

7. Arbeitsmethodik und Datenprozessierung

7.1. Arbeitsschwerpunkte

Thematische Schwerpunkte der Arbeit sind **photogeologische Kartierung und Altersdatierung ausgewählter Gebiete auf Callisto und die Erstellung eines chronostratigraphischen Systems**. Grundlage sind die Bilddaten der Kameras an Bord der Voyager- und Galileo-Sonde in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen. Von besonderer Bedeutung sind Altersdatierungen photogeologischer Einheiten mit Hilfe von Einschlagskraterhäufigkeiten und die Anwendung von Impaktchronologiemodellen zur Angabe absoluter Alter.

Basis photogeologischer Kartierung und weiterer Auswertungen sind Schwarzweiß-Mosaik aus kontrast- und kantenverstärkten Einzelbildern, überwiegend aus Daten der panchromatischen Filter der auf Voyager und Galileo eingesetzten Kameras. Die räumlichen Auflösungen der verwendeten Bilddaten reichen von 1 bis 2 km pro Bildpunkt bis zu maximal 5 m pro Bildpunkt. Als Ergänzung zur photogeologischen Kartierung wurden auch Bilddaten der Voyager- und Galileo-Farbfilter mit niedrigerer Auflösung verwendet. Die einzelnen Arbeitsschritte gliedern sich wie folgt auf in:

1. Bildverarbeitung:

- a) Herstellung von Schwarzweiß-Photomosaiken aus kontrast- und kantenverstärkten Einzelbildern;
- b) Herstellung von Farbbildern (Echt- bzw. Falschfarbendarstellungen);

2. Bildinterpretation und -auswertung:

- a) Photogeologische Kartierung und Interpretation ausgewählter Gebiete in unterschiedlichen Maßstäben;
- b) Altersbestimmung photogeologischer Einheiten durch Messung ihrer Impaktkraterhäufigkeiten und Anwendung von Impaktchronologiemodellen;
- c) Chronostratigraphische Unterteilung und Zuordnung der kartierten geologischen Einheiten.

7.2. Bildverarbeitung

7.2.1. Anlage und Software zur Bilddatenprozessierung

Die Verarbeitung der Voyager- und Galileo-Bilddaten erfolgte unter Verwendung des Software-Pakets **VICAR** (**V**ideo **I**mage **C**ommunication **A**nd **R**etrieval), entwickelt durch das *Multimis-*

sion *Image Processing Laboratory (MIPL)* am Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA. Als zentrale Schnittstelle zwischen Anwender und Programmen dient die Kommandosprache **TAE** (**T**ransportable **A**pplications **E**xecutive) des NASA Goddard Space Flight Center.

TAE/VICAR wird mittlerweile ausschließlich (Stand: zweites Halbjahr 2006) unter dem Betriebssystem *Linux* betrieben. Obwohl die Anwendung der TAE-Kommandosprache weiterhin möglich ist, wird VICAR im Regelfall als *Shell-Vicar* verwendet, wobei die Eingabe von Programmen und Programmparametern direkt auf der Linux-Kommandozeile erfolgt. Im weitaus häufigeren Fall werden aber meist ganze Bildverarbeitungsprozeduren durch ein einziges Shell-Script abgearbeitet. Da die Quellcodes der VICAR-Programme für die Nutzer des Gesamtpakets frei zugänglich sind, besteht die Möglichkeit, eigene VICAR-Programme oder Subroutinen in den Programmiersprachen Fortran-77, C und C++ zu entwickeln, bzw. VICAR-Subroutinen in eigenen Programmen zu implementieren.

Unter Verwendung einer weitgehend ähnlichen TAE-Schnittstelle ist das Software-Paket **ISIS** (**I**ntegrated **S**oftware for **I**maging **S**pectrometers) des U. S. Geological Survey in Gebrauch, das teilweise auch für diese Arbeit genutzt wurde²⁹. Anwenderprogramme beider Systeme sind auf alle Bilddaten anwendbar, die Daten müssen jedoch erst wechselweise von einem ins andere Format umgewandelt werden.

Die einzelnen Hard- und Softwarekomponenten von VICAR und ISIS ermöglichen die interaktive, schnelle Verarbeitung der meist umfangreichen Bilddatenmengen praktisch aller amerikanischen Planetenmissionen. Die einzelnen Bildverarbeitungsschritte und die dazu benötigten VICAR-Programme werden in den folgenden Abschnitten 7.2.3 bis 7.2.5 beschrieben. Die gesamte Anlage wurde als **HIIPS-Station** (**H**ome **I**nstitution **I**mage **P**rocessing **S**ystem) im Zusammenhang mit der Galileo-Mission eingerichtet.

Eine zweite Rechnerlinie basiert auf *Macintosh-PC's* (Betriebssystem Mac-OS 9 und aufwärts) und deren umfangreichen Software-Paketen zu Textverarbeitung, Graphik, Bildverarbeitung und Bildausgabe als Hardcopy, Dia oder Overheadfolie. Die Umwandlung von Bilddaten aus dem VICAR-oder ISIS-Format in eines der zahlreichen gängigen Bildformate wie *TIFF*, *PICT*, *GIF*, *JPEG*, *PNG* oder *PSD* (Photoshop Document) ist unproblematisch. Die Daten können anschließend in eines der speziellen Graphik- oder Bildverarbeitungsprogramme auf Macintosh eingelesen und weiter bearbeitet werden³⁰. Umgekehrt können Bilddaten aus diesen Formaten wiederum in das VICAR-oder ISIS-Format rücktransformiert werden.

²⁹ISIS wurde vorwiegend zum Austausch von Bilddatenprodukten zwischen einzelnen Instituten in den USA und dem DLR genutzt, da in einigen Einrichtungen dort bevorzugt ISIS benutzt wird.

³⁰Gleiches gilt selbstverständlich auch für die entsprechenden auf PC's unter dem Betriebssystem MS-DOS installierten Programme.

7.2.2. Verarbeitungsschritte der Bilddatenprozessierung

Die Bilddaten der Kameras aus Galileo und Voyager wurden nach folgendem Schema verarbeitet:

1. Systematische Bilddatenprozessierung:

- a) Radiometrische Korrektur;
- b) Geometrische Korrektur (nur Voyager-Daten);
- c) Photometrische Korrektur;
- d) Kartenprojektion;

2. Wissenschaftliche Weiterverarbeitung:

- a) Schwarzweiß-Verarbeitungen:
 - i. Kontrastverstärkung;
 - ii. Kantenverstärkung durch räumliche Filterverfahren;
- b) Farbverarbeitungen:
 - i. HSI-Farbraumtransformation;
 - ii. Farbratio-Bilder;
 - iii. Rot-Blau-Anaglyphenbilder zur Stereodarstellung.

7.2.3. Systematische Bilddatenprozessierung

7.2.3.1. Radiometrische Korrektur

Bei diesem ersten Bildverarbeitungsschritt werden alle nicht geometrisch bedingten Systemfehler beseitigt. Mit Hilfe von Kalibrationsfiles, die vor und während des Fluges aus *Flat-Field*-Aufnahmen (vergl. Abschnitte 6.1.2 und 6.2.2) generiert wurden, korrigiert man Fehler in der Datenübertragung, ungleichmäßige Ausleuchtung, Dunkelströme (*dark currents*) und radiometrisch bedingte Fehler der Kameraoptik und der Vidicon-Elektronenoptik. Die radiometrische Korrektur von *Voyager-Bilddaten* umfasst mehrere Schritte:

1. Kosmetische Entfernung der Reseaux-Punkte aus den Bilddaten durch Interpolation der DN-Werte in einem Radius von 5 Pixel um das Zentrum eines jeden Punkts (VICAR--Programme: **resloc** und **ressar77**)³¹. Damit sind die Punkte jedoch nicht vollständig entfernt. Es bleibt ein annähernd kreisförmiger, wenig auffälliger Fleck übrig, der bei späteren Prozeduren zur Kontrast- und Kantenverstärkung wieder stärker sichtbar werden kann. Reste der Reseauxpunkte können durchaus auffallend, wenn auch nicht störend in Erscheinung treten. In den weitaus meisten Fällen lassen sie sich als solche erkennen und von natürlichen Phänomenen unterscheiden.

³¹Unter der Schnittstelle TAE können die Programme groß oder klein geschrieben werden. In Shell-VICAR bzw. in Scripts ist nur Kleinschreibung zulässig. Dasselbe gilt für die in den Programmen verwendeten Parameter.

2. Pixelweise radiometrische Korrektur (VICAR-Programm: **ficor77**):

- a) Subtraktion des Dunkelstroms für jeden DN-Wert. Aus den Informationen zum Zeitpunkt jeder Voyager-Aufnahme im *Label* eines Bildes wird zur Korrektur das *dark current file* abgerufen, das dem Aufnahmezeitpunkt des zu korrigierenden Voyagerbildes zeitlich am nächsten gelegen ist und durch den gleichen Filter und mit der gleichen Bildrate (*scan rate*) aufgenommen wurde.
- b) Radiometrische Korrektur eines jeden Pixels unter Verwendung eines Kalibrationsfiles für die jeweilige Kamera (NA oder WA, Voyager-1 oder Voyager-2) und den verwendeten Filter. Benutzt wird dabei ein abschnittsweise lineares Modell der Lichttransferfunktion der Voyager-Kamera. Die DN-Werte des radiometrisch kalibrierten Bildes werden so skaliert, dass eine senkrecht beleuchtete, in der gleichen Entfernung von der Sonne wie Jupiter befindliche Referenzfläche³² DN-Werte von 10,000 aufweisen würde (*Jepsen et al.*, 1980; *Danielson et al.*, 1981). Eine derartige Skalierung erfordert, dass die Rohbilder bei der radiometrischen Korrektur vom Byte- in das Halbwort-Format mit 2^{16} DN-Werten zwischen -32768 und 32767 umgewandelt werden (*Jepsen et al.*, 1980). Der Wert I/F jedes Pixels ist einfach aus der Division des DN-Wertes durch 10000 zu erhalten. Das *Label* eines Bildes enthält einige der in diesem Korrekturschritt hergeleitete Größen, darunter die Umrechnungsfaktoren vom DN-Wert in I/F und vom DN-Wert in die Intensitätseinheit $\text{nW} \cdot \text{sterad}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$.

3. Multiplikation der DN-Werte des radiometrisch korrigierten Bildes mit den filter- und kamera-abhängigen Korrekturfaktoren aus Tabelle 6.3, Abschnitt 6.1.2) (VICAR-Programm: **fixvgr** oder **f2**).

Für die radiometrische Korrektur der *Galileo-SSI-Daten* ist nur ein einziger Schritt erforderlich, der analog zur Voyager-Verarbeitung abläuft (obige Punkte 2a und 2b; Vicar-Programm: **galsos**). Die DN-Werte werden so in das Halbwort-Format skaliert, dass das in Jupiterentfernung (5.2 AU) von der Sonne auf eine Referenzfläche senkrecht auftreffende und mit dem Wert $I/F = 1.0$ (d. h. mit der geometrischen Albedo 1.0) reflektierte Sonnenlicht auf den DN-Wert 10000 gesetzt wird. In diesem Korrekturschritt werden auch durch Verunreinigungen der Kamera verursachte Bildfehler (*blemishes*) kosmetisch entfernt.

Da im Lauf der Mission wegen der eingeschränkten Datenrate unterschiedliche Teile ein- und desselben SSI-Bildes zu unterschiedlichen Zeiten in kleineren Daten"paketen" von der Sonde zur Erde übermittelt wurden, mussten diese Daten des so genannten *Pass 1* und *Pass 2* erst zusammengesetzt werden (*merged raw data*). In den Fällen, wo sich die beiden Bilddaten nicht überlappten, konnte ein einfaches Mosaikprogramm (Vicar-Programm: **fastmos**) angewandt werden. Bei Überlappung von Bildteilen wurde stattdessen ein Programm zur Bildberechnung (**f2**) benutzt. Für zwei Bildteile *in1* und *in2* wurde das Gesamtbild unter Verwendung der **f2**-Funktion:

$$func = (in1 \cdot (in1 > 0)) + (in2 \cdot (in2 > 0))$$

zusammengesetzt.

³²Für die Referenzfläche werden Reflexionseigenschaften nach dem Lambert'schen photometrischen Modell angenommen (siehe Abschnitt 5.5, Gleichung 5.2 und anschließende Fußnote.)

Verglichen mit den Datenprodukten aller folgenden Arbeitsschritte weisen radiometrisch korrigierte Bilder räumlich die höchste Auflösung auf (*Batson, 1990*).

7.2.3.2. Geometrische Korrektur von Voyager-Bilddaten

In diesem Verarbeitungsschritt werden geometrisch bedingte Verzerrungen der Kameraoptik und des Vidicon-Tubus der Voyager-Kameras korrigiert (*Danielson et al., 1981*). Das VICAR-Programm **geoma** benutzt hierzu die Reseaux-Punkte als Stützstellen (*tiepoints*). Deren genaue Lage in der perspektivischen Abbildung einer Bildszene wird **vor** dem Aufruf von *geoma* durch das Programm **resloc** für jedes spezifische Bild aus dem Master-Reseauxfile abgerufen und in einem (neben dem Eingabebild) zweiten Eingabe-File abgespeichert.

Aus der Lage der Reseaux-Punkte wird eine geometrische Transformation berechnet, mittels derer jede Aufnahme aus der nicht in perspektivischer Abbildung vorliegenden Bildszene (*image space* oder Bildraum) in eine perspektivische Abbildung (*object space* oder Objektraum) umgewandelt wird. Die neuen Orte und DN-Werte der Pixel für das geometrisch korrigierte Ausgabebild werden nach einem bilinearen Algorithmus transformiert.

Bei der geometrischen Entzerrung müssen die ursprünglich 800 x 800 Zeilen und Spalten großen Bilder in einen Rahmen von 1000 x 1000 Zeilen und Spalten eingepasst werden. Die ursprünglich geraden Bildränder erscheinen bedingt durch die Transformation nach innen zur Bildmitte hin gewölbt. Die geometrische Verzerrung ist im Zentrum jedes Voyager-Bildes am kleinsten und wird zu den Rändern hin größer. Verbunden mit der durch die Entzerrung hervorgerufenen Vergrößerung der Bilder um einen Faktor von maximal etwa 1.25 ist eine Verringerung der räumlichen Auflösung.

7.2.3.3. Bestimmung von Kameraposition und Blickrichtung

Die beiden folgenden Verarbeitungsschritte der photometrischen Korrektur und der Kartenprojektion erfordern genaue Kenntnis über die Blickrichtung der Kamera (*camera pointing*) zum Zeitpunkt der Aufnahme und über die geographische Lage der erfassten Oberflächenregion. Bekannt sein müssen (*Batson, 1990*) **(a)** die Position der Sonne, **(b)** die Position des Raumfahrzeugs, **(c)** die Position des beobachteten Objekts, **(d)** die Orientierung des beobachteten Objekts, d. h. die Richtung seiner Rotationsachse, und **(e)** die Orientierung der Kamera. Die in den Punkten (a) bis (d) genannten Größen lassen sich durch Abtasten der Radiosignale der Sonde und durch astronomische Ephemeriden der beobachteten Objekte bestimmen. Orientierung und Blickrichtung der Kamera (e) sind in erster Näherung durch Sternsensoren bestimmbar (*Batson, 1990*). Höhere Genauigkeit wird mit der Methode der Phototriangulation³³ erzielt. Die Bestimmung der geographischen Breite und Länge markanter Oberflächenphänomene dient zur Ableitung eines **Kontrollnetzes** für jedes Objekt im Sonnensystem mit einer festen Oberfläche (*Davies und Katayama, 1981; Davies, 1990*).

³³ *Phototriangulation*: Rechenvorgang, bei dem Ortsmessungen von Oberflächenpunkten auf einander überlappenden Bilddaten zur Längen- und Breitenbestimmung dieser Punkte verwendet werden (*Davies, 1990*).

Die beiden zur Durchführung der beiden folgenden Verarbeitungsschritte benötigten Größen sind der **RS-Vektor** (= Vektor vom Zentrum des beobachteten Objekts zur Sonde in kartesischen Objektkoordinaten), und die **OM-Matrix**. Sie wird benötigt, um alle Vektorgrößen vom planetozentrischen Koordinatensystem in das Kamerasystem zu rotieren. Sie ist selbst wieder ein Produkt zweier Matrizen: (1) Die *ME-Matrix* transformiert die planetozentrischen Koordinaten in die Koordinaten eines Referenzsystems, definiert durch die Lage des Erdäquators in Bezug auf Himmelsäquator und Frühlingspunkt (entweder bezogen auf den 1. Januar 1950 (*J1950*-), oder (bevorzugt) auf den 1. Januar 2000 (*J2000-System*)). Die *C-Matrix* schließlich transformiert das Koordinatensystem der Kamera in das Referenzkoordinatensystem (J1950 oder J2000).

Die Werte für die ME-Matrizen der einzelnen Objekte (ebenso vorläufige, noch relativ ungenaue Werte der RS-Vektoren und C-Matrizen) liegen bei Voyager in einem als **SEDR** (**S**upplemental **E**xperimental **D**ata **R**ecord) bezeichneten Datensatz vor, der unter anderem Ephemeriden der einzelnen von den Kameras erfassten Objekte enthält. Seit Beginn der Galileo-Mission wurde der SEDR-Datensatz ersetzt durch ein umfassendes Informationssystem, das als **SPICE** bezeichnet wird und von der *Navigation Ancillary Information Facility (NAIF)* am Jet Propulsion Laboratory entwickelt wurde. Alle für Planung und Auswertung von Beobachtungen unbemannter Raumfahrzeuge notwendigen Daten werden fünf logischen Elementen, den so genannten **kernel**s, zugeordnet. *SPICE* ist ein Kunstwort, das sich aus den Anfangsbuchstaben dieser fünf *kernel*s zusammensetzt:

- S** - Ephemeriden des Raumfahrzeugs (**S**pacecraft);
- P** - Ephemeriden und Konstanten der Planeten (**P**lanet);
- I** - Beschreibung des **I**nstruments (Kamera);
- C** - Kamera-Ausrichtung (*C*amera *p*ointing);
- E** - **E**vents: Kommandos an Raumfahrzeug und Instrument.

Der im Jahr 1989 auf den letzten Stand gebrachte und elektronisch von *Davies und Mitarbeitern (RAND Corporation)* übermittelte Datensatz an RS-Vektoren und C-Matrizen für jedes einzelne Voyagerbild der Galileischen Monde erlaubt Mosaike herzustellen, ohne dass Versätze an Bildrändern durch zusätzliche geometrische Registrierung korrigiert werden mussten. Die mit diesem Datensatz erstellten Voyager-Mosaike waren die Grundlage für das Einpassen der hoch aufgelösten Bilddaten der SSI-Kamera in den niedriger aufgelösten und entsprechend hoch vergrößerten Kontext der Voyager-Mosaike.

7.2.3.4. Photometrische Korrektur

Ein größeres, zusammenhängendes Gebiet wird in der Regel durch Einzelbilder aus unterschiedlichen Beobachtungssequenzen abgedeckt, die (a) aus unterschiedlichen Entfernungen und (b) unter unterschiedlicher Beleuchtungsgeometrie aufgenommen wurden. Ziel der photometrischen Korrektur ist, die Einzelbilder auf einheitliche Beleuchtungsgeometrie ($i = \epsilon = \alpha = 0^\circ$) zu normieren. Dadurch kann spektral unterschiedliches Reflexionsverhalten geologischer Einheiten in Farbfilterdaten direkt verglichen werden. Der Korrekturschritt ist außerdem notwendig, um

einheitlich ausgeleuchtete Mosaik ohne Grauwertsprünge an den Bildgrenzen zu erhalten. Dennoch verschwinden Bildränder in der Regel nie vollständig, da häufig Bilder unterschiedlicher räumlicher Auflösung zu einem Mosaik zusammengesetzt werden müssen und sich der Übergang von einem Einzelbild geringerer zu einem Einzelbild höherer Auflösung an einem Wechsel in der Schärfe bemerkbar macht.

Zur photometrischen Korrektur wurde entweder das ältere VICAR-Programm **photfunc** aufgerufen, oder dieser Verarbeitungsschritt konnte gleichzeitig mit der Kartenprojektion (siehe folgenden Abschnitt 7.2.3.5) durchgeführt werden.

Die Eignung eines bestimmten photometrischen Modells zur Korrektur von Bilddaten (beschrieben in Abschnitt 5.5) und die Qualität des aus diesen korrigierten Daten erstellten Mosaiks wurde jeweils durch Versuchsreihen ermittelt. Es ergab sich, dass Korrekturen nach dem **Minnaert-Modell** für photogeologische Auswertungen ausreichend waren. Bilddaten eines Mosaiks wurden mit einem konstanten Minnaert-Parameter korrigiert. Der jeweilige Wert für den Randverdunklungsparameter k der Galileischen Eissatelliten wurde *Johnson et al.* (1983) entnommen:

Europa	$k = 0.5$
Ganymed	$k = 0.5$
Callisto	$k = 0.6$

Einige der Mosaik wurden mit dem genaueren **Squyres-Veverka-Modell** (*Squyres und Veverka*, 1981) korrigiert. Die hierzu benötigten Parameter sind in Abschnitt 5.5 in Tabelle 5.3 aufgeführt. Weder mit dem Minnaert-Modell noch mit dem Squyres-Veverka-Modell konnten Bildsäume und Grauwertsprünge vollständig entfernt werden. Die photometrisch korrigierten Daten ließen sich mit räumlichen Filtern noch einmal verbessern (vergl. Abschnitt 7.2.4.2).

7.2.3.5. Kartenprojektion

Zur Durchführung von Längen-, Winkel- oder Flächenmessungen wurden alle Bilddaten auf einen geeigneten Kartennetzentwurf projiziert. In dieser Arbeit wurden überwiegend **winkeltreue Kartenprojektionen** angewandt, da (1) photogeologische Kartierungen des U. S. Geological Survey in der Regel auf der Grundlage von Photomosaiken in winkeltreuer Projektion erfolgen, und (2) Kratergrößen-Häufigkeitsmessungen optimal auf Messbildern durchführbar sind, in denen Krater als Kreise abgebildet werden. Ein weiterer Grund (3) waren statistische Richtungsanalysen von Bruchstrukturen oder Lineamenten.

Aus den Kamerapositionsdaten für die jeweilige Aufnahme (vergl. Abschnitt 7.2.3.3) wurden *tiepoints* zur Umrechnung in die Geometrie der Kartenprojektion bestimmt. Die Projektion selbst entspricht einer geometrischen Transformation unter Verwendung einer (bevorzugt) bilinearen Interpolation zur Positions- und Grauwertneuberechnung jedes Pixels im Ausgabebild.

Um die mit allen Kartenprojektionen verbundenen Längen- und Flächenverzerrungen möglichst

klein zu halten, wurden je nach geographischer Lage der Arbeitsgebiete folgende Kartennetzentwürfe ausgewählt:

1. Für äquatornahe Gebiete bis in Breiten von maximal etwa $\pm 40^\circ$ die **winkeltreue zylindrische Mercator-Projektion** mit dem Äquator als längentreuem Breitenkreis (Berührungszylinder) und der Projektionsachse parallel zur Rotationsachse des Objekts.
2. Für die mittleren Breiten zwischen $\pm 25^\circ$ und maximal $\pm 70^\circ$ die **Lambert'sche winkeltreue Projektion** mit einem Projektionskegel, der das abzubildende Objekt in zwei längentreuen Standardparallelkreisen schneidet und dessen Achse parallel zur Rotationsachse des Objekts ist.
3. Für die polnahen Gebiete oberhalb $\pm 60^\circ$ Breite die **winkeltreue azimutale** oder **polarstereographische Projektion**, deren Projektionspol je nach Lage des Gebiets entweder auf den Nord- oder Südpol fällt.
4. Für globale Mosaikentwürfe entweder eine **flächentreue zylindrische Projektion** (z. B. sinusoidal) oder bevorzugt eine **äquidistante zylindrische Projektion**, bei der Längen- und Breitengrade konstanten Abstand voneinander haben. In beiden Fällen liegt der Berührungszylinder parallel zur Rotationsachse des Objekts. Beide Projektionsarten bilden außerdem den gesamten Bereich zwischen beiden Polen ab.
5. Bei einigen vorwiegend zur Übersicht verwendeten Bildern kam die **orthographische Projektion** zur Anwendung. Sie ist weder flächen- noch winkeltreu und eignet sich daher nicht für Messungen. Als Projektionszentrum kann jeder Punkt der Oberfläche gewählt werden; bevorzugt sind dies Nord- oder Südpol, bei Satelliten mit gebundener Rotation der dem Zentralkörper zu- oder abgewandte Punkt, der Apex- und Antapexpunkt der Bahnbewegung, oder Zentren von kreisförmigen Oberflächenformen (z. B. Einschlagsbecken).

Bei Längen- und Flächenmessungen ist die Zu- bzw. Abnahme des Maßstabs (angegeben in Kilometer pro Pixel, bzw. auf dem Photo-Endprodukt umgerechnet in Kilometer pro Zentimeter) mit der geographischen Breite zu berücksichtigen. Es seien φ die geographische Breite bzw. $\delta = 90^\circ - \varphi$ die Ko-Breite, und L_o eine Länge in Kilometer pro Zentimeter am längentreuen Breitenkreis oder Projektionspol. Dann gelten für die Breitenabhängigkeit des Maßstabs und für eine gegebene Länge L in Kilometer pro Zentimeter auf einem Bild folgende Beziehungen:

1. bei der Mercatorprojektion:

$$L(\varphi) = L_o \cdot \cos(\varphi) \quad (7.1)$$

2. bei der polarstereographischen Projektion:

$$L(\varphi) = L_o \cdot \cos^2(\delta/2) \quad (7.2)$$

3. und bei der Lambert'schen winkeltreuen Kegelprojektion mit den Ko-Breiten δ_1, δ_2 der beiden Standardparallelkreise:

$$L(\varphi) = L_o \cdot \frac{m \cdot n}{\sin \delta} \quad (7.3)$$

mit

$$n = \frac{\log(\sin \delta_2) - \log(\sin \delta_1)}{\log(\tan(\delta_2/2)) - \log(\tan(\delta_1/2))}$$

und

$$\begin{aligned} m &= \frac{\sin \delta_1}{n} \cdot \left(\frac{\tan(\delta/2)}{\tan(\delta_1/2)} \right)^n \\ &= \frac{\sin \delta_2}{n} \cdot \left(\frac{\tan(\delta/2)}{\tan(\delta_2/2)} \right)^n \end{aligned}$$

Die Programme zur Kartenprojektion - das (ältere) Vicar-Programm **map3** oder das neuere **frameortho** - benötigen die Eingabe des Maßstabs in Kilometer pro Pixel. Bei Verwendung von *frameortho* ist die im vorangehenden Abschnitt beschriebene photometrische Korrektur kein eigener Verarbeitungsschritt mehr, sondern wird bei der Kartenprojektion des Bildes mitberechnet. Wegen der umfangreichen Grauwertberechnungen bei einer photometrischen Korrektur werden Bilddaten vom Byte- oder Halbwort- in das Real-Format (32 Bit) umgerechnet (2^{32} Grauwerte im Wertebereich von $-2.147 \cdot 10^9$ bis $2.147 \cdot 10^9$).

Soweit möglich, sollten Einzelbilder eines Mosaiks gleiche oder zumindest ähnliche Auflösungen aufweisen. Bei Vergrößerung des tatsächlichen Bildmaßstabs müssen bei der Kartenprojektion viele Zwischenwerte interpoliert werden. Dies macht sich später bei der Kontrast- und Kantenverstärkung in einem etwa rechteckigen Linienmuster ("*ringing*") bemerkbar. Nicht zu vermeiden ist dieser Effekt bei Bildern, die hohes *foreshortening* durch schräg zur Oberfläche verlaufende Blickrichtungen der Kamera aufweisen, da in einer Reihe von Fällen nur Bilddaten dieser Art von einer bestimmten Region existieren.

7.2.3.6. Geometrische Registrierung

In einigen Fällen war eine zusätzliche geometrische Nachregistrierung notwendig, etwa wenn an aneinander grenzenden Bilddaten immer noch Versätze von Oberflächenstrukturen auftraten, oder bei nicht exakt aufeinander registrierten Farbdaten. Ein weiter wichtiger Fall war die Herstellung so genannter *Kontextmosaike*. Dabei wurden Mosaike aus hoch aufgelösten Bilddaten der Galileo-Kamera in einen Rahmen aus niedriger aufgelösten Voyager- oder Galileo-Daten eingepasst. Da die für jedes SSI-Bild in den SPICE-Kernels verfügbaren Kamerapositionsdaten nur eingeschränkt genau sind und ein vollständiger, auf Phototriangulation basierender Datensatz derzeit noch nicht vorliegt, wurden hierzu die Voyager-Daten als Grundlage für hoch aufgelöste Mosaike herangezogen.

In allen diesen Fällen wurden interaktiv am Bildschirm übereinstimmende Geländepunkte als *tiepoints* vermessen, mithilfe derer eine verbesserte geometrische Transformation berechnet wurde (älteres Vicar-Programm **picreg**, neueres Programm **tp** zur interaktiven Tiepoint-Bestimmung). Die erneute geometrische Registrierung auf der Grundlage dieses Datensatzes kann mit den (älteren) Programmen **geoma**, **lgeom**, **mgeom** oder dem (neueren) Programm **dlrtpgeom** durchgeführt werden.

7.2.3.7. Transformation vom Halbwort- oder Real-Format ins Byte-Format

In diesem letzten Schritt der systematischen Bilddatenreduktion wurden die Bilddaten vor der weiteren Verarbeitung entweder vom 2^{16} DN-Werte umfassenden Halbwort-Format oder (bei Verwendung des neueren Programms *frameortho*) vom 2^{32} DN-Werte umfassenden Real-Format in das Byte-Format mit 2^8 DN-Werten (von 0 bis 255) umgewandelt. Die für ein Mosaik bestimmten Bilddaten wurden mit einheitlichen Unter- und Obergrenzen in das Byte-format (Grauwerte 0 bis 255) transformiert (VICAR-Programm **cform**).³⁴.

7.2.4. Weiterverarbeitung von Schwarzweiß-Bilddaten

7.2.4.1. Kontrastverstärkungen

In den Bilddaten des Voyager- oder SSI-Flächensensors wird nur ein relativ geringer Ausschnitt des vollen 8-Bit-Dynamikbereiches genutzt, da die Kameras dazu konzipiert wurden, unterschiedlich helle Oberflächen unter unterschiedlichsten Beleuchtungsbedingungen mit ausreichender visueller Helligkeit abzubilden. Aus einer Reihe von Möglichkeiten wurden in dieser Arbeit folgende Methoden angewandt, um die teilweise recht schmalen Histogramme auf den vollen Dynamikumfang aufzuspannen und den Bildkontrast für das menschliche Auge deutlich anzuheben:

LINEARE STRECKUNG:

Bei der **linearen Kontraststreckung** werden Grauwerte (DN_{alt}) zwischen einem oberen und unteren Wert (DN_2 bzw. DN_1) im Dynamikbereich DN_{min} und DN_{max} nach folgender Geradengleichung neu verteilt:

$$DN_{neu} = \frac{DN_{max} - DN_{min}}{DN_2 - DN_1} \cdot DN_{alt} - DN_1 \quad (7.4)$$

wobei DN_{min} und DN_{max} in der Regel, aber nicht notwendigerweise mit dem kleinsten (0) bzw. größten (255) Wert des 8-Bit-Dynamikbereiches identisch sind.

STÜCKWEISE LINEARE STRECKUNG:

Bei der **stückweise linearen Streckung** (*table stretch*) wird benutzer-definiert einem Grauwert ein neuer Wert zugeordnet. Zwischen zwei neuen Werten wird linear interpoliert. Dieses Verfahren eignet sich bei Bilddaten mit einem sehr engen, dicht besetzten Histogramm bei z. B. niedrigen Grauwerten, und einem sehr breiten, aber in den einzelnen DN-Werten weniger dicht besetzten Histogramm bei mittleren und höheren Grauwerten.

LOGARITHMISCHE STRECKUNG:

Hoch aufgelöste, bei sehr niedrigem Sonnenstand aufgenommene Bilddaten lassen sich mit der linearen Streckung nicht mehr befriedigend verbessern. Abhilfe schafft hier eine **logarithmische**

³⁴Diese Transformation erfolgt nach der gleichen Formel, die bei der linearen Kontrastverbesserung von Bilddaten (Gleichung 7.4, beschrieben im folgenden Abschnitt 7.2.4.1) angewandt wird.

Streckung nach folgender Gleichung:

$$DN_{\text{neu}} = a \cdot \log(DN_{\text{alt}} + b) + c \quad (7.5)$$

Die Koeffizienten b und c legen die Lage des gestreckten Bildes innerhalb des vollen DN-Dynamikbereiches fest. Der Koeffizient a bestimmt die Form der Grauwertverteilungskurve. Durch Versuchsreihen wurde ermittelt, dass bei der überwiegenden Zahl der Bilddaten, bei denen diese Streckung angewendet wurde, Werte für a zwischen 10 und 100 die besten Ergebnisse lieferten.

Die drei hier genannten Prozeduren zur Kontrastverbesserung können zudem kombiniert werden. Linear oder stückweise linear gestreckte Daten lassen sich mit einer logarithmischen Streckung als Ganzes noch einmal deutlich aufhellen. Die drei Streckungsarten sind neben anderen im VICAR-Programm **stretch** implementiert, weiterhin sind sie auch im Softwarepaket **photoshop** unter Mac-OS oder MS-DOS enthalten.

7.2.4.2. Kantenverstärkung: Räumliche Filterverfahren

Erhöhung des Bildkontrastes und gleichzeitige Verstärkung von Kanten erzielt man mit Filtern im Ortsraum. Grauwerte werden in Abhängigkeit einer beliebig groß zu wählenden Pixelumgebung neu berechnet. Kanten, die morphologische Details wie Kraterränder, Lineamente, oder Bruchstrukturen nachzeichnen, werden je nach gewähltem Filtertyp entweder verstärkt oder geglättet. Die dabei umfasste Grauwertumgebung wird als *Filterbox* bezeichnet. Die Box wandert bei der Berechnung des gefilterten Bildes durch das ganze Bild; gefiltert wird stets das in der Mitte der Box befindliche Pixel.

Die Eignung bestimmter Filtertypen und Filterboxgrößen zur Verstärkung (oder Abschwächung) von Kanten und die Wahl der nachfolgend beschriebenen Parameter musste durch zahlreiche Testreihen ermittelt werden.

Das VICAR-Softwarepaket ermöglicht die Berechnung von vier verschiedenen Filtertypen (Programm: **tfilt**), die sich jeweils mit dem ungefilterten Ausgangsbild kombinieren lassen.

Im Folgenden bedeuten die Größen:

DN_{inp}	DN-Wert eines Pixels im ungefilterten (Eingabe-) Bild;
DN_{out}	DN-Wert eines Pixels im gefilterten (Ausgabe-) Bild;
$F_{(i,j)}$	Filtertyp mit einer i Zeilen, j Spalten großen Box (hier stets: $i = j$)
\overline{DN}	arithmetischer Graumittelwert in der Filterbox;
$DCTRAN$	<i>Transmission factor</i> ;
B, K	Korrekturgrößen für das Ausgabebild.

Die Berechnung eines Filters mit der Boxgröße i Zeilen und j Spalten (entspricht den *tfilt*-Parametern n_{lw} und n_{sw} ; hier stets: $n_{lw} = n_{sw}$) erfolgt nach der Gleichung:

$$DN_{\text{out}} = F_{(i,j)} \cdot B + DN_{\text{inp}} \cdot d_{\text{ctran}} + K. \quad (7.6)$$

Der Term $F_{(i,j)} \cdot B$ kombiniert Kantenverstärkung und Kontrastverstärkung. Während durch i und j die Größe der erfassten Grauwertumgebung gegeben ist, dient der Parameter B dazu, die Grauwertverteilung zu verbreitern und dadurch auch den Kontrast zu erhöhen (B entspricht den *tfilt*-Parametern *boost* oder *scale*). Durch den Parameter *dctran*³⁵ wird angegeben, wieviel Prozent des Grauwertumfangs des ungefilterten Eingabebilds zum gefilterten dazu addiert werden sollen. *Dctran* liegt zwischen 0.0 und 1.0. Im letzteren Fall wird der gesamte Grauwertumfang des Eingabebildes addiert (sogenannter *Addback-Filter*). Der Summand K (*tfilt*-Parameter *dlevel*) ist eine additive Korrekturgröße, um die Grauwertverteilung des gefilterten Bildes um den DN-Wert 128 (mittlerer Wert zwischen 0 und 255) zu zentrieren³⁶. Durch die Größen B und K lassen sich auch Helligkeitsunterschiede zwischen Bildern eines Mosaiks, die durch die photometrische Korrektur nicht völlig beseitigt werden konnten, aneinander angleichen.

Alle Berechnungen von Filtern nach Gleichung 7.6 gehen aus vom arithmetischen DN-Mittelwert innerhalb der (hier stets quadratisch gewählten) Filterbox, d. h. von deren Tiefpass-Anteil.

LOWPASS-FILTER:

Beim **Lowpass-** oder **Tiefpass-Filter** wird der Grauwert des Pixels im Zentrum der Filterbox durch den Mittelwert innerhalb der Filterbox ersetzt:

$$F_{(i,j)} = \overline{DN}. \quad (7.7)$$

Der Tiefpass-Filter glättet Grauwertunterschiede und wird häufig zur Verbesserung stark veräuschter Farbdaten benutzt.

HIGHPASS-FILTER:

Beim **Highpass-** oder **Hochpass-Filter** wird vom Pixel im Zentrum der Filterbox der Tiefpass-Anteil der Box subtrahiert:

$$F_{(i,j)} = DN_{\text{inp}} - \overline{DN}. \quad (7.8)$$

Der Hochpass-Filter verstärkt die hochfrequenten Anteile eines Bildes und unterdrückt die niedrigfrequenten. Er wird häufig angewandt, wenn morphologische Details einer Oberfläche stark herausgehoben werden sollen. Der Hochpassfilter kann ferner Helligkeitsgradienten (photometrisch bedingte Effekte) über ein Bild zusätzlich ausgleichen. Ein Nachteil dieses Filtertyps ist die Verstärkung von Bildfehlern wie Rauschen, Unschärfe (*smear*) oder Resten von Reseauxpunkten.

SCENE-DEPENDENT UND DIVIDE-FILTER:

Der **Scene-dependent-Filter** (kurz: Scene-Filter) ist eine Variante des Hochpass-Filters; die

³⁵ *Dctran* leitet sich her von **D**irect **C**urrent **T**RANsmission factor; durch diese Größe ist der Anteil des ursprünglichen Signals definiert, der den Filter unverändert durchläuft.

³⁶ Die Berechnung des Filters erfolgt im Halbwort-Format. Falls das Eingabebild im Byte-Format vorliegt, wird es automatisch in Halbwort umgewandelt. Nach dem Filtern wird das Ausgabebild wieder in das Byte-Format zurücktransformiert. Um zu vermeiden, dass ein Teil der Grauwertverteilung außerhalb des Dynamikbereiches von 0 bis 255 liegt, wird diese ganzzahlige Konstante K dazu addiert.

Differenz zwischen DN-Wert des im Zentrum der Filterbox befindlichen Pixels und dem DN-Mittelwert wird auf den DN-Mittelwert normiert:

$$DN_{(i,j)} = (DN_{\text{inp}} - \overline{DN}) / \overline{DN}. \quad (7.9)$$

Wie beim Hochpass-Filter werden Kanten verstärkt, photometrisch bedingte Helligkeitsgradienten können einigermaßen ausgeglichen werden. Im Unterschied zum Hochpass hebt der Scene-Filter hochfrequente Anteile mehr in den dunklen Partien eines Bildes hervor, während niedrigfrequente in den hellen Partien stärker unterdrückt werden. Er eignet sich somit gut als Alternative zum Hochpass bei der Anwendung auf relativ dunkle Bilddaten.

Eine weitere Variante des Hochpass-Filters ist der **Divide-Filter**:

$$F_{(i,j)} = DN_{\text{inp}} / \overline{DN}. \quad (7.10)$$

Er hellt dunkle Partien eines Bildes auf, kann vor allem die Grauwerte in Bilddaten mit extremen Kontrastunterschieden aneinander angleichen. Kanten können mit kleinen Boxgrößen (z. B. 3x3) ebenfalls verstärkt werden.

Die geeignetsten Filtertypen und Kombinationen der einzelnen das Ergebnis beeinflussenden *tfilt*-Parameter mussten für Bilddaten eines bestimmten Objekts in Abhängigkeit von räumlicher Auflösung, Grauwertverteilung des nicht kontrastverstärkten Bildes und dessen Qualität (Artefakte, Bildfehler, Noise) durch Testen ermittelt werden. Kanten werden durch kleine Filterboxen (3x3 oder 5x5) bei Hochpass-, Scene- oder Divide-Filter besonders hervorgehoben, wurden aber zum (kontrastverstärkten) Ausgangsbild dazu addiert (*Addback-Filter* mit $dctran = 1$).

Beim Hochpass-, Scene- und Divide-Filter besteht eine weitere sehr wirksame Methode der Kontrast- und Kantenverstärkung darin, zwei Filter unterschiedlicher Boxgröße zu einem **Doppelfilter** additiv zu kombinieren. Dabei werden in der Regel ein Filter mit einer relativ großen Filterbox (mehr als z. B. 41x41) zum Verstärken der großräumigen Grauwertunterschiede und ein Filter mit einer sehr kleinen Box (3x3 oder 5x5) zusammen addiert. Derartige Kombinationen sind sowohl mit dem VICAR-Programm *tfilt* als auch mit *photoshop* durchführbar. Der den drei oben genannten Filtertypen zur Kantenverstärkung am nächsten kommende Filter in *photoshop* entspricht der Option *unsharp mask* (unscharf Maskieren), der ebenfalls hier häufig verwendet wurde, auch mit additiver Kombination zwischen Filtern unterschiedlicher Boxgröße.

7.2.4.3. Schwarzweiß-Mosaik und Bildkarten

Einheitlich kartenprojizierte und kanten- bzw. kontrastverstärkte Einzelbilder eines ausgewählten Gebiets wurden abschließend zu einem Mosaik zusammengesetzt. Die Prozedur verläuft vollautomatisch; die VICAR-Programme **newmos** und das neuere **dlrmosaic** benötigen dazu die in allen kartenprojizierten Bildern vorhandenen *Maplabels*, in denen Informationen zum Maßstab und zum Projektionstyp enthalten sind.

Da die Bilder entsprechend der Eingabereihenfolge von oben nach unten überlagert werden, musste eine geeignete Reihenfolge durch Testreihen ermittelt werden, bis ein optimales Ergebnis

erzielt und alle noch vorhandenen Ränder und Grauwertsprünge weitgehend beseitigt waren. In einigen Fällen wurden aus unterschiedlichsten Blickwinkeln aufgenommene Daten mit teilweise starkem Foreshortening zu einem Mosaik kombiniert. In solchen Fällen generiert man ein Mosaik besser von Hand: Die kartenprojizierten Bilder werden in *photoshop* auf einzelne Ebenen geladen, individuell gestreckt und/oder gefiltert, Bildteile schlechter Qualität abgeschnitten, und durch bessere Bildteile (soweit vorhanden) darüber liegender Bilder ersetzt. Diese Prozedur ist sehr zeitaufwändig und lässt sich nicht automatisieren.

Allen Mosaiken wurden geographische Netzlinien (VICAR-Programme: **overlay** und (neuer) **dlroverlay**) einbeschrieben. Ein Maßstabsbalken bestimmter Länge in Kilometer, bezogen auf die verzerrungsfreie(n) Breite(n) (bzw. das verzerrungsfreie Projektionszentrum) ergänzt die für alle Messungen notwendigen Informationen. Diese Mosaik stellen die Grundlage dar für photogeologische Kartierungen und Messungen von Kraterhäufigkeiten.

7.2.5. Farbbilder zur Darstellung spektraler oder topographischer Unterschiede

Photogeologische Kartierung und Interpretation von Schwarzweiß-Bilddaten der Voyager- und Galileo-SSI-Kamera wurden durch folgende Farbdarstellungen ergänzt:

1. Farbdarstellungen in mittlerer bis niedriger räumlicher Auflösung (2.5 - 10 km/pxl) unter Anwendung der HSI-Farbraumtransformation;
2. Farbratios in niedriger räumlicher Auflösung;
3. Anaglyphenbilder zur perspektivischen Darstellung bei möglicher Stereo-Überdeckung.

7.2.5.1. HSI-Farbraumtransformation

Zur Herstellung eines einfachen Farbbildes werden die Farbauszüge dreier beliebiger aufeinander registrierter (kartenprojizierter) Farbfilter nach abnehmender zentraler Wellenlänge den Komponenten Rot, Grün und Blau (RGB) zugeordnet. Da die zentralen Wellenlängen und Wellenlängenbereiche der Voyager- oder SSI-Farbfilter nicht mit den spektralen Empfindlichkeiten des menschlichen Auges für rotes, grünes und blaues Licht übereinstimmen, kann keiner der abgebildeten Satelliten exakt in "Echt"farben wiedergegeben werden.

Die Farbfilter sind untereinander hoch korreliert, daher sind Farbunterschiede zwischen beliebigen Filterkombinationen relativ gering. Außerdem erlaubt die additive RGB-Farbmischung nicht, Farbkontrast zugleich mit Helligkeit und Farbtiefe ausreichend zu erhöhen. Die einzelnen Farbauszüge werden daher vom RGB-Farbraum in den **HSI-Farbraum** mit den drei Komponenten *Hue*, *Saturation* und *Intensity* transformiert (*Haydn et al.*, 1982; *Gillespie et al.*, 1986). Außerdem lassen sich damit auch Farbbilddaten unterschiedlicher Auflösung oder auch unterschiedlicher Sensoren miteinander kombinieren (*Haydn et al.*, 1982).

Der Vorteil einer HSI-Transformation gegenüber einem herkömmlichen RGB-Farbbild liegt darin, die einzelnen Komponenten *H*, *S* und *I* unabhängig voneinander zu verändern, oder eine

oder auch mehrere dieser drei Komponenten gegen andere Verarbeitungen der gleichen Bildszene auszutauschen. Hier wurde folgendermassen verfahren:

Die drei ausgewählten Farbauszüge der gleichen Bildszene wurden zunächst im Kontrast verstärkt und anschließend in den HSI-Farbraum transformiert. Dann wurden eine oder mehrere der drei Komponenten des HSI-Farbraums vor der Rücktransformation in den RGB-Farbraum verändert, z. B. durch:

- *Austauschen der Intensitätskomponente:* An die Stelle der Intensität I setzt man in der Regel ein kontrast- und kantenverstärktes Bild der gleichen Szene gleicher oder höherer Auflösung als die Farbfiler.
- *Verändern der Sättigung:* Durch lineare Streckung oder Verschieben des Histogramms kann die Farbtiefe erheblich verstärkt werden.

Abschließend wurden die Farbdaten aus dem HSI- wieder in den RGB-Farbraum zurück transformiert. Für Farbraumtransformationen wurde das VICAR-Programm **colort** benutzt.

7.2.5.2. Farbratios

Der Quotient bzw. die **Ratio** zweier Bilder der gleichen Bildszene in unterschiedlichen Farbfilttern werden bevorzugt zur Darstellung spektraler Unterschiede zwischen Oberflächenmaterialien benutzt. Das Verfahren beruht auf einer pixelweisen Verknüpfung zweier Farbkanäle mit den Grauwerten DN_1 und DN_2 an einer bestimmten Zeile und Spalte (*Gillespie et al.*, 1987):

$$RDN = \frac{DN_1}{DN_2} \cdot B + K \quad (7.11)$$

Durch die Größen B und K können Breite und Offset, (d. h die Lage des Ratio-Histogramms innerhalb des 8-Bit-Dynamikbereiches) verändert werden. Da das Rauschen bei der Ratioberechnung verstärkt wird, empfiehlt es sich, vor der Ratioberechnung einen Tiefpass-Filter auf die beiden Eingabebilder (Boxgrößen am besten zwischen 3x3 und 7x7 pxl) anzuwenden. Ratios werden mit dem bereits genannten VICAR-Programm **f2** berechnet.

Farbratios beschreiben näherungsweise die Unterschiede in der Steigung der Reflexionskurve zwischen den beiden Farbkanälen. Ratiobilder haben den Vorteil, dass das Verhältnis der DN-Werte beider Farbkanäle für eine gegebene Materialeinheit weitgehend unabhängig ist von der Beobachtungsgeometrie. Dies bedeutet auch, dass die Oberflächenmorphologie in Ratiobildern - optimale Registrierung vorausgesetzt - normalerweise verschwindet (hiervon ausgenommen sind im Schatten liegende Oberflächenpartien).

Aus drei unterschiedlichen Ratios lässt sich ein RGB-Farbkomposit generieren, in dem jeder Einzelratio eine der drei Komponenten Rot, Grün oder Blau zugeordnet wird. Der Farbkontrast kann durch individuelle Streckungen der einzelnen Ratios (etwa nach Gleichung 7.4) erhöht werden.

7.2.5.3. Anaglyphenbilder zur Stereodarstellung

Falls von ein- und demselben Gebiet mindestens zwei Aufnahmen mit annähernd gleichem Sonnenstand und gleicher Auflösung, aber unterschiedlichem Blickwinkel vorhanden sind, lässt sich topographische Information in einer Stereo-Anaglyphen-Darstellung gewinnen. Bei Callisto sind Stereoansichten von Voyager-Daten nur in Ausnahmefällen möglich, da die Daten meist nur 1 bis 2 km/pxl Auflösung aufweisen (vergl. *Schenk et al.*, 1994). Problematisch ist die Verwendung von Voyager- und SSI-Daten als Stereopartner wegen des meist hohen Auflösungsunterschiedes zwischen beiden Datensätzen. Für die Galileo-Vorbeiflüge an Callisto wurden, anders als bei Europa oder Ganymed, keine hoch aufgelösten Stereosequenzen geplant, aus denen digitale Geländemodelle hätten abgeleitet werden können. Zumindest in Einzelfällen lassen sich aber Voyager- oder Galileo-Bildpaare als Stereopartner verwenden.

Die Eignung derartiger Partner für Stereodarstellung oder digitale Geländemodelle hängt insbesondere von folgenden Gegebenheiten ab: (1) Bei zu großem Abstand und zu geringen Auflösungen (z. B. Voyager) ist ein topographisches Relief in der Größenordnung von weniger als 1 km Höhenunterschied kaum noch aufzulösen. (2) Bei zu geringem Stereowinkel zwischen den beiden Partnern lässt sich die Topographie trotz hoher Bildauflösung nur schlecht darstellen.

Zur Darstellung der Topographie wurden aus den beiden Stereopartnern *Rot-Blau-Anaglyphenbilder* hergestellt. Hierbei wurde der linke Partner dem roten Kanal, der rechte Partner dem grünen und blauen Kanal zugeordnet³⁷. Besonders im Fall der niedriger aufgelösten Voyager-Daten mussten die beiden Stereopartner vorher stark gestreckt und kantenverstärkt werden, um überhaupt einen Stereo-Effekt zu ergeben. Insgesamt ist der Stereoeindruck bei den verwendeten Voyager-Daten relativ schwach.

Anaglyphenbilder zwischen SSI-Daten von Callisto konnten stets nur aus Bildern unterschiedlicher Auflösung (Unterschiede 1:3 bis 1:10) hergestellt werden. Gerade bei Bilddaten mit geringen Auflösungsunterschieden (z. B. aus einer Bildsequenz) ergab sich meist ein zu kleiner Stereowinkel zwischen den beiden Partnern, wodurch der Stereoeindruck eher gering ausfiel.

7.3. Methodik der photogeologischen Kartierung planetarer Oberflächen

7.3.1. Definition geologischer und photogeologischer Einheiten

Eine **geologische Einheit** ist definiert als **dreidimensionale lithologische** oder **lithostratigraphische Einheit**, die durch einen einheitlichen Bildungsprozess innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls entstand (*Wilhelms*, 1990). Jede Einheit ist (1) schichtförmig (*stratiform, tabular*), (2) besitzt eine endliche, im Normalfall lateral variierende Dicke und (3) eine endliche laterale Ausdehnung; ferner gilt (4) das *Superpositionsprinzip*: Jede Einheit liegt auf anderen

³⁷Rot-Grün-Anaglyphenbilder sind ebenfalls im Gebrauch. Rot-Blau-Anaglyphenbilder erscheinen aber optisch ansprechender, da sie etwa wie ein Schwarzweißbild wirken.

(älteren) Einheiten, und (5) wird von anderen (jüngeren) Einheiten oder einer freien Fläche (Atmosphäre oder Weltraum) überlagert (*Shoemaker und Hackman*, 1962; *Mutch*, 1972; *Wilhelms*, 1987, 1990).

Bei der geologischen Kartierung einer Planetenoberfläche auf der Basis von Schwarzweiß- oder Farbbilddaten ist der dreidimensionale Charakter einer geologischen Einheit - etwa geschichtete Gesteine - nur auf höchst aufgelösten Bilddaten ($\approx < 50 \text{ m/pxl}$) sichtbar. Die geologische Kartierung extraterrestrer Oberflächen erfolgt daher vorwiegend nach *photogeologischen Kriterien*.

Maßgebliche Unterscheidungskriterien für photogeologische Einheiten auf den Planeten und Satelliten des Sonnensystems wurden anhand des in großem Umfang von der Mondoberfläche vorliegenden hoch aufgelösten Bildmaterials aufgestellt (*Shoemaker und Hackman*, 1962; *Wilhelms*, 1970, 1972, 1987, 1990; *Wilhelms und McCauley*, 1971; *Mutch*, 1972; *Guest und Greeley*, 1977). Diese Kriterien gelten uneingeschränkt für jedes Objekt mit einer festen Oberfläche, die Erdoberfläche eingeschlossen (*Wilhelms*, 1990).

Für das **Galilean Satellites Mapping Program** des *U. S. Geological Survey* (U. S. G. S.) wurde eine Rangfolge photogeologischer Unterscheidungskriterien definiert, die von der Kartierung der Oberflächen der terrestrischen Planeten im inneren Sonnensystem abgeleitet wurde (*Lucchitta*, 1984): (1) Hauptunterscheidungsmerkmal ist die **Albedo** (bzw. die **Farbe** bei Verwendung von Farbdaten)³⁸. Die weitere Unterteilung dieser Haupteinheiten erfolgt (2) nach charakteristischen **Oberflächenformen**.

Analog zu echten geologischen Einheiten sind photogeologische Einheiten auf Planetenoberflächen demnach ebenfalls als *dreidimensionale, lithologische Materialeinheiten* anzusehen, selbst dann wenn es sich nur um oberflächliche Bedeckungen, etwa von Lockermaterial (z. B. Kraterauswurfsmaterial) handelt (*Spudis und Greeley*, 1976; *Wilhelms*, 1972, 1990; *Lucchitta*, 1984; *Greeley*, 1985). Basiseinheit der Lithostratigraphie ist (a) die **Formation**, die (b) in **Schichtglieder** (*members*) unterteilt, oder mit anderen Formationen (c) zu einer **Gruppe** (*group*) zusammengefasst wird. Da bei der photogeologischen Kartierung planetarer Oberflächen, wie oben erwähnt, auch der Formenschatz eine wesentliche Rolle bei der Unterscheidung spielt, sind diese lithostratigraphischen Einheiten stets auch als *geomorphologische Einheiten* aufzufassen.

Relativ häufig wird immer wieder der Begriff **Terrain** (z. B. von *Smith et al.* (1979a,b)) bei der Benennung von Einheiten verwendet. Der Begriff rückt die räumliche Verbreitung einer Oberflächeneinheit mehr in den Vordergrund. Er wird hier nur eingeschränkt benutzt, da im Einklang mit Richtlinien des U. S. G. S. zur photogeologischen Kartierung aller festen planetaren Oberflächen im Sonnensystem stets der Materialcharakter im Vordergrund steht (*Lucchitta*, 1984).

Über den Mineralbestand des Materials an der Oberfläche der Galileischen Satelliten ist auf der Grundlage der Voyager- oder Galileo-SSI-Bilddaten keine genaue Aussage möglich. Durch multispektrale Auswertungen der Farbfilterdaten können zumindest einzelne mögliche Stoffgemenge identifiziert werden, es gehen aber auch physikalische Eigenschaften der Oberflächen, z. B. Korngrößen, in die Farbunterschiede ein (z. B. *Denk et al.*, 1998b; *Stephan*, 2006). Ein bedeutendes

³⁸Albedo ist hier im Sinn qualitativ unterschiedlicher Helligkeit zu verstehen (vergl. Abschnitt 5.5).

Hilfsmittel in der Interpretation der Zusammensetzung von Oberflächenmaterialien ist das in Abschnitt 6.3 kurz beschriebene abbildende Spektrometer (*Near Infrared Mapping Spectrometer NIMS*) an Bord des Galileo-Orbiters. Damit werden allerdings nur die obersten Millimeter bis Zentimeter der Oberfläche erfasst. Weder mit Kameras noch mit Spektrometern ist derzeit eine Gesteinsansprache bei Eisoberflächen möglich.

7.3.2. Lithostratigraphische Einheiten

Das eingangs genannte Superpositionsprinzip erlaubt, die relative stratigraphische Stellung photogeologischer Einheiten durch ihre gegenseitige Überdeckung oder Überlagerung festzulegen - jedenfalls sofern geologische Grenzen gut erkennbar sind. Callisto stellt hierbei, wie noch zu sehen sein wird, einen Problemfall dar.

Der Erosionszustand von Impaktkratern ist ein ungefähres Indiz für ihr relatives Alter: Krater mit scharfen Rändern oder Krater mit deutlich sichtbaren Strahlensystemen sind jünger als stark abgetragene Krater mit kaum noch erkennbarem Auswurfsmaterial (*Pohn und Offield, 1970; Trask, 1971*)³⁹. Dem bei geologischen Kartenwerken des U. S. G. S. üblichen Standard folgend werden Krater in mindestens drei verschiedene Alters- bzw. Erosionsklassen unterteilt: junge, frische, meist sehr helle Krater, häufig mit auffallenden Strahlensystemen (Klasse **c₃**), stärker abgetragene Krater (Klasse **c₂**), und alte, stark abgetragene Krater, mit meist erodierten Rändern und fehlenden Ejekta (Klasse **c₁**). Jede dieser drei Klassen besitzt den Rang einer lithostratigraphischen Gruppe (*Mutch, 1972*).

In dieser Arbeit wurde in zwei Fällen von diesem beim *U. S. Geological Survey* üblichen Schema abgewichen: (1) Extrem stark erodierte Krater, die teilweise kaum noch zu erkennen sind bzw. nahezu völlig von jüngeren Ablagerungen überdeckt wurden, werden als Kraterruinen (*crater ruins*) durch Struktursymbole angezeigt und sind nicht als eigene Einheiten definiert. In Kartenwerken des U. S. G. S. umfassen Krater des Typs **c₁** dagegen auch solche Kraterruinen. (2) Spezielle Impaktstrukturen wie die auf Ganymed und Callisto nachgewiesenen Dom-Krater (*dome craters*) werden üblicherweise einer der drei Gruppen zugeordnet, während morphologische Unterschiede zu regulären Kratern durch Symbole angezeigt werden. Sie unterscheiden sich jedoch so wesentlich von normalen Einschlagskratern, dass ihre Kartierung als eigenständige geologische Einheit, wie von *Passey und Shoemaker (1982)* vorgeschlagen, als berechtigt erscheint und deshalb hier auch durchgeführt wurde.

Die Einteilung in eine relative Altersabfolge von Krater-Erosionsklassen lässt keinerlei sichere Aussage über das absolute Alter dieser Krater zu. Es ist nicht bekannt, wie sich die Albedo frischer Strahlenkrater und ihres Auswurfsmaterials mit der Zeit ändert; selbst die hellsten Strahlenkrater könnten immer noch vor mehreren Milliarden Jahren entstanden sein (*Neukum et al., 1975; Shoemaker et al., 1982*). Eigenschaften des Oberflächenmaterials könnten sich von Ort zu Ort so stark ändern, dass in gleichen Zeiten unterschiedlich weit fortgeschrittene Erosionszustände bei Kratern entstehen können (*Lucchitta, 1984*). In stratigraphischen Korrelations-

³⁹Dies gilt jedoch nur für atmosphärelose Objekte, da klimatische Unterschiede in verschiedenen Oberflächengebieten auch unterschiedlich starke Erosion bei ansonsten etwa gleich alten Kratern zur Folge haben können.

diagrammen wird daher stets eine zeitliche Überlappung dieser drei Kraterformen angegeben, wobei aber grob die Regel einer Altersabfolge $c_3 < c_2 < c_1$ von jüngeren zu älteren Formen gilt.

Auf manchen geologischen Karten ist auch eine ähnliche Unterteilung für die Palimpseste auf Ganymed zu finden. Obwohl ursprünglich im *Summary of Ganymede Mappers' Meeting* (Lucchitta, 1984) davon abgeraten wurde, Palimpseste analog der bereits bei regulären Kratern schwierigen Zuordnung in Erosionsklassen einzuteilen, wurde dieses Einteilungsprinzip schließlich doch von vielen, auch von z. B. Lucchitta et al. (1992) selbst, übernommen und wird auch für diese Arbeit beibehalten.

Die Albedo von hellen, stratigraphisch jungen Strahlenkratern, aber auch anderen Kratern ist abhängig von der Albedo des Substrats, auf der sie entstanden, was die Alterszuordnung wesentlich erschwert (Shoemaker et al., 1982). Helle Strahlen erscheinen auf dunklem Untergrund generell dunkler als auf hellem und sind in größerer Entfernung vom Einschlagszentrum auch wesentlich schlechter vom dunklen Substrat zu unterscheiden. Dies ist bei Strahlenkratern oder hellen Kraterketten nachzuweisen, die die Grenze zwischen einer dunkleren und einer helleren Einheit überschreiten.

Abbildung 7.1 macht mit einem Beispiel von der Ganymed-Oberfläche deutlich, wie sehr unter Umständen fehlende Bildauflösung und/oder -qualität dazu führen können, dass geologische Einheiten falsch aufgestellt werden: In Kartenwerken des U. S. G. S. (vergl. Karte (Controlled Photomosaik): MAP I-1890 (Jg-2)), erstellt auf der Basis von Voyager-Bilddaten, ist im dunklen als *Perrine Regio* bezeichneten Gebiet eine Kraterkette erkennbar, an die im östlich davon gelegenen hellen Gebiet (*Sicyon Sulcus*) ein sehr heller Fleck angrenzt, der auf der Karte mit einem eigenen Namen (*Sais Facula*) bezeichnet ist. Dies geht aus dem kleinen rechts oben eingesetzten Bild in Abb. 7.1 hervor, das dieses Gebiet in den Voyager-Daten zeigt. In Wirklichkeit ist Sais Facula ein Teil der *Enki Catena* benannten Kraterkette. Die bei deutlich niedrigerem Phasenwinkel aufgenommenen SSI-Daten des Zielgebiets G7GSCATENA01 (500 m/pxl Auflösung) im Kontext der später in der Mission (Orbit G29) erhaltenen Bilddaten zeigen eindeutig, dass der starke Helligkeitskontrast durch den Substratwechsel bedingt ist, den die Kette überquert. Lediglich im hellen Gebiet von Sicyon Sulcus sind auch die hellen Ejekta erkennbar, im dunklen dagegen nicht. Legt man daher diese Frische- und Helligkeitskriterien zur Einteilung in jünger oder älter zugrunde, um mehrere offenbar *gleich alte* Krater auf *unterschiedlich hellem* Substrat in ihrer relativen Altersstellung zu beurteilen, so würden sie auf hellerem Substrat fälschlicherweise als stratigraphisch jünger eingeordnet als auf dunklerem.

Bei höherer Bildauflösung ($< \approx 400$ m/pxl) sind Krater, Dom-Krater und Palimpseste in einzelne geologische Einheiten unterteilbar. Für jeden Krater werden diese Einheiten zu einer **Formation** zusammengefasst, die entweder unbenannt bleibt oder im Fall eines benannten Kraters nach ihm benannt wird (Mutch, 1972). Die einzelnen in einem Impaktkrater unterscheidbaren Einheiten sind nach obiger Definition *Schichtglieder* dieser Formation (ebd.).

Einzelne Krater-Formationen, die sich in einer bestimmten Zeit bildeten, werden zu einer Gruppe, z. B. den bereits genannten Erosionsklassen zusammengefasst. Große Impaktbecken erhalten dagegen in der Regel den Rang einer nach dem Becken zu benennenden Gruppe mit einzelnen Formationen (Beispiel: Orientale-Becken auf dem Erdmond mit *Orientale Group* und den For-

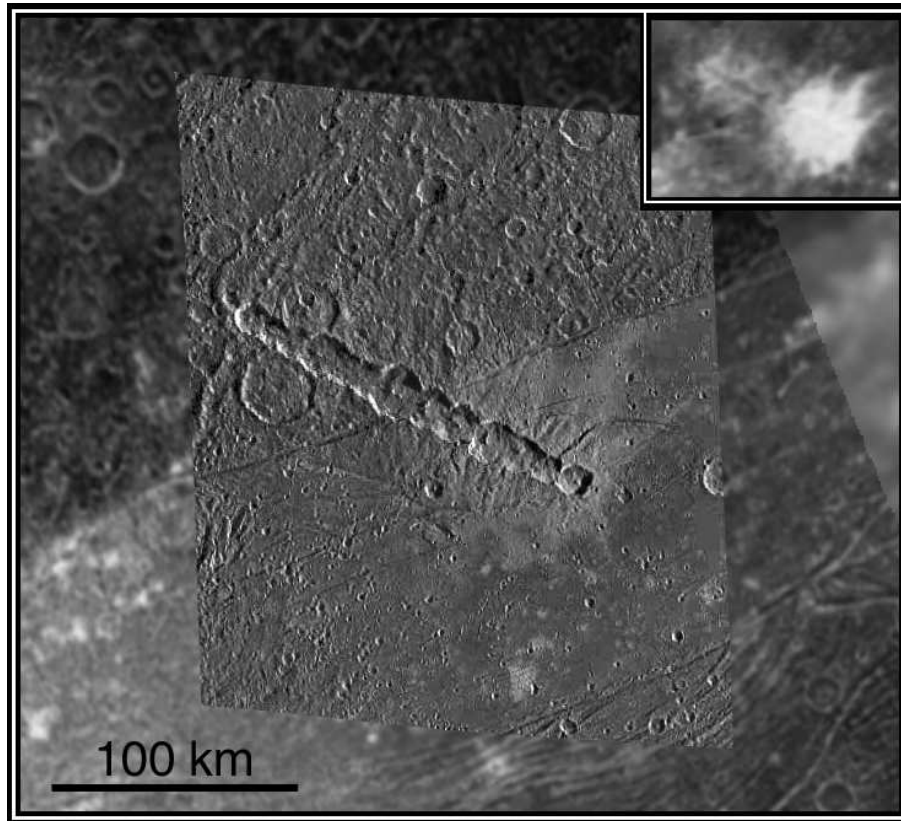


Abbildung 7.1.: Beispiel für fehlerhafte geologische Zuordnung: *Enki Catena* (Ganymed). Das kleinere eingesetzte Bild zeigt die Voyager-Daten mit offenbar zwei unterschiedlich hellen Einheiten. Die Galileo-Aufnahmen (Bildnummer: G7G0005, Zielgebiet: G7GSCATENA01) im Kontext des SSI-Bildes 29G0023 (Zielgebiet: 29GSCAPCOL01-05, 800 m/pxl) dagegen verdeutlicht, dass die Helligkeit der Einheit, der Kraterkette *Enki Catena*, (Lage bei 39° N, 12.5° W) mit der Helligkeit des Substrats (dunkles Material im westlichen Bereich, helles im östlichen) wechselt.

mationen *Hevelius Formation*, *Montes Rook Formation*, und *Maunder Formation* (Wilhelms, 1987)).

Die **Kraterhäufigkeit** der einer geologischen Einheit aufliegenden Impaktkrater ist ein weiteres, in vielen Fällen verlässlicheres Maß für ihr Alter - eine ausreichende Anzahl Krater und eine genügend große Messfläche vorausgesetzt. Mit der Ableitung relativer Alter und, unter Verwendung von Kraterchronologiemodellen, auch absoluter Alter aus Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen zur Unterstützung stratigraphischer Zusammenhänge befasst sich der folgende Abschnitt 7.4.

Ein Einzelkrater lässt sich durch die Messung der Größenverteilung der ihm aufliegenden kleineren Krater genau datieren (Neukum und König, 1976), Bildauflösungen von wenigstens mehr als ≈ 400 m/pxl vorausgesetzt. Da es unmöglich ist, die genaue stratigraphische Position aller Krater auf einer Planetenoberfläche zu bestimmen, einfach weil sich nicht alle Krater gegenseitig

überdecken (vergl. *Mutch* (1972)), können Messungen der Kraterhäufigkeiten an Einzelkratern in günstigen Fällen hier mehr bewirken als stratigraphische Zusammenhänge allein.

7.3.3. Chronostratigraphische und chronologische Einheiten

Chronostratigraphische Einheiten umfassen alle lithologischen bzw. lithostratigraphischen Einheiten, die in einem bestimmten Zeitraum der geologischen Geschichte eines Planeten oder Satelliten entstanden sind. Bei den terrestrischen Planeten im inneren Sonnensystem erfolgt die zeitliche Untergliederung ihrer geologischen Geschichte in **chronostratigraphische Systeme** durch große Impaktereignisse und ihre genetisch teilweise an diese Großeinschläge gebundenen magmatischen Aktivitäten (z. B. *Shoemaker und Hackman*, 1962; *Wilhelms*, 1987, 1990).

Die der chronostratigraphischen Kategorie des Systems übergeordneten Kategorien *Ärathem* und *Äonothem* wurden in die planetare Stratigraphie nicht eingeführt, da sie nur für die Geologie der Erde im Zusammenhang mit der Entwicklung des Lebens benutzt werden. Ebenso sind Kategorien niedrigerer Wertigkeit seltener in Gebrauch. Lediglich die unterhalb des Systems stehende Kategorie **Serie** wird zur weiteren Unterteilung benutzt, während die nächst-niedrigeren beiden Kategorien *Stufe* und *Zone* wiederum nicht verwendet werden.

Aufgrund der umfangreichen Datenbasis aus feldgeologischen Untersuchungen an den Apollo-Landstellen auf dem Erdmond und aus Bilddaten in teilweise sehr hoher Auflösung (Zehnermeterbereich) sind große Einschlagsereignisse ziemlich genau datierbar. Lithostratigraphische Einheiten können durch Untersuchungen wechselseitiger Überlagerungen mit den Auswurfsmassen großer lunarer Impaktereignisse in chronostratigraphische Systeme eingeordnet werden, dem alle diejenigen Einheiten angehören, die zwischen zwei Einschlägen gebildet wurden. Aus Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen, kalibriert an radiometrischen Altersdaten der von den Apollo- und Luna-Landstellen zurückgebrachten Gesteinsproben, ist abzuleiten, wann ein bestimmtes Einschlagsereignis stattgefunden hat und welche Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einschlägen abgelaufen ist. Damit können den chronostratigraphischen Einheiten abstrakte **chronologische Einheiten** zugeordnet werden.

Die in der planetaren Geologie am häufigsten verwendete chronologische Kategorie ist die dem System im Rang gleichgestellte **Periode**. Auch bei den chronologischen Kategorien gilt, dass in der planetaren Geologie die der Periode übergeordneten Begriffe **Ära** (dem *Ärathem* entsprechend) und **Äon** (= *Äonothem*) nicht verwendet werden. Als weitere Unterteilung der Periode ist lediglich die **Epoche** im Gebrauch (die der Serie entspricht), nicht aber die nächst-niedrigere Kategorie **Alter** (der *Stufe* entsprechend).

Die geologische Geschichte des Erdmondes beispielsweise wird vom Älteren zum Jüngeren in die Perioden *pre-Nectarian*, *Nectarian*, *Imbrian*, *Eratosthenian* und *Copernican* eingeteilt (*Wilhelms* (1987), und Zitate darin). Für die terrestrischen Planeten Merkur, Venus und Mars sind ähnliche Chronologien, basierend auf großen Einschlägen, Lavafutungen und tektonischen Ereignissen aufgestellt worden, deren Datierung bisher aber nicht durch radiometrische Messungen erfolgte, sondern ausschließlich auf Einschlagschronologiemodellen beruhen.

Tanaka (2001) empfiehlt, die untere Grenze zeitstratigraphischer Systeme nicht nur durch Typlokalitäten, sondern auch durch Kraterhäufigkeiten bei einem bestimmten Durchmesser, gemessen auf einer typisierenden Einheit, festzulegen. Dieser Vorschlag gründet auf dem Argument, dass auf Bilddaten immer nur die Oberfläche geologischer Einheiten, nicht aber ihre Basis selbst zu sehen ist.

Die durch die Galileo-SSI-Kamera erweiterte Bilddatenbasis der Galileischen Monde ermöglicht, Multiringstrukturen unterschiedlicher Größe auf den einzelnen Monden zu identifizieren und als **Zeitmarken zur Unterteilung ihrer geologischen Geschichte** zu verwenden. Allerdings ist die Ableitung absoluter Alter aus Messungen der Kraterhäufigkeiten und damit die chronologische Unterteilung der geologischen Geschichte der einzelnen Monde in einzelne, zeitlich begrenzte *Perioden* vom verwendeten Impaktchronologiemodell abhängig und kann, je nach Modell, zu erheblich voneinander abweichenden Ergebnissen führen (vergl. Abschnitte 7.4.5.3 und 7.4.5.4).

7.3.4. Benennung photogeologischer Einheiten

Benennung und Kurzbezeichnung der photogeologischen Einheiten folgen den für geologische Kartenwerke des *U. S. Geological Survey* geltenden Regeln. Den Einheiten wurden englische Bezeichnungen zugewiesen, die sich an den eingangs genannten beiden Hauptunterscheidungskriterien orientieren und den Materialcharakter heraus heben. Bezeichnungen wie *material* oder *deposit* sind Bestandteil eines jeden Namens (*Wilhelms*, 1990).

Die Kurzbezeichnungen für die Einheiten enthalten an erster Stelle einen Großbuchstaben, der das chronostratigraphische System angibt, dem die betreffende Einheit angehört. Beispiel: Beim Einschlag des Valhalla-Beckens entstanden im Zentrum helle, glatte Ebenen, die die Einheit *central bright plains material* bilden. Sie werden in das durch den Einschlag definierte Valhalla-System eingeordnet und erhalten die Kurzbezeichnung *Vcb*.

In einigen Fällen ist die Zuordnung zu einem chronostratigraphischen System mehrdeutig. Es lässt sich nicht exakt unterscheiden, welchem von zwei zeitlich aneinander grenzenden Systemen eine geologische Einheit zuzuordnen ist, wohl aber eine (wahrscheinliche) untere Grenze. In diesem Fall enthält die Kurzbezeichnung der Einheit beide Systemkürzel - Beispiel: Kraterketten, die nach dem Becken Valhalla oder dem Krater Burr entstanden sind: *BVca*; das Kürzel für das jüngere System hat dabei an erster Stelle zu stehen. Ist der wahrscheinliche Basishorizont nicht bekannt, so wird eine Bezeichnung wie im folgenden Beispiel gewählt: **ApAc** bezeichnet beispielsweise Krater, die mindestens so alt oder älter als das Asgard-Becken sind⁴⁰.

Die dem chronostratigraphischen System nachfolgende Kurzbezeichnung wird stets von der englischen Bezeichnung der geologischen Einheit abgeleitet. Geologisch weitgehend gleiche Einheiten mit gleichen Namen und gleicher zeitstratigraphischer Systemzugehörigkeit, aber unterschiedlichem Alter - ermittelt entweder aus stratigraphischer Überlappung und/oder Messungen der

⁴⁰Der Buchstabe *p* steht hier für *prä-* bzw. *pre-*.

Kraterhäufigkeiten - werden durch tiefer gestellte Ziffern am Ende der Kurzbezeichnungen gekennzeichnet; aufsteigende Ziffern entsprechen abnehmenden Altern der Einheiten.

7.3.5. Lineamente: Identifizierung und Kartierung

Anders als Europa oder Ganymed ist Callisto nicht oder nur in geringem Maß durch Tektonik geprägt. Die einzigen auf seiner Oberfläche nachzuweisenden tektonischen Formen sind (1) Brüche, Gräben und Furchen (*furrows*), (2) Steilhänge (*scarps*), (3) Bergrücken, und (4) Lineamente (*Thomas und Masson, 1985; Schenk und McKinnon, 1987; Wagner und Neukum, 1991; Schenk, 1995*). Gräben, Steilhänge und Bergrücken sind an große Einschlagsbecken gebunden, um deren Einschlagszentren sie konzentrisch oder radial angeordnet sind. Formen, die auf Episoden endogener Aktivität hindeuten würden, sind dagegen nicht sicher nachzuweisen.

Ein **Lineament** ist definiert als eine kartierbare lineare Erscheinungsform auf einer Oberfläche, die gerade oder leicht gekrümmt angeordnet ist, sich von angrenzenden Erscheinungsformen unterscheidet und vermutlich ein oberflächennahes Phänomen widerspiegelt (*O'Leary et al., 1976*). Ein Lineament kann geomorphologischen Ursprungs, d. h. (1) durch eine mehr oder weniger lineare Anordnung natürlicher (auf der Erde auch künstlicher) Geländeformen gekennzeichnet sein, oder (2) durch linear verlaufende Grenzen zwischen unterschiedlichen Geländeformen oder Materialeinheiten, oder (3) durch linear verlaufende Unterbrechungen einer Geländeeinheit. Lineamente können sich aber auch durch lineare Helligkeitsdifferenzen im Vergleich mit der Umgebung auszeichnen. Diese Art wird als *Albedolineament* bezeichnet.

Obwohl in der Definition des Begriffs Lineament ein ausschließlich tektonischer Ursprung nicht enthalten ist, belegen zahlreiche Abhandlungen zu Lineamentanalysen auf Bilddaten terrestrischer Planeten oder Satelliten einen genetischen Zusammenhang zwischen bestimmten Lineamentmustern bzw. -richtungen und tektonischen Deformationen. Lineamente sind demnach Indikatoren für einen bestimmten während eines geologischen Zeitraums wirksamen Stresszustandes (vergl. *Sabins, 1978; Wise, 1982*). Auch wenn viele dieser Lineamente durch horizontale und/oder vertikale Verschiebungen von Krustenbereichen kontrolliert werden, fordert die Definition nicht notwendigerweise, dass Lineamente grundsätzlich an tektonisch bedingte Materialverlagerungen gekoppelt sein müssen (ebd.).

Lineamentkartierungen und -auswertungen wurden bei allen terrestrischen Planeten durchgeführt. Von einigen Autoren wurde dabei die Existenz eines so genannten "*global grid*" oder *globalen Standardnetzes* postuliert mit Vorzugsrichtungen, die in bestimmten Regionen auf jedem der terrestrischen Planeten vorherrschen sollen. Diese Ergebnisse wurden aber vielfach angezweifelt. Als Hauptargument gegen die Existenz derartiger Lineamentmuster wurde meist eine zu niedrige Bildauflösung genannt.

Wilhelms (1987) nahm an, dass das von *Fielder (1963)* und *Strom (1964)* vom Erdmond beschriebene lunare Standardnetz mit Hauptrichtungen von NE-SW, NW-SE und N-S auf der Identifikation und Kartierung von Artefakten oder von zufällig linear angeordneten Geländeformen beruhte. Ähnlich den von *G. Schiaparelli* 1877 am Teleskop beobachteten und später

fälschlicherweise als "Kanäle" (*canali*) interpretierten linearen Strukturen auf der Marsoberfläche sollten Lineamente in Bilddaten höherer Auflösung und besserer Qualität nicht mehr zu sehen sein.

Tatsächlich konnten derartige Lineamente auf Bilddaten höherer Auflösung von der gesamten Mondoberfläche nicht bestätigt werden. Andere Autoren vertraten dagegen die Auffassung, dass lediglich lokal auftretende Lineamentsysteme zu beobachten sind, ohne Zusammenhang zu irgendeinem globalen tektonischen Ereignis oder Stress-System (z. B. Hörz *et al.*, 1991).

Systeme paralleler Lineamente wurden in mehreren Regionen auf Callisto in den Voyager-Bilddaten identifiziert (Thomas und Masson, 1985; Schenk und McKinnon, 1987; Wagner und Neukum, 1991, 1994b). In einigen Gebieten ist der genetische Zusammenhang mit einem großen Einschlagsbecken eindeutig, da sich die Lineamente konzentrisch oder radial um das Beckenzentrum anordnen (Thomas und Masson, 1985). In anderen Gebieten dagegen ist das Lineamentmuster gleichförmig parallel. Thomas und Masson (1985); Wagner und Neukum (1991, 1994b) und Schenk (1995) wiesen Lineamentsysteme mit zwei bis drei Vorzugsrichtungen nach. Callisto könnte demnach ein globales Lineamentnetz aufweisen. Bis zum Eintreffen der Galileo-Sonde im Jupitersystem war jedoch unsicher, ob diese Lineamente natürliche Phänomene darstellten. In den Regionen, von denen bereits Lineamentkartierungen und statistische Auswertungen auf Voyager-Datenbasis vorliegen (z. B. Wagner und Neukum (1991, 1994b), wurden daher in Teilgebieten, die die SSI-Kamera in hoher Auflösung abdeckten, die Existenz dieser Lineamente und ihre Richtungsverteilungen überprüft.

7.4. Messung von Impaktkraterhäufigkeiten zur relativen und absoluten Altersdatierung

7.4.1. Grundlagen

Krater auf den festen Oberflächen der Planeten und ihrer Satelliten entstehen durch den Einschlag von Himmelskörpern, bei denen es sich um (1) Überbleibsel der planetaren Akkretion, um (2) Mitglieder des Asteroidengürtels, und/oder (3) um Mitglieder von Kometenfamilien handelt. Unabhängig von ihrer tatsächlichen Herkunft werden Einschlagskörper allgemein meist als **Meteoriten**, **Projektile** oder **Impaktoren** bezeichnet. Messungen und Analysen von Einschlagskraterhäufigkeiten auf Planeten und Satelliten geben Aufschluss (a) über den **zeitlichen Ablauf geologischer Prozesse**, (b) über die mögliche **Herkunft der Projektile**, und (c) über die **Einschlagsbedingungen**, die durch die Eigenschaften der Projektile und der Target-Oberfläche bestimmt sind.

Die Oberfläche eines Planeten oder Satelliten ist umso älter, je länger sie dem Meteoritenbombardement ausgesetzt war und je höher folglich ihre Impaktkraterdichte ist. Genauer sind unter Krater"ichten" die **Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen** geologischer Einheiten auf einer festen planetaren Oberfläche zu verstehen. Sie spiegeln unterschiedliche Exponierungszeiten wieder, denen sie dem Meteoritenfluss ausgesetzt waren, und lassen sich somit zur geologischen

Altersbestimmung verwenden (Öpik, 1960; Shoemaker et al., 1962; Baldwin, 1964, 1971; Hartmann, 1966; Neukum, 1975, 1977; Neukum und König, 1976; Neukum et al., 1972, 1975).

Zunächst stellen die auf einzelnen geologischen Einheiten bestimmten Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen ein Maß für **relative Altersunterschiede** dar. Zur Umrechnung von relativen in **absolute Alter** gibt es zwei mögliche Wege:

1. Impaktkraterhäufigkeiten geologischer Einheiten, von denen Bodenproben entnommen wurden, werden korreliert mit im Labor gemessenen *radiometrischen Altern* der Proben. Daraus lässt sich ein Einschlagschronologiemodell ableiten, das rechnerisch die Ableitung absoluter Alter aus gemessenen Impaktkraterhäufigkeiten auch von den Regionen einer Planetenoberfläche möglich macht, von denen keine Bodenproben vorhanden sind.
2. Die *Einschlags-* und *Kraterproduktionsrate* und ihr zeitlicher Verlauf müssen bekannt sein, oder zumindest durch ein hinreichend genaues Modell beschrieben werden können.

Akkumuliert sich eine Kraterverteilung auf einer Oberfläche durch den Einschlag von Projektilen in der Weise, dass bereits existierende Krater nicht durch nachfolgende Einschläge zerstört werden, also kein Gleichgewicht zwischen Zerstörung und Neubildung auftritt, befindet sich die Kraterverteilung der betreffenden Oberfläche **in Produktion**. In diesem Fall kann die Kraterverteilung als das Abbild der Massen-Geschwindigkeitsverteilung der die Krater erzeugenden Projektilpopulation betrachtet werden (Neukum et al. (1975); Neukum (1983), und Zitate darin). Eine solche Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung wird als **Produktionsverteilung** oder **Population im Produktionszustand** bezeichnet (ebd.).

Eine ursprüngliche Produktionsverteilung kann gestört werden durch (Neukum et al., 1975; Neukum, 1983; Strom und Neukum, 1988):

- **Geologische Prozesse:**

- Erosion, Sedimentation und Überflutung, etwa durch Lava; in erster Linie werden dabei kleinere Krater unterhalb eines bestimmten Durchmessers ausgelöscht.
- Viskose Relaxation: Dieser Prozess betrifft vorwiegend Krater oberhalb eines bestimmten Durchmessers auf den Eismonden der großen Planeten.

- Durch eine **Gleichgewichtsverteilung**: Im Lauf der Zeit hat sich ein Gleichgewicht zwischen Neubildung und Zerstörung bereits auf der Oberfläche existierender Krater eingestellt, d. h. hier liegt keine Produktionsverteilung mehr vor.

Um das einfache Prinzip - je höher die Kraterdichte einer Fläche, umso höher ihr Alter - zu Altersbestimmungen zu nutzen, müssen außerdem folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Der Meteoritenfluss muß über die betrachtete Planeten- oder Satellitenoberfläche isotrop sein, andernfalls würden gleich alte Gebiete in geographisch verschiedenen Regionen der Oberfläche unterschiedliche Kraterhäufigkeiten aufweisen.

2. Die physikalischen Eigenschaften der Oberfläche dürfen sich nicht wesentlich mit der geographischen Lage ändern, d. h. Projektile gleicher Masse und Einschlagsgeschwindigkeit müssen auf allen Oberflächengebieten bei ansonst *gleichen* Einschlagsbedingungen Krater gleichen Durchmessers erzeugen.
3. Es darf keine Gleichgewichtsverteilung vorliegen.
4. Die Anzahl der Krater auf einer zu vermessenden Fläche sollte groß genug sein (10 Krater oder mehr), um ein statistisch aussagekräftiges Ergebnis zu liefern.

In den folgenden Abschnitten werden die für die Auswertung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Autoren relevanten Darstellungsmethoden vorgestellt. Die wesentlichen Richtlinien zur Standardisierung von Kratergrößen-Häufigkeitsmessungen und deren Darstellung in Tabellen und Diagrammen wurden im September 1977 von der CRATER ANALYSIS TECHNIQUES WORKING GROUP erarbeitet und von *Arvidson et al.* (1979) publiziert.

7.4.2. Darstellungsmethoden von Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen

7.4.2.1. Kumulative Kraterverteilung

Unter der **differentiellen Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung** $n(D, t)$ versteht man die Anzahl der Krater in einem bestimmten Durchmesserintervall $(D, D + dD)$, die auf einer gegebenen Oberfläche (geologischen Einheit) durch Projektile im Massenintervall $(m, m + dm)$ einer gegebenen Massenverteilung $n(m, t)$ unter der Annahme einer mittleren Impaktgeschwindigkeit während einer bestimmten Exponierungszeit t entstanden sind:

$$n(D, t) = \int_0^t \varphi(D, t') dt' \quad (7.12)$$

Die Größe $\varphi(D, t)$ entspricht der *differentiellen Kraterbildungsrate*. Sie gibt an, wieviele Krater des Durchmessers D pro Zeiteinheit auf der Oberfläche entstehen. Durch Integration von $n(D, t)$ über die Kraterdurchmesser erhält man die **kumulative Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung**⁴¹. Sie ist gleich der Anzahl der Krater größer oder gleich einem bestimmten Durchmesser, die sich pro Flächeneinheit während der Exponierungszeit t gebildet haben:

$$N_{kum}(D, t) = \int_D^\infty \int_0^t \varphi(D', t') dD' dt' = \int_D^\infty n(D', t) dD' \quad (7.13)$$

Die differentielle Kraterbildungsrate $\varphi(D, t)$ lässt sich in zwei Terme aufspalten:

$$\varphi(D, t) = g(D) \cdot f(t) \quad (7.14)$$

⁴¹Anstelle des genaueren Begriffs *Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung* wird im folgenden der Einfachheit halber häufig nur von *Kraterverteilung* gesprochen.

wobei $g(D)$ das Größenverteilungsgesetz bezeichnet, das beim Erdmond zeitlich weitgehend konstant ist (Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994; Neukum et al., 2001a). Der zweite Term $f(t)$ entspricht der allgemeinen Zeitabhängigkeit der Kraterbildungsrate. Damit kann Gleichung 7.13 folgendermaßen umgeformt werden:

$$N_{kum}(D, t) = \int_D^\infty \int_0^t g(D') \cdot f(t') dD' dt' = G(D) \cdot F(t) \quad (7.15)$$

In der Praxis werden die Integrale in Gleichung 7.13 und 7.15 durch diskrete Zahlen aufsummiert. Unter den in Abschnitt 7.4.1 genannten Voraussetzungen (1.-4.), und bei zeitlich konstantem Größenverteilungsgesetz gilt für das Verhältnis der kumulativen Häufigkeiten zweier geologischer Einheiten eines Planeten oder Satelliten mit unterschiedlichen Exponierungszeiten t_i bzw. t_j beim gleichen Kraterdurchmesser folgende einfache Beziehung:

$$\frac{N_{kum}(D, t_i)}{N_{kum}(D, t_j)} = \frac{F(t_i)}{F(t_j)} = C \quad (7.16)$$

d. h. ihre kumulativen Häufigkeiten unterscheiden sich lediglich durch einen konstanten Faktor und sind direkt proportional zum Verhältnis ihrer Zeitabhängigkeit (Arvidson et al., 1979; Neukum, 1983; Strom und Neukum, 1988). Zum besseren Vergleich der kumulativen Häufigkeiten unterschiedlich alter geologischer Einheiten werden diese auf einen Referenzdurchmesser (oder ein Durchmesserintervall) bezogen. Die kumulative Häufigkeit bei diesem Durchmesser - häufig im Gebrauch sind 1 km, 4 km, 10 km und 20 km - ist ein direktes Maß für das relative Alter einer geologischen Einheit und wird als **Krater-Retentionsalter** bezeichnet (Neukum und Wise, 1976; Neukum und Hiller, 1981; Neukum, 1983)⁴².

Arvidson et al. (1979) empfehlen bei der Erstellung von Krater-Häufigkeitsdiagrammen (Häufigkeit aufgetragen gegen Kraterdurchmesser) folgende Standards einzuhalten:

- Doppelt-logarithmische Achsen im gleichen Maßstab zur Basis 10;
- Verwendung konsistenter Einheiten auf Abszisse und Ordinate: Kraterdurchmesser in Kilometer, Häufigkeit pro Quadratkilometer;
- Angabe der 1σ -Standardabweichung für jeden Messpunkt; unter der Annahme, dass Kraterpopulationen poissonverteilt sind, ist die Standardabweichung σ proportional zu $\pm n^{1/2}n$ (n : Anzahl der Krater eines bestimmten Durchmessers).

Die Darstellung ungerasterter Daten führt bei einer großen Anzahl gemessener Krater sehr schnell zu unübersichtlichen Diagrammen und langen Tabellenausdrucken. Alle Daten werden daher erst in ein **Durchmesserraster** eingeordnet und die kumulative Häufigkeit diskret aufsummiert (Arvidson et al., 1979). Folgende Rasterschrittweiten sind in Gebrauch:

⁴²Der Begriff Krater-Retentionsalter wird nicht einheitlich verwendet. In manchen Veröffentlichungen wird auch das absolute Alter einer geologischen Einheit, das mit einem Einschlagschronologiemodell bestimmt wurde, mit Retentionsalter bezeichnet. Es sollte aber klar zwischen *Retentionsalter gleich relativem Alter* und *Kratermodellalter gleich absolutem Alter* unterschieden werden (Neukum, 1983).

- Ein **Standard-** oder **Wurzel-2-Raster**; für jeden Kraterrasterdurchmesser D_i und $n = (-19, -18, \dots, 19, 20)$ gilt:

$$D_i(n) = 2^{n/2} \quad (7.17)$$

- Ein quasilogarithmisches **Feinraster** (Neukum, 1983):

$$D_i(a, n) = a \cdot 10^n \quad (7.18)$$

mit $n = (-3, \dots, 3)$ und den Rasterintervallgrenzen:

$$a = 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7, 2.0, 2.5, \\ 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0$$

Vorzugsweise wird in dieser Arbeit dieses Feinraster benutzt. Die Messpunkte sind entlang der Abszisse ($\log D$) dichter besetzt. Für einen in das Rasterdurchmesserintervall $[D_a, D_b)$ fallenden Krater mit dem Durchmesser D_i gilt $D_i = D_a$.

7.4.2.2. Differentielle Kraterverteilung

Die **differentielle Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung** erhält man durch Differentiation aus der kumulativen (Gleichung 7.15) (Arvidson et al., 1979; Neukum, 1983):

$$N_{dif} = n(D, t) = \frac{\partial}{\partial D} N_{kum} \approx \frac{\Delta N_{kum}}{\Delta D} \quad (7.19)$$

In der Praxis werden differentielle (wie kumulative) Häufigkeiten aus diskreten Zahlen bestimmt. Dies erfolgt für einen Krater des Durchmessers D_i aus einem Durchmesserintervall $[D_a, D_b)$ nach der Beziehung:

$$N_{dif} = \frac{N_{kum}(D_a) - N_{kum}(D_b)}{D_b - D_a} \quad (7.20)$$

Im Diagramm wird jedoch nicht die differentielle Häufigkeit ($\log(N_{dif})$) gegen den unteren Rasterdurchmesser (bzw. dessen Logarithmus), sondern gegen den Logarithmus des geometrischen Mittels $\bar{D} \cong \sqrt{D_a \cdot D_b}$ des Rasterintervalls $[D_a, D_b)$ aufgetragen (Arvidson et al., 1979).

Das Beispiel einer Messung in Bild 7.2 (a, b) zeigt eine nicht durch nachfolgende Prozesse gestörte Produktionsverteilung aus einem Gebiet der Kraterebenen auf Callisto (Daten nach Wagner et al., 1989). Das Erreichen der Bildauflösungsgrenze, d. h. des kleinsten noch verlässlich messbaren Kraters, ist durch das Maximum in der differentielle Häufigkeit (hier etwa bei 9 - 10 km Durchmesser) angezeigt, wie Abb. 7.2 (a) verdeutlicht. Im kumulativen Diagramm ist dies aus dem Umbiegen (*roll-over*) der Messpunkte unterhalb von 9 km ersichtlich (Abb. 7.2 (b)).

Bei einer **geologischen Überprägung** (*resurfacing*) werden Krater unterhalb eines bestimmten Durchmessers D_c ausgelöscht. Die Krateruhr wird praktisch zurückgestellt. Auf der überprägten Fläche akkumuliert sich im Durchmesserbereich $D < D_c$ erneut eine Kraterverteilung, mit der

gleichen Steigung wie für die Krater der älteren Verteilung im Durchmesserbereich $D > D_c$, jedoch mit geringerer Kraterhäufigkeit beim Referenzdurchmesser wegen der geringeren Exponierungszeit (Neukum und Horn, 1976).

Bild 7.2 (d, e) zeigt das Beispiel einer Messung eines überprägten Gebiets (Wagner und Neukum, 1994a) ((d): differentiell, (e) kumulativ). Der kritische Durchmesser D_c liegt hier bei etwa 15km. Die differentielle Verteilung kann durch zusätzliche Maxima besser als die kumulative anzeigen, bei welchen Durchmessern Überprägungseffekte zum Tragen kommen.

7.4.2.3. Relative Kraterverteilung

In grober Näherung kann die Abhängigkeit der kumulativen Häufigkeit vom Kraterdurchmesser durch ein einfaches Potenzgesetz der Form:

$$N_{kum} \sim D^\alpha \quad (7.21)$$

beschrieben werden. Die Größe α heißt **Verteilungs-, Populations-, Steigungs- oder Slope-Index**. Er entspricht im doppelt-logarithmischen Diagramm der Steigung einer kumulativen Verteilung und pendelt im Mittel zwischen den Werten -1 und -3 (Neukum, 1983).

Die Verteilungen der großen Krater auf dem Erdmond und den terrestrischen Planeten schwanken im Mittel um eine *kumulative Standardverteilung* $S_{dif}(D) \sim D^{-2}$. Durch Normieren der kumulativen Verteilung auf D^{-2} (bzw. der differentiellen auf D^{-3}) lässt sich daher die Änderung des kumulativen Verteilungsindex α mit dem Kraterdurchmesser wesentlich genauer darstellen. Diese Art der Darstellung heißt **relative Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung**; sie ist definiert durch (Arvidson et al., 1979):

$$N_{rel} = R(D) = \frac{N_{dif}(D)}{D^{-3}} \quad (7.22)$$

Bei gerasterten Messdaten wird die relative Verteilung berechnet durch:

$$R(D) \cong (D_a D_b)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{N_{kum}(D_a) - N_{kum}(D_b)}{D_b - D_a} \right) \quad (7.23)$$

Die Bezeichnung **R-Plot** in (englisch-sprachigen) Veröffentlichungen ist allgemein üblich. Analog zur differentiellen Verteilung wird das geometrische Mittel zwischen zwei Rasterpunkten berechnet und dessen Logarithmus gegen $\log R$ aufgetragen.

Bild 7.2 (c, f) zeigt Beispiele für eine ungestörte und eine durch Überprägung gestörte Produktionsverteilung in relativer Darstellung. Änderungen des Verteilungsindex α , d. h. Änderungen der Steigung im kumulativen Diagramm, drücken sich in relativer Darstellung durch Steigungs- und Vorzeichenwechsel aus. Der rechnerische Zusammenhang zwischen dem Wechsel des Verteilungsindex in kumulativer, differentieller und relativer Darstellung ist in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

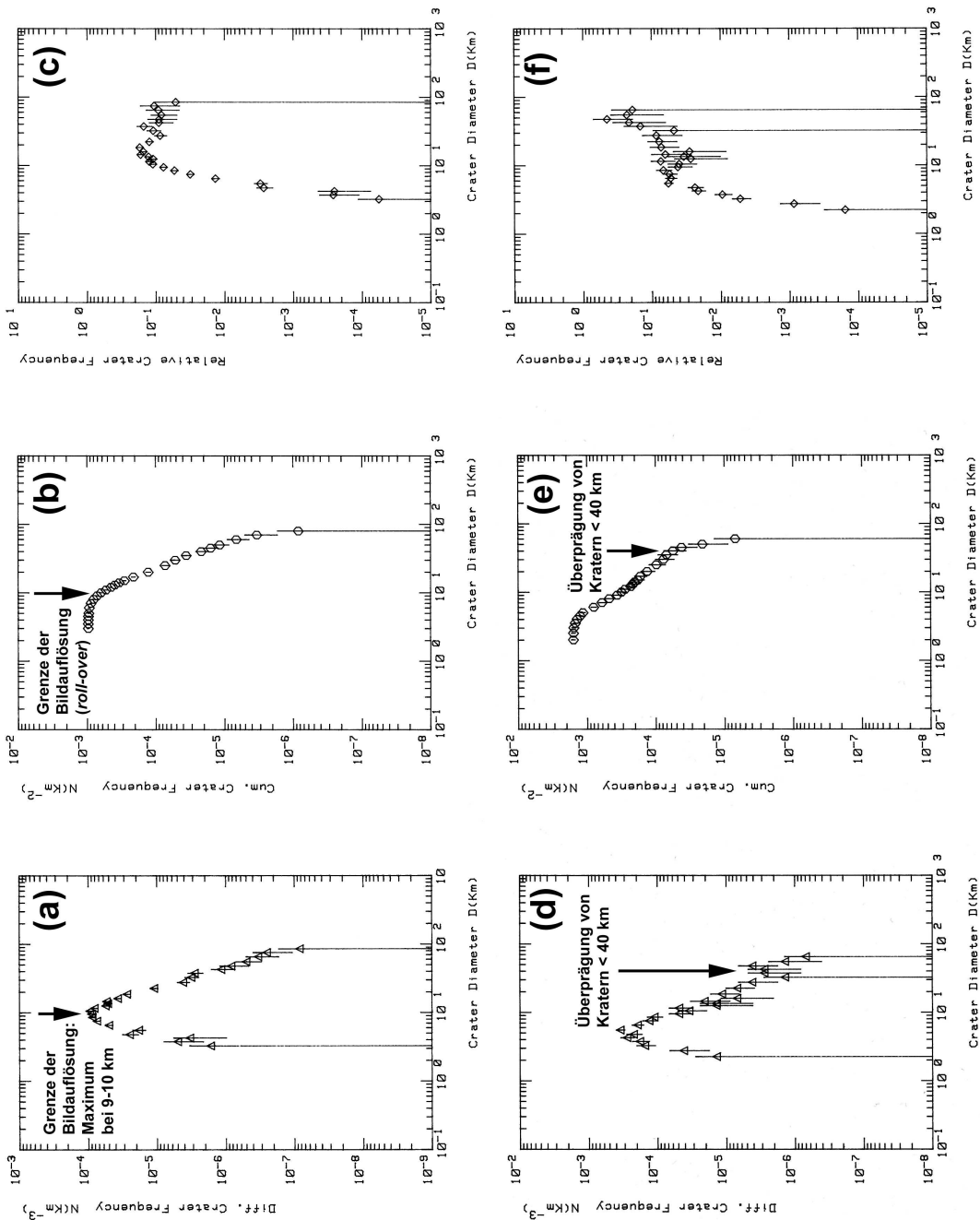


Abbildung 7.2.: Darstellungsmethoden von Kraterhäufigkeiten. (a - c) Nicht überprägte geologische Einheit (Kratereneben); (d - f) überprägte Einheit: "volcanic flows" (Stooke, 1989; Wagner et al., 1989); (a, d) differentielle Darstellung, (b, e) kumulative Darstellung, (c, f) relative Darstellung. Messungen in Voyager-2-Daten im Valfjör Quadrangle (Je-9) (Schmidt et al., 1989; Wagner et al., 1989; Wagner und Neukum, 1994a).

N_{kum}	\sim	D^α	
N_{dif}	\sim	$D^{\alpha-1}$	
R	\sim	$D^{\alpha-1} / D^{-3}$	$= D^{\alpha+2}$

Tabelle 7.1.: Rechnerischer Zusammenhang des Verteilungsindex bei differentieller und relativer Verteilung mit dem kumulativen Verteilungsindex α .

Von einigen Autoren wird die von *Hartmann* (1966) eingeführte **inkrementale Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung** (eine Variante der kumulativen Verteilung) benutzt, die für eine Verteilung mit dem Steigungsindex α durch folgende Beziehung beschrieben wird:

$$N_{inkr} = (1 - p^{\alpha+1}) \cdot N_{kum} \quad (7.24)$$

Der jeweilige Wert der inkrementalen Verteilung hängt von der Wahl der Intervallgrößen (meist $p = 2$ oder $p = \sqrt{2}$) ab. Die Verwendung dieser Darstellungsart wird von *Arvidson et al.* (1979) nicht empfohlen und ist hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Die Verwendung des Begriffs *inkrementale Verteilung* ist außerdem nicht eindeutig. Eine Reihe von Autoren benutzen den Begriff inkrementale Verteilung gleichbedeutend und daher irreführend mit differentieller Verteilung.

7.4.3. Gleichgewichtsverteilung

Ist eine Oberfläche lange genug dem Projektfluss ausgesetzt, kann sich ein Gleichgewicht zwischen bereits vorhandenen und sich neu bildenden Kratern einstellen. Die Kraterverteilung ist nicht mehr in Produktion, sondern erreicht eine **Equilibriums- oder Gleichgewichtsverteilung** (*Neukum und Dietzel* (1971); *Neukum* (1983), und weitere Zitate darin). Sie wird durch folgende Formel beschrieben:

$$N_{equ} = 10^k \cdot D^{-2} \quad (7.25)$$

Charakteristisch ist in kumulativer Darstellung die Proportionalität $N_{equ} \sim D^{-2}$. In relativer Darstellung entspricht dies einer horizontalen Geraden, wie aus den Beziehungen in Tabelle 7.1 leicht abzulesen ist. *Trask* (1966) fand in Studien an lunaren Maregebieten den Wert $k = -1.1$. Häufigkeitsverteilungen, die etwa einen Faktor 2 - 3 unter- oder oberhalb der in Gleichung 7.25 beschriebenen Verteilung liegen, können als Gleichgewichtsverteilungen bezeichnet werden. Der Exponent k müsste streng genommen für jeden einzelnen Planeten oder Satelliten neu ermittelt werden, der Wert $k = -1.1$ des Erdmondes lässt sich aber in guter Näherung für andere Körper als Richtgröße verwenden.

Eine Verteilung nach Gleichung 7.25 stellt sich jedoch nur bei Produktionsverteilungen mit Verteilungsindizes $\alpha < -2$ ein (*Neukum und Dietzel*, 1971). Im umgekehrten Fall einer Produktionsverteilung mit $\alpha > -2$ ist die Gleichgewichtsverteilung einer Produktionsverteilung ähnlich, die um einen von der Exponierungszeit abhängigen Faktor *niedriger* liegt als die Produktionsverteilung (*Neukum und Dietzel*, 1971; *Neukum*, 1983). Vorausschauend auf die auf Callisto (und den beiden anderen Galileischen Eismonden) gemessenen Verteilungen ist hier festzuhalten, dass

die Verteilungsindizes der Produktionsverteilungen grundsätzlich niedriger als -2 sind, d. h. dass demnach, falls vorhanden, Gleichgewichtsverteilungen nach Gleichung 7.25 vorliegen.

Gleichgewichtsverteilungen erfassen in der Regel nur Krater mit Durchmessern $D < D_E$. Die Größe D_E bezeichnet den Grenzdurchmesser, unterhalb dem die Verteilung im Gleichgewicht ist. Der Durchmesser D_E ist altersabhängig: Je länger die Fläche dem Projekttilfluss ausgesetzt ist, umso größer wird der Grenzdurchmesser D_E (Neukum und Dietzel, 1971; Neukum, 1983). In einigen Maregebieten des Erdmondes, die jünger als etwa 3.9 Milliarden Jahre sind, tritt ein Gleichgewicht bei Kratern $D < D_E \approx 100$ m auf, in den mehr als 4 Milliarden Jahren alten Hochländern dagegen bereits bei $D < D_E \approx 1$ km (Neukum und Dietzel, 1971; Neukum, 1983). Für Krater $D > D_E$ liegt dagegen meist eine Produktionsverteilung vor, und für diesen Durchmesserbereich lassen sich auch Krater-Retentionsalter ableiten.

In Zusammenhang mit sehr dicht bekraterten Oberflächen wird häufig auch der Begriff **Sättigung (crater saturation)** in der Literatur benutzt. Er beschreibt den visuellen Eindruck einer mit Kratern "gesättigten" Fläche und ist rein rechnerisch, etwa im Sinn einer bestimmten Häufigkeit, nicht definiert (Neukum, 1983). Durch diesen Begriff bringen einige Autoren (z. B. Zahnle et al., 1998 und 2003) zum Ausdruck, dass das relative Alter der am dichtesten bekraterten Einheiten nicht mehr bestimmt werden kann. Es ist daher wichtig, bei solchen Einheiten genau nachzuprüfen, ob eine -2-Verteilung lediglich unterhalb eines bestimmten Durchmessers, oberhalb aber eine Produktionsverteilung vorliegt, oder ob über den gesamten gemessenen Durchmesserbereich eine Equilibriumsverteilung ausgebildet ist.

7.4.4. Produktionsverteilungen des Erdmondes und der Galileischen Satelliten

7.4.4.1. Die Produktionsverteilung des Erdmondes

Durch das von den Lunar-Orbiter- und Apollo-Missionen vom Erdmond gesammelte Bildmaterial konnten Kraterhäufigkeitsverteilungen in einem weiten Durchmesserbereich bis herab in den Zehnermeter- und Meterbereich gemessen werden. Der Mond bietet sich somit hervorragend als *Eichkörper* bei vergleichenden Untersuchungen auf anderen Planeten- oder Satellitenoberflächen an.

Chapman und Haefner (1967) und Neukum et al. (1972) vermuteten, dass in der Beziehung zwischen kumulativer Häufigkeit und Kraterdurchmesser kein einfaches Potenzgesetz (Gleichung 7.21) gilt, sondern eher ein Gesetz der Form $N_{kum} \sim D^{\alpha(D)}$. Die auf verschiedenen alten lunaren geologischen Einheiten gemessenen kumulativen Häufigkeitsverteilungen lassen sich in einander überlappenden Durchmesserbereichen durch Verschieben der einzelnen Verteilungen in $\log(N_{kum})$ -Richtung, also durch Herausrechnen der Zeitabhängigkeit) ziemlich exakt entlang einer glatten Kurve mit komplexer Form anordnen lassen (Neukum et al., 1975; Neukum und König, 1976; Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994). Diese Kurve repräsentiert die zeitinvariante **lunare Produktions-, Standard- oder Kalibrationsverteilung**.

Die in Bild 7.3 (a: kumulativ; b: relativ) abgebildete lunare Produktionsverteilung ist abschnittsweise durch folgende Rechenausdrücke definiert (Neukum et al., 1975; Neukum, 1983; Neukum

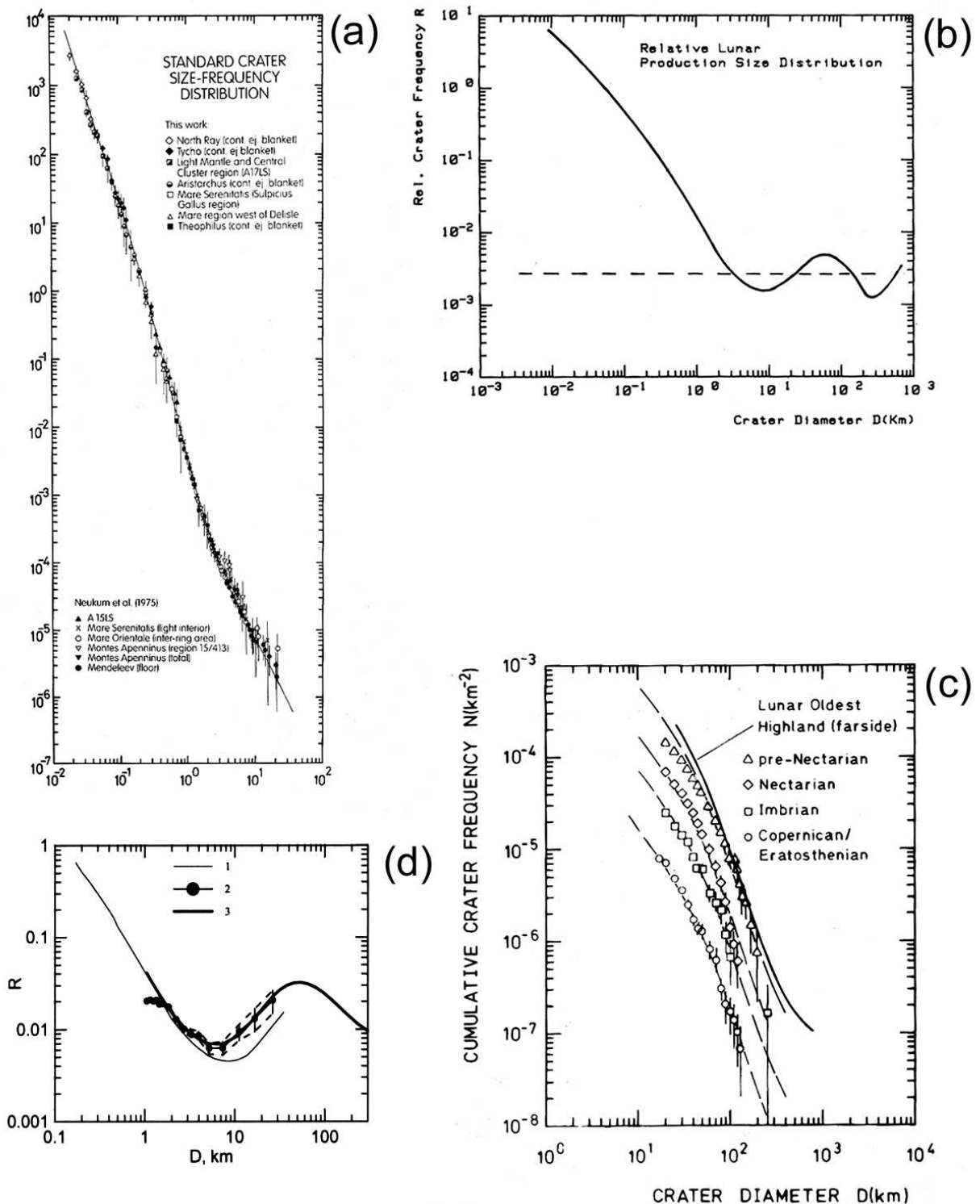


Abbildung 7.3.: Lunare Produktions- oder Kalibrationsverteilung; (a) kumulative Darstellung; (b) relative Darstellung; (c) zeitliche Stabilität der Verteilung in kumulativer Darstellung; (d) verbessertes lunares Polynom in relativer Darstellung (Ivanov et al., 2001; Neukum et al., 2001a); weitere Erläuterungen siehe Text.

und Ivanov, 1994):

1. im Durchmesserbereich $20 \text{ m} \leq D \leq 300 \text{ km}$ durch ein Polynom 11. Grades:

$$\log(N_{kum}) = a_0 + a_1 \cdot \log(D) + a_2 \cdot (\log(D))^2 + \dots + a_{11} \cdot (\log(D))^{11} \quad (7.26)$$

2. im Durchmesserbereich $D > 300 \text{ km}$ durch ein einfaches Potenzgesetz

$$N_{kum} = D^s \quad (7.27)$$

mit dem Verteilungsindex $s \approx -1.5-2$ (Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994). In Gleichung 7.26 ist noch die Exponierungszeit t_0 zu berücksichtigen, während der eine geologische Einheit dem Meteoritenbombardement ausgesetzt war. Es sei $F(t_0)$ das Zeitintegral der Einschlagsrate, dann lässt sich Gleichung 7.26 umformen zu:

$$\log(N_{kum}) = a_0 + F(t_0) + \sum_{k=1}^{11} a_k \cdot (\log(D))^k \quad (7.28)$$

Zur numerischen Approximation der Verteilung wird willkürlich $a_0 + F(t_0) = -2.5339$ gesetzt (Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994). Die elf Koeffizienten a_0 bis a_{11} sind im folgenden Abschnitt 7.4.4.2 in Tabelle 7.2 aufgelistet. Zur Ableitung eines Retentionsalters aus der Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung einer geologischen Einheit wird die in Gleichung 7.28 beschriebene Kurve nach der Methode der kleinsten Quadrate durch Verschieben in $\log(N_{kum})$ -Richtung an die Messpunkte angepasst und das Retentionsalter für einen bestimmten Referenzdurchmesser abgelesen (bzw. auf dem Rechner ausgegeben).

Das Produktionsverteilungspolynom aus Gleichung 7.26 mit den Koeffizienten aus Tabelle 7.2 (Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994) ist nur innerhalb eines Faktors 2 in der Genauigkeit der Häufigkeit zwischen den kleineren und den größeren Kratern gültig. Zwischenzeitlich wurden daher neue Zählungen auf der Ejektadecke des lunaren Orientalebeckens auf Bilddaten der Lunar-Orbiter- und der Clementine-Missionen durchgeführt und das Polynom neu bestimmt (Ivanov et al., 2001; Neukum et al., 2001a). Das Ergebnis ist in Bild 7.3 (d) in relativer Form dargestellt. Die Differenz in der Häufigkeit zwischen den großen und kleinen Kratern konnte mit diesem neueren Polynom bereinigt werden. Die in der Abbildung dick durchgezogene Kurve liegt exakt auf den Messpunkten, während das "alte" Polynom in diesem Durchmesserbereich etwa einen Faktor 1.5 - 2 in N_{rel} darunter liegt.

7.4.4.2. Herleitung von Produktionsverteilungspolynomen für die Galileischen Satelliten

Bild 7.4 (a) zeigt Beispiele von Produktions-Kraterverteilungen der Hochlandregionen des Erdmondes, des dunklen Gebiets Galileo Regio auf Ganymed, und der dunklen Kraterbenen Callistos in relativer Darstellung. Allen drei Verteilungen gemeinsam ist im Durchmesserbereich ($> 5 \text{ km}$) die Form eines umgedrehten "U". Die Lage des (lokalen) Maximums, des so genannten

Inflexionsdurchmessers (Neukum, 1983) befindet sich bei jedem der drei Körper, wie angegeben, bei einem anderen Durchmesser⁴³.

Formen von Verteilungen wie in den Mondhochländern oder Maregebieten sind auf allen terrestrischen Planeten im inneren Sonnensystem zu finden. Da Produktionsverteilungen das Abbild der kratererzeugenden Projektilpopulation darstellen, ist aus diesen Ähnlichkeiten abzulesen, dass die Planeten im inneren Sonnensystem mit großer Wahrscheinlichkeit von Mitgliedern ein- und derselben Projektilfamilie getroffen wurden (Neukum, 1983; Strom und Neukum, 1988; Neukum und Ivanov, 1994).

Unterschiede in der Lage und im lokalen Maximum dieses umgedrehten "U" haben ihre Ursache in den Einschlagsbedingungen: *Zwei identische Projektile* - d. h. identisch in Durchmesser und Dichte - verursachen auf zwei verschiedenen Körpern *unterschiedlich große Krater*, da die Einschlagsparameter von Objekt zu Objekt variieren. Rechnerische Zusammenhänge zwischen Projektil- und Targeteigenschaften und den Einschlagsparametern werden durch *Kraterskalierungsgesetze* beschrieben (vergl. Neukum und Ivanov (1994), und Zitate darin). Auf den Durchmesser eines Kraters, der durch ein Projektil gegebenen Durchmessers und Dichte erzeugt wird, haben Parameter wie Einschlagsgeschwindigkeit und -winkel, Oberflächendichte und Gravitation sowie rheologische Parameter der Oberfläche Einfluss (ebd.). Die Einschlagsgeschwindigkeit bzw. ihre senkrecht zur Oberfläche gerichtete Komponente übt dabei den stärksten Einfluss auf die Größe des entstehenden Kraters aus. Für einen Kraterdurchmesser D und eine bestimmte Einschlagsgeschwindigkeit v fand Holsapple (1987) folgende Proportionalität:

$$D \sim v^{2/3} \quad (7.29)$$

Ist v größer als auf dem Erdmond, so ist das umgedrehte "U" in $\log D$ nach rechts zu größeren Kratern verschoben, andernfalls nach links, wie im Fall von Ganymed und Callisto (Abb. 7.4 (a)).

Unter Krater und Kraterdurchmesser ist hier nicht der morphologisch sichtbare Krater zu verstehen, sondern der Durchmesser einer sich vorübergehend bildenden Kraterhohlform (der so genannten *transient cavity*). Sie ist ein zeitlich begrenztes Phänomen unmittelbar nach dem Auftreffen des Projektils (Melosh, 1989; Spudis, 1993). Innerhalb der *transient cavity* ist alles Material durch den Aufprallschock in Bewegung, entweder nach unten, seitwärts, oder aus der entstehenden Hohlform heraus. Aus letzterem Material entstehen die Ejekta. Durch nachfolgende Ausgleichsbewegungen von unten nach oben wird die Hohlform flacher. Der Kraterstand der ursprünglichen Hohlform sackt etwas zusammen. Der morphologische Krater als Endprodukt des gesamten Impaktprozesses ist somit größer und flacher als die *transient cavity*, vor allem bei Kratern mit komplexer Morphologie (d. h. mit Zentralbergen oder -mulden, Terrassen usw.) (Melosh, 1989). Bei einfachen, meist kleineren und in der Regel schüsselförmigen Kratern (*simple, bowl-shaped craters*) ist der Durchmesser der *transient cavity* annähernd gleich dem Kraterdurchmesser.

⁴³Der Inflexionsdurchmesser liegt beim Erdmond im gezeigten Diagramm eigentlich bei 80 km. Da die kleineren Krater aber erodiert sind, fällt der Kurvenast stärker zu den kleineren Kratern ab. Der tatsächliche Inflexionsdurchmesser beim Mond liegt daher wie angegeben eher bei 60 km (Neukum, 1983).

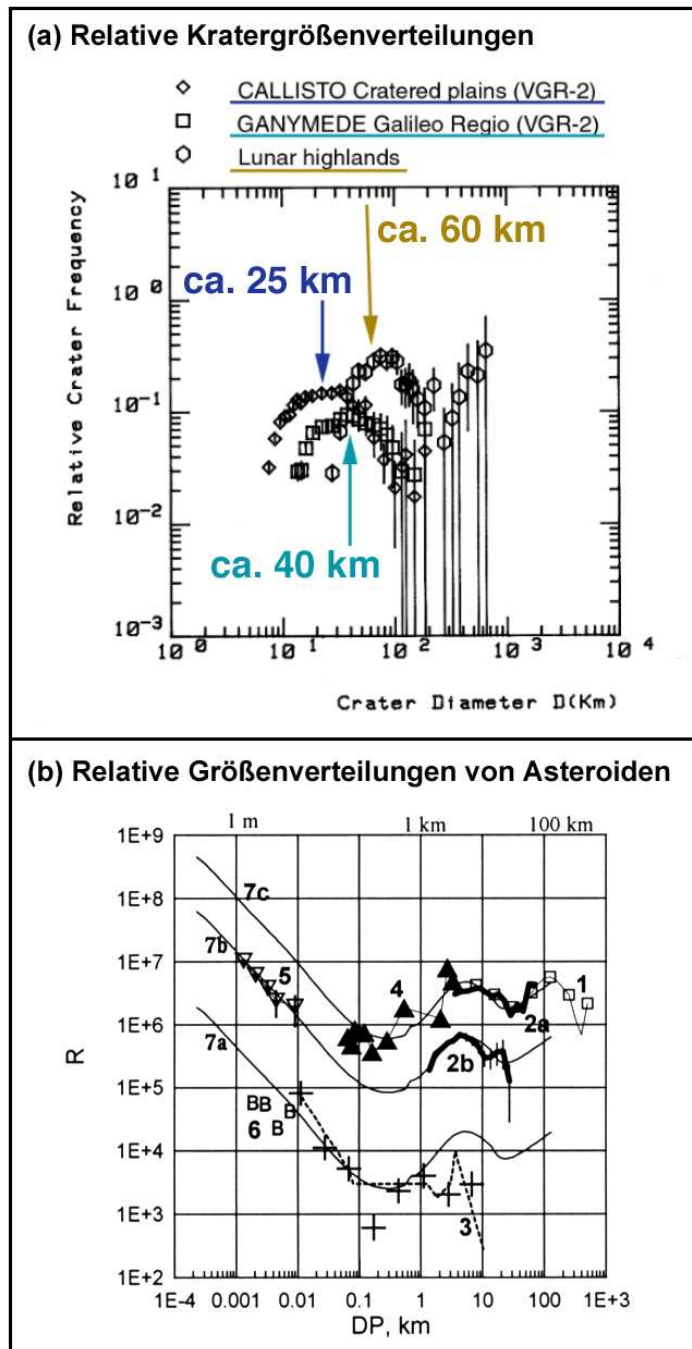


Abbildung 7.4.: Kratergrößen- und Asteroiden-Größenverteilungen in relativer Darstellung. (a) Relative Verteilungen auf Mond, Ganymed und Callisto. Dargestellt sind Verteilungen des Mond-Hochlandes (Neukum, 1983), des dunklen Gebiets Galileo Regio auf Ganymed (Neukum und Pozio, 1983), und der dunklen Krater Ebenen Callistos (Strom et al., 1981). Die Maxima der relativen Verteilungen auf den drei Körpern (Inflexionsdurchmesser) sind angegeben. (b) Größen-Häufigkeitsverteilung von Asteroiden in relativer Darstellung. Punkte 1 und 2: Palomar-Leiden-Survey (PLS) und Spacewatch data (Jedicke und Metcalfe, 1998), Punkte 4 und 5: für die Asteroiden Mathilde und Gaspra abgeleitete Projektilverteilungen, Punkte 7a - 7c: Verteilung von erdnahen Objekten (Near Earth Objects (NEAs)), Objekten des inneren Asteroidengürtels und des Hauptgürtels. Diagramm nach (Ivanov et al. (2001), und Zitate darin. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Astronomische Beobachtungen der Asteroiden und ihrer Größen-Häufigkeitsverteilung haben ergeben, dass die gleiche Form der Verteilung mit dem umgedrehten "U" auch bei diesen Körpern vorhanden ist. Folglich kommen Asteroiden zum überwiegenden Teil als Projektile auf den terrestrischen Planeten in Betracht (*Neukum, 1983; Strom und Neukum, 1988; Neukum und Ivanov, 1994; Durda et al., 1998; Jedicke und Metcalfe, 1998; Ivanov et al., 2001; Neukum et al., 2001a,b; DeNiem und Werner, 2002; Werner et al., 2002*).

Ein relatives Diagramm (R-Plot) einiger Asteroiden-Größenverteilungen ist in Bild 7.4 (b) relativen Kraterverteilungen des Erdmondes, Ganymed's und Callisto's in 7.4 (a) gegenübergestellt. Die in (b) gezeigten Größenverteilungen sind charakteristisch für eine Projektilfamilie, deren Größenverteilungsspektrum durch gegenseitige Zusammenstöße und Zerstörungen ihrer Mitglieder entstand, d. h. die eine **Kollisionsentwicklung** (*collisional history*) durchlaufen haben. Diese drückt sich in "Buckeln" bei Projektilen über 1 km Durchmesser aus, während die Häufigkeit zu immer kleineren Projektilen im Log-log-Plot mit einer kumulativen Häufigkeit von etwa -3 linear steil ansteigt.

Krater-Häufigkeitsmessungen auf SSI-Bilddaten der Asteroiden 951 Gaspra und 234 Ida mit seinem Mond Dactyl zeigen, dass die gleiche Form der Kraterverteilungen mit einem Steigungsindex von etwa -3 selbst auf den Objekten zu finden ist, die in der Quellregion der Projektilfamilie liegen, die die Krater auf den Planeten des inneren Sonnensystems verursacht haben (*Neukum und Ivanov, 1994*). Es erscheint daher als gesichert, dass der überwiegende Teil der Projektile, die auf den Planeten des inneren Sonnensystems und auf den Asteroiden selbst auftrafen, zum überwiegenden Teil aus dem Asteroidengürtel kam (*Neukum, 1983; Strom und Neukum, 1988; Neukum und Ivanov, 1994; Ivanov et al., 2001; Neukum et al., 2001a,b*).

Die Ergebnisse von Kraterhäufigkeitsmessungen auf den Galileischen Satelliten Ganymed und Callisto werden von einzelnen Forschergruppen unterschiedlich interpretiert. Beispielsweise sehen *Strom et al. (1981)* oder *Passey und Shoemaker (1982)* deutliche Unterschiede in der Form der Größenverteilung zwischen Kratern auf diesen beiden Körpern und auf den terrestrischen Planeten im inneren Sonnensystem. Kraterhäufigkeitsmessungen, die mittels des in dieser Arbeit verwendeten Stereokomparators (Beschreibung in Abschnitt 7.4.6.1) von mehreren Auswertern sowohl auf Voyager- als auch Galileo-Daten durchgeführt worden sind, zeigen dagegen deutlich eine ähnliche Form wie auf den terrestrischen Planeten (Bild 7.4 (a); (*Neukum, 1983, 1985, 1997; Neukum und Pozio, 1983; Neukum et al., 1998, 1999; Schmidt, 1988; Schmidt et al., 1989*)). Diese Resultate legen den Schluss nahe, dass diese Objekte ebenfalls durch Mitglieder einer kollisionsentwickelten Projektilfamilie getroffen wurden. Beim derzeitigen Kenntnisstand kommen dabei am ehesten Objekte des Asteroidengürtels und langlebige Überbleibsel von Planetesimalen aus der Zeit der planetaren Akkretion in Frage (*Neukum, 1997; Neukum et al., 1998, 2007*).

Aus der überwiegenden Zahl der Stereokomparatormessungen von Kraterhäufigkeiten auf den Galileischen Satelliten auf der Basis von Voyager-Bilddaten lässt sich folgendes schlussfolgern: Die Größenverteilung der Krater auf den Oberflächen der Galileischen Satelliten weist eine komplexe Form auf, ähnlich wie bei Verteilungen des Erdmonds (*Neukum, 1997; Neukum et al., 1998*). Wegen dieser Ähnlichkeit kann damit das Polynom der lunaren Produktionsverteilung (Gleichungen 7.26 bis 7.28) zur Herleitung analoger Produktionsverteilungen für die Galileischen Satelliten verwendet werden. Das Verfahren sei hier kurz beschrieben.

Aus der Lage der Inflexionsdurchmesser in relativer Darstellung (Bild 7.4 (a)) ist abzulesen, wie groß der Krater ist, den identische Projektile auf unterschiedlichen Körpern erzeugen würden. Zwischen dem Inflexionsdurchmesser beim Erdmond (D_M) und bei einem anderen Planeten (D_P) besteht näherungsweise folgende einfache Beziehung:

$$f \cong \frac{D_M}{D_P} \quad (7.30)$$

Die Größe f wird als **Transformationsfaktor** der lunaren Produktionsverteilung für den entsprechenden Planeten oder Satelliten bezeichnet (*Neukum*, 1983). Die Ableitung eines für einen anderen Körper als für den Erdmond gültigen Produktionsverteilungspolynoms 11. Grades nach Gleichung 7.30 geschieht durch Verschieben der lunaren Produktionsverteilung in log D -Richtung, und zwar für $f > 1$ nach links, anderenfalls nach rechts. Die Lage des Inflexionsdurchmessers beim Erdmond und einem spezifischen Körper stellt eine erste Näherung zur Transformation der lunaren Produktionsverteilung auf diesen Körper dar. Der tatsächliche Wert von f , der dann auch benutzt wird, wird empirisch durch Probieren verschiedener Faktoren $f_i \approx f$ (in der Regel in schrittweisen Vergrößerungen/Verkleinerungen um 0.1) ermittelt. Verwendet wird letztendlich das Polynom, dessen Form sich am genauesten an bestehende Messungen anpasst. Zu dieser Prozedur sind Messungen mit einer sehr großen Anzahl Kratern (über 1000) möglichst im Durchmesserbereich zwischen 5 - 10 km (untere Grenze) und etwa 100 km (obere Grenze) erforderlich.

Der skalierungsbedingte Unterschied zwischen Inflexionsdurchmessern auf Erdmond, Ganymed und Callisto ist aus Bild 7.4 (a) in Verbindung mit Gleichung 7.30 abzulesen. Er beträgt zwischen Mond und Ganymed etwa einen Faktor 1.5, zwischen Mond und Callisto etwa 2 - 2.5. Es wurden mehrere mögliche Faktoren in dieser Größenordnung getestet. Die derzeit verwendeten Produktionsverteilungspolynome wurden schließlich mit Transformationsfaktoren von **1.8 für Ganymed** (verbesserte Bestimmung gegenüber dem älteren Wert 1.5 (*Neukum*, 1983)) und **2.4 für Callisto** erhalten (*Schmidt*, 1988; *Schmidt et al.*, 1989).

Unter der Annahme einer Proportionalität des Kraterdurchmessers mit $v^{2/3}$ der Einschlagsgeschwindigkeit (vergl. Gleichung 7.29, (*Holsapple*, 1987)) und unter Verwendung von Abschätzungen der Einschlagsgeschwindigkeiten auf den Galileischen Satelliten nach *Horedt und Neukum* (1984b) wurde ein Polynom für Europa mit einem Transformationsfaktor von 1.3 abgeleitet (*Neukum et al.*, 1998, 1999). Ein lokales Maximum in der relativen Verteilung weisen Europa's Kraterverteilungen nicht auf, da der größte Krater nur bei 45 km Durchmesser liegt (*Turtle et al.*, 1999), daher war die gleiche Prozedur wie bei Ganymed oder Callisto hier nicht möglich.

In ähnlicher Weise wurde ein theoretisches Polynom mit einem Faktor von 0.96 für den innersten Satelliten Io abgeleitet. Seine Gültigkeit lässt sich nicht testen, da die Oberfläche frei von Impaktkratern ist. Das Polynom lässt sich aber dazu verwenden, maximale Oberflächenalter nach einer in Abschnitt 7.4.8 beschriebenen Methode abzuschätzen. Der vollständige Satz der Koeffizienten für die vier Galileischen Satelliten im Vergleich mit den Koeffizienten des lunaren Polynoms (*Neukum*, 1983; *Neukum und Ivanov*, 1994) ist in Tabelle 7.2 aufgelistet.

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass die Koeffizienten der vier Polynome nicht vom neuen, verbesserten Mondpolynom (Abb. 7.3 (d) nach *Neukum et al.* (2001a) hergeleitet wurden, sondern

$a_i =$	Callisto $f = 2.4$	Ganymed $f = 1.8$	Europa $f = 1.3$	Io $f = 0.96$	Mond
$a_0 =$	-3.8067	-3.4181	-2.9404	-2.4695	-2.5339
$a_1 =$	-2.9617	-3.2491	-3.4962	-3.6416	-3.6269
$a_2 =$	1.2574	1.0307	0.7105	0.3946	0.4366
$a_3 =$	0.5009	0.6933	0.7968	0.7865	0.7935
$a_4 =$	-0.4751	-0.2916	-0.0753	0.1096	0.0865
$a_5 =$	-0.2754	-0.3061	-0.2991	-0.2575	-0.2948
$a_6 =$	0.0649	0.0171	-0.0326	0.0710	-0.0.664
$a_7 =$	0.0553	0.0533	0.0464	0.0364	0.0379
$a_8 =$	$-1.1159 \cdot 10^{-4}$	$4.0175 \cdot 10^{-3}$	$7.9960 \cdot 10^{-3}$	0.0109	0.0106
$a_9 =$	$-3.9033 \cdot 10^{-3}$	$-3.43 \cdot 10^{-3}$	$-2.8110 \cdot 10^{-3}$	$-2.1571 \cdot 10^{-3}$	-0.0022
$a_{10} =$	$-3.5193 \cdot 10^{-4}$	$-4.065 \cdot 10^{-4}$	$-4.6820 \cdot 10^{-4}$	$-5.2570 \cdot 10^{-4}$	$-5.1797 \cdot 10^{-4}$
$a_{11} =$	$3.97 \cdot 10^{-5}$	$3.97 \cdot 10^{-5}$	$3.97 \cdot 10^{-5}$	$3.97 \cdot 10^{-5}$	$3.97 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 7.2.: Koeffizienten a_i (vergl. Gleichungen 7.26 bis 7.28) der Produktionsverteilungspolynome der vier Galileischen Satelliten. Die Koeffizienten des (alten) Mondpolynoms (*Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994*) sind zum Vergleich aufgeführt.

vom älteren (*Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994*). Durch Tests hat sich gezeigt, dass die Transformation nach dem älteren Polynom bessere Fits auf Kratermessungen der Galileischen Satelliten ermöglicht. Hierfür gibt es zwei mögliche Gründe: (1) Die Größenverteilung der Projektile im Jupitersystem unterscheidet sich bei den größeren Kratern etwas von der lunaren Projektilverteilung. Es waren im Verhältnis weniger große Projektile vorhanden, die Verteilung ist somit bei Durchmessern über 40 - 50 km steiler. (2) Die Kraterskalierung auf Eismonden verläuft signifikant anders als auf silikatischen Oberflächen, vor allem in unterschiedlichen Durchmesserbereichen.

7.4.5. Impaktchronologiemodelle zur absoluten Altersdatierung

7.4.5.1. Impaktchronologie des Mondes und der terrestrischen Planeten

Nur beim Erdmond als einzigem planetaren Körper können derzeit Kraterhäufigkeiten mit radiometrisch datierten Gesteinsaltern von den Apollo- und Luna-Landestellen korreliert werden⁴⁴. Durch Auftragen der Krater-Retentionsalter (d. h. der kumulativen Häufigkeiten) gegen das radiometrisch gemessene absolute Alter wurde mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate die in Bild 7.5 (a) dargestellte Kurve der **lunaren Einschlagschronologie** abgeleitet (*Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994; Neukum et al., 2001a*).

⁴⁴Bei den auf der Erde gefundenen Meteoriten, die mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Einschlagsereignisse vom Mars hierher gelangt sind, können zwar radiometrische Altersbestimmungen durchgeführt werden, aber der Ursprungsort auf der Marsoberfläche ist unbekannt.

Sie wird durch folgenden Rechenausdruck beschrieben:

$$N_{kum}(D \geq 1 \text{ km}) = P_1 \cdot (e^{P_2 \cdot t} - 1) + P_3 \cdot t \quad (7.31)$$

mit den Koeffizienten:

$$\begin{aligned} P_1 &= 5.44 \cdot 10^{-14}, \\ P_2 &= 6.93, \text{ und} \\ P_3 &= 8.38 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Die Zeit wird in der Einheit **Giga-Jahr (Ga; englisch: Giga-year (Gyr) oder Aeon (aeon)**, 1 Ga = $1 \cdot 10^9$ Jahre) angegeben. Weiter ist die Einheit **Mega-Jahr (Ma bzw. Myr; 1 Ma = $1 \cdot 10^6$ Jahre)** bei Modellaltern unter 1 Ga in Gebrauch. Durch ein numerisches Verfahren lässt sich mit Gleichung 7.31 für jede auf der Mond-Oberfläche gemessene kumulative Kraterhäufigkeit ein absolutes **Krater-Modellalter (cratering model age)** angeben⁴⁵.

Differenzieren der Gleichung 7.31 nach der Zeit t ergibt die zeitliche Änderung der kumulativen Kraterbildungsrate (*cratering rate*) für Durchmesser $D \geq 1 \text{ km}$ (Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994):

$$\frac{\partial N_{kum}}{\partial t} = \Phi(D \geq 1 \text{ km}) = P_1 \cdot P_2 \cdot e^{P_2 \cdot t} + P_3. \quad (7.32)$$

Diese Kurve ist in Bild 7.5 (b) gezeigt. Zwischen 4.5 und 3.5 Ga fällt die Kraterrate, analog die Einschlagsrate, exponentiell mit der Zeit (*smooth decay*) bei einer Halbwertszeit von $\approx 0.1 \text{ Ga}$ ab (Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994). Ab etwa 3.5 - 3.0 Ga biegt die Kraterrate um in eine Gerade, entsprechend einer nahezu konstanten Einschlagsrate bis heute.

Von den übrigen terrestrischen Planeten sind derzeit noch keine Gesteinsproben zur radiometrischen Datierung vorhanden. Da die terrestrischen Körper aber von der gleichen Projektilpopulation bombardiert wurden wie der Mond und dieses Bombardement mit annähernd gleicher Zeitabhängigkeit verlief, lassen sich hieraus **Mond-ähnliche Einschlagschronologiemodelle** (*lunar-like impact chronology models*) für jeden dieser Körper herleiten. Aus astronomischen Beobachtungen von die Planetenbahnen kreuzenden Asteroiden (PCAs = *planet-crossing asteroids*) konnten Einschlags- und Krateraten für Mars und Merkur hergeleitet werden, deren Genauigkeiten in den letzten Jahren verbessert wurden (z. B. für Merkur: Neukum et al., 2001b; für Mars: Hartmann und Neukum, 2001).

Wie auf dem Erdmond verlief das vorwiegend durch Asteroiden verursachte Bombardement während der ersten 600-700 Millionen Jahre mit einem exponentiellen Abfall in der Einschlags- und Kraterbildungsrate. Die Rate halbierte sich etwa alle 100 Millionen Jahre. Das Ende dieses heftigen Bombardements ist auf jedem der terrestrischen Planeten (die geologisch stark veränderten Planeten Venus und Erde ausgenommen) durch jeweils ein stratigraphisch jüngstes Becken

⁴⁵Das Verfahren kann auf jeden beliebigen Kraterdurchmesser X als Referenzdurchmesser erweitert werden, indem aus dem Produktionsverteilungspolynom (Gleichung 7.26) der Faktor zwischen der kumulativen Häufigkeit für $D \geq X \text{ km}$ und $D \geq 1 \text{ km}$ ermittelt und die Koeffizienten P_1 und P_3 mit diesem Faktor multipliziert werden. Der Koeffizient P_2 des Exponentialterms bleibt dabei gleich.

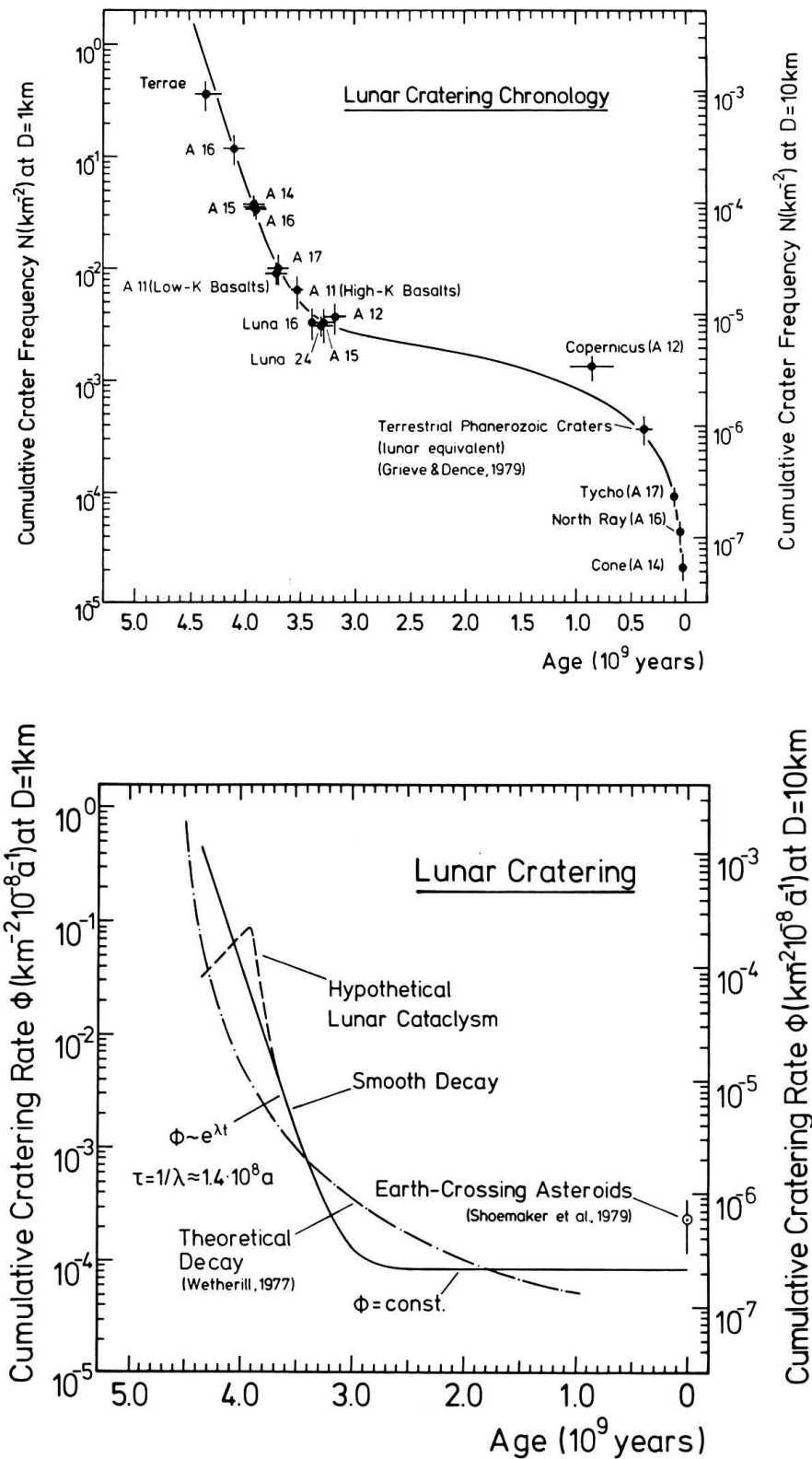


Abbildung 7.5.: Einschlagschronologie und Einschlagsrate des Erdmondes (Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994; Neukum et al., 2001a); (a) Abhängigkeit der Retentionsalter vom absoluten Alter bei Durchmessern größer oder gleich 1 km (linke Ordinate) und 10 km (rechte Ordinate); (b) zeitliche Abhängigkeit der Einschlagsrate für Durchmesser größer oder gleich 1 km (linke Ordinate) und 10 km (rechte Ordinate).

angezeigt, den so genannten **marker horizon** (Wetherill, 1975)⁴⁶. Die Modellalter dieser jüngsten Becken (Erdmond: Orientale; Merkur: Caloris) liegen etwa bei 3.75 - 3.8 Ga (Neukum et al., 2001a,b). Nach ihrer Entstehung ging die exponentiell abfallende Impaktrate allmählich in eine seit etwa 3 bis 3.3 Ga mehr oder weniger konstante Rate über.

Der Beitrag von Kometen zu den Einschlagsraten im inneren Sonnensystem ist nicht genau bekannt, liegt aber höchstwahrscheinlich unter 10 % (Neukum et al., 2001a). Die von den Asteroiden abweichende Form der Größenverteilung (vergl. Davis und Farinella, 1997) müsste sich sonst in der Form der Verteilung niederschlagen, im Gegensatz zu allen Beobachtungen. Der Beitrag der Kometen bewegt sich somit im Rahmen der Messgenauigkeit.

7.4.5.2. Impaktchronologiemodelle für das Jupitersystem

Modellchronologien für das Jupitersystem basieren auf folgenden Annahmen:

1. Die Jupitersatelliten wurden vorwiegend durch **Objekte aus dem Asteroidengürtel** bombardiert, mit einem ähnlichen zeitlichen Verlauf der Einschlagsrate wie bei den terrestrischen Planeten des inneren Sonnensystems, zumindest in der Frühzeit (z. B. Neukum, 1983; Neukum, 1985; Neukum, 1997; Neukum et al., 1998).
2. Den Hauptanteil der Projektilfamilie im Jupitersystem stellten über den gesamten geologisch erfassbaren Zeitraum **Kometen**, während Asteroiden einen zu vernachlässigenden Einfluss besitzen. Bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Einschlagsrate gibt es zwei Varianten: (a) eine Entwicklung wie im inneren Sonnensystem mit einer Periode heftigen Bombardements (LHB) in der Frühzeit (Shoemaker und Wolfe, 1982), und (b) eine mehr oder weniger konstante Einschlagsrate, abgesehen vermutlich von der frühesten Zeit, d. h. vor etwa 4.3 - 4.4 Ga (Zahnle et al., 1998, 2003).
3. Als weitere mögliche Varianten werden Mischpopulationen von Projektilen, etwa von Kometen und bestimmten Familien von Asteroiden diskutiert (Zahnle et al., 1998; Kuzmitcheva und Ivanov, 2002; Brunini et al., 2003).

Die beiden derzeit konkurrierenden Modelle werden im Folgenden kurz vorgestellt. Im weiteren Verlauf sind sie ohne weitere Literaturangabe kurz mit **Model I** und **Model II** angegeben.

7.4.5.3. Model I: Mond-ähnliches Asteroidenchronologiemodell

Dieses Modell besitzt aufgrund der großen Ähnlichkeiten in den Formen von Kraterverteilungen auf dem Erdmond und auf den Galileischen Satelliten (vergl. Abschnitt 7.4.4.2) eine solide Grundlage. Ein Hauptanteil von **Projektilen aus dem Asteroidengürtel** wurde bereits aufgrund umfangreicher Zählungen auf Voyager-Bilddaten vermutet (Neukum, 1983, 1985; Neukum

⁴⁶Streng genommen bezieht sich der *marker horizon* auf die nach diesem jüngsten Becken entstandenen Einheiten mit kumulativen Kraterhäufigkeiten von $\approx 120/10^6$ größer/gleich 10 km Durchmesser (Wetherill, 1975).

und Pozio, 1983; Schmidt, 1988; Schmidt et al., 1989). Auswertungen der Galileo-SSI-Daten bestätigten eine den Asteroiden ähnliche Größenverteilung herab bis zu den kleinsten Kraterdurchmessern (Neukum, 1997; Neukum et al., 1998, 2007).

Aus Bild 7.4 (a) geht hervor, dass die Verteilungen von Ganymed und Callisto nach links zu kleinen Durchmessern hin verschoben sind. Dies bedeutet, dass die Geschwindigkeiten, mit denen die Projektile einschlugen, wesentlich geringer als beim Erdmond sind, eine Tatsache, die nur mit vorwiegend *planetozentrischen Objekten* verträglich ist (Horedt und Neukum, 1984b). Das Hauptproblem bei einer planetozentrischen Projektilpopulation ist ihre kurze Lebensdauer in der Größenordnung von weniger als $\approx 10^6$ Jahren (Horedt und Neukum, 1984b; Neukum, 1985). Ein zeitlich langlebigeres Reservoir an Projektilen ist daher notwendig. Dies könnte in zeitweise durch Jupiter eingefangenen, von außen kommenden (also heliozentrischen) Objekten bestehen (ebd.).

Für spezielle heliozentrische Objekte, etwa solche auf einer reinen Kreisbahn, lassen sich Impaktwahrscheinlichkeiten für die Galileischen Satelliten ableiten. Für Callisto fanden Horedt und Neukum (1984b) z. B. eine um einen Faktor 4000 höhere Einschlagswahrscheinlichkeit bei einem (eingefangenen) planetozentrischen Objekt gegenüber einem heliozentrischen. Genauere Modellierungen für das Einfangen heliozentrischer Objekte mit realistischeren Bahnparametern (höhere Exzentrizitäten und Bahnneigungen gegen die Ekliptik) durch die großen Planeten stehen noch aus. Für das Einfangen solcher Objekte als Normalfall spricht die immer größer werdende Zahl an Neuentdeckungen besonders kleiner Monde mit Durchmessern von nur wenigen Kilometern in den Satellitensystemen der vier großen Planeten. Bei Jupiter beträgt die Gesamtzahl der derzeit bekannten Monde 63. Der aktuelle Stand bekannter Jupitersatelliten ist auf folgender Webseite aufgelistet: <http://www.ifa.hawaii.edu/~sheppard/satellites/jupsatdata.html>.

Zur Unterscheidung vorwiegend planetozentrischer und heliozentrischer Projektilpopulationen in den Satellitensystemen der vier großen Planeten hilft ein wichtiges Merkmal: Im Fall synchroner Rotation eines Satelliten wären Kraterhäufigkeiten gleich alter Einheiten bei vorwiegend heliozentrischen Projektilen durch eine ausgeprägte *Apex-Antapex-Asymmetrie* gekennzeichnet⁴⁷ (Shoemaker und Wolfe, 1982; Horedt und Neukum, 1984a).

Eine Apex-Antapex-Variation auf den Oberflächen der Galileischen Satelliten konnte auf Voyager-Bilddaten nicht zufrieden stellend nachgewiesen werden (vergl. z. B. Schmidt, 1988). Die vollständige Bildabdeckung durch die Galileo-SSI-Kamera leistet für weitergehende Untersuchungen aber gute Dienste. Callisto eignet sich dazu auch am besten, da er die "einfachste" Geologie aller vier Satelliten aufweist. Auf Ganymed dürfte eine stärkere Überlagerung mit in Wirklichkeit geologisch bedingten Altersunterschieden zum Tragen kommen.

Horedt und Neukum (1984b) vermuteten folgendes Einschlagsszenario im Jupitersystem als Grundlage des **Chronologiemodells I**: Heliozentrische Objekte, vorwiegend Asteroiden, wurden eingefangen. Gezeiteneffekte könnten dabei eine Rolle gespielt haben, ebenso der Reibungs-

⁴⁷Bei einem synchron mit seiner Umlaufdauer um den Zentralplaneten rotierenden Satelliten ist der *Apex-Punkt* der genau in Richtung der Bahnbewegung liegende Punkt auf der Oberfläche mit der geographischen Breite und Länge 0° N, 90° W. Der *Antapexpunkt* liegt demnach genau entgegen der Bahnbewegungsrichtung bei einer Breite und Länge von 0° N, 270° W.

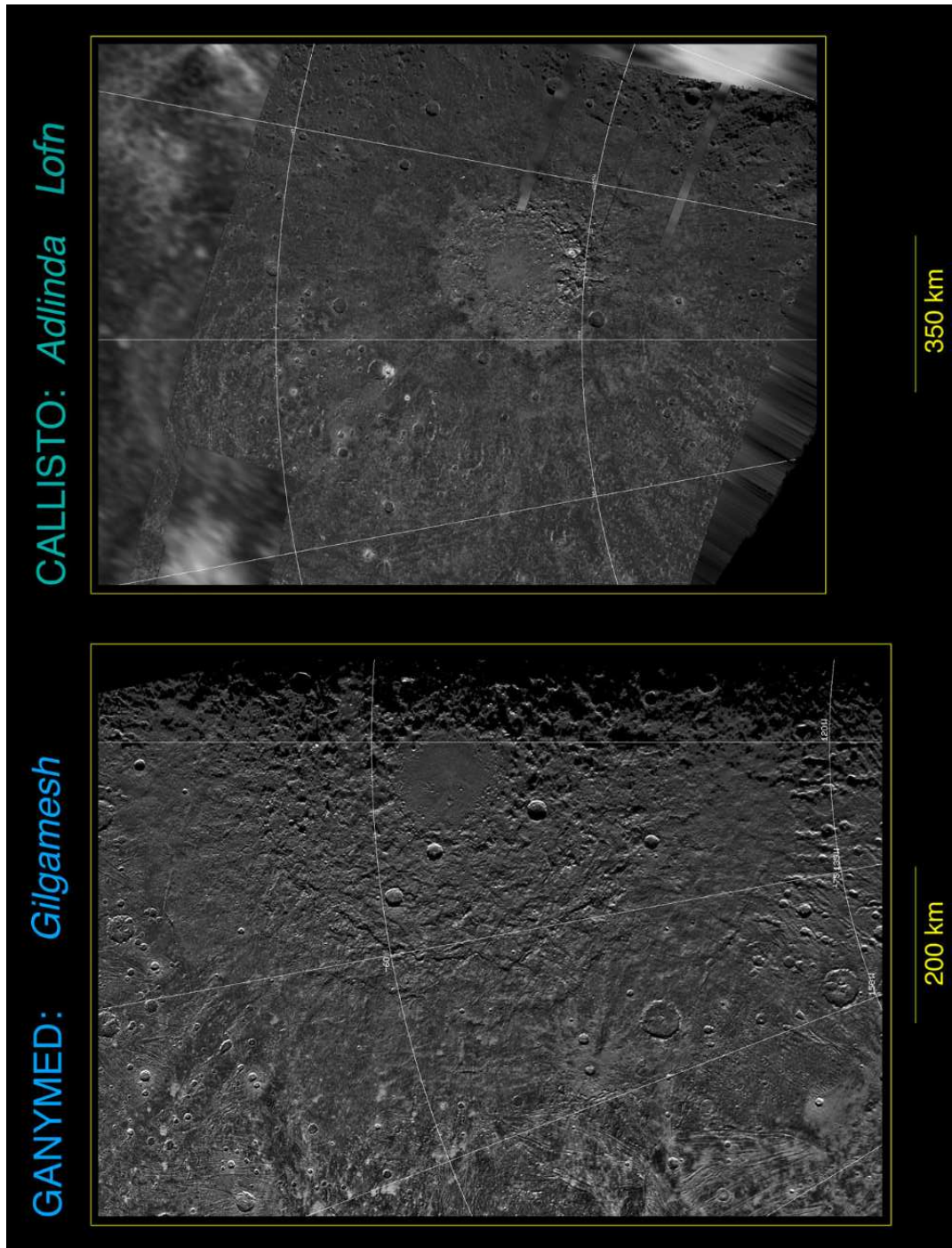


Abbildung 7.6.: Die Becken Gilgamesh und Lofn auf Ganymed und Callisto. Beide sind die stratigraphisch jüngsten Becken auf den zwei Satelliten und repräsentieren jeweils den *marker horizon* (Wetherill, 1975; Neukum, 1983, 1985, 1997; Neukum *et al.*, 1998, 2007; Schenk und Moore, 1999).

Koeff.	Io	Europa	Ganymed	Callisto	Mond
P_1	$4.346 \cdot 10^{-14}$	$2.173 \cdot 10^{-14}$	$1.055 \cdot 10^{-14}$	$5.379 \cdot 10^{-15}$	$5.44 \cdot 10^{-14}$
P_2	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93
P_3	$6.694 \cdot 10^{-4}$	$3.347 \cdot 10^{-4}$	$1.625 \cdot 10^{-4}$	$8.286 \cdot 10^{-5}$	$8.38 \cdot 10^{-4}$
Faktor F	4.0	2.06	1.0	0.51	-

Tabelle 7.3.: Koeffizienten des mond-ähnlichen Chronologiemodells für die Galileischen Satelliten. Der Vollständigkeit halber sind auch die Werte für Io (zum Abschätzen von Modellaltern) aufgeführt. Die Koeffizienten des Mond-Chronologiepolynoms sind zum Vergleich aufgelistet. Alle Koeffizienten gelten für einen Kraterdurchmesser von 1 km (Gleichung 7.31). Der in der letzten Zeile angegebene Wert F entspricht dem Verhältnis zwischen den kumulativen Häufigkeiten gleich alter Einheiten auf Ganymed und dem jeweiligen Satelliten beim Durchmesser 1 km (Ganymed = 1.0).

widerstand durch eine ausgedehnte Atmosphäre, vor allem in der Frühzeit (*Horedt und Neukum, 1984b*, und Zitate darin). Der zeitliche Verlauf der Einschläge vorwiegend asteroidaler planetozentrischer Objekte könnte damit ähnlich wie auf den terrestrischen Planeten verlaufen sein mit einer Periode heftigen Bombardements in der Frühzeit bis ca. 3.8 Ga, in der sich $\approx 90 - 95\%$ aller Krater und die großen Multiringbecken gebildet haben, gefolgt von einer konstant verlaufenden Einschlagsrate seit etwa 3.3 - 3 Ga bis heute, in der nur noch 5 % der Krater entstanden sind (*Neukum et al., 2001a*). Seit dem Ende des heftigen Bombardements bis rezent könnten die Galileischen Satelliten wahrscheinlich vorwiegend durch heliozentrische Projektilen (Kometen?) bombardiert worden sein, dazu kommt ein nicht bekannter Anteil eingefangener Objekte (*Horedt und Neukum, 1984b; Neukum et al., 2007*).

Die Ableitung eines mond-ähnlichen Impaktmodells für das Jupitersystem nach Gleichung 7.31 benötigt zwei Zahlenwerte: (1) Die Halbwertszeit des Abfalls der Kraterrate und (2) einen zeitlichen Fixpunkt, um das Alter einer bestimmten geologischen Einheit mit einer gemessenen Kraterhäufigkeit zu eichen (*Neukum, 1983, 1985, 1997; Neukum et al., 1998*).

Das Konzept des *marker horizon* auf den Planeten im inneren Sonnensystem (vergl. *Wetherill (1981)*) verlangt, dass die stratigraphisch jüngsten Becken mehr oder weniger alle im selben Zeitraum gebildet wurden, also vor etwa 3.7 bis 3.8 Ga (*Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994; Neukum et al., 2001a,b; Werner und Neukum, 2003*). Ein ähnlicher Zeitrahmen ist daher für die jüngsten Becken auf den Galileischen Satelliten vorgegeben. Auf Ganymed entspricht das **Gilgamesh-Becken** dem *marker horizon*, auf Callisto das Becken **Lofn**. Beide Becken zeigt Bild 7.6.

Der Fixpunkt für die Ganymed-Impaktchronologie ist durch die auf den *kontinuierlichen Ejekta von Gilgamesh* gemessene kumulative Kraterhäufigkeit von $N(\geq 1) = 3.47 \pm 0.97 \cdot 10^{-3}$ gegeben. Das zugeordnete Modellalter wird dem lunaren Orientale-Becken ähnlich auf **3.8 Ga** gesetzt (*Neukum, 1983, 1985, 1997; Neukum et al., 1998, 2007*). Daraus lassen sich durch Vergleich der Häufigkeiten von Orientale und Gilgamesh die für Ganymed spezifischen Koeffizienten P'_1 , P'_2 und P'_3 bei festem Modellalter von 3.8 Ga folgendermaßen bestimmen:

1. Wegen der Annahme einer gleichen zeitlichen Änderung der Einschlagsrate gilt wie beim Erdmond $P'_2 = P_2 = 6.93$ (Neukum, 1997; Neukum et al., 1998, 2007).
2. Die bei einem Durchmesser ≥ 1 km gemessenen kumulativen Kraterhäufigkeiten von Gilgamesh und Orientale N_{gi} und N_{or} unterscheiden sich durch einen konstanten Faktor A :

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{N_{gi}}{N_{or}} \\
 &= \frac{N_{gi}}{P_1 \cdot (e^{P_2 \cdot t_{or}} - 1) + P_3 \cdot t_{or}}
 \end{aligned}
 \tag{7.33}$$

mit t_{or} gleich der Entstehungszeit von Orientale (3.8 Ga) und den Koeffizienten P_1 , P_2 und P_3 der lunaren Einschlagschronologiefunktion (Gleichung 7.31 und Tabelle 7.3).

Daraus lassen sich die neuen Koeffizienten der auf Ganymed übertragenen Mondchronologiekurve ableiten mit:

$$\begin{aligned}
 P'_1 &= A \cdot P_1; & P'_3 &= A \cdot P_3 & \text{und} \\
 P'_2 &= P_2 = 6.93.
 \end{aligned}$$

Bei der Umrechnung auf die übrigen Galileischen Satelliten sind (1) die durchschnittliche Einschlagsgeschwindigkeit der Projektilen, (2) die Gravitation an der Oberfläche und (3) der Fokussierungsfaktor durch Jupiter zu berücksichtigen (Neukum, 1997; Neukum et al., 1998, 2007). Setzt man den Projektilfluss bei Ganymed auf 1.0, und benutzt man die von Horedt und Neukum (1984b) angegebenen mittleren Einschlagsgeschwindigkeiten in Zusammenhang mit dem Kraterskalierungsgesetz von Schmidt und Housen (1987), so beträgt der durch Jupiter fokussierte Projektilfluss bei Europa das 1.49-fache von Ganymed, bei Callisto das 0.63-fache (Neukum et al., 2007)⁴⁸. Daraus lassen sich für gleich alte geologische Einheiten auf den Galileischen Satelliten die einzelnen Faktoren für das Verhältnis der kumulativen Häufigkeiten bei einem Durchmesser von 1 km bestimmen (Neukum, 1997; Neukum et al., 1998, 2007).

Die Kraterhäufigkeiten gleich alter Einheiten unterscheiden sich in etwa von jedem Mond zum nächstinneren um etwa einen Faktor zwei. Die genauen Faktoren und die Koeffizienten der Chronologiepolynome für die Galileischen Satelliten sind in obiger Tabelle 7.3 aufgeführt. Bild 7.7 zeigt die mond-ähnliche Impaktchronologie Callistos im Vergleich zu der des Erdmondes (Neukum, 1983, 1997; Neukum und Ivanov, 1994; Neukum et al., 1998, 2007).

⁴⁸Diese Werte resultieren unabhängig davon, ob man die Einschlagsgeschwindigkeiten heliozentrischer oder planeltozentrischer Projektilen zugrunde legt.

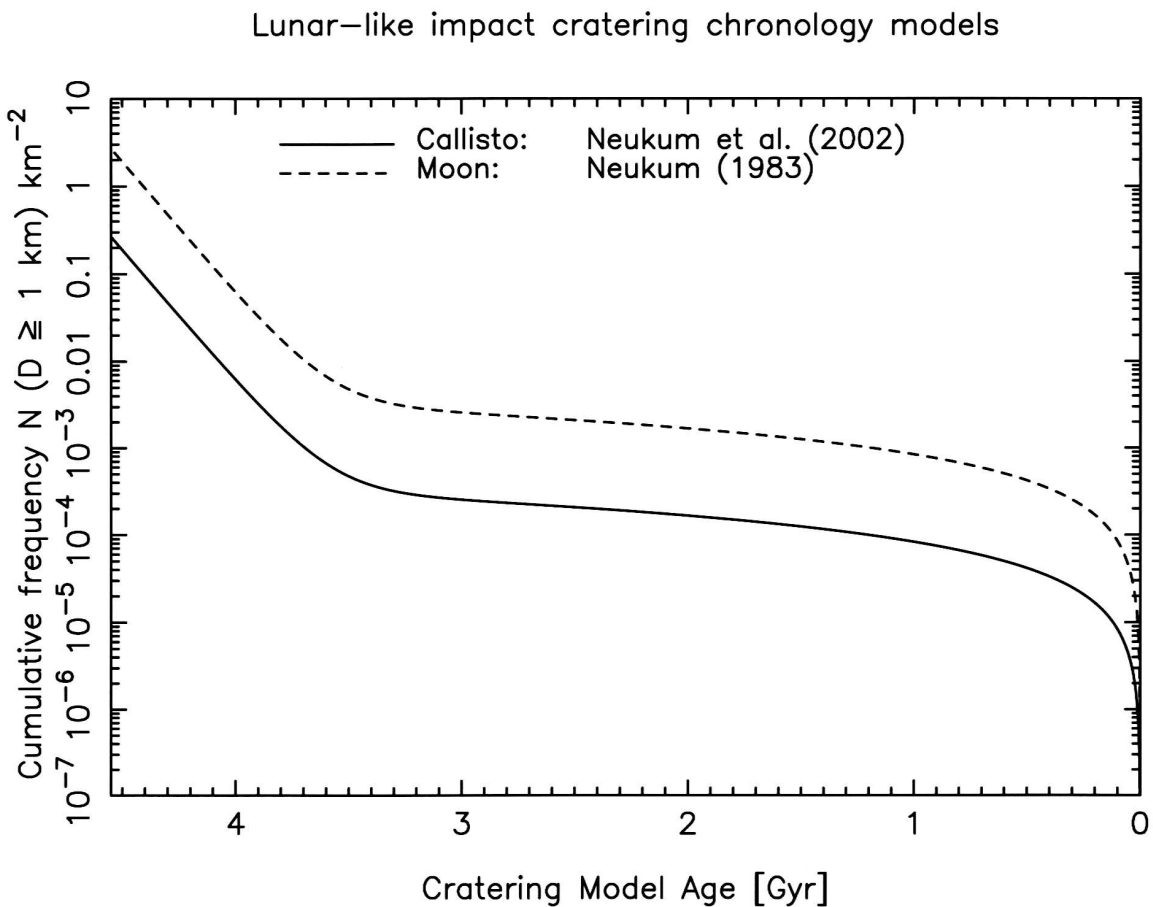


Abbildung 7.7.: Mond-ähnliches Chronologiemodell für Callisto. Zum Vergleich ist die Chronologie des Erdmondes (Neukum, 1983; Neukum und Ivanov, 1994) mit enthalten. Callisto-Chronologie nach Neukum (1997) und Neukum et al. (1998). Die beiden Chronologien sind hier auf die kumulativen Häufigkeiten größer/gleich 1 km Kraterdurchmesser bezogen.

7.4.5.4. Model II: Kometenchronologiemodell

Dieses Modell mit zwei Varianten wurde auf der Grundlage einer Projektilfamilie abgeleitet, deren Größen-Häufigkeitsverteilung sich von der im inneren Sonnensystem unterscheidet. Strom et al. (1981); Passey und Shoemaker (1982) und Woronow et al. (1982) sehen markante Unterschiede in den Verteilungen zwischen z. B. dem Erdmond und Ganymed oder Callisto. Auffälligstes Merkmal ist nach ihrer Ansicht eine "Verarmung" (*depletion* bzw. ein so genannter "*dearth*") an großen Kratern über 50 km Durchmesser und demzufolge an großen Projektilen. Eine alternative Interpretation dieses Phänomens boten Shoemaker et al. (1982) durch geologische Prozesse wie viskose Relaxation an, durch die Krater nahezu völlig verschwinden oder nur noch in den Palimpsesten nachzuweisen sind.

Auswertungen der Galileo-SSI-Daten und der älteren Voyager-Daten, unterstützt durch die Anwendung räumlicher Filter zur Hervorhebung von Kanten, zeigten jedoch, dass eine im Bereich der großen Krater stark abfallende Häufigkeitsverteilung nicht der Realität entspricht. Diese Formen sind tatsächlich vorhanden, meist aber stark abgetragen oder von jüngeren Einheiten überdeckt. Besonders in einigen Gebieten auf Callisto, die durch die SSI-Kamera in besserer Auflösung abgedeckt wurden, ließen sich alte Becken nachweisen (*Klemaszewski et al.*, 1998a). *Schenk* (1998) und *Schenk et al.* (2004) kamen für die großen Becken (Durchmesser über 100 km) zu ähnlichen Ergebnissen und zogen daraus den Schluss, dass die lunare Verteilung und die Callistos zumindest in diesem Durchmesserbereich grob übereinstimmen. Nach ihrer Ansicht ist aber immer noch eine Verarmung von Kratern über 60 km Durchmesser vorhanden.

Von einer Reihe Autoren wird daher angenommen, dass **vorwiegend kometare Objekte** als Projektile im Jupitersystem in Frage kommen, da sie sich über einen größeren Zeitraum zwischen den Bahnen der Planeten des äußeren wie inneren Sonnensystems aufhalten (*Shoemaker und Wolfe*, 1982; *Chapman und McKinnon*, 1986). Erstere Autoren entwarfen ein Einschlagsszenario für das Jupitersystem auf der Basis von Kometenfamilien, dessen zeitlicher Verlauf dem weiter oben beschriebenen Asteroiden-Chronologiemodell ähnelt. Nach ihrer Ansicht sind für Einschläge auf Jupiter und seinen Satelliten (1) **kurz-periodische Kometen**, auch als **Kometen der Jupiter-Familie** (*Jupiter-family comets = JFCs*) bezeichnet, (2) **lang-periodische Kometen** aus der Oort'schen Wolke und (3) die Planetenbahnen kreuzende **Asteroiden** verantwortlich. Allerdings verstehen sie unter letzteren nicht Objekte aus dem Asteroidengürtel, sondern erloschene, ehemals kurz-periodische Kometen (JFC)⁴⁹.

Shoemaker und Wolfe (1982) gingen für die kurz-periodischen Kometen (aktive wie erloschene) von einer Größenverteilung mit einem konstanten Verteilungsindex von $\alpha = -2.2$ aus und leiteten aus Beobachtungen rezenter Objekte der angegebenen Kometenfamilien ihre Einschlagswahrscheinlichkeiten ab. Sie fanden, dass die Impakt- und Kraterbildungsraten nicht ausreichten, um die große Zahl von Kratern auf Ganymed und Callisto zu erklären. Daher stützten sie ihr Chronologiemodell auf eine deutlich höhere Impakt- und Kraterrate in der Frühzeit, ähnlich wie im inneren Sonnensystem, aber mit dem Unterschied, dass die dafür verantwortlichen Projektile ausschließlich kometaren Ursprungs waren. Der Graph der Abhängigkeit der Kraterhäufigkeit von der Zeit ist qualitativ identisch mit der Modellchronologie I (vergl. Bild 7.7). *Chapman und McKinnon* (1986) merkten kritisch an, dass ein solches heftiges Bombardement durch Kometen, zeitlich in enger Verbindung zu dem im inneren Sonnensystem, zwar plausibel erscheint, letztendlich aber nicht exakt beweisbar ist.

Shoemaker selbst rückte 1996 vom Konzept eines solchen mond-ähnlichen Bombardements im Jupitersystem ab und leitete ein Chronologiemodell ab mit einer fast durchwegs konstanten Einschlags- und Kraterrate von Kometen, abgesehen möglicherweise von der Zeit vor 4.2 - 4.3 Ga. Eine Reihe von Autoren griff dieses Konzept auf und erarbeitete ein auf vorwiegend kometaren Projektilen beruhendes Chronologiemodell für das Jupitersystem (*Chapman et al.*, 1997, 1998;

⁴⁹Der Anteil dieser Objektfamilien an der Kraterrate im Jupitersystem beträgt bei den lang-periodischen Kometen etwa 1/8 bis maximal 1/3 der gesamten Kraterproduktion, bei den erloschenen, kurz-periodischen Kometen etwa die Hälfte, die restlichen Krater werden durch aktive kurz-periodische Kometen erzeugt (*Shoemaker und Wolfe*, 1982). Problematisch ist, dass die Extrapolation auf 50 % der gesamten Kraterproduktion durch erloschene Kometen auf der Beobachtung eines einzigen Objekts (944 *Hidalgo*) beruht.

Zahnle et al., 1998). Im weiteren Text wird darauf als **Model II** Bezug genommen.

Zahnle et al. (1998) diskutierten dieses Modell mit den im Folgenden verwendeten Impakt- und Kraterdaten. Diese beruhen auf Beobachtungen von Zahl und Bahnelementen folgender Objekte und Modellierungen ihrer Bahnparameter mit der Zeit (Zahnle et al., 1998): (1) kurzperiodische *Kometen der Jupiterfamilie, JFC*, auch als *ekliptische Kometen (ecliptic comets)* bezeichnet (Duncan und Levison, 1997), und (2) *fast-isotropische Kometen* bzw. *nearly isotropic comets*. Letztere umfassen (a) die *lang-periodischen Kometen, LPCs*, die aus der Oort'schen Wolke stammen und auf parabolischen oder hyperbolischen Bahnen um die Sonne kreisen, und (b) die Kometen des *Halley-Typs, HTCs* mit Umlaufzeiten von 200 Jahren, also am unteren Ende der Umlaufzeiten der LPCs (ebd.).

Die von Zahnle et al. (1998) abgeleiteten Impakt- und Kraterdaten für diese Objekte weisen eine Reihe von Unsicherheiten auf. Eine Quelle dabei ist die Umrechnung von Projektil- in Kraterdurchmesser über Kraterskalierungsgesetze. Laut Zahnle et al. (1998) liegt die Unsicherheit des Kraterdurchmessers für ein gegebenes Projektil dabei in der Größenordnung von 30 %, dies bedeutet etwa einen Faktor zwei Unsicherheit im Impaktorfluss. Ein bedeutender Einfluss auf die Abschätzung der Impakt- und Kraterdaten kommt auch durch die Unsicherheit im Durchmesser des Kometenkerns zustande, da der Kern durch Staub und Gas der Koma nie genau beobachtet werden kann. Unter einer Reihe von Zahnle et al. (1998) diskutierten Annahmen und Abschätzungen liegt die Unsicherheit der Kraterdaten etwa bei einem Faktor 4 - 5. Letzterer höherer Wert wird hier bei allen Altersangaben nach *Model II* verwendet.

Zahnle et al. (1998) erhielten insgesamt (für ca. 90 % JFCs, ca. 10 % LPCs und HTCs) folgende Kraterproduktionsraten $dC(D \geq 10)/dt$ für Krater über 10 km Durchmesser (in Einheiten pro Quadratkilometer und pro Jahr):

Io	$4.8 \cdot 10^{-14}$
Europa	$1.1 \cdot 10^{-13}$
Ganymed	$6.0 \cdot 10^{-14}$
Callisto	$2.7 \cdot 10^{-14}$

Daraus lassen sich Modellalter (in Ga) nach folgender Beziehung aus der gemessenen kumulativen Häufigkeit $N_{cum}(D \geq 10 \text{ km})$ bestimmen:

$$t' = \left[\frac{N_{cum}(D \geq 10)}{dC/dt} \right] / 10^9 \quad (7.34)$$

Die Variable t' entspricht einem Modellalter bei konstanter Kraterdaten über die gesamte Zeit des Sonnensystems. Zahnle et al. (1998) nahmen an, dass es zeitliche Änderungen in der Einschlags- und Kraterdaten gegeben hat. Es ist aber nicht genau bekannt, mit welcher Rate der Kuiper-Gürtel an Projektilen verarmte. Im Fall, dass keine Kollisionen (*collisionless dissipation*) stattgefunden haben, könnte dies proportional zu t^{-1} erfolgt sein, mit Kollisionen zwischen den Objekten im

Kuiper-Gürtel dagegen mit einer deutlich höheren Rate (*Zahnle et al.*, 1998). Unter der Annahme einer Proportionalität zu t^{-1} erhält man die tatsächlichen Modellalter (t) nach folgender Gleichung:

$$t = t_o \cdot (1 - \exp(-t'/t_o)) \quad (7.35)$$

Die Variable t_o entspricht dabei dem Alter des Sonnensystems von 4.56 Ga. Die durch Kombination der Gleichungen 7.34 und 7.35 abgeleiteten Modellalter wurden hier aber unter zwei von den Autoren abweichenden Annahmen berechnet: (1) Die kumulativen Häufigkeiten beim Durchmesser 10 km, aus denen die Modellalter berechnet werden, sind durch Anfitzen der Produktionsverteilung nach *Model I* erhalten worden. Die kometarye Verteilung unterliegt aber einem Potenzgesetz mit konstantem Verteilungsindex ($\alpha = -2.2$). Neuere Messungen der Größenverteilungen von Kometen zeigen allerdings eine stärkere Durchmesserabhängigkeit des Verteilungsindex (*Zahnle et al.*, 2003). (2) Bei der Anwendung von *Model II* wird ferner die von den Autoren diskutierte Apex-Antapex-Asymmetrie nicht berücksichtigt, nach der die Häufigkeiten je nach geographischer Lage erst korrigiert werden müssten. Wie im späteren Abschnitt 8.6.5 diskutiert wird, sind solche Variationen nicht nachweisbar, die Korrektur wurde daher nicht durchgeführt.

Den Graphen der *Model-II*-Chronologie nach *Zahnle et al.* (1998) im Vergleich zur *Model-I*-Chronologie (*Neukum et al.*, 1998) zeigt Bild 7.8.

Nach Überlegungen von *Gladman et al.* (1997) treffen nur 1-2 % der Asteroiden aus dem Hauptgürtel auf Jupiter. Zu einem ähnlichen prozentualen Anteil gegenüber den JFCs kamen *Duncan und Levison* (1997). *Zahnle et al.* (1998) schlossen daher, dass diese Objekte rezent keine Rolle als Impaktoren im Jupitersystem spielen und vermuteten, dass 90 % der Krater auf den Galileischen Satelliten durch die Einschläge von JFCs entstehen, und LPCs und HTC's einen Anteil von 1 - 10 % der Einschläge stellen.

Zahnle et al. (1998) räumen ein, dass der Beitrag von Asteroiden, besonders aus dem äußeren Hauptgürtel, in der Frühzeit des Sonnensystems durchaus höher gewesen sein könnte. Als weitere mögliche Impaktoren sehen sie Familien von Objekten in der Frühzeit, die jetzt erloschen und deshalb nicht mehr nachweisbar sind. Die einzige Familie von Asteroiden, denen die Autoren rezent einen signifikanten Beitrag zur Kraterproduktion auf den Jupitermonden zuschreiben, ist die Gruppe der **Trojaner**. Sie besteht aus vermutlich 160000 Objekten mit Durchmessern > 2 km bis 100 km, die sich in und um die beiden Lagrangsche'schen Punkte L4 und L5 von Jupiter aufhalten, also Jupiter auf seiner Bahn 60° vorgelagert sind (L4), oder ihm um den selben Winkelbetrag nachfolgen (L5) (*Jewitt et al.*, 2000)⁵⁰. Ihr Ursprung ist nicht genau bekannt, es könnten Asteroiden aus dem Hauptgürtel sein, aber auch JFCs. Möglicherweise sind die kleinen Krater auf den Galileischen Monden durch Einschläge von Projektilen der Trojaner-Familie entstanden, falls sie nicht anderweitig durch kleine Kometen entstanden sind, deren Existenz aber keineswegs gesichert ist (*Zahnle et al.*, 1998).

Modellrechnungen der dynamischen Entwicklung von Asteroiden der *Hilda-Gruppe* führten *Brunini et al.* (2003) zu dem Schluss, dass ihr Beitrag zu den Impaktraten im Jupitersystem den

⁵⁰Sie vollführen Librationsbewegungen um die Punkte L4 und L5 über einen Zeitraum von etwa 150 Jahren (*Jewitt et al.*, 2000).

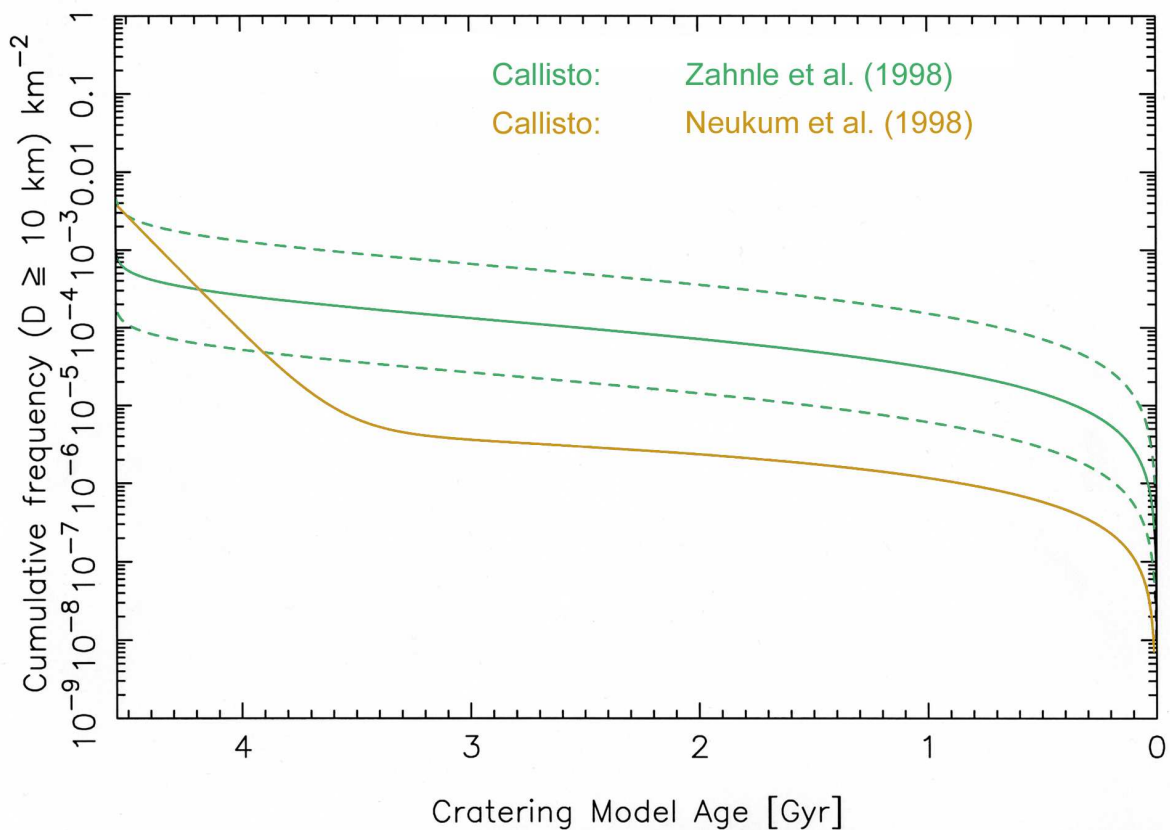


Abbildung 7.8.: Impaktchronologiemodell nach *Zahnle et al.* (1998), basierend auf dem Einschlag vorwiegend von Kometen der Jupiter-Familie (JFCs). Obere und untere gestrichelte Kurve entspricht einem Faktor fünf Unsicherheit in den Kraterdaten. Zum Vergleich ist die mond-ähnliche Chronologie nach *Neukum et al.* (1998) dargestellt.

der JFCs und der Trojaner um einen Faktor 4 - 5 übertrifft. Knapp 1000 dieser Objekte sind derzeit bekannt. Die Autoren vermuten, dass sie in signifikanter Anzahl für die kleinen Krater auf den Galileischen Satelliten verantwortlich sein könnten.

Kuzmitcheva und Ivanov (2002) diskutierten die Existenz kleiner Projektile sowohl aus der Trojaner-Gruppe als auch aus dem Kuiper-Gürtel. Für kleine Kometen setzen sie allerdings voraus, dass sie durch Kollisionsentwicklung entstanden sind und eine steile Verteilung ähnlich den Asteroiden aufweisen, um Einklang mit den beobachteten Kraterverteilungen auf den Galileischen Satelliten zu gewährleisten.

Eine weitere Voraussetzung für kleine aus dem Kuiper-Gürtel stammende Kometen in Jupiternähe ist, dass die Sublimation dieser Körper langsam genug verläuft, um sie als mögliche Projektile zu erhalten. Die Sublimationsrate von Kometen ist nahe ihrem Perihel am höchsten. Ein 10 Meter großer Komet könnte in einer Distanz von 2.5 A. E. nur maximal 5 bis 6 Jahre überleben, seine Lebensdauer wäre damit um 4 bis 5 Größenordnungen niedriger als die durchschnittliche Lebensdauer von JFCs (ebd.). Allerdings können kleine Kometen, die sich in

der Region zwischen Jupiter und Saturn aufhalten, mehr als 100 Bahnperioden ohne völlige Verdampfung überstehen. Zumindest einige der kleinen Krater auf den Galileischen Satelliten könnten deshalb auch von kleinen Kometen verursacht worden sein (*Kuzmitcheva und Ivanov, 2002*).

Die Kraterproduktionsraten in *Model II* sind mehrfach neu berechnet worden, unter besonderer Berücksichtigung von möglichen Asymmetrien zwischen Apex und Antapex (*Zahnle, 2001; Zahnle et al., 2001*). Das Fehlen von Asymmetrien auf Körpern wie Callisto oder Ganymed (dunkle Gebiete) führen die Autoren auf Sättigungseffekte zurück. Bei Ganymed weisen zumindest die hellen Gebiete eine Asymmetrie auf, jedoch niedriger als von der modellierten Einschlagsrate durch JFCs, LPCs oder HTC's vorhergesagt. Die Autoren vermuten daher, dass Ganymed zeitweise nicht synchron rotierte (ebd.). *Zahnle et al. (2001)* kamen darüberhinaus zu dem überraschenden Schluss, dass Sättigung auch auf Flächen mit geringerer Kraterdichte eine signifikante Rolle spielen würde. Nach ihrer Ansicht sind auch in den hellen Gebieten nicht notwendigerweise Produktionsverteilungen zu finden, sondern krater-gesättigte Verteilungen, ein Folgerung, die in völligem Widerspruch zu den Beobachtungen von *Neukum et al. (1998)* und *Neukum et al. (2007)* steht, abgesehen bei der Verteilung sehr kleiner Krater $\ll 100$ Meter Durchmesser.

In neueren Modellierungen gingen *Zahnle (2001)* und *Zahnle et al. (2003)* von niedrigeren Impakt- und Krateraten im Jupitersystem mit Unsicherheiten von einem Faktor 3 aus. Dadurch erhöht sich das Durchschnittsalter beispielsweise der Oberfläche Europa's von 5 - 10 Ma (*Zahnle et al., 1998*) auf ca. 50 - 70 Ma. Für das Durchschnittsalter der hellen Gebiete auf Ganymed gaben *Zahnle et al. (2003)* einen Wert von ≈ 2 Ga an. Das Alter des Gilgamesh-Beckens liegt, unter Berücksichtigung der Apex-Antapex-Asymmetrie der Kraterate, etwa bei 800 Ma (ebd.). Ebenfalls wegen der Apex-Antapex-Asymmetrie sollen die beiden Becken Valhalla und Lofn auf Callisto trotz unterschiedlicher hoher Kraterdichten nominell Alter von etwa 2 Ga aufweisen (ebd.). *Zahnle et al. (2003)* räumten ein, dass die Zahlen ihrer Modellalter in hohem Maße unsicher seien.

Die Krateraten $dC(D \geq 10)/dt$ nach *Zahnle et al. (2003)* - $1.8 \cdot 10^{-14}$ für Ganymed, $9.8 \cdot 10^{-15}$ für Callisto - liefern für Krater über 10 km Durchmesser bei Anwendung der Gleichungen 7.34 und 7.35 für die dunklen Krater Ebenen auf Callisto und die dunklen Gebiete Ganymed's sehr hohe Modellalter, etwa in der Größenordnung von 4.4 - 4.5 Ga, die möglicherweise viel zu hoch sind, da beide Monde in ihren dunklen Gebieten deutliche Anzeichen geologischer Entwicklung zeigen, Ganymed ausgeprägter als Callisto. In allen Altersangaben dieser Arbeit werden die Werte des *Model I* denen des *Modell II* gegenübergestellt. Die beiden Varianten des letzteren Modells nach *Zahnle et al. (1998)* und *Zahnle et al. (2003)* werden zur leichteren Unterscheidung mit **Model IIa** bzw. **Model IIb** vermerkt.

7.4.6. Durchführung von Kraterhäufigkeitsmessungen

7.4.6.1. Messinstrument

Messflächen und Kraterdurchmesser wurden auf einem Zeiss-Stereokomparator des Typs PS2K gemessen. Alle Messungen erfolgten ausschließlich auf kartenprojizierten Bildmosaikern, in Aus-

nahmefällen (bei bestimmten Zielgebieten der Galileo-SSI-Kamera) auch auf Einzelbildern. Das Messgerät ermöglicht Messungen sowohl an stereoskopischem wie monoskopischem Bildmaterial. Da die Anzahl möglicher Stereobildpaare aber begrenzt ist und die wenigen Stereodaten außerdem große Auflösungsunterschiede zwischen den beiden Stereopaaren aufweisen, wurden nur monoskopische Daten ausgewertet.

Der Stereokomparator ist an einen Hewlett-Packard Desktop-Computer (Typ HP 9000/300) angeschlossen. Eine Reihe von Anwenderprogrammen ermöglichen die Durchführung aller Arbeitsschritte von der Kratermessung (Programm **KRASTMw**) bis zur graphischen Darstellung der Verteilungen unter Verwendung eines Graphik-Plotters (Typ HP 9872C), und zur Bestimmung relativer und absoluter Modellalter (Programm **KRANCHwr**). Das Programm **TRAEIC** dient dazu, neue Polynomkoeffizienten einer für einen bestimmten Planeten oder Satelliten gültigen Produktionsverteilung entsprechend Gleichung 7.30 abzuleiten.

Bei der Bestimmung der Kraterhäufigkeiten ist auf folgende Punkte zu achten (*Neukum und Hiller, 1981; Neukum, 1983*):

1. Die Messbereiche müssen homogen sein, d.h. es dürfen nur Krater einer einzigen geologischen Einheit gemessen werden.
2. Die Messfläche muß genau kartiert und exakt vermessen werden. Hierbei wird im Stereokomparator die (geologische) Grenze der Messfläche durch einen Polygonzug mit hinreichend kleiner Schrittweite umfahren. Nicht zusammenhängende Messgebiete einer Einheit lassen sich hier bereits zusammenaddieren, weiterhin können eine oder mehrere Flächen innerhalb der zu messenden Fläche(n) subtrahiert werden (z. B. Cluster von Sekundärkratern).
3. Die Änderung des Maßstabs mit der geographischen Breite ist mithilfe der Gleichungen 7.1 bis 7.3 (Abschnitt 7.2.3.5) zu berücksichtigen.
4. Die Kraterdurchmesser müssen exakt bestimmt werden. Hierzu werden nacheinander linker und rechter Rand des Kraters mit der Messmarke angefahren und der Durchmesser über die jeweilige Eichung von μm in km umgerechnet. Im ausschließlich verwendeten monoskopischen Bildmaterial ist er nur durch den Schattenwurf genau zu lokalisieren.
5. Es dürfen nur Krater mitgemessen werden, bei denen es sich um primäre Impaktkrater handelt. Vulkan- und Sekundärkrater, anderweitige kreisförmige Strukturen oder Artefakte dürfen nicht in die Messung einbezogen werden.

Sekundärkrater unterscheiden sich in der Morphologie und zum Großteil auch im Durchmesser von Primärkratern. Den Kriterien von *Oberbeck und Morrison (1973)* zufolge sind elliptisch verformte Krater, Krater mit spezifischem "Heringsknochenmuster" (*herring-bone pattern*) und Cluster von Kratern als sekundär einzustufen. Der Durchmesser von Sekundärkratern bewegt sich im Kilometerbereich und darunter, größere Exemplare (bis 20 km Durchmesser) sind nachgewiesen.

Photogeologische Einheiten können sich über mehrere Zehner-Breitengrade umfassende Bereiche der Oberfläche erstrecken. Um den Fehler bezüglich des sich mit der geographischen Breite ändernden Maßstabs möglichst klein zu halten, wurde eine photogeologische Einheit in kleinere Messflächen aufgeteilt, die meist 5 Breitengrade (maximal 10 Grad) umfassen.

Jedes zur Messung benutzte Bildmosaik enthält geographische Netzlinien und einen Maßstabsbalken bekannter Länge (in Kilometer bzw. Pixelanzahl), der jeweils auf das verzerrungsfreie Projektionszentrum bezogen ist. Bestimmt man im Stereokomparator die Länge dieses Balkens (in μm), ergibt sich daraus die für das Messprogramm KRASTMw2 erforderliche Eichung in Kilometer pro Zentimeter. Je nach der Projektionsart, in der das Bildmosaik projiziert ist, lassen sich die Abhängigkeiten des Maßstabs bzw. der Eichung von der geographischen Breite nach den Gleichungen 7.1 bis 7.2 berechnen. Als geographische Breite wird jeweils das arithmetische Mittel aus oberer und unterer Breite der Messfläche verwendet.

7.4.6.2. Systematische Fehler bei der Krater-Häufigkeitmessung

7.4.6.2.1. Genauigkeit des Messgeräts

Die Messmarke des Zeiss-Stereokomparators besitzt eine Genauigkeit von $5 \mu\text{m}$. Berücksichtigt man den Kartenprojektionsmaßstab S (in km/pixel) und die Pixelgröße P in μm auf dem zur Messung verwendeten Transparentpositiv, so erhält man bei einem Maßstab von beispielsweise $2 \text{ km}/\text{pxl}$ für die Kraterdurchmesser D nach der Beziehung

$$D(\mu\text{m}) = \frac{D(\text{km})}{S(\text{km}/\text{pxl})} \cdot P(\mu\text{m}/\text{pxl}) \quad (7.36)$$

Durchmesserwerte um $200 \mu\text{m}$ für die kleinsten noch messbaren Krater. Der durch die Genauigkeit des Messgeräts bedingte Fehler liegt damit unter 2.5% .

7.4.6.2.2. Statistische Fehler in der Bestimmung der Kraterhäufigkeit

Die Größe der $1 - \sigma$ -Standardabweichung einer beim Durchmesser D gemessenen Häufigkeit N beruht auf der Annahme, dass die Aufschlagswahrscheinlichkeiten der Projektile auf der Oberfläche poissonverteilt sind. Das Konfidenzintervall (σ) für den i -ten Kraterdurchmesser (n_i : kumulative Krateranzahl; A : Fläche) beträgt somit:

$$\pm \sigma_i = \log \left(\frac{n_i \pm n_i^{1/2}}{A} \right) \quad (7.37)$$

7.4.6.2.3. Fehler in der Bestimmung des Retentionsalters

Die Anpassung der Produktionsverteilungskurve an eine gemessene Kraterverteilung erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate. Der Fehler in der Verteilungsfunktion bzw. des auf einen bestimmten Durchmesser bezogenen Retentionsalters wird wie folgt ermittelt:

1. Anpassung der Produktionsverteilungskurve an die einzelnen Messpunkte innerhalb eines gewählten Durchmesserintervalls D_{min} und D_{max} , in dem die Kurve am genauesten innerhalb der Schwerpunkte und Fehlerbalken der einzelnen Messpunkte zu liegen kommt. D_{min} sollte nicht kleiner sein als der Durchmesser, bei dem das Maximum der differentiellen Verteilung auftritt.
2. Verschiebung der Produktionsverteilung im gleichen Durchmesserintervall um $N = k \cdot \Delta N$ beim Referenzdurchmesser nach oben bzw. unten. Je nach Streuung der Messpunkte ist $2 \leq k \leq 6$, entsprechend dem k -fachen der Standardabweichung für den Referenzdurchmesser des Retentionsalters, d. h. die Standardverteilung wird k -mal nach oben bzw. unten geschoben, bis sie im Mittel auf den oberen bzw. unteren Enden der Fehlerbalken innerhalb des Durchmesserintervalls liegt, in dem die Kurve gefittet wurde⁵¹.

Durch Anpassen des Produktionsverteilungs-Polynoms lassen sich Krater-Retentionsalter auch für Referenzdurchmesser angeben, die nicht in der gemessenen Einheit enthalten sein (z.B. aufgrund der Bildauflösung). Für die beiden häufig benutzten Referenzdurchmesser größer oder gleich 1 und 10 km gilt für ihre entsprechenden kumulativen Häufigkeiten mittels des Callisto-Verteilungspolynoms die Beziehung $N_{kum}(D \geq 1) = N_{kum}(D \geq 10) \cdot 68.865$.

7.4.6.2.4. Statistische Fehler durch Maßstabsmittelung

Bei der Bestimmung von Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen photogeologischer Einheiten, die sich über mehrere Zehner-Breitengrade erstrecken, ist der Einfluss der Maßstabsänderung mit der geographischen Breite auf die Genauigkeit der Messung zu berücksichtigen. Der Einfluss der Maßstabsmittelung wurde in einer simulierten Messung für verschiedene geographische Breitenlagen am Beispiel eines Mercator-projizierten Bildes näher untersucht:

1. Fehler in der Flächenbestimmung:

Teilflächen mit 5° Breite und Länge wurden in 5° breiten Schritten vom Äquator bis 40° N (maximale bei Mercator noch zu akzeptierende Breite) gemessen (Mittelwert aus mehreren Messungen) und mit den für jede Teilfläche berechneten Wert verglichen⁵². Die Resultate ergaben Fehlerwerte von unter 1 %. Die Fehler erhöhen sich nicht gesetzmäßig mit Vergrößerung der unteren und oberen geographischen Breite der Teilflächen, da beim Messen durch unterschiedlich genaues Positionieren der Messmarke zufällige Fehler bei der Flächenmessung auftreten können. Eine Vergrößerung der Teilflächen hat nur geringen Einfluss. Beispielsweise beträgt der Fehler einer zwischen 20° und 40° N gelegenen Teilfläche mit gemitteltem Maßstab lediglich 1.44 % gegenüber dem berechneten Wert.

⁵¹Diese sehr umständliche und zeitaufwändige manuelle Verfahrensweise soll automatisiert werden. Entsprechende Programm-Module hierzu sind in Entwicklung.

⁵²Die Fläche einer derartigen Messzelle wird nach der Formel:

$$A = (\lambda_{links} - \lambda_{rechts}) \cdot R^2 \cdot (\sin \varphi_{oben} - \sin \varphi_{unten})$$

berechnet (R : Radius des Körpers, λ : geographische Länge, φ : Breite).

2. Fehler in der Bestimmung der Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung:

Es wurde willkürlich eine Messung der Callisto-Oberfläche mit einer ausreichenden Anzahl von Kratern (85) ausgewählt. Aus der zugrundeliegenden differentiellen Krateranzahl wurde allen Kraterasterdurchmessern Durchmesser in Kilometer zugeordnet und anschließend über den für den Äquator gültigen Eichfaktor in Kilometer pro Zentimeter umgerechnet, d. h. alle Krater wurden als am verzerrungsfreien Äquator gemessen angenommen. Diese Krater wurden dann für folgende Prozedur verwendet:

- a) Jedem Krater wurde mittels einer Funktion zur Erzeugung von Zufallszahlen eine bestimmte geographische Breite innerhalb einer 5 Breitengrade umfassenden Teilmessfläche zugeordnet. Nach Gleichung 7.1 (Seite 92) wurden die Kraterdurchmesser auf den ihrer zugeordneten geographischen Breite entsprechenden neuen Durchmesser in Zentimeter umgerechnet, so wie sie in einem kartenprojizierten Messbild vorliegen würden. Anschließend wurden für jeden Krater vier Zahlenwerte ermittelt:
 - i. der Kraterdurchmesser in Kilometer mit dem nach Gleichung 7.1 für die (arithmetisch) mittlere Breite innerhalb des Teilgebiets umgerechneten Eichfaktor in km/cm;
 - ii. der diesem Kraterdurchmesser entsprechende Kraterasterdurchmesser in Kilometer, in den der Krater eingeordnet werden würde;
 - iii. der wahre Kraterdurchmesser in Kilometer über den nach Gleichung 7.1 für die entsprechende Breitenlage umgerechneten Eichfaktor (km/cm);
 - iv. der diesem wahren Kraterdurchmesser entsprechende Kraterasterdurchmesser in Kilometer.
- b) Dies wurde für jede 5 Grad breite Messzelle fortschreitend zwischen 0° N und maximal 60° N bei festgehaltener Fläche der Messzelle durchgeführt. Die nachfolgende Auflistung zeigt, dass durch Maßstabmittelung mit zunehmend höherer geographischer Breite mehr und mehr Krater (in %) in ein "falsches" (d. h. benachbartes) Raster eingeordnet werden; bei Erweiterung auf eine maximale Breite von 60° N, wo der Maßstab bei einer Mercatorprojektion doppelt so groß wie am Äquator ist, ergeben sich unzulässig hohe falsche Zuordnungen zu einem Rasterdurchmesser (beinahe ein Drittel der Krater wird falsch eingeordnet):

Breite = 0° – 5°:	3.53 %
Breite = 5° – 10°:	2.35 %
Breite = 10° – 15°:	3.53 %
Breite = 15° – 20°:	3.53 %
Breite = 20° – 25°:	4.71 %
Breite = 25° – 30°:	5.88 %
Breite = 30° – 35°:	5.88 %
Breite = 35° – 40°:	7.06 %
Breite = 40° – 45°:	8.24 %
Breite = 45° – 50°:	12.94 %
Breite = 50° – 55°:	20.0 %
Breite = 55° – 60°:	29.41 %

7.4.6.2.5. Fehler in den absoluten Modellaltern

Die im vorangehenden Abschnitt 7.4.5.2 vorgestellten Impaktchronologiemodelle weisen Fehler auf, die sich den Messfehlern der Kratermessung überlagern. Eine genaue Behandlung der Fehler bei Angabe eines absoluten Modellalters müsste beide Einflüsse rechnerisch verarbeiten. Dies ist derzeit noch nicht durchführbar. Hier wurde daher folgendermaßen verfahren:

1. Für *Model I* wird die Chronologiekurve als "fix" (fehlerfrei) betrachtet. Die Fehler der durch Anfitzen des Verteilungspolynoms erhaltenen Retentionsalter lassen sich damit bei festgehaltener Chronologiefunktion in Fehler des Modellalters überführen. Wie Bild 7.5 (a) verdeutlicht, übertragen sich systematische Fehler bei der Messung kumulativer Häufigkeiten von weniger als etwa 3 - 3.3 Ga alten geologischen Einheiten wegen des flacheren Kurvenverlaufs in größere Fehler des absoluten Alters von bis zu 500 Ma, während sie bei Einheiten mit Altern oberhalb von ca. 3.3 Ga wegen der exponentiellen Änderung der Häufigkeiten mit der Zeit nur bei 20 bis 50 Ma liegen.

In Wirklichkeit liegt die Unsicherheit in der Chronologiefunktion wie in den Modellchronologien im inneren Sonnensystem bei einem Faktor 2 - 3 (vergl. *Hartmann und Neukum (2001)*). In einem noch zu entwickelnden numerischen Verfahren müssten die gesamten Fehler im Modellalter durch Kombination der Unsicherheit der Chronologiefunktion und der Fehler bei Kratermessung und Anwendung des Verteilungspolynoms bestimmt werden.

2. Für *Modell II* werden die gemessenen und durch das Verteilungspolynom gefitteten Retentionsalter als fest betrachtet. Die Fehler im Modellalter werden aus der Unsicherheit der Kraterraten (d. h. über die einen Faktor 5 höheren oder niedrigeren Kraterraten nach *Zahnle et al., 1998*) abgeleitet.

7.4.6.3. Zufällige Fehler

7.4.6.3.1. Einfluss der Bildqualität auf die Messungen

Das Identifizieren von Kraterrändern auf monoskopischem Bildmaterial wird durch die Anwendung räumlicher Filter zur Kantenverstärkung erleichtert. Dennoch unterliegt eine Messung sehr stark der Qualität des Bildmaterials, da sich zusammenhängende Messgebiete häufig über mehrere Einzelbilder eines Mosaiks erstrecken, die unterschiedliche Auflösungen oder Blickwinkel der Kamera aufweisen können. Bei besonders schlechtem Bildmaterial können vorhandene (kreisförmige) Artefakte durch die angewandten Filter verstärkt und unter Umständen fehlerhaft in eine Messung mit einbezogen werden. Bei einer Reihe von Bilddaten der Galileo-SSI-Kamera beeinträchtigen insbesondere Artefakte der ICT-Kompression (Schachbrettmuster), oder die Sättigung des Sensors an hellen Geländemerkmale wie Kraterrändern die Bildqualität.

7.4.6.3.2. Fehlerhafte Messung von Sekundärkratern und Nicht-Impaktkratern

Normalerweise sind Vulkan- oder Sekundärkrater durch ihre Morphologie deutlich von primären Einchlagskratern zu unterscheiden. Die Unterscheidbarkeit wird eingeschränkt durch die Bildqualität, namentlich nahe der Bildauflösungsgrenze. Fehlerhafte Einbeziehung von Sekundärkratern in eine Messung macht sich durch Messpunkte bemerkbar, die zu kleineren Durchmessern hin vermehrt oberhalb der an die Messung angepassten Kurve liegen (*Neukum et al.*, 1975).

7.4.6.3.3. Einfluss des Beobachters

Unterschiedliche Beobachter messen Kraterdurchmesser systematisch entweder zu klein oder zu groß, oder identifizieren Impakt- und Nichtimpaktstrukturen unterschiedlich. Vergleichsmessungen innerhalb unserer Arbeitsgruppe sind mehrfach durchgeführt worden und ergaben Fehler (z. B. in der kumulativen Häufigkeit) von $\leq 5\%$. Größer sind die Abweichungen zwischen den Ergebnissen von Gruppen, die andere Messapparaturen verwendet hatten.

7.4.7. Lineare Interpolation von Kraterhäufigkeiten

In spezifischen Messungen können Fälle eintreten, dass einer oder mehrere Rasterdurchmesser nicht besetzt sind. Für derartige Fälle kann die Häufigkeit des fehlenden Rasterdurchmessers linear interpoliert werden. Diesem Verfahren liegt zugrunde, dass die kumulative Verteilung in einem eingeschränkten Durchmesserbereich durch die Beziehung $N_{kum} \approx D^\alpha$ (bzw. in logarithmischer Schreibweise $\log N_{kum} \approx \alpha \cdot \log D$) approximiert werden kann. Die Interpolation kumulativer Häufigkeiten bei fehlenden Rasterdurchmessern ist erforderlich, wenn beispielsweise gemessene (d. h. nicht durch Anfitten der Produktionsverteilung ermittelte) Häufigkeiten bei einem bestimmten Durchmesser in Abhängigkeit des Winkelabstandes zum Apex untersucht werden sollen (vergl. Abschnitt 8.6.5).

Der in einer Messung fehlende Rasterdurchmesser und dessen zu interpolierende kumulative Häufigkeit seien D_{ip} bzw. N_{ip} . Der Durchmesser liege zwischen den gemessenen Durchmessern D_j und D_k ($D_j < D_k$) mit ihren entsprechenden kumulativen Häufigkeiten N_j und N_k . Die durch den Verteilungsindex α angegebene Steigung zwischen diesen beiden Messwerten wird ermittelt durch die Beziehung:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\log N_k - \log N_j}{\log D_k - \log D_j} \\ &\approx \frac{\log N_{ip} - \log N_j}{\log D_{ip} - \log D_j}. \end{aligned} \quad (7.38)$$

Unter der Annahme einer gleichen Steigung innerhalb der Rasterintervalle (D_j, D_{ip}) und (D_{ip}, D_k) ergibt sich die gesuchte kumulative Häufigkeit N_{ip} aus obiger Gleichung durch Auflösung nach N_{ip}

$$\log N_{ip} = \alpha [\log D_{ip} - \log D_j] + \log N_j \quad (7.39)$$

Auflösung [km/pxl]	Schwellenwert [km]	N_{kum} ($D \geq 1\text{km}$)	N_{kum} ($D \geq 10\text{km}$)	Modellalter [Ga]
2	5	$2.15 \cdot 10^{-2}$	$3.13 \cdot 10^{-4}$	4.190
1	2.5	$7.29 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-4}$	4.020
0.5	1.4	$2.02 \cdot 10^{-3}$	$2.93 \cdot 10^{-5}$	3.820
0.2	0.5	$8.17 \cdot 10^{-5}$	$1.19 \cdot 10^{-6}$	0.985
0.1	0.25	$6.46 \cdot 10^{-6}$	$9.38 \cdot 10^{-8}$	0.077

Tabelle 7.4.: Abhängigkeit abgeschätzter Krateralter von der Bildauflösung.

und Antilogarithmieren von $\log N_{ip}$. Bei diesem Verfahren ist zu berücksichtigen, dass lokale Schwankungen in der Häufigkeit stärker ins Gewicht fallen, falls einer der zur Interpolation verwendeten Rasterdurchmesser eine vom annähernd linearen Trend einer Messung abweichende Häufigkeit aufweist. In solchen Fällen sollten nicht die unmittelbar D_{ip} benachbarten Durchmesser zur Interpolation verwendet werden, sondern eventuell einer der übernächsten Werte.

Mit dem in den Gleichungen 7.38 und 7.39 beschriebenen Interpolationsverfahren können auch Häufigkeiten für Durchmesser ermittelt werden, die außerhalb des Durchmesserbereichs einer spezifischen Messung liegen, sofern der gesuchte Durchmesser höchstens ein bis zwei Rasterdurchmesser oberhalb oder unterhalb des größten bzw. kleinsten in der Messung noch vertretenen Durchmessers liegt. Für den Fall $D_j < D_k < D_{ip}$ kann Gleichung 7.39 wie angegeben verwendet werden. Für den Fall $D_{ip} < D_j < D_k$ ist der Term $\log N_j$ in Gl. 7.39 vom linken Summanden abzuziehen.

Der Fehler N_{err} der interpolierten kumulativen Häufigkeit ist für die Messfläche A analog zu Gleichung 7.37 durch die Beziehung $N_{err} = \sqrt{N_{ip}}/A$ gegeben.

7.4.8. Abschätzung von Kraterhäufigkeiten

Auf bestimmten geologischen Einheiten sind bei gegebener Bildauflösung keine Krater zu sehen und deshalb auch keine Messungen der Kraterhäufigkeit möglich. In diesen Fällen kann das maximale Krater-Retentionsalter jedoch durch folgende Prozedur abgeschätzt werden (z. B. *Wagner et al.*, 1999).

Zunächst wird die Fläche der zu vermessenden geologischen Einheit in Quadratkilometer bestimmt. Bei gegebener Bildauflösung S km/pxl, bei der in dieser Messfläche kein Krater zu sehen ist, wird angenommen, dass wenigstens ein Krater unterhalb der Bildauflösung vorhanden ist. Wegen der Einordnung der Krater in ein Raster (Gleichung 7.19, Abschnitt 7.4.2.1) müsste beispielsweise bei einer Auflösung von 48 m/pxl und einem damit verbundenen Rasterdurchmesser von 45 m der Datenpunkt für die kumulative Häufigkeit auf den nächst-kleinere Krater-Rasterdurchmesser von 40 m als Schwellenwert gelegt werden.

Die kleinsten bei gegebener Bildauflösung S km/pxl auf einer Fläche noch zu sehenden Krater (D_{min}) liegen in der Größenordnung von $D_{min} \approx 3 \cdot S$ km. Daher sollte hier der unterhalb

dieses Wertes gelegene nächstkleinere Krater-Rasterdurchmesser zur Altersabschätzung verwendet werden, vor allem bei niedriger aufgelösten Daten (> 1 km/pxl) und bei Daten schlechter Qualität.

Durch den Datenpunkt wird das für den jeweiligen Satelliten oder Planeten ermittelte Produktionsverteilungspolynom gelegt und die kumulativen Häufigkeiten beim Referenzdurchmesser (z. B. 1 km) abgelesen. Dieser einzelne so erhaltene Datenpunkt in der Kraterstatistik liefert ein **maximales Alter** der geologischen Einheit, da sich bei Verfügbarkeit höher aufgelöster Bilddaten der tatsächlich vorhandene größte Kraterdurchmesser als wesentlich kleiner erweisen könnte und die an diesen neuen Datenpunkt angepasste Produktionsverteilung insgesamt tiefer, d. h. bei niedrigeren Altern liegen könnte (vergl. Bild 7.9).

Die Methode ist, wie im letzten Punkt angedeutet, stark von der Bildauflösung abhängig. Die Altersabschätzung von Einzelkratern auf niedriger aufgelösten Voyager-Daten ergibt deshalb sehr hohe Werte, die weit über den tatsächlichen Altern dieser Krater liegen könnten. Tabelle 7.4 zeigt Beispiele, wie sehr sich die Krater-Modellalter (hier für *Model I* betrachtet) mit höherer Bildauflösung und damit immer kleiner werdendem Schwellenwert ändern können. Angenommen wird hierzu ein Krater mit 40 km Durchmesser auf Callisto, auf dessen Boden (Fläche: 1256.637 km²) sich eine Kraterverteilung mit lediglich einem Krater des größten vorkommenden Durchmessers von 250 Meter befindet. Dies ergibt eine kumulative Häufigkeit größer oder gleich dieses Durchmessers von $1/1256.637 = 7.96 \cdot 10^{-5}/\text{km}^2$.

Um diesen Krater noch zu sehen, müsste die Auflösung mindestens 0.1 km/pxl betragen. Das für diesen Krater abgeleitete Modellalter beträgt 77 Millionen Jahre, und dies entspricht dem "wahren" Alter des Kraters. Stünde dagegen nur eine Bildauflösung von 2 km/pxl zur Verfügung, wie etwa bei vielen Voyager-Bilddaten, würde wegen des hohen Schwellenwertes von 5 km dagegen ein viel zu hohes Modellalter von 4.19 Milliarden Jahren resultieren.

Bild 7.9 veranschaulicht diese Unterschiede in den maximal abschätzbaren Modellaltern am Beispiel zweier verschiedener Bildauflösungen und der Schwellenwerte aus Tabelle 7.4. Bei einem Schwellenwert von 0.5 km (blaue Kurve) resultiert ein Modellalter von 985 Millionen Jahren, also immer noch um mehr als das Zehnfache höher als das "wahre" Alter des Kraters. Die kumulative Häufigkeit bei 0.5 km liegt in der roten Kurve um fast einen Faktor 10 höher als die kumulative Häufigkeit in der blauen Kurve beim gleichen Durchmesser. Die Methode der Abschätzung von Krateraltern kann also bei geringer Bildauflösung nur sehr ungenaue und vielfach unzutreffende maximale Modellalter erbringen.

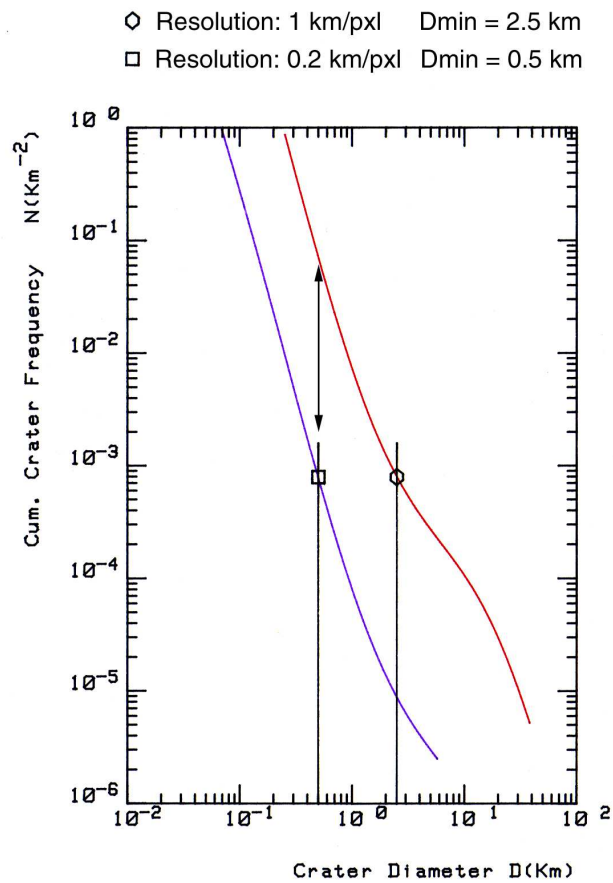


Abbildung 7.9.: Einfluss der Bildauflösung auf die Abschätzung von Krater-Modellaltern. Schwellenwerte in den beiden Beispielen sind Kraterdurchmesser von 2.5 km und 0.5 km. Weitere Erläuterung siehe Text.

