

#1 - New York Times - BESTSELLERAUTOR

NEIL DEGRASSE TYSON

LINDSEY NYX WALKER

BIS ZUR
UNENDLICHKEIT
UND NOCH VIEL
WEITER

Eine kosmische Entdeckungsreise

**BIS ZUR
UNENDLICHKEIT
UND
NOCH VIEL WEITER**



**BIS ZUR
UNENDLICHKEIT
UND
NOCH VIEL WEITER**

Eine kosmische Entdeckungsreise

NEIL DEGRASSE TYSON
LINDSEY NYX WALKER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie. Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://dnb.de> abrufbar.

Für Fragen und Anregungen

info@m-vg.de

Wichtiger Hinweis

Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wurde auf eine genderspezifische Schreibweise sowie eine Mehrfachbezeichnung verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen sind somit geschlechtsneutral zu verstehen.

1. Auflage 2024

© 2024 by Finanzbuch Verlag, ein Imprint der Münchner Verlagsgruppe GmbH

Türkenstraße 89

80799 München

Tel.: 089 651285-0

Die amerikanische Originalausgabe erschien 2023 bei National Geographic Partners, LLC unter dem Titel *To Infinity and Beyond* © 2023 Curved Light Productions, LLC. All rights reserved.

Originally published in the United States and Canada by National Geographic Partners, LLC as TO INFINITY AND BEYOND. This translated edition published by arrangement with National Geographic Partners, LLC.

Einige Abschnitte wurden aus Aufsätzen in der Zeitschrift *Natural History* übernommen: Seite 55: »Rätsel des Kosmos: Die Corioliskraft« und Seite 145 »Der Jupiter« aus *The Coriolis Force* (März 1995); »Die Gezeitenkraft« von Seite 120f. aus *Tides and Time* (November 1995); Seite 192 f.: »Schockierende Wahrheiten« aus *Shocking Truths: If You Break the Sound Barrier, You Can Make Quite a Stir* (September 2006).

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Wir behalten uns die Nutzung unserer Inhalte für Text und Data Mining im Sinne von § 44b UrhG ausdrücklich vor.

Übersetzung: Hans-Peter Remmler, Christina Hackenberg

Redaktion: Silke Panten

Korrektur: Rainer Weber

Umschlaggestaltung: Elisa Gibson, Marc-Torben Fischer & Sonja Stiefel

Umschlagabbildung: Nick Liefhebber. Reprinted by permission of National Geographic Partners, LLC.

All rights reserved.

Satz: Daniel Förster

Druck: Florjancic Tisk d.o.o., Slowenien

Printed in the EU

ISBN Print 978-3-95972-793-8

ISBN E-Book (PDF) 978-3-98609-547-5

ISBN E-Book (EPUB, Mobi) 978-3-98609-548-2



Weitere Informationen zum Verlag finden Sie unter

www.finanzbuchverlag.de

Beachten Sie auch unsere weiteren Verlage unter www.m-vg.de

*Den Forschern gewidmet, und allen anderen
Vertretern unserer Gattung, die die Kühnheit besitzen,
Dinge erkunden zu wollen, die sie ängstigen*



INHALT

EINFÜHRUNG

Die kosmische Odyssee 9

TEIL 1

DIE ERDE HINTER SICH LASSEN 15

TEIL 2

UNTERWEGS IM HINTERHOF DER SONNE 85

TEIL 3

HINAUS IN DEN ÄUSSEREN WELTRAUM 167

TEIL 4

BIS ZUR UNENDLICHKEIT
UND NOCH VIEL WEITER 235

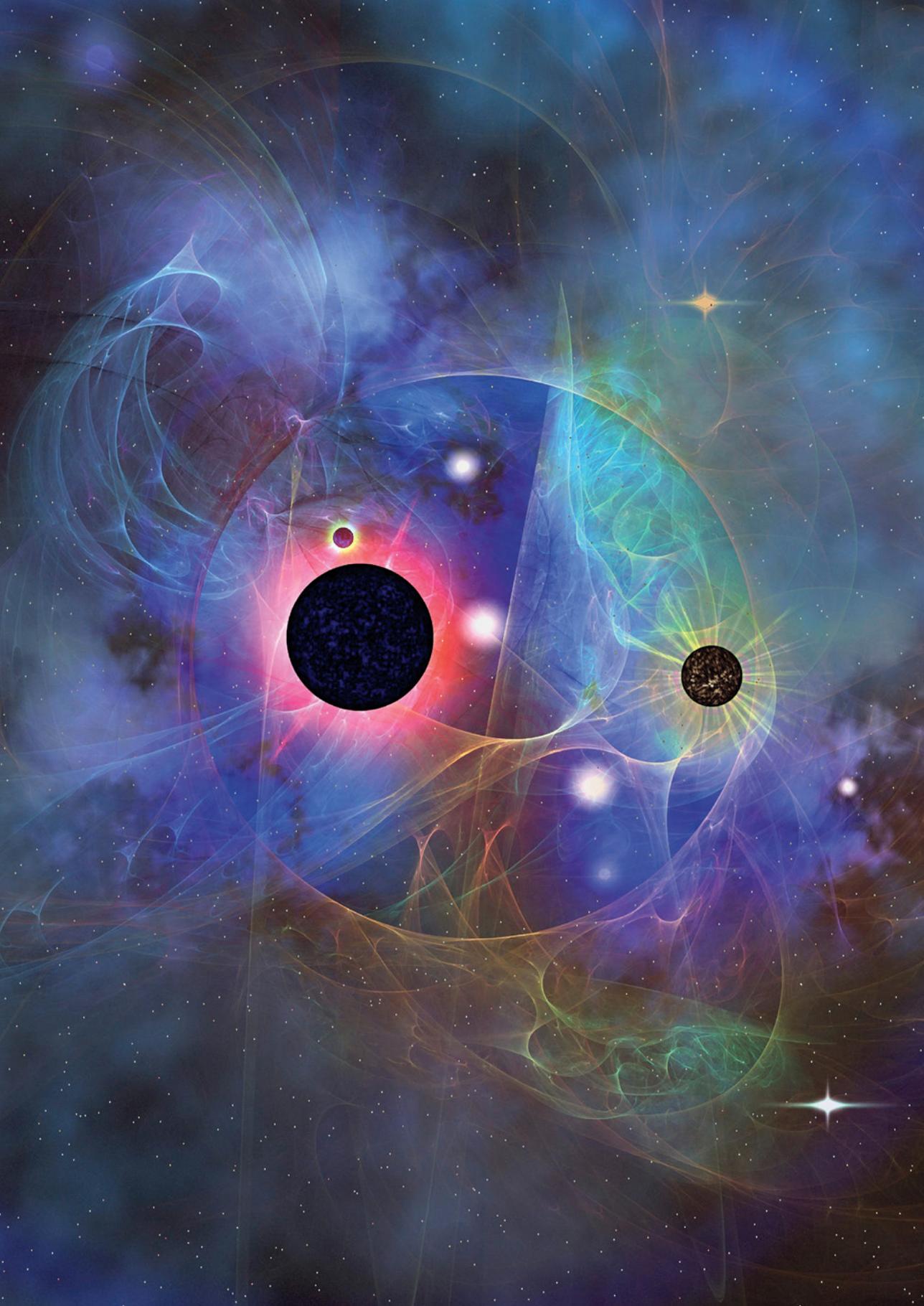
DANKSAGUNG 306

WEITERFÜHRENDE LEKTÜRE 307

DIE AUTOREN 309

BILDQUELLEN 310

REGISTER 312



EINFÜHRUNG

DIE KOSMISCHE ODYSSEE

Es war einmal in einer Zeit – lange bevor die Menschen verstanden, was sich über den Wolken verbarg –, da war das Reich des Himmels und der Sterne die Heimat von Göttern, und erklärt werden konnte es nur durch Mythen und Fabeln. Doch eine Reihe von Entdeckungen – dazwischen immer wieder Rückschläge und Neuanfänge, Irrwege und Sackgassen – erschütterten letztendlich diese uralten Überzeugungen und gaben der Menschheit das Wissen an die Hand, um fremdartige und zur Demut mahnende Wahrheiten ans Licht zu bringen. Die Odyssee der kosmischen Entdeckungen hatte begonnen – und sie kennt bis heute kein Ende. Langsam, aber sicher tat sich ein neues Universum auf, eines, in dem es von Molekülen wimmelt, in dem monströse schwarze Löcher lauern, durch das sich leerer Raum und Galaxien jeder Form und Größe winden und das Hinweise auf zahllose Mysterien liefert, die noch der Erkundung harren.

Seite 8: Eine lebhaftere Darstellung eines energiegeladenen Universums voller schwarzer Löcher, Sterne und Nebulae

Seite 3: Eine erweiterte Ansicht der Milchstraße, wie sie sich einem Betrachter in einem Raumschiff darbieten könnte, das mit Überlichtgeschwindigkeit unterwegs ist

Seite 6: Der mexikanische Bundesstaat Baja California Sur und der Golf von Kalifornien, beobachtet aus einem Fenster des bemannten SpaceX-Raumschiffs Dragon Freedom, 420 Kilometer über dem Pazifik

In diesem Buch wollen wir Sie einladen, gemeinsam mit uns zu dieser Reise aufzubrechen – eine Reise von Körper und Geist weg von der Erde, in die Unendlichkeit und darüber hinaus. Was versetzte die Menschen in die Lage, unserem Heimatplaneten zu entfliehen, physisch und geistig, und ins Unbekannte zu entschweben? Welche Einsichten, welcher Wagemut, welche revolutionären Ideen, welche technologischen Fehlschläge und Erfolge trugen uns zu dem Wissen, das wir heute haben? Und welche atemberaubenden Erkenntnisse an der Grenze unserer Vorstellungskraft liefern Einblicke in einen gigantischen Kosmos, der erst noch darauf wartet, erforscht zu werden? Es ist eine facettenreiche Geschichte von Menschen und Planeten, von Sternen und Raumschiffen, eine Saga, deren subtilen Feinheiten wir auf diesen Seiten auf die Spur kommen wollen.

Endlose Weite, Leere, Dunkelheit, Kälte: All das sind große und eigenartige Begriffe, die sich einer angenehm warmblütigen, gerade erst entstandenen Kreatur auf Kohlenstoffbasis in einem gleichsam vorstädtischen Winkel der Galaxie namens Milchstraße nicht ohne Weiteres erschließen. Wer noch nicht wüsste, dass sich die Erde um die Sonne dreht, und nicht etwa umgekehrt, hätte einige Mühe, diese Wahrheit auf eigene Faust herauszufinden. Wer nicht wüsste, dass unser Sonnensystem acht Planeten, Hunderttausende Asteroiden und Millionen Kometen beherbergt, könnte verständlicherweise annehmen, dass nur die Erde und die fünf mit bloßem Auge sichtbaren Planeten unseren beschaulichen Winkel des Kosmos ausmachen. Um zu diesen Meilensteinen der Erkenntnis zu gelangen, mussten wir zu Nestflüchtern werden.

Die Kraft, die die Erde zusammenhält, die den Mond an die Erde bindet und die Erde an unsere Sonne, sorgt auch dafür, dass der Mensch über fast die gesamte Dauer seiner Existenz unter den Wolken feststeckt. Wir können die irdische Schwerkraft nicht ohne Weiteres überwinden, und das ist vielleicht der Grund, warum der erste Motorflug der Gebrüder Wright im Jahr 1903 und die Mondlandung der Apollo 11 im Jahr 1969 in fast jeder Liste der größten Errungenschaften der Menschheit ganz weit oben stehen. Seitdem ließen Tausende Satelliten, Hunderte Raumsonden, Dutzende Rovers und sogar ein winziger Helikopter die Erde hinter sich und machten aus unserem Sonnensystem mit seinen bescheidenen acht Planeten einen Hinterhof für Forschungsreisende.

Und dieser Hinterhof wächst unablässig weiter. 2012 entschwand die Raumsonde Voyager 1 in den interstellaren Raum und verabschiedete sich endgültig aus unserem Sonnensystem – nicht jedoch, ohne zuvor dessen mysteriöse Planeten und deren Monde in wahre Wunderwelten zu verwandeln. Die Mission von Voyager ist noch nicht zu Ende, und es kann gut sein, dass sie länger währt, als es überhaupt Menschen geben wird. Das winzige Raumfahrzeug hat eine goldene Datenplatte an Bord: eine Tonaufnahme mit Liedern und Klängen von der Erde und den dort heimischen Spezies. Diese sollen jedes Wesen oder jedes Etwas, das die Aufnahme abfängt, freundlich grüßen, verbunden mit der kollektiven Bitte, uns aus unserer galaktischen Einsamkeit zu retten. Als Beleg, dass wir, diese kleinen und schwächlichen Geschöpfe, einen Platz inmitten dieses riesigen und sich immer weiter ausdehnenden Universums haben, setzt Voyager die nie endende Reise fort, die einst mit den ersten menschlichen Wesen begann, die sich fragten, was unsere ausgestreckte Hand und unseren in den Himmel gewandten Blick wohl noch alles erwartet.

Seit dem Jahr 2022 führt uns das James-Webb-Weltraumteleskop auf unserer Odyssee immer weiter in die Tiefen des Alls und schickt uns Bilder, die das älteste Licht zeigen, das das menschliche Auge jemals erblickt hat. Zugleich erinnert es uns daran, wie riesig unser Universum in Wirklichkeit ist. Das First Deep Field des Webb-Teleskops enthüllte Tausende schwach leuchtender und ferner Galaxien, darunter auch manche, die vor 13,7 Milliarden Jahren entstanden sind. Es sind Bilder, die uns näher an den Urknall heranbringen als jemals zuvor. Versuchen Sie sich einmal vorzustellen, wie Sie dieses Bild einem Newton oder einem Galilei erklären sollen, dessen radikal neues Verständnis eines geozentrischen Universums das gesamte Christentum auf den

Das winzige Raumfahrzeug hat eine **goldene Datenplatte** an Bord: eine Tonaufnahme mit **Liedern und Klängen** von der Erde und den dort heimischen Spezies. Diese sollen jedes Wesen oder jedes Etwas, das die Aufnahme abfängt, freundlich grüßen, verbunden mit der **kollektiven Bitte**, uns aus unserer galaktischen Einsamkeit zu retten.



Dieses im Nahinfrarotbereich erzeugte Bild des Galaxienhaufens SMACS 0723, aufgenommen vom James-Webb-Weltraumteleskop der NASA, nutzt einen natürlichen Effekt, den sogenannten Gravitationslinseneffekt

Kopf stellte und die Welt des Wissens und des Glaubens ins Wanken brachte. Stellen Sie sich vor, Sie wollten diesen Geistesgrößen erklären, dass wir bloß einer von vielen Billionen Planeten in einem Universum sind, das kein greifbares Ende hat. Oder ihnen mitteilen, wie die Quantenphysik und die allgemeine Relativitätstheorie darauf schließen lassen, dass es nicht nur unser eigenes Universum geben könnte, sondern vielleicht noch zahllose weitere.

Das sind die Geschichten, die sich bei der Lektüre dieses Buchs vor Ihnen ausbreiten werden: eine der Schwerkraft spottende Flugbahn weg von der



Erde durch unsere nähere Umgebung im Sonnensystem, hinaus in die Galaxie und immer noch weiter. Auf diesem Weg werden uns verblüffende Entdeckungen begegnen und unerwartete Rätsel, die schon die größten Geister der Menschheitsgeschichte umgetrieben und in Staunen versetzt haben, sie zwangen, Annahmen neu zu überdenken und ihre Weltsicht zu korrigieren. Vielleicht treffen wir dort draußen, in den Abgründen des Unbekannten, sogar auf Dinge, die das Zeug haben, Ihr eigenes Denken zu revolutionieren.

Willkommen bei der kosmischen Odyssee – einer spannenden, ehrfurchtgebietenden und durch und durch unterhaltsamen Entdeckungsreise quer durch die Raumzeit bis in die Unendlichkeit und darüber hinaus.



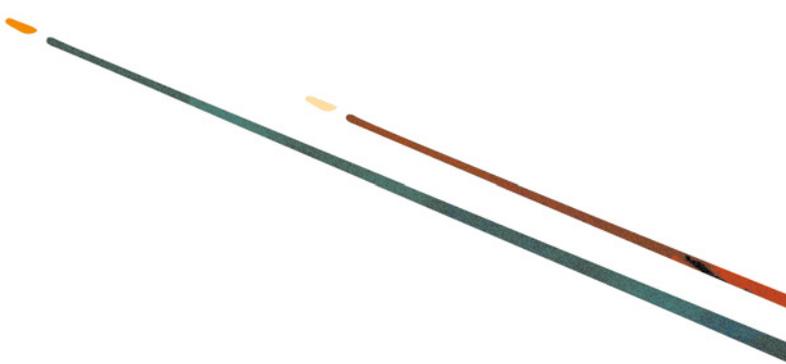
TEIL 1

DIE ERDE HINTER SICH LASSEN

»Dass ich sterblich bin, weiß ich, und dass meine Tage gezählt sind; aber wenn ich im Geiste den vielfach verschlungenen Kreisbahnen der Gestirne nachspüre, dann berühre ich mit den Füßen nicht mehr die Erde: Am Tische des Zeus selbst labt mich Ambrosia, die Götterspeise.«

Ptolemäus, *Almagest*





Der nächtliche Sternenhimmel vermittelt der Menschheit Orientierung, Erleuchtung und Hoffnung, und das mindestens seit den Zeiten, da die Menschen begannen, den Blick nach oben zu richten. Niemand kann sagen, wer als Erster davon träumte, die Erde hinter sich zu lassen, um zu erkunden, was wohl jenseits dieser liegen mochte, oder wer sich als Erster fragte, ob es ein solches Jenseits überhaupt irgendwo gibt. Wir wissen aber, dass der Zauber der Sonne, des Mondes und des mit bloßem Auge sichtbaren, funkelnden Sternenhimmels ein Echo über die Jahrtausende menschlicher Kultur hinterließ.

An Belegen dafür herrscht kein Mangel. Höhlenmalereien und in Felsen geritzte Zeichnungen, die sich auf ein Alter von 40 000 Jahren und mehr datieren lassen, stellen nicht bloß Tiere und Jäger dar, sie zeigen auch Kometen, Meteore und Sternbilder in ausreichender Detailgenauigkeit, um daraus das gemächliche Schlingern der Erde auf ihrer Achse ablesen zu können: die Präzession der Tagundnachtgleichen. Im 4000 Jahre alten *Gilgamesch-Epos* aus dem antiken Mesopotamien (im heutigen Irak) – eine Geschichte voller Abenteuer, Helden, Bösewichter, Romanzen und Schlachten – werden die Sternbilder als Charaktere lebendig. In diesem Werk, einem der ältesten erhaltenen Stücke der Weltliteratur, verbinden kosmische Fäden die Reiche der Sterblichen und der Unsterblichen miteinander, derweil Zeit und Entfernungen anhand der Bewegung der Sterne gemessen werden.

Seite 16: Die Milchstraße über dem Fluss Múrtega im Naturpark Noudar,
Sternwarte Alqueva, Portugal

Seite 14: Eine verblüffende Abbildung der Erde, erzeugt mit Datenschichten aus
der Bildsammlung des NASA-Observatoriums Blue Marble Next Generation

Über Jahrtausende gingen die Menschen vernünftigerweise davon aus, der Mond müsse eine flache, leuchtende Scheibe sein, die zu- und wieder abnahm – bis ins 17. Jahrhundert, als Galileo Galilei sich traute, sein gerade erst perfektioniertes Teleskop gen Himmel zu richten und damit eine Kugel mit strukturierter Oberfläche sichtbar werden ließ, mit in Sonnenlicht getauchten zerklüfteten Gebirgen und steilen, im Schatten verborgenen Tälern.

Von jenem Augenblick an wurden der Himmel und all die himmlischen Objekte zu Welten – Reisezielen –, zu Oberflächen, auf denen einst der Mensch würde wandeln können, wenn es uns denn nur gelänge, die Tiefen des Weltraums zu durchqueren. Seitdem, vor allem aber im 20. Jahrhundert, zieht es Wissenschaftler, Techniker, Draufgänger und Politiker zu immer neuen Höhen. Wissensdurst, Wettbewerb und von Kriegen vorangetriebene Innovationen trugen uns durch das Tor unserer durchsichtigen Atmosphäre und darüber hinaus.

Doch bevor wir den Himmel zu durchstoßen vermochten, bevor wir wissen konnten, dass man dort navigieren konnte, musste der Mensch erst einmal entdecken, was der Himmel überhaupt ist, was er nicht ist und wo er endet – wenn er denn irgendwo endet. Unsere Atmosphäre, so sollten wir bald erfahren, war nichts weiter als eine blaue Luftblase, die sich in ein unwirtliches Vakuum verflüchtigt, ohne Teilchen, ohne Druck und ohne Photonen, wie wir sie in unserem gemütlichen irdischen Kokon vorfinden. Schritt für Schritt, Frage für Frage und Entdeckung für Entdeckung bahnten wir uns den Weg durch diese Luftblase, was auch immer jenseits davon auf uns warten mochte.

In diesem Abschnitt wollen wir diese Odyssee begleiten, wie der Mensch zuerst mithilfe von Ballons die Erdoberfläche hinter (oder besser unter) sich ließ, dann mit Flugzeugen, Düsenjets und schließlich mit Raketen bis hinauf zum Mond. Wir werden lernen, in der Atmosphäre zu navigieren, und wir werden die Schwerkraft überwinden, die der menschlichen Vorstellungskraft so lange Zeit Fesseln anlegte.

Von den eingetrockneten, verblassten Höhlenmalereien von einst bis zu den frisch aufgestellten Quantengleichungen moderner Zeiten entwickelt sich eine Geschichte ohne Ende, gekennzeichnet durch Zyklen voller Wissensdrang, Entdeckungen und Umbrüche und nicht zuletzt dem Abstrei-

fen einstigen (vermeintlichen) Wissens, während wir von einer Weltsicht zur nächsten voranschreiten.

Alsdann, wir sind startklar für unsere kosmische Reise.

DIE ATMOSPHERE DER ERDE

Angetrieben durch unser Verlangen, wie die Vögel in die Lüfte zu steigen, zog es uns zunächst in Form von Geschichten himmelwärts. Allerlei Erzählungen von fliegenden Menschen zogen sich kulturübergreifend durch antike Mythen und Legenden. Alexander der Große wird oft so dargestellt, als würde er in einem geflügelten Streitwagen durch die Lüfte schweben, gezogen von vier mythischen Greifen – Wesen mit dem Körper eines Löwen und den Schwingen eines Adlers. Eine Legende der indigenen Cowichan berichtet von zwei Jungen, die mit ihrem Gesang ihr Kanu dazu brachten, vom Gipfel des Berges, auf dem es gebaut worden war, über ihr Dorf bis hinaus ins Meer zu schweben. Das antike Sanskrit-Epos von *Ramayana* und andere indische Texte beschreiben fliegende »vimanas«, selbst angetriebene Streitwagen der Götter.

Eine der berühmtesten Geschichten vom menschlichen Flug finden wir jedoch im prachtvollen griechischen Mythos von Dädalus und seinem Sohn Ikarus. Wenn jemals darauf hingewiesen wurde, nicht zu nahe an die Sonne heranzufiegen, war garantiert die Rede von dieser uralten Legende, die als Warnung vor der Versuchung zu verstehen ist, es mit dem Risiko und dem Nervenkitzel nicht zu übertreiben.

Um von der Insel Kreta zu entkommen, konstruierte Dädalus, ein erstklassiger Handwerker und Aeronaut, zwei Sätze Flügel aus Vogelfedern, die er mit Wachs zusammenfügte: ein Paar Flügel für sich selbst, das andere für Ikarus. Er ermahnte den Sohn, weder zu nah über dem Wasser zu fliegen, weil sonst die Feuchtigkeit die Federn in Unordnung bringen könnte, noch zu nahe an der Sonne, weil sonst die Hitze das Wachs zum Schmelzen brächte. Doch in seinem jugendlichen Leichtsinn schwebte Ikarus immer höher und höher in Richtung Sonne hinauf, bis das Wachs seiner Flügel tatsächlich schmolz und die Schwingen sich auflösten; er stürzte ins unbarmherzige Ägäische Meer und in den Tod. Dieses tragische Beispiel liegt zwei



Der Sturz des Ikarus (1606/1607) von Carlo Saraceni

Jahrtausende vor unserem heutigen Verständnis von Thermodynamik, Aerodynamik und Atmosphärenphysik, die Ungereimtheiten sind daher verzeihlich. Ikarus wäre zweifellos zu Tode gekommen, aber ganz gewiss nicht wegen der Hitze der Sonne.

Wir wissen heute, was Ikarus und die alten Griechen, denen wir diese Geschichte verdanken, nicht wussten: dass sich nämlich die Erdatmosphäre in fünf separate Schichten unterteilt. Die Troposphäre, wo sämtliche Pflanzen und Tiere leben und atmen, enthält drei Viertel aller Luftmoleküle und 99 Prozent des gesamten Wasserdampfs der Erde. Nahezu unser gesamtes Wetter spielt sich innerhalb dieser dichtesten Schicht ab, die bis in circa 6,5 bis 18 Kilometer Höhe über der Erdoberfläche reicht, je nach Breitengrad und Jahreszeit. Und sie dehnt sich aufgrund der steigenden Temperaturen auf der Erde immer weiter nach oben aus, um rund 60 Meter pro Jahrzehnt. Am Grund der Troposphäre, auf Meereshöhe, liegt die durchschnittliche globale Temperatur heutzutage etwa bei 15 °C. Ganz oben, an der Grenze zur Stratosphäre, fällt die Durchschnittstemperatur dagegen auf minus 57 °C und noch darunter.

Wenn aber das Sonnenlicht zuerst die Atmosphäre durchdringen muss, bevor es auf der Erde ankommt, und wenn wir uns, wenn wir in die Höhe steigen, der Sonne annähern, müsste es dort oben nicht wärmer sein als auf Meereshöhe, wie es auch der Verfasser der Geschichte des Ikarus annahm? Jeder, der schon einmal in größere Höhen aufgestiegen ist, wird die Antwort auf diese Frage kennen. In Wirklichkeit lehrt uns die Erfahrung genau das Gegenteil. Bergsteiger kalkulieren mit einer Abnahme der Durchschnittstemperatur um ungefähr 2 °C pro 300 Meter Höhenunterschied. Sherpas und Kletterer können davon ausgehen, dass die milden Durchschnittstemperaturen im Frühling von etwa 15 °C im Basislager am Fuß des Mount Everest auf dem Weg zum Gipfel bis auf minus 30 °C absinken werden – sofern sie denn lebend dort oben ankommen. Wie sich zeigt, haben die auf der Erdoberfläche wahrgenommenen Temperaturschwankungen absolut nichts mit dem Abstand zur Sonne zu tun – da muss etwas ganz anderes im Spiel sein.

Fragen wir uns zunächst einmal, wie viel näher Ikarus der Sonne wohl gekommen sein mag. Wenn wir davon ausgehen, dass er vielleicht 15 Kilometer in die Höhe gestiegen ist – deutlich höher als jedes Verkehrsflugzeug –, die Sonne aber etwa 150 Millionen Kilometer von der Erde entfernt ist, dann kam Ikarus der Sonne gerade einmal um 0,00000001 Prozent näher. Das dürfte kaum ausreichen, um die Geschichte vom schmelzenden Wachs zu erklären.

Was die Lufttemperatur als solche angeht, müssen wir uns zunächst einmal den Zusammenhang zwischen Licht und Wärme vergegenwärtigen. Die Sonne emittiert Licht in jeder Wellenlänge des elektromagnetischen Spektrums und versorgt dadurch praktisch das gesamte Leben auf der Erde mit Energie. Das Spektrum ist endlos und reicht von langwelligigen, sanften Radiowellen bis zu den kurzwelligigen und intensiven Gammastrahlen. Zwischen den beiden liegt ein schmales Frequenzband, das wir als sichtbares Licht kennen: der einzige für das menschliche Auge wahrnehmbare Bereich des gesamten Spektrums. Sterne wie die Sonne senden fast die Hälfte ihrer Energie in Form von sichtbarem Licht aus, einen kleinen Teil davon als ultraviolettes Licht (etwas kürzere Wellen), den Rest zum Großteil als (etwas langwelligeres) Infrarotlicht. Letzteres empfinden wir als Wärme. Es ist mit hin kein Zufall, dass die meisten Tiere auf der Erde raffinierte Organe ent-

wickelten, die in der Lage sind, diese ausgewählten Bereiche des grenzenlosen elektromagnetischen Spektrums wahrzunehmen.

Angesichts der Art und Weise, wie sich die Erdbewohner entwickelten, könnten wir annehmen, dass Außerirdische von einem fremden Planeten, der um eine andere Art von Stern kreist, Sinnesorgane entwickeln, die ganz speziell auf dessen Form von Licht zugeschnitten sind. Aliens, die auf Planeten zu Hause sind, die um kühle, kleine, rote Zwergsterne kreisen – der häufigste Sternentyp in unserer Galaxie –, sehen ihre Welt vielleicht in einem regelrechten Rausch aus Infrarotlicht und haben große Mühe, das hochfrequenter blaue Licht wahrzunehmen.

Die Temperatur ist einfach ein Maß für molekulare Vibrationen, und alle Moleküle vibrieren. (Diese wichtige Tatsache sollten wir bei unserer Reise durch den Kosmos immer im Blick behalten.) Alles mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt – das heißt alles im Universum, die kältesten Eisberge und Materie in den dunkelsten und tiefsten Weiten des Welt-raums inklusive – emittiert elektromagnetische Energie. Bei höheren Temperaturen bevorzugt der ausgestrahlte elektromagnetische Energiemix die kürzeren Wellenlängen des Lichts. Niedrigere Temperaturen bevorzugen längere Wellen. Die Sonne mit ihrer durchschnittlichen Oberflächentemperatur von circa 5500 °C erreicht ihre Spitzenwerte in den Frequenzen des sichtbaren Lichts, wie auch alles andere in ähnlichen Temperaturbereichen. Derweil strahlt fast alles auf der Erde, einschließlich unserer 37 °C warmen Körper und der Oberfläche des Planeten selbst, überwiegend im langwelligen (unsichtbaren) Infrarotfrequenzbereich. Deshalb kann sich das Lagerfeuer vom Abend zuvor sogar noch am nächsten Tag warm anfühlen, auch wenn es nicht mehr erkennbar glüht. Während der einst rotglühend heiße Haufen sich abkühlt, verschiebt sich die Spitzenfrequenz des davon ausgesendeten Lichts in die langwelligeren Bereiche und verlässt letztendlich das sichtbare Spektrum. Die Holzkohle bleibt dennoch kuschelig warm, durchflutet von Infrarotenergie noch lange genug, nachdem Sie sich mit den letzten gerösteten Marshmallows den Bauch vollgeschlagen haben.

Ist Ihnen schon einmal aufgefallen, dass die wärmste Zeit des Tages einige Stunden nach der Mittagsstunde liegt, und nicht etwa dann, wenn die Sonne am höchsten steht? Das gleiche Infrarotlicht, das wir bei der Holzkohle am Lagerfeuer fühlen, aber nicht sehen können, sorgt für diese Brut-

hitze an heißen Sommernachmittagen. Die Atmosphäre absorbiert einen Teil des Infrarotlichts der Sonne und überträgt den Rest an die Erdoberfläche. Die stärkste Wirkung des Sonnenlichts erfolgt allerdings über das sichtbare Licht, das unsere Atmosphäre unbeschadet durchdringt. Die ebenso simple wie tiefgründige Tatsache, dass unsere Atmosphäre für sichtbares Licht durchlässig ist, ist der Grund, der es uns überhaupt erst ermöglicht, die Sonne, den Mond und die zahllosen Sternbilder zu sehen.

Geringe Anteile des kurzwelligeren UV-Sonnenlichts durchdringen die Atmosphäre ebenfalls – und sogar die Wolken, weshalb besonders hellhäutige Menschen selbst an bedeckten Tagen Sonnencreme auftragen, um sich vor Sonnenbrand und im Extremfall Hautkrebs zu schützen. Wenn wir das Gesicht zur Sonne wenden, treffen das sichtbare und das UV-Licht auf die Moleküle in unserer Haut, regen dort Elektronen an, verwandeln diese Bewegung in Wärme und emittieren dann diese Wärme in Form von Infrarotstrahlung. In ähnlicher Weise werden Moleküle auf der Erdoberfläche, sobald sie die Strahlung in den verschiedenen Wellenlängen absorbieren, in Infrarotstrahlung umgewandelt und vom Erdboden wieder abgestrahlt. Diese Infrarotenergie strahlt damit wieder zurück durch die Atmosphäre und erwärmt die Luft, die Infrarotstrahlung absorbiert. Ein Julitag kommt uns nicht deshalb besonders heiß vor, weil die Sonne die Luft von oben erwärmt, sondern weil der Erdboden die Luft von unten erwärmt. Aus diesem Grund befindet sich der wärmste Bereich der Troposphäre unmittelbar über der Erdoberfläche.

Auf seiner Reise zurück ins Weltall kollidiert der Großteil der von der Erde emittierten Infrarotstrahlung mit bestimmten Molekülen in der Atmosphäre, deren Bindungen zur Folge haben, dass sich die Moleküle bei Kontakt mit Infrarotstrahlung ausdehnen und vibrieren und die Strahlung absorbieren. Wenn diese Moleküle die Energie aufgenommen haben, strahlen sie sie in sämtliche Richtungen wieder ab, auch zurück in Richtung Erde, wo die Energie ein weiteres Mal absorbiert und erneut emittiert wird. Diesen fortdauernden, immer hin und her pendelnden Zyklus bezeichnen wir als Treibhauseffekt. Derselbe Effekt stellt sich, in kleinerem Maßstab, auch in echten Treibhäusern ein, oder auch in Autos bei geschlossenen Fenstern. Sichtbares Sonnenlicht durchdringt das transparente Glas und wird im Inneren in Infrarotlicht verwandelt, das dann von ebendiesen Fenstern, die

das sichtbare Licht durchließen, am Entweichen aus dem Treibhaus beziehungsweise dem Autoinnenraum gehindert wird. Dadurch wird die Temperatur im Innenraum deutlich höher als die Umgebungstemperatur im Freien, und so entsteht ein lokal begrenztes Mikroklima, das für tropische Pflanzen angenehm ist, für im Auto eingeschlossene Haustiere oder Kinder aber tödlich sein kann. Sofern Sie nicht gewohnheitsmäßig Hibiskuspflanzen oder Geigenfeigen durch die Stadt kutschieren, empfiehlt es sich wärms-

Tatsächlich profitiert das Leben auf der Erde von einem gemäßigten **Treibhauseffekt**. Ohne diesen würde die Durchschnittstemperatur auf der Erde im **Frostbereich** verbleiben, und die Oberfläche unseres Planeten wäre eine **eisige Tundra**, auf der Leben, wie wir es kennen, gar nicht möglich wäre.

tens, die Fenster selbst dann, wenn sich ein paar Wolken am blauen Sommerhimmel zeigen, zumindest einen Spalt offen zu lassen.

Tatsächlich profitiert das Leben auf der Erde von einem gemäßigten Treibhauseffekt. Ohne diesen würde die Durchschnittstemperatur auf der Erde im Frostbereich verbleiben, und die Oberfläche unseres Planeten wäre eine eisige Tundra, auf der Leben, wie wir es kennen, gar nicht möglich wäre. Zu unserem Glück stabilisiert unsere Atmosphäre die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht größtenteils über Luftströmungen. Auf dem Mond, wo es keine Atmosphäre gibt, pendelt die Oberflächentemperatur extrem zwischen brodelnden 120 °C bei Tag und eisigen minus 130 °C bei Nacht.

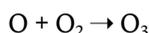
Was also wäre dem armen Ikarus nun wirklich widerfahren? Seine erste Torheit war eine Frage der Aerodynamik: Er hätte es niemals geschafft, überhaupt von Kreta abzuheben. Einen Fingerzeig liefern uns die Engel der Renaissance-malerei – und die Kondore. Beide haben Flügel, und beide dürften in etwa gleich viel wiegen. Aber Kondore können tatsächlich fliegen, ganz ohne die Hilfe der bildenden Künste. Wenn ein solcher kindlicher Engel fliegen wollte, bräuchte er eine Flügelspannweite von rund 3 Metern, wie der Kondor. Und wenn wir das nun auf das Gewicht eines erwachsenen Menschen hochrechnen, hätte Ikarus ungefähr zehnmal größere Flügel gebraucht – und eine entsprechende Brustmuskulatur, um ordentlich mit den Flügeln schlagen

zu können. Das Ende vom Lied: Schon beim Versuch, vom Boden abzuheben, wäre er einfach auf die Nase gefallen.

Aber selbst davon abgesehen: Wäre Ikarus näher zur Sonne aufgestiegen, wären seine Flügel nicht etwa geschmolzen – die Kälte hätte ihm beim Aufstieg so zugesetzt, dass er den tödlichen Absturz dennoch nicht mehr hätte vermeiden können. 1920 lieferte der renommierte Astrophysiker Sir Arthur Eddington eine wohlmeinendere Interpretation dieser Legende: »Vielleicht muss man ein gutes Wort für Ikarus einlegen ... Ich stelle ihn mir vor als den Mann, der zweifellos einen Konstruktionsfehler in den Flugmaschinen seiner Epoche offengelegt hat.«

JENSEITS DER TROPOSPHÄRE

Die Troposphäre (eine schematische Darstellung der einzelnen Atmosphärenschichten finden Sie auf Seite 171), vom griechischen Wort *tropé*, was »Veränderung« oder »Wendung« bedeutet, zeichnet sich nicht nur durch das veränderliche Wetter aus, sondern auch, und das ist bemerkenswert, durch ihre Tendenz, mit zunehmender Höhe an Temperatur zu verlieren. Die nächste Schicht unserer Atmosphäre, die Stratosphäre, weist eine exakt gegenteilige thermische Eigenschaft auf: Je höher wir in der Stratosphäre steigen, desto wärmer wird es. Dort muss es etwas geben, das Energie absorbiert, also die Vibrationsrate der Luftmoleküle steigert. Und wer ist der Schuldige? Die Stratosphäre ist die Heimat der Ozonschicht – die Region stark konzentrierter dreiatomiger Sauerstoffmoleküle (O₃), die fast die gesamte besonders schädliche ultraviolette Strahlung der Sonne aufnimmt. Ein Ultraviolettphoton trägt exakt die Energie, die es braucht, um ein Ozonmolekül aufzuspalten, was O₃ in O₂ plus O verwandelt. Kurioserweise spaltet anschließend dasselbe ultraviolette Licht auch O₂ weiter auf, und wir haben zwei einzelne Sauerstoffatome, O plus O, die sich dann erneut mit einzeln umherschwirrenden O₂-Molekülen zu dem zuvor verlorengegangenen Ozon verbinden können:





Der Mond geht über der orangefarbenen Troposphäre auf – dem niedrigsten und dichtesten Teil der Erdatmosphäre –, der an der Tropopause endet, der Grenze zwischen der orangefarbenen und der blauen Atmosphäre

Mit anderen Worten: Das wilde Wechselspiel der Zerstörung und Neubildung von Molekülen in der Ozonschicht hält diese im Gleichgewicht mit dem von der Sonne einfließenden UV-Licht. Gäbe es diese Schutzschicht nicht, würde die UV-Energie der Sonne an der DNA sämtlichen Lebens auf der Erdoberfläche unermesslichen Schaden anrichten.

Die nächsthöhere Schicht, die Mesosphäre, ist die Region, in der Meteoroiden verbrennen und uns das spektakuläre Schauspiel der Sternschnuppen bescheren. Darüber liegt die Thermosphäre, innerhalb der die Internationale Raumstation ISS und Tausende weitere Satelliten die Erde umkreisen. Die Thermosphäre hat zwar nur ein Millionstel der Dichte von Luft auf Meereshöhe, dafür findet dort am meisten solare Aktivität statt. Diese Schicht ist die Region, in der sich das wunderschöne Phänomen der Nordlichter und Südlichter abspielt: *aurora borealis* beziehungsweise *aurora australis*.

Die Thermosphäre heißt so – *thermo* kommt ebenfalls aus dem Griechischen und bedeutet »heiß« –, weil sie in einer Hinsicht die heißeste aller

dieser Schichten ist. Wir messen Temperatur anhand molekularer Vibrationen, und wir messen Hitze, indem wir die Vibrationsenergie aller jeweils vorhandenen Moleküle zusammenzählen. Moleküle vibrieren in dieser oberen Schicht am schnellsten. Doch diese Moleküle sind so dünn gesät, dass man sie auf dem menschlichen Körper kaum bemerken würde. Wenn Sie der Thermosphäre einen Besuch abstatten, ohne vorher in einen Raumanzug zu schlüpfen, sind Sie vermutlich aufgrund des Sauerstoffmangels erstickt, bevor Sie dazu kommen, nennenswerte Hitze zu verspüren.

Jenseits der Außenbezirke der Thermosphäre liegt die Exosphäre, die letzte, äußerste Schicht unserer Atmosphäre, die viel weiter reicht als alle anderen genannten Sphären zusammen und nur noch aus winzigen Mengen atmosphärischer Moleküle besteht.

DAS GEWICHT DER LUFT

Haben Sie je etwas als »luftig-leicht« beschrieben? Wenn ja, dachten Sie dabei ganz bestimmt nicht daran, wie schwer Luft in Wirklichkeit ist. Ja, die Luft hat Gewicht, und nicht zu knapp. Wir bezeichnen dieses Gewicht als Luftdruck. Da drängt sich die nächste Frage förmlich auf: Was ist Druck?

Druck macht sich in unserem Alltag ständig in wichtigen und unwichtigen Dingen aller Art bemerkbar. Wie scharf sind Ihre Küchenmesser? Wie bequem ist der Stuhl, auf dem Sie gerade sitzen? Wieso schmerzen High Heels an den Füßen so viel mehr als flache Schuhe? Druck ist, physikalisch ausgedrückt, schlicht Kraft (das Gewicht eines beliebigen Objekts, also des Küchenmessers, Ihres Gesäßes auf dem Stuhl, Ihres ganzen Körpers) dividiert durch die Fläche (die Schneide des Messers, das Kissen, in dem ihr Hintern seine Konturen hinterlässt, Ihre eingezwängten Zehen), über die sich diese Kraft verteilt. Anders ausgedrückt: Je kleiner die Fläche, desto höher der Druck, den eine gegebene Kraft ausübt.

Angenommen, Sie müssten einen zugefrorenen See überqueren: Wie stellen Sie das an? Sie bringen genau dieses Prinzip zur Anwendung. Menschen mit besonders kleinen Füßen sind viel eher gefährdet, im dünnen Eis einzubrechen, als Menschen, die dasselbe wiegen, aber Schneeschuhe an den Füßen haben, die ihr Gewicht über eine größere Fläche verteilen. Sie

trauen dem Frieden noch immer nicht? Die besten Chancen haben Sie, wenn Sie sich flach auf den Bauch legen, langsam vorwärts robben und dabei stets ihr gesamtes Gewicht über die Fläche ihres ausgestreckten Körpers verteilen, genau wie der Eisbär auf dem Foto unten.

Wenn das Gewicht der Luft Luftdruck verursacht, bedeutet dies, dass Luft eine messbare Kraft ausübt. Stellen Sie sich vor, Sie befinden sich auf Meereshöhe – etwa am Strand vor Ihrer Haustür, wenn Sie an der Küste wohnen – und haben eine leere Glassäule mit einer Grundfläche von 1×1 Zoll (etwa $2,5 \times 2,5$ Zentimeter) bei sich. Platzieren Sie das eine Ende der Säule auf den Boden und lassen Sie das obere Ende wie von Zauberhand in die Höhe wachsen, wie im Märchen *Hans und die Bohnenranke*, bis hinauf zur äußeren Grenze der Erdatmosphäre. Damit haben Sie, wie mit einem überdimensionalen Plätzchenausstecher, eine lange, gasgefüllte Säule ausgeschnitten. Die gesamte Luft in dieser Säule wiegt knapp 7 Kilogramm. Damit lasten also 7 Kilo auf jedem Quadratzoll Ihres Körpers, jeden Tag, rund um die Uhr. Würde aber jemand ein 7-Kilogramm-Gewicht auf jeden Quadratzoll Ihres Körpers legen, dann würden Sie vermutlich keine Luft mehr bekommen, so schwer drückte das Gewicht auf Ihre Brust. Was geht da vor sich? Wie kann der Mensch unter solch enormem Druck überhaupt überleben?



Ein Eisbär begreift intuitiv die Physik, die es braucht, um sich in der Gegend um das Arctic National Wildlife Refuge in North Slope, Alaska, sicher übers Packeis zu bewegen

In Flüssigkeiten breitet sich Druck in alle Richtungen aus, nicht bloß senkrecht nach unten. Auch wenn es seltsam anmutet: Luft gilt in diesem Sinn als Flüssigkeit. Eine Flüssigkeit nimmt *per definitionem* die Form des sie umgebenden Gefäßes an – das tun offensichtlich alle Gase und Flüssigkeiten. Der Luftdruck, der auf Ihrem Körper lastet, muss sich mithin in alle Richtungen manifestieren, wie bei jeder Flüssigkeit. Der Druck nach unten ist derselbe wie der Druck nach oben, zur Seite und in jede andere Richtung. Im Endeffekt neutralisieren sich alle diese Kräfte, und unter der Voraussetzung, dass Sie Luft in den Lungen haben, werden Sie vom Gewicht der Luft absolut nichts spüren.

Was geschieht nun, wenn wir die ausgleichenden Kräfte irgendwie wegnehmen könnten? Wenn Sie sich jemals eines Saugnapfs bedient haben, haben Sie genau dieses Experiment durchgeführt. Drücken Sie einen Saugnapf auf eine harte, glatte Oberfläche, so werden Sie feststellen, dass sie ihn nur schwer wieder abziehen können. Das ist ja auch Sinn und Zweck eines Saugnapfs. Je größer die Fläche des Saugnapfs, desto schwerer bekommen Sie ihn von der glatten Oberfläche wieder weg, obwohl kein Klebstoff oder irgendeine andere haftende Substanz im Spiel ist.

Warum? Weil die Sogwirkung als solche keine Kraft ist, sondern die Reaktion des atmosphärischen Drucks auf ein Vakuum. 7 Kilogramm pro Quadratzoll Luftdruck drücken nun den Saugnapf aus Gummi auf seine glatte Unterlage, wodurch ein Vakuum entsteht und jede ausgleichende Kraft dahinter aufhebt. Wenn Ihr Saugnapf also eine Fläche von 10 Quadratzoll hat, bekommen Sie es mit zehn entsprechenden Säulen Atmosphärendruck zu tun. Sie müssten nun also $10 \times 7 = 70$ Kilogramm anheben, um den Saugnapf von seiner Unterlage zu lösen – ungefähr das Gewicht eines erwachsenen Menschen.

Da der Luftdruck gleichmäßig in alle Richtungen wirkt, funktioniert auch der Saugnapf in jeder Ausrichtung. In vielen Gangsterfilmen trägt der raffinierte Einbrecher Schuhe und Handschuhe mit Saugnäpfen, und klettert damit Wände hoch und an der Decke entlang, um unerkannt zu bleiben oder das Auslösen der Laser-Alarmanlage zu vermeiden. Idealerweise pumpt irgendein angeschlossener Mechanismus Luft in die Saugnapfschuhe und auch wieder heraus, damit unser Filmheld nicht jedes Mal 70 Kilo an Kraft aufwenden muss, um einen Schritt voranzukommen.

Aber Flüssigkeiten können noch weit mehr als nur die Form ihres umgebenden Gefäßes annehmen. Eine weitere ihrer bemerkenswerten Eigenschaften ist die Auftriebskraft. Etwa im Jahr 250 vor unserer Zeitrechnung soll der griechische Mathematiker Archimedes von Syrakus sein berühmtes »Heureka!« (Ich hab's gefunden!) ausgerufen haben, nachdem er bei einer entspannten Stunde in einem der öffentlichen Badehäuser des antiken Griechenlands in seiner Badewanne die Auftriebskraft entdeckt hatte.

Der alten Legende zufolge heuerte der König von Syrakus einen Goldschmied an, der ihm eine Krone aus einem Goldklumpen fertigen sollte, den der König zuvor abgewogen hatte. Der Goldschmied hatte den Auftrag alsbald erledigt. Der König, misstrauisch und habgierig, wie er war, wollte sichergehen, dass der Goldschmied nicht einen Teil des Goldes für sich abgezweigt und durch weniger wertvolles Silber ersetzt hatte. Daher wandte er sich an seinen als Mathematiker hoch angesehenen Cousin Archimedes, damit dieser eine Strategie entwickeln sollte, mit der sich die Unverfälschtheit der Goldkrone und die Ehrlichkeit des Goldschmieds überprüfen ließe. Und wo ließe sich über ein solches Rätsel besser nachdenken als in der Badewanne? Nachdem er mit dem ganzen Körper in die volle Wanne eingetaucht war, konstatierte Archimedes wenig überraschend, dass die Wanne überlief, was ihm die Erkenntnis verschaffte, dass das Volumen des überlaufenden Wassers gleich dem Volumen seines eingetauchten Körpers ist.

Da Archimedes das ursprüngliche Gewicht des Goldes kannte und jetzt auch wusste, wie man das Volumen eines unregelmäßig geformten Gegenstandes ermittelt, konnte er durch Vergleichen der Dichte die Reinheit oder Unreinheit des Materials feststellen. Die Dichte ist die Masse eines Objekts (beziehungsweise in diesem Fall das spezifische Gewicht), geteilt durch das Volumen (die Größe). Archimedes beschaffte sich einen Klumpen reinen Silbers und einen entsprechenden Goldklumpen, beide von der gleichen Masse (beziehungsweise vom gleichen Gewicht) wie die Krone. Er tauchte den Goldklumpen in eine mit Wasser gefüllte Schüssel und maß, wie viel Wasser dieser Klumpen verdrängte. Dann wiederholte er das Ganze mit dem Silberklumpen und verglich die ermittelten Wassermengen. Da Silber weniger Dichte aufweist als Gold, war der Silberklumpen größer und verdrängte entsprechend mehr Wasser als der gleich schwere Goldklumpen. Zum Schluss tauchte Archimedes die königliche Krone in die gleiche Was-