



Gedanken zur Erforschung von Meteoritenkratern: Wo stehen wir im Jahr 2026?

Autor: Prof. Dr. Christian Köberl, *Universität Wien und Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien*

Alle Himmelskörper im Sonnensystem mit festen Oberflächen sind von Kratern bedeckt. Anders als auf den meisten Planeten und Monden ist die Erkennung von Einschlagkratern und Auswurfsschichten auf der Erde schwierig, da geologische und atmosphärische Prozesse die Spuren von Einschlägen innerhalb geologisch kurzer Zeiträume verwischen oder auslöschen.

Aber Impaktkrater sind nicht nur astronomisch oder geologisch von Interesse. Unser tägliches Leben ist voll von Gefahren. Autounfälle, Flugzeugabstürze, Erdbeben oder Vulkanausbrüche sind sicherlich bekannt. Wer hat allerdings daran gedacht, durch die Explosion oder den Einschlag eines Meteoriten, Kleinplaneten oder Kometen sterben zu können? Kaum jemand macht sich im täglichen Leben Sorgen darüber, ob er oder sie nun im Laufe der nächsten 50 Jahre durch einen Vulkanausbruch, Tornado, Flutwelle, Erdbeben oder ein seltenes Grippevirus umkommen wird - trotzdem kann es passieren. Ähnlich ist das mit Meteoriteneinschlägen. Dabei kennen wir auf der Erde eine ganze Menge Spuren von Meteoriteneinschlägen, deren Entstehung für einige Zeit und für ein bestimmtes Gebiet (in manchen Fällen auch für den gesamten Planeten) katastrophale Auswirkungen gehabt haben. Neben den Meteoritenkratern, die Zeugen von relativ großen Einschlagsereignissen sind, sollten wir auch Explosionen von kleineren kosmischen Eindringlingen über der Erdoberfläche nicht vergessen, obwohl nach hundert oder zweihundert Jahren in der Natur kaum noch etwas an eine solche Katastrophe erinnert.

Obwohl „Krater“ auf verschiedenen Himmelskörpern (vor allem auf dem Erdmond) seit der Erfindung des Fernrohres und den darauffolgenden Untersuchungen durch Galilei (1610) und Nachfolger bekannt waren, gab es verschiedene Hypothesen zur Erklärung der Bildung dieser Strukturen. Die bis in das 20. Jahrhundert vorherrschende Meinung war, dass praktisch alle Mondkrater durch Vulkanismus gebildet wurden. Weiters wurde bis vor nur wenigen Jahren die Untersuchung von Meteoritenkratern als ein Thema für die Astronomie, und nicht für die Erdwissenschaften, angesehen. Die Vorgänge, die die Gestalt unserer Erde bestimmten, wurden als langsame und endogene Prozesse gesehen, in der Tradition von James Hutton und Charles Lyell. Bekannte Impaktstrukturen, wie etwa das Nördlinger Ries in

Gedanken zur Erforschung von Meteoritenkratern: Wo stehen wir im Jahr 2026?

Autor: Prof. Dr. Christian Köberl, *Universität Wien und Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien*

Süddeutschland oder der Meteor Crater in Arizona, wurden als Ausnahmen betrachtet. Bis zur Mitte unseres Jahrhunderts noch waren viele Geologen – dem Beispiel von Lyell folgend – der Meinung, Einschlagskrater gäbe es auf der Erde nicht wirklich, denn die Entstehung eines solchen Kraters wurde ja von Menschen bisher noch beobachtet.

Erst seit etwa 1980 hat die Diskussion von Meteoriteneinschlägen und deren geologischer Bedeutung auch Eingang in den "geologischen Alltag" gefunden. Dies war vor allem die Folge von Untersuchungen der Gesteine an der Kreide-Tertiär-Grenze, wobei aus chemischen Anomalien auf ein gigantisches Einschlagsereignis vor knapp 66 Millionen Jahren geschlossen wurde, das mit dem schon lange bekannten Aussterben der Dinosaurier und anderer Lebewesen in Verbindung gebracht wurde. Bei diesem Einschlagsereignis wurde der erst 1991 entdeckte - knapp 200 km durchmessende - Chicxulub-Krater im heutigen Mexiko gebildet (Abbildung 1), und die mit diesem Impaktereignis verbundenen Umweltkatastrophen markieren das Ende der Kreidezeit und führten zum Aussterben einer Vielzahl von Lebewesen auf der Erde.

Mittlerweile wurden zirka 200 Impaktkrater auf der Erde bestätigt (siehe aber die Diskussion weiter unten zum aktuellen Stand). Während der letzten zwei oder drei Jahrzehnte ist die Planetologie außerdem zu der Erkenntnis gelangt, dass Einschlagsereignisse während der Entwicklung unseres Sonnensystems viel wichtiger waren, als früher angenommen. Impakte waren schon von Anbeginn an wichtig: die Planeten wurden durch Zusammenstöße kleiner Körper, der sogenannten Planetesimale, gebildet. Und die momentan am besten mit den Beobachtungen übereinstimmende Hypothese der Entstehung unseres Erdmondes besagt, dass vor etwa 4.45-4.50 Milliarden Jahren ein etwa Mars-großer Körper mit der Protoerde kollidierte, und aus den Überresten dieser Katastrophe entstand der Mond.

Ein instruktives Beispiel bietet die Oberfläche unseres Erdmondes, die vollkommen von Kratern bedeckt ist (Abbildung 2). Durch die Untersuchung der Häufigkeit und Verteilung von Einschlagskratern auf dem Erdmond kann man die Impakthäufigkeit im inneren Sonnensystem (also in Erdnähe) bestimmen. Der Mond hat keine Atmosphäre und ist auch nicht (mehr) geologisch aktiv, sodass seine Oberfläche alle Einschlagsereignisse, die über mehrere Milliarden Jahre erfolgt sind, aufgezeichnet hat. Auf Grund ihrer höheren Anziehungskraft wurde die Erde im Laufe der Jahrtausende von einer noch größeren Zahl an kosmischen Projektilen getroffen als der Mond. Die Oberfläche der Erde sollte also mit Einschlagskratern bedeckt sein (vor allem im Vergleich mit der Mondoberfläche). Die Erklärung, warum man auf der Erdoberfläche eher selten Einschlagskrater sieht, hängt mit aktiven geologischen Vorgängen, wie etwa Erosion, Subduktion, Sedimentation, Vulkanismus, etc., zusammen. Dadurch werden Einschlagskrater auf der Erdoberfläche entweder abgetragen und zerstört oder durch spätere Gesteinsbildungen verdeckt.

Aus astronomischen Untersuchungen sowie aus geochronologischen Untersuchungen der bekannten Meteoritenkrater, kann die Frequenz der Einschläge von kosmischen Körpern

Gedanken zur Erforschung von Meteoritenkratern: Wo stehen wir im Jahr 2026?

Autor: Prof. Dr. Christian Köberl, Universität Wien und Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien

untersucht werden. Daraus findet man etwa, dass Körper mit etwa 1 km Durchmesser, die Krater von etwa 20-40 km Durchmesser schlagen (wie zum Beispiel das Nördlinger Ries), etwa einmal pro Million Jahre auf der Erde auftreten. Kleine Einschläge (Krater mit etwa 1 km Durchmesser, wie z.B. der Meteor Crater in Arizona) sind wesentlich häufiger - einmal pro etwa 10,000 Jahre. Wirklich große Einschläge, die zur Bildung von Kratern im Bereich von mehr als 100 km Durchmesser führen, sind seltener und treten wahrscheinlich etwa einmal in 50-100 Millionen Jahren auf. Solche gigantischen Einschlagsereignisse sind es dann auch, die zu globalen Katastrophen – und möglicherweise zu Massensterben – führen können. Die ältesten erhaltenen Spuren von Einschlägen auf der Erde datieren auf etwa 3,4 Milliarden Jahre; die älteste (teilweise) erhaltene Einschlagstruktur ist 2,2 Milliarden Jahre alt. Obwohl die frühen Spuren von Einschlägen nicht gut erhalten sind, wissen wir, dass Einschläge gravierende Auswirkungen auf die geologische und biologische Evolution der Erde hatten.

Nicht nur für Geologen, aber auch für die interessierte Öffentlichkeit stellt sich - auf Grund der Bedeutung und möglichen Gefahr die mit Impakten zusammenhängt - die Frage, wie man nun eigentlich nachweisen kann, ob eine bestimmte geologische Struktur durch einen Einschlag entstanden ist. Luftbilder und Satellitenaufnahmen sind zur Enddiagnose ungeeignet, können aber natürlich Hinweise geben. Auch geophysikalische Beobachtungen, wie etwa Schwerkraft, Magnetik oder seismische Untersuchungen, können ebenfalls wertvolle Hinweise liefern, aber zur Bestätigung einer Struktur als durch Impakt entstanden sind sie auch nicht geeignet. Das hängt unter anderem damit zusammen, dass auf der Erde viele geologische Strukturen in etwa kreisähnlich sein können, auch ohne durch Impakt entstanden zu sein.

Was wirklich nötig ist, sind petrographische und mineralogische sowie geochemische Untersuchungen an Gesteinsproben der jeweiligen Struktur. Die geochemische Untersuchung von Impaktprodukten - wie zum Beispiel Impaktgläser, Impaktschmelze und andere Impakt-Brekzien - kann Hinweise auf die Entstehungsgeschichte sowie auf das Alter der jeweiligen Meteoritenkrater geben. Anreicherungen an Elementen, die in Meteoriten häufig vorkommen (wie zum Beispiel die Platinmetalle), können gute Hinweise auf die Impaktentstehung einer Struktur geben. Besonders wichtig für die Bestimmung der Impaktnatur eines Kraters sind Impaktbrekzien. Durch die hohe Impaktenergie beim Einschlag wird eine Schockwelle gebildet, die durch das Gestein läuft und zu unumkehrbaren Änderungen der Kristallstruktur der gesteinsbildenden Minerale führt. Die Schockwellen laufen sowohl in das Target, als auch in das Projektil, hinein. Die enorm hohen Drucke, die mit den Schockwellen verbunden sind, übersteigen bei weitem die Materialstärke der Gesteine, die bei der Entlastung nach der Kompression schlagartig aufschmelzen oder verdampfen. Die dabei auftretenden Drucke sind im Bereich von Megabar (Millionen Bar, also Millionen Mal höhere Drucke als der Luftdruck auf der Erdoberfläche).

Bei diesen Prozessen werden die Gesteine sowohl lokal und also im weiteren Umfeld zerrüttet – es entsteht eine sogenannte Brekzie. Im konkreten Fall spricht man von Impaktbrekzien, wobei hier verschiedene Typen unterschieden werden. Oft werden Gesteine zerbrochen und

Gedanken zur Erforschung von Meteoritenkratern: Wo stehen wir im Jahr 2026?

Autor: Prof. Dr. Christian Köberl, Universität Wien und Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien

während Kraterbildung viele Kilometer am Boden oder durch die Luft bewegt, wobei dann verschiedene Gesteinstypen zusammengemischt und zementiert werden; das Resultat nennt man eine polymikte Brekzie. Wenn eine solche Brekzie Überreste von geschmolzenem Gestein enthält (da der Druck und die Temperatur so hoch waren, dass Targetgestein aufgeschmolzen wurde), nennt man ein solches Gestein einen "Suevit" (nach dem lateinischen Namen für die Region Schwaben in Süddeutschland, wo die Typenformation für diese Brekzienart im Nördlinger Ries auftritt). Ein Beispiel eines Suevits – mit Glaseinschlüssen – ist in Abbildung 3 gezeigt. Die Temperatur, der einige Komponenten dieses Gesteins ausgesetzt waren, betrugen bis zu 2000°C.

Bei Einschlagsereignissen kommt es also innerhalb kürzester Zeiträume zu sehr hohen Drucken und Temperaturen, die um Größenordnungen höher sind als jene, die bei normalen endogenen (internen) geologischen Prozessen (z.B. Gebirgsbildung, Vulkanausbrüche) auftreten. Dabei kommt es zu unumkehrbaren Veränderungen in den Gesteinen und Mineralen des Gesteins, in das der Impakt erfolgt. Insbesondere die Kristallstruktur der Minerale wird durch die hohen Drücke gestört. Kristallographische Veränderungen, die typisch für die Schock-Metamorphose (auch "Stoßwellenmetamorphose" genannt) sind, werden als "planare Deformationsstrukturen" (PDF) bezeichnet. Diese sind auf Änderungen im Kristallgitter von Mineralen (zum Beispiel Quarz oder Feldspat) zurückzuführen, die nur mit dem Mikroskop gesehen werden können. Dabei handelt es sich um regelmäßige, parallele und sehr dünne extrem gerade (planare) Lamellen, die einen Quarzkristall durchziehen (daher auch der oft informell verwendete Begriff "Schocklamellen"); siehe Abbildung 4. Die Form und Art der planaren Deformationsstrukturen ist charakteristisch und kommt in dieser Art in der Natur ausschließlich in Gesteinen von Einschlagskratern vor. Das Vorhandensein solcher Schockstrukturen ist daher ein eindeutiger Beweis für die Impaktentstehung eines Kraters.

Die Bestätigung einer geologisch interessanten und auffälligen Struktur als Impaktkrater bedarf also relativ langwieriger und oft auch technisch aufwendiger geologischer, geophysikalischer, petrographischer und geochemischer Untersuchungen. Im Zeitalter der einfach zu beschaffenden Satellitenbilder wird oft und unkritisch eine annähernd kreisähnliche Struktur unbekannter (oder nicht nachgeprüfter) geologischer Natur als Impaktkrater bezeichnet. Einfache, sogar wellige Linien in Quarzkristallen werden als Schocklamellen bezeichnet, und chemische Anomalien – aus dem Zusammenhang gerissen – werden als Beweis für eine Impaktnatur zitiert. Leider häufen sich solche oberflächlichen Untersuchungen in der jüngeren Vergangenheit.

Unter anderem auch aus diesen Gründen wurde im Jahr 2023 von der Meteoritical Society das Komitee für Impaktkraterforschung (Impact Cratering Committee: ICC) gegründet – analog zum Meteoriten-Nomenklaturkomitee, welches Informationen zu möglichen Meteoriten überprüft und diese dann gewissermaßen „offiziell“ macht. Das ICC hat acht Mitglieder und zwei Haupt-Aufgaben: 1) die Formulierung der aktuell anerkannten Kriterien für die Diagnose von Meteoriteneinschlagsprozessen, um den Einschlagsprung eines vermuteten Fundortes

Gedanken zur Erforschung von Meteoritenkratern: Wo stehen wir im Jahr 2026?

Autor: Prof. Dr. Christian Köberl, Universität Wien und Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien

oder Materials zu bestätigen, und 2) die Erstellung und Pflege einer aktuellen Datenbank aller bestätigten terrestrischen Einschlagkrater und -strukturen. Eine Beschreibung des ICC sowie eine Liste der aktiven Mitglieder und die Satzung ist hier zu finden: <https://meteoritical.org/society/leadership/impact-cratering-committee>. Heuer hat das ICC nun nach mehrjähriger Beratung die „definitiven“ Kriterien zur Identifikation von terrestrischen Impaktstrukturen publiziert: <https://doi.org/10.1111/maps.70163>. Damit gibt es jetzt auch klar nachvollziehbare offizielle Regeln zur Identifikation von möglichen Einschlagsstrukturen. An einer aktuellen Kraterliste, basierend auf den eindeutigen Kriterien, wird momentan gearbeitet. Allerdings gibt es hier einige Probleme. Wie oben erwähnt sind momentan in etwa 200 Impaktkrater auf der Erde bekannt und in Publikationen und in diversen Online-Datenbanken angeführt. Allerdings ist die Dokumentation der Hinweise auf eine Impakt-Natur nicht bei allen dieser bisher gelisteten Strukturen ausreichend oder detailliert genug, um den neuen, strikteren Kriterien Genüge zu tun. In manchen Fällen sind eher unscharfe Fotos publiziert oder keine Orientierungsdaten der Deformationsstrukturen vorhanden, oder auch, etwa in Falle einiger Strukturen die vor vielen Jahrzehnten in der russischen Literatur beschrieben wurden, sind die entsprechenden Veröffentlichungen entweder nicht oder nicht gut zugänglich bzw. von der Druckqualität ungenügend. Hier ist also noch einiges an Arbeit zu tun.

Abschließend kehren wir noch zu der Problematik der Gefahr von Einschlägen zurück. Die bekanntesten Opfer des Chicxulub-Einschlags vor 66 Millionen Jahren, die Dinosaurier, hatten buchstäblich keine Chance. Heute leben wir in einer hochentwickelten Gesellschaft mit umfangreichem Wissen um unsere kosmische Umgebung. Potenziell gefährliche Asteroiden sind mittlerweile bekannt, ebenso wie Technologien, um die Umlaufbahnen solcher erdnaher Objekte (NEOs) möglicherweise geringfügig zu verändern – die sogenannte „Planetenverteidigung“. Heutige Technologien zur Abwehr von möglicherweise gefährlichen Körpern sind erst am Beginn - vor wenige Jahren wurde mit dem Einschlag einer Raumsonde auf dem Mond eines Asteroiden das Konzept getestet, aber es stehen bisher keine entsprechenden Raketen oder Sonden startbereit, sollte eine Gefahr erkannt werden. Abgesehen von den Kommunikations- und Warnproblemen in beiden Fällen, die mit dem aktuell viel diskutierten Misstrauen gegenüber Behörden und Wissenschaft zusammenhängen, ergeben sich weitere interessante Fragen. Diese Diskussionen könnten im Rahmen eines „Internationalen Jahres der planetaren Verteidigung“ im Jahr 2029 einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Die Vereinten Nationen sind dem Vorschlag der Wissenschaftsgemeinde gefolgt und haben im Dezember 2024 das Jahr 2029 zum "International Year of Asteroid Awareness and Planetary Defence" erklärt. Warum gerade 2029? Weil am 13. April 2029 der etwa 370 Meter große Asteroid Apophis sehr nahe, in ca. 30.000 Kilometern von der Erde, sicher an der Erde vorbeiziehen wird. Das ist näher als viele Satelliten, die sich in der geostationären Umlaufbahn befinden. Apophis wurde 2004 entdeckt. Zunächst löste er bei den Astronomen Besorgnis aus und wurde auch in den Medien ausgiebig thematisiert. Zeitweise galt er als der größte

Gedanken zur Erforschung von Meteoritenkratern: Wo stehen wir im Jahr 2026?

Autor: Prof. Dr. Christian Köberl, Universität Wien und Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien

bekannte Asteroid, der auf Kollisionskurs mit der Erde sein könnte; neue Messungen haben eben gezeigt, dass der Körper knapp an der Erde vorbeiziehen wird, aber sehr knapp: Der Asteroid wird bei dunklem Himmel mit bloßem Auge sichtbar sein.

Ziel des Internationalen Jahres ist es, die Menschheit über die Gefahren naher Asteroiden, ihren wissenschaftlichen Wert, ihr Potenzial für zukünftige Einschläge auf der Erde und die großen Herausforderungen, die mit ihrer Erforschung und ihren Schutzmaßnahmen einhergehen, aufzuklären und vorzubereiten. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, mögliche gefährliche Asteroiden frühzeitig zu entdecken. Es ist nicht verwunderlich, dass kleinere, potenziell ebenfalls gefährliche Körper unentdeckt bleiben können, solange ihre Umlaufbahnen nicht bekannt sind. Dies ist eine wichtige Lektion für all jene, die der Wissenschaft misstrauen und abwarten wollen, bis sie „mit eigenen Augen sehen“, denn dadurch bleibt gefährlich wenig Zeit zum Handeln. Daraus ergibt sich die Frage: Haben wir tatsächlich deutlich bessere Chancen als die Dinosaurier?

Prof. Dr. Christian Köberl

Prof. Dr. Christian Köberl ist ordentlicher Professor (im Ruhestand) für Geowissenschaften an der Universität Wien und war von 2010 bis 2020 Generaldirektor des Naturhistorischen Museums Wien. 2004 wurde er zum korrespondierenden und 2006 zum wirklichen Mitglied der ÖAW gewählt, wo er Mitglied verschiedener Gremien war bzw. ist. Köberl hat bisher über 550 „peer-reviewte“ wissenschaftliche Artikel, 23 Bücher und über 800 Konferenzbeiträge veröffentlicht. Er ist Träger vieler nationaler und internationaler Auszeichnungen, z.B. die Barringer-Medaille der Meteoritical Society, das Österreichische Ehrenkreuz für Wissenschaft und Kunst 1. Klasse, der „Distinguished Service Award“ of the Geological Society of America -- und der Kleinplanet 15963 wurde ihm zu Ehren "Koeberl" genannt. Seine Forschungen befassen sich mit Meteoritenkratern auf der Erde und im Sonnensystem, Isotopengeochemie, und ähnlichen Themen. Er war Projektleiter bei internationalen Tiefbohrprojekten u. a. in Meteoritenkratern in den USA, Russland und Ghana.

Gedanken zur Erforschung von Meteoritenkratern: Wo stehen wir im Jahr 2026?

Autor: Prof. Dr. Christian Köberl, Universität Wien und Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien

Weiterführende Literatur:

Alvarez W. (2008) The Mountains of Saint Francis: Discovering the Geologic Events That Shaped Our Earth. W.W. Norton Publ., 320 pp.

Brandstätter, F., Ferrière, L., und Köberl C. (2013) Meteoriten/Meteorites (Zeitzeugen der Entstehung des Sonnensystems. Witnesses of the Origin of the Solar System), Edition Lammerhuber, 267 pp.

Köberl C. und Schönberger A. (2018) Achtung Steinschlag (Asteroiden und Meteoriten: Tödliche Gefahr und Wiege des Lebens), Christian Brandstätter Verlag Wien, 207 pp.

Schilling G. (2025) Target Earth - Meteorites, Asteroids, Comets, and Other Cosmic Intruders That Threaten Our Planet. MIT Press, 120 pp.

Wien, im Juli 2026

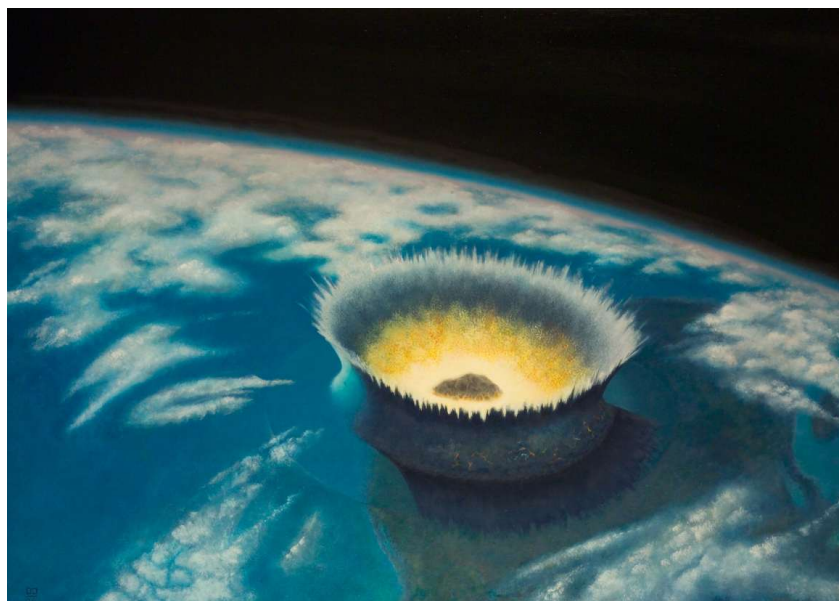


Abbildung 1: Künstlerische Darstellung des Chicxulub-Einschlages im flachen Meerwasser, das damals einen Teil der heutigen Halbinsel Yukatan (Mexiko) bedeckte. Einige Sekunden nach dem Einschlag beginnt gerade die Auswurfphase, und Material aus dem Krater, dessen Bildung gerade beginnt, wird ausgeworfen. (Ölbild von Dona Jalufka, Wien, 1994/2005).

Gedanken zur Erforschung von Meteoritenkratern: Wo stehen wir im Jahr 2026?

Autor: Prof. Dr. Christian Köberl, Universität Wien und Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien

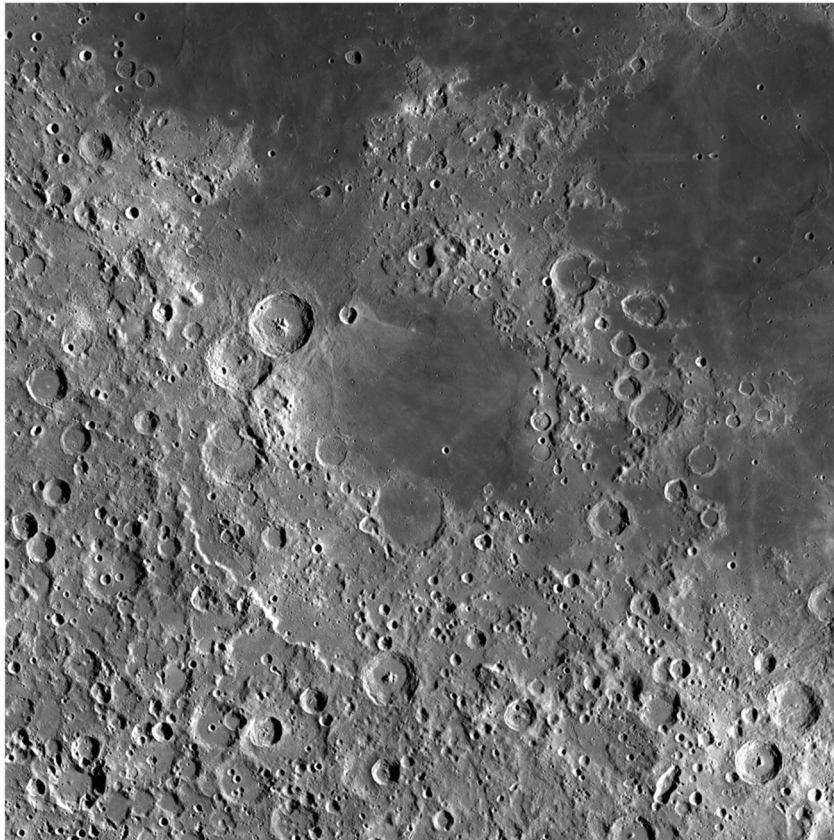


Abbildung 2: Teil der Mondoberfläche (Nektarisbecken, ca. 800 km Durchmesser) mit vielen Einschlagskratern (NASA/Lunar Reconnaissance Orbiter)

<https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/10/mare-nectaris-lro.png>



Abbildung 3: Typischer Suevit (Bosumtwi-Krater, Ghana), ca. 25 cm breit.
Foto: C. Köberl

Gedanken zur Erforschung von Meteoritenkratern: Wo stehen wir im Jahr 2026?

Autor: Prof. Dr. Christian Köberl, Universität Wien und Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien

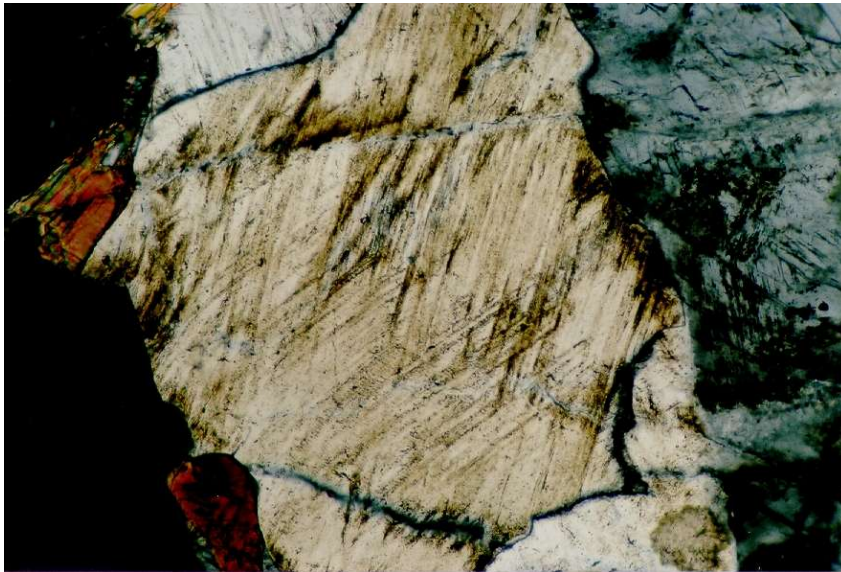


Abbildung 4. Geschockter Quarzkristall im optischen Mikroskop. Besonders deutlich sind die sogenannten planaren Deformationselemente ("Schocklamellen") zu sehen. Das Bild zeigt einen Quarzkristall aus einer Impaktbrekzie des Woodleigh-Kraters (Australien)
Aufnahme: C. Köberl