

Krater zählen auf Pluto und Charon

In Bezug zum Beitrag „Kleine Kuipergürtelobjekte sind vermutlich rar“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 6/2019, Rubrik „Blick in die Forschung: Nachrichten“, S. 13, Zielgruppe: Mittel- und Oberstufe, WIS-ID: 1421025

Monika Maintz

Auch nach Jahren eifriger Forschung gibt der Kuipergürtel den Wissenschaftlern noch viele Rätsel auf. So stellt sich etwa die Frage: Wie viele Objekte in dieser eisigen Region am Rande des Sonnensystems lassen sich anteilig einzelnen Gruppen mit bestimmten Durchmessern zuordnen? Eine Möglichkeit, etwas darüber herauszufinden, ist die Untersuchung von Einschlagkratern auf transneptunischen Objekten (TNOs), also auf Himmelskörpern, die jenseits der Neptunbahn um die Sonne kreisen und die sich im Bereich des Kuipergürtels aufhalten. Dank der NASA-Raumsonde „New Horizons“, die am 14. Juli 2015 an Pluto und seinen fünf Monden, Charon, Hydra, Kerberos, Nix und Styx, vorbeiflog, gibt es nun erstmals hochauflöste Bilder des Zwergplaneten und seines größten Mondes Charon (Abb. 1), die eine eingehende Untersuchung der Oberflächenstrukturen der beiden Himmelskörper – und damit der Anzahl und Größe ihrer Einschlagkrater – erlauben. Dadurch wird auch eine statistische Betrachtung der auf Pluto und Charon vorkommenden Krater möglich. Das Ziel dieses WIS-Beitrages ist, dass die Schüler auf hochauflösten Bildern von Charon eine Krateranalyse durchführen und eine Kraterstatistik erstellen, um daraus wiederum die Größenverteilung der Impaktoren bzw. die Größenverteilung der Objekte im Kuipergürtel abzuleiten.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Kleinkörper	Sonnensystem, Kuipergürtel, transneptunische Objekte, Charon, Pluto, New Horizons-Aufnahmen, Größenverteilung der Kuipergürtelobjekte, Kraterstatistik
Fächerverknüpfung	Astro – Geo Astro – Ma	Oberflächenstrukturen, Einschlagkrater Dreisatz, Statistik
Lehre allgemein	Erkenntnisgewinnungskompetenz, Unterrichtsmittel	Messungen durchführen, Messergebnisse interpretieren und beurteilen, Erkenntnisse gewinnen mit Hilfe von Statistiken, Arbeitsblätter

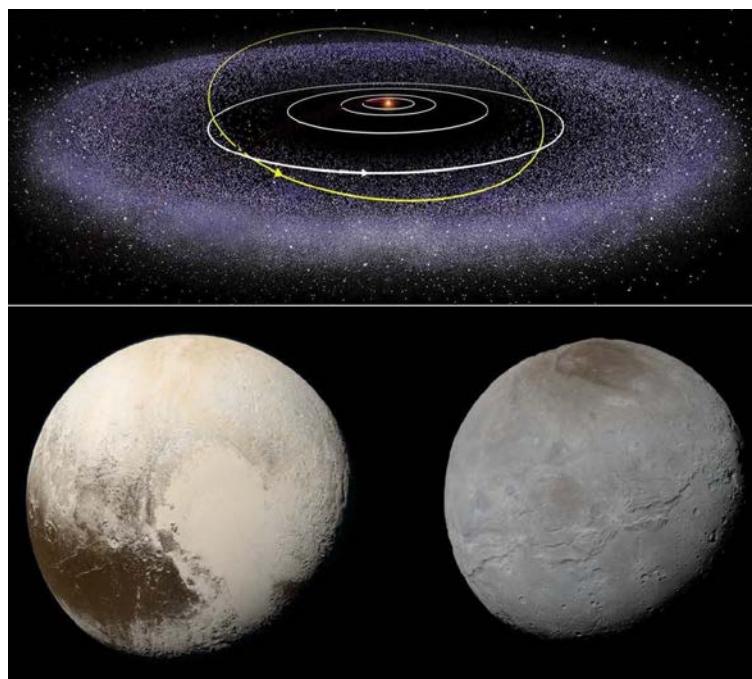


Abbildung 1:

Oben: Der Kuipergürtel umrandet das innere Sonnensystem mit den 8 Planeten (künstlerische Darstellung). Pluto und sein Mond Charon sind Bestandteile des Kuipergürtels. Dieser ist als wolkige Struktur außerhalb der Neptunbahn dargestellt.

© NASA, https://solarsystem.nasa.gov/internal_resources/158/.

Unten: Pluto (links) und Charon (rechts) in natürlichen Farben, wie sie das menschliche Auge wahrnehmen würde. Aufnahmen der NASA-Raumsonde New Horizons vom 14. Juli 2015.

© NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Southwest Research Institute / Alex Parker.

Der Kuipergürtel

Als „Kuipergürtel“ (Abb. 2) bezeichnet man eine scheibenförmige Ansammlung von Kleinkörpern, die sich im äußeren Sonnensystem jenseits der Neptunbahn befindet, zur Ekliptik hin konzentriert ist und sich über einen Bereich erstreckt, der etwa 30 bis 55 Astronomische Einheiten von der Sonne entfernt ist. (Eine Astronomische Einheit, 1 AE, ist definiert als der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne und entspricht einer Strecke von rund 149,6 Millionen km.) Vermutlich bevölkern Millionen von kleinen, zu einem Großteil aus Wassereis bestehende Objekte diese Region. Schätzungsweise haben Hunderttausende dieser „Kuipergürtel-Objekte“ (engl.: Kuiper Belt Objects, KBOs) einen Durchmesser von über 100 km. Weitaus weniger erreichen vermutlich einen Durchmesser von über 1000 km. Zu diesen zählen Pluto und Charon. Neben Wassereis und Gestein enthalten diese Kleinkörper auch zahlreiche andere Bestandteile wie gefrorenes Ammoniak und Methan. Da es sich dabei um Überbleibsel aus der Zeit der Planetenentstehung handelt, in denen die Materie aus der Urzeit des Sonnensystems konserviert ist, sind die Kuipergürtel-Objekte für die Forschung von großem Interesse.

Benannt wurde der Kuipergürtel nach dem Astronomen Gerard Kuiper. Er beschäftigte sich mit der Frage, ob es jenseits von Pluto weitere Himmelskörper geben könnte. Im Jahr 1951 veröffentlichte er einen wissenschaftlichen Artikel zu diesem Thema. Er sagte das Vorhandensein des später nach ihm benannten Kuipergürtels jedoch nicht vorher. Dennoch würdigte man ihn als Ideengeber und Vordenker in Bezug auf die grundsätzliche Idee der Existenz eines Reservoirs von Himmelskörpern jenseits der Neptunbahn. Da es extrem schwierig ist, kleine Himmelskörper in großer Entfernung mit Teleskopen von der Erde aus aufzuspüren, dauerte es bis in die 1990er Jahre hinein, um den Kuipergürtel durch die Entdeckung von weiteren KBOs - neben Pluto und Charon - explizit nachzuweisen. Mittlerweile sind mehr als 2000 dieser Objekte bekannt.

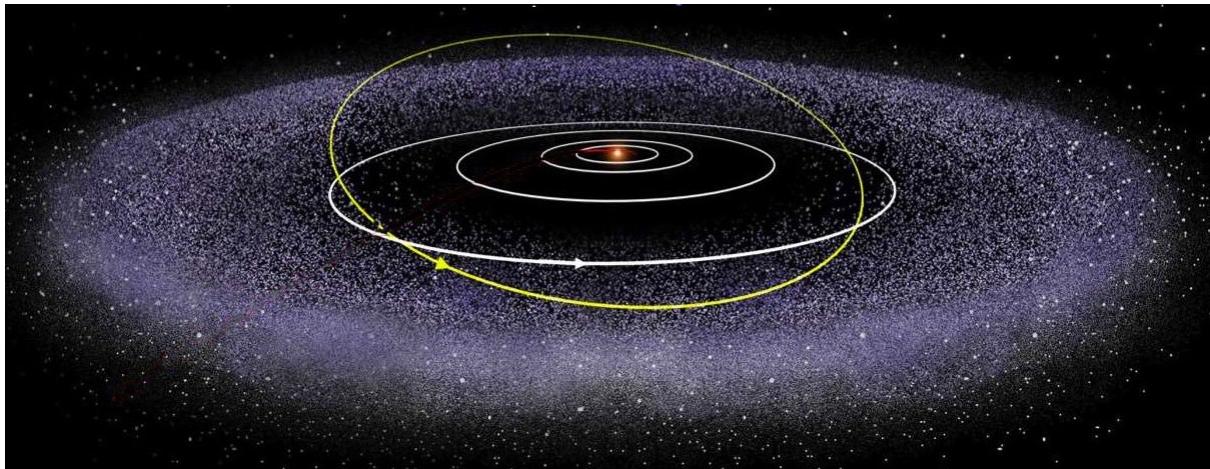


Abbildung 2: Lage des Kuipergürtels im Sonnensystem jenseits der Neptunbahn in künstlerischer Darstellung. Die Bahnen der Planeten nahe der Sonne (Merkur, Venus, Erde und Mars) sind zu klein für das Bild. Die Umlaufbahnen von Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun sind in weiß eingezeichnet. Die Plutobahn ist gelb markiert. Der Kuipergürtel ist als wolkige Struktur außerhalb der Neptunbahn dargestellt.

© NASA, https://solar-system.nasa.gov/internal_resources/158/.

Plutomond Charon

Charon wurde im Juni 1978 von James Christy und Robert Harrington am U.S. Naval Observatory in Flagstaff, Arizona, entdeckt. Er ist der größte und innerste Mond von Pluto. Sein Durchmesser beträgt 1208 km. Damit ist er fast halb so groß wie Pluto. Im Vergleich zu den Morden der Planeten im Sonnensystem ist er relativ zu seinem (Zwerg-)Planeten der größte bekannte Mond. Daher bezeichnet man Pluto und Charon bisweilen auch als „Doppelzwerghypersystem“. Wie der Erdmond in Bezug auf die Erde so befindet sich auch Charon bezüglich Pluto in einer gebundenen Rotation und wendet ihm daher immer dieselbe Seite zu. Für einen Umlauf um Pluto und damit für eine Rotation um sich selbst benötigt er 6,4 Erdtage. Seine Entfernung zu Pluto beträgt 19640 km. Im Gegensatz zu den Erwartungen vieler Wissenschaftler zeigen die Aufnahmen von New Horizons keinen eintönigen, durch Krater zerschundenen Himmelskörper. Vielmehr weist Charon vielfältige Landschaften mit Bergen, Canyons und Erdrutschen sowie unterschiedlich gefärbte Bereiche der Oberfläche auf (Abb. 3)! Eine detaillierte Untersuchung dieser Oberflächenstrukturen ermöglicht nicht nur Aussagen über Charons Entstehung und Entwicklung infolge möglicher geologischer Aktivitäten und Ähnlichem, sondern erlaubt auch Rückschlüsse auf die Kleinkörper im Kuipergürtel insgesamt.



Abbildung 3: Hochauflöste Aufnahme des Plutomonds Charon, fotografiert von New Horizons kurz vor der größten Annäherung der Raumsonde an das Plutosystem am 14. Juli 2015 - farbverbessert, um die Variationen der Oberflächeneigenschaften bestmöglich hervorzuheben. © NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Southwest Research Institute.

Was man mit Hilfe von Kratern über den Kuipergürtel lernen kann

Schon bei einem flüchtigen Blick auf die hochaufgelöste Aufnahme in Abbildung 3 fällt auf, dass die Oberfläche von Charon mit Kratern übersät ist. Diese weisen ganz unterschiedliche Durchmesser auf. Daraus folgt, dass auch die Objekte, die die Einschlagskrater verursacht haben, unterschiedlich groß gewesen sein müssen.

Das Verhältnis der Größe des einschlagenden Objekts oder Impaktors zur Größe des durch den Einschlag erzeugten Kraters liegt in der Regel zwischen 1:10 und 1:20. Anhand des Kraterdurchmessers kann man also direkt auf die Größe des Impaktors schließen.

Diesen Zusammenhang kann man sich zunutze machen, um aus der Analyse der auf Charon vorkommenden Krater die Durchmesser der jeweiligen Einschlagkörper abzuschätzen. Die Größenverteilung dieser Objekte lässt wiederum einen **Rückschluss auf die Häufigkeit zu, mit der Objekte einer bestimmten Größe im Kuipergürtel vertreten sind.**

Dieselbe Untersuchung kann man natürlich mit Hilfe der hochaufgelösten Bilder von New Horizons auch für Pluto durchführen. Der Einfachheit halber beschränken wir uns im Folgenden jedoch auf seinen Mond Charon.

Arbeiten wie die Forscher

Das Ziel dieses WIS-Beitrages ist, die oben skizzierten Überlegungen praktisch anzuwenden und ihre Tauglichkeit und Aussagekraft zu überprüfen. Dabei soll anhand der frei von der NASA zur Verfügung gestellten hochaufgelösten Bilder von Charon eine Krateranalyse durchgeführt und eine Kraterstatistik erstellt werden, aus der wiederum die Größenverteilung der Impaktoren abgeleitet werden soll. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen soll in einem letzten Schritt diskutiert werden, was man daraus über die Größenverteilung der Objekte im Kuipergürtel aussagen kann.

Der Schwerpunkt der Aufgabenstellung liegt jedoch nicht darin, ein möglichst korrektes Ergebnis zu erreichen. Es kommt vielmehr darauf an, dass die Schüler in die Haut der Wissenschaftler schlüpfen und kritisch überprüfen, ob die gewählte Vorgehensweise funktionieren kann, ob bzw. wie gut sie das gesteckte Ziel mit den ihnen zur Verfügung stehenden Arbeitsmitteln erreichen können und wie aussagekräftig die Ergebnisse am Ende tatsächlich sind. Salopp gesagt: Der Weg ist das Ziel und das Erkennen und Identifizieren von auf dem Weg liegenden Stolpersteinen.

Arbeitsmittel

Für die Krateranalyse stehen den Schülern 2 **Arbeitsblätter im Din-A3-Format** zur Verfügung, auf denen die obere und untere Hälfte von Charon jeweils getrennt abgebildet ist – einmal mit und einmal ohne Raster. Dafür wurde das Bild aus Abb. 3 verwendet und aufgehellt bzw. kontrastverstärkt, damit die Oberflächenstrukturen besser hervortreten. Das große Format wurde gewählt, damit auch kleinere Strukturen möglichst noch zu erkennen sind. Für die Kratersuche können die Arbeitsblätter mit dem vorgegebenen Raster verwendet werden, das die obere und untere Hälfte von Charon in insgesamt 16 Felder unterteilt. Die Einteilung in Messfelder kann natürlich bei Bedarf auch beliebig verfeinert werden.

Die Messergebnisse können in die vorgegebene **Tabelle** eingetragen werden. Diese ist auf die Arbeitsblätter mit Raster abgestimmt und somit für 16 Felder angelegt. Wenn eine feinere Einteilung verwendet werden soll, lässt sie sich problemlos ergänzen.

Um eine möglichst aussagekräftige Statistik zu bekommen und ähnlich breite Krater voneinander trennen zu können, sollen die Werte für die Kraterdurchmesser auf einen halben mm genau abgelesen werden. Daher ist für die Messwerte eine sehr feine Einteilung in Bereiche von 1-mm-Schritten vorgegeben. Dies kann aber auch bei Bedarf beliebig verändert werden.

Alternativ zur Tabelle kann ein Tabellenkalkulationsprogramm verwendet werden. Dies vereinfacht die spätere Umrechnungsprozedur der Kraterdurchmesser von mm in km sowie die daraus erfolgende Berechnung der Größe der Einschlagkörper.

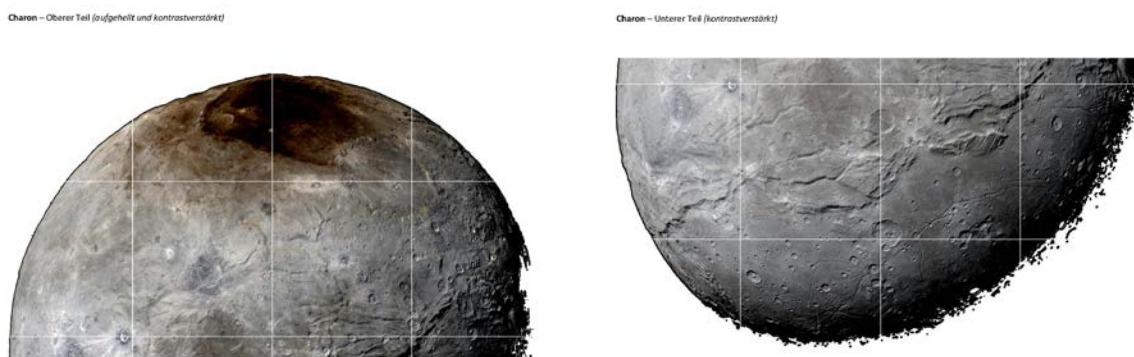


Abbildung 4: 2 Arbeitsblätter, welche die obere und untere Hälfte von Charon mit darüber gelegtem Raster zeigen und zur Krateranalyse dienen. Die Arbeitsblätter werden ergänzt durch eine Tabelle zum Eintragen der Ergebnisse. © Monika Maintz.

Jetzt geht's los!

... und schon tauchen die ersten Probleme auf: Bei der Suche nach Strukturen auf den Arbeitsblättern, die sich eindeutig Einschlagkratern zuordnen lassen, stellt sich schnell heraus, dass das ganz schön knifflig ist. Das führt zu folgenden Fragen:

- Wie kann ich Oberflächenstrukturen eindeutig als Krater identifizieren?
- Wie kann ich die Kraterränder eindeutig bestimmen?
- Wie genau kann ich meine Messwerte überhaupt ablesen?
- Wie wirken sich die bei der Abbildung einer dreidimensionalen Kugel auf eine zweidimensionale Fläche unvermeidlichen Verzerrungen an den Rändern auf das Aussehen der Krater aus? Kann ich hier überhaupt noch aussagekräftige Durchmesser bestimmen?
- Wie wirkt sich die begrenzte Auflösung der gedruckten Bilder auf das Erkennen kleinsten Krater und Genauigkeit der Messungen aus?

Dies zeigt, dass man sich vorher genau überlegen muss, nach welchem Schema man vorgeht. Große Krater sind meist recht gut zu erkennen. Bei kleinen Kratern kann es leicht zu Verwechslungen kommen. Nicht jede runde Kleinststruktur muss auch ein Krater sein. Schnell wird klar, dass man bei der Suche nach den kleinsten Kratern durch die vorgegebene Auflösung der gedruckten Bilder beschränkt ist, auch wenn die Aufnahmen von New Horizons prinzipiell mehr hergeben würden. Die Krateranalyse ist also von vorne herein „nach unten“ zu den kleinsten Kratern hin begrenzt. Die zu erstellende Kraterstatistik kann demzufolge in Bezug auf die allerkleinsten Krater nur eine Obergrenze darstellen, denn noch kleinere Krater sind einfach nicht mehr zu erkennen.

Als Kriterium für die Identifizierung kleiner, aber auch großer Krater kann der Schattenwurf der Kraterränder herangezogen werden. Da das Licht der Sonne auf der Aufnahme schräg auf die Oberfläche von Charon trifft, werfen Strukturen, die etwas über ihre Umgebung hinausragen, kleine Schatten. Das führt dazu, dass eine Seite der Krater etwas dunkler ist, die voll beleuchtete Seite erscheint dagegen heller. Man muss also nach annähernd runden oder ovalen Strukturen Ausschau halten, die auf der einen Seite etwas heller und auf der anderen etwas dunkler sind.

Ein weiteres Kriterium für die Identifikation von Kratern ist das Vorhandensein eines Zentralberges im Innern einer runden Struktur. Zentralberge entstehen, wenn der beim Einschlag eingedrückte Boden wieder zurück federt. Dann kann Material aufgeworfen werden und einen Berg entsteht. Bei größeren Einschlägen können sich sogar vollständige ineinander geschachtelte Ringstrukturen bilden. Des Weiteren können mehrere Krater überlappen oder teilweise bereits weg erodiert sein, so dass nur noch Teile der Kraterwände erkennbar sind. In großen Kratern finden sich auch oftmals viele kleine Krater.

Und was kommt dabei heraus?

Abb. 5 zeigt ein Beispiel für eine Auswertung, bei der insgesamt 618 Krater gefunden und vermessen wurden. Die Messwerte sind in Tab. 1 eingetragen. Hier ist auch die Häufigkeitsverteilung der Krater, d. h. die Anzahl der Krater pro Messbereich angegeben. In Tab. 2 sind sowohl die in mm gemessenen Kraterdurchmesser als auch die in km umgerechneten Werte für die Kraterdurchmesser aufgelistet.

Bei der Umrechnung geht man folgendermaßen vor: Wir wissen, dass Charon einen Äquatordurchmesser von 1208 km hat. Nun messen wir den Durchmesser von Charon auf dem Arbeitsblatt in mm und erhalten einen Wert von 385 mm, der aufgrund der unvollständigen Abbildung von am rechten Rand von Charon nur auf etwa 5 mm genau bestimmt werden kann. Wir setzen die beiden Werte gleich und rechnen mittels **Dreisatz** die Kraterdurchmesser von mm in km um:

385 mm entsprechen 1208 km

Daraus folgt:

$$1208 \text{ km} / 385 \text{ mm} \cdot \text{Messwert (in mm)} = \text{Messwert (in km)}$$

Dieses Vorgehen ist zwar nicht exakt, aber näherungsweise richtig und für unsere Zwecke hinreichend genau. Nun müssen wir aus den Kraterdurchmessern noch die Durchmesser der Einschlagkörper ermitteln. Dies machen wir sowohl für das Größenverhältnis 1:10 als auch für das Größenverhältnis 1:20. Dazu verwenden wir folgende Rechnung:

Daraus folgt: **Impaktordurchmesser (in km) : Kraterdurchmesser (in km) ~ 1:10**

Entsprechend gilt: **Impaktordurchmesser (in km) = Kraterdurchmesser (in km) / 10**

Daraus folgt: **Impaktordurchmesser (in km) : Kraterdurchmesser (in km) ~ 1:20**

Daraus folgt: **Impaktordurchmesser (in km) = Kraterdurchmesser (in km) / 20**

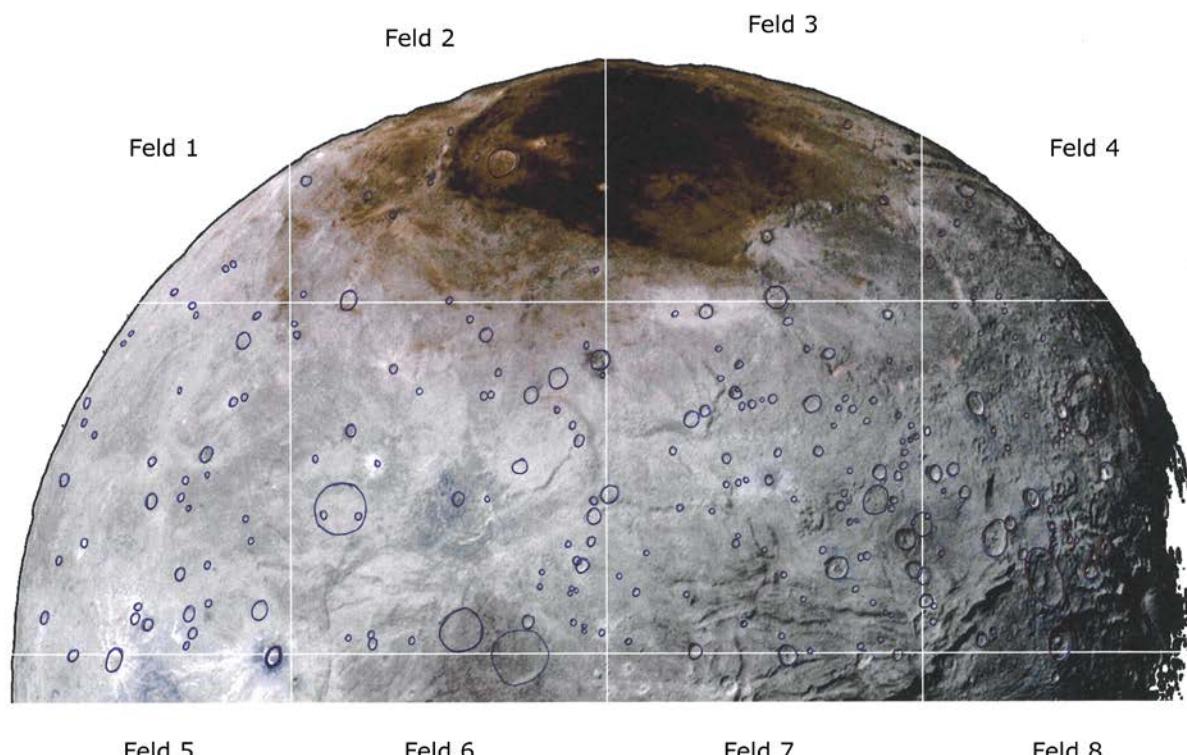
Auch diese Werte sind in Tab. 2 aufgelistet. Des Weiteren finden sich hier die Gesamtzahlen der Krater pro Messintervall für alle 16 Messfelder sowie speziell für die Messfelder 6, 7, 10 und 11, die nur den mittleren Bereich der Oberfläche von Charon abbilden. Damit sind Messwerte ausgeschlossen, die in Randfeldern gewonnen wurden und aufgrund der dort auftretenden Verzerrungen von vorne herein ungenauer sind. Diese Zahlen geben an, wie viele Krater eine bestimmte Größe haben. In Abb. 6 sind diese Daten grafisch dargestellt (blau: Werte für alle Messfelder, lila: Werte für die Messfelder 6, 7, 10 und 11).

Kraterstatistik für Charon (Nur zentrale Felder berücksichtigt)

Kraterdurchmesser (in mm)																	gesamt			
< 1	1	1-2	2	2-3	3	3-4	4	4-5	5	5-6	6	6-7	7	7-8	8	8-9	9	9-10	> 10	
Feld 1	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Feld 2	1	1	4	0	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	12
Feld 3	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4
Feld 4	0	1	4	3	2	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	12
Feld 5	3	5	6	8	5	1	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35
Feld 6	4	2	15	8	2	2	4	0	3	1	2	0	1	0	0	1	0	0	0	47
Feld 7	1	11	37	8	10	0	4	1	3	1	2	2	2	0	2	0	0	0	0	84
Feld 8	0	8	18	7	6	2	2	5	3	2	2	1	0	0	1	1	0	0	2	60
Feld 9	1	2	1	3	5	2	4	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	22
Feld 10	2	8	15	12	4	3	9	3	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	61
Feld 11	5	15	21	9	6	7	9	4	5	1	1	0	2	0	0	0	0	1	2	88
Feld 12	2	3	12	6	1	3	5	2	2	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	40
Feld 13	0	2	4	4	1	5	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
Feld 14	2	21	17	10	8	8	2	5	2	2	0	0	2	0	1	0	0	1	1	82
Feld 15	0	11	10	4	7	2	2	5	2	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	48
Feld 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
gesamt	21	90	164	84	61	36	48	32	25	9	12	4	10	1	4	3	1	2	3	618
gesamt	12	36	88	37	22	12	26	8	12	3	6	2	6	0	2	1	0	1	1	280
gesamt	12	36	88	37	22	12	26	8	12	3	6	2	6	0	2	1	0	1	1	280

Tabelle 1: Kraterdurchmesser für Charon (siehe Abb. 5). © Monika Maintz.

Charon – Oberer Teil (aufgehellt und kontrastverstärkt)



Charon – Unterer Teil (kontrastverstärkt)

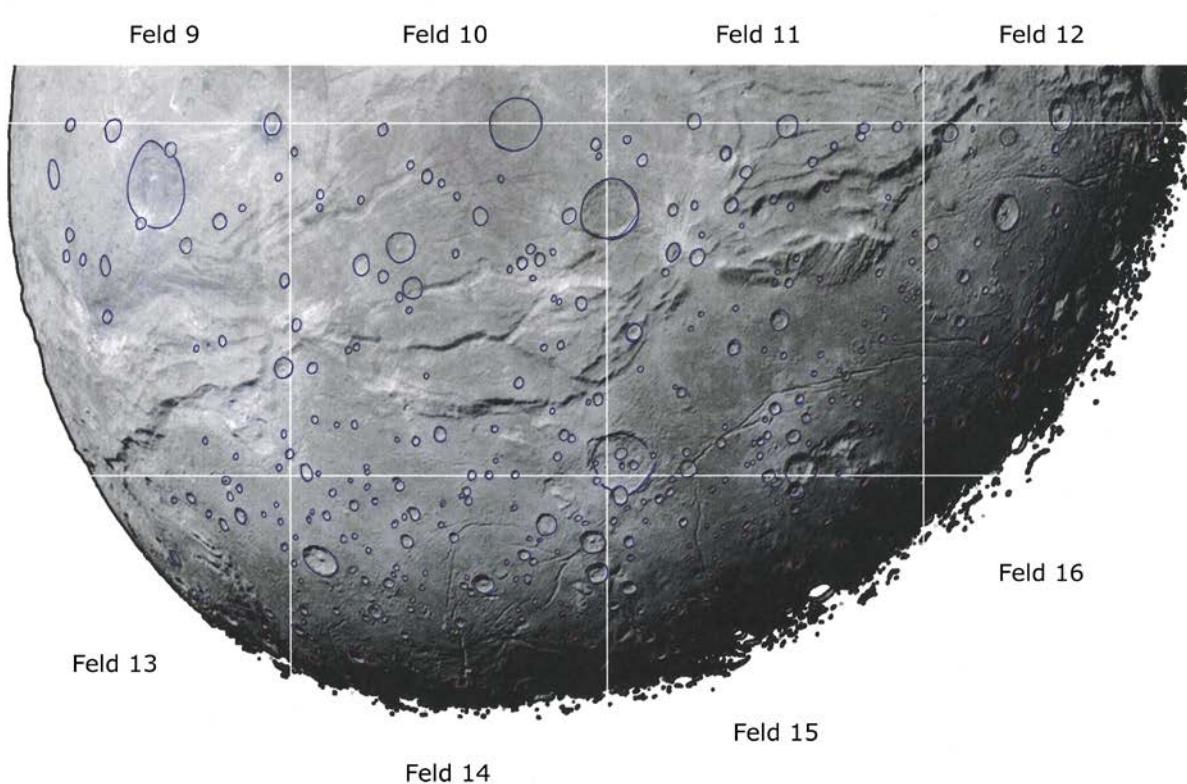


Abbildung 5: Krateranalyse unter Verwendung der Arbeitsblätter. © Monika Maintz.

Interpretation der gemessenen Daten

Aus Abb. 6 kann man sehr schön ablesen, dass es auf Charon eine Häufung von Kratern gibt, die einen Durchmesser von 3 km bis 6 km haben. Dies gilt sowohl für die Messungen insgesamt als auch für die Messungen, die sich nur auf die „fehlerbereinigten“ Felder 6, 7, 10 und 11 beziehen. Den Kratern mit Durchmessern von 3 km bis 6 km entsprechen Einschlagkörper mit Durchmessern von 300 m bis 600 m (Größenverhältnis 1:10) bzw. 200 m bis 300 m (Größenverhältnis 1:20).

Wenn man der eigenen Statistik traut, würde das bedeuten, dass es im Kuipergürtel vorwiegend Himmelskörper mit Durchmessern von etwa 200 m bis 600 m geben muss. Krater mit Durchmessern von 16 km und mehr scheinen auf Charon dagegen eher unterrepräsentiert zu sein. Die dazugehörigen Impaktoren bzw. Kuipergürtel-Objekte mit Größen ab 800 m (Größenverhältnis 1:10) bzw. 1,6 km (Größenverhältnis 1:20) wären dementsprechend eher selten im Kuipergürtel anzutreffen.

Diese Folgerungen sind bestimmt nicht ganz falsch, aber mit Sicherheit auch nicht ganz richtig. Wie wir gesehen haben, sind die durchgeführten Messungen mit den zur Verfügung stehenden Materialien und Methoden insgesamt noch sehr ungenau. Des Weiteren haben wir explizit nur Krater mit Durchmessern bis zu 31 km untersucht. Weitauß größere Krater, die augenscheinlich auch vorhanden sind, wurden außen vorgelassen. Winzige Krater sind auf den Arbeitsblättern nicht eindeutig zu erkennen und tauchen daher gar nicht in der Statistik auf. Etliche Randbereiche konnten nur unzureichend genau vermessen werden. Auch die Durchmesser-Umrechnung von mm in km ist stark fehlerbehaftet.

Kraterstatistik für Charon		Ergebnisse																	
Kraterdurchmesser (in mm)																			
< 1	1	1-2	2	2-3	3	3-4	4	4-5	5	5-6	6	6-7	7	7-8	8	8-9	9	9-10	> 10
Kraterdurchmesser (in km)																			
< 3	3	3-6	6	6-9	9	9-13	13	13-16	16	16-19	19	19-22	22	22-25	25	25-28	28	28-31	> 31
Anzahl Krater																			
21	90	164	84	61	36	48	32	25	9	12	4	10	1	4	3	1	2	3	8
Anzahl Krater (Nur zentrale Felder berücksichtigt)																			
12	36	88	37	22	12	26	8	12	3	6	2	6	0	2	1	0	1	1	5
Durchmesser Einschlagkörper (Verhältnis 1:10, in km)																			
< 0,3	0,3	0,3-0,6	0,6	0,6-0,9	0,9	0,9-1,3	1,3	1,3-1,6	1,6	1,6-1,9	1,9	1,9-2,2	2,2	2,2-2,5	2,5	2,5-2,8	2,8	2,8-3,1	> 3,1
Durchmesser Einschlagkörper (Verhältnis 1:20, in km)																			
< 0,2	0,2	0,2-0,3	0,3	0,3-0,5	0,5	0,5-0,6	0,6	0,6-0,8	0,8	0,8-0,9	0,9	0,9-1,1	1,1	1,1-1,3	1,3	1,3-1,4	1,4	1,4-1,6	> 1,6

Tabelle 2: Auflistung der aus der Kraterstatistik für Charon abgeleiteten Ergebnisse. © Monika Maintz.

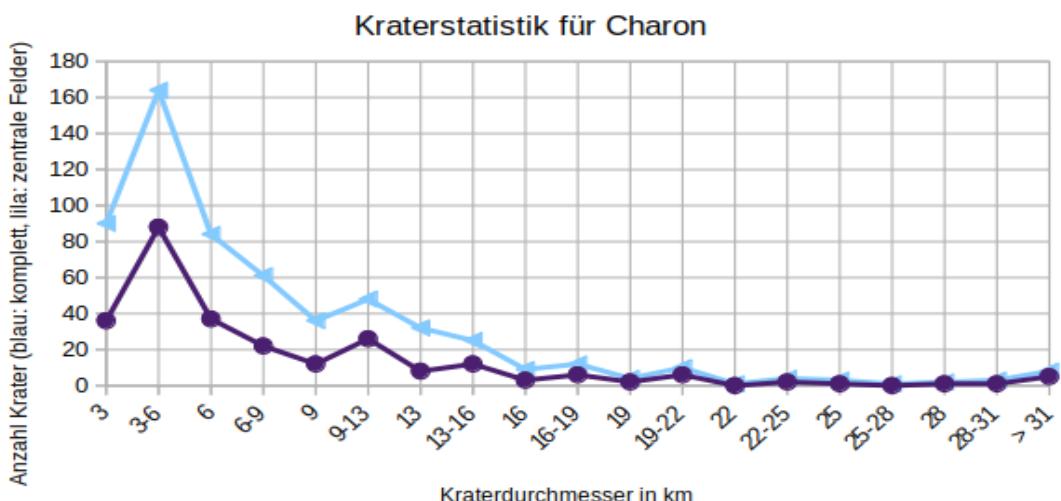


Abbildung 6: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Krateranalyse. Die Grafik zeigt die Häufigkeitsverteilung der Krater auf der Oberfläche von Charon in Bezug auf die Kraterdurchmesser. Blau: Werte für alle Messfelder; lila: Werte für die Messfelder 6, 7, 10 und 11. © Monika Maintz.

Fazit

Es hat sich gezeigt, dass sowohl die verwendeten Materialien als auch die Methodik, mit der die Messungen durchgeführt wurden, noch unzureichend waren. Daher sind die aus den Messdaten abgeleiteten Ergebnisse nur als erste Näherung anzusehen.

Um die Aussagekraft der Statistik zu verbessern, müsste man zum Beispiel die Messgenauigkeit erhöhen und dafür die Krateranalyse idealerweise am Computer durchführen. So könnte man auch die volle Auflösung der Bilder von New Horizons ausnutzen. Auch wäre es sinnvoll, die Messungen auf Pluto auszuweiten, um mehr Messdaten und dadurch eine bessere Kraterstatistik zu erhalten. Es zeigt sich also, dass Forschungsergebnisse generell von vielen Faktoren abhängen, über deren Einfluss man sich immer im Klaren sein muss.

Arbeitsmaterialien im Anhang

- Arbeitsblatt in DinA 3 mit der oberen Hälfte von Charon (jeweils mit und ohne Raster)
- Arbeitsblatt in DinA 3 mit der unteren Hälfte von Charon (jeweils mit und ohne Raster)
- Tabelle zum Eintragen der Messergebnisse

Links

Kuipergürtel:

- <https://solarsystem.nasa.gov/resources/399/kuiper-belt-in-depth/>
- <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/overview/>
- <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/in-depth/>
- https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/exploration/?page=0&per_page=10&order=launch_date+desc%2Ctitle+asc&search=&tags=Kuiper+Belt&category=33
- https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/galleries/?page=0&per_page=25&order=created_at+desc&search=&href_query_params=category%3Dsolar-system_kuiper-belt&button_class=big_more_button&tags=kuiper+belt&condition_1=1%3Ais_in_resource_list&category=51
- <https://solarsystem.nasa.gov/news/792/10-things-to-know-about-the-kuiper-belt/>

Pluto:

- <https://solarsystem.nasa.gov/planets/dwarf-planets/pluto/overview/>
- <https://solarsystem.nasa.gov/planets/dwarf-planets/pluto/in-depth/>
- <https://solarsystem.nasa.gov/planets/dwarf-planets/pluto/by-the-numbers/>
- https://solarsystem.nasa.gov/planets/dwarf-planets/pluto/galleries/?page=0&per_page=25&order=created_at+desc&search=&href_query_params=category%3Dplanets%2Fdwarf-planets_pluto&button_class=big_more_button&tags=pluto&condition_1=1%3Ais_in_resource_list&category=51

Plutomonde:

- https://solarsystem.nasa.gov/moons/plutomoons/overview/?page=0&per_page=40&order=name+asc&search=&condition_1=99%3Aparent_id&condition_2=moon%3Abody_type%3Ailike
- <https://solarsystem.nasa.gov/moons/pluto-moons/in-depth/>

Charon:

- <https://solarsystem.nasa.gov/moons/pluto-moons/charon/in-depth/>
- <https://solarsystem.nasa.gov/moons/pandslides, surface-color variations and morluto-moons/charon/by-the-numbers/>
- <https://www.nasa.gov/feature/pluto-s-big-moon-charon-reveals-a-colorful-and-violent-history>