

2. Kurzfassung

Callisto ist der äußerste der vier Galileischen Jupitersatelliten. Mit einem Durchmesser von 4816 km ist er planetengroß, nur wenig kleiner als der innerste Planet Merkur, aber an Größe übertroffen durch seinen inneren Nachbarn Ganymed (5268 km) und durch den größten Saturnmond Titan (5150 km). Callisto repräsentiert (so wie praktisch alle Monde im äußeren Sonnensystem) eine spezifische Klasse von Objekten, die als **Eissatelliten** bezeichnet werden: Ihre mittleren Dichten liegen beträchtlich unter denen silikatischer Körper, und das Vorhandensein von Wassereis an der Oberfläche wurde spektroskopisch nachgewiesen (*Pilcher et al.*, 1972; *Morrison et al.*, 1977; *Consolmagno und Lewis*, 1977).

Trotz seiner Größe allerdings zeigten die ersten Detailaufnahmen von Callisto, die die Voyager-Kameras 1979 zur Erde übermittelten, eine Oberfläche, die mehr oder weniger geprägt ist durch Einschlagskrater und -becken mit wenig oder so gut wie keiner geologischen Aktivität. Dadurch entstand ein allgemeines Bild von Callisto als des am wenigsten interessanten - sogar "langweiligen" - Mondes im Jupitersystem, eine Ansicht, die aber nicht von jedem geteilt wurde (z. B. *Schenk und McKinnon*, 1985). In der jüngeren Vergangenheit führten detailliertere Untersuchungen der Bilddaten, die von der Kamera an Bord der Galileo-Sonde, ebenso erneut der Voyager-Daten zu einer umfassenden Revision dieser Ansicht (*Schenk und McKinnon*, 1985; *McKinnon und Parmentier*, 1986; *Schenk*, 1995; *Bender et al.*, 1997b; *Wagner und Neukum*, 1991; 1994a,b; *Moore et al.*, 2004).

Die Zielsetzungen dieser Arbeit sind, Galileo-SSI-Daten im Kontext niedriger aufgelöster SSI- oder Voyager-Daten zu benutzen, um **(1) ein globales, chronostratigraphisches System für Callisto** abzuleiten, um **(2) detaillierte geologische Auswertungen besonders ausgewählter Gebiete** darzustellen, z. B. (a) von *Kraterebenen und Ebenen zwischen einzelnen größeren Kratern (inter-crater plains)*, (b) der *Formen von Kratern und Multiringbecken*, (c) von *Gebieten möglicher kryovulkanischer Überprägung*, und (d) von *Regionen, die geprägt sind durch ein Wechselspiel von tektonischer Deformation und nachfolgenden Abtragungsprozessen*, sowie **(3) um die Intensität geologischer Prozesse im Lauf der Zeit zu untersuchen**.

Um diese Ziele zu erreichen, kamen **photogeologische Kartierung, Messungen von Krater-Häufigkeitsverteilungen auf geologischen Einheiten und Einschlagschronologiemodelle** für diese Arbeit zur Anwendung. Zwei Chronologiemodelle wurden benutzt: Ein Modell, von hier ab als *Modell I* bezeichnet, basiert auf einer mond-ähnlichen Zeitabhängigkeit der Kraterbildungsrate. Krater wurden vorwiegend durch asteroidale Körper gebildet, zumindest bis vor 3.3 Ga als die Einschlagsrate exponentiell abfiel und schließlich bis heute mehr oder weniger konstant verlief (*Neukum*, 1997; *Neukum et al.*, 1998) (Einheiten: 1 Ga = 1 Giga-Jahr = $1 \cdot 10^9$ Jahre; 1 Ma = 1 Mega-Jahr = $1 \cdot 10^6$ Jahre). Der Einschlag vorwiegend von Asteroiden und demzufolge ein mond-ähnliches Bombardement wird durch alle in dieser Arbeit präsentierten Messungen gestützt. Ein zweites Modell, von hier ab als *Modell II* bezeichnet, besitzt als Grundlage die

Einschläge vorwiegend von Kometen der Jupiterfamilie seit ca. 4.4 Ga, möglicherweise mit einem unbekanntem Beitrag der Trojanischen Asteroiden zu den kleineren Kratern, und mit einer konstanten Einschlagsrate, außer vielleicht in der frühesten Zeit (*Zahnle et al.*, 1998, 2003). Eine kometare Projektilfamilie, abgeleitet von astronomischen Beobachtungen der Größenverteilung von Kometen und Kuipergürtelobjekten (KBOs = *Kuiper Belt Objects*) (z. B. *Gladman et al.*, 2001) ist jedoch nicht im Einklang mit der Form der auf Callisto gemessenen Kraterverteilungen.

Große Einschlagsbecken stellen bedeutende stratigraphische Leithorizonte dar, da weite Bereiche prä-existierender geologischer Einheiten zerstört, durch Auswurfsmassen überdeckt, oder tektonisch deformiert wurden. Die beiden größten Becken auf Callisto sind Valhalla (mit einem Gesamtdurchmesser von etwa 4000 km) und Asgard (etwa 1700 km). Die Hauptperioden der geologischen Geschichte von Callisto, definiert durch diese beiden und weitere Einschlagsstrukturen, sind mit den jeweiligen Modell-I-Altern der Basis der entsprechenden zeitstratigraphischen Systeme:

prä-Asgardische Periode	> 4.19 Ga
Asgardische Periode	4.19 Ga
Valhallische Periode	3.98 Ga
Burrianische Periode	< 3.5 Ga

Callisto akkretierte sich sehr wahrscheinlich homogen im proto-Jovianischen Urnebel, abzuleiten aus seinem heutigen niedrigen Differenzierungsgrad (*Schubert et al.*, 1981, 1986; *Canup und Ward*, 2002; *Nagel et al.*, 2004). Allerdings differenzierte sich Callisto seit seiner Entstehung zumindest teilweise, da sich (a) sein Trägheitsmoment von dem eines völlig homogenen Körpers unterscheidet und (b) die Galileo-Magnetometerdaten zeigten, dass möglicherweise ein Wasser-ozean unter der Oberfläche existiert, der sich irgenwann in der Vergangenheit bildete und bis heute überlebte (*Khurana et al.*, 1998; *Zimmer et al.*, 2000). Nach einer relativ kurzen Zeit ($10^7 - 10^8$ Jahre) stellte sich bei Callisto eine gebundene Rotation ein, wobei eine Hemisphäre stets auf Jupiter gerichtet ist (*Horedt und Neukum*, 1984b).

In der **prä-Asgardischen** und **Asgardischen Periode** war die Impaktrate sehr wahrscheinlich viel höher als heutzutage. Zahlreiche Krater der unterschiedlichsten Formen entstanden und bildeten ausgedehnte Bereiche von Kraterebenen. Multiringstrukturen aus dieser Zeit sind heute stark abgetragen und nicht leicht zu identifizieren. Ihre Zahl ist aber viel größer als ursprünglich angenommen (z. B. *Klemaszewski et al.*, 1998a).

In diesen beiden frühesten Perioden der Geschichte von Callisto war die Struktur im Untergrund der seines inneren Nachbarmondes Ganymed sehr ähnlich. Eine Übergangszone zwischen sprödem zu duktilem Material (*brittle-ductile transition zone*) lässt sich bei maximalen Tiefen von ungefähr 10 bis 20 km lokalisieren. Dies kann aus folgenden Beobachtungen abgeleitet werden: (a) der Breite und dem Abstand tektonischer Gräben in Multiringbecken (*McKinnon und Melosh*, 1980), sowie (b) Kraterformen wie Dom-Kratern und (c) Palimpsesten ähnlich denen auf Ganymed. Die Ansicht einer großen Zahl von Palimpsesten auf Callisto wurde mehrfach zurückgewiesen (z. B. *Schenk et al.*, 2004). In dieser Arbeit wird gezeigt, dass schwach erkennbare

kreisförmige bis elliptische oder polygonale Flächen, die nur wenig heller als die umgebenden dunklen Kraterebenen sind, zahlreiche, stark abgetragene Palimpseste darstellen.

Tektonische Prozesse auf Callisto hatten nie so durchgreifende Einflüsse wie auf Ganymed, obwohl hoch aufgelöste Bilddaten zeigen, dass auch Callisto tektonischem Stress außerhalb der Multiringstrukturen, zumindest bis zu einem bestimmten Grad, ausgesetzt war. Diese Stresswirkungen riefen Systeme paralleler Lineamente und lokal Steilhänge und Bruchstrukturen hervor. Globale Lineamenttrends wurden in Voyager-Daten nachgewiesen (*Thomas und Masson, 1985; Wagner und Neukum, 1991*). Gezeitenabbremung wurde als der wahrscheinlichste Ursprung dieses globalen Systems von den Autoren genannt. Bei genauer Betrachtung der SSI-Daten sind die gleichen Hauptrichtungen festzustellen, ein wichtiger Hinweis, dass die in niedriger aufgelösten Daten kartierten Lineamente "reale" Oberflächenformen darstellten. Die von *Wagner und Neukum (1991)* und in dieser Arbeit nachgewiesenen Trends stehen jedoch nicht in voller Übereinstimmung mit den NW-SE- und NE-SW-Trends, die (in mittleren Breiten) ein Hinweis auf die Wirkung der Gezeitenabbremung sind (*Pechmann und Melosh, 1979*). Sie sind etwa um 15° rotiert. Der wahrscheinlichste Grund, abgesehen von einer nicht in Gezeiten liegenden Ursache, ist eine globale Reorientierung der Rotationsachse durch einen großen Einschlag, möglicherweise durch Valhalla. Ein ähnliches Ereignis wird als Ursache für die Trends im *grooved terrain* von Ganymed gesehen (*Murchie und Head, 1986*). Weitere Bilddaten und eine Vervollständigung der globalen Abdeckung mit Auflösungen von wenigstens 500 m/pxl sind erforderlich, um diese tektonischen Phänomene zu untersuchen.

Vulkanische Aktivität, in Form von *Kryovulkanismus* auf Eissatelliten, könnte in früherer Zeit stattgefunden haben, ist aber in keinem Gebiet auf Callisto sicher nachzuweisen. Glatte, weniger bekraterte Ebenen, von denen man annahm sie würden "Lavaströme" ("flows") (*Stooke, 1989; Schmidt et al., 1989*) repräsentieren, können alternativ als tief liegendes Gebiet (möglicherweise ein Einschlagsbecken) erklärt werden, das durch jüngeres Material aufgefüllt wurde, wodurch größere Krater fast bis zum Rand überdeckt und kleinere Krater völlig ausgelöscht wurden. Ebenso scheinen kleinere Flecken dunklen, glatten Materials nicht vulkanischen Ursprungs zu sein. Eine Ursache durch Erosion und Ablagerung (siehe unten) ist eher wahrscheinlich. Deshalb ist die Rolle vergangener kryovulkanischer Aktivität auf Callisto immer noch unbekannt.

Erosion und Abtragung wirkten auf alle hoch gelegenen Geländeformen unmittelbar nach deren Bildung ein. Der wahrscheinlichste für die Entstehung dieser abgetragenen Formen verantwortliche Prozess ist *Sublimations-Abtragung* (*sublimation degradation*), begünstigt durch einen beträchtlichen Anteil hoch flüchtiger Stoffe im Eismaterial der Kruste, wie CO₂ (*Moore et al., 1997, 1999*). Dies steht in starkem Gegensatz zu Ganymed mit seinem niedrigeren Kohlendioxid-Anteil und Geländeformen, die deshalb viel weniger abgetragen erscheinen.

Abtragung des Materials in der oberen Callisto-Kruste begann entlang bereits existierender tektonischer Schwächezonen, wodurch schließlich Massive entstanden, die der Oberfläche bei regionaler SSI-Bildaufföschung (≈ 200 m/pxl) ein "beulenartiges" ("knobby") Aussehen verleihen. Flüchtige Substanzen im Krustenmaterial trennten sich voneinander, bedingt durch Temperaturvariationen im Tagesgang, wodurch sich schließlich ein dunkler Rückstand nicht eishaltigen Materials bildete (*McCord et al., 1997*).

Die Wirkung von Erosion und Abtragung lässt sich anhand einer charakteristischen Verflachung der kumulativen Kraterverteilung bei Durchmessern unterhalb einiger Kilometer gut belegen. Der Vergleich mit Kraterverteilungen auf Ganymed in diesem Größenbereich zeigt klar, dass eine derartige Verflachung dort nicht vorkommt. Daher wurde die geringere Kraterhäufigkeit bei kleinen Kratern auf Callisto durch geologische Effekte verursacht und ist nicht das Ergebnis einer an kleinen Projektilen verarmten Impaktorfamilie (z. B. *Wagner et al.*, 2006c).

Die Entwicklung des hoch gelegenen Geländes, zusammengesetzt aus Eis- und Nichteismaterial, in Massive und in einen dunklen Rückstand verläuft wahrscheinlich durch (a) fortdauernde Sublimations-Abtragung und durch (b) Trennung sehr flüchtiger Substanzen von weniger flüchtigen. Durch diese Prozesse entstand eine global verbreitete Decke dunklen Materials die auf allen räumlich hoch aufgelösten SSI-Bildern nachzuweisen ist. Einzelne Bergkegel und Massive sind umgeben von Sockeln aus Schuttmaterial (*debris aprons*). Während diese Massive zerfallen, reichert sich dunkles Material in den Sockeln an. Schließlich verschwinden die Massive völlig, und die einstmals die Massive umgebenden Sockel verschmelzen miteinander und bilden eine einheitliche Decke dunklen Materials, das die widerstandsfähigsten Kegel und Massive wie eine Flüssigkeit umschließt (*embayment*). Folglich entstand das dunkle Material direkt am Ort (*in situ*). Obwohl ein exotischer Transportmechanismus wie *elektrostatische Levitation* (z. B. *Klemaszewski et al.*, 1998a) nicht auszuschließen sind, wird er tatsächlich nicht benötigt, um die Ablagerung der globalen Decke dunklen Materials zu erklären, trotz ihres "mobilen" Aussehens.

Die **Valhallische Periode** begann mit dem Einschlag eines massiven Asteroiden oder Kometen. Durch den Impakt entstand das größte gut erhaltene Multiringbecken auf Callisto, entweder vor 3.98 Ga (*Model I*) oder vor 2 - 3 Ga (*Model II*). Zahlreiche konzentrische Grabenstrukturen zeigen, dass die Übergangszone von sprödem zu duktilem Verhalten in einer Tiefe von etwa 15 - 20 km lag (*McKinnon und Melosh*, 1980). Dies ist vergleichbar mit dem Asgard-Becken, deshalb waren Krustenstruktur und Wärmefluss noch mehr oder weniger gleich zur Zeit, als Valhalla entstand.

Penepalimpseste (Dom-Krater) entstanden noch in dieser Periode. Wenigstens ein großes frisches Palimpsest lässt sich nachweisen, das ein Modellalter vergleichbar dem von Valhalla aufweist. Deshalb ist es wahrscheinlich, dass sich die Struktur des Untergrundes, die Übergangszone von sprödem zu duktilem Material, und als Konsequenz die thermischen Eigenschaften in der Valhallischen Periode nicht signifikant änderten. Die Existenz eines Ozeans in der Tiefe zur Zeit als sich Valhalla bildete erscheint ebenfalls als möglich, da sich das so genannte "weird terrain" in der zu Valhalla antipodalen Region nicht nachweisen lässt (*Watts et al.*, 1989; *Moore et al.*, 2004).

Das jüngste Becken auf Callisto ist Lofn, das von einigen Autoren (z. B. *Greeley et al.*, 2000b) gelegentlich auch der Klasse heller Strahlenkrater zugeordnet wird. Nahe Lofn befindet sich ein weiteres Becken, Heimdall, in Helligkeit und Morphologie Lofn ähnlich, aber überdeckt mit Lofn-Ejekta und deshalb älter. Es ist möglich, dass beide Becken durch ein einzelnes großes Projektil entstanden, das sich vor dem Impakt in zwei nahezu gleich große Teile zerlegte, wodurch beim Aufschlag des ersten Heimdall, dann beim nächsten Aufschlag Lofn entstand. Fehlende Bildabdeckung verhindert, dieser Frage genau nachzugehen.

Durch Kraterzählungen auf den kontinuierlichen Ejekta von Lofn wurde ein *Model-I*-Alter von 3.86 Ga, 120 Ma jünger als Valhalla, ermittelt. In diesem mond-ähnlichen Szenario repräsentiert Lofn damit den *marker horizon* (Wetherill, 1975, 1981), dem Gilgamesh-Becken auf Ganymed oder Orientale auf dem Erdmond vergleichbar. Daher erscheint es sinnvoll, das Valhallische System (bzw. die Valhallische Periode) in eine *Untere* und eine *Obere Valhallische Serie* (entsprechend einer *Frühen* und einer *Späten Valhallischen Epoche* in chronologischen Termini) zu unterteilen, wobei die Basis der oberen Serie durch die Lofn-Ejekta festgelegt ist. Die Späte Valhallische Epoche markiert das Ende des heftigen Meteoritenbombardements und der Bildung großer Becken. In *Model II* dagegen sind die Einschläge von Valhalla und Lofn durch einen sehr viel längeren Zeitraum von ≈ 1 Ga getrennt, und Lofn ist hier 1.26 Ga alt. Im Rahmen von *Model II* erscheint es daher eher geeignet, das jüngste stratigraphische System durch den hellen, frischen Strahlenkrater Lofn zu definieren (bzw. dieses System mit dem nächsten Burrianischen System zusammenzufassen).

Sublimations-Abtragung fand weiterhin in der Valhallischen Periode statt, vermutlich in gleicher Rate wie in den beiden früheren Perioden. Tektonische Formen und kleine Krater in den Grabenstrukturen von Valhalla sind in einigen Gebieten stark abgetragen.

Die **Burrianische Periode**, die jüngste in der Callisto-Geschichte ist durch den Einschlag festgelegt, durch den der auffallende, 60 km große helle Strahlenkrater Burr in der Region des Asgard-Beckens entstand, der auf dem post-Asgardischen Becken Utgard liegt. Das Modellalter der Typlokalität des obersten zeitstratigraphischen Systems ist wegen nicht verfügbarer hoch aufgelöster Bildabdeckung weit ungenauer definiert. Aus einer Abschätzung der Kraterhäufigkeiten auf Boden und Ejekta ergab sich ein maximales Alter von 3.51 Ga in *Model I*, während das maximale Alter in *Model II* etwa bei nur 270 Ma liegt.

Die hohe Albedo, der frische Rand und der gute Erhaltungszustand der hellen Strahlen lässt darauf schließen, dass dieser und ähnliche Krater erst nach der Periode des heftigen Meteoritenbombardements entstanden und somit wesentlich jünger als 3.5 Ga sein sollten. Entsprechend *Model I* würde sich ein Krater der Größe von Burr etwa einmal alle ≈ 1.2 Ga bilden. Damit könnte dies ein Minimalalter für junge Strahlenkrater darstellen. Ebenso ergaben Kraterzählungen in einem jungen frischen Strahlenkrater auf dem Saturnsatelliten Rhea ein mögliches Modellalter von 2 - 2.5 Ga im mond-ähnlichen Einschlagsszenario, somit ebenfalls eine Entstehung nach dem heftigen Bombardement.

Die jüngste Periode ist sogar mit einer unteren Zeitgrenze von 2 oder 3 Ga charakterisiert durch sehr niedrige Impaktraten, ableitbar vom frischen Aussehen von Kratern in ihren Einheiten. Wenn die untere Zeitgrenze in *Model I* nahe 3.5 Ga liegt, dann sind die jüngsten, am weitesten verbreiteten Einheiten Burrianischen Alters die dunklen Gebiete zwischen den größeren Kratern (*inter-crater plains*) mit einer hohen Dichte kleinerer Krater und *Model-I*-Altern von 3.4 bis 3.6 Ga. Die bei Bildauflösungen zwischen 5 und 15 m/pxl gemessenen kleinen Kratern ergeben eine steile kumulative Verteilung unter 300 m Kraterdurchmesser, wohingegen die Verteilungen bei Durchmessern zwischen 300 m und ca. 3 - 5 km ziemlich flach sind. Dies beweist, wie oben diskutiert, die Wirkung von Erosionsprozessen.

Die steile (kumulative) Steigung bei diesen kleinen Durchmessern zeigt klar, dass nach der

Bildung des dunklen Rückstandes Erosion und Abtragung entweder aufhörten oder sich mit einer sehr niedrigen Rate fortsetzten. Da dies etwa in der Zeit vonstattenging, als das heftige Meteoritenbombardement endete (vor 3.4 - 3.6 Ga bei Annahme eines mond-ähnlichen Verlaufs der Impaktrate), erscheint es denkbar, dass die Erosions- und Abtragungsraten an einen höheren Impaktorfluss in dieser Zeit gekoppelt waren. Ein derartiger höherer Impaktorfluss und ebenso ein höherer Wärmefluss, möglicherweise zusätzlich ausgelöst durch den höheren Impaktorfluss, könnten das Freisetzen flüchtiger Stoffe mit einer höheren Rate verursacht haben, so dass Geländeformen in früheren Zeiten schneller abgetragen wurden.

In *Modell II* betragen die Alter der dunklen *inter-crater plains* nur 200 bis 500 Ma. Diese Alter erscheinen zu jung für derart dicht bekraterte Gebiete, außer man bringt hohe Einschlagsraten ins Spiel. Zudem erscheint es wenig wahrscheinlich, dass in den jüngsten Einheiten auf einem "toten" Objekt wie Callisto, in dem seit den frühesten Zeiten keine endogene Aktivität stattgefunden hat, in globalem Maßstab Prozesse der jüngsten Vergangenheit aufgezeichnet sein sollten.

Es besteht zur Zeit eine Kontroverse darüber, ob die große Häufigkeit kleiner Krater auf diesen jungen Einheiten durch Primärkrater bedingt ist. Ein Einfluss vorwiegend bzw. ausschließlich von Sekundärkratern auf die hohe Kraterdichte wurde von *Bierhaus et al.* (2000) diskutiert. Jedoch konnten *Werner* (2005) und *Werner et al.* (2006) nachweisen, dass das Mitzählen von Sekundärkratern in einer Krater-Häufigkeitsmessung bei kleinen Kratern eine Unsicherheit von höchstens etwa einem Faktor 2 im Modellalter hervorruft. Zudem wurden kleine Krater mit unregelmäßiger Form, Krater in Strahlen, Ketten oder Clustern sorgfältig kartiert und bei allen Messungen nicht berücksichtigt. Daher ist die Zählung von kleinen Kratern nach wie vor eine verlässliche Methode zur Altersdatierung.

Gegenwärtig sind die auf Callisto aktiven Hauptprozesse (1) gelegentliche Einschläge, (2) eine sehr langsam verlaufende Erosion und Abtragung, und (3) eine ständige Ausgasung von CO₂, wodurch eine sehr dünne Atmosphäre um Callisto entsteht (*Carlson*, 1999). Die Heckseite von Callisto wird beständig durch Teilchen der Jupiter-Magnetosphäre bombardiert, wodurch sich dort eine sehr dünne Ablagerung von CO₂ an der Oberfläche bildet (*Hibbitts et al.*, 2000).