

Der Bolide von Tscheljabinsk

Sein Ursprung und seine Folgen

Am 15. Februar 2013 trat ein kleiner Asteroid in die Erdatmosphäre ein, der weltweit großes Aufsehen erregte. Er brach über der russischen Millionenstadt Tscheljabinsk auseinander und richtete durch seine Druckwelle beträchtliche Schäden am Boden an. Das Ereignis war aber auch ein Glücksfall für die Meteoritenforscher. Rund neun Monate nach dem Einschlag stellen nun drei Wissenschaftlergruppen ihre Erkenntnisse über den Eintrittskörper vor.

Von Tilmann Althaus

IN KÜRZE

- Der Bolide von Tscheljabinsk ging auf einen Himmelskörper von rund 12 000 Tonnen Masse und einem Durchmesser von rund 19 Metern zurück.
- Von der ursprünglichen Masse kamen nur etwa zwei bis fünf Tonnen als Meteoritenbruchstücke am Erdboden an, der Rest verglühte oder wurde zu Staub.
- Die Bahn des Boliden durch das Sonnensystem hat große Ähnlichkeit mit derjenigen des Asteroiden 86039 (1999 NC43).

Drei verschiedene Forschergruppen präsentierten im November 2013 ihre Untersuchungsergebnisse über den Boliden von Tscheljabinsk am 15. Februar 2013. Die Arbeiten erschienen in den Fachblättern »Science« und »Nature«.

Jiří Borovička vom Astronomischen Institut der Tschechischen Akademie der Wissenschaften in Ondřejov und seine Koautoren werteten 15 im Internet frei verfügbare Videos von Überwachungskameras aus und rekonstruierten die Bahn und die Bewegung des Himmelskörpers durch die Atmosphäre (siehe Bild rechts oben). Aus den abgeleiteten Werten schließen die Forscher auf einen Himmelskörper mit einer Masse von rund 12 000 Tonnen und einem gemittelten Durchmesser von rund 19 Metern. Dabei gehen sie von einer mittleren Dichte von 3,3 Gramm pro Kubikzentimeter aus, die aus gefundenen Bruchstücken folgt.

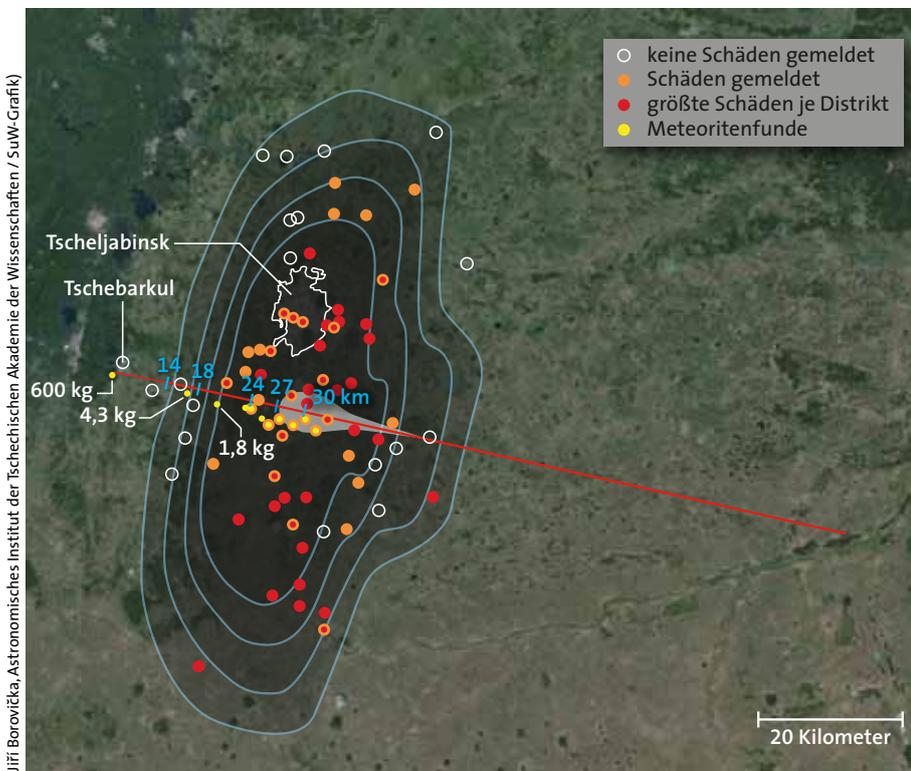
Aus den Videobildern leiteten sie in Zusammenarbeit mit der zweiten Forschergruppe um Peter G. Brown an der kanadischen University of Western Ontario eine Lichtkurve des Boliden ab und

trugen dafür die Helligkeit des Feuerballs gegen die Zeit auf. Zudem nutzten sie die auf den Videos simultan aufgezeichneten Knallgeräusche und ermittelten deren Ankunftszeiten. Aus den Daten ergibt sich, dass in etwa 45 Kilometer Höhe erste Fragmente vom eintretenden Gesteinsbrocken abbrechen. Die stärkste Fragmentierung ereignete sich in Höhen zwischen 40 und 30 Kilometern. Insgesamt ermittelten die Forscher elf Fragmentationsereignisse. In 30 Kilometer Höhe hatte sich der Bolide mittlerweile in 20 größere Brocken mit Massen von je rund zehn Tonnen zerlegt. Der Hauptkörper dürfte dort noch eine Masse von etwa 20 Tonnen besessen haben. Der größte Teil (rund 98 Prozent) des in die Erdatmosphäre eingedrungenen Objekts war zu diesem Zeitpunkt bereits verglüht oder hatte sich in Staub verwandelt.

Die 20 Fragmente brachen in Höhen zwischen 26 und 24 Kilometern nochmals weiter auseinander, und die Hauptmasse wog dort noch etwa zehn Tonnen. Sie zerlegte sich in einer Höhe von 22 Kilometern so sehr, dass das größte Bruchstück nur noch eine Masse von 15 Kilogramm aufwies.



Alex Alishevskikh / CC-by-SA-2.0 (CC BY-SA) via <http://www.flickr.com/photos/alexey/>



Jiffi Borovička, Astronomisches Institut der Tschechischen Akademie der Wissenschaften / SuW-Graphik

Bei seinem Eintritt in die Erdatmosphäre am 15. Februar 2013 hinterließ der sich mit 20 Kilometer pro Sekunde bewegende Bolide eine markante Rauchspur. Sie entstand durch die enorme Hitze, die auf die Reibung in der Erdatmosphäre zurückgeht. Die Spur besteht sowohl aus feinsten Staubteilchen des Meteoriten als auch aus atmosphärischem Wasserdampf, der an den Staubteilchen kondensierte.

Die gelben Punkte geben die Fundorte von Meteoritenbruchstücken wieder, die nach dem Boliden vom 15. Februar 2013 im Umfeld der Stadt Tscheljabinsk geborgen wurden. Die roten und orangefarbenen Punkte weisen auf gemeldete Schäden am Erdboden hin. Die schmetterlingsförmigen Konturlinien repräsentieren Modellrechnungen für die vom Boliden beim Fall freigesetzten Druckwellen sowie die am Boden angekommene zerstörerische Energie.

Im Oktober 2013 bargen Taucher aus dem Tschebarkul-See, etwa 20 Kilometer südwestlich von Tscheljabinsk, ein rund 600 Kilogramm schweres Trümmerstück – das massereichste, das bisher gefunden wurde. Es stammt nicht von der Hauptmasse, sondern ist der Überrest eines der vorher abgetrennten Fragmente, das durch die Reibung in der Erdatmosphäre schon deutlich verlangsamt war (siehe Grafik oben und Bild auf S. 54 unten).

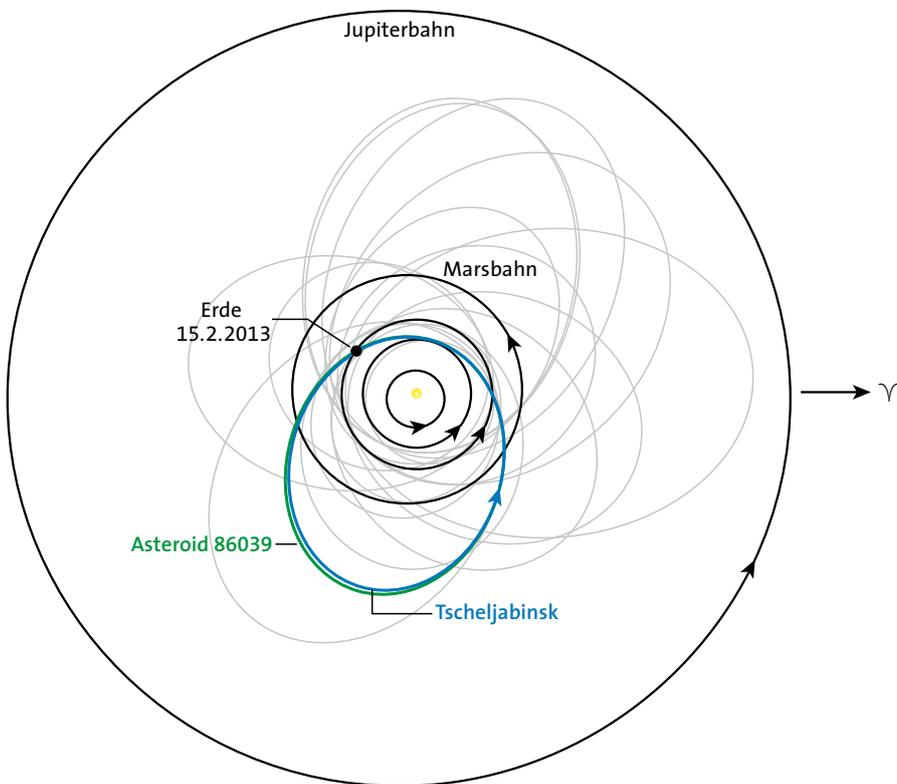
Neben der Trajektorie des Boliden in der Erdatmosphäre interessierte die Forscher um Borovička auch die Bahn des Himmelskörpers durch unser Sonnen-

system vor dem Einschlag. Mit Hilfe der Videoaufzeichnungen rekonstruierten sie seine Bahn und stellten fest, dass sie derjenigen des Asteroiden 86039 (1999 NC43) sehr ähnlich ist. Die Wissenschaftler vermuten daher, dass der Bolide von Tscheljabinsk ein Bruchstück dieses rund 2,2 Kilometer großen Asteroiden ist. Sie geben einer Wahrscheinlichkeit von 1 : 10000 an, dass die Übereinstimmung der Bahnen nur rein zufällig ist.

Bislang konnte nur von 17 beim Fall beobachteten Meteoriten ihre vorherige Bahn durch das Sonnensystem rekonstruiert werden, aber noch nie fand sich eine

derart große Ähnlichkeit mit der Bahn eines bereits bekannten Asteroiden (siehe Grafik auf S. 54 oben).

Die Arbeitsgruppe um Peter Brown untersuchte, wie groß die Gefahr durch Himmelskörper dieser Größe ist. Um die vom Boliden freigesetzte Energie zu bestimmen, griffen die Forscher auf seismische Messungen, Daten von Infraschallsensoren und die schon oben erwähnte Lichtkurve zurück. Nach ihren Berechnungen setzte der Bolide bei seinem Niedergang zur Erdoberfläche eine Energie frei, die der Explosion von 500 Kilotonnen des Sprengstoffs TNT entspricht.



Nun erweiterten die Forscher um Brown ihre Datenbasis durch Messwerte, die Sensoren der US-Regierung seit dem Jahr 1994, also über einen Zeitraum von rund 20 Jahren, aufgezeichnet hatten. Diese Sensoren dienen der Überwachung des weltweiten Testverbots von nuklearen Waffen und bestehen unter anderem aus Detektoren für Infraschall am Erdboden sowie aus Satelliten, die im Infraroten nach den Starts von Interkontinentalraketen und nach Atombombenexplosionen Ausschau halten. Die Sensoren haben in dieser Zeit zahlreiche Ereignisse registriert, die auf Eintritte von Himmelskörpern in die Erdatmosphäre zurückgehen. Die Forscher stellten fest, dass der Zustrom an solchen Objekten weitgehend den Vorhersagen der Impaktforscher entspricht. Bei Objekten im Größenbereich zwischen 15 und 30 Metern scheint die Häufigkeit allerdings etwa doppelt so hoch zu liegen, wie durch teleskopische Beobachtungen und aus der Verteilungssta-

Bisher gelang es für 17 beim Fall beobachteten Meteoriten, ihre ursprünglichen Bahnen durch das Sonnensystem zu rekonstruieren. Alle Objekte stammen aus dem Asteroiden-Hauptgürtel zwischen den Orbits von Mars und Jupiter. Die Bahn des Boliden von Tscheljabinsk ist derjenigen des Asteroiden 86039 (1999 NC43) sehr ähnlich, möglicherweise war er ein Bruchstück dieses 2,2 Kilometer großen Himmelskörpers. Das Widdersymbol ∇ markiert die Richtung zum Frühlingspunkt.



Google Earth / Jiří Borovička, Astronomisches Institut der Tschechischen Akademie der Wissenschaften / Eduard Kalinin

Das größte bekannte Fragment des Meteoriten von Tscheljabinsk mit einer Masse von rund 600 Kilogramm ging im Tscheljabinsk-See südwestlich der Großstadt Tscheljabinsk nieder. Bei seinem Fall durchschlug es die Eisdecke des Sees (Inset) und hinterließ ein kreisförmiges Loch mit einem Durchmesser von sieben Metern (rechtes Teilbild). Das Fragment konnte erst im Oktober 2013 von Tauchern geborgen werden.

tistik der Einschlagkrater auf dem Mond ermittelt wurde. Die Gründe hierfür sind noch unbekannt.

Völlig unabhängig von den Wissenschaftlergruppen um Jiří Borovička und Peter Brown untersuchte das internationale Forscherteam um Olga P. Popowa von der Russischen Akademie der Wissenschaften in Moskau die Ereignisse um den Boliden. Wie die beiden erstgenannten Gruppen nutzten auch die Forscher um Popowa die Videobilder der Überwachungskameras und kommen zu vergleichbaren Resultaten. Die ersten Leuchterscheinungen, die vom Eintritt des mehrfamilienhausgroßen Himmelskörpers ausgelöst wurden, begannen in einer Höhe von 97 Kilometern über Grund. Das Objekt trat mit einer Geschwindigkeit von 19,2 Kilometern pro Sekunde in die Erdatmosphäre ein. Mit 18,3 Grad relativ zur Erdoberfläche war der Eintrittswinkel relativ flach. Die Forscher um Popowa lei-

ten eine Eintrittsmasse von 13 000 Tonnen und einen mittleren Durchmesser von 19,8 Metern für den kleinen Asteroiden ab, in guter Übereinstimmung mit den Angaben der beiden anderen Gruppen.

Die Größe und die Geschwindigkeit des Objekts weisen darauf hin, dass sich in etwa 90 Kilometer Höhe eine Stoßwelle in der Erdatmosphäre ausbildete. In einer Höhe von etwa 83 Kilometern brachen erste Teile vom Himmelskörper ab, und es bildete sich ein Staubschweif entlang der Eintrittsbahn aus. Rund 30 Kilometer tiefer erhöhte sich die Fragmentationsrate. Der Boliden bewegte sich zu diesem Zeitpunkt mit 18,6 Kilometer pro Sekunde. Die letzten Fragmentationen ließen sich in einer Höhe von 27 Kilometern erkennen. Der dabei entstandene Staubschweif spaltete sich durch den Auftrieb der heißen Gase in zwei Teile auf, die zu zwei zylindrischen Wirbeln führten (siehe Bild auf S. 53 oben).



Hofheim Instruments M. Tennigkeit
Telefon +49 (0) 61 92 - 22 333
www.HofheimInstruments.com



Der Sechzehner ist da.

Diesen leistungsstarken 16 Zoll Leichtbau-Reise-Dobson können Sie ganz leicht zerlegen, vollständig in zwei Transportboxen verstauen und damit besonders einfach transportieren. **Alles ist drin:** exzellenter, nur 25 Kilo leichter F/4,5-Newton in Gitterbauweise, Leichtbau-Dobson-Montierung mit allen Stangen, präziser 2-Zoll-Crayford-Okularauszug. Industriell gefertigt, komplett ohne Werkzeug zu handhaben, stabil und solide aus Edelstahl, Carbon, Aluminium und Birke-Multiplex. Für faszinierende Deep-Sky-Erlebnisse der Extraklasse - unterwegs und zuhause.





Andrey Yarentsev

Rund 600 Kilogramm schwer ist das größte bekannte Fragment des Meteoriten von Tscheljabinsk. Es befindet sich jetzt im Tscheljabinsker Staatlichen Museum für lokale Geschichte.

derbruch, belegt nach Ansicht von Popowa und ihren Koautoren, dass das Gestein bereits vorgeschädigt war. Es enthielt offenbar Sprünge und Risse, entlang derer das Gestein schon bei geringer Druckbelastung in der Atmosphäre zerfiel.

Mit Isotopenuntersuchungen ermittelten die Forscher das Bestrahlungsalter der Meteoriten. Sie stellten fest, dass der Bolide von Tscheljabinsk nur 1,2 Millionen Jahre als eigenständiges Objekt im Sonnensystem unterwegs war. Vor 1,2 Millionen Jahren zog ein größerer Asteroid dicht an der Erde vorbei, wobei durch Gezeiteneffekte Material abgetrennt wurde.

Die Untersuchungen des Boliden von Tscheljabinsk haben nicht nur die Meteoritenforschung bereichert, sondern erlaubten es erstmals, die Effekte im Detail zu betrachten, die den Absturz eines größeren Himmelskörpers auf die Erde begleiten. Nun haben die Planetologen die Möglichkeit, die bisher aus den Daten von Atombombenexplosionen abgeleiteten Erkenntnisse mit der Realität zu vergleichen und ihre Modelle anzupassen. ☺

In den Wochen nach dem Ereignis besuchte ein Teil der Forscher 50 Dörfer entlang der Absturzlinie, um die Glasschäden durch die Stoßwelle systematisch zu erfassen. In der Stadt Tscheljabinsk hatten rund 44 Prozent der Wohnhäuser gesprungene oder zerstörte Scheiben. Allerdings waren diese Schäden nicht gleichförmig über die Stadt verteilt. Dieser Befund weist auf komplizierte Druckverteilungen beim Durchgang der Stoßwelle hin (siehe Grafik auf S. 53 Mitte).

Auch die Helligkeit des Feuerballs ist bemerkenswert, er leuchtete im Maximum für Sekundenbruchteile 30-mal so hell wie die Sonne. In der Region befragte Personen berichteten zudem über intensive Wärme, die vom Feuerball ausging. Einige Augenzeugen wiesen gar auf Sonnenbrand auf ihrer Haut hin, der möglicherweise durch die vom Feuerball ausgehende ultraviolette Strahlung verursacht wurde. Allerdings enthalten sich die Wissenschaftler hierzu eines Kommentars.

Popowa und ihre Koautoren gehen davon aus, dass im Bereich der Absturzstelle des Boliden etwa drei bis fünf Tonnen an

meteoritischem Material niedergingen, also etwa 0,2 bis 0,4 Promille der Ausgangsmasse. Rund 76 Prozent des Boliden sind beim Atmosphäreneintritt verglüht, die restliche Masse desintegrierte zum allergrößten Teil zu Staub.

Die Meteoriten von Tscheljabinsk

Die aufgefundenen Meteoritenbruchstücke gehören zur Klasse der LL-Chondriten. LL steht für »low iron, low metal« und bedeutet, dass dieser Meteorit nur geringe Mengen an metallischem Eisen und anderen Metallen wie etwa Nickel enthält. Die Bezeichnung Chondrit wurde vom griechischen Wort »chondros« = Korn abgeleitet. Sie weist darauf hin, dass sich in dem Gestein rundliche Körner mit Durchmessern von bis zu einigen Millimetern befinden. Sie gehen auf die Entstehungszeit des Sonnensystems vor rund 4,6 Milliarden Jahren zurück. Damit gehört das Material des Tscheljabinsk-Boliden zu einer der häufigsten Meteoritenklassen (siehe Bild unten).

Dass der Meteorit schon in relativ großer Höhe über dem Erdboden auseinan-

Rund vier Zentimeter Größe besitzt dieses Bruchstück des Meteoriten von Tscheljabinsk, das unmittelbar nach dem Fall aufgesammelt wurde. Im Anschnitt zeigen sich unterschiedlich helle Gesteinsanteile und rundliche Gebilde, die als Chondren bezeichnet werden. Zudem ist das Bruchstück von zahlreichen Rissen durchzogen. Sie waren schon vor dem Fall vorhanden und sind mit dunklem Gesteinsglas gefüllt, das bei einem Einschlag auf dem Mutterkörper des Meteoriten entstand.



Science / AAAS



TILMANN ALTHAUS ist seit 2002 Redakteur bei »Sterne und Weltraum« und betreut vor allem Themen zur Planetenforschung und Raumfahrt.

Literaturhinweise

Borovička, J. et al.: The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. In: Nature, doi:10.1038/nature12671, 2013

Brown, P.G. et al.: A 500-kiloton airburst over Cheljabinsk and an enhanced hazard from small impactors. In: Nature, doi:10.1038/nature12741, 2013

Popova, O.P. et al.: Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. In: Science, doi: 10.1126/science.1242642, 2013

Weblinks zum Thema unter: www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1214574

FÜR ALLE, DENEN

SOWEIT DAS AUGE REICHT

NOCH NIE WEIT GENUG WAR.



Giles Sparrow
**FASZINATION
STERNENHIMMEL**
320 Seiten, € / D 29,99

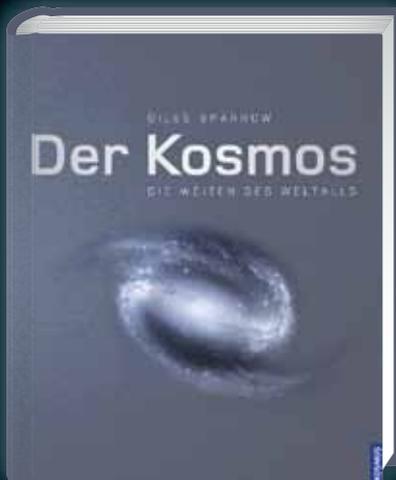
Alle Sternbilder des gesamten Himmels – mit großen Sternkarten, Sagen und Geschichten sowie vielen Tipps für Entdeckungstouren zu Sternen, Planeten und Galaxien. Ein praktischer Himmelsführer und beeindruckender Bildband.



**TOPAKTUELL
DAS
HIGGS-BOSON:
VON DER
ENTDECKUNG
BIS ZUM
NOBELPREIS**

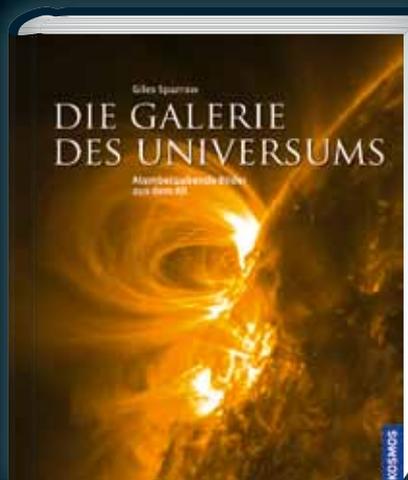
Rüdiger Vaas
**VOM GOTTESTEILCHEN
ZUR WELTFORMEL**
512 Seiten, € / D 24,99

Wie sind die Bausteine des Universums entstanden? Und was hat das mit dem Higgs-Boson zu tun? Rüdiger Vaas spannt den Bogen vom Allerkleinsten zum Allergrößten: Gibt es wirklich eine „Weltformel“?



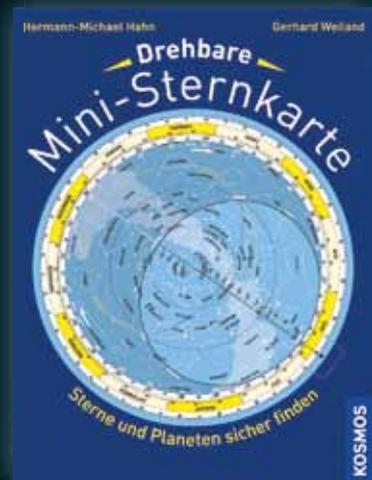
Giles Sparrow
DER KOSMOS
224 Seiten, € / D 78,-

Eimalig in Größe und Qualität wird dieser traumhaft schöne Bildband Sie in die unendlichen Weiten des Weltalls entführen.



Giles Sparrow
DIE GALERIE DES UNIVERSUM
224 Seiten, € / D 39,99

Bilder einer astronomischen Ausstellung: Planeten, Sterne und Galaxien erscheinen wie Werke eines kosmischen Künstlers.



Hermann-Michael Hahn • Gerhard Weiland
DREHBARE MINI-STERNKARTE
€ / D 9,99

Klein, aber oho! Die drehbare Mini-Sternkarte passt in jede Tasche und zeigt für jeden Tag und jede Uhrzeit den aktuellen Himmelsausschnitt.