

THORSTEN DAMBECK

# PLANETEN — WELTEN







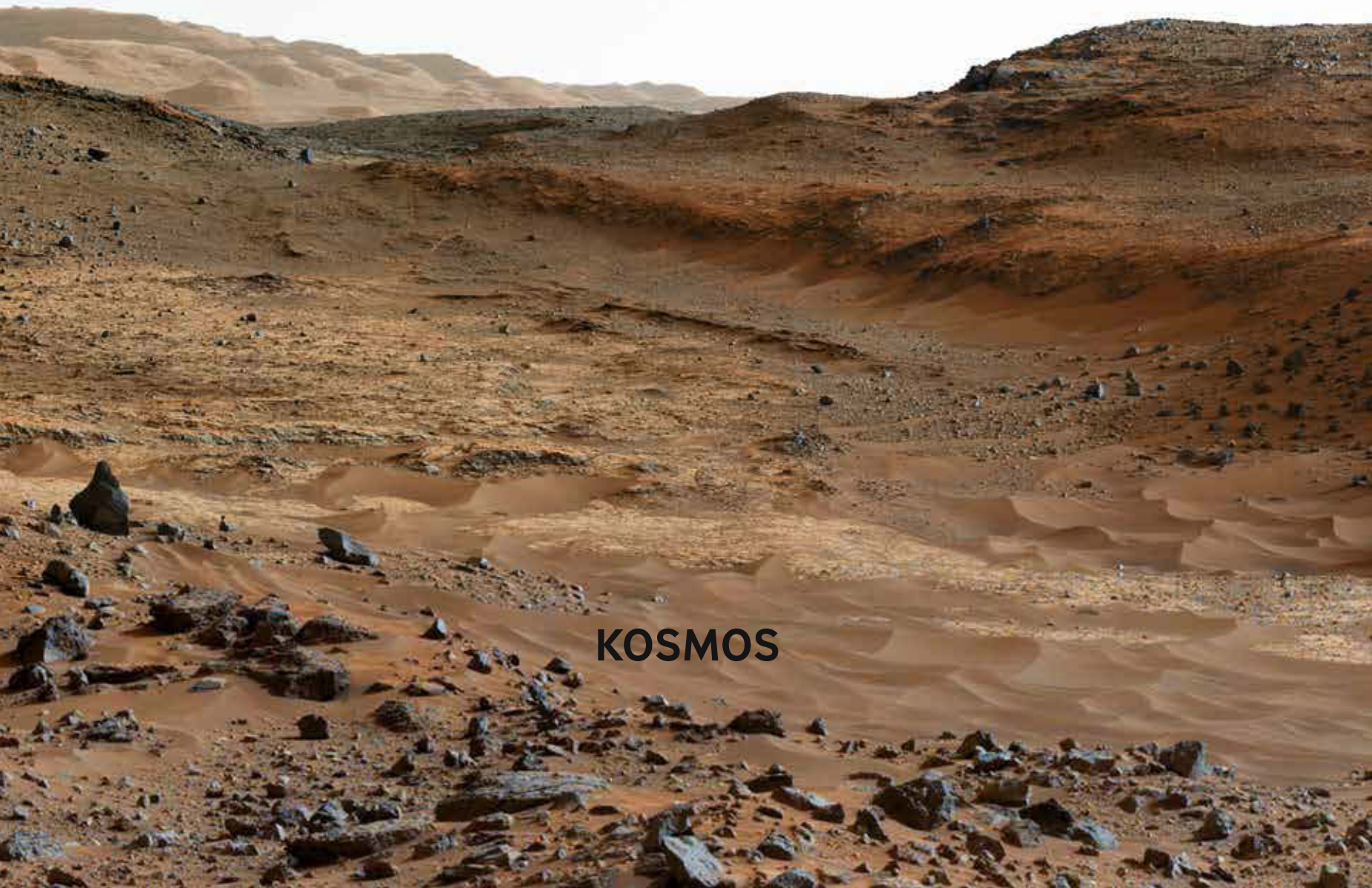
# PLANETEN — WELTEN

IN DEN TIEFEN  
DES SONNENSYSTEMS

---

THORSTEN DAMBECK

KOSMOS



# INHALT



Wandernde Welten  
am Nachthimmel 8

## 1 DER TAGESSTERN 12

Das Zentrum des  
Sonnensystems 14

Die Korona der Sonne 18

Ein Paternoster  
für Sonnenplasma 24

Das Fusionsfeuer  
im Sonnenkern 27

Der Wind der Sonne 31

## 2 GESTEINS- PLANETEN 34

Die Geschwister der Erde 36

Der mondähnliche Merkur 38

Die verschleierte Venus 48

Aktive Feuerberge  
auf der Venus? 56

Der blaugraue  
Doppelplanet 58

Das Rätsel der warmen  
Urerde 68

Der Erdmond 70

Die dunklen Oasen  
des Mondes 78

Mars, unser roter Nachbar 80

Der Mythos des Roten  
Planeten 82

Der Fund neuer  
Marskanäle 92

Wetterberichte vom Mars 94

Lebensspuren in  
der Marsluft? 98

## 3 KLEINKÖRPER 102

Ceres, der größte  
Kleinplanet 104

Vesta, der hellste  
Kleinplanet 108

Die Fahndung nach  
neuen „Planeten“ 112

Große Kometen-  
erscheinungen 116

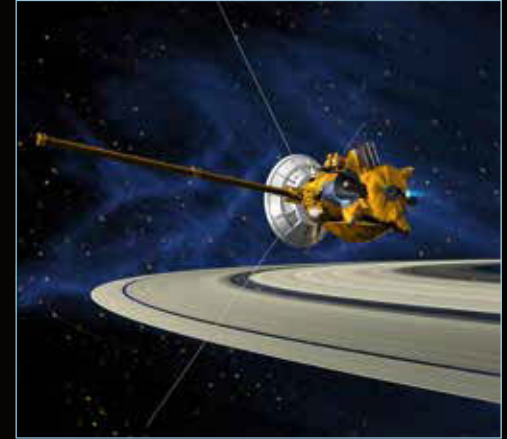
Rosettas Ziel –  
ein poröser Klumpen 120

Die kosmische  
Badeente 123

Odyssee über  
den Kometen 125

Kometenchemie 128

Kometen als  
Lebensspender? 130



## 4 GASPLANETEN

132

Das Reich der äußeren Planeten	134
Jupiter, der Riese aus Gas	136
Jupiters magnetisches Doppelherz	144
Jupiters Mondsystem	146
Heißer Vulkanmond Io	148
Europa, astrobiologische Wundertüte	151
Ganymed und Kallisto	154
Saturn, der beringte Planet	156
Mondfabrik Saturnringe	164
Titan – ein erdähnlicher Exot	166
Eisschleuder Enceladus	170
Uranus, der kälteste Planet	174
Neptun, Planet der Stürme	178

## 5 FERNE EISWELTEN

182

Der degradierte Pluto	184
Kleine Körper hinter Neptun	194
An der Grenze zu den Sternen	198

## 6 PLANETEN-FORSCHUNG

202

Roboter im Sonnensystem	204
Weltraumsegler auf großer Fahrt	212
Planetenwelten der Galaxis	214
Register	220
Bildnachweis	223
Impressum	224



# VORWORT

Planetenforschung war seit jeher spannend, besonders faszinierend aber war sie in den vergangenen zwei Jahrzehnten. In dieser Zeit lag der Schwerpunkt auf der Erkundung des Mars und des äußeren Sonnensystems. Während Orbiter den Roten Planeten in einer enormen Detailfülle abbildeten, erkundeten Marsrover auf ihren Fahrten weite Gebiete seiner Oberfläche. Missionen zu Asteroiden und Kometen, die Boten aus dem äußeren Sonnensystem und Zeugen der Planetenentstehung sind, zeigten diese Körper erstmals aus unmittelbarer Nähe. Ein Höhepunkt war zweifellos die fantastische Ausbeute der ROSETTA-Mission. Die Sonden GALILEO und CASSINI-HUYGENS erforschten im Detail das Jupiter- und Saturnsystem und NEW HORIZONS stieß bis zum Pluto vor. Sie funkte spektakuläre Bilder von einem äußerst aktiven Zwergplaneten – selbst Experten hatten ihn bis dato für eine langweilige, durchgefrorene Eiskugel gehalten.

Für mich persönlich war die Erforschung des Saturnsystems mit dem Team von CASSINI-HUYGENS eine unvergessliche Erfahrung. Diese Mission, sowohl von der NASA als auch von der ESA durchgeführt,

war schon deshalb besonders, da hier ein außergewöhnlich internationales Forscherteam zusammenkam, in dem europäische und nordamerikanische Wissenschaftskultur aufeinandertrafen. Jedes der mehrmals jährlich stattfindenden Treffen vibrierte vor Entdeckergeist. Mit gutem Grund: Schließlich erkundete man, ebenso wie die frühen Entdecker, eine „Terra incognita“, ein unbekanntes Land.

Zwar hatten zuvor wenige eilig vorbeifliegende Raumsonden bereits erste Eindrücke vom Saturnsystem erhascht. Aus der Umlaufbahn hatten wir nun aber genügend Zeit, die wohl vielseitigste Umgebung des Sonnensystems zu studieren. Anstelle unserer eigenen Sinne fungierte das vielfältige Sensorium einer mit zwölf Detektoren ausgestatteten Raumsonde. Die Faszination, die ich mir in meinen jugendlichen Planetenforscherträumen ausgemalt hatte, stellte sich tatsächlich fast genauso ein: Wir beobachteten den gewaltigen Wirbelsturm an Saturns Nordpol und sein Ringsystem, das im Tanz mit den kleinen Monden Wellen schlägt. Erstmals landeten wir mit HUYGENS an den Küsten der Methanseen des in trüben Nebel gehüllten Titan-



mondes und erspähten andere Trabanten, von denen einer seinen Atem aus Eis und Gas in den schwarzen Weltraum spuckte.

Die Auswürfe dieses kleinen Mondes namens Enceladus konnten wir mit unseren Instrumenten „schmecken“, und es stellte sich heraus, dass sie gefrorene Tröpfchen aus einem gewaltigen Ozean unter der Eiskruste des Mondes enthalten, an dessen Grund womöglich heiße Quellen sprudeln. Enceladus ist nur einer der Ozeanmonde, die in den letzten Jahren entdeckt wurden. Die GALILEO-Sonde fand bereits um die Jahrtausendwende Hinweise auf solche Tiefenmeere bei drei großen Jupitermonden, wovon einer, nämlich Europa – ähnlich wie Enceladus –, möglicherweise Hydrothermalquellen und Eisvulkane besitzt. Letztere könnten auch hier einen vergleichsweise einfachen Zugang zur Erforschung eines potenziellen Lebensraumes bieten.

Die Erforschung der Ozeanmonde und die Suche nach Leben dort wird ein wichtiger Schwerpunkt der Raumfahrt der nächsten Jahrzehnte sein. NASA und ESA schicken mit dem EUROPA CLIPPER und

mit JUICE jeweils große Missionen ins Jupitersystem. Ebenso werden verschiedene Szenarien untersucht, mit denen man nach Lebensspuren in den Eisvulkanen von Enceladus fahnden könnte. Weitere Erkenntnisse über die Lebensfreundlichkeit von Planetensystemen werden die beobachtenden Astronomen liefern. Zwar hatten sie sich weitgehend aus der Planetenforschung verabschiedet und sich weiter entfernten Objekten zugewandt. Mit der Entdeckung von mehr und mehr extrasolaren Planetensystemen hat sich das Blatt aber wieder gewendet. So werden sich die Erkenntnisse „raumfahrender“ und beobachtender Planetenforscher ergänzen und die große Frage nach der Lebensfreundlichkeit des Kosmos schließlich beantworten. Wie die Antwort auch lauten wird: Die Planetenwelten bleiben ein Faszinosum, das jeden, Experte oder Laie, jung oder alt, in den Bann ziehen kann.

***Dr. Frank Postberg** ist Planetologe und im Wissenschaftlerteam mehrerer internationaler Missionen vertreten. Sein Lieblingsmond ist der Saturnmond Enceladus, der es auch auf den Schutzumschlag dieses Bildbandes geschafft hat.*

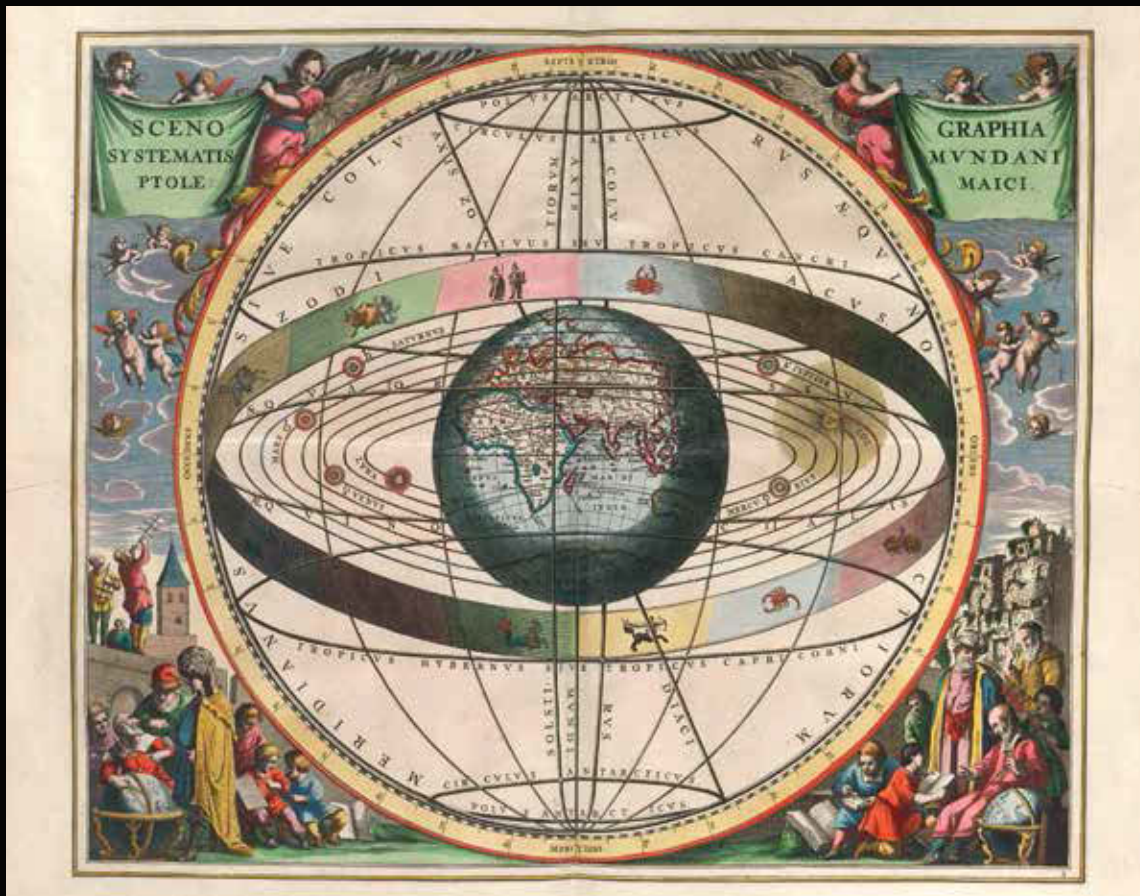


# WANDERENDE WELTEN AM NACHTHIMMEL

Schon die alten Gelehrten wussten, dass unter den tausenden Sternen des Nachthimmels einige wenige besonders sind. Diese lassen sich nicht in starre Sternbilder sperren, sondern sie bewegen sich innerhalb weniger Wochen zwischen den anderen, scheinbar festgenagelten Fixsternen. Das sind die Planeten.

Der Begriff „Planet“ entstammt dem Altgriechischen und bedeutet so etwas wie umherschweifen. Eingedeutet werden die Planeten noch heute manchmal als Wandelsterne bezeichnet. Neben Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn zählte man bis in die Neuzeit den Mond und – als Tagesstern – auch die Sonne hinzu. Der Aufschwung der Astronomie in der Renaissance läutete das Ende des geozentrischen Weltbildes ein. Naturforscher nutzten die neu erfundenen Fernrohre, um diese auch zum Himmel zu richten. Dabei sahen sie, dass die alt-

hergebrachte Theorie unhaltbar war. Als Zentrum des Weltalls hatte die Erde ausgedient; ihrer hervorgehobenen Stellung beraubt, musste sie sich in den Kreis der Planeten fügen. Der Mond verließ als Erdbegleiter die Planetengruppe, ebenso die Sonne, die nun als neue Mitte im Sonnensystem fungierte. Und die Wissenschaft schritt jetzt schneller voran: Johannes Kepler erkannte, dass die Planeten nicht auf Kreisen, sondern auf Ellipsen das Zentralgestirn umrunden, und Isaac Newton erklärte ihre Bewegung durch die Schwerkraft.



## ← Wer umkreist wen?

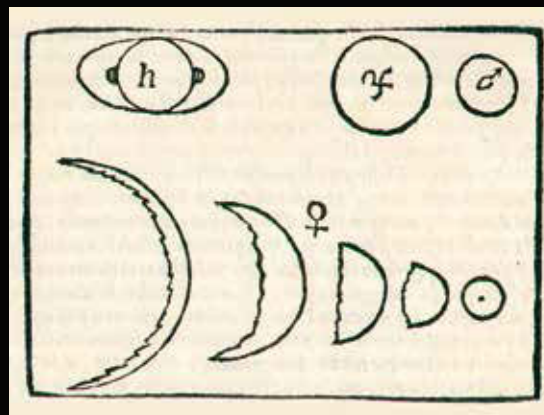
Die Erde steht im Zentrum, die Himmelskörper umkreisen sie – so lehrte es das geozentrische Weltbild. Bereits in der Antike entstand diese Idee vom Weltaufbau. Erst die Astronomen der Renaissance erkannten, dass der Sonne die Ehre der zentralen Position gebührt und die Erde nur einer von mehreren Planeten ist. Im Jahr 1660 hat der deutsch-niederländische Astronom Andreas Cellarius in seinem Sternatlas *Harmonia Macrocosmica* eine schöne Darstellung des langlebigen Irrtums publiziert – von innen nach außen umkreisen die Erde demnach: Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter und Saturn; Uranus und Neptun wurden erst deutlich später entdeckt.



## ENTDECKUNGEN FERN DER SONNE

Das innere Sonnensystem, also die Region nahe der Sonne, stellt sich seit Jahrhunderten im Wesentlichen unverändert dar – vier Welten, gewissermaßen erdähnlich, ziehen dort ihre Umlaufbahnen: die „terrestrischen“ Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars. Außen bestehen sie aus Fels, innen haben sie Kerne aus Metall. Die Erde trennen durchschnittlich 149,6 Millionen Kilometer von der Sonne, diesen Abstand nennt man eine „Astronomische Einheit“; der Abstand Erde – Sonne beträgt also kurz 1 AE. Näher an der Sonne kreisen die Venus und der sonnennächste Planet Merkur. Sein Sonnenabstand beträgt lediglich 0,39 AE. Jenseits der Erdbahn bewegt sich der Mars in etwa 1,52 AE Sonnendistanz. Nur drei Monde begleiten die inneren Planeten, der Erdmond ist mit Abstand der größte.

Weiter von der Sonne entfernt trifft man auf Jupiter. Mit ihm beginnt das äußere Sonnensystem, seine 318 Erdmassen machen ihn zum massereichsten Planeten. Jupiters gewaltige Atmosphäre, hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium, reicht tausende Kilometer tief. Planetologen nehmen an, dass in seinem Zentrum außerdem Gesteinsbestandteile

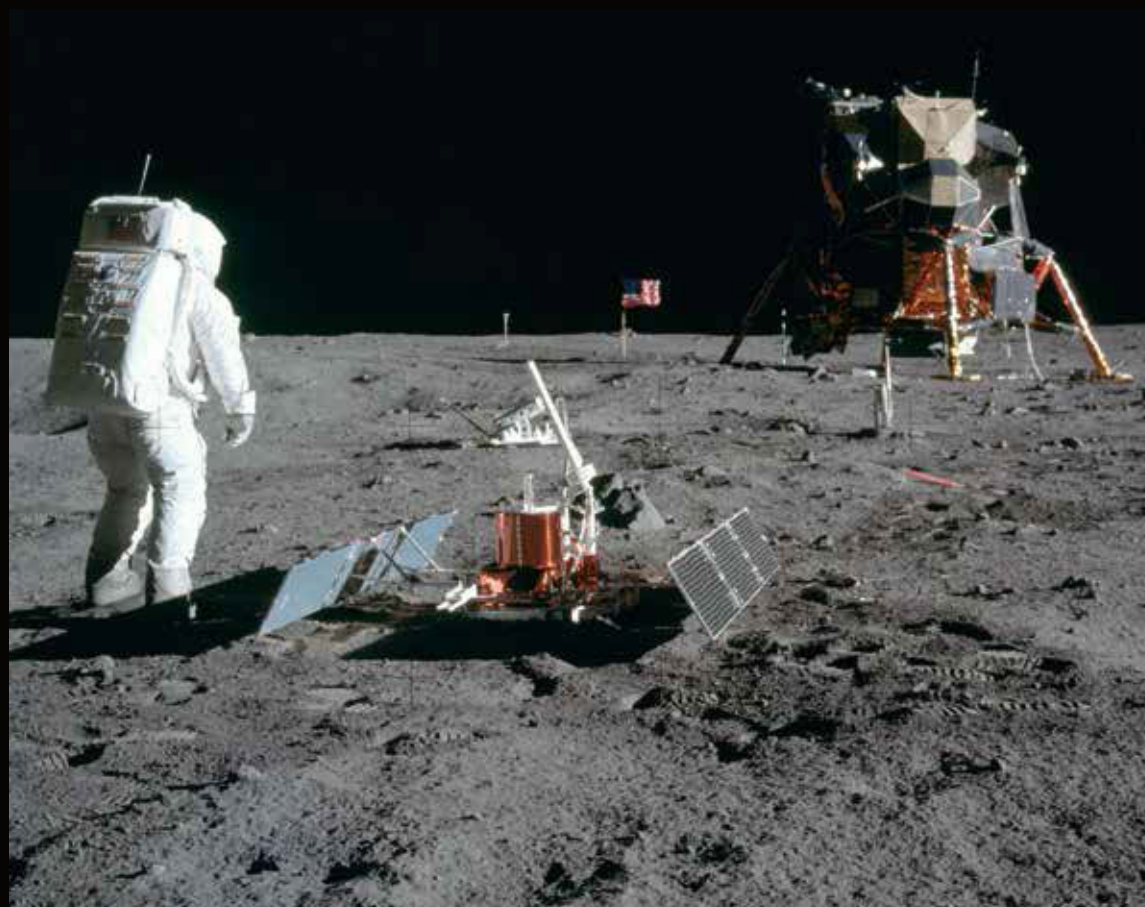


existieren, mehrfach schwerer als die Erde. Anders als die terrestrischen Planeten haben solche Gasriesen keine festen Oberflächen. Das gilt auch für Saturn, der noch weiter von der Sonne seine Bahn zieht, etwa 9,6 AE entfernt.

Mit ihren Teleskopen haben die Astronomen im äußeren Sonnensystem immer wieder neue Himmelskörper aufgespürt. Die Erfolgsserie begann 1610 mit den vier großen Monden des Jupiter, die Galileo Galilei in seinem selbstgebauten Instrument

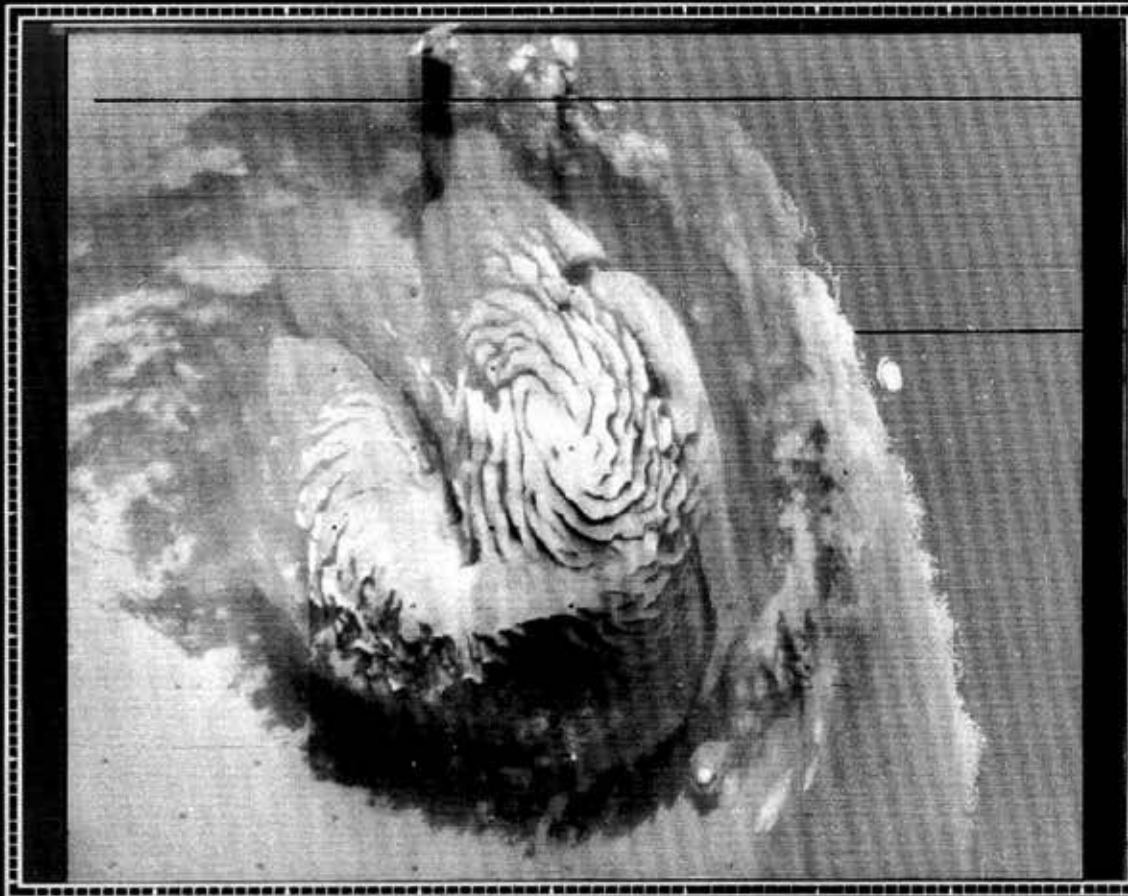
### ← Galileos Planeten

Mit selbstgebauten Teleskopen machte Galileo Galilei Beobachtungen, die mit dem hergebrachten Weltbild unvereinbar waren: Die Venus zeigt wie unser Mond Phasen und ändert ihre scheinbare Größe – kaum verständlich für einen Körper, der um die Erde kreisen soll. Darüber ist rechts der Mars dargestellt, seine unrunde Erscheinung deutet ebenfalls auf unvollständige Beleuchtung hin. In der Mitte sieht man Jupiter und links Saturn. Die Saturnringe waren in den damaligen Fernrohren noch nicht klar erkennbar, Galilei vermutete, dass Saturn „Henkel“ besitze. Die Abbildung stammt von 1623 und zwar aus Galileis Schrift *Il Saggiatore* (die Goldwaage), in der er sich mit der Natur der Kometen auseinandersetzt.



### ← Mondgeschichte

Am 20. Juli 1969 betraten erstmals Menschen einen fremden Himmelskörper. Hier stationiert der Mondfahrer Buzz Aldrin automatische Messgeräte auf der Oberfläche des Trabanten. Im Vordergrund sieht man ein Seismometer. Mit diesem und weiteren Geräten der folgenden APOLLO-Missionen wurden bis 1977 rund 13.000 Mondbeben aufgezeichnet; verglichen mit irdischen Beben sind sie eher schwach und erreichen meist kaum die Stufe 2 der Richterskala. Dahinter steht der Laserreflektor, mit dem gemessen wurde, dass die Distanz Erde – Mond pro Jahr um 3,8 Zentimeter zunimmt. Außerdem: rechts die Landefähre EAGLE und im Bildzentrum das Sternenbanner.



#### ← Mars aus der Nähe

In den 1960er-Jahren rätselten die Planetologen darüber, was sie vom Mars halten sollten: eher leblos wie der Mond oder doch erdähnlich? MARINER 9 war 1971 die erste Raumsonde, die den Roten Planeten aus der Umlaufbahn komplett ablichtete. Die angeblichen Marskanäle, die Astronomen ein Jahrhundert zuvor gesehen und teils als Bauten intelligenter Marsianer interpretiert hatten, tauchten auf den Fotos nirgends auf. Heute ist klar: Im Sonnensystem ist Mars der erdähnlichste Planet. Hier sieht man ein MARINER-Foto seiner nördlichen Polkappe, sie besteht aus Wasser- und Kohlendioxid; entdeckt hatte sie 1666 der italienisch-französische Astronom Giovanni Domenico Cassini.

um den Gasplaneten kreisen sah. Mitte des 17. Jahrhunderts erkannte Christiaan Huygens die Natur der Saturnringe und entdeckte dessen planetengroßen Mond Titan. 1781 dann ein neuer Meilenstein: William Herschel spürte den Uranus auf – den ersten großen Planeten hinter dem schon im Altertum bekannten Saturn. Schließlich wurde 1846 an der Berliner Sternwarte mit Neptun die Gruppe der großen Planeten vorerst komplettiert; mit 30,1 AE Distanz zur Sonne ist Neptun ihr fernster Vertreter. Uranus und Neptun sind größer als die terrestrischen Planeten, jedoch kleiner als die Gasriesen. Sie werden Eisriesen genannt und haben ebenfalls keine feste Oberfläche.

#### NEUER PLANET GEFUNDEN?

Der Boom astronomischer Entdeckungen stellte auch das Bild der Forscher über das Sonnensystem auf den Prüfstand. So schien 1801 mit Ceres zwischen Mars und Jupiter ein neuer Planet gefunden, doch stellte sich bald schon die Lage anders dar, denn zahlreiche weitere Kleinplaneten kreisen in

Ceres' Nachbarschaft. Heute sind über 700.000 bekannt. Meist handelt es sich bei diesen Asteroiden des Hauptgürtels um unförmige Felsbrocken. Übrigens sind die überwiegende Zahl der Meteorite, also Steine, die bisweilen vom Himmel stürzen, ursprünglich Bruchstücke von Körpern dieses Gürtels.

Mit der Entdeckung von Pluto 1930 wiederholte sich dieses Muster. Viele Jahrzehnte lang galt er als neunter Planet, bis in den 1990er-Jahren weitere Körper jenseits von Neptun im sogenannten Kuiper-Gürtel gefunden wurden. Mittlerweile ist klar, dass es dort weit mehr Himmelskörper als im Hauptgürtel gibt und dass Pluto lediglich ihr größtes bekanntes Exemplar ist. 2006 wurde deshalb sein Planetenstatus von der Internationalen Astronomischen Union revidiert, es bleibt also bei einer Planetenzahl von acht. Dafür summiert sich die Zahl der bekannten Planetenmonde auf heute 174, mit steigender Tendenz. Für Körper wie Pluto, Ceres und andere Miniplaneten wurde immerhin eine neue Kategorie geschaffen: die der Zwergplaneten.

## ABENTEUER RAUMFAHRT

Im 20. Jahrhundert waren die Planeten schließlich nicht mehr sonderlich spannend, entfernte kosmische Gefilde faszinierten die Astronomen mehr. Die Wende brach mit den Raumsonden am Ende der 1950er-Jahre an. Beginnend mit einfachen Vorbeiflügen am Mond und den Nachbarplaneten Mars und Venus sind mittlerweile alle acht Planeten von immer leistungsfähigeren Sonden besucht und die meisten aus der Umlaufbahn erkundet worden. Zudem brachten Astronauten fast 400 Kilogramm Mondgestein zur Erde; auch ein halbes Jahrhundert später wird es mit immer besseren Methoden analysiert. Außer auf dem Mond sind unbemannte Sonden auf Venus, Mars und dem weit entfernten Saturnmond Titan gelandet, ebenso wie auf mehreren Kleinkörpern. Über den Mars rollen sogar seit 20 Jahren automatische Fahrzeuge, sie sind mit Messgeräten und Kameras bestückt. All dies hat unser Wissen explodieren lassen und die Planetenforschung ist dabei gleichsam erwachsen geworden. Sie ist

nicht länger nur Anhängsel der Astronomie, sondern heute viel stärker interdisziplinär ausgerichtet mit starken Beiträgen der Geowissenschaften.

Die Astronomen sind jedoch längst nicht abgemeldet. Beispielsweise ist die massenhafte Erfassung erdnaher Asteroiden oder sonnenferner Kuiper-Gürtel-Objekte mit astronomischen Methoden unverzichtbar. Mit Instrumenten wie HUBBLE und dem künftigen JAMES-WEBB-Weltraumteleskop oder dem in Bau befindlichen europäischen 39-Meter-Spiegel ELT in Chile stehen nie dagewesene Möglichkeiten zur Verfügung. Die Erforschung der Planeten ferner Sonnen wird zudem noch sehr lange ausschließlich den Astronomen vorbehalten bleiben. Ihre Erkenntnisse über die mittlerweile zu tausenden bekannten Exoplaneten werden erneut auch den Blick auf unseren heimischen Planeten verändern. Und eine wichtige Frage muss die Wissenschaft außerdem beantworten: Bleibt es bei acht großen Planeten oder sind heute noch unentdeckte Wandelsterne hinter Neptun unterwegs?

### ↓ Jupiters Monde im Fokus

Im Vorbeiflug gelangen den beiden VOYAGER-Sonden erstmals detaillierte Beobachtungen der vier Galileischen Jupitermonde. Obwohl sie vergleichbar groß wie Planeten sind, waren sie zuvor fast völlig unerforscht. Auf dem innersten Mond Io fotografierten die Sonden zahlreiche aktive Vulkane, sie spucken hunderte Kilometer hoch ins Weltall. Diese Montage aus dem Jahr 1979 zeigt im Vordergrund Kallisto, dann folgen Ganymed und der hellgelbliche Mond Europa, unter dessen Eiskruste ein Tiefenmeer existiert. Den rötlichen Vulkanmond Io sieht man hinten links neben Jupiter.



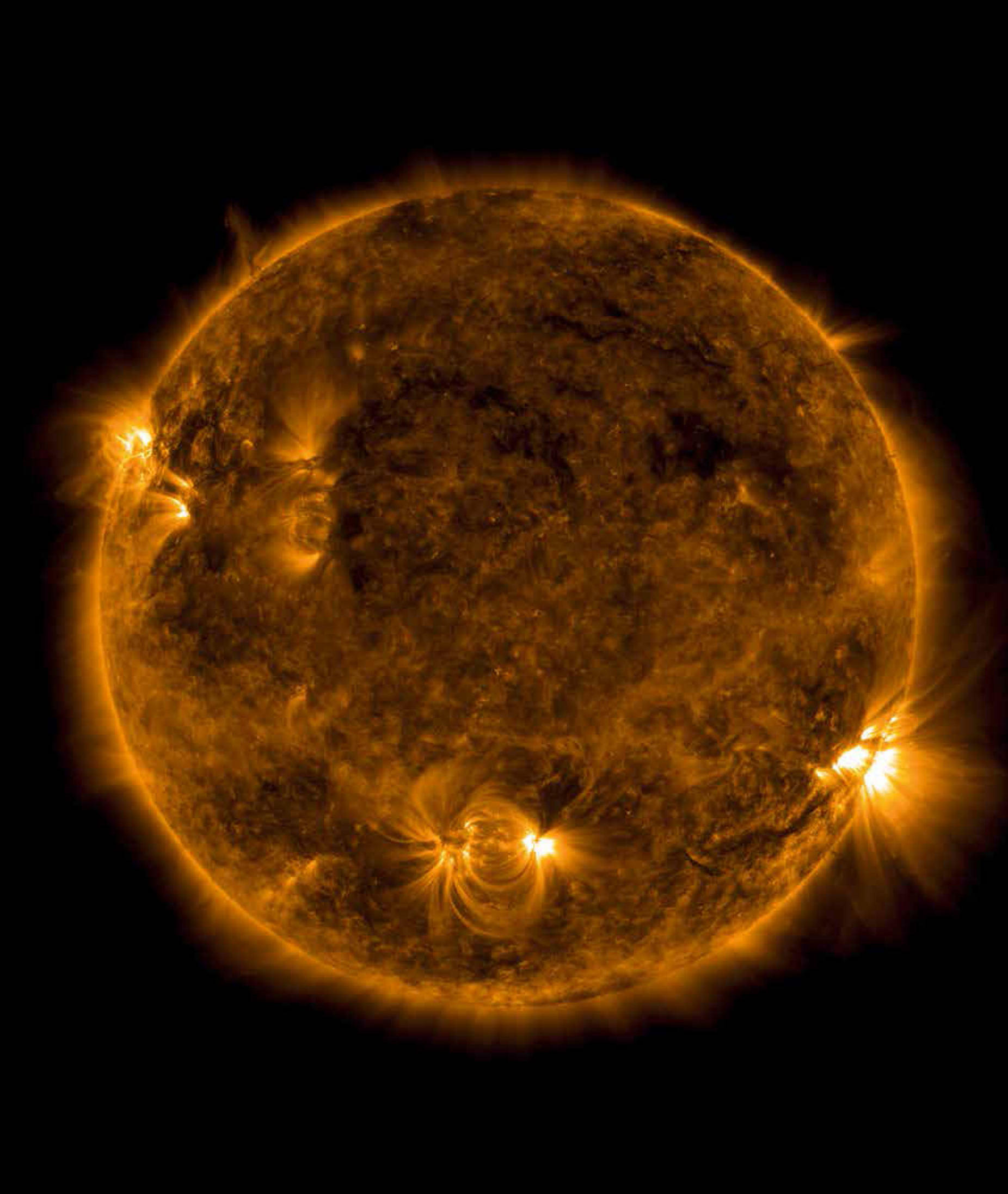


# 1 DER TAGESSTERN

Astronomisch gesehen ist die Sonne der uns nächstgelegene Stern. Ihr Körper beinhaltet 99,8 Prozent der Masse des gesamten Sonnensystems. In regelmäßigen Zyklen schwankt ihre Helligkeit und dunkle Flecken häufen sich auf ihrem Antlitz. Tief im Inneren des Sonnenkörpers arbeitet ein gewaltiger Kernfusionsreaktor, der aus Wasserstoff Helium erzeugt und der die Erde seit Jahrmilliarden mit Licht und Wärme versorgt.

## → Die Sonne im UV-Licht

Ein Blick auf die Sonne im extremen UV-Licht, den der Satellit SOLAR DYNAMICS OBSERVATORY (SDO) der NASA im September 2010 eingefangen hat. In Falschfarben dargestellt, zeigt die Aufnahme die Emission von stark ionisierten Eisenatomen. Sie macht die bogen- und schleifenförmigen Plasmastrukturen über aktiven Regionen der Sonnenoberfläche sichtbar.



# DAS ZENTRUM DES SONNENSYSTEMS

Die Sonne ist mit Abstand der massereichste Körper im Sonnensystem; ihre Anziehungskraft zwingt Planeten, Kleinplaneten und Kometen auf Ellipsenbahnen. Rund acht Minuten benötigt das Licht von ihr zur Erde. Seit Jahrmilliarden schon sorgt unser Tagesgestirn für angenehme Verhältnisse auf unserem Heimatplaneten.

Die Sonne ist ein Stern der „Spektralklasse G“ mit einem Strahlungsmaximum im sichtbaren Bereich bei Wellenlängen von rund 500 Nanometern. Ihre Oberflächentemperatur beträgt 5500 Grad Celsius; verglichen mit anderen Sternen ist das eher Mittelmaß. Wie alle sogenannten Hauptreihensterne erzeugt auch die Sonne ihre Energie im Kern bei Temperaturen um 15 Millionen Grad durch die Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium; ein Vorgang, der als Kernfusion bekannt ist. 14.000 Erdmassen ihres Brennstoffs hat die Sonne im Lauf ihres Lebens bereits zu Helium fusioniert, wobei das Äquivalent von 90 Erdmassen in Energie umgewandelt wurde. In rund sieben Milliarden Jahren wird sich die Sonne zu einem roten Riesenstern aufblähen und dabei einige innere Planeten verschlucken. Ob auch die Erde dieses Schicksal teilen wird, ist noch nicht ganz klar. Schließlich wird die Sonne als weißer Zwergstern enden – kaum größer als die Erde, aber sehr viel heißer als heute.

## SPARSAME SONNE

Die Langlebigkeit der Sonne hängt mit ihrer eher bescheidenen Masse zusammen, denn massearme Sterne haushalten sparsam mit ihren Brennstoffvorräten. Anders die stellaren Schwergewichte: Beteigeuze beispielsweise, der linke Stern in der Schulter des Sternbilds Orion, ist 20-mal massereicher als die Sonne und strahlt 55.000-mal heller. Bei solchen stellaren Kolossen läuft der Energieverbrauch auf Hochtouren. Die Konsequenz: Beteigeuze wird seinen Energievorrat bereits zehn Millionen Jahre nach seiner Bildung aufgezehrt haben und in einer Supernovaexplosion sein Ende finden.

Auf der anderen Seite der Massenverteilung rangieren die roten Zwergsterne. Sie sind statistisch in

der Milchstraße sehr viel häufiger und machen rund 80 Prozent aller Sterne aus. Der sonnennächste Stern Proxima Centauri ist ein solches Exemplar. Mit nur zwölf Prozent der Sonnenmasse und 2800 Grad Celsius auf seiner Oberfläche ist er ein Vertreter der spektralen M-Klasse – und ein wahres Energiespartalent: Rechnungen zufolge wird er die Kernfusion noch 4000 Milliarden Jahre aufrecht erhalten können.

## BESTÄNDIG UND VARIABEL ZUGLEICH

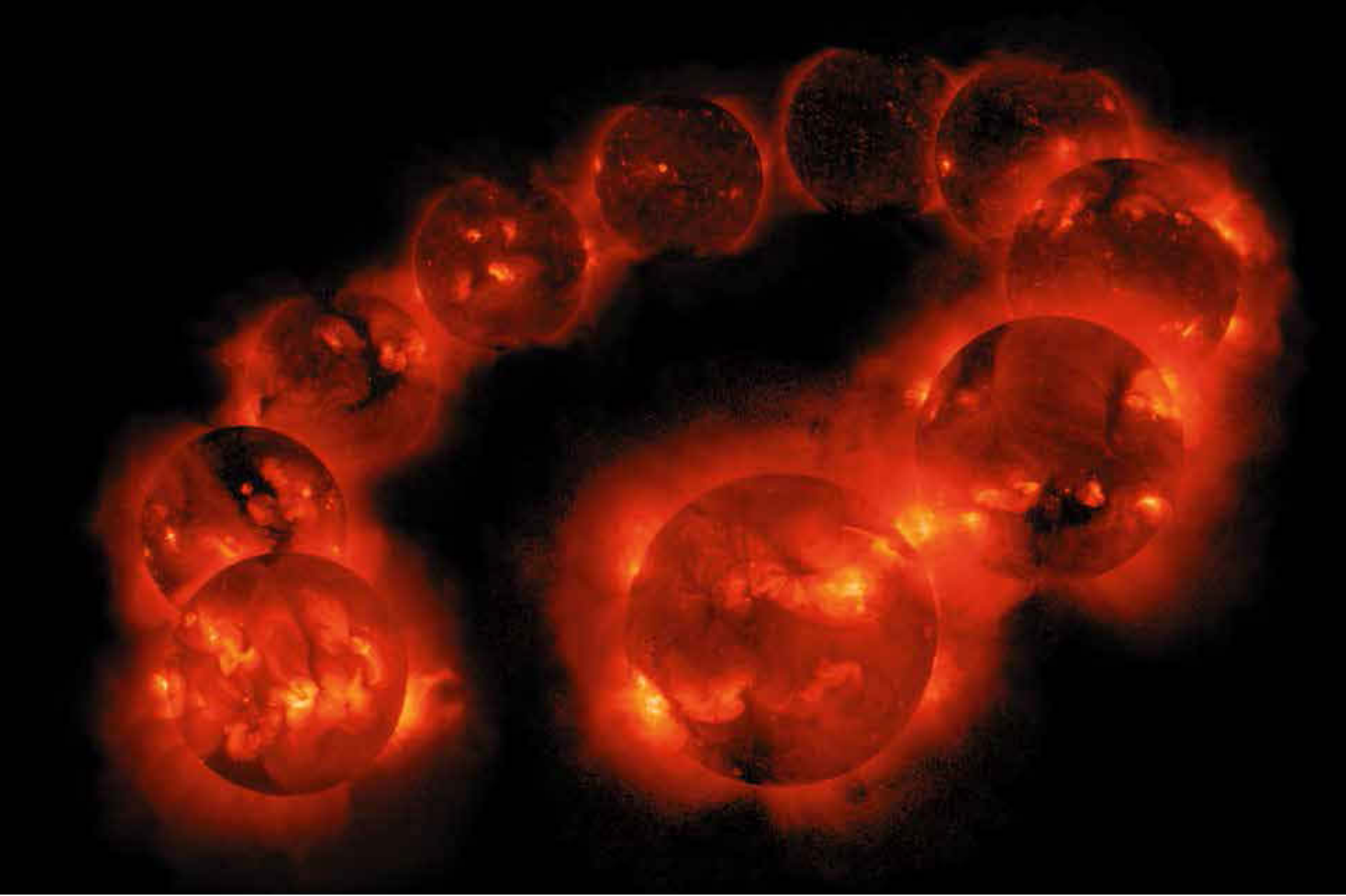
Astronomen beziffern das Alter der Sonne auf immerhin 4,57 Milliarden Jahre und ihre gesamte Lebensdauer als Hauptreihenstern auf knapp zwölf Milliarden Jahre. Trotz dieser Beständigkeit verhält sie sich auf kurzen Zeitskalen weniger konstant. Ihre Aktivität wechselt zyklisch, ablesbar an der Zahl der Sonnenflecken. Diese dunklen Flecken, die oft in Gruppen auftreten, waren bereits im Altertum bekannt. Nach der Erfindung des astronomischen Fernrohrs im 17. Jahrhundert wurden sie quasi wiederentdeckt. Es handelt sich um vergleichsweise kühle, stark magnetische Stellen auf der Sonnenoberfläche.

Warum der Zyklus der Sonne ausgerechnet mit elf Jahren und nicht mit einer anderen Periode schwankt, ist noch nicht geklärt. Hingegen ist klar, dass der Sonnenfleckenzyklus nicht exakt regelmäßig ist. Die Zyklen sind vielmehr zwischen neun und 14 Jahre lang. Auch ihre Durchschnittslänge variiert langfristig. Im 20. Jahrhundert betrug die Zyklusdauer beispielsweise 10,2 Jahre. Mit der Anzahl der dunklen Sonnenflecken und der hellen Sonnenfackeln schwankt auch die Helligkeit der Sonne, allerdings nur um etwa ein Promille. Diese Variation ist vermutlich zu klein und zu schnell, um sich auf das Erdklima auszuwirken.

## → Die Sonne im Wandel

Diese Zusammenstellung von Fotos eines fast vollständigen Sonnenzyklus zeigt die variierende Sonnenaktivität, aufgenommen im Röntgenlicht vom japanischen Sonnensatelliten YOHKOH. Die einzelnen Aufnahmen entstanden zwischen August 1991 und September 2001, wo die Sonnenaktivität jeweils recht hoch war. Sie wechselt periodisch, im sichtbaren Licht ist die Aktivität ablesbar an der Zahl der Sonnenflecken. Warum der Zyklus ausgerechnet elf Jahre dauert, ist noch nicht geklärt; genau genommen schwankt er auch zwischen neun und 14 Jahren. Weitere Zyklen, auf Zeitskalen von mehreren hundert Jahren, scheinen die solare Aktivität zusätzlich zu prägen.





Jedoch scheinen weitere Zyklen auf Zeitskalen von mehreren hundert Jahren die solare Aktivität zusätzlich zu prägen. Bekannt ist das Maunder-Minimum aus dem 17. Jahrhundert, benannt nach dem britischen Astronomenhepaar Annie und Edward Maunder. Durch das Studium alter Aufzeichnungen erkannten sie im 19. Jahrhundert, dass es vor dem Jahr 1715 sieben Jahrzehnte lang fast gar keine Flecken auf der Sonne gab. Das Minimum wird, neben anderen irdischen Phänomenen, mit der „Kleinen Eiszeit“ in Zusammenhang gebracht. Dabei handelt es sich um eine sehr kühle Klimaphase, in der zumindest in Europa, Nordamerika und China ungewöhnlich viele extrem kalte Winter auftraten.

Das Magnetfeld der Sonne ist auf ihrer sichtbaren Oberfläche etwa doppelt so stark wie das irdische Feld auf der Erdoberfläche (abgesehen von den Sonnenflecken, an denen das Magnetfeld mehr als tausendfach stärker ist). Doch das solare magnetische Feld zeigt sich deutlich variabler als das

Erdmagnetfeld. Im Minimum des Aktivitätszyklus bildet sich typischerweise ein einfaches Sonnenmagnetfeld aus, das größtenteils einem Dipol ähnelt, also die einfache Struktur wie bei einem Stabmagneten hat. Im Maximum des Zyklus ist es mit dieser einfachen Symmetrie vorbei – das Magnetfeld ist deutlich komplexer: Viele geschlossene Schleifen tragen nun bei, man spricht von einem Multipolfeld.

#### **ZWIEBELARTIGER SONNENAUFBAU**

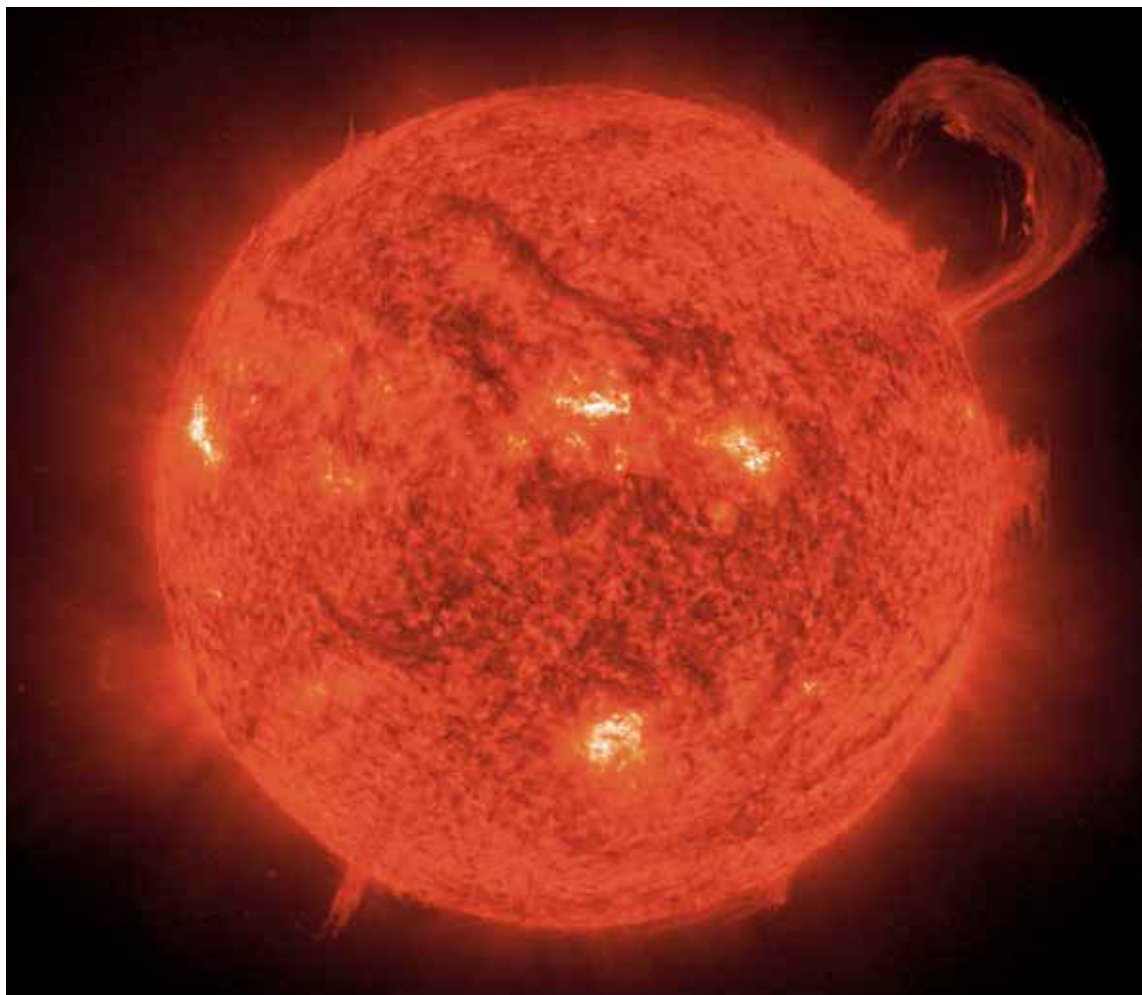
Im Jahr 1859 gelang es erstmals, durch die Untersuchung von Spektren ein chemisches Element auf der Sonne nachzuweisen. Heute weiß man, dass die Sonne bezogen auf ihre Masse hauptsächlich aus Wasserstoff (rund 71 Prozent) und Helium (etwa 27 Prozent) besteht. Weniger als zwei Prozent entfallen auf schwerere chemische Elemente: Sauerstoff, Kohlenstoff, Neon, Eisen, Stickstoff

und Silizium führen die Liste an. Insgesamt wurden 78 der 92 natürlichen chemischen Elemente auf der Sonne nachgewiesen. Die innere Struktur der Sonne ist zwiebelartig aufgebaut, in mehreren übereinanderliegenden Schichten also. Von außen nach innen folgen Konvektionszone, Strahlungszone und schließlich der zentrale Kern, wo die Wasserstoffatome fusionieren. In der Zone oberhalb des Kerns, der Strahlungszone, geschieht der nach außen gerichtete Energietransport durch Strahlungsprozesse. Darüber liegt die Konvektionsschicht, in der die Energie durch konvektive Strömungen des Plasmas aufwärts bis an die sichtbare Oberfläche, die Photosphäre, transportiert wird.

Über der sichtbaren Sonnenoberfläche erstreckt sich die etwa 10.000 Kilometer mächtige, zunächst kühlere Chromosphäre. Deutlich weiter ins Weltall, nämlich ein bis zwei Sonnenradien, reicht die Korona, die dünne, Millionen Grad heiße äußere Gashölle der Sonne. Die Korona ist der Ausgangsort des Sonnenwindes, eines stetigen Stroms geladener Teilchen, dessen Einfluss bis weit jenseits von Neptun an den Rand des Sonnensystems reicht.

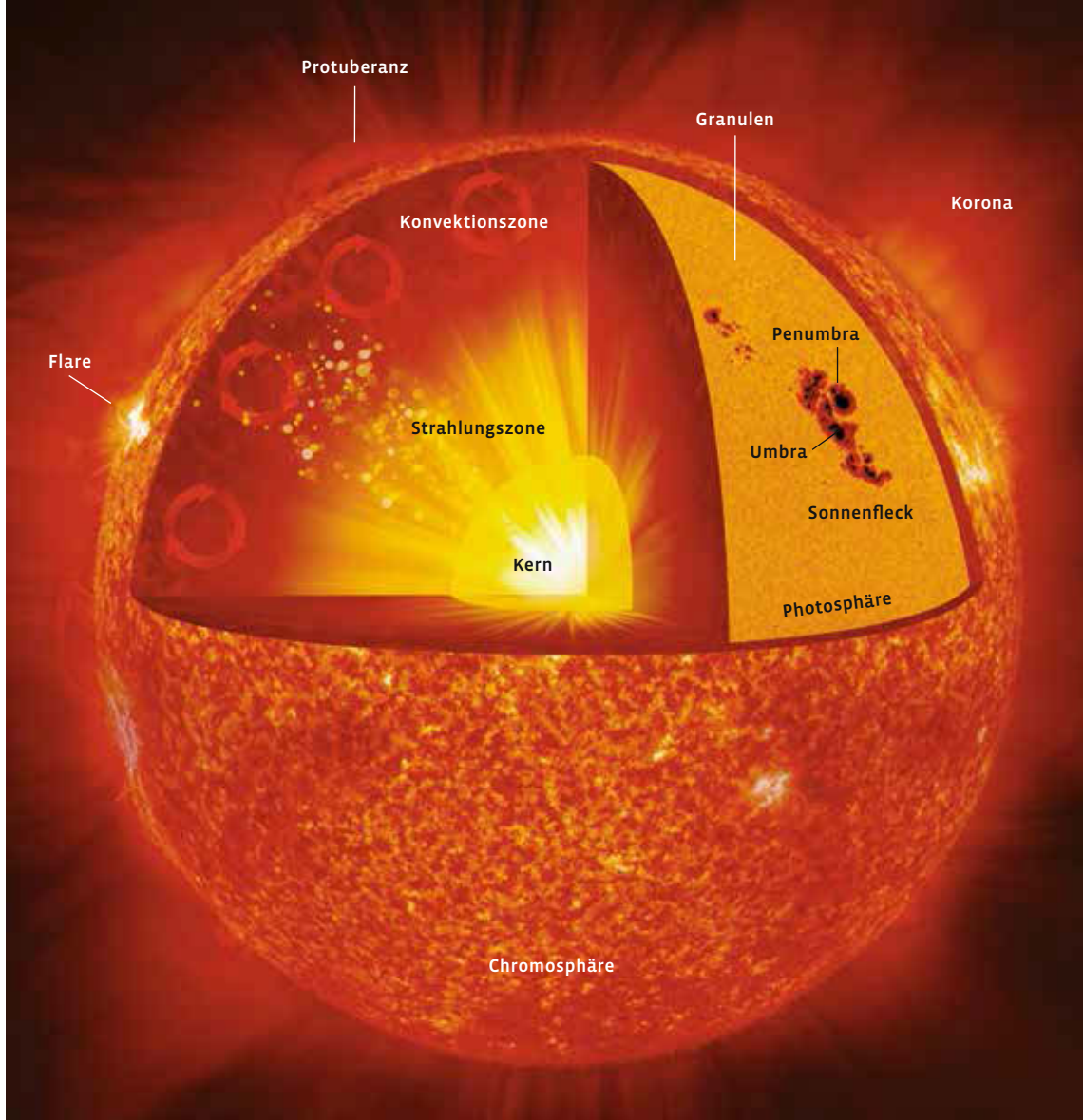
Der Sonnenwind weht mit 250 bis 800 Kilometer pro Sekunde und erzeugt eine riesige Blase im interstellaren Medium, die sogenannte Heliosphäre. Vereinfacht kann man die Heliosphäre als den Einflussbereich unseres Tagessterns bezeichnen, ihre genaue Gestalt und ihre Eigenschaften werden durch die weitgereisten VOYAGER-Sonden erforscht.

Im Jahr 2016 entdeckten Astronomen von der Europäischen Südsternwarte ESO einen Planeten bei unserem Nachbarstern Proxima Centauri. Von dort aus betrachtet würde man die Sonne als gewöhnlichen, hellen Stern in der Figur des Sternbilds Kassiopeia sehen. Auch das Sonnensystem ist astronomisch gesehen wahrscheinlich nichts Ungewöhnliches: Selbst vorsichtigen Schätzungen zufolge existieren in der Milchstraße zehntausende sonnenähnliche Sterne mit Planeten auf erdähnlichen Umlaufbahnen. Diese Hochrechnung ist ein Ergebnis von zwei Jahrzehnten intensiver Erforschung von Exoplaneten. Und trotzdem: Die Astrophysiker brennen darauf, mehr über unsere Sonne zu erfahren. Denn sie ist der am einfachsten zu erforschende Stern im gesamten Kosmos.



#### ← Sonne mit Henkel

Der europäisch-amerikanische Sonnensatellit SOHO hat diese Protuberanz im Jahr 1999 aufgenommen. Protuberanzen sind riesige Wolken aus relativ kühlem, dichtem Gas, die in die dünne, aber heiße Sonnenatmosphäre – die Korona – geschleudert werden; gelegentlich können sie diese sogar verlassen. Die Emission bei einer Wellenlänge von 304 Ångström (= 30,4 Nanometern) zeigt die obere Chromosphäre bei einer Temperatur von etwa 60.000 Grad, wobei die heißesten Bildstellen fast weiß, „kühlere“ Stellen rot dargestellt sind. Die auf dem Foto erkennbaren Strukturen entsprechen Gegebenheiten im lokalen magnetischen Feld der Sonne. Der altgediente SOHO, 1995 gestartet, beobachtet die Sonne noch heute.



### ← Der Aufbau der Sonne

Atmosphäre, Oberfläche und innerer Aufbau der Sonne: Die solare Atmosphäre, die Korona, erstreckt sich etwa über zwei Sonnendurchmesser. Sie ist Millionen Grad heiß und Ausgangspunkt des Sonnenwindes, eines Stromes geladener Teilchen, der mit 250 bis 800 Kilometer pro Sekunde durch das Sonnensystem weht. Protuberanzen sind vergleichsweise kühle Gaswolken, die weit ins All geschleudert werden. Kurzlebige Helligkeitsausbrüche (Flares) dauern bis etwa eine Stunde, sie stehen für gewaltige explosive Energiefreisetzungen. Die Chromosphäre erstreckt sich bis rund 10.000 Kilometer über der sichtbaren Sonnenoberfläche, der Photosphäre. Dort zeigen sich immer wieder dunkle Stellen starker Magnetfelder, die Sonnenflecken mit dunkler Umbra und hellerer Penumbra. Dauerhaft und bei stärkerer Vergrößerung sind die kleineren Granulen sichtbar, sie entstehen durch die thermische Bewegung der auf- und absteigenden Gasmassen. Die innere Struktur unseres Heimatsterns ist zwiebelartig, also in mehreren Schichten aufgebaut. Von außen nach innen: Konvektionszone, Strahlungszone und Kern. Im zentralen Kern läuft die eigentliche Energieproduktion durch nukleare Kernfusion, in der Strahlungszone geschieht der nach außen gerichtete Energietransport durch Strahlungsprozesse, während er in der Konvektionszone von Strömungen angetrieben wird.

### ZEHN FAKTEN ÜBER DIE SONNE

Durchmesser	1.392.700 Kilometer $\approx$ 109 Erddurchmesser
Masse	$1,989 \times 10^{30}$ Kilogramm $\approx$ 333.000 Erdmassen
Distanz zur Erde	149.600.000 Kilometer $\approx$ 23.481 Erdradien
Mittlere Dichte	1,408 Gramm pro Kubikzentimeter $\approx$ 26 Prozent der Dichte der Erde
Fallbeschleunigung auf der Oberfläche	274 Meter pro Sekunde zum Quadrat $\approx$ 28-fache Erdbeschleunigung
Rotationsdauer	25 Tage (am Äquator) 35 Tage (im Polgebiet)
Temperaturen	5500 Grad (Photosphäre) 4200 Grad (Sonnenfleck) 15.710.000 Grad (Sonnenzentrum)
Alter	4,57 Milliarden Jahre
Durchschnittliche Sonneneinstrahlung auf der Erde pro Quadratmeter	1362 Watt (oberhalb der Lufthülle)
Nächste totale Sonnenfinsternis	3. Juli 2019 (sichtbar in Südamerika) 3. September 2081 (sichtbar in Mitteleuropa)



# DIE KORONA DER SONNE

Die Atmosphäre der Sonne ist ein rätselhafter Ort – ihre Korona ist um ein Vielfaches heißer als die sichtbare Oberfläche. Warum das so ist, untersuchen die Wissenschaftler intensiv. Neuerdings konnten sie in der Sonnenkorona riesige Wirbelstürme entdecken. Spielen sie dabei eine Rolle?

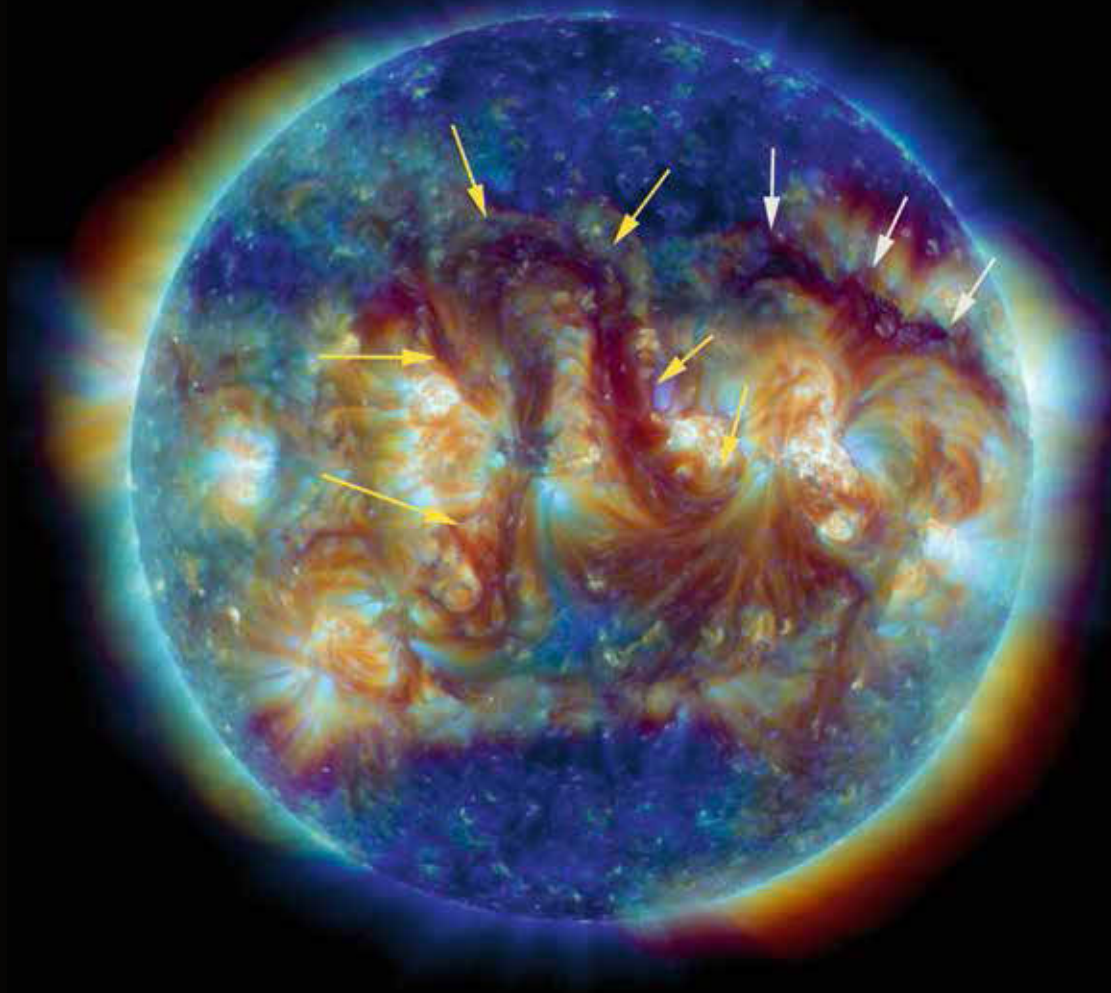
Ohne Hilfsmittel ist ein Blick auf die Sonnenkorona nur sehr selten möglich. Mit bloßem Auge kann man sie lediglich bei einer totalen Sonnenfinsternis wahrnehmen – als leuchtenden Kranz um das verdunkelte Tagesgestirn. Dieser Lichtkranz stellt Astronomen seit Jahrzehnten vor ein Rätsel: Wieso ist die äußere Gashölle der Sonne mit Millionen Grad sehr viel heißer als die Sonnenoberfläche, die es nur auf etwa 6000 Grad bringt? Woher stammt die Energie für diese enorme Aufheizung?

## TAUSENDE SONNENTORNADOS

Die Fachdebatte über die Natur dieser Koronaheizung erhielt vor wenigen Jahren mit einer spektakulären Entdeckung einen neuen Dreh: Ein Team um Wissenschaftler von der Universität Oslo hatte Tornados auf der Sonne erspäht. Riesige magnetische Wirbel reißen elektrisch geladenes Gas von der Sonnenoberfläche weg in Richtung Korona. Die Forscher beobachteten die Sonne dazu vom

## ↓ Lange Filamente

Zwei langgestreckte Filamente sind auf dieser Aufnahme der Sonne vom 8. September 2016 im extremen UV-Licht erkennbar. Das Exemplar im Bildzentrum (gelbe Pfeile) zeigt eine stark gebogene Form. Ohne diese Krümmung würde es sich über den gesamten Sonnendurchmesser erstrecken. Das kleinere Filament, markiert mit weißen Pfeilen, ist etwa halb so lang. Solche Filamente bestehen aus Plasma über der sichtbaren Sonnenoberfläche und werden durch magnetische Kräfte geformt. Es sind keine dauerhaften Strukturen, üblicherweise brechen sie innerhalb weniger Tage auseinander. Das Falschfarbbild stammt vom SDO-Satelliten der NASA und ist aus drei einzelnen Aufnahmen kombiniert.



#### ← Totale Sonnenfinsternis

Aufnahme der totalen Sonnenfinsternis vom 11. August 1999, mit Chromosphäre (rot) und dem weißen Kranz der Korona. Die Chromosphäre ist ohne spezielle Filter nur bei einer totalen Sonnenfinsternis beobachtbar, und dies auch nur in den ersten und letzten Sekunden der Finsternis. Sie erscheint dann als rötlicher Saum am Sonnenrand. Auch die weiße Sonnenkorona ist nur bei einer totalen Sonnenfinsternis sichtbar, jedoch während der gesamten totalen Phase. Ihre Form ist abhängig von der Aktivität der Sonne.

Erdboden und aus dem All, und zwar mit dem schwedischen Sonnenteleskop auf der Kanareninsel La Palma und zeitgleich mit dem NASA-Satelliten SDO. Dabei fotografierten sie die solare Gashülle in einem großen Wellenlängenbereich zwischen Infrarot und Ultraviolett. So gelang es ihnen, unterschiedliche Schichten der Sonnenatmosphäre zu untersuchen. Was sie dabei entdeckten, waren riesige Wirbelsysteme, die von der Oberfläche der Sonne bis in die höhere Atmosphäre reichen.

Die Wissenschaftler sprechen von „magnetischen Tornados“. Sie sind tausendmal größer als ihre Pendanten im irdischen Wetter – die Querschnittsfläche der Sonnentornados kann kontinentale Ausmaße erreichen. Zunächst spürten die Forscher zwar nur rund ein Dutzend dieser Wirbel auf, deren Lebensdauer durchschnittlich 13 Minuten betrug. Doch sie vermuten, dass die Tornados ein häufiges Phänomen sind. Selbst in ruhigen Zeiten sollen Hochrechnungen zufolge mehr als 10.000 davon stetig auf der Sonne toben. Und Computersimulationen deuten darauf hin, dass es auch kleinere

Sonnentornados gibt: „Die bisher beobachteten Tornados liegen genau an der Grenze dessen, was mit den verfügbaren Methoden heute beobachtbar ist“, so Sven Wedemeyer-Böhm von der Uni Oslo. „Simulationen zeigen jedoch, dass diese lediglich die größten Exemplare in einer Verteilung sein könnten. Kleinere Wirbelstürme sind wahrscheinlich viel häufiger.“ Künftige Sonnentelkope könnten die kleineren Wirbel aufspüren, beispielsweise der 4-Meter-Spiegel, der momentan auf dem 3000 Meter hohen Vulkan Hāleakala auf Hawaii errichtet wird und ab 2018 zum Einsatz kommen soll.

Die Energiequelle dieser Wirbel soll die Konvektionsbewegung der Gasmassen im Inneren der Sonne sein. Bei den Bewegungen der geladenen Gasströme entsteht das solare Magnetfeld, indem ständig heißes Plasma zur Oberfläche steigt und kühleres nach unten sinkt. Um die abwärts gerichteten Plasmaströme herum bilden sich auf der Sonnenoberfläche Strudel, ähnlich wie am Abfluss einer Badewanne. Die magnetischen Feldlinien sind dort besonders dicht, die Feldstärke ist also besonders hoch. Das



#### ← Solarer Hexenkessel

Dieses Bild stammt vom amerikanischen SDO-Satelliten und zeigt die ultraviolette Strahlung eines Teils der Korona am 22. Oktober 2011. Es wurde bei Wellenlängen von 13,1 Nanometern (blau dargestellt) und 9,4 Nanometern (rot) aufgenommen. Die dunklen, fingerartigen Strukturen der sogenannten Rayleigh-Taylor-Instabilität im oberen Bildteil heben sich vor dem blauen Plasma klar ab.

mitrotierende Magnetfeld überträgt die Drehbewegungen von der Sonnenoberfläche weit in die darüberliegende Gashölle. Die Wissenschaftler fanden in den Sonnentornados Wirbelgeschwindigkeiten von mehr als 10.000 Kilometer pro Stunde. Nach ihren Berechnungen kann dieser Prozess genügend Energie in die Korona pumpen, um die hohen Temperaturen dort zu erklären.

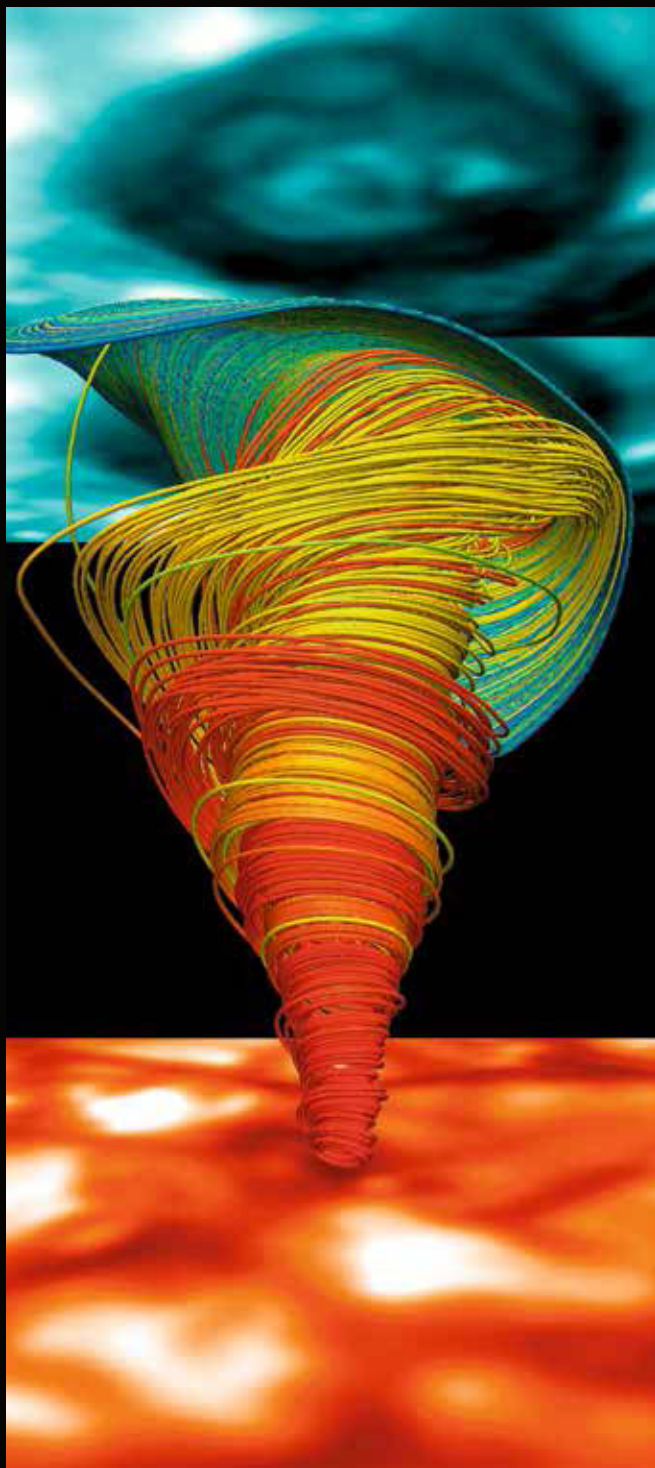
#### **DUNKLE FINGERSTRUKTUREN**

Die Debatte über die Koronaheizung ist mit den Sonnentornados aber nicht beendet. Wahrscheinlich tragen mehrere Prozesse zum Energietransfer bei, meint Hardi Peter vom Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung. Den Wissenschaftlern ist klar, dass die brodelnde Korona akribisch beobachtet werden muss, um die erstaunliche Hitze dort erklären zu können. Denn die Sonne ist in ständigem Wandel begriffen: In der Nähe von Sonnenflecken kann es zu eruptiven Flares kommen. Dabei lösen sich Gasmassen von der Sonnenoberfläche und werden hoch in die Korona geschleudert. Oft bilden sich dann rätselhaft fingerartige Plasmastrukturen. Bei ihrer Erklä-

rung greifen die Wissenschaftler auf ein bekanntes Naturphänomen zurück, das in völlig unterschiedlichen Situationen beobachtbar ist – im fernen Kosmos ebenso wie in der heimischen Teetasse.

Seit ihrer Entdeckung vor zwei Jahrzehnten fragten sich die Wissenschaftler, was hinter solch fingerartigen Strukturen steckt, meist sind sie nur für einige Minuten im oberen Teil der Flares sichtbar. Sie bilden einen deutlichen Kontrast zu dem hellen, im ultravioletten Licht leuchtenden Plasma, in das sie eingebettet sind. Wegen ihrer Gestalt und der schlängelnden Bewegungen werden diese dunklen Strukturen im Jargon der Sonnenforscher manchmal „Kaulquappen“ genannt. Bei der Deutung tappten die Experten aber bisher im Dunkeln. Die Auswertung von Flarefotos der SDO-Sonde der NASA und der ebenfalls amerikanischen STEREO-Mission („Solar Terrestrial Relations Observatory“) brachte die Wende. Beide Sonden ermöglichen Beobachtungen der Sonne in unterschiedlichen Wellenlängen des ultravioletten Lichtes. Die hochauflösenden Bilder können noch kleine Details mit weniger als 800 Kilometern Größe abbilden, insbesondere die SDO-Bilder zeigen das solare Geschehen mehrmals pro Minute. Sie sind also gut geeignet, die kurzlebi-



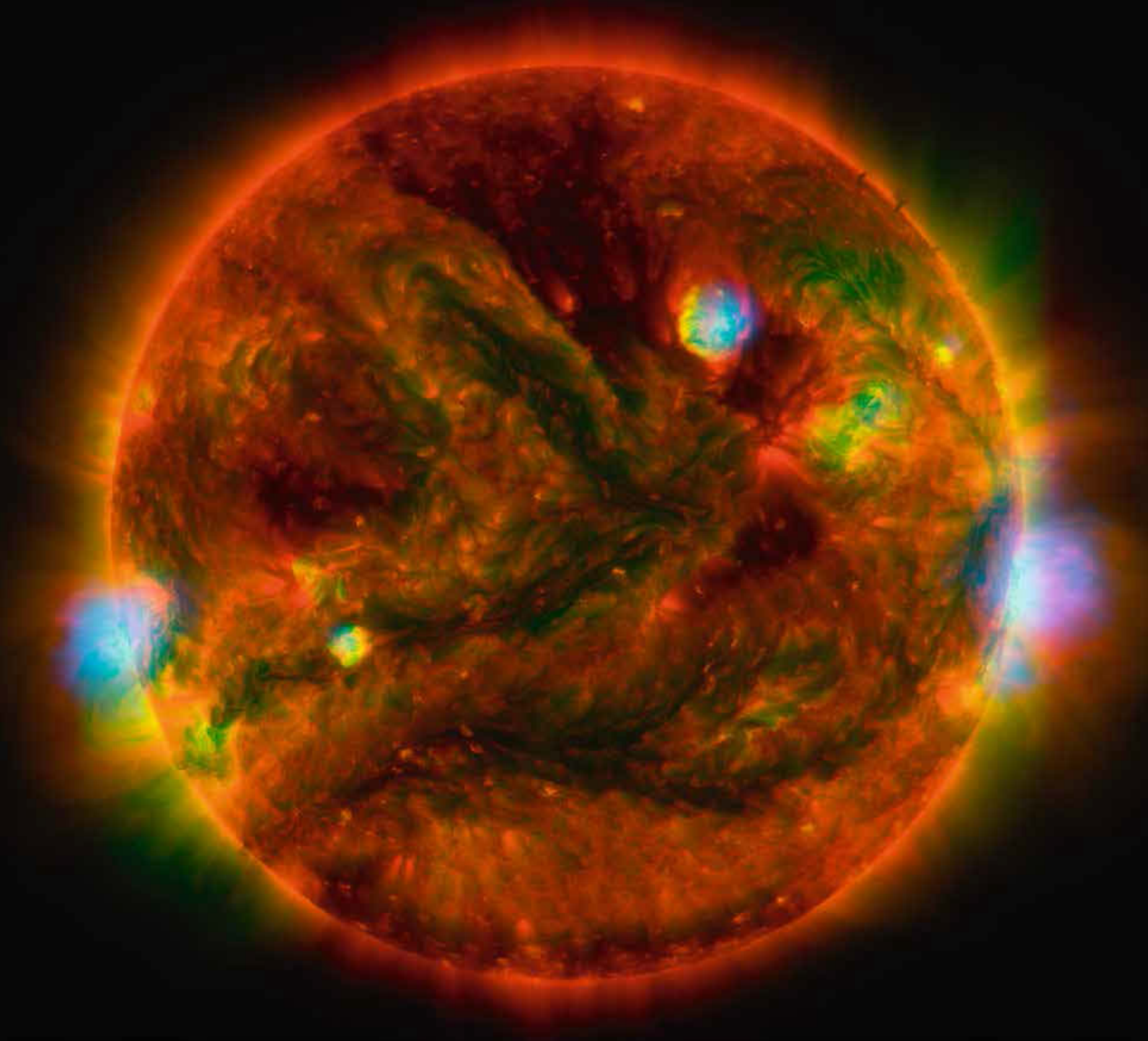


#### ↑ Turbulenzen auf der Sonne

Diese numerische Computersimulation (links) zeigt einen magnetischen Tornado in der Korona. Die roten Linien stehen für die Feldlinien des lokalen solaren Magnetfeldes, während in Grün das Geschwindigkeitsfeld des ionisierten Plasmas dargestellt ist. Oben sieht man in Blau die in den Beobachtungen entdeckte Wirbelstruktur, unten die Sonnenoberfläche (rot). Rechts:

Spektrale Signaturen eines magnetischen Tornados in der Sonnenkorona. Die Hintergrundaufnahme stammt vom SDO-Satelliten der NASA, während die fünf quadratischen Aufnahmen vom schwedischen 1-Meter-Sonnen-teleskop auf der Kanareninsel La Palma beigesteuert wurden. Die bläulichen Bilder zeigen die Wirbelstruktur des Tornados. Zum Größenvergleich ist die Landkarte Europas eingeblendet.





#### ↑ Solare Aktivität

Aktive Regionen auf der Sonnenoberfläche. Das Bild zeigt die kombinierten Daten von drei Teleskopen, die alle im Weltall stationiert sind. Hochenergetische Röntgenstrahlen hat der NuSTAR-Satellit („Nuclear Spectroscopic Telescope Array“) der NASA für dieses Bild aufgefangen, sie sind blau dargestellt. Die niederenergetischeren Messungen

im Röntgenlicht (grün) stammen von dem japanischen Satelliten HINODE. In Gelb und Rot tragen die Beobachtungen im extremen Ultraviolett des amerikanischen SDO-Satelliten bei. Die blauweiß dargestellten aktiven Regionen zeigen besonders heißes Plasma, es erreicht eine Temperatur von mehreren Millionen Grad. Während der Beobachtungen entluden sich dort

sogenannte Mikroflares, die das Plasma schnell erhitzen. Hauptsächlich wird mit NuSTAR die Röntgenstrahlung von Schwarzen Löchern oder Supernovae unter die Lupe genommen, für Beobachtungen kleinskaliger Sonnenphänomene ist der 2012 gestartete Wissenschaftsatellit aber auch geeignet. Die Aufnahme stammt vom 29. April 2015.

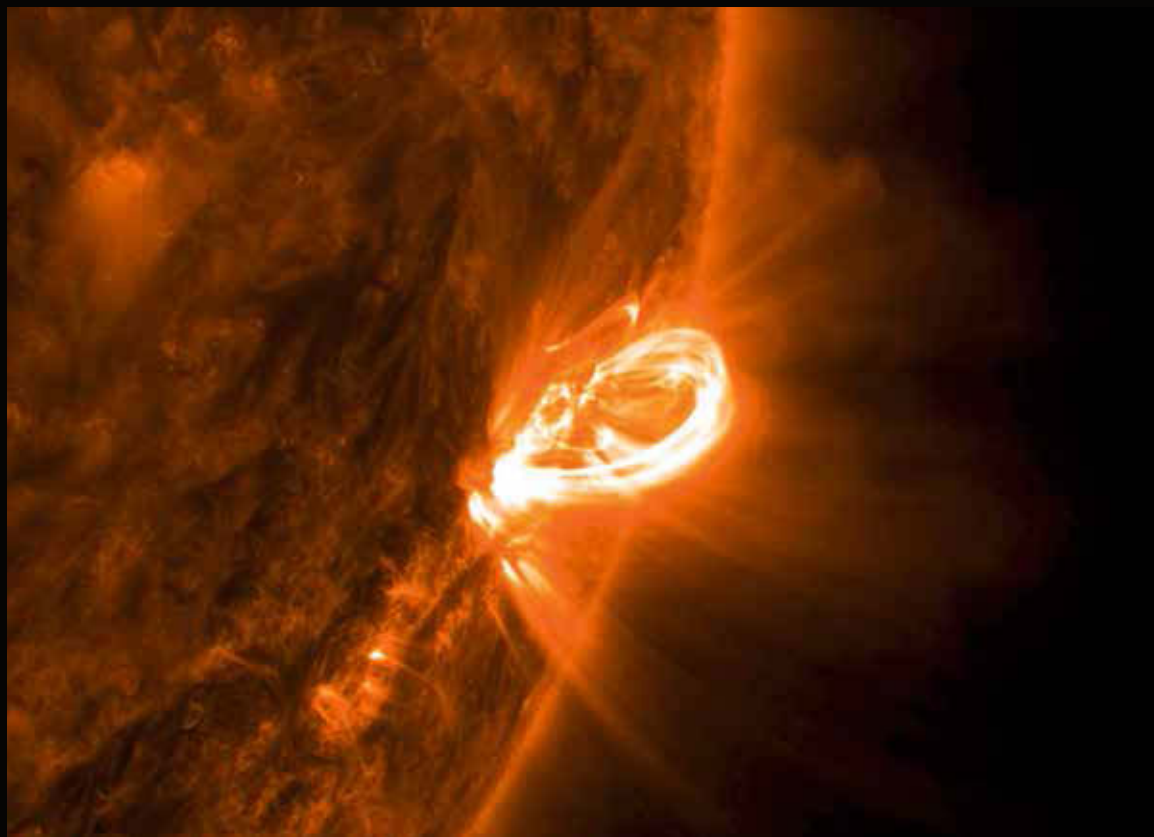
gen Kaulquappen in der Korona zu untersuchen. „Es zeigte sich, dass diese Strukturen Instabilitäten sind, die sich beim Aufeinandertreffen verschieden dichter Plasmen bilden“, so die Astronomin Davina Innes, die an der Untersuchung beteiligt war.

Zusätzlich wurden mit dreidimensionalen Computermodellen mittels sogenannter MHD-Rechnungen dieselben Prozesse simuliert. Die Abkürzung „MHD“ steht für Magnetohydrodynamik, eine Theorie, mit der Physiker elektrisch geladene Flüssigkeiten beschreiben; näherungsweise kann man auch das Sonnenplasma damit berechnen. Die Ergebnisse der aufwendigen Rechnungen zeigen eine markante Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Überraschend ist, dass die jahrelang rätselhaften Strukturen mittels der MHD-Rechnungen mit einer alten physikalischen Bekannten erklärt werden können: Sie gehen auf die Rayleigh-Taylor-Instabilität zurück, einen fundamentalen Prozess der Strömungslehre.

Diese Instabilität tritt beispielsweise zwischen zwei unterschiedlich dichten Flüssigkeiten auf, wenn diese gegeneinander beschleunigt werden. Sogar in einer Teetasse, in die etwas Milch gegeben wird, kann sich das Phänomen abspielen, denn

auf die dichtere und schwerere Milch wirkt eine größere Gewichtskraft ein. Die kurz sichtbaren, pilzförmigen Ausstülpungen an der Tee-Milch-Grenzfläche sind ein typisches Zeichen für die Instabilität. Auch in der Hülle explodierender Sterne tritt die Rayleigh-Taylor-Instabilität auf; bekannt sind beispielsweise die fingerartigen Strukturen in den Gasmassen des Krabbennebels, der bei einer Supernova entstand.

Die Studien führen zu einem vertieften Verständnis der Vorgänge in der Korona. Neben der Rayleigh-Taylor-Instabilität geht es aber auch um die energiereichen Prozesse, die die explosiven Flarevorgänge hervorrufen. Dabei schnell das Magnetfeld in eine andere Konfiguration durch eine Art magnetischen Kurzschluss, eine sogenannte Rekonnexion. Wie bei einem zu stark verdrillten Gummiband, das reißt, entlädt sich während der Flares schlagartig die Energie, die im Magnetfeld gespeichert ist. Die Rolle des Gummibandes spielen die magnetischen Feldlinien. Bei ihrem abrupten Umgruppieren entsteht ein Strahl aus dünnem Plasma, ein sogenannter Jet. Dieser wird vom Ort des Kurzschlusses weg beschleunigt. Dort, wo dichteres und dünnes Plasma aufeinandertreffen, nimmt die Rayleigh-Taylor-Instabilität ihren Lauf.



#### ← Leuchtender Plasmabogen

Ende September 2016 erwischte der amerikanische SDO-Satellit eine aktive Region mit einem markanten Bogen aus Sonnenplasma. Aktive Regionen sind Zonen auf der Sonne mit starken Magnetfeldern, deren Feldlinien sichtbar werden, wenn sich glühendes Plasma auf Spiralen entlang dieser Linien bewegt. Das Bild wurde im extremen Ultraviolett aufgenommen.