finanzkräftigen und einflussreichen – Freunde platziert und so sein Anliegen, Naturwissenschaft und Technik einer großen Öffentlichkeit begreiflich zu machen, auch zu dem ihren gemacht. Ebenso fuchsschlau agiert heute auch unser Generaldirektor Wolfgang Heckl, und wahrscheinlich hat er sich deshalb den mittlerweile berühmten Papp-Oskar vor die Bürotür gestellt. Übrigens war eine meiner ersten Aufgaben in dem normalerweise ausschließlich ernstesten Aufgaben nachgehenden Verein, das mittlerweile berühmte Bildnis aus Pappe bei der Feier zum 10. Jubiläum des Freundeskreises zu versteigern, streng nach Oskars Motto, um Geld einzutreiben, ist uns (fast) jedes Mittel recht.

Ich empfinde es als unglaubliches Privileg, ein Museum dieser Größe, eine Institution dieser Komplexität und Vielschichtigkeit von innen kennenlernen zu dürfen und in einem nicht unerheblichen Maße die Geschicke des Hauses mitzugestalten. Und je länger ich dem Museum als Freundeskreismitglied verbunden bin, desto mehr wächst in mir die Überzeugung, hier zumindest etwas zu den drängenden Fragen der Zeit beitragen zu können, denn das Museum ist einerseits Teil der unendlich schnellen Technikentwicklung unserer Zeit und andererseits auch ein kulturgeschichtlicher Wissensspeicher. Es ist ein in den Raum gestülptes Gedächtnis über die Entwicklung der modernen Welt in unzähligen Objekten. Stets beseelt und mit vielen Eindrücken und Erfahrungen bereichert verlasse ich das Haus, husche an der Leitzentrale vorbei hinaus in die Stadt.





» Nikolaus von Bary
Student

Ich kam zunächst als Begleitung meines Vaters zu Veranstaltungen des Freundeskreises und war von Anfang an begeistert. Ich bin in der Umgebung von München aufgewachsen und war in meiner Kindheit des Öfteren im Deutschen Museum. Als Student für Maschinenbau und allgemein technisch interessierte Person ist das Deutsche Museum für mich ein Sinnbild für Technik und ein wunderbarer Ort, um Neues zu entdecken. Im Rahmen einer Initiative, junge Leute für den Freundeskreis zu begeistern, übernahm Camilo Dornier schließlich eine Patenschaft für

mich, und meine Begeisterung für den Freundeskreis ist seitdem ungebrochen. Neben den sehr interessanten Vorträgen und Exkursionen bietet der Freundeskreis eine Plattform für Austausch und Diskussion zwischen Gleichgesinnten. Er bietet die Möglichkeit, viele neue Leute kennenzulernen und sich in Gespräche über Technik zu vertiefen. Bei den Veranstaltungen findet immer ein reger Austausch von verschiedenen Sichtweisen und Gedanken statt. Die Möglichkeit einer solchen diversen Vernetzung ist etwas sehr Seltenes und ich genieße es jedes Mal sehr. Ich schätze die Freude und Begeisterung, die der Vorstand, aber insbesondere auch alle Mitglieder, dem Deutschen Museum in jeder Situation entgegenbringen. Bei den Vorstandssitzungen und den Veranstaltungen entsteht so eine positive Energie, die alle verbindet. Die Teilnahme ist daher immer eine besondere Freude!



Die »Lange Nacht« im Deutschen Museum



» Camilo Dornier
Unternehmer

Im Jahr 2000 bat mich Frau Christiane Kaske, unsere wunderbare Initiatorin, in den Gründungsvorstand des FFK, um dort das Amt des Schriftführers zu übernehmen. Nach anfänglichem Zögern bin ich letztendlich dem Charme von Frau Kaske und dem Reiz, mich für ein so traditionsreiches, wertvolles und einmaliges Museum von Weltrang zu engagieren, erlegen.

Mit dem Deutschen Museum verbinden mich eindrucksvolle Kindheitserlebnisse. Ich habe das Museum öfters mit meinen Eltern besucht. Als Teenager durfte ich dann alleine oder mit Freunden während der Schulferien viele Tage – oftmals am Stück – im Museum verbringen. Es war immer spannend. Ein Reich der Fantasie und

Träume. Nach einem langen Museumstag mit vielen Eindrücken und Knopfdruckerlebnissen waren wir stets erschöpft und unsere Beine taten weh. Die münzbetriebenen Beinrüttelmaschinen brachten dann ein wenig Erleichterung. Rückblickend war das Deutsche Museum für mich der schönste Abenteuerspielplatz meiner Jugend und jeder Besuch ein prägendes Erlebnis. Heute ist für mich das Deutsche Museum eine Quelle und ein Symbol für Kreativität und Mut, um Grenzen zu durchbrechen und Neues bzw. Werte im Sinne unseres globalen Gemeinwohls zu schaffen.

Als Mitglied im FFK kann man sich an der vielleicht wichtigsten Bildungsaufgabe für unser Land und seine langfristige Zukunft engagieren. Nachdem wir über keine nennenswerten Rohstoffe verfügen, hängt unser Wohlstand im Kern von der Innovationsfähigkeit und der Unternehmerqualität unserer Bevölkerung ab. Grundlage hierfür sind Naturwissenschaft und Technik!

Das Deutsche Museum ist der Ort, an dem wir unsere Kinder und Jugendlichen für Technik begeistern können und so die Potenziale für unseren Ingenieur- und Wissenschaftsnachwuchs erschließen können. Darüber hinaus ist unser Museum ein zentraler Ort, um in allen Bevölkerungsschichten das Verständnis für Technologie zu fördern, ohne die eine umweltverträgliche und ressourcenschonende Entwicklung unseres Blauen Planeten nicht möglich sein wird. Jedes Mitglied des FFK kann diese Entwicklung auf vielfältige und sehr persönliche Art und Weise unterstützen, zum Beispiel durch Übernahme einer Patenschaft für ein Juniormitglied. Hier kann man seinen Erfahrungsschatz einbringen und jungen Menschen helfen, ihren Weg in die Naturwissenschaft zu finden. Mir bereiten »meine« Patenkinder sehr viel Freude, nicht zuletzt weil ich dort auch schon unsere zukünftige Vorstandsgeneration und noch vieles mehr heranwachsen sehe. Unser aller Engagement für das Deutsche Museum wird reichlich belohnt. Hier wächst eine wunderbare Generation von Freunden für unser Haus heran.

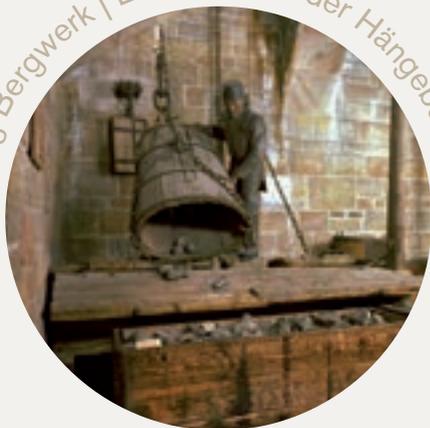


»» **Dr. Alexandra Zenneck**
Juristin

Meine Verbindung zum Haus ist zweifacher Natur: Zum einen hat mich Technik schon immer interessiert – ich bin sozusagen eine technikaffine Volljuristin. Zum anderen haben wir familiäre Verbindungen: Mein Schwiegergroßvater, Jonathan Zenneck, folgte Oskar von Miller im Amt des Generaldirektors des Deutschen Museums. Die meisten Münchner kennen nur die Boschbrücke, aber ich komme immer über die Zenneckbrücke auf die Museumsinsel.

Ich bin inzwischen seit einigen Jahren Mitglied im Freundes- und Förderkreis. Das Deutsche Museum ist auf der Welt einzigartig und alleine deshalb unterstützenswert. Aber auch deshalb, weil ich dort die vielen Fragen meiner drei Kinder besser beantworten kann. Meine Kinder wollen als Erstes immer in die Physikabteilung – vielleicht haben sie das von ihrem Urgroßvater. Bei mir hingegen steht seit meiner Kindheit das Bergwerk an erster Stelle. Man taucht dort unter die Erde ab und entdeckt, wie die Menschen zunächst mit den bloßen Händen und später mit immer raffinierteren Werkzeugen die Schätze der Welt geborgen haben. Ich schätze vor allem die Dinge zum Anschauen und Anfassen im Museum. Was das Deutsche Museum so besonders macht, ist, dass man viele der ausgestellten Maschinen auch in Aktion sehen kann. Jonathan Zenneck hat dafür gesorgt, dass viele dieser originalen Exponate von den Besuchern per Knopfdruck in Gang gesetzt werden können. Das gefällt mir persönlich sehr gut und ich finde, dass diese klassischen Exponate auch so erhalten bleiben sollten. Ich hoffe sehr, dass wir mit dem Freundeskreis auch solche Erinnerungen bewahren.

Abteilung Bergwerk | Bergmann in der Hängebank



Das Deutsche Museum 1925



»» **Henrik Arneht**
Unternehmensberater

Meine Frau erfuhr im Mai 2002 von der Existenz des damals noch »jungen« Freundeskreises und schenkte mir eine »Probe«mitgliedschaft zum Geburtstag. Angesichts der Zielsetzung des Freundeskreises war es klar, dass sie damit ins Schwarze getroffen hatte, und ich bin ihr dafür bis heute dankbar. Neben der überwältigenden Vielfalt an Themengebieten und interessanten Objekten, die im Deutschen Museum präsentiert werden, ist es für mich immer auch ein Ort der Erinnerung an meinen Vater, der mich als Fünfjährigen zum ersten Mal in das Museum mitnahm. Die Eindrücke dieses ersten

Besuchs im Deutschen Museum, in dem man selber alle Knöpfe drücken durfte und dann über die Folgen staunen, nachdenken und die väterliche Geduld in unzähligen Nachfragen auf eine harte Probe stellen musste, haben mich mein ganzes Leben begleitet. Ich durfte im Freundeskreis insbesondere auf den zahlreichen Veranstaltungen eine Vielzahl interessanter Menschen kennen und schätzen lernen, die eine gemeinsame Zielsetzung verfolgen, nämlich die Unterstützung einer Institution, die maßgeblich zur technisch-kulturellen Weiterentwicklung unserer Gesellschaft beiträgt. Das Deutsche Museum ist eine weltweit einzigartige Institution, und der Freundeskreis genießt durch die unbürokratische und schnelle Unterstützung unterschiedlichster Projekte quer durch das ganze Haus große Wertschätzung. Exklusive Veranstaltungen und gemeinsame Reisen fördern den Zusammenhalt im Freundeskreis und bieten spannende Möglichkeiten zum Informationsaustausch. Durch den Juniorenkreis und die gezielte Förderung von Veranstaltungen für Kinder und Jugendliche und als Gründungsmitglied der Zukunftsinitiative unterstützt der Freundeskreis den Weg des Deutschen Museums in die Zukunft.



» Dr. Sabine Rojahn
Rechtsanwältin

Ich erhielt vor einigen Jahren einen sehr freundlichen Anruf von Herrn Dornier. Er hatte im *Handelsblatt* einen Artikel über mich gelesen und meinte, dass ich gut in den Freundes- und Förderkreis passen würde. Er erläuterte mir die Zielsetzung des Freundes- und Förderkreises und fragte, ob ich nicht mitmachen wolle. Ich habe gleich mit großer Freude »ja« gesagt.

Ich habe mich schon immer für Naturwissenschaften und Technik interessiert. Das Deutsche Museum bietet einen fantastischen Überblick über die Erkenntnisse der Naturwissenschaften und die Errungenschaften der Technik, und zwar hinsichtlich Vergangenheit und auch Zukunft. Das Deutsche Museum ist aber auch ein Forum für den Austausch von Wissenschaft und Technik. Dies wird durch die zahlreichen Veranstaltungen dokumentiert. Ein Schwerpunkt ist erfreulicherweise die Kinder- und Jugendausbildung. Aber es finden sich auch Vorträge oder Sonderausstellungen, die sich mit grundsätzlichen Problemen, Aufgaben und Lösungsmöglichkeiten zur Sicherung unseres Lebens beschäftigen.

Da mein Büro nur zehn Minuten Fußweg vom Deutschen Museum entfernt liegt, stattete ich zur Entspannung und zur Anregung dem Deutschen Museum öfter einmal einen kurzen Besuch ab. Die Mitglieder des Freundes- und Förderkreises verbindet die Liebe und das Interesse an den Naturwissenschaften und der Technik. Die Mitglieder kommen aus ganz unterschiedlichen Berufen. Hierdurch hat man die Gelegenheit, mit Menschen zu sprechen, die man im sonstigen beruflichen Umfeld oder im Freundes- und Bekanntenkreis nicht trifft. Allein dies ist eine große Bereicherung. Eben darum lohnt es sich allein schon, Mitglied im Freundes- und Förderkreis zu werden. Zusätzlich möchte ich erwähnen, dass die angebotenen Reisen des Freundes- und Förderkreises sehr attraktiv sind. In hervorragender Weise wird Kunst- und Museumsgenuss verbunden. Diese Reisen stellen stets etwas Besonderes dar.



Jasmine Huwer
Studentin

Dass ich heute Mitglied des Freundeskreises bin, habe ich eigentlich einem Zufall zu verdanken. 2013 – ich hatte gerade angefangen, Ingenieurwissenschaften zu studieren – war ich im Rahmen der Langen Nacht der Museen auf der Dachterrasse des Deutschen Museums zu Besuch. Dort wurde ich von ein paar Studenten gefragt, ob ich nicht Interesse hätte, Juniorenmitglied des Freundes- und Förderkreises zu werden. Zunächst war ich skeptisch, aber als ich erfuhr, dass auch sie Ingenieurwissenschaftler waren, habe ich ihren Fragebogen schließlich ausgefüllt. Inzwischen bin ich stellvertretende Vorsitzende des Juniorenkreises und stehe bei der Langen Nacht der Museen selbst hinter der Bar auf der Dachterrasse.

Ich bin im Münchner Umland aufgewachsen und deshalb von klein auf mit dem Deutschen Museum vertraut. Ich finde es toll, dass man dort Wissen erleben kann. Als Kind waren vor allem einfache physikalische Zusammenhänge interessant für mich. Heute, als Studentin, kann ich die Theorien, die in der Universität vermittelt werden, dort noch einmal ganz anders erfahren. Zum Beispiel habe ich in der Keramikabteilung vieles wiederentdeckt, was ich zuvor in Materialwissenschaften studiert hatte. Als Mitglied des Freundes- und Förderkreises lerne ich das Haus jetzt noch besser kennen. Vor allem aber bin ich dankbar für die Möglichkeiten, die mir das Patensystem des Freundes- und Förderkreises bietet. Als Junior kommt man dort in engen Kontakt mit Persönlichkeiten, die man sonst nicht treffen würde. Unsere Paten sind wirklich beeindruckende Menschen. Jeder von ihnen hat viel erlebt und kann daher eine Menge an sein Patenkind weitergeben. Meine Patin, Christiane Kaska, unterstützt mich nicht nur finanziell, indem sie meinen Mitgliedsbeitrag übernimmt. Wir stehen auch in persönlichem Kontakt, telefonieren, treffen uns zum Kaffee oder bei Veranstaltungen. Wir tauschen uns über Themen aus, die uns beide bewegen. Sie hat mir sogar angeboten, mich in der Planung meiner beruflichen Zukunft zu unterstützen. Das ist eine unglaubliche Chance, die ich sehr zu schätzen weiß.





Der Bettelmönch und seine Freunde

Oskar von Miller als Bettelmönch, dem von allen Seiten Geschenke zugetragen werden. Karikatur auf einem Programm des Landesausstellungsparks in Berlin, 1907.

Beschäftigt man sich mit der Geschichte des Deutschen Museums, stellt sich unwillkürlich die Frage: Wie war der durchschlagende Erfolg des Museums in so kurzer Zeit möglich? Sicherlich gibt es ein Bündel an Erklärungsmöglichkeiten, entscheidend dürften aber die Person des Gründers Oskar von Miller (1855–1934) und sein umfassendes Netzwerk an Freunden und Förderern gewesen sein. Von Wilhelm Fühl

Schon die nackten Zahlen und Fakten sprechen für sich. Zum Zeitpunkt der Museumsgründung im Juni 1903 verfügte Miller über keinerlei Geldmittel, keine Mitarbeiter, kein Museumsgebäude, er hatte keine Förderer und kein einziges Objekt. Bereits drei Jahre nach der Gründung waren die ersten Ausstellungen im Alten Nationalmuseum (heute: Museum Fünf Kontinente) eröffnet, wieder drei Jahre später die erste Zweigstelle in der Schwere-Reiter-Kaserne. 1925 wurde – verzögert durch den Ersten Weltkrieg und die Inflationsjahre – das Museumsgebäude auf der Insel mit 23 000 m² Ausstellungsfläche eingeweiht. Bei Millers Ausscheiden als Museumsvorstand 1933 besaß das Deutsche Museum über 65 000 Objekte, das Museumsgebäude und die Bibliothek mit Platz für eine Million Bände waren eröffnet, im Archiv befanden sich bereits Tausende wertvoller Handschriften und Pläne, der Kongressaal stand im Rohbau. Und: Über acht Millionen Menschen hatten das Museum bereits besucht.

Ganz offensichtlich hatte Miller ein ungeheures Organisationstalent, er hatte ein Gespür für die Interessen der Museumsbesucher und verstand es, ihnen Ausstellungen zu bieten, die damals weltweit einzigartig waren. Aber wie gelang es ihm, Mitstreiter für sein Vorhaben zu gewinnen, enorme Geldsummen und Sachspenden einzuwerben? Miller wird häufig als mitreißender Redner geschildert, doch relativieren historische Tondokumente diese Aussage. Keineswegs war seine Stimme so einschmeichelnd, so umwerbend und überzeugend, wie man meinen könnte, sie wirkt eher etwas grob und poltrig.

Die Person Millers charakterisiert in einzigartiger Weise ein Zitat des einflussreichen und mächtigen Großindustriellen und Generaldirektors der Farbenfabriken vorm. Fried. Bayer & Co. und später der I.G. Farbenindustrie A.G., Carl Duisberg (1861–1935). Duisberg spricht darin davon, erst als er sich mit Miller richtiggehend zusammengerauft habe, sei er einer seiner besten Freunde geworden. Miller war, das lassen auch andere Erinnerungen an ihn erkennen, ein durchaus schwieriger, ja manchmal cholerischer Charakter mit diktatorischen Zügen. Aber er war ein gekonnter Netzwerker. Schon über seine in München einflussreiche Familie, über seine berufliche Tätigkeit bei

der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, als Inhaber eines europaweit angesehenen Ingenieurbüros für Kraftwerkenanlagen und als Organisator von zwei bedeutenden Elektrizitätsausstellungen hatte er ungemein viele Beziehungen aufgebaut, die er nach der Gründung des Museums für dessen Zweck funktionalisierte. Ungeniert sprach Miller seinen großen Bekanntenkreis an und bat um Un-

Porträt von Carl Duisberg mit Widmung »Seinem lieben Freunde Oskar von Miller«.

»Beim Deutschen Museum tritt man in den Bannkreis seines Schöpfers; dabei handelt es sich um ein Erlebnis. Dies darf man sich aber nicht ohne weiteres als schön und bequem vorstellen. Bei mir begann das Erlebnis mit einer großen – wie man in Bayern so schön sagt – Rauferei. Von vielen Freunden Oskar von Millers wurde mir allerdings gesagt, erst wenn man sich mit ihm gehörig ausgesprochen, das heißt gezankt hat, kann man sein guter Freund sein. Das ist bei mir gründlich geschehen. Ich bin dann einer seiner besten Freunde geworden, und darauf bin ich ganz besonders stolz ... Ich habe (als Vorsitzender des Vorstandsrats des Deutschen Museums) getreulich das getan, was ungeschrieben noch über dem Museum steht: In diesem Hause darf jeder tun, was ich will. Oskar von Miller.« Carl Duisberg





Nicht jedes Geschenk war willkommen: Oskar von Miller lehnte die Aufstellung einer Bismarck-Statue ab und düpierte damit zahlreiche national gesinnte Geldgeber. Bis heute steht die Statue an der Boschbrücke auf städtischem Grund.

terstützung – manchmal hat man den Eindruck, dass er diese geradezu einforderte. Auf der anderen Seite geizte er nicht mit Belohnungen. Hatte er einen Stifter überzeugt, 5000 Reichsmark zu spenden, bekam dieser als Dank eine lebenslängliche Mitgliedschaft in einem Museumsverein. Besondere Leistungen wurden mit einem abgestuften Belohnungssystem vergolten, von der Eintragung in das »Stifterbuch«, das öffentlich im Ehrensaal auslag, von einer Denkmünze, dem »Goldenen Ehrenring«, der Ehrenmitgliedschaft im Museum bis hin zur Erhebung in den persönlichen Adelsstand, die Miller mehrfach für seine Förderer durchsetzen konnte. Zudem waren seine alljährlichen Museumsfeste gesellschaftliche Ereignisse in der Weimarer Republik, bei denen ranghohe Vertreter aus Politik, Industrie, Wissenschaft, Behörden, Vereinen, Verbänden und Adel gerne anwesend waren. Und natürlich war allen Beteiligten bewusst, dass man sich die Teilnahme mit einer neuen Spende »erkaufen« musste, hatte Miller doch seit 1925 die Museumsfeiern genau auf seinen Geburtstag, den 7. Mai, gelegt ...

Miller bemühte sich energisch um neue Mitglieder. Regelmäßig wurden die Gremienmitglieder angesprochen und aufgefordert, ihrerseits Mitglieder und Spenden zu werben. Man setzte auf die Multiplikatoren- und Vorbildfunktion renommierter Gremienmitglieder wie Gustav Krupp von Bohlen und Halbach, Wilhelm Conrad Röntgen und Rudolf Diesel. Ein Beispiel für dieses »Schneeballsystem« ist der Mannheimer Fabrikant Fritz Engelhorn (1855–1911). Aus seiner Korrespondenz mit Miller wird deutlich, dass er sich bemühte, dem Museum neue und finanzkräftige Mitglieder zuzuführen. Im Jahr 1909 schickte er dem Museum eine Liste mit 38 Namen von Fabrikanten, Ingenieuren und örtlichen Honoratioren aus dem Raum Mannheim, die das Museum unterstützen wollten. Am Heiligen Abend des gleichen Jahres konnte er Miller stolz mitteilen, dass er weitere elf Firmen für eine korporative Mitgliedschaft gewonnen habe.

Bei der Durchsicht von Tausenden an Korrespondenzen im Museumsarchiv ist man erstaunt, dass sich nur wenige der Angesprochenen strikt weigerten, das große Museumsprojekt zu unterstützen. Prinzipiell funktionierte das System. Politik, Industrie, Wissenschaft und Privatpersonen

förderten das Museum und lieferten die gewünschten Objekte oder Geldsummen. Sogar die Arbeiterschaft beteiligte sich mit kostenlosen Arbeitsstunden an der Vervollendung des Museumsgebäudes. Viele Firmen schickten, teilweise unaufgefordert, ihre neuesten Produkte. 1904 beklagte Miller, ein großer Schienenhersteller habe dem Museum eine riesige Sammlung von Schienenprofilen übersandt, die zwar als »Zierde jeder industriellen Ausstellung« gelten könne, für ein »wissenschaftliches Museum« aber völlig unbrauchbar sei. Dennoch wurde diese Schenkung nicht abgelehnt. Man wollte die Stifterfirma nicht vor den Kopf stoßen.

Zu einem wirklichen Eklat zwischen Miller und einem Stifter kam es in einem Fall, der Bismarck-Statue, die heute an der Boschbrücke/Ecke Erhardtstraße steht. Der Industrielle Paul Reusch (1861–1935) hatte 1926 die Stiftung angestoßen. Miller lehnte ein solches Denkmal für das Museum mit dem Hinweis ab, dass Bismarck zwar als Reichsgründer seine Bedeutung habe, Technik und Wissenschaft seien von ihm aber nur indirekt gefördert worden. Der Streit eskalierte in einzigartiger Weise. Viele Industrielle und Politiker unterstützten die Aufstellung der Bismarck-Statue und wandten sich vom Museum ab. Im Parteiorgan *Völkischer Beobachter* attackierte die NSDAP in München Miller als Parteigänger der Räteregierung und Internationalisten, der einen deutschen Staatsmann nicht würdige – wohl auch aus dem Grund, da der ausführende Künstler Fritz Behn (1878–1970) ein früherer Parteigenosse war. Miller aber blieb trotzig und verweigerte die Aufstellung. Noch heute steht die mächtige Bismarck-Statue bezeichnenderweise auf städtischem Boden, nicht auf Museumsgrund.

Dennoch zeigte sich, dass die Politisierung des Streits um das Denkmal in Millers fein gesponnenem Netz von Förderern Risse hinterlassen hatte. Die Unterstützung ging merklich zurück, die Spenden reduzierten sich von rund 320.000 im Jahr 1929 auf 50.000 Reichsmark drei Jahre später, die Finanzierung des Bibliotheksgebäudes und des Kongresssaals geriet ins Stocken. In der NS-Zeit bildete sich ein personell neuer, aber kurzlebiger Kreis von Förderern des Museums, so dass nach dem Zweiten Weltkrieg ein völlig neues Netzwerk geknüpft werden musste. ■



DER AUTOR

Dr. Wilhelm Füßli

Der Historiker ist Leiter des Archivs des Deutschen Museums. Im Jahr 2003 veröffentlichte er mit Helmuth Trischler das Buch *Geschichte des Deutschen Museums. Akteure, Artefakte, Ausstellungen*. 2005 folgte eine Biografie zu Oskar von Miller. Zurzeit arbeitet er an einem Band zu den Dioramen des Deutschen Museums.



Engagierte Fliegerin

Isolde Würdehoff im Porträt Von **Laura Pöhler**

An die Gründungssitzung kann sich Isolde Würdehoff noch gut erinnern. »Da wehte ein frischer Wind durchs Museum, den man spüren konnte.« Mehr als überfällig sei die Gründung eines Freundeskreises gewesen, meint sie, doch erst mit Christiane Kaske sei aus der Idee Wirklichkeit geworden. Frau Kaske sei es auch zu verdanken gewesen, dass der Freundeskreis bereits am Tag seiner Gründung 40 Mitglieder und einen handlungsfähigen Vorstand vorweisen konnte. Auch Isolde Würdehoff war von Anfang an dabei – sechs Jahre lang hat sie sich als Schriftführerin engagiert, die letzten sechs Jahre gestaltete sie als Vorsitzende die Arbeit des Freundeskreises mit. Aber eigentlich ist es der sportlichen Dame zuwider, allzu viel über sich selber zu reden. Die Sache sieht sie im Mittelpunkt und wird nicht müde, auf die Verdienste der Vorgängerin und das Engagement jedes einzelnen Mitglieds zu verweisen. Sie selber, meint sie, sei da gar nicht so wichtig und im Grunde ist es ihr fast ein wenig unangenehm, dass die Redaktion des Mitgliedermagazins sie genötigt hatte, einem kleinen Porträt zuzustimmen. Sie lässt sich am Ende darauf ein – um der Sache willen. »Das Deutsche Museum gehört zu München wie der Liebfrauenturm«, sagt die gebürtige Münchnerin. Wenn sie über die Arbeit des Freundeskreises spricht, wird jedoch schnell klar, dass Isolde Würdehoff weit mehr bewegt als die Museumsbilanz. Ihre detaillierten Erinnerungen an die geförderten Projekte der letzten 15 Jahre erzählen von ihrer Faszination für Naturwissenschaft und Technik.

Als ehemalige Präsidentin des Luftsportverbands Bayern und Vizepräsidentin des Deutschen Aero Clubs war Isolde Würdehoff nicht selten die einzige Frau in einer männlich dominierten Fliegerwelt. Frauen für Wissenschaft und Technik zu begeistern ist ihr daher ein persönliches Herzensanliegen. Als sie 1990 erfuhr, dass die Luftfahrtabteilung des Deutschen Museums in Ermangelung qualifizierter Museumsführerinnen keine speziellen Führungen mehr für Frauen anbieten könne, übernahm sie diese Aufgabe kurzerhand selbst. 17 Jahre alt war Isolde Würdehoff, als sie selber zum ersten Mal »abhob«. »Als Fliegerin interessiert man sich automatisch dafür, was die Welt zusammenhält«, meint sie. Heute kann die ehemalige Angestellte der Bayerischen Börse den Pilotenschein für Segel- und Motorsegelflug, das Goldene Leistungsabzeichen mit Strecken-Diamant, mehr als 3000 Flugstunden und Tausende Kilometer über der Erde vorweisen.

25 Jahre lang hat sie ihr Wissen und ihre Erfahrung mit den Besucherinnen des Deutschen Museums geteilt. Isolde Würdehoff ist – auch wenn sie das selber sicher niemals so äußern würde – ein Vorbild nicht nur als Fliegerin. Für ihr beispielhaftes und unermüdliches bürgerschaftliches Engagement wurde ihr sogar das Bundesverdienstkreuz verliehen. Den Vorsitz des Freundeskreises wird sie nach sechs Jahren Amtszeit aus Altersgründen abgeben. Sie hat das Amt, wie Weggefährten verraten, durch ihre Begeisterungsfähigkeit, die Freude an neuen Ideen und große Herzlichkeit geprägt. Sie selber meint rückblickend: »Ich habe viele tolle Vorstandsmitglieder an meiner Seite gehabt. Es war eine gute Zeit«, und versichert mit einem Lächeln, sie werde dem Freundes- und Förderkreis noch lange treu bleiben. ■■

RADSPIELER

Seit 1841



*Ausgesuchte Möbel,
Stoffe, Glas,
Geschirr und alles,
was Wohnen
schön macht.*



*F. Radspieler & Comp. Nachf.
Hackenstraße 7 · 80331 München
Telefon 089/23 50 98-0
Fax 089/26 42 17
mail@radspieler-muenchen.de
www.radspieler.com*

Wer glaubt, der Freundes- und Förderkreis des Deutschen Museums sei nur etwas für die Älteren, irrt! Seit zwei Jahren bringen Juniormitglieder frischen Wind in den »FFK«. Drei von ihnen haben sich – mitten in der Prüfungszeit – spontan bereiterklärt, einen sonnigen Samstag im August »ihrem« Museum zu opfern, um gemeinsam vier Seiten für dieses Magazin zu erarbeiten.

Alle Texte wurden von den Junioren selber verfasst. Fotografiert hat Rosa Süß.



Johanna Schwöbel (21)

kommt aus Pirmasens in der Pfalz, studiert Ingenieurwissenschaften an der TU München und hat sich auf Maschinenwesen mit Schwerpunkt Entwicklung und Konstruktion spezialisiert. Johanna liebt Kunst aller Art. Wenn sie nicht im Deutschen Museum ist, dann erkundet sie die Galerien und Pinakotheken. Sie zeichnet auch selber.

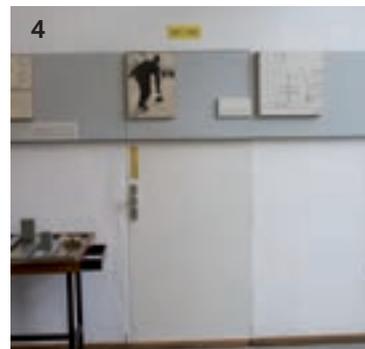
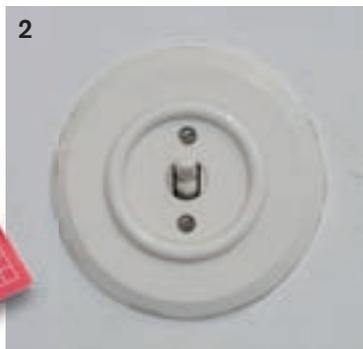
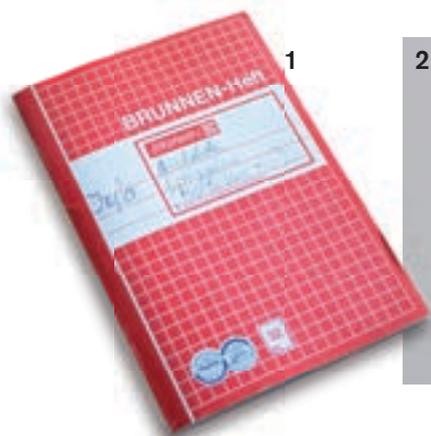
Martin Höpfner (25)

ist geboren in Wiesbaden und hat in Wuppertal gelebt. An der TU München studiert er Ingenieurwissenschaften mit Schwerpunkt Maschinenwesen. Sein besonderes Interesse gilt der Nutzfahrzeugtechnik; Martin geht in seiner Freizeit gerne in die Berge oder spielt Klavier. Sein Lieblingskomponist ist Bach.

Johannes Liebertseder (24),

geboren in Landau in der Pfalz, studiert seit 2010 an der TU Maschinenwesen. Besonders interessieren ihn Numerik und Simulation. Was er nach dem Studium machen will, weiß er noch nicht genau. Johannes singt als Tenor im Universitätschor mit.





Auf der Suche nach verrückten Geschichten im Deutschen Museum

Ein Museum mit einer so langen Geschichte und Tradition wie das Deutsche Museum, muss im Laufe der Jahrzehnte zwangsläufig Schauplatz vieler amüsanter, skurriler und unerwarteter Geschichten gewesen sein. Ich möchte mich an diesem Samstagmittag auf die Suche nach einigen dieser Geschichten machen. Wer könnte wohl den besten Überblick haben, die schönsten Geschichten kennen? Na klar, der erste Anlaufpunkt ist die »Zentrale«. Ich öffne die schwere Stahltür, hinter der sich die Koordinationszentrale des Hauses befindet.

Ein kurzes Gespräch dort offenbart vor allem eines: Das Museum ist riesengroß, und es gibt eine beinahe unbegrenzte Zahl von Möglichkeiten, sich darin zu verlaufen. Aus eigener, leidvoller Erfahrung kann ich das bestätigen. Es heißt, Kindergartengruppen hätten den Verlust einzelner Schützlinge in den Weiten des Museums sogar erst auf dem Heimweg bemerkt. Genaueres über die kleinen und großen Kuriositäten des Alltags erfahre ich hier aber nicht. Als Nächstes steuere ich die Information am Eingang an. Ich stelle mir vor, dass die Mitarbeiter dort täglich eine Menge ungewöhnlicher und lustiger Situationen erleben. Auf meine Nachfrage hin überreicht man mir tatsächlich ein kleines rotes DIN-A6-Heft mit der säuberlichen Beschriftung »Anekdoten/Ereignisse (Positives)«. Also doch, es hätte mich auch gewundert, wenn niemand hier die verrücktesten Fragen und ungewöhnlichsten Bitten notieren würde. Der erste Eintrag datiert vom Juli 2013, und ich lese Geschichten von Besuchern, die als Dank für erfolgreiche Familienzusammenführung ankündigen, die Mitarbeiter der Information für eine Woche ins Nachtgebet einschließen zu wollen. Der letzte Eintrag folgt fünf Seiten später. Zwei Jahre in der Geschichte eines großen Technikmuseums, komprimiert auf sechs Seiten, das kann doch nicht alles sein.

Natürlich kann es das nicht, denn auch hier werden die meisten und besten Geschichten vermutlich nicht aufge-

schrieben. Sie ereignen sich, zaubern ein Schmunzeln auf die Gesichter der Beteiligten, und werden wieder vergessen. Nur die schönsten bleiben im Gedächtnis der Mitarbeiter hängen.

Um diese Geschichten aufzuspüren, schlendere ich nun mit offenen Augen und Ohren durch die Museumsräume. Ich spreche in einigen Räumen das Personal gezielt an, und in der Tat: Es kommen viele Anekdoten zum Vorschein.

Kinder stellen die klügsten Fragen, während Erwachsene oft zu feige sind oder die Fragen völlig verklausulieren. Die häufigste Frage in der Physikabteilung ist allerdings die nach der Toilette. Und auf der Toilette, so erzählt eine Siebenjährige lautstark, liest ihr Vater immer das *Kultur&Technik*-Magazin. Es gibt sie also doch, die Skurrilitäten im Deutschen Museum. Jeden Tag. Man muss sie nur suchen.

AUFGESCHNAPPT

Johanna traf Martin, Thomas, Julius und Jonas im Museum und fragte sie:

Was gefällt dir am Museum am besten?

Martin: *Die Düsenjäger!*

Der Vater wirft ein: *Die haben wir doch noch gar nicht gesehen?*

Martin: *Trotzdem!*

Und von den Sachen, die du schon gesehen hast?

Martin: *Das Schiff! Weil es riesig ist!*

Thomas: *Die Flugzeughalle. Eigentlich alles.*

Julius: *Wir haben uns ja nicht alles angeschaut?!*

Jonas: *Die Flugzeughalle. Und das U-Boot. Aber nicht die Teile, nur das U-Boot!*

Peter: Der kleine Junge zeigt auf das Rettungsboot im Innenhof.

Guck mal Papa, ein Hubschrauber!

Vater: *Das ist doch kein Hubschrauber!*

Peter: *Oh ja. Hab' ich verwechselt.*

1. In einem kleinen Heftchen vermerken Museumsmitarbeiter ungewöhnliche, lustige oder merkwürdige Begegnungen.

2. Suchbild 1: Wo befindet sich dieser uralte Schalter und was passiert, wenn man ihn betätigt?

3. Suchbild 2: Wo befindet sich die Kugel aus Metall und wie kommen all die Kritzeleien auf die eigentlich »Unberührbare«?

4. Suchbild 3: Wo befindet sich diese Tür und wo führt sie wohl hin?



Was ist deine Lieblingsabteilung? Keine einfache Frage – schließlich hat jede Abteilung ihren ganz besonderen Charme. Die drei Junioren mussten eine Weile nachdenken, wofür sie sich entscheiden sollten.

Düstere Schächte, lichte Höhen und klingende Instrumente



Zahlreiche Treppen führen in die Tiefen des Bergwerks. In dunklen Schächten und Stollen verbergen sich schufende Knappen, geheimnisvolle Lichter und martialische Werkzeuge. Wer genau hinsieht, entdeckt allerdings auch Dinge, die hier gar nicht hingehören: Dem gebückt stehenden Knappen hat ein Besucher ein weißes Faltblatt in die Hand gedrückt.

In den Tiefen der Erde

Johanna Schwöbel

Nach mittlerweile zwei Jahren als Juniormitglied im Freundeskreis hat Johanna, die ursprünglich nicht aus München stammt, das Museum neu kennengelernt. Schon bei den ersten Besuchen war das Bergwerk einer der Orte, die sie nicht auslassen wollte. Wenn beim Hinuntergehen der gebogenen Treppe ein kühler Luftzug nach oben weht, riecht es leicht modrig nach Holz und Gestein. Es scheint, als wäre man nicht ein Stockwerk hinab ins Untergeschoss des Museums gestiegen, sondern würde in endlosen Gängen tief unter der Erde umherwandern. Das Bergwerk ist einer der Teile des Museums, die als Raum selbst Ausstellungsstück sind. Es bedarf nicht vieler Erläuterungen, um zu vermitteln, wie Technik unter Tage funktioniert, wie sie sich entwickelt und an Begebenheiten angepasst hat. Eingebettet in die Umgebung trägt jedes Staubkorn und jede weitere Spinnweb dazu bei, die Zeitreise durch die Geschichte des Bergbaus für den Besucher noch authentischer wirken zu lassen. Johanna ist der Meinung, dass dieser Ort genau so erhalten bleiben sollte. Auch wenn einige der Informationsräume zwischen den einzelnen Bergwerkssegmenten neu gestaltet werden sollten – der Charme dieser vermeintlich unterirdischen Welt darf nicht verloren gehen. Zu gut passt sie in die Tiefe des Museumskomplexes, der für Johanna einzigartig ist, weil er die richtige Balance zwischen neuzeitlicher Wissensvermittlung und traditionellem Museumsambiente hält.

Stolz und auch ein bisschen Verantwortung schwingen mit, während man als Mitglied des Freundeskreises durch diesen Lieblingssort wandert. Es ist schön zu sehen, wie mancher Besucher beeindruckt die Hand an der Wand entlanggleiten lässt, sich in eine der zahlreichen engen Nischen duckt und durch verwinkelte Schächte nach oben blickt. Jeder Spaziergang durchs Haus zeigt, wie bedeutend das Verhältnis zwischen Museum und seinen Förderern war und ist. Als Juniormitglied Teil des Freundeskreises zu sein, ist verbunden mit dem Gefühl, ein wenig auch Bewohner dieses Hauses zu sein, in dem Menschen aus aller Welt zusammenkommen, um Technik zu erleben und ihr Interesse daran zu teilen.



Rhythmus und Klang begleiten Menschen durch die Zeiten. Martin Höpfner bewundert neue und alte Schlagwerke wie das Xylophon aus Steinen.

Der Ton macht die Musik

Martin Höpfner

Jeder, der schon mal im Deutschen Museum war, und die unglaubliche Vielfalt interessanter Abteilungen und faszinierender Themen erleben durfte, weiß, wie schwer es ist, eine Lieblingsabteilung zu nennen. Genauso erging es auch Martin. Im Laufe vieler Besuche und Erkundungen der Museumsräume hat aber schließlich auch er eine Art Lieblingsabteilung gefunden. »Eine Art« deshalb, weil es nach wie vor sehr schwer fällt, sich einen eindeutigen Favoriten herauszupicken.

Martins Wahl fällt auf die Musikinstrumentenabteilung. Vielleicht vor allem deshalb, weil er eine solche Abteilung



Der angehende Ingenieur spielt Klavier. Aber auch die Orgel hat es ihm angetan

in einem Technikmuseum nicht erwartet hätte. Angesiedelt im ersten Stock, umgeben von den Ausstellungsbereichen Atomphysik, Elektronenmikroskopie und wissenschaftliche Chemie, bietet die Abteilung eine überraschende Abwechslung: ein Spinett aus dem 17. Jahrhundert nur einen Raum entfernt von hochpräzisen Gerätschaften; eine Vielzahl von handgefertigten Holzinstrumenten nicht weit von der Metall-dominierten Luftfahrt. Inmitten der vielen Technik, die vor allem nach Funktionalität, Wirtschaftlichkeit und Perfektion strebt, bietet die Instrumentenabteilung einen erfrischenden Kontrast. Die Instrumente hier wurden gebaut mit dem Ziel besonderer Ästhetik und schönen Klangs. Dass auch hierbei Technik eine gewisse Rolle spielt, schließt dann wieder den Bogen zum Technikmuseum. Genau das ist es, was für Martin die Besonderheit dieser Abteilung ausmacht.



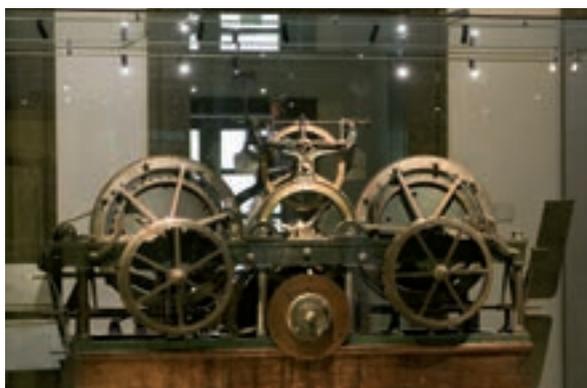
Mittendrin und hoch hinaus

Johannes Liebertseder

Mein Lieblingsort im Deutschen Museum?« Johannes fällt es nicht leicht, diese Frage zu beantworten. Das Museum bietet einfach zu viel: Von Ausflügen unter die Erde im Bergwerk bis hin zu gefühlten Weltraummissionen in der Raumfahrt, von riesigen Schiffen, die ganze Räume füllen, bis hin zu den kleinsten bekannten Teilchen in der Nanotechnologie – die Vielseitigkeit ist schlicht umwerfend und man verliert schnell den Überblick. Doch da fällt es ihm ein: »Mein Lieblingsort ist der Museumsturm! Von dort kann ich das ganze Museum überblicken.« In der Tat hat man vom Museumsturm einen exzellenten Ausblick auf das gesamte Gebäude. Er verdeutlicht nicht nur die beeindruckende Größe des Deutschen Museums, sondern gibt auch einen Eindruck von der außergewöhnlichen Lage auf einer Insel in der Isar mitten im Herzen Münchens. Doch der Turm ist mehr als nur eine Aussichtsplattform. Seine Fassade macht ihn durch die angebrachten Wettermessgeräte Barometer (Luftdruck), Thermometer (Temperatur), Hygrometer (Luftfeuchtigkeit) und Windmesser (Windgeschwindigkeit und -richtung) zu einem Wasserturm, wobei die Messungen größtenteils an der Turmspitze vorgenommen werden. Auch im Innern verbirgt sich Wissenswertes, denn mit dem Foucault'schen Pendel ist dort eines der berühmtesten Experimente der Physik nachgebaut, mit dem Mitte des 19. Jahrhunderts die Erdrotation anschaulich nachgewiesen wurde. Eine einmalige Kombination, meint Johannes und resümiert nochmals: »Der Museumsturm ist für mich etwas Besonderes. Ohne ihn würde dem Deutschen Museum etwas fehlen.«

Ein Herz für besondere Wünsche

Seit seiner Gründung hat der Freundes- und Förderkreis über 130 Projekte mit einem Gesamtvolumen im Millionenbereich unterstützt. Von der Anschaffung spezieller Vitrinen über den Erwerb wertvoller Objekte bis hin zu ganzen Sonderausstellungen – die Förderung umfasst die gesamte Museumsarbeit. Einige ausgewählte Projekte werden hier kurz vorgestellt. Von Laura Pöhler



Restaurierung Turmuhrwerk der Frauenkirche

127 Jahre lang, von 1842 bis 1969, taktete das Uhrwerk Johann Mannhardts vom Nordturm der Frauenkirche aus das Leben der Münchner. Die Restaurierung war dem Freundes- und Förderkreis ein besonderes Anliegen und eine Herausforderung für die Werkstätten des Deutschen Museums. Nach der Bergung aus schwindelerregender Höhe mittels Kran wurde das Uhrwerk in seine Einzelteile zerlegt, gereinigt und anschließend wieder zusammengesetzt. Nun ist dieses Meisterwerk, geschützt in einer Vitrine, samt interaktiver Konservierungsdokumentation für Interessierte im Foyer der Bibliothek des Deutschen Museums zu bewundern.

Sowjetischer Raumanzug Orlan-D

In der Raumfahrtabteilung des Deutschen Museums herrscht selbst an ruhigen Tagen vor einer Vitrine zuverlässiger Andrang. Der sowjetische Raumanzug Orlan-D beeindruckt vor allem jüngere Besucher besonders. Mit seinem goldbedampften Visier und seinem großen roten Hammer-und-Sichel-Abzeichen am Ärmel leuchtet das Exponat aus seiner Vitrine in die Dunkelheit der Ausstellung hinein. Der 74 Kilo schwere Orlan-D wurde für »Weltraumspaziergänge« gefertigt, also für Ausstiegsmanöver im freien Weltraum, und kam erstmals 1977 zum Einsatz. Er ist ein Vorläufer des heute auf der ISS verwendeten russischen Raumanzuges. Das mit den Mitteln des Freundeskreises angeschaffte Exponat füllte damals eine wichtige Lücke in der Ausstellung. Denn anders als sein Nachbar, der Raumanzug Sokol, besitzt er hinten ein aufklappbares Lebenserhaltungssystem. Auch der damit verbundene wassergekühlte Innenanzug konnte angeschafft werden und ist nun ebenfalls ausgestellt.



Nichts für Untrainierte: Der Raumanzug wiegt 74 Kilo.

Flugdemonstrator VFW-614

Wie funktioniert eigentlich die Steuerung eines Flugzeugs? Peter Hanickel aus der Flugwerft Schleißheim hat eine interaktive Demonstration für das Deutsche Museum gebaut, die genau dies dem Besucher nahebringen soll. Beim Flugdemonstrator in der Luftfahrtabteilung nimmt der Besucher auf einem Pilotensitz Platz und bedient Steuerhorn und Pedale. Die korrespondierenden Bewegungen werden ihm durch ein großes Flugzeugmodell vom Typ VFW-614 angezeigt. Durch die Übernahme der nicht unerheblichen Materialkosten hat der Freundeskreis damals die Realisierung ermöglicht. Auch nach sieben Jahren funktioniert die Demonstration noch problemlos und gehört zu den unverzichtbaren interaktiven Exponaten, die das Deutsche Museum zu bieten hat. Und zu den beliebtesten – der Pilotensitz ist meistens besetzt.

Einmal Pilot sein! Der Sitz am Flug-simulator ist meistens schon besetzt.



Miniziegel-Modellanlage

Die Miniziegel-Modellanlage ist das Highlight der Keramikausstellung im zweiten Obergeschoss des Sammlungsbaus. Zweimal am Tag wird dort unter staunenden Besucheraugen roter Ton realitätsgetreu in Form gepresst, geschnitten, getrocknet und schließlich gebrannt. Die Anlage ist nicht nur eine perfekte Miniaturnachbildung einer Ziegelei, die mit Originalbaustoffen funktioniert und alle Abläufe genau abbildet. Dank einer großzügigen Spende des Freundes- und Förderkreises konnte vor einigen Jahren die veraltete analoge Steuerung durch eine computergestützte ausgetauscht werden, die denen in modernen Ziegeleien entspricht. Seitdem bäckt die Anlage wieder einen der wichtigsten Baustoffe unserer Kultur. Das Schönste: Gegen eine kleine Spende kann man am Ende einen frisch gebrannten Miniziegel samt Museumslogo mit nach Hause nehmen. Auch wenn ein Miniziegel vielleicht noch kein Dach überm Kopf macht – nach einem Tag im Deutschen Museum hat man nicht nur jede Menge neues Wissen im Hirn, sondern auch eine Kleinigkeit in der Hand.

Die Ziegelei im Zwergenformat produziert Tonquader, die genauso aussehen wie ihre großen Vorbilder.

Mit Unterstützung des Freundeskreises wird die Anlage mittlerweile sogar per Computer gesteuert.



GEFÖRDERTE PUBLIKATIONEN



Wolf-Peter Fehlhammer (Hrsg.), 2002
Deutsches Museum: Geniale Erfindungen und Meisterwerke aus Naturwissenschaft und Technik.

Deutsches Museum. Geniale Erfindungen und Meisterwerke aus Naturwissenschaft und Technik

Der umfangreiche Jubiläumsband präsentiert in Bildern und Texten das Museum in all seinen Facetten: dem Reichtum seiner Sammlungen und Ausstellungen sowie der Vielfalt seiner Aktivitäten. Dieser »Prachtband«, wie er allgemein genannt wird, war nicht nur der erste Museumsführer dieser Güte und einer der ersten bewilligten Förderanträge des jungen Freundeskreises. Da der Verkaufserlös des beliebten Bandes zahlreiche weitere Publikationen ermöglichte, war dieses Projekt auch ein wichtiger Grundstein für die weitere Arbeit des Freundeskreises. Inzwischen vergriffen, ist er jederzeit in der Bibliothek des Museums einsehbar.



Elisabeth Vaupel und Stefan L. Wolff (Hrsg.), 2010
Das Deutsche Museum in der Zeit des Nationalsozialismus.

Das Deutsche Museum in der Zeit des Nationalsozialismus. Eine Bestandsaufnahme.

Auf mehr als 700 Seiten setzt sich dieses Werk mit dem – gerade in der ehemaligen »Hauptstadt der Bewegung« – von vielen immer noch als »heikel« empfundenen Thema *Das Deutsche Museum in der Zeit des Nationalsozialismus* auseinander. Der mit der Unterstützung des Freundeskreises ermöglichte Sammelband enthält 17 Aufsätze, die Mitarbeiter des Museums sowie externe Wissenschaftler verfasst haben. Bei seiner Lektüre wird deutlich, dass das bisher tradierte Selbstbild des Deutschen Museums, als »rein« technisch-wissenschaftliche Bildungseinrichtung und »unpolitische« Institution, grundlegend revidiert werden muss.

Unterstützen Sie den Freundeskreis des Deutschen Museums!

Jahresbeitrag:

- 500 Euro für persönliche Mitgliedschaften
- 250 Euro für Juniormitgliedschaften (bis 35 Jahre)
- 2500 Euro für Mitgliedschaften mittelständischer Unternehmen nach EU-Norm
- 5000 Euro für Mitgliedschaften großer Unternehmen

Kontakt:

Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum e. V.
Museumsinsel 1 · 80538 München

Ihre Ansprechpartnerin:

Claudine Koschmieder

Tel. 089/2179-314

Fax 089/2179-425

c.koschmieder@deutsches-museum.de



»Ich brauche den Geruch von Beton in der Nase«

Dieter Lang ist seit 2014 Generalbevollmächtigter Bau beim Deutschen Museum. Wir haben mit ihm darüber gesprochen, wie es mit der Generalsanierung weitergeht, warum die Zukunftsinitiative so eine komplexe Aufgabe ist – und weshalb er trotzdem so entspannt bleibt. Interview: Gerrit Faust



Dieter Lang hat viel zu tun und bleibt dennoch entspannt: Er kann sich auf ein gutes Team verlassen.

Faust: Woran arbeiten Sie gerade?

Lang: Wir bereiten zurzeit die Sanierung der Ufermauer des Museums vor – die Arbeiten sollen im Oktober beginnen. Außerdem arbeiten wir an einem neuen Leitsystem für Besucher und einer Informationskampagne zur Zukunftsinitiative – beides soll im Oktober funktionieren. Und schließlich haben wir die Kostenberechnung für die Zukunftsinitiative abgeschlossen –, und zwar mit einem äußerst positiven Ergebnis. Wir kommen genau mit dem Geld aus, das uns für die geplanten Maßnahmen zur Verfügung steht. Und das, obwohl man bei einem fast hundert Jahre alten Gebäude mit Bombenschäden, das in den Nachkriegsjahren nur sehr sparsam saniert wurde, vor Überraschungen nie ganz gefeit ist.

Bei den Untersuchungen hat sich zum Beispiel herausgestellt, dass die historischen statischen Nachweise zum Teil fehlerhaft waren – das heißt für uns, dass wir jetzt einen größeren Aufwand haben, um das Gebäude statisch zu ertüchtigen.

In der Presse war zu lesen, dass das Geld, das dem Museum zur Verfügung steht – 445 Millionen Euro – nur für die Sanierung des Gebäudes reicht. Auch von einer »Rumpfsanierung« war die Rede. Was ist da dran?

Von der baulichen Seiten her leisten wir uns keine Luxussanierung. Aber wir tun alles, um das Gebäude im Hinblick auf Brandschutz und Technik auf den neuesten Stand zu bringen. Und natürlich hat der Besucher auch etwas von den Bau-

Und? Hat es bisher Überraschungen gegeben?



Das komplette Programm des Deutschen Museums, des Deutschen Museum Verkehrszentrums, der Flugwerft Schleißheim und des Deutschen Museum Bonn vom 1. Oktober bis 31. Dezember finden Sie im aktuellen Quartalsprogramm, das Sie bei einem Besuch im Deutschen Museum kostenlos mitnehmen können.

Bitte beachten Sie auch die Terminübersicht, die diesem Magazin beiliegt.

Mitglieder sehen mehr

Exklusive Führungen – kostenlos für Sie

Als Mitglied des Deutschen Museums haben Sie viele Vorteile – jetzt kommen noch weitere hinzu. Ab Oktober veranstaltet das Deutsche Museum exklusive, kostenlose Führungen für Mitglieder – Experten führen Sie durchs Haus, vermitteln Ihnen Informationen über die Ausstellungen und die Geschichte unseres Hauses. Dabei möchten wir Ihnen auch die Gelegenheit geben, Blicke hinter die Kulissen des Museums zu werfen.

Führungen für Mitglieder 2015:

- 20. Oktober** »Willkommen im Anthropozän – Willkommen im Menschenzeitalter«. Ein Rundgang durch eine außergewöhnliche Sonderausstellung.
- 17. November** »Das Deutsche Museum und seine Geschichte«. Ein kleiner Rundgang durch das Haus auf der Museumsinsel.
- 15. Dezember** »Vom Einbaum bis zum U-Boot«. Ein Rundgang durch die Schifffahrt.

Anmeldung bitte 14 Tage im Voraus unter Angabe der Mitgliedsnummer an besucherservice@deutsches-museum.de. Treffpunkt für die Führungen ist die Eingangshalle des Deutschen Museums – bitte den Mitgliedsausweis mitbringen.

Museumsshop: 20 Prozent Rabatt nur für Mitglieder

Erledigen Sie Ihre Weihnachtseinkäufe doch einfach bei uns!

Sie suchen besondere Geschenke? Geschenke, die es anderswo nicht gibt – Geschenke für kreative Köpfe, für Technikbegeisterte, für Wissenschaftsfans, für Freunde des Museums – oder für sich selbst? Dann kommen Sie in einen unserer Shops. In allen Museumsshops gibt es am Freitag, 27. November, und Freitag, 4. Dezember, einen speziellen Verkaufstag für Mitglieder. Gegen Vorlage der Mitgliedskarte gibt es 20 Prozent Rabatt. Artikel, die einer Preisbindung unterliegen (wie Bücher und Globen), sind leider davon ausgenommen. Der Rabatt gilt in allen Shops des Deutschen Museums – auf der Museumsinsel, im Verkehrszentrum, in der Flugwerft, im Deutschen Museum Bonn und in den beiden Filialen im Münchner Zentrum (Rindermarkt 17) und am Münchner Flughafen (Terminal 2). Das Angebot gilt nicht im Online-Shop.

Newsletter für Mitglieder: Immer auf dem Laufenden

Alle aktuellen Informationen zum Museum per E-Mail

Möchten Sie über aktuelle Ausstellungen, Sonderführungen und andere Veranstaltungen im Deutschen Museum auf dem Laufenden sein? Möchten Sie die neuesten Informationen zur Zukunftsinitiative und zum Fortgang der Modernisierung des Deutschen Museums haben? Wollen Sie sich von den zukünftigen Dauerausstellungen des Museums schon heute ein Bild machen können? Gerne senden wir Ihnen unseren Newsletter per E-Mail zu. Schicken Sie einfach eine E-Mail mit dem Betreff »Newsletter« an mitgliederinfo@deutsches-museum.de – wir nehmen Sie dann in den Verteiler auf.

maßnahmen. Die ganze Infrastruktur wird verbessert – bis hin zu den Toilettenanlagen. Auch für die bessere Orientierung der Besucher wird einiges getan. Zudem sollte ein Museum, das derart wichtige technische Kulturgüter beherbergt, auch selbst auf dem neuesten technischen Stand sein. Und wir bringen eben nicht nur das Gebäude auf Vordermann, sondern modernisieren auch alle Ausstellungen. Rund 75 Millionen Euro fließen allein in die neuen Ausstellungen. Das ist die Maßnahme, die die Besucher am deutlichsten wahrnehmen werden. Der Charakter des Hauses wird dabei gewahrt. Eine Ikone wie das Bergwerk wird zwar technisch ertüchtigt, bleibt aber im Prinzip, wie sie ist.

Wahrscheinlich wäre es einfacher gewesen, wenn man das Gebäude für die Zeit der Arbeiten komplett geschlossen hätte?

Ja. Ein Gebäude bei laufendem Betrieb zu sanieren, ist ein bisschen so, als würde man einen Anzug in die Reinigung zu geben, während man ihn noch anhat.

Demnächst bringen wir den Anzug ja tatsächlich in die Reinigung: Ab Oktober werden die betroffenen Ausstellungen geräumt. Wann geht es richtig los mit den Bauarbeiten?

Erst im Herbst 2016. Zunächst werden wir rund neun Monate lang ausräumen, im Sommer 2016 beginnen wir mit den Vorarbeiten. Vorher wird allerdings ein Verbindungsgang zum Zentrum Neue Technologien und zum Sonderausstellungsbereich mit der Ausstellung »Willkommen im Anthropozän« geschaffen. Denn dieser Gebäudeteil wird später nicht mehr durch das Museumsgebäude zugänglich sein.

Werden die betroffenen Ausstellungsräume, die vor einer

Sanierung stehen, komplett leergemäht?

Es gibt bestimmte Dinge, die zu groß, zu schwer oder zu empfindlich sind, um sie aus dem Gebäude zu holen. Da gibt es Grenzen des Machbaren – zum Beispiel beim U-Boot oder bei den Schiffen Maria und Renzo. Diese Exponate bleiben im Gebäude und müssen natürlich vor den Bauarbeiten geschützt werden. Es kann auch ein Problem sein, Exponate nach einer Demontage später wieder in ihren Originalzustand zurückzusetzen. Deshalb wird die Demontage auch mit großer Sorgfalt dokumentiert und begleitet.

Was geschieht mit den Räumen, wenn sie komplett leer geräumt sind?

Die Räume werden im Wesentlichen auf den Rohbauzustand zurückgeführt. Zum Teil kommen auch die Glasdächer raus. Dann wird die komplette Haustechnik – also zum Beispiel Stromleitungen und Brandmeldeanlagen – erneuert. Zudem wird auch eine neue Belüftungsanlage eingebaut – die gibt es bisher nicht. Und die brauchen wir – sowohl aus konservatorischen als auch aus energetischen Gründen. Und schließlich werden auch die Wände gedämmt.

Und was passiert im Außenbereich?

Da ist der Hochwasserschutz ein wichtiger Punkt – und davon wird der Besucher auch etwas zu sehen bekommen. Große Maschinen mit 25 Meter langen Auslegern werden um das Gebäude platziert. Eine unterirdische Wand wird errichtet, um das Hochwasser abzuhalten. Wir machen das in Zusammenhang mit der Sanierung der Ufermauer. In diesem Rahmen werden wir leider auch etliche Bäume auf der Insel fällen müssen – was uns natürlich am meisten weh tut. Aber wir werden nach

Abschluss der Arbeiten neue Bäume pflanzen – und wir tun alles, um das ökologische Gleichgewicht auf der Insel nicht zu stören. Beim Artenschutz haben wir eine Biologin beauftragt, die uns auf diesem Weg begleitet.

Es sind ja auf der Insel auch eine ganze Reihe von Depots geräumt worden. Was passiert später mit den Räumen?

Kein Raum bleibt ungenutzt. Ein Teil wird für Ausstellungszwecke benötigt, zum Teil brauchen wir den Platz aber auch für die Infrastruktur und die Haustechnik. Oder für den Einbau der Treppenhäuser – und für einen unterirdischen Fluchttunnel für den Brandfall. Das ist ein massiv gebauter Ringtunnel, der die innenliegenden Treppenhäuser alle miteinander verbindet, und von dem aus man im Ernstfall ins Freie flüchten kann.

Je mehr ich über die geplante Sanierung und Erneuerung erfahre, desto öfter denke ich: Das ist aber eine gigantische Maßnahme, bei der es sehr viele Dinge zu bedenken gilt. Sie wirken aber immer so entspannt. Wie machen Sie das eigentlich?

Ich muss schon an sehr viele Dinge denken, aber ich kann mich auch auf mein Team verlassen – und das macht eine sehr gute Arbeit.

Und wenn es im nächsten Jahr dann richtig losgeht mit den Baumaßnahmen – freuen Sie sich darauf?

Mein Zugang zum Bauen ist ein ganz pragmatischer: Ich spüre, was ich tue, erst dann so richtig, wenn ich den Geruch von Beton in der Nase habe. Da muss dann manifest werden, was man über Jahre hinweg geplant hat. Das ist das Ergebnis, worauf man hinarbeitet. Und das ist das Schöne daran.

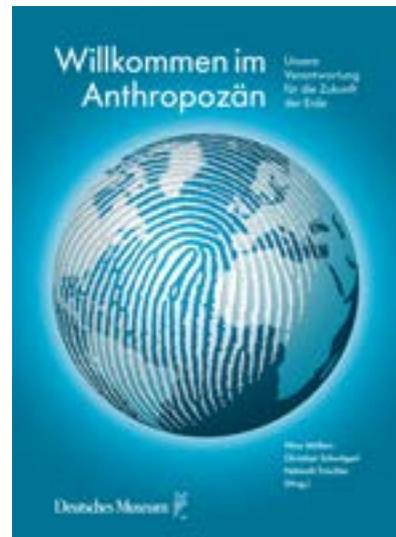
Deutsches Museum *Kerschensteiner Kolleg*

Familienwochenende für Mitglieder

Mit Kindern von 10 bis 14 Jahren

Fr/Sa/So 13. bis 15. November 2015

Rahmenprogramm zur Sonderausstellung



Willkommen im Menschenzeitalter! Ob Landwirtschaft, Handel, Verkehr oder Industrie: Seit es uns Menschen gibt, haben wir die Erde geprägt und verändert und hinterlassen auf ihr einen unverwechselbaren und oft unwiderrufflichen Fingerabdruck. Die Sonderausstellung erklärt den Begriff und das Konzept des Anthropozäns anhand ausgewählter Themen wie Natur, Urbanität, Evolution

oder dem Verhältnis Mensch-Maschine und bildet den Schwerpunkt unseres Mitgliederwochenendes. Natürlich werden wir Ihnen und Ihren Kindern diese Sonderausstellung kindgerecht vorstellen. Außerdem werden die Kinder die geologische Spur anhand von Gesteinsproben analysieren. Der Zusammenhang Mensch – Maschine wird bei einem interaktiven Rundgang durch verschiedene Ausstellungen des Hauses erlebbar. Es besteht auch die Möglichkeit, unser wieder eröffnetes Planetarium kennenzulernen. Das detaillierte Programm finden Sie auf unserer Homepage unter: www.deutsches-museum.de/information/fortbildung/weiterbildung/

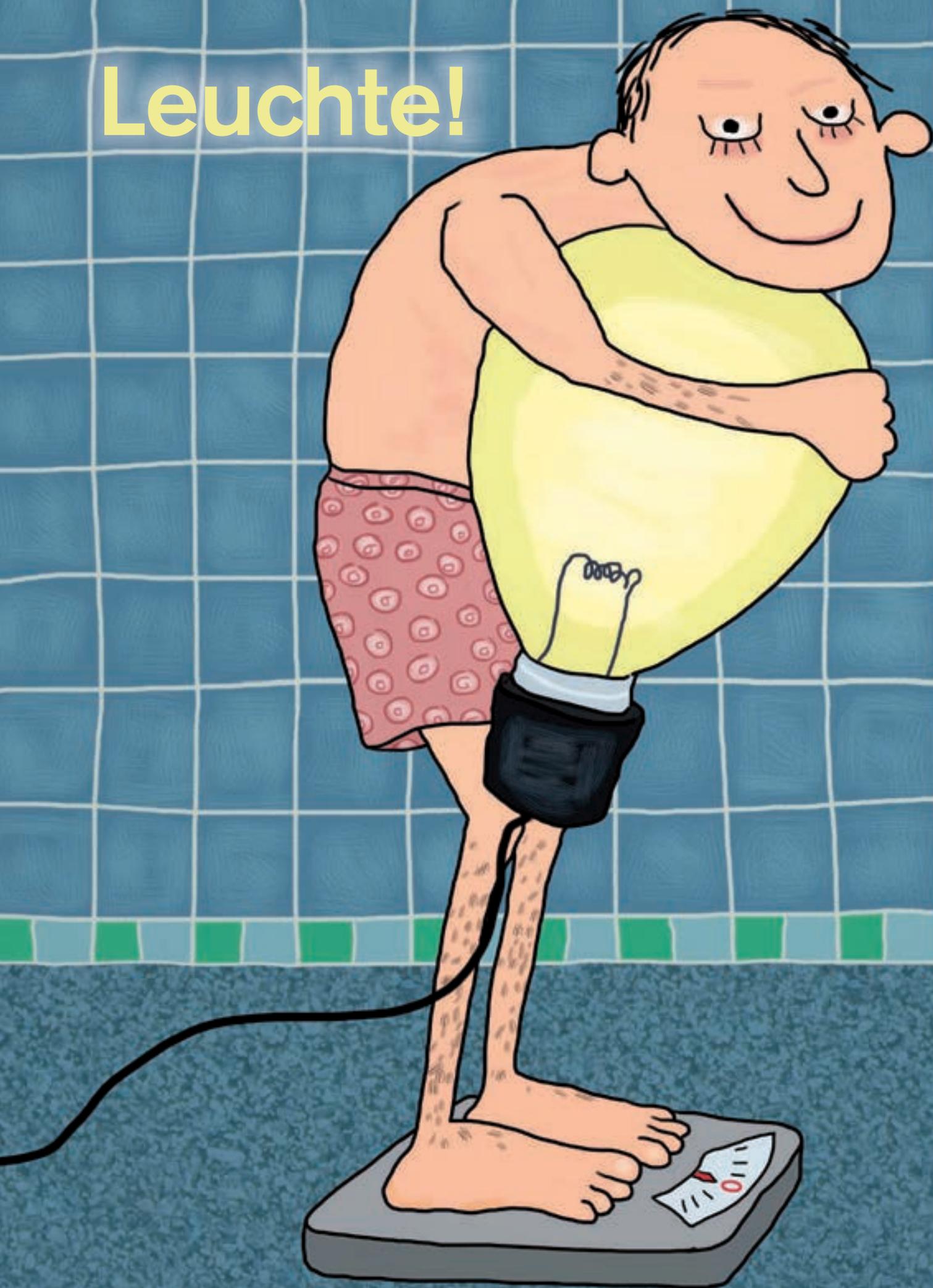
Zwei Übernachtungen mit Frühstück inkl. Seminargebühren und Museumseintritt: 105,- Euro im Familienzimmer, 85,- Euro für Kinder.

Sie wohnen im Kerschensteiner Kolleg, direkt im Deutschen Museum, im Zentrum Münchens. Die Zimmer (Etagenduschen und -WCs) sind modern eingerichtet und ruhig gelegen. Wir empfehlen die Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln.

Information und Anmeldung:

Nicole Kühnholz-Wilhelm
Kerschensteiner Kolleg, Deutsches Museum
Museumsinsel 1, 80538 München
Tel. 089 / 2179-523, Fax 089 / 2179-273
E-Mail: n.kuehnholz@deutsches-museum.de

Leuchte!



Heute geht es um ein etwas heikles Thema. Ich scheue mich, davon zu sprechen. Es ist mir zugegebenermaßen unangenehm. Mit einem Wort: Es geht um mein Gewicht. Es hat Zeiten gegeben, da wog ich so um die 65 Kilo und konnte essen, was das Zeug hielt. Dann kam eine andere Zeit. Das merkte ich daran, dass ich auf die Waage stieg und der Zeiger auf 75 Kilo stand. Ich dachte: »Holla! Das muss ein Fehler sein! Wahrscheinlich hat sich Onkel Otto draufgestellt und die Waage überlastet.« Ich kaufte eine neue, digitale Waage. Die zeigte 75,6 Kilo. Daran kann man sehen, dass Waagen in Wahrheit Uhren sind. Lebensuhren. Ich dachte: »Gut, du bist nicht mehr 30. Für dein Alter sind 75 Kilo eigentlich ganz okay.« Ich stellte mich seitlich vor den großen Spiegel und stellte beruhigt fest, dass ich, wenn ich die Luft anhielt, rein bauchtechnisch noch genauso aussah wie immer. Ich schob die neue Waage unter das Badezimmerregal und ließ die Waage Waage sein. Dann kam die Zeit, als ich feststellte, dass irgendwer ständig an den Hosengrößen drehte. Was früher 48 war, hieß erst 50 und dann 52. Ich habe heimlich die alte Waage unterm Regal hervorgezogen. Aber sie musste im Laufe der Zeit kaputtgegangen sein, denn 85,7 Kilo hatte ich noch nie gewogen. Wahrscheinlich hatte sich Fräulein Schröder draufgestellt und mit ihrem Leichtgewicht die Elektronik durcheinandergebracht. Das war mein erster Gedanke. Mein zweiter Gedanke vernichtete mich. Gewiss, ich war nicht mehr 40. Aber wenn das so weiterging, dann würde ich mit 90 Jahren so etwa 125 Kilo wiegen. Damit würde ich wahrscheinlich sogar in die Zeitung kommen. Fräulein Schröder sagte nur: »Weniger essen, mehr Bewegung!« Ich sagte: »Aber es gibt doch eine Diät, bei der man alles essen darf, und man nimmt trotzdem irgendwie ab.« »So etwas ist keine Diät«, sagte Fräulein Schröder streng, »so etwas ist eine Lüge«. Die folgenden Wochen waren die Hölle. Ich aß kaum noch Kekse, nahm nur noch einen Löffel Zucker in den Tee, trank am Abend nur noch ein Glas Wein. Schon glaubte ich, ein Kilo verloren zu haben. Aber am nächsten Tag war das Kilo wieder da. Einfach so. »Was du da machst«, sagte Fräulein Schröder, »das hat mit Verzicht nichts zu tun, noch nicht mal mit dem Anschein von Verzicht.« »Ich will ja auch gar nicht verzichten«, entgegnete ich gereizt, »ich will weniger wiegen!« Fräulein Schröder lächelte mitleidig. »Dann dachte ich: Wenn das mit dem weniger Essen nicht klappt – vielleicht geht es mit mehr Bewegung. Beim Schreiben legte ich jetzt in jeder Schreibpause meinen Stift von der rechten in die linke Hand und dann wieder zurück. Ich stellte meinen Bürostuhl etwas höher und konnte so während der Arbeit mit den Beinen kreisförmig baumeln. Und beim Zähneputzen machte ich zugleich Kniebeugen. Von dieser Doppelbewegung versprach ich mir besonders viel. Nach Wochen der anstrengendsten Übungen – einmal habe ich mir beim Zähneputzen in der Abwärtsbewegung das Kinn am Waschbeckenrand aufgeschlagen – traute ich mich wieder auf die Waage und wurde erneut auf das Bit-

terste enttäuscht. Fräulein Schröder reagierte nur sarkastisch: »Viel Masse bedeutet ja immerhin auch viel Energie. $E = mc^2$. Du weißt schon.« »Ha, ha«, sagte ich, »sehr witzig«, und hielt mir sozusagen den Bauch. Und doch lief mich ihre Bemerkung nicht mehr los. Wenn, wie diese Formel es sagte, Masse und Energie irgendwie äquivalent waren, überlegte ich, dann sollte ich vielleicht anstelle der Masse versuchen, die Energie zu reduzieren. Das würde sich dann direkt auf die Masse niederschlagen. Ich müsste mich nicht »mehr« bewegen, sondern im Gegenteil: Ich müsste mich viel weniger oder am besten gleich gar nicht mehr bewegen. Ein Mensch, der sich nicht mehr bewegt, das war doch klar, der braucht kaum noch Nahrung, der schrumpelt einfach von selber ein! Der wird leichter und leichter und schwebt am Ende wie eine Feder. Man musste es eben genau anders machen, als alle sagten! Nicht schneller werden, sondern langsamer! Nicht bewegen, sondern erstarren! Ein paar Tage fühlte ich mich als der Einstein der Diätwissenschaften. Ich dachte daran, das patentieren zu lassen und endlich reich zu werden. Ich überlegte mir einen Namen für die neue Diät, ein ganzes Marketingkonzept unter dem Label »DMF«. DMF, das stand für Don't move. Fly! – Bewege dich nicht. Fliege! Fräulein Schröder war von meiner neuen Strategie der Gewichtsreduzierung allerdings nicht so ganz überzeugt. Ich spürte das. Übergewichtig sein heißt ja nicht gefühllos sein! Nach drei Wochen DMF wurde sie sogar etwas unfreundlich. »Wenigstens zum Frühstück könntest du mal dein Bett verlassen!«, zischte sie mich an, nur weil ich sie gebeten hatte, mir noch eine weitere Portion Eier mit Speck zu bringen. Wir einigten uns dann darauf, dass ich das Frühstück, wie auch alle andere Mahlzeiten – das zweite Frühstück, das Mittagessen, den Nachmittagskuchen, das Abendessen und den Mitternachts-Snack – fortan auf dem Sofa einnehme, damit ich meine Liegeposition nur ganz kurz unterbrechen müsste. Ich sagte: »Du willst doch nicht den Erfolg meiner DMF-Diät gefährden. Schließlich ist das hier ein sehr wichtiger Pilotversuch, mit mir als einzigem und wichtigstem Referenzobjekt.« Nach vier Wochen stellte ich mich wieder auf die Waage und danach war das DMF-Projekt tot. Mausetot. Ich will das in Kilogramm lieber gar nicht erst ausdrücken. Die Masse zu reduzieren hatte nichts geholfen, die Energie zu reduzieren hatte erst recht nichts geholfen. Ja was blieb denn da noch?! Und so kam ich dann auch auf die einzig verbliebene, die einzig plausible, auf die allergenialste Lösung überhaupt. Wenn $E = mc^2$ war, dann war die Masse m ja gleich die Energie E durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c^2 , also in Kurzform: $M = E / c^2$. Wenn man nun den Wert für c erhöhte, dann musste M doch kleiner werden! Wir müssen also bloß die Lichtgeschwindigkeit erhöhen und die Gewichtsprobleme der Menschheit sind gelöst. Meine neue Diät, an deren praktischer Umsetzung noch etwas gearbeitet werden muss, heißt jetzt DMS – Don't move, shine! – Bewege dich nicht, leuchte! ■

Text:
Daniel Schnorbusch,
Illustration:
Jana Konschak



DER AUTOR

Dr. Daniel Schnorbusch, geboren 1961 in Bremen, aufgewachsen in Hamburg, Studium der Germanistischen und Theoretischen Linguistik, Literaturwissenschaft und Philosophie in München, ebendort aus familiären Gründen und nicht mal ungern hängengeblieben, arbeitet als Lehrer, Dozent und freier Autor.



Als skurrile Sonderlinge der Gesellschaft porträtierte der Münchner Maler Carl Spitzweg um 1860 den Astrologen (links) ebenso wie den Alchemisten (unten).

Der andere Blick

René Descartes' *Discours de la méthode* von 1637 gilt als ein Startpunkt modernen, naturwissenschaftlich orientierten Erkenntnistrebens. Allerdings dauerte es geraume Zeit, bis sich Descartes' Forderung nach einer rational begründbaren und experimentell nachweisbaren Wissenschaft durchsetzen konnte. Bis ins 19. Jahrhundert beherrschten naturmagische Denkweisen den Blick auf die Welt. Andererseits ist moderne Wissenschaft nicht denkbar, ohne die Vorarbeiten der »Naturmagier«. Wie konnte sich Naturwissenschaft aus mythischen Vorstellungen entwickeln? Warum haben so viele Menschen auch heute ein Bedürfnis nach nichtwissenschaftlichen Welterklärungen? Was erwarteten sich gebildete Menschen von spiritistischen Sitzungen im 19. und beginnenden 20. Jahrhundert? Webt moderne Wissenschaft womöglich ihre eigenen magischen Mythenetze? Begleiten Sie unsere Autorinnen und Autoren auf ihrem Weg zu Vorläufern und Irrtümern der Naturforschung.



»Der Alchemist« von Carl Spitzweg.

Impressum

Das Magazin aus dem Deutschen Museum

39. Jahrgang

Herausgeber: Deutsches Museum München
Museumsinsel 1
80538 München
Postfach 80306 München
Telefon (089) 21 79-1
www.deutsches-museum.de

Gesamtleitung: Rolf Gutmann (Deutsches Museum),
Dr. Stefan Bollmann (Verlag C.H.Beck, verantwortlich)

Beratung: Dr. Christian Sicka

Redaktionsleitung: Sabrina Landes, Agentur publishNET
Hoferstr. 1, 81737 München, redaktion@publishnet.org;
Laura Pöhler (Redaktion), Birgit Schwintek (Grafik), Inge
Kraus (Bild), Barbel Bruckmoser (Produktion), Andrea
Bistrich, Manfred Grögler (Korrektorat)

Verlag: Verlag C.H.Beck oHG, Wilhelmstraße 9, 80801
München; Postfach 400340, 80703 München, Telefon (089)
3 81 89-0, Telefax (089) 3 81 89-398, www.beck.de

Redaktioneller Beirat: Dr. Frank Dittmann (Kurator Energie-
technik, Starkstromtechnik, Automation), Gerrit Faust
(Leiter Presse- und Öffentlichkeitsarbeit), Dr. Johannes-
Geert Hagmann (Kurator Physik, Geodäsie, Geophysik),
Prof. Dr. Elisabeth Vaupel (Forschungsinstitut)

Herstellung: Bettina Seng, Verlag C.H.Beck

Anzeigen: Bertram Götz (verantwortlich), Verlag C.H.BECK
oHG, Anzeigenabteilung, Wilhelmstr. 9, 80801 München;
Postfach 400340, 80703 München; Bärbel Schott, Telefon
(089) 3 81 89-606, Telefax (089) 3 81 89-599. Zurzeit gilt
Anzeigenpreisliste Nr. 31, Anzeigenschluss: sechs Wochen
vor Erscheinen.

Repro: Rehbrand, Rehms & Brandl Medientechnik
GmbH, Friedenstraße 18, 81671 München

Druck und Bindung: Memminger MedienCentrum,
Fraunhoferstraße 19, 87700 Memmingen

Versand: Kessler Druck+Medien GmbH & Co. KG, Michael-
Schäffer-Straße 1, 86399 Bobingen

Bezugspreis 2015: Jährlich 26,- Euro
Einzelheft 7,80 Euro, jeweils zuzüglich Versandkosten

Für Mitglieder des Deutschen Museums ist der Preis für
den Bezug der Zeitschrift im Mitgliedsbeitrag enthalten
(Erwachsene 52,- Euro, Schüler und Studenten 32,- Euro).
Erwerb der Mitgliedschaft: schriftlich beim Deutschen Mu-
seum, 80306 München.

Für Mitglieder der Georg-Agricola-Gesellschaft zur För-
derung der Geschichte der Naturwissenschaften und der
Technik e.V. ist der Preis für den Bezug der Zeitschrift im
Mitgliedsbeitrag enthalten. Weitere Informationen: Georg-
Agricola-Gesellschaft, Institut für Wissenschafts- und Tech-
nikgeschichte, TU Bergakademie Freiberg, 09596 Freiberg,
Telefon (03731) 393406

Bestellungen von Kultur & Technik über jede Buchhand-
lung und beim Verlag. Abbestellungen mindestens sechs
Wochen vor Jahresende beim Verlag.

Abo-Service: Telefon (089) 3 81 89-679

Die Zeitschrift erscheint vierteljährlich. Sie und alle in
ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheber-
rechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der
Zustimmung des Verlags. Der Verlag haftet nicht für
unverlangt eingesandte Beiträge und Bilddokumente.
Die Redaktion behält sich vor, eingereichte Manuskrip-
te zu prüfen und gegebenenfalls abzulehnen. Ein Recht
auf Abdruck besteht nicht. Namentlich gekennzeichnete
Beiträge geben nicht die Meinung der Redaktion
wieder.

ISSN 0344-5690