

7 Schlussfolgerungen

Auch wenn die Oberfläche von Ganymed, wie viele andere Himmelsobjekte des äußeren Sonnensystems, zum großen Teil „nur“ aus Wassereis besteht, zeigt diese eine Vielfalt unterschiedlicher Oberflächenprozesse, von denen vermutlich nur ein Bruchteil von NIMS erfasst wurde. Als erstes abbildendes Spektrometer im äußeren Sonnensystem erlaubt NIMS Einblicke in die Veränderungen der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Ganymedoberfläche. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass Veränderungen der Reflexionseigenschaften der Ganymedoberfläche auf den wechselnden Anteil von Wassereis und Gesteinsmaterial sowie den Gehalt an CO₂ zurückzuführen sind. Diese Variationen konnten auf der Basis der Absorptionen von Wassereis bei 1,04, 1,25, 1,5, 2, 2,4 und 3µm und von CO₂ bei 4,25µm untersucht und kartiert werden. Die simultane Analyse der Absorptionen von Wassereis erlaubte es ferner, Veränderungen des relativen Anteils und der Partikelgröße von Wassereis erstmals getrennt voneinander zu erfassen. Die Ergebnisse der Arbeit verdeutlichen zusätzlich das Potential der Kombination der spektral hoch aufgelösten NIMS-Daten mit räumlich hoch aufgelösten Kameradaten. Dies ermöglicht Einblicke in die chemisch-physikalischen Eigenschaften der geologischen Einheiten und deren Bildungsprozesse sowie in die Wechselwirkungen der Ganymedoberfläche mit dem planetaren Raum, die mit Kameradaten allein nicht möglich sind. Sie untermauern und erklären einerseits die spektralen Variationen in den Kameradaten, bieten jedoch andererseits auch zusätzliche Informationen, die sich vor allem auf Variationen in der Partikelgröße von Wassereis und den Gehalt an leichtflüchtigen Elementen, wie CO₂, bezieht.

1. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die bisherige Annahme einer exogenen Herkunft des Gesteinsmaterials (*Prockter et al.*, 1998). Der höchste Anteil von Gesteinsmaterial konzentriert sich hauptsächlich im dunklen Gebiet der Regiones, welches die älteste geologische Einheit der Ganymedoberfläche darstellt (*Neukum*, 1997; *Neukum et al.*, 1998; *Zahnle et al.*, 2003). Dagegen konzentriert sich Wassereis vor allem in geologisch jungen Einschlagskratern und ihrem Auswurfsmaterial, was auf Wassereis im Untergrund von Ganymed hindeutet. Dies geht konform mit der Annahme, dass sich infolge der Differenzierung des Inneren von Ganymed leichtes Material wie Wassereis in den äußeren Schichten von Ganymed ansammelt und einen etwa 900 km dicken Eismantel bildet (*Schubert et al.*, 2004). Die NIMS-Daten zeigen keine Hinweise für einen endogenen Ursprung des Gesteinsmaterials. Die relativ hohe Konzentration von Gesteinsmaterial wird eher als Resultat des Bombardements mit (mikro-) meteoritischem Material gesehen, welches durch Sublimationsprozesse und das Herausschlagen von Wassereispartikeln an der Oberfläche konzentriert wird. Dieses Bombardement beeinflusst vermutlich auch den relativen Anteil von Gesteinsmaterial im geologisch jüngeren hellen Gebiet der Sulci. Diese sind jedoch durch einen etwas höheren relativen Anteil von Wassereis gekennzeichnet, welcher durch die Zufuhr von Wassereis aus dem Untergrund während der Entstehung des hellen Gebietes erklärt werden kann. Innerhalb der Sulci wurden Bruchstücke dunkler Gebiete beobachtet. Einige wurden möglicherweise teilweise von Material der Sulci überflutet (*Schenk & McKinnon*, 1991, *Pappalardo*, 1998; *Pappalardo et al.*, 2004). Eine Ausnahme bilden die an Gesteinsmaterial reichen Ejekta einzelner geologisch junger Einschlagskrater. Jedoch repräsentiert dies eher aufgearbeitetes Oberflächenmaterial und nicht neu eingebrachtes Material. Die NIMS-Daten bieten keinen direkten Hinweis auf die chemische Zusammensetzung des Gesteinsmaterials. Dessen spektrale Signatur wird durch die des stets vorhandenen Wassereises dominiert. Vermutlich handelt es sich im Falle des Gesteinsmaterials von Ganymed um an Kohlenstoff reiche Verbindungen, wie sie von kohligem Chondriten bekannt sind (*Gaffey*, 1976; *Hiroi et al.*, 1996; *Calvin & King*, 1997). Es wurden keine Verschiebungen in den Wellenlängenpositionen von Wassereis gemessen, die

Anzeichen für das Vorhandensein von hydratisierten oder hydroxylierten Mineralen liefern (*McCord et al., 2001*).

2. Die Wechselwirkung der Ganymedoberfläche mit dem interplanetaren Raum zeigt sich hauptsächlich in den Veränderungen der Partikelgröße von Wassereis. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen erstmals eindeutig die ausgeprägte Korrelation der Veränderungen in der Partikelgröße von Wassereis mit der geographischen Position auf der Ganymedoberfläche. Relativ große Wassereispartikel ($>500\mu\text{m}$) wurden nahe dem Äquator ($\sim 30^\circ\text{N}$ bis $\sim 30^\circ\text{S}$) gemessen. Dagegen konzentrieren sich in den polaren Regionen von Ganymed ($> 30^\circ\text{N}$ bzw. S) relativ kleine Partikel ($<10\mu\text{m}$). Die Beobachtungen wurden mit der ungewöhnlichen Form von Ganymeds selbsterzeugtem Magnetfeld in Verbindung gebracht. Nahe dem Äquator wird die Oberfläche größtenteils vor einfallender hochenergetischer Strahlung aus Jupiters Magnetosphäre geschützt. Im äquatorialen Bereich dominiert daher durch die Erwärmung des Oberflächenmaterials während des Tages die Sublimation von feinkristallinem Wassereis (*Lebofsky, 1975; Spencer et al., 1987a; Purves & Pilcher, 1980; Squyres, 1980; Colwell et al., 1990; Moore et al., 1996*), was in einem Anwachsen der mittleren Partikelgröße von Wassereis resultiert. Im Gegensatz dazu verursacht die hochenergetische Strahlung aus Jupiters Magnetosphäre in den polaren Regionen die Zerstörung der Wassereiskristalle und resultiert in einer dünnen Schicht von feinkristallinem Wassereis, welches die Reflexionseigenschaften des darunterliegenden Materials maskiert. Nur niederenergetisches Plasma ist in der Lage, die Ganymedoberfläche nahe dem Äquator zu erreichen und beeinflusst vor allem die Heckseite von Ganymed. Unabhängig von den geologischen Einheiten wurde hier ein generell niedriger Wassereisanteil gemessen.
3. Im Oberflächenmaterial eingelagertes gasförmiges CO_2 wurde durch die Absorption bei $4,25\mu\text{m}$ identifiziert. Dies bestätigt die Untersuchungen von *McCord et al. (1998)* und *Hibbitts et al. (2003a)*. Entgegen bisheriger Annahmen zeigen die Ergebnisse der Arbeit jedoch, dass kein Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein von Gesteinsmaterial und dem Gehalt an CO_2 besteht. Dagegen zeigen die Absorptionstiefen bei $4,25\mu\text{m}$ eine direkte Korrelation mit dem Reflexionsgrad des Oberflächenmaterials nahe $4,25\mu\text{m}$. Tiefere Absorptionen im dunklen Gebiet sind daher nur das Resultat des höheren Reflexionsgrades bei $4,25\mu\text{m}$ in dessen Reflexionsspektrum und kein direkter Indikator für einen wechselnden Gehalt von CO_2 . Die Absorptionstiefe bei $4,25\mu\text{m}$ gibt daher nur indirekte Hinweise auf Veränderungen im Gehalt an CO_2 . Sie wurden nur als Indikator für reelle Veränderungen im Gehalt an CO_2 gewertet wenn (a) der Reflexionsgrad der zu untersuchenden Gebiete nahezu konstant ist oder (b) tiefere Absorptionen in Bereichen mit niedrigeren Reflexionsgrad im Vergleich zu einer Umgebung mit einem höheren Reflexionsgrad beobachtet wurden. Dies ermöglichte erstmals die eindeutige Identifizierung höherer Konzentrationen von CO_2 in an feinkristallinem Wassereis reichen, morphologisch frischen Einschlagskratern. Somit ist CO_2 ein direktes Resultat des Einschlagsprozesses. Die Klärung der Frage, ob CO_2 dem Untergrund bzw. dem Einschlagskörper entstammt oder während des Einschlagsprozesses gebildet wurde, ist auf der Basis der vorliegenden Daten nicht möglich.
4. Es wurde ebenfalls nachgewiesen, dass sich kein CO_2 in den polaren Ablagerungen von Wassereis befindet und somit nicht durch die Wechselwirkung mit einfallender Strahlung gebildet wird. Dagegen deuten die NIMS-Daten darauf hin, dass CO_2 in vorwiegend amorphem Wassereis der äquatorialen Region eingelagert ist.
5. Die NIMS-Daten zeigen ferner, dass mit zunehmendem Alter der Einschlagskrater nicht nur eine Angleichung des relativen Anteils und der Partikelgröße von Wassereis erfolgt, sondern auch den Gehalt an CO_2 mit einschließt. Der Grad der Angleichung ist jedoch kein direkter Indikator für das geologische Alter der Einschlagskrater, sondern wird vor allem von den je nach geographischer Lage unterschiedlich dominierenden Oberflächenprozessen (Sublimation/meteoritisches Bombardement) beeinflusst. Obwohl die hohen Konzentrationen von CO_2 im Bereich einiger geologisch

junger Einschlagskrater auf einen direkten Zusammenhang mit dem Einschlagsprozess hindeuten, lässt sich die Angleichung im Gehalt an CO₂ nur durch zusätzliche exogene Oberflächenprozesse erklären. Entgegen der Abgabe von CO₂ an eine leichtflüchtige Atmosphäre, wie es vom Nachbarmond Callisto bekannt ist (*Carlson et al.*, 1996), verbleibt CO₂ im Oberflächenmaterial von Ganymed oder wird nur in so geringem Maße abgegeben, dass dies von NIMS nicht messbar ist. CO₂ entweicht im Allgemeinen infolge des thermisch bedingten Übergangs von amorphem zu kristallinem Wassereis. Dies ist verstärkt für Callisto der Fall (*Carlson et al.*, 1996; *Hansen & McCord*, 2004). Dagegen herrscht auf Ganymed ein Gleichgewicht zwischen thermisch bedingter Kristallisation und Amorphisierung von Wassereis aufgrund (mikro-) meteorischen Bombardements.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Erfolg der Auswertungen stark von der Koordinierung der Beobachtungen beider Instrumente (Spektrometer / Kamera) während einer Mission abhängt. So ist die Analyse der Zusammenhänge zwischen den Variationen in den Reflexionseigenschaften und den geologischen Prozessen der Oberflächengestaltung abhängig von der Abdeckung der planetaren Oberfläche mit Fernerkundungsdaten und deren spektraler und räumlicher Auflösung. Im Rahmen dieser Arbeit waren vor allem die Auswirkungen des Ausfalls der großen Antenne der Raumsonde Galileo spürbar, welche zum einen deutlich die Datenmenge des NIMS-Instruments einschränkte und in der unvollständigen Abdeckung der Ganymedoberfläche mündete. Zum anderen standen für räumlich hoch aufgelöste NIMS-Beobachtungen keine SSI-Daten zur Verfügung. Zur Analyse der Spektraldaten wurde daher teilweise auf Daten der Raumsonden Voyager 1 und 2 zurückgegriffen, deren Qualität deutlich unter der der SSI-Daten liegt. Spektraldaten höherer räumlicher Auflösung wären für gezielte Beobachtungen wünschenswert, um spezifische geologische Fragen, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht vollständig beantwortet oder neu aufgeworfen wurden:

1. Sie würden es erlauben, innerhalb der Regiones Bereiche zu identifizieren, in denen Gesteinsmaterial getrennt von Wassereis detektierbar ist, um dessen Reflexionsspektren direkt mit denen anderer Himmelskörper zu vergleichen.
2. Die Konzentration von CO₂ im Bereich geologisch junger Einschlagskrater wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur für relativ kleine Einschlagskrater nachgewiesen, deren geomorphologische Teilstrukturen in den NIMS-Daten räumlich nicht aufgelöst wurden. Zusätzliche räumlich hoch aufgelöste Beobachtungen morphologisch frischer Einschlagskrater könnten es ermöglichen, lokale Unterschiede in der Verbreitung von CO₂ aber auch der Partikelgröße von Wassereis innerhalb der Einschlagsstrukturen (Kraterboden, Ejekta) zu identifizieren, die detaillierte Hinweise zum Ablauf der Einschlagsprozesse im Wassereis und zur Bildung von CO₂ liefern.
3. Des Weiteren wäre eine detaillierte Kartierung der lokalen Verbreitung von amorphem und kristallinem Wassereis in Zusammenhang mit derjenigen von CO₂ wünschenswert, um die Vermutung eines Zusammenhangs zwischen amorphem Wassereis und dem Gehalt an CO₂ auf Ganymed zu bestätigen.
4. Vor allem in Bezug auf den Bildungsprozess der dunklen Strahlen sind Spektral- und Kameradaten deutlich höherer räumlicher Auflösung notwendig, die Aufschluss über die geomorphologischen Eigenschaften der dunklen Strahlen und auch das Alter dieser Einschlagskrater geben können.

Daneben würde eine Verbesserung der spektralen Auflösung ermöglichen, weitere leichtflüchtige Verbindungen im Oberflächenmaterial zu identifizieren und deren Verbreitung über die Ganymedoberfläche zu kartieren.

<i>Spektrale Variationen</i>	<i>Beobachtung</i>	<i>Interpretation</i>
Wassereis	überall auf Ganymed vertreten	
	relativ hohe Konzentration in morphologisch frischen Einschlagskratern, verschiedenster Form und Größe	→ aus dem Untergrund freigelegtes Wassereis
	relativ feine Partikel im Bereich von morphologisch frischen Einschlagskratern verschiedenster Form und Größe	→ durch Einschlagsprozesse amorphisiertes Wassereis bzw. frisch in kubischer Form kristallisiertes Wassereis
	steigender relativer Anteil in Richtung der polaren Regionen (>30° N bzw. S)	→ polare Wassereisablagerungen
	Abnehmende Partikelgröße in Richtung der polaren Regionen (>30° N bzw. S)	→ Einfluss der Jupitermagnetosphäre
	evtl. abnehmender relativer Anteil in Richtung der Heckseite (ist nicht eindeutig zu beobachten für die Partikelgröße)	→ Einfluss der Jupitermagnetosphäre

Tab. 7.1: Zusammenfassung der beobachteten spektralen Variationen auf der Ganymedoberfläche.

<p><i>Gesteinsmaterial</i></p> <p>hohe Konzentration im dunklen Gebiet, dem geologisch ältesten Gelände auf der Ganymedoberfläche</p> <p>Ausnahme: Ejekta einiger morphologisch frischen Einschlagskrater</p> <p>abnehmender Anteil in Richtung der Pole</p>	<p>→ exogener Ursprung (da kein Hinweis auf aus dem Untergrund freigelegtes Gesteinsmaterials) → Einschlagskörper mit einem hohen Kohlenstoffanteil</p> <p>→ durch Einschlagsprozesse mit dem Wassereis vermischt und durch Sublimationsprozesse an der Oberfläche konzentriert</p> <p>→ aufgearbeitetes Oberflächenmaterial (?)</p> <p>→ zunehmende Maskierung der spektralen Signaturen des Gesteinsmaterials in Richtung der polaren Regionen (>30° N bzw. S) infolge zunehmender Ablagerung von feinkristallinem Wassereis</p>
<p><i>CO₂</i></p> <p>Korrelation mit Reflexionsgrad bei 4,25µm</p> <p>Dennoch: relativ hohe Konzentration im Bereich einiger morphologisch frischen Einschlagskrater</p> <p>hohe Konzentration in lokalen Bereichen der dem Jupiter zugewandten Hemisphäre (nahe Kittu) ?</p> <p>abnehmende Bandentiefen in Richtung der Pole (>30° N bzw. S)</p>	<p>→ Variationen in der Absorptionstiefe sind abhängig von der Detektierbarkeit und sind kein direkter Hinweis auf Veränderungen im Gehalt an CO₂ (Absorption ist evtl. nur maskiert).</p> <p>Konzentration infolge des Einschlagsprozesses: → aus Untergrund freigelegt (?) → während des Einschlags gebildet oder eingebracht (?) bzw. → Reaktion mit implantierten C (?)</p> <p>→ Einfluss Jupiters Strahlungsgürtel ?</p> <p>→ kein CO₂ in polaren Ablagerungen von Wassereis (>30° N bzw. S)</p>

Fortsetzung von Tab.7.1.

Und letztendlich wäre die Kombination unterschiedlichster abbildender Fernerkundungsinstrumente wünschenswert, wie sie bereits im Rahmen der momentan laufenden Cassini-Mission erprobt wird. So erlauben eine Reihe abbildender Fernerkundungsinstrumente die Detektierung der Oberflächeneigenschaften im Saturnsystem vom ultravioletten Wellenlängenbereich ($0,056\mu\text{m}$) bis weit ins infrarote Licht ($1000\mu\text{m}$). Auf ihrer Reise ins Saturnsystem nutzte die Raumsonde Cassini im Dezember 2000 den Vorbeiflug am Jupiter, um durch dessen Schwerkraft für die letzte Etappe ihrer Reise Schwung zu holen. Dieser Vorbeiflug erfolgte aber in einer recht großen Entfernung von fast 10 Millionen km (~ 136 Jupiterradien), die zu groß war um räumlich aufgelöste Spektraldaten der Jupitermonde zu liefern.

Eine zukünftige Mission ins Jupitersystem sollte die vollständige Abdeckung der Ganymedoberfläche mit Spektraldaten ermöglichen, das heißt, vor allem die bisher fehlenden Spektraldaten der dem Jupiter zugewandte Hemisphäre und der Bugseite liefern. Diese sind notwendig, um die Einflüsse des interplanetaren Raums auf die Reflexionseigenschaften der unterschiedlichen Hemisphären, insbesondere in Bezug auf die Partikelgröße von Wassereis und den Gehalt an CO_2 , vollständig zu klären.

Der „*Jupiters Icy Moons Orbiter*“ (JIMO) der amerikanischen Raumfahrtbehörde (NASA) soll womöglich in naher Zukunft den Ganymed und seine beiden Nachbarmonde Europa und Callisto im Rahmen der Prometheus-JIMO-Mission umkreisen und erforschen. JIMO wäre die erste Mission der NASA, die nukleare Energie als Antrieb nutzt, der das Raumschiff in die Lage versetzen würde, jede der vereisten Welten zu umkreisen und ausgedehnte Untersuchungen über ihre chemische Zusammensetzung, Entwicklungsgeschichte und möglichen Habitabilität vorzunehmen. Der Start der Mission wurde für das Jahr 2015 angedacht. Schon im Herbst 2004 wurden jedoch Zweifel an der Finanzierbarkeit der Mission hinsichtlich der Entwicklung eines nuklearen Antriebs geäußert. So wurden die bisherigen Pläne vorerst „auf Eis gelegt“. Gegenwärtig (Stand: April 2005) wird jedoch eine mit konventionellen Mitteln durchzuführende Mission zu den Jupitermonden in Betracht gezogen. Unter Umständen erfolgt diese in Zusammenarbeit mit der europäischen Raumfahrtbehörde (ESA), die bereits erste Pläne für eine Mission zum Jupitermond Europa vorgestellt hat, bei der eine Landesonde auf der Oberfläche abgesetzt werden soll. Auf diesem Wege könnte die sehr erfolgreiche Zusammenarbeit der beiden Institutionen, die im Verlauf der aktuellen Cassini-Mission deutlich wurde, eine Fortsetzung finden.