

Einschläge ohne Rhythmus

Eine neue statistische Untersuchung widerlegt Studien, die ein periodisches Ab- und Zunehmen der Einschlagswahrscheinlichkeit von Asteroiden und Kometen auf der Erde behauptet hatten.

Von Markus Pössel

Nur einige Jahre, nachdem der Physiker Luis Alvarez (1911–1988) und sein Sohn, der Geologe Walter Alvarez, die Theorie aufgestellt hatten, das Aussterben der Dinosaurier sei auf einen Asteroideneinschlag zurückzuführen, nahmen sich die Paläontologen David Raup und Jack Sepkoski Daten zur Artenvielfalt von Meerestieren vor und untersuchten die darin enthaltenen Hinweise auf Massenaussterben, sprich: auf das vergleichsweise plötzliche Verschwinden vieler Arten zu einem gegebenen Zeitpunkt. Sie fanden, dass sich solche Massenaussterben mit einiger Regelmäßigkeit etwa alle 26 Millionen Jahre ereigneten.

Bereits in ihrem ersten Artikel von 1984 hatten Raup und Sepkoski angemerkt, diese Periodizität könne auf extraterrestrische Einflüsse zurückgehen; mit den Arbeiten von Vater und Sohn Alvarez war ein möglicher solcher Einfluss, nämlich die Kollision der Erde mit einem Asteroiden oder Kometen, zu großer Prominenz gelangt. So überrascht es nicht, dass eine ganze Reihe von Wissenschaftlern zu untersuchen begann, ob nicht die Einschlagrate solcher Himmelskörper

auf der Erde die gesuchte Regelmäßigkeit aufweisen könnte – mit der Periodizität der Extinktionseignisse als Folge.

Die direkte Möglichkeit, nach solchen Periodizitäten zu suchen, besteht darin, die Spuren von Einschlägen zu betrachten: die knapp 180 Krater, die sich heute noch auf der Erde nachweisen lassen. Rund zwei Drittel davon lassen sich geologisch datieren; für rund ein Drittel lassen sich zumindest Ober- oder Untergrenzen für das Alter bestimmen (siehe Grafik S. 38).

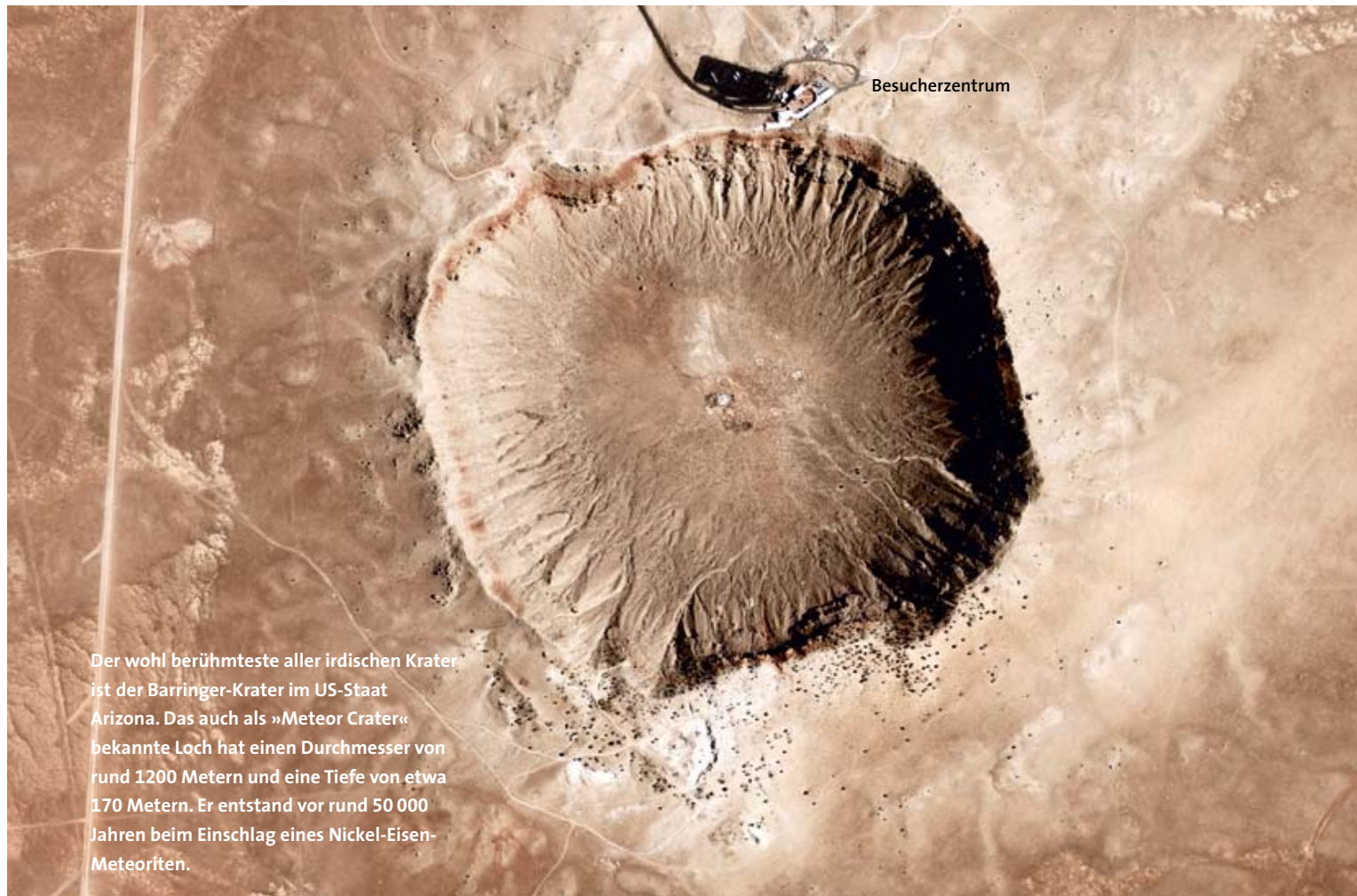
Dieses Datenmaterial scheint geeignet, der Frage nach periodischen Veränderungen der Einschlagwahrscheinlichkeit nachzugehen. Genau dies taten eine Reihe von Autoren, angefangen 1984 mit Walter Alvarez und seinem Physikerkollegen Richard A. Muller und, unabhängig, dem Biologen Michael Rampino und dem Astronomen Richard Stothers – wobei sich mit zunehmender Anzahl der Veröffentlichungen allerdings eine deutliche Streuung zeigte: Die aus der Kraterstatistik abgeleiteten Perioden liegen zwischen 13 und 50 Millionen Jahren.

Parallel dazu gab es Überlegungen, welcher Mechanismus solch eine Periodi-

zität bewirken könnte. Rampino und Stothers schlugen das regelmäßige Pendeln unseres Sonnensystems senkrecht zur Scheibenebene unseres Milchstraßensystems vor, bei dem sich die Sonne abwechselnd ober- und unterhalb der Scheibenebene aufhält. Im Laufe jedes Zyklus, dessen Dauer zwischen 50 und 75 Millionen Jahre betragen soll, ändern sich auch die winzigen Gezeitenkräfte, mit denen die umliegenden Sterne auf die Objekte der Oort'schen Wolke wirken, jener Ansammlung riesiger Brocken aus Eis und Staub, die unser Sonnensystem im Abstand von rund einem Lichtjahr umgibt. Bewirken diese Änderungen, dass sich mal mehr, mal weniger dieser Brocken als Kometen auf den Weg in das innere Sonnensystem machen und die Erde daher periodisch häufiger und weniger häufig Kollisionen mit Kometen erlebt?

Sonnenbegleiter Nemesis

Eine spektakuläre Alternative kam von dem Astronomen Marc Davis und seinen Kollegen sowie, unabhängig davon, vom Physiker Daniel P. Whitmire und dem Ingenieur Albert A. Jackson: Ihren Annahmen zufolge wäre die Sonne Teil eines



Der wohl berühmteste aller irdischen Krater ist der Barringer-Krater im US-Staat Arizona. Das auch als »Meteor Crater« bekannte Loch hat einen Durchmesser von rund 1200 Metern und eine Tiefe von etwa 170 Metern. Er entstand vor rund 50 000 Jahren beim Einschlag eines Nickel-Eisen-Meteoriten.

National Map Seamless Viewer / US Geological Service

ausgedehnten Doppelsternsystems, und der Begleitstern, vielleicht ein Roter oder Brauner Zwerg, sei entsprechend schwer auszumachen und deshalb bislang auch nicht direkt nachgewiesen. Er befände sich dabei auf einer moderat bis stark gestreckten elliptischen Umlaufbahn. Um eine Periodizität von 26 Millionen Jahren zu erreichen – dem Wert von Raup und Sepkoski entsprechend – müsste die große Halbachse der Bahn immerhin 1,4 Lichtjahre betragen. In den sonnennäheren Regionen jedes Umlaufs würde »Nemesis«, so der von Davis und Mitstreitern geprägte Name für den Begleiter, die Bahnen der Objekte der Oortschen Wolke stören und dadurch einen Schwarm von Kometen in Richtung des inneren Sonnensystems schicken.

Freilich gab es auch kritische Stimmen hierzu. Sowohl zu den Aussterbe-Periodizitäten als auch zu den aus Kraterdaten abgeleiteten periodischen Variationen der Einschlagwahrscheinlichkeit erschienen recht schnell Veröffentlichungen, welche die statistischen Analysen in Zweifel zogen.

Das war der Stand der Dinge, als Coryn Bailer-Jones vom Heidelberger Max-

Planck-Institut für Astronomie vor drei Jahren begann, sich mit dem Thema zu beschäftigen. Als Leiter einer der Datenanalyse-Gruppen für den ESA-Astrometriesatelliten Gaia, der im Jahr 2013 zum Lagrangepunkt L2 geschossen werden soll, fragte er sich, ob Gaia-Daten in Zukunft helfen könnten, die Rolle einiger der vorgeschlagenen Mechanismen hinter den Periodizitäten aufzuklären. Infrage kamen dabei das Hin- und Herbendeln durch die galaktische Scheibenebene oder der Umstand, dass unsere Sonne periodisch in die (relativ zur Sternpopulation wandernden) Spiralarme der Milchstraße gerät.

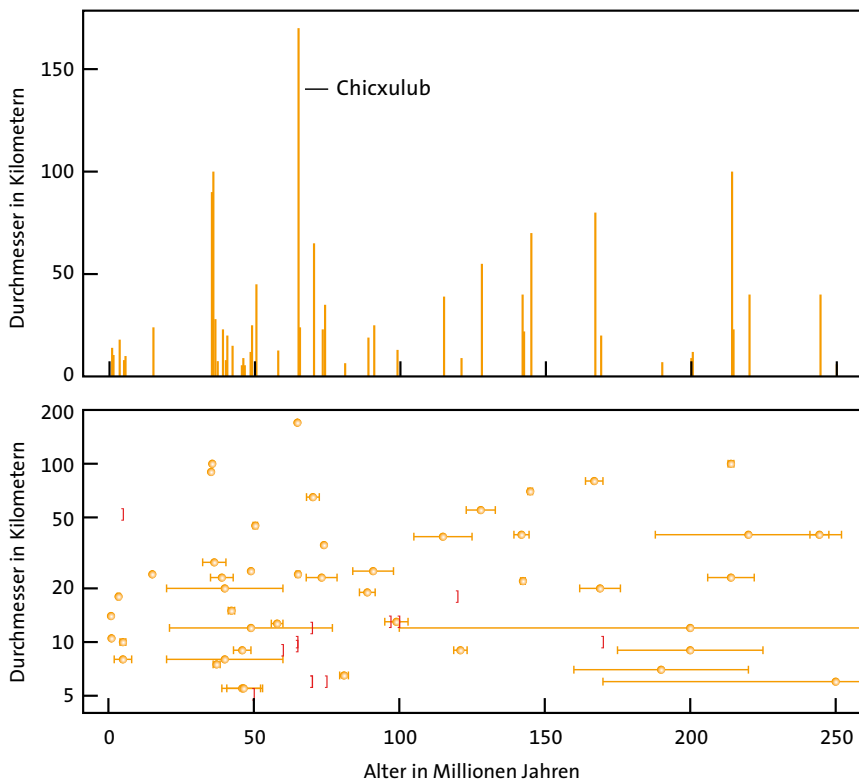
Stimmt die Hypothese?

Rasch stieß Bailer-Jones dabei auf Aspekte der Debatte, in denen er ein grundsätzliches Problem herkömmlicher Statistik wiedererkannte: Das traditionelle, »frequentistisch« genannte Vorgehen zur Überprüfung einer Hypothese besteht darin, eine alternative Hypothese aufzustellen, die so genannte Nullhypothese. Soll die Hypothese einen bestimmten Einfluss oder einen bestimmten Zusammenhang nachweisen, dann drückt die

Nullhypothese aus, dass ein Einfluss beziehungsweise ein Zusammenhang nicht besteht. Sagt die Hypothese beispielsweise aus, dass ein bestimmtes Medikament zur Behandlung der Krankheit X wirksam ist, dann wäre die Nullhypothese, dass das Medikament nicht besser wirkt als ein Placebo.

Ist die Nullhypothese erst einmal definiert, so lässt sich anhand der verfügbaren Daten die folgende Frage beantworten: Vorausgesetzt, die Nullhypothese träte zu, wie wahrscheinlich wäre es dann, bei einer Beobachtung oder Messung die tatsächlich erlangten Daten zu erhalten? Ist diese Wahrscheinlichkeit zu gering (fünf Prozent und ein Prozent sind typische Schwellenwerte), dann wird die Nullhypothese verworfen und im Gegenzug die ursprüngliche Hypothese akzeptiert.

In der konkreten Anwendung birgt dieses Vorgehen einige Tücken. Eine generelle Schwierigkeit besteht darin, dass die für die Nullhypothese durchgeführte Rechnung nicht automatisch ein Maß für die Wahrscheinlichkeit derjenigen Hypothese liefert, die man überprüfen möchte. Es ist nämlich durchaus möglich, dass



eine ganz andere Hypothese die richtige Erklärung darstellt. Weitere Fallstricke stellen die verschiedenen Möglichkeiten dar, die Nullhypothese bei der Auswertung ungewollt unfair zu benachteiligen – im Falle der Krateranalyse etwa dadurch, dass man die Länge der Periode zwar direkt aus den Daten ableitet, sie in der statistischen Auswertung dann aber so behandelt, als wäre sie unabhängig von den Daten vorgegeben gewesen.

Wahrscheinlichkeitsberechnung besser mit bayesscher Statistik

Um diese und weitere Probleme zu vermeiden, wählte Bailer-Jones eine alternative Methode, Wahrscheinlichkeiten zu berechnen: die so genannte bayessche Statistik. Sie ist geeignet, mehrere alternative Hypothesen direkt miteinander zu vergleichen. Für die Kraterdaten wählte Bailer-Jones mehrere Vergleichshypothesen:

- die konstante Einschlagwahrscheinlichkeit (also die übliche Nullhypothese der traditionellen Statistik),
- einfache periodische Sinusschwingungen (also einen strikt periodischen Verlauf),
- eine Kombination aus periodischem Verlauf und konstanter Grundwahrscheinlichkeit,
- einen Trend, also mit der Zeit zunehmende oder abnehmende Wahrscheinlichkeit, sowie
- eine Überlagerung aus Trend und periodischer Variation.

Ohne Beobachtungs- oder Messdaten, so die Grundannahme, ist keine Hypothese den anderen vorzuziehen. Jeder der Hypothesen wird daher die gleiche Ausgangswahrscheinlichkeit (A-priori-Wahrscheinlichkeit) zugewiesen. Mit Hilfe der bayesschen Statistik lässt sich diese anfängliche Einschätzung anschließend im Licht gegebener Messdaten – in diesem Falle der Altersabschätzungen für die verschiedenen Krater – systematisch revidieren und denjenigen Hypothesen, die besser (schlechter) mit den Messdaten vereinbar sind, eine entsprechend höhere (geringere) Wahrscheinlichkeit zuweisen.

Auch in der bayesschen Statistik gibt es Subtilitäten, also Raffinessen, die es angemessen zu berücksichtigen gilt – etwa bei der Auswahl von A-priori-Wahrscheinlichkeiten. Doch diese, so zeigt sich, fallen bei der Kraterauswertung

Für seine Analyse standen Coryn Bailer-Jones insgesamt 59 Kraterdatierungen zur Verfügung. Der obere Teil der Grafik zeigt die Alter der Krater und ihren Durchmesser. Der untere Teil enthält 13 weitere Krater, von denen nur eine obere Altersgrenze bekannt ist (rot). Zur besseren Darstellung der kleinen Krater sind dort die Durchmesser logarithmisch aufgetragen.



In der farbkodierten Höhenkarte ist der Einschlagkrater des Nördlinger Ries deutlich auszumachen. Auf solch einer aus Satellitendaten erstellten topografischen Karte tritt die Struktur des erodierten und aufgefüllten Kraters deutlicher hervor als auf einem Satellitenfoto.

ZUM NACHDENKEN

Tycho, Chicxulub und Ries



In die Untersuchung von Coryn Bailer-Jones (siehe S. 36) flossen alle irdischen Kraterbekanntentstehungsdatums ein. Dazu zählen auch das Nördlinger Ries und der Chicxulub-Krater auf der Halbinsel Yucatán vor 65 Millionen Jahren. Nach einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2007 stammen die Impaktoren, die den Chicxulub-Krater und den Mondkrater Tycho schufen, vom selben Mutterkörper ab wie der Asteroid (298) Baptistina.

Aufgabe 1: a) Welche minimale Einschlaggeschwindigkeit v_{\min} kann ein Impaktor bei Erde und Mond besitzen? Unter der Annahme, dass der Impaktor im Unendlichen die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$ hat und nur durch die Gravitation des jeweiligen Körpers beschleunigt wird, folgt sie aus der Anwendung des Energiesatzes $E_{\text{ges}}|_{\text{Einschlag}} = E_{\text{ges}}|_{\infty}$ mit $E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$, $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$ und $E_{\text{pot}} = - G m M/R$. Die Radien und Massen von Erde und Mond sind: $R_E = 6378$ km, $R_M = 3476$ km, $M_E = 5,974 \cdot 10^{24}$ kg, $M_M = 7,349 \cdot 10^{22}$ kg, Gravitationskonstante $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$. **b)** Welcher Name wurde für v_{\min} geprägt?

Aufgabe 2: Unter der Annahme, dass die jeweiligen Impaktoren zusätzlich zu v_{\min} aus Aufgabe 1 eine Anfangsgeschwindigkeit von 10 km/s besaßen und ihre Dichte $\rho = 3 \text{ g/cm}^3$ betrug, berechne man ihre Größe d . Als Messwerte stehen die Kraterdurchmesser zur Verfügung: $D_T = 86,2$ km, $D_C = 180$ km und $D_R = 24$ km. Impaktoren der Energie E_{kin} schlagen auf der Erde einen Krater der Größe $D_E = 0,074 \kappa W^{1/3,4}$ km. Dabei ist κ ein Korrekturfaktor. Für Krater größer als 4 km gilt: $\kappa = 1,3$. Die dimensionslose Einschlagenergie ist $W = E_{\text{kin}}/kt_{\text{TNT}}$, wobei eine Kilotonne TNT (kt_{TNT}) der Energie $4,185 \cdot 10^{12}$ Joule entspricht. Die Größe von Kratern auf dem Mond lässt sich mit Hilfe der Skalierung $D_M/D_E = (g_E/g_M)^{1/6}$ bestimmen. Darin bezeichnet g die Schwerebeschleunigung: $g = G M/R^2$. AMQ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **15. November 2011** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528246. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern **Preise** verlost: siehe S. 117

als 35 Kilometer im Durchmesser und jünger als 400 Millionen Jahre, lässt sich der Trend in der Tat schon nicht mehr nachweisen.

Andererseits könnte zumindest ein Teil des Anstiegs real sein. Anstatt auf der Erde nach Kratern zu suchen, wo Wind und Wetter für kräftige Erosion von Oberflächenmerkmalen sorgen, kann man auch den Mond betrachten. Während von dessen Kratern nur in wenigen Ausnahmefällen (durch das Apollo- und das Luna-Programm) direkte Datierungen vorliegen, lässt sich aus der Überdeckung älterer durch jüngere Krater sowie aus den strahlenförmigen Auswürfen, den Ejekta, deren hellere Farbe im Laufe der Jahrtausende immer weiter nachdunkelt, abschätzen, wie sich die Einschlagrate mit der Zeit verändert hat. Einige Autoren sehen hier einen ähnlichen Aufwärtstrend, wie ihn Coryn Bailer-Jones für die irdischen Krater erhalten hat – genauer: Sie erhielten eine solche Einschlagrate, die sich im Laufe der letzten 300 Millionen Jahre so gut wie verdoppelt hat.

Welche Rolle Auswahleffekt und realer Anstieg bei der Erklärung des Trends spielen, muss sich erst noch erweisen. Bailer-Jones hat als nächstes Forschungsziel, und hier schließt sich der Kreis, jedenfalls die Artenvielfalt im Visier und möchte untersuchen, zu welchem Ergebnis – Periodizität? Trend? – eine bayesische Auswertung für diesen Datensatz gelangt.

nicht ins Gewicht. Stattdessen kommen die Stärken des Verfahrens voll zum Tragen, insbesondere beim Umgang mit Fällen, in denen nur Altersgrenzen, aber keine konkreten Alterswerte für Krater vorliegen.

Analyse zeigt neue Ergebnisse

Das erste Ergebnis von Bailer-Jones' Untersuchung lautet:

■ Einfache periodische Variationen, wie sie in den erwähnten früheren Studien behauptet worden waren, sind anhand der verfügbaren Daten auszuschließen. Stattdessen zeigen die Daten eine allgemeine Tendenz:

■ Seit rund 250 Millionen Jahren hat die Einschlagwahrscheinlichkeit – abgeschätzt anhand der zu verschiedenen Zeiten entstandenen, heute noch nachweisbaren Krater – stetig zugenommen.

Das entspricht einem der bereits erwähnten Fallstricke traditioneller Statistik: Wer in solch einer Situation die Nullhypothese »konstante Einschlagwahrscheinlichkeit« ablehnt und stattdessen auf Periodizität schließt, übersieht, dass es noch andere Möglichkeiten gibt, zum Beispiel eben solch einen allgemeinen Trend.

Was steckt hinter diesem Trend? Die erste Möglichkeit ist, dass es sich um einen Auswahleffekt handelt: Größere und/oder jüngere Krater lassen sich einfacher nachweisen als kleinere und/oder ältere. Kleinere Krater erodieren schneller und sind nach einer gewissen Zeit nicht mehr auffindbar, und ältere Krater haben generell mehr Zeit, zu erodieren und sich wieder mit Material zu füllen als jüngere Krater. Betrachtet man in Bailer-Jones' Analyse nur Krater größer



MARKUS PÖSSEL leitet das Haus der Astronomie in Heidelberg.

Literaturhinweise

Bailer-Jones, C. A. L.: Bayesian time series analysis of terrestrial impact cratering. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 416, S. 1163–1180, 2011

Bailer-Jones, C. A. L.: The evidence for and against astronomical impacts on climate change and mass extinctions: a review. In: International Journal of Astrobiology 8, S. 213–219, 2009