



## Schwerkraft – oder warum fällt der Stein?



Wenn Sie dieses Quarks & Co Script in Ihrer Hand loslassen, fällt es zu Boden: Schwerkraft zieht das Heft in Richtung Erdmittelpunkt – es ist die gleiche unsichtbare Kraft, die uns fest auf der Erde und unsere Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne hält.

Ohne Schwerkraft würde unsere gesamte Galaxie nicht existieren: Erst durch die Gravitation sind aus Gas und kosmischen Staubteilchen Sterne und Planeten entstanden.

Hier auf der Erde hat Isaac Newton das Gravitationsgesetz schon Mitte des 17. Jahrhunderts entdeckt. Doch Wissenschaftler haben noch lange nicht alle Rätsel um die Schwerkraft gelöst: Wie entstehen schwarze Löcher, die alles anziehen und verschlucken, was in ihre Nähe kommt? Und warum erfahren alle Sonden, die ins All geschossen werden, eine merkwürdige Abbremsung?

Machen Sie sich mit diesem Script auf die Spur der geheimnisvollen Gravitationskraft – und erfahren Sie, welche Bedeutung sie für unseren Körper hat. Denn in der Schwerelosigkeit haben Astronauten mit Schlafstörungen, Gleichgewichtsproblemen, Muskel- und Knochenschwund zu kämpfen.

Und so lästig es auch ist, sich nach einem heruntergefallenen Gegenstand wie diesem Heft zu bücken: Die Besatzung einer Raumstation würde Sie darum auf Dauer beneiden.



Weitergehende Informationen zu diesem Thema, sowie Link- und Lesetipps, finden Sie auf unserer Homepage unter:

[www.quarks.de](http://www.quarks.de)

## Schwerkraft – oder warum fällt der Stein?

### Inhalt

S. 4	Leben in der Schwerelosigkeit
S. 11	Im freien Fall
S. 12	Der Mond ist weg!
S. 14	Ebbe und Flut
S. 17	Wussten Sie schon?
S. 19	Abnehmen am Äquator?
S. 20	Eine Reise durch den Mittelpunkt der Erde
S. 21	Die Entstehung unseres Sonnensystems
S. 24	Wie entsteht ein schwarzes Loch?
S. 26	Die Pioneer-Anomalie Eine Sonde ist nicht mehr auf Kurs

### Impressum

**Text:** Axel Bach, Reinhart Brüning, Heinz Greuling, Christina Müller, Daniel Münter, Corinna Sachs, Christoph Schmidt, Michael Tekath, Silvio Wenzel

**Redaktion und**

**Koordination:** Wolfgang Lemme

**Copyright:** WDR, Januar 2006

**Gestaltung:** Designbureau Kremer & Mahler, Köln

Dieses Script entstand in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Wissenschaftsjournalismus Dortmund

### Bildnachweise

alle Abbildungen WDR außer:

S. 21	Neue Sterne / Protoplanetarische Scheibe; Rechte: NASA
S. 21	Neue Sterne / Adlernebel; Rechte: NASA
S. 26	Neue Sterne / Pioneer 10; Rechte: NASA

## Leben in der Schwerelosigkeit

Eine Reise ins All, das ist der Traum vieler Menschen, und die Vorstellung, schweben zu können, hört sich wirklich erst einmal toll an. Doch die Realität sieht anders aus. Auf der Internationalen Raumstation ISS leben seit 1998 ununterbrochen Menschen in der Schwerelosigkeit, 400 Kilometer über der Erde. Wie es ihnen wirklich geht, erfährt man bei all der Weltraumfaszination aber recht selten: Die Astronauten starten topfit zu ihrer Mission und kommen körperlich degeneriert, ausgezehrt und regelrecht gealtert zurück. Denn der Mensch ist hervorragend an die Belastung der Schwerkraft angepasst. Wenn die Erdanziehung fehlt, beginnen die Menschen, unter vielen verschiedenen körperlichen Symptomen zu leiden.



Möglicher Ursprung für die Weltraumkrankheit: Augen und Innenohr senden widersprüchliche Signale an das Gehirn

### Dauernde Übelkeit – und Vakuamtüten für den Notfall

Viele Astronauten auf der ISS leiden unter der so genannten Weltraumkrankheit. Das bedeutet, ihnen ist die ganze Zeit schwindelig und übel. Die Ursache ist noch nicht genau erforscht. Man vermutet, dass der Ursprung dieser Übelkeit widersprüchliche Signale von Augen und Innenohr sind, die an das Gehirn geleitet werden. Denn normalerweise empfängt das Gleichgewichtsorgan des Menschen, das in den Ohren sitzt, Signale durch die Schwerkraft. Der menschliche Körper weiß immer, wo oben und unten ist, oder ob er sich in Schräglage oder in der Waagerechten befindet. In der Schwerelosigkeit ist das anders: Das Gleichgewichtsorgan, der so genannte Vestibularapparat, sendet dann keine Signale an das Gehirn. Ein Oben und Unten, das der Körper unter der Schwerkraft spürt, gibt es ja nicht mehr, der Astronaut kann sich in jede räumliche Richtung bewegen.

Auf der russischen Raumstation MIR haben die Konstrukteure versucht, ein Gefühl von „Boden“ zu schaffen, indem eine Fläche grau gestrichen wurde. Doch das half nicht, die Symptome der Weltraumkrankheit blieben. 30 Prozent der Astronauten müssen sich sogar übergeben.

Auch das birgt in der Schwerelosigkeit besondere Probleme. Schließlich fliegen alle Teilchen schwerelos durch den Raum, also würde auch Erbrochenes durch die Kabine schweben. Daher gibt es für diesen Fall Vakuumsäcke, die das Malheur sicher aufsaugen.

### Das „Puffy-Face-Syndrom“: wenn das Blut zu Kopf steigt

Alle Astronauten haben in der Schwerelosigkeit ein aufgedunsenes Gesicht, auf Englisch „puffy face“ genannt. Es entsteht, weil durch die fehlende Schwerkraft bis zu 1 Liter Flüssigkeit aus den Beinen und dem Unterkörper in den Oberkörper fließen. Das passiert schon in den ersten Sekunden nach Eintritt in den schwerelosen Raum. Denn der Kreislauf des Menschen ist auf die Bedingungen der Erde eingestellt, er pumpt das Blut gegen die Schwerkraft immer nach oben Richtung Herz. Ohne Schwerkraft zieht nichts mehr die Flüssigkeit nach unten! Dem Astronauten steigt das Blut also dauerhaft zu Kopf, die Auswirkungen sind heftig: die Mimik verändert sich, der Halsumfang nimmt um bis zu zwei Zentimeter zu. In den Anfangszeiten der Raumfahrt bekamen die Astronauten regelmäßig Probleme mit ihren maßgeschneiderten Raumanzügen: innerhalb von Sekunden wurden sie an Schultern und Hals zu eng.



In der Schwerelosigkeit steigt dem Astronauten das Blut dauerhaft in den Kopf

### Storchenbeine und kalte Füße

Im All leiden alle Astronauten an den so genannten „Storchenbeinen“. Wie beim Phänomen des „Puffy-Face“ erklärt, pumpt der Kreislauf immer weiter Blut Richtung Herz. Unter den Bedingungen der Schwerkraft würde es auch wieder nach unten fließen, und die Venenklappen sorgen dafür, dass es nicht in den Beinen versackt. Doch im All fließt kein Blut mehr nach unten, weil es kein „unten“ mehr gibt. So wird Flüssigkeit aus den Beinen in den Oberkörper verschoben. Dieser Effekt lässt die Beine zwei bis drei Zentimeter dünner werden. Aber das sieht allenfalls lustig aus – für die Astronauten hat es ganz praktische und unangenehme Folgen: Sie leiden an kalten Füßen, selbst wenn es auf der ISS immer angenehme 25 °C warm ist.



Ohne Schwerkraft wird Flüssigkeit aus den Beinen in den Oberkörper verschoben

## Die Lust am Essen geht verloren



Fast jeder zweite Astronaut klagt über Schlaflosigkeit

Essen im Weltraum wirkt spaßig – ist es aber nicht. Durch die Luft wirbelnde Essensreste darf es natürlich nicht geben, daher kommt die meiste Nahrung aus Plastiktüten. Und obwohl die Gerichte von jedem Astronauten vorher persönlich ausgesucht und bei einem Testessen probiert werden, schmecken sie im All meistens nicht. 40 Prozent der Astronauten klagen über Appetitlosigkeit. Die Gründe dafür sind vermutlich vielfältig: gefriergetrocknet, vakuumverpackt, eingeschweißt, mit heißem Wasser wieder aufgeweicht – so schmecken auch die köstlichsten Delikatessen nicht besonders. Doch es muss noch weitere Gründe geben: Schon zu Beginn der Raumfahrt stellten Forscher fest, dass die Astronauten im All salzigere Mahlzeiten bevorzugen und einen anderen Geschmack entwickeln. Man vermutet, dass die Geschmackspapillen im Mund durch die Flüssigkeitsverschiebungen beeinflusst werden. Zusätzlich klagen viele Astronauten über geschwollene Schleimhäute, was ähnliche Folgen hat wie ein Schnupfen: Man riecht nichts mehr, und deshalb geht auch der Geschmack verloren. Aber für den eingeschränkten Geruchssinn sind die Astronauten vermutlich eher dankbar. Denn auf der ISS kann man nicht lüften – und daher riecht es dort genau so, wie man es sich vorstellt, wenn über 7 Jahre nicht gelüftet wird.

## Prickelwasser ist verboten

Im schwerelosen Raum darf man übrigens auch keine kohlenensäurehaltigen Getränke zu sich nehmen. Denn auch auf Gase in Flüssigkeiten wirkt auf der Erde die Schwerkraft: Da sie leichter sind als Luft, steigen sie nach oben, und durch ein mehr oder weniger diskretes Aufstoßen ist man sie los. Aber im Weltraum wissen die Gase nicht wohin – und verursachen einen Blähbauch. Nur wenn sie mit dem Speisebrei in den Darm gelangen, werden sie durch die Darmbewegungen nach draußen befördert. Übrigens scheiden die Astronauten im All ungefähr anderthalb bis zwei Liter mehr Flüssigkeit aus als auf der Erde. Um dies zu kompensieren, müssen alle Astronauten direkt vor dem Rückflug mindestens anderthalb Liter trinken. Trotzdem haben alle Astronauten bei der Rückkehr auf die Erde Probleme mit dem Kreislauf. Und können meistens noch nicht einmal mehr aufrecht stehen.

## Auf dem Klo wird abgesaugt

Die menschliche Verdauung funktioniert auch ohne Schwerkraft – die Darm-Peristaltik leitet den Speisebrei in die richtige Richtung. Doch der tägliche Gang aufs Klo ist im Weltraum nicht ohne Probleme. Schließlich müssen sämtliche Ausscheidungen eingefangen werden, damit sie nicht für immer schwerelos durch die ISS fliegen. Um dieses Problem zu lösen, ist das Klo an eine Saugvorrichtung angeschlossen – ganz ähnlich wie ein Staubsauger auf der Erde. Der Astronaut klinkt seine Füße ein, um sich über dem Klo zu verankern. Dann drückt er auf einen Knopf um den „Klo-Sauger“ einzuschalten. Damit nichts in den freien Raum entweht, muss der Astronaut versuchen, die Klobrille möglichst ganz abzuschließen, also sie mit seinem Hinterteil möglichst vollständig zu bedecken. Die Ergebnisse werden dann gefriergetrocknet, damit sie wenig Platz wegnehmen, und später auf der Erde entsorgt. Für das kleine Geschäft hat jeder Astronaut seinen persönlichen Trichter, auch der Urin wird gefriergetrocknet. Die kleinen gelben Urinkristalle werden später auf der Erde entsorgt.



Auch der Gang aufs Klo ist nicht ohne Probleme

## Die Muskeln schwinden

Schwerelosigkeit bedeutet auch, dass Muskeln und Knochen nicht beansprucht werden. Pro Tag sind daher mindestens 2 Stunden Sport Pflicht, damit der Körper halbwegs in Schuss bleibt. Doch trotz intensiven Trainings beginnt nach ca. 2 Wochen für jeden Astronauten der Abbau der Muskelmasse. Besonders stark ist der Rückgang an den Beinen, der Hüfte und am Rücken. Denn hier wirkt die Schwerkraft auf der Erde am stärksten. Die Muskeln, die uns im täglichen Leben aufrecht halten, sind im Weltraum völlig überflüssig und bilden sich zurück. Das trifft gerade die kleinen Muskelgruppen, etwa zwischen den Rippen. Die so genannten tonischen Muskeln, die man kaum spürt und auch nicht sehen kann, sorgen auf der Erde selbst im Liegen für eine gewisse Spannung und Haltung. Das entfällt im All völlig!

Übrigens ist auch das Training auf der ISS besonders: Gewicht heben ist völlig unmöglich – schließlich wiegt selbst das schwerste Gewicht nichts! Und um auf der ISS zu joggen, müssen sich die Astronauten festschnallen, damit sie überhaupt einen Widerstand gegen den Boden aufbauen können. Zurück auf der Erde dauert es mehrere Wochen, bis die Astronauten ihre Muskelmasse mit intensivem Training wieder normalisiert haben.

## Mürbe Knochen im All

Der Knochenabbau beginnt schon nach wenigen Wochen im Weltraum. Vor allem die großen Röhrenknochen, wie in den Oberschenkeln, werden abgebaut. Auf der Erde ist der Knochen einem ständigen Umbau-Prozess unterworfen: Je nach Belastung wird der Knochen angepasst – verschiedene Zellen haben die Aufgabe, ständig Knochenmasse auf- und wieder abzubauen. Doch um den Bauprozess in Schwung zu halten, braucht der Knochen Reize durch den Zug von Muskeln und Sehnen und durch das eigene Körpergewicht. Speziell dieser Reiz durch das Gewicht fehlt im All, daher läuft der Knochenumbau vor allem in eine Richtung: Abbau! Nach 6 Monaten auf der ISS büßen die Astronauten ungefähr 10 Prozent ihrer Knochendichte ein.

Inzwischen wissen Raumfahrt-Mediziner, dass dieser Rückgang nie mehr ganz aufgeholt werden kann. Das bedeutet für die Astronauten: Selbst mit intensivem Training bleibt die Knochendichte geringer als vor ihrem Aufenthalt im Weltraum!

### Fast alle haben Rückenschmerzen



40 Prozent aller Astronauten haben Rückenschmerzen

Im All wachsen die Astronauten mindestens um zwei Zentimeter. Auch das liegt an der fehlenden Schwerkraft: Die Wirbelsäule verlängert sich, da die Bandscheiben aufquellen. Auf der Erde passiert das nachts im Schlaf. Im Laufe des Tages wird die Bandscheibe dann durch den aufrechten Gang wieder ein wenig zusammengedrückt. Doch ohne Schwerkraft bleibt der gallerthaltige Kern der Bandscheibe aufgequollen. Das klingt eigentlich so, als ob sich wenigstens der Rücken im All so richtig entspannen könnte. Aber dem ist nicht so! 90 Prozent der Astronauten klagen über Rückenschmerzen. Anscheinend drücken vor allem an der Lendenwirbelsäule die Wirbel durch die ungewohnte Haltung auf die Nerven.

### Die Orientierung leidet

Nicht nur der Gleichgewichtssinn ist bei vielen Astronauten gestört. Die Schwerkraft wirkt besonders auf unseren räumlichen Orientierungssinn. Häufig verlieren die Astronauten selbst im begrenzten Raum der ISS die Orientierung. Denn die Gänge haben vier Seiten – dafür fehlen Decke und Boden. Immer wieder berich-

ten Astronauten, dass sie selbst nach Wochen und Monaten immer wieder neue Ecken in der ISS entdeckten: Jede Abzweigung sieht je nach Perspektive immer wieder anders aus.

### Ein gutes Buch lesen? Von wegen!

Schon vor Jahren bemerkten Astronauten, dass sie im All Probleme hatten, längere Texte wie Gebrauchsanweisungen oder Versuchsanleitungen zu lesen. Und das ging eindeutig über die Probleme hinaus, die jeder Normalsterbliche mit Gebrauchsanleitungen hat. Es schien so, als müssten sich Astronauten intensiver konzentrieren, wenn sie einen bestimmten Punkt fixieren wollen. Daher entwickelte eine Forschergruppe von der Charité Berlin einen besonderen Test für die Augen, mit dem man die Abweichbewegung der Augen im All messen kann. Es stellte sich heraus, dass die Augen eng mit dem Gleichgewichtssinn kooperieren. Anscheinend benötigen sie das Signal des Gleichgewichtsorgans als Referenz. Der Wegfall der Schwerkraft beeinflusst also nicht nur den Gleichgewichtssinn, sondern auch die Steuerung der Augen.

### Körperhygiene unter erschwerten Bedingungen

Normale tägliche Verrichtungen wie Händewaschen, Zähneputzen, Rasieren und Haarschneiden sind auf der ISS keineswegs selbstverständlich. Würde man sich wie auf der Erde duschen, flögen die Wassertropfen schwerelos in der ISS herum – bei so viel lebenswichtiger Elektronik unmöglich. Daher wird gar nicht geduscht. Waschen geht nur mit Seife und sehr wenig Wasser in einem feuchten Tuch. Beim Zähneputzen wird nicht ausgespuckt, stattdessen nimmt ein feuchtes Tuch die aufgeschäumte Zahnpasta auf. Und beim Rasieren oder Haarschneiden werden die losen Haare gleichzeitig mit einem Staubsauger aufgesaugt. Denn sonst würden die Haare für immer durch die Raumstation fliegen.

### Beim Rückflug drohen Schwindel und Ohnmacht

Irgendwann darf jeder Astronaut auf die Erde zurück. Erst dann machen sich die Langzeit-Effekte der Schwerelosigkeit bemerkbar. Muskel- und Knochenmasse fehlt, und das nicht nur an Armen und Beinen. Auch das Herz ist ein Muskel, der ohne die Belastung der Schwerkraft erlahmt. Da kommen zwei Effekte zusammen: Denn der Astronaut scheidet in den ersten Tagen im All etwa zwei Liter



Bei der Rückkehr zur Erde wird es wieder unangenehm

mehr Flüssigkeit aus. Das heißt, das Herz muss weniger Flüssigkeit transportieren. Gleichzeitig muss es aber nicht gegen den Zug der Schwerkraft arbeiten, braucht also weniger Pumpleistung. Daran gewöhnt sich das Herz – und schrumpft. Zurück auf der Erde ist das für den Astronauten deutlich spürbar: Schon beim Rückflug sacken ihm anderthalb Liter Flüssigkeit aus Kopf und Oberkörper zurück in die Beine, sobald die Erdanziehung wieder wirkt. Diese Flüssigkeit fehlt im Gehirn, das Resultat können Schwindel und Ohnmacht sein.

### Fazit: Leiden für die Wissenschaft

Ein erholsamer Urlaub ist so ein Ausflug ins All also ganz bestimmt nicht. Wir sind Geschöpfe der Schwerkraft und jede Zelle, jeder Muskel und jede Vene unseres Körpers ist dafür gebaut, gegen diese Kraft anzukämpfen. Wer sich in die Schwerelosigkeit begibt, muss also damit rechnen, dass der Körper durcheinander kommt. Dabei sind die Strapazen der Astronauten für Wissenschaftler geradezu ein Geschenk. Wenn sich Muskeln und Knochen bei den Astronauten wie im Zeitraffer abbauen, können die Mediziner Effekte beobachten, wie sie sonst nur nach langer Bettruhe zustande kommen. Das ermöglicht viele Erkenntnisse, die sich in der Medizin, zum Beispiel bei der Pflege bettlägeriger Menschen oder bei Osteoporosepatienten, nutzen lassen.

## Im freien Fall

### Von Fallschirmspringern, Stahlkugeln und Vogelfedern

Jeder weiß, dass eine Vogelfeder langsam zur Erde schwebt, wenn man sie loslässt, während eine Stahlkugel schnell zu Boden saust. Im Physikunterricht haben viele jedoch gelernt: „Alles fällt gleich schnell herunter.“ Was stimmt nun?

Die Erfahrung aus dem Alltag scheint den wissenschaftlichen Lehrsätzen zu widersprechen. Wie kommen aber die Physiker darauf, dass alle Dinge auf der Erde gleich schnell herunterfallen? Diese Erkenntnis hatte zuerst Galileo Galilei, der 1590 den freien Fall beschrieben hat. Jedoch konnte erst der englische Naturforscher Robert Boyle 69 Jahre später zeigen, dass dies tatsächlich stimmt – und zwar im Vakuum.

### Ohne Luft geht's schneller runter

Die Luft ist es also, die den freien Fall bremst – bei der leichten Feder mehr als bei der massiven Kugel. Wenn die Luft fehlt, gilt tatsächlich, dass alle Körper gleich schnell fallen. Und die Geschwindigkeit, mit der sie das tun, ist auch bekannt: Mit dem Wert für die so genannte Fallbeschleunigung kann man sie berechnen. Sie beträgt im Vakuum auf der Erde grob 9,81 Meter pro Sekunde im Quadrat. Das bedeutet, dass jeder fallende Körper im Vakuum nach einer Sekunde eine Geschwindigkeit von 9,81 Meter pro Sekunde (etwa 35,3 km/h) hat, nach zwei Sekunden sind es bereits 19,62 Meter pro Sekunde (knapp 71 km/h) und nach zehn Sekunden sind es schon über 350 km/h.

Da beim Fallen auf der Erde üblicherweise kein Vakuum herrscht, hängt die tatsächlich erreichte Geschwindigkeit in der Praxis vom Luftwiderstand ab. Ein Fallschirmspringer zum Beispiel wird in den ersten zwei Sekunden beinahe so schnell wie die Kugel im Vakuum. Dann bremst ihn jedoch die Luft aus. Und nach etwa sieben Sekunden hat ein ausgestreckt fliegender Fallschirmspringer seine maximale Geschwindigkeit erreicht: knapp 200 km/h, schneller wird er nicht.



# Der Mond ist weg!

## „Papa, wie wäre es, wenn es den Mond nicht gäbe?“

Eine Kinderfrage, die es in sich hat: Wie sähe die Erde ohne Mond aus? Jedes Kind weiß, dass der Mond für Ebbe und Flut verantwortlich ist. Doch kaum jemand kennt die ganze Geschichte: Vor viereinhalb Milliarden Jahren gab es noch kein Leben auf der Erde. Aber Ozeane, und in ihnen sollte das Leben entstehen. Wichtig dafür waren Mineralstoffe, die es zuerst aber nur an Land gab. Ins Meer gelangten sie durch Ebbe und Flut. Dazu mussten die Stoffe dort aber auch noch verteilt werden – und bis heute arbeiten Ebbe und Flut wie große Rührlöffel, die die Meere durchmischen. Der Mond spielte also eine wichtige Rolle bei der Entstehung des Lebens, ohne ihn hätte alles viel länger gedauert. Dann gäbe es heute noch längst keine Menschen, höchstens Pflanzen.

## Der Mond als Klimaregulator

Wie es ohne Mond aber genau wäre mit den Pflanzen, hängt vom Klima ab. Das wiederum wird stark von der Rotation der Erde beeinflusst – und die ist auf den Mond angewiesen! Denn die Achse, um die sich die Erde dreht, bleibt immer in derselben Neigung von etwa 23 Grad – das ist die Wirkung des Mondes. Denn durch seine Masse wirkt Schwerkraft auf die Erde ein, so dass sie immer in derselben Position bleibt.

Wie es aber mit dem Gleichgewicht der Erde ohne Mond aussähe, hat der französische Astronom Jacques Laskar berechnet: dann würde die Erdachse im Laufe von einigen Jahrhunderten ihre Richtung verändern und sozusagen hin- und hertrudeln. Dadurch gäbe es furchtbare Stürme, und dazu extreme Temperaturunterschiede. Der Mond ist also so etwas wie ein Klimaregulator für die Erde. Bäume und Pflanzen, wie wir sie kennen, hätten ohne den Mond keine Überlebenschance, sie würden durch den Wind zerfetzt. Auch für Menschen wäre eine solche Umwelt nicht geeignet. In unserem Sonnensystem gibt es aber auch Beispiele für Planeten, die nicht so stabil sind. Zum Beispiel der Mars: seine Drehachse schwankt, weil er nur zwei winzige Monde hat, die

nicht stark genug auf ihn wirken. So stürmt es schwer auf dem Mars, und es gibt große Temperaturunterschiede auf seiner Oberfläche: sie schwanken zwischen 130 und 20 Grad – und das täglich!

## Ohne Mond hätte der Tag nur acht Stunden

Vor viereinhalb Milliarden Jahren dauerte eine Drehung der Erde etwa sechs Stunden, so kurz war der Tag. Als die Weltmeere entstanden und auf die Schwerkraft des Mondes mit Ebbe und Flut reagierten, bremsten die riesigen, schwappenden Wassermassen die Geschwindigkeit ab, mit der sich die Erde drehte. So wurden die Tage nach und nach immer länger – heute sind es 24 Stunden. Doch auch die Sonne spielt noch eine Rolle, als massereicher Stern wirkt sie trotz ihrer Entfernung ebenfalls auf die Erde und die Meere ein. Gäbe es den Mond nicht, würden sich die Ozeane daher trotzdem noch bewegen: einmal genährt durch die Eigendrehung der Erde, dann aber auch durch die Wirkung der fernen Sonne. Die Bewegung wäre schwächer und würde in einem anderen Rhythmus verlaufen, und die Bremswirkung wäre auch geringer. Dabei hätte sich die Rotation der Erde nur ganz wenig verlangsamt: Ein Tag wäre heute gerade mal acht Stunden lang.

## Der Mond entfernt sich von der Erde

Die Gezeitenkräfte führen aber auch dazu, dass sich der Mond von der Erde entfernt. Das wurde schon Anfang der 70er Jahre gemessen. Apollo-Astronauten brachten spezielle Reflektoren auf den Mond. Laserstrahlen wurden nun von der Erde auf diese Reflektoren ausgerichtet und wieder zur Erde zurückgeworfen. Die Forscher fanden auf diese Weise heraus, dass sich der Mond jährlich um knapp vier Zentimeter von der Erde weg bewegt. Das heißt aber nicht, dass er völlig verschwindet. In etwa 5,5 Milliarden Jahren wird sich unser Sonnensystem sowieso ziemlich verändern, denn dann – so sagen Astronomen voraus – wächst die Sonne zu einem roten Riesen heran, der den inneren Teil unseres Sonnensystems schluckt. Bis dahin wird der Mond seinen Abstand zur Erde von heute rund 388.000 Kilometern auf etwa 600.000 Kilometer vergrößert haben! Das gilt aber nur, wenn er sich mit konstanter Geschwindigkeit von der Erde entfernt. Tatsächlich wird diese sich aber verlangsamen.



Ebbe und Flut waren der Motor für die Entstehung des Lebens



Ohne den Mond würden auf der Erde schwere Stürme wüten, Pflanzen hätten da keine Überlebenschance



Ohne den Mond hätten auf der Erde intelligente Lebewesen erst viel später entstehen können. Und sie sähen sicher auch anders aus als Menschen

## Ebbe und Flut: Wie die Gezeiten entstehen

Wer schon einmal an der Nordsee Urlaub gemacht hat, kennt die Gezeiten, die gerade dieses Meer so besonders machen: bei Ebbe sind stundenlange Wattwanderungen möglich, bei Flut machen Baden und Surfen Spaß. Wer aber an der Ostsee Urlaub macht, merkt Ebbe und Flut kaum – obwohl sie da sind: der Unterschied zwischen Hoch- und Niedrigwasser beträgt an der Ostsee nur einige Zentimeter; an der Nordseeküste sind es im Schnitt vier Meter.

Zwei Mal täglich gibt es Ebbe und Flut. Das ansteigende Wasser ist die Flut, das fallende Wasser die Ebbe. Die jeweiligen Endpunkte heißen Hochwasser bzw. Niedrigwasser. Die Zeitdauer von einem Niedrigwasser zum nächsten ist die so genannte Tide; sie dauert etwa 12 Stunden und 25 Minuten. Die Zeitpunkte von Niedrig- und Hochwasser verschieben sich also jeden Tag um 50 Minuten; das ist exakt so viel, wie auch der Mond Tag für Tag später aufgeht.

### Die Kraft zwischen Erde und Mond

Erde und Mond sind die Hauptakteure, betrachten wir sie zuerst: Trotz der riesigen Entfernung zwischen diesen beiden Himmelskörpern ziehen sie sich gegenseitig an. Dadurch wölbt sich die Meeresoberfläche auf der mondzugewandten Seite nach außen: Durch seine Anziehungskraft entsteht ein Flutberg, unter dem sich die Erde im Laufe eines Tages einmal hindurchdreht.

Doch gleichzeitig entsteht auch auf der entgegengesetzten (mondfernen) Seite ein Flutberg. Wie kommt es dazu?

### Das Erde-Mond-Karussell

Die Erklärung für dieses Phänomen klingt etwas ungewöhnlich. Denn wenn man sagt, dass sich der Mond um die Erde dreht, ist das – genau genommen – falsch. In Wahrheit drehen sich Mond und Erde gemeinsam um ihren Massenschwerpunkt.

Man kann sich das etwa so vorstellen: Die beiden Himmelskörper bilden ein zusammengehörendes System, als ob die schwere Erde mit einer dünnen Stange mit dem leichteren Mond verbunden wäre. Die Erde ist aber 81 Mal schwerer als der Mond. Der Schwerpunkt zwischen Erde und Mond liegt

also irgendwo zwischen ihnen. Trotz der großen Entfernung zum Mond ist das noch innerhalb der Erde: 1.600 km unter der Erdoberfläche, und damit über 4.750 km vom Erdmittelpunkt entfernt.

Die Erde dreht sich leicht unregelmäßig um diesen Schwerpunkt herum, man könnte auch sagen, sie eiert. Das merken die Menschen zwar nicht, aber die Torkelbewegung wirkt ähnlich stark wie die Anziehungskraft des Mondes und führt dazu, dass die Erde das Wasser auf ihrer mondabgewandten Seite wegschleudert: etwa so wie in Karussells, die zwei Drehbewegungen kombinieren. So entsteht der zweite Flutberg. Beide Flutberge sind auf dem offenen Meer etwa einen halben Meter hoch und verursachen zweimal täglich Ebbe und Flut. Weil das Wasser wegen der Massenträgheit langsamer steigt als der Mond läuft, folgt der Wellenscheitel zum Beispiel an der Nordseeküste dem Mond mit einer Verzögerung von zwei Stunden.

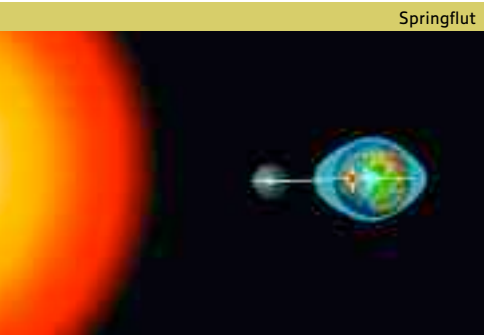
### Genau hingeguckt

Die Kräfte auf der Erde, die durch das Zusammenspiel von Mond und Erde entstehen, sind jedoch noch etwas komplizierter: Fliehkraft und Gravitationskraft gleichen sich im Prinzip gegenseitig aus. Sonst würden Mond und Erde entweder auseinanderdriften oder aber zusammenprallen. Wenn man diese Kräfte berechnet, dann vereinfacht man das gewöhnlich so, dass die gesamte Masse von Erde und Mond jeweils nur von deren Mittelpunkt aus gerechnet werden. Die riesige Erde ist also nur ein kleiner – aber sehr schwerer – Punkt. In der Realität sieht das natürlich anders aus: Auf der Seite der Erde, die dem Mond zugewandt ist, überwiegt die Gravitationskraft. Sie ist größer als die entgegengesetzt wirkende Fliehkraft. Die gegenüberliegende Seite der Erde ist vom Mond jedoch über 12.700 Kilometer weiter entfernt. Dort ist die Gravitationskraft des Mondes kleiner als die Fliehkraft, und dies führt zum zweiten Flutberg.

### Sonne, Mond und Erde

Auch die Sonne mischt noch mit bei Ebbe und Flut. Sie erzeugt, genauso wie der Mond, zwei Flutberge auf der Erde. Die sind aber niedriger, nämlich nur etwa ein Drittel so hoch. Je nach Stellung von Sonne und Mond können sich die Gezeiteneffekte abschwächen oder verstärken. Liegen Sonne, Mond und Erde auf





Springflut

einer geraden Linie (z. B. bei Voll- oder Neumond), kommt es zu einem stärkeren Anstieg des Wassers bei Flut, einer so genannte Springtide (Springflut). Stehen Sonne und Mond hingegen im rechten Winkel zueinander, was bei Halbmond geschieht, kommt es zu einem geringeren Anstieg (Nippflut bzw. Nippflut). Die Summe der Einflüsse von Mond und Sonne macht schließlich den auf der Erde beobachtbaren Gezeiteneffekt aus.



Nippflut

### Wieso dauert jede Tide 12 Stunden und 25 Minuten?

Die Erde dreht sich in 24 Stunden einmal um sich selbst. Gleichzeitig dreht sich auch der Mond in derselben Richtung innerhalb von 27 Tagen um die Erde. Bis also der Mond wieder über demselben Ort der Erde steht, vergehen 24 Stunden und 50 Minuten.

### Wie groß ist der Flutberg auf dem offenen Meer?

Auf dem offenen Meer sind die Flutberge kaum zu erkennen: Sie sind nicht höher als etwa einen halben Meter und verteilen sich auf eine Distanz von etwa 10.000 Kilometern. Das ist auch der Grund, warum man in Binnenseen keine Gezeiten erkennen kann. Ist der See beispielsweise einen Quadratkilometer groß, beträgt der Tidenhub gerade Haaresbreite.

### Der Mond bewegt sogar das feste Land

Die Kraft des Mondes wirkt nicht nur auf die Meere, sondern auch auf die Landmassen. Ähnlich wie das offene Meer bewegt sich auch das Festland um etwa einen halben Meter. Weil sich aber alles mitbewegt, merkt man das nicht.

## Wussten Sie schon, dass...

... ein Elektron so leicht ist, dass seine Masse in Kilogramm angegeben so aussehen würde: 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 9 Kilogramm – oder kurz: „9 mal 10 hoch minus 31 Kilogramm“. Damit zählen Elektronen zu den leichtesten Teilchen. Sie sind 2.000 mal leichter als ein Wasserstoffatom, das chemische Element mit der geringsten Masse. Dagegen befindet sich in der Mitte unserer Galaxie ein gewaltiges schwarzes Loch, das 2,6 Millionen mal so schwer ist wie unsere Sonne. Es wiegt etwa 5.148.000.000. 000.000.000.000.000.000.000.000.000 Kilogramm – oder „5,148 mal 10 hoch 36 Kilogramm“.

... sich das Gewicht eines Quarks nur schwer bestimmen lässt? Quarks sind elementare Bausteine der Natur. Aus ihnen bestehen zum Beispiel Protonen und Neutronen, die Bestandteile der Atomkerne. Bisher ist es allerdings noch nicht gelungen, ein einzelnes Quark zu isolieren und seine Masse zu bestimmen. Modellrechnungen gehen aber davon aus, dass ein so genanntes Up-Quark rund 5 Milliardstel Milliardstel Milliardstel Gramm und ein anderer Quark-Typ (das Down-Quark) rund 12 Milliardstel Milliardstel Milliardstel Gramm wiegt. Diese Quarks sind somit zehn bis zwanzigmal schwerer als ein Elektron.

... unsere Erde eine Masse von rund 6.000 Mal eine Milliarde mal eine Milliarde Tonnen hat? Das wäre eine Sechs mit 21 Nullen – und dann das Ganze in Tonnen! Und unsere Erde wird ständig schwerer: Täglich fallen einige hundert Tonnen an Steinen und Eisenpartikeln aus dem Weltall auf die Erde. Das meiste davon verglüht in der Atmosphäre und trägt dort zum Gewichtszuwachs bei. Der kosmische Feinstaub aus dem All bewirkt im Vergleich zum Gesamtgewicht der Erde aber nur eine winzige Gewichtszunahme.

WUSSTEN SIE SCHON, DASS...

## Wussten Sie schon, dass...

... die Erdanziehung nicht überall gleich ist? Dies führt zum Beispiel dazu, dass die Weltmeere alles andere als spiegelglatt sind. Stattdessen haben sie Beulen und Vertiefungen. Der Grund: die unterschiedlich verteilte Masse und die somit von Ort zu Ort unterschiedliche Anziehungskraft der Erde.

... die Gewichtskraft in der Einheit Newton (N) gemessen wird? Eine 100g Tafel Schokolade zieht mit ziemlich genau einem Newton nach unten.

... ein Mensch mit einem Gewicht von 80 Kilogramm wohl einen Schreck bekäme, wenn er auf der Sonne auf eine Waage steigen würde? Dort würde er stattliche 2.240 Kilogramm wiegen! Sein Gewicht wäre auf jedem Planeten unseres Sonnensystems anders: Auf dem Jupiter wäre er 192, auf der Venus 72, auf dem Mars 30,4 Kilogramm schwer. Ein echter „Schlankmacher“ ist unser Mond: Dort wäre unser 80-Kilo-Mensch 12,8 Kilogramm leicht.

... ein Liter Luft unter Normalbedingungen von 20 Grad Celsius und einem Luftdruck von 1.013 Hektopascal etwa 1,3 Gramm wiegt? Da ein Kubikmeter 1.000 Liter beinhaltet, wiegt ein Kubikmeter Luft stattliche 1.300 Gramm.

## Abnehmen am Äquator?

Dieser Tipp steht in keiner Diät-Zeitschrift: Der einfachste Weg um abzunehmen ist ein Ausflug ins All: Dort herrscht Schwerelosigkeit und alle Körper sind nahezu gewichtslos.

Allerdings ist diese Reise weit und beschwerlich. Ein näher liegendes Ziel ist stattdessen die Zugspitze, denn auch dort nimmt das Gewicht ab. Entscheidend dafür ist der Abstand zum Erdmittelpunkt, dem Zentrum für die Gravitationskraft des Planeten. Je weiter man sich vom Erdmittelpunkt entfernt, desto schwächer wirkt die Schwerkraft. Allerdings ist der Effekt recht gering: Die Zugspitze liegt 2.962 Meter über dem Meeresspiegel und ein Mensch, der in Nordrhein-Westfalen 100 Kilogramm wiegt, bringt auf dem Gipfel nur mickrige 70 Gramm weniger auf die Waage. Das reicht kaum für einen zusätzlichen Schoko-Riegel.

Wer mehr abnehmen möchte, der sollte als Reiseziel einen Ort auf dem Äquator wählen. Hier kann man ausnutzen, dass die Erde nicht kugelförmig ist sondern an den Polen leicht abgeflacht. Ein Mensch, der am Äquator steht, ist rund 20 Kilometer weiter vom Erdmittelpunkt entfernt als an den Polen. Daher ist auch die Anziehungskraft der Erde am Äquator etwas geringer. Außerdem rotiert ein Mensch dort mit einer größeren Geschwindigkeit um die Erdachse als zum Beispiel in Mitteleuropa – die Fliehkraft, die den Menschen wie bei einem Karussell von der Erde wegzieht, wird dadurch ebenfalls höher. Am Äquator wiegt ein durchschnittlicher Erwachsener deshalb rund ein halbes Kilogramm weniger als in Köln!

Ein Reiseziel zum Äquator hat auch den Vorteil, dass auf dem Rückflug mehr Fluggepäck erlaubt ist als auf der Hinreise. Für ein kleines Andenken ist wegen der beschriebenen Effekte noch ein wenig Gewicht frei, auch wenn die maximalen 30 Kilogramm schon beim Hinflug erreicht waren.

Die schlechte Nachricht: Nach der Rückkehr wiegt man wieder das Gleiche wie vor dem Urlaub (wenn nicht sogar noch mehr, weil das Hotelbuffet so gut geschmeckt hat). Durch die Reisen selbst jedenfalls hat sich an Bauch oder Hüfte nichts verändert. Denn Masse und Gewicht sind nicht das Gleiche: Die Masse wirkt ortsunabhängig und wird in Kilogramm angegeben. Ein Goldbarren von einem Kilogramm hat überall auf der Welt die Masse von einem Kilogramm. Die Gewichtskraft hingegen, die auf die jeweilige Masse wirkt, ist von Ort zu Ort unterschiedlich. Deshalb wiegen wir auch an verschiedenen Orten der Erde unterschiedlich viel. Dauerhaftes Abnehmen bleibt also schwierig.

## Eine Reise durch den Mittelpunkt der Erde

Was macht ein Forscher, der seine Verwandten auf der anderen Seite der Erde besuchen möchte und keine Lust hat, um die Erde herum zu fliegen? Klar: Er gräbt einen Tunnel durch den Erdmittelpunkt – zumindest theoretisch.

Zunächst braucht er dazu einen robusten Bohrer, der bei dem rund 12.740 Kilometer langen Weg bis ans andere Ende der Welt nicht schlapp macht. Obendrein muss er die 4.000 Grad Celsius im flüssigen Erdkern aushalten. Auch der Forscher muss sich etwas einfallen lassen, um später nicht einfach in seinem Tunnel zu verglühen. Zuerst aber überlegt er genau, wo er den Bohrer ansetzt: Die Eigenrotation der Erde spielt dabei eine wichtige Rolle.

Am Äquator dreht sich die Erde mit einer Geschwindigkeit von fast 1.700 Kilometern pro Stunde. Springt der Forscher hier in den Tunnel, wird er bereits nach einem freien Fall von ein paar hundert Metern gegen die Tunnelwand gedrückt.

Besser sieht es bei einem Tunnel mitten durch die Drehachse der Erde von Pol zu Pol aus: Hier spielt die Rotationsgeschwindigkeit keine Rolle. Springt der Forscher nun hinein, wird er durch die Erdanziehung auf eine Geschwindigkeit von 200 bis 300 Kilometer pro Stunde beschleunigt, mehr lässt der Luftwiderstand nicht zu. Nach knapp 32 Stunden ist dann der Erdmittelpunkt erreicht. Sobald der Forscher an ihm vorbei geflogen ist, wird er durch die vom Erdmittelpunkt ausgehende Anziehungskraft gebremst und fällt wieder zurück. Nach einigem Pendeln bleibt der Forscher dann genau in der Erdmitte hängen – seine Verwandten können in diesem Falle lange warten.

Anders sieht es aus, wenn der Forscher im Tunnel ein Vakuum erzeugt und ein Sauerstoffgerät mitnimmt: Bei seinem Sprung beschleunigt er dann immer mehr, bis er bereits nach 21 Minuten mit etwa 29.000 Kilometern pro Stunde am Erdmittelpunkt vorbeirast. Dann aber wird er auch in diesem Fall abgebremst. Wegen seiner hohen Geschwindigkeit schafft er es aber (in weiteren 21 Minuten) noch bis zum anderen Ende des Tunnels, bevor er wieder zum Erdmittelpunkt zurück stürzt. Seine Verwandten könnten ihn also nach 42 Minuten am anderen Ende der Welt auffangen. Allerdings wäre seine Frisur vermutlich hinüber.

## Die Entstehung unseres Sonnensystems

### Am Anfang war nur Gas und Staub

Vor rund 4,7 Milliarden Jahren wurde unser Sonnensystem geboren, und die Schwerkraft spielte dabei die entscheidende Rolle. Am Anfang stand eine Wolke aus Gas und Staubteilchen. Sie war vermutlich riesig – mehrere hundert Lichtjahre im Durchmesser – und bestand hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium, Gasen so alt wie das Universum selbst. Doch in dieses Gas war rund ein Prozent ultrafeinen Staubes gemischt, aus Kohlenstoff, Sauerstoff, Aluminium, Eisen und schweren Elementen. Diese und noch weitere Stoffe waren zuvor in Sternen erzeugt und in gewaltigen Supernova-Explosionen ins All geschleudert worden.

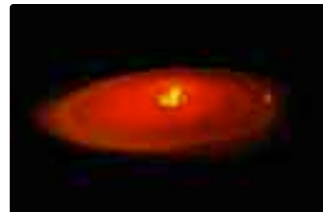
Astronomen glauben, dass dann die Entstehung unseres Systems so abgelaufen sein könnte: Die Wolke wird von Turbulenzen durchzogen, die das Gas immer wieder auseinander treiben. Doch zugleich wirkt auch die Schwerkraft, so dass die Gasteilchen sich gegenseitig anziehen und die Wolke beisammen bleibt. Irgendwann stört etwas dieses Gleichgewicht, es kann etwa die Druckwelle einer relativ nahen Supernova gewesen sein. Dadurch bilden sich in der Wolke zufällige Verdichtungen. Sie haben mehr Masse und ziehen mehr Teilchen an – von ihnen geht eine erhöhte Gravitation aus. Gas und Staub aus der Umgebung fliegen auf die Klumpen zu, sie wachsen und verdichten sich weiter. An vielen Stellen fällt die Wolke so in Kerne zusammen, aus denen jeweils ein Sonnensystem geboren wird.

### Die Sonne: Schwerkraft gegen Druck

Auch der Teil der Wolke, der später unser Sonnensystem bilden soll, fällt unter seiner eigenen Schwerkraft zusammen. Wegen der Turbulenzen hat er sich schon vor dem Zusammenstürzen leicht gedreht, während des Kollapses wird er immer schneller – wie ein Schlittschuhläufer, der bei der Pirouette die Arme anzieht. Die Wolke flacht deshalb immer weiter ab,



Noch heute werden neue Sterne geboren, indem sich Gas- und Staubwolken verdichten. So auch im Adlernebel, rund 7.000 Lichtjahre von der Erde entfernt, hier zu sehen auf einem Bild des Hubble-Teleskops



In dieser Computer-Illustration einer protoplanetarisches Scheibe hat die Sonne bereits gezündet

bis sie die Form einer Scheibe annimmt, Astronomen nennen sie die protoplanetarischesche Scheibe.

Ein Großteil der Materie stürzt unter der Wirkung der Schwerkraft jedoch ins Zentrum dieser Scheibe. Dort verdichtet sie sich immer mehr, Druck und Temperatur steigen an. Schließlich wird es so heiß und dicht, dass die Verschmelzung von Wasserstoff- zu Heliumkernen beginnt: unsere Sonne hat gezündet. Die Kernverschmelzung in der Sonne setzt noch heute so viel Energie frei, dass sich Temperatur und Strahlungsdruck mit der Schwerkraft die Waage halten. So wird die Sonne nicht weiter zusammengedrückt, sondern behält eine stabile Größe.

### Die Planeten: aus Staub geboren



In der Jugendzeit unseres Sonnensystems umkreisten tausende mondgroße Körper die Sonne

Nicht nur im Zentrum, sondern auch in den anderen Bereichen der protoplanetarischesche Scheibe wurde damals an unserem Sonnensystem gebaut: Während sich in der Mitte die Sonne bildet, wirbeln die Turbulenzen im Gas die winzigen Staubteilchen außen ständig durcheinander. Sie stoßen immer wieder zufällig zusammen, bleiben aneinander kleben und wachsen so nach und nach zu immer größeren Klumpen an. Nach rund einer Million Jahren sind aus diesen Klumpen Brocken geworden, die schon einen Durchmesser von bis zu einem Kilometer haben.

Jetzt beschleunigt die Schwerkraft das Geschehen: Die Brocken ziehen sich gegenseitig an, die größeren schlucken die kleinen. Nach weiteren 10.000 Jahren ist das Feld schon ziemlich bereinigt; die Brocken sind schon so groß wie der Mond! Abertausende von ihnen ziehen auf regelmäßigen Bahnen um die Sonne und kommen sich nur noch ab und zu in die Quere. Das große Fressen geht deshalb nur mit gebremster Geschwindigkeit weiter.

### Aufräumarbeiten im Sonnensystem

Rund 100 Millionen Jahre nach dem Kollaps der Gas- und Staubwolke hat die Schwerkraft ihre Arbeit weitgehend beendet. Geblieben ist das Sonnen-

system, wie wir es heute kennen: neun große Körper, die um einen riesigen Gasstern kreisen. Sie haben die meisten Brocken aus der ehemaligen protoplanetarischesche Scheibe aufgesammelt oder als Monde an sich gebunden. Auch Gas ist zwischen ihnen kaum noch vorhanden. Die großen Planeten wie Jupiter und Saturn konnten einen Teil davon als Gasatmosphäre an sich ziehen. Der Rest ist aus dem System heraus geblasen worden, als die Sonne in ihrer Jugendphase einen extrem starken Sonnenwind entwickelte.



In den Galaxien, zwischen den Sternen und in den Gaswolken – überall gibt die Schwerkraft den

Doch auch jetzt ist die Schwerkraft noch der dominierende Faktor zwischen den Akteuren. Sie bestimmt die Bahnen, auf denen die Planeten ziehen, sie hält die Sonne zusammen und die Atmosphäre auf den Planeten. Und in anderen Gegenden unserer Galaxie spielt die Schwerkraft weiter Geburtshelfer bei der Entstehung von Sonnen und Planeten.

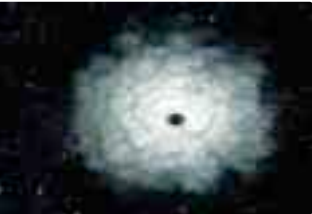
### Ungeklärte Geheimnisse

Das Modell der Sonnen- und Planetenentstehung fußt auf der Beobachtung unseres eigenen Sonnensystems, ferner Sterne und Nebel. Außerdem auf theoretischen Überlegungen und Berechnungen. Viele Indizien passen zueinander, doch es gibt auch ungeklärte Fragen: so können Staubforscher bislang recht gut simulieren wie sich der Staub der protoplanetarischesche Scheibe bis zu einer Größe von etwa einem Meter zusammen ballte. Doch noch kein Modell liefert eine Methode, mit der man daraus kilometergroße Brocken bauen kann. Bei den berechneten Zusammenstößen im Computer fallen solche Klumpen immer wieder auseinander.

Ein weiteres Rätsel ist die Geburt der Gasriesen Jupiter und Saturn. Nach den bisherigen Überlegungen müssten sie sehr schnell einen Kern von der dreißigfachen Erdmasse gebildet haben, um Gas aus der Scheibe als Atmosphäre zu binden. Denn spätestens zehn Millionen Jahre nachdem der Einsturz der Wolke begonnen hatte, blies der starke Sonnenwind alles Gas aus der protoplanetarischesche Scheibe fort. Nach den heutigen Modellen war in der Scheibe nicht genug Staub für ein so schnelles Wachstum von Jupiter und Saturn.

# Wie entsteht ein Schwarzes Loch?

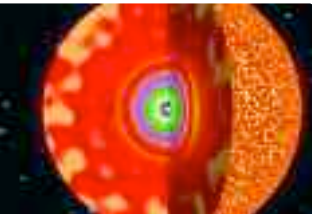
## Dunkle Rätsel



Nichts kann der Anziehungskraft von Schwarzen Löchern entkommen. Selbst Licht wird einfach verschluckt

Sie sind wohl die faszinierendste Ausprägung des Phänomens Schwarze Kraft – die Schwarzen Löcher. Seit Astronomen und Physiker berechnet haben, dass es sie gibt, gelten sie als das größte ungelöste Geheimnis des Universums. Denn in ihrer Nähe spielt die Physik, wie wir sie kennen, keine Rolle mehr. Man kann die Schwarzen Löcher nicht einmal direkt sehen, denn ihre Anziehungskraft ist so stark, dass selbst Licht ihnen nicht entfliehen kann.

## Nur was für ganz schwere Jungs



Am Ende seines Lebens besteht ein Stern aus mehreren Schalen. Außen verschmelzen immer noch Wasserstoffkerne zu Helium. Je weiter man nach innen kommt, desto schwerer werden die chemischen Elemente, die sich dort ablagern. In der Mitte sitzt ein Eisenkern

Die Astronomen unterscheiden zwei Arten von Schwarzen Löchern. Da sind zum einen die so genannten stellaren Schwarzen Löcher. Sie entstehen am Ende des Lebens riesiger Sterne – wirklich riesiger Sterne: damit aus einem Stern nach seinem Tod ein Schwarzes Loch wird, muss er am Anfang seines Lebens mindestens achtmal so viel wiegen wie unsere Sonne. Neueste Berechnungen zeigen, dass die Chancen am besten stehen, wenn der Stern eine Anfangsmasse von nicht weniger als 25 bis 40 Sonnenmassen aufbieten kann.

Das Leben eines solchen Kolosses neigt sich seinem Ende zu, wenn der Wasserstoffvorrat im Kern des Sterns zur Neige geht. Bei solch riesigen Sternen ist dies bereits nach einigen Millionen Jahren der Fall (zum Vergleich: unsere Sonne benötigt ungefähr zehn Milliarden Jahre, um all ihren Wasserstoff zu verfeuern). Nach dieser Zeit hat sich im Kern jede Menge Helium angesammelt.

Dieses brennt zunächst nicht. Der Stern zapft seine Wasserstoffreserven in den äußeren Regionen an, verbrennt sie und bläht sich dabei immer weiter auf. Immer mehr Helium entsteht und sammelt sich in der Mitte des Feuerballs. Schließlich ist der Druck so groß, dass auch das Helium zündet. Durch seine Verbrennung entsteht ein weiteres schwereres Element – Kohlenstoff. Auch dieses sammelt sich im Zentrum des Sterns an, bis der Druck schließlich so groß ist, dass auch beim Kohlenstoff die Kernfusion beginnt. Dabei entstehen dann immer mehr schwere Elemente, bis hin zum Eisen. Hier stoppt die Fusionskette, weil aus der Verschmelzung zweier Eisenkerne keine Energie mehr gewonnen werden kann.

## Ein Ende mit Schrecken

Der Eisenkern ist schließlich so schwer, dass er unter seinem eigenen Gewicht in sich zusammen fällt. Die gesamte Gashülle des aufgeblähten Sterns stürzt daraufhin mit Überschallgeschwindigkeit in Richtung des kollabierten Eisenkerns. Dort prallen die Gase ab, und der Stern wird in einer gewaltigen Detonation zerrissen, die seine Materie in den Weltraum schleudert. Astronomen nennen das eine Supernova-Explosion. Zurück bleibt ein kleiner Rest. Wiegt dieser mindestens das 2,8-fache unserer Sonne, dann presst die Schwerkraft diese Masse zu einem stellaren Schwarzen Loch zusammen. Dabei gehen alle atomaren Strukturen verloren, selbst Magnetfelder verschwinden. Die gesamte Materie wird unendlich zusammengedrückt. Sie hat danach praktisch kein Volumen mehr, aber eine unendliche Dichte. Alles das lässt sich mit der klassischen Physik gar nicht mehr beschreiben – es geht nur noch mit der Relativitätstheorie.



Eine gigantische Stoßwelle durchläuft den Stern und führt schließlich zur gewaltigen Explosion. Die Oberfläche des Sterns bleibt fast unverändert, bis die Stoßwelle sie auseinanderreißt

## Nicht verschwunden, nur unsichtbar

Es hört sich paradox an, aber die so zusammengedrückte Materie hat keine fassbare Ausdehnung mehr, übt dabei jedoch starke Anziehungskraft auf ihre Umgebung aus. So sammelt sich alles kosmische Material aus ihrer Nähe in einer so genannten Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch an. Einmal dort gefangen, gibt es kein Entrinnen mehr. Die Anziehungskraft ist so groß, dass selbst Licht nicht mehr entkommen kann.

## Die wahren Giganten

Doch die Schwerkraft hat noch Größeres in petto: Die stellaren Schwarzen Löcher werden von den so genannten galaktischen Schwarzen Löchern weit in den Schatten gestellt. Sie können bis zum milliardenfachen schwerer sein als unsere Sonne. Solche Monstren entstehen bei der Kollision von Sternen oder von ganzen Galaxien. Diese galaktischen Schwarzen Löcher üben unvorstellbare Anziehungskräfte aus. Vor wenigen Jahren konnten Wissenschaftler beweisen, dass sich ein solches galaktisches Schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße befindet. Inzwischen gehen die Fachleute davon aus, dass es auch in den meisten anderen Galaxien solche riesigen schwarzen Löcher in den Zentren gibt.

# Die Pioneer-Anomalie

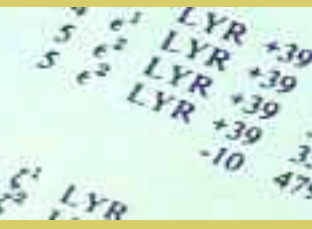
## Eine Sonde ist nicht mehr auf Kurs



Pioneer 10 – eine Sonde, die auf die Reise zum Jupiter geschickt wurde und als kosmische Flaschenpost in Richtung Aldebaran unterwegs ist, wird zum Testfall für das Gravitationsgesetz



Die Pioneer 10 startet am 2. März 1972 in Richtung Jupiter



Datenauswertungen ergeben eine Kursabweichung von Pioneer 10

### Ungelöste Rätsel in der Raumfahrt

Das Gravitationsgesetz von Isaac Newton von 1687 gilt als das am besten überprüfte Gesetz der Physik. Das hat sich auch mit Albert Einstein und seiner neueren Theorie der Gravitation von 1916 nicht geändert. Denn Newtons Gesetz ist nach wie vor in der Alltagsphysik gültig. Also immer dann, wenn die Geschwindigkeiten, die auftauchen, weit unter der Geschwindigkeit des Lichtes liegen. Dennoch: Die Gravitation wirft auch heute noch Fragen auf und stellt die Physik vor neue Herausforderungen. Und das gerade in ihrer Paradedisziplin, der Raumfahrt. Denn die ist eigentlich ein Triumph der klassischen Physik und des Gravitationsgesetzes – wenn, ja wenn da nicht gelegentlich seltsame Begebenheiten auftauchen würden, die die Raumforscher und Astronomen verblüffen.

### Auf Kurs Richtung Jupiter und noch viel weiter

Ohne den Klassiker Newton und sein Gesetz wären keine Satelliten am Himmel und keine Menschen je auf dem Mond gelandet. Auch die unbemannten Erkundungssonden zu anderen Sternen unseres Sonnensystems hätten ohne Newtons Gesetz nie die ersten Bilder von fremden Welten machen können. Doch schon 1972 schickten Forscher und Astronomen der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA die erste Sonde zum Planeten Jupiter. Diese Pioneer 10 hatte aber noch ein weiteres Ziel: als erstes von Menschenhand gebautes Objekt sollte sie das Planetensystem verlassen, und zwar in Richtung Aldebaran, dem hellsten Stern im Sternbild Stier, Entfernung von der Erde: 68 Lichtjahre, geschätzte Reisezeit: zwei Millionen Jahre.

### Die Rechnung war richtig – aber das Ergebnis falsch

Der Start am 2. März 1972 und die Berechnung der Reiseroute waren ein Ergebnis der Gesetze und Formeln von Isaac Newton. Metergenau berechneten die Techniker und Astronomen einen Kurs, der hart am Jupiter vorbei-

ziehen sollte. Man wollte den Riesenplaneten als Katapult nutzen und die Pioneer 10 als erste Sonde aus dem Sonnensystem heraus schleudern. Im Juni 1983 war es tatsächlich soweit: die Pioneer verließ ihre kosmische Heimat.

Was die Physiker beim Start nicht wissen konnten: Einige Jahre nach dem Abflug, 1980, zeigten die Logbücher Abweichungen vom Kurs – ein Umstand, der zunächst von den Technikern als reiner Datenfehler interpretiert wurde. Man war sich so sicher, alles verstanden und im Griff zu haben. Zehn weitere Jahre mussten verstreichen, bis die „Datenfehler“ nicht mehr weg zu diskutieren waren.

### Keine Sonde fliegt, wie sie soll

Die Pioneer 10 war nicht exakt auf Kurs, sondern zeigte eine merkwürdige Abbremsung. Die Abweichungen waren zwar winzig, aber durchweg gleich und summierten sich so über die Jahre. Um ein Gefühl für die Dimension zu bekommen, hier ein Rechenbeispiel: Wenn die Sonde 60 Stundenkilometer schnell fliegt, dann würde sie mit diesem Brems-Effekt erst nach 650 Jahren zum Stehen kommen. Wenn die Verzögerung auch noch so klein war, für die Physiker hatte sie große Bedeutung. Es gab nämlich keine logische Erklärung dafür, Messfehler konnten es nicht sein. Alle Fehlerquellen wie Reibungsverluste durch interstellaren Staub oder ein Ausgasen der radioaktiven Batterien konnten definitiv ausgeschlossen werden. Die Forscher standen vor einem Rätsel. Dann überprüfte man die Daten anderer, später ins All geschickter Sonden, wie Voyager, Ulysses oder Galileo – und stellte ebenfalls eine Abweichung von den errechneten Daten fest. Und zwar immer dieselbe.

### Die Schwerkraft ist noch immer ein Geheimnis

Sollte vielleicht doch etwas mit dem Gravitationsgesetz nicht stimmen? Niemand hatte es bisher in Zweifel gezogen. Und bis heute ist nicht eindeutig geklärt, woher die seltsame Abweichung stammt. Es gibt sogar Physiker, die diese Abbremsung durch die so genannte „Dunkle Materie“ erklären wollen. Dunkle Materie ist eine Form von Materie, die nur theoretisch und indirekt von den Astronomen erschlossen wurde. Aber gesehen hat sie noch niemand, und über ihre Eigenschaften können Physiker nichts sagen. So brachte eine kleine Sonde, gebaut als kosmische Flaschenpost, die Grundfesten des ehernen Gravitationsgesetzes von Isaac Newton ins Wanken und beschäftigt die Wissenschaftler – bis heute.