

1 Einführung und Aufgabenstellung

Im Blickpunkt der geowissenschaftlichen Erkundung planetarer Objekte stehen immer wieder die Oberflächen der Planeten, Monde sowie der kleineren Himmelskörper wie Asteroiden und Kometen. Die vorhandenen technischen Voraussetzungen ermöglichen es heute planetare Objekte selbst in den äußeren Bereichen unseres Sonnensystems mit Hilfe von Raumsonden aus der Nähe zu beobachten. So begann am 18. Oktober 1989 die Raumsonde Galileo ihre Reise ins Reich des größten Planeten unseres Sonnensystems. Galileo war die erste Raumsonde, welche den Jupiter und seine Monde ab Dezember 1995 über einen Zeitraum von etwa sieben Jahren (bis 2003) umkreiste und erkundete. Ziel der Mission war unter anderem die Erforschung der vier Galileischen Monde des Jupiters.

Zu ihnen gehört Ganymed, der größte Mond Jupiters und zugleich des gesamten Sonnensystems. Seine Oberflächenzusammensetzung ist Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Ganymed gehört zu jenen Monden im Sonnensystem, deren Oberfläche zum Großteil von Wassereis geprägt ist. Neben Wassereis wird ein bisher nicht identifiziertes Gesteinsmaterial im Oberflächenmaterial von Ganymed vermutet. Möglicherweise handelt es sich dabei um hydratisierte Salze wie zum Beispiel MgSO_4 (McCord et al., 2001). Leichtflüchtige Verbindungen wie zum Beispiel CO_2 und SO_2 werden auf Ganymed vermutet (McCord et al., 1998) und sind möglicherweise im Oberflächenmaterial eingelagert.

Insbesondere das SSI- Kamerasystem bildete während der Galileo Mission die Oberfläche von Ganymed mit größtmöglicher räumlicher Auflösung ab. Dieses hat besonders für die Geowissenschaften neue und weit reichende Erkenntnisse über den Aufbau der Oberfläche von Ganymed erbracht. Dabei hat sich gezeigt, dass Ganymed komplexe geologische Prozesse (Differenzierung, Tektonik, Einschlagsereignisse, Erosion) durchlaufen hat, die in vielgestaltigen Oberflächenstrukturen resultieren (Pappalardo et al., 2004). Dies lässt vermuten, dass die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Ganymedoberfläche nicht gleichmäßig über die Oberfläche von Ganymed verbreitet sind, sondern komplexe Verteilungsmuster in Abhängigkeit der geologischen Oberflächenstrukturen bzw. deren Gestaltungsprozessen aufweisen. Neben dem relativen Anteil von Wassereis, dem Grad der Verunreinigung mit Gesteinsmaterial und dem Gehalt an leichtflüchtigen Verbindungen variieren ebenfalls die physikalischen Eigenschaften von Wassereis (z. B. die Partikelgröße) über die Ganymedoberfläche. Die Zusammenhänge zwischen den Veränderungen der chemisch-mineralogisch und physikalischen Eigenschaften des Oberflächenmaterials und den geologischen und geomorphologischen Gegebenheiten von Ganymed sind das eigentliche Thema der vorliegenden Arbeit.

Ein Nachteil des Kameraexperiments ist jedoch die eingeschränkte spektrale Information. Zum einen sind dessen optische Systeme in einem sehr eingeschränkten Wellenlängenbereich zwischen 0,4 und 1,1 μm empfindlich. Zum anderen geben sie das von der planetaren Oberfläche reflektierte Licht in wenigen extrem breitbandigen Spektralkanälen wieder, welche das in dem jeweiligen Wellenlängentervall von der Oberfläche reflektierte Licht zu einem Helligkeitswert aufsummieren. Eine möglichst detaillierte spektrale Information ist jedoch die entscheidende Datengrundlage für Aussagen über die chemisch-mineralogischen und physikalischen Eigenschaften der Oberfläche von Ganymed.

Vor Galileo erfolgte die Untersuchung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Ganymedoberfläche vorwiegend im sichtbaren Licht und im nahen Infrarot auf der Basis erdgebundener Teleskopdaten (Clark, 1980 a). Im Falle der Teleskopspektren von Ganymed handelt es sich jedoch um räumlich nicht aufgelöste Punktspektren. Sie erlaubten maximal die Untersuchung hemisphärischer Unterschiede in den spektralen Eigenschaften. Rückschlüsse auf Zusammenhänge zwischen den chemisch-mineralogischen und physikalischen Eigenschaften planetarer Oberflächen und deren geologischen Oberflächenstrukturen bzw. Gestaltungsprozessen lassen sie nicht zu. Im Zuge des Einsatzes der abbildenden Spektroskopie bietet sich jedoch neben der Identifizierung der kompositionellen Einheiten planetarer Oberflächen die Möglichkeit der räumlichen Zuordnung der

spektralen Information, was für geologische Interpretationen von großer Wichtigkeit ist. Abbildende Spektrometer kombinieren die Eigenschaften eines Spektrometers mit denen einer Kamera. Sie produzieren einen dreidimensionalen Datensatz in einem Spektralbereich ausreichender spektraler und räumlicher Auflösung für jedes Bildelement, so dass individuelle Absorptionsmerkmale identifiziert und deren räumliche Verbreitung kartiert und auf Zusammenhänge mit den geologischen Oberflächenstrukturen hin untersucht werden kann.

Für die Untersuchung der spektralen Eigenschaften der Ganymedoberfläche stehen erstmals Daten des abbildenden *Near-Infrared Mapping Spectrometers* (NIMS) der Raumsonde Galileo zur Verfügung. NIMS ist das erste abbildende Spektrometer, welches bei einer planetaren Mission ins äußere Sonnensystem eingesetzt wurde. Es bildet den Vorläufer des abbildenden Spektrometers VIMS, das sich an Bord der Raumsonde CASSINI befindet. NIMS operiert im Wellenlängenbereich des nahen Infrarots zwischen 0,7 und 5,2 μm . In diesem Bereich weisen Wassereis und leichtflüchtige Bestandteile wie CO₂ charakteristische Absorptionen auf, die auf molekulare Schwingungen zurückzuführen sind. Die Wellenlängenpositionen dieser Absorptionen dienen zum einen der Identifizierung der Bestandteile im Oberflächenmaterial. Jedoch dient die Absorptionstiefe (bzw. Intensität) vor allem als Indikator für den Anteil der Komponenten im Oberflächenmaterial. Im Fall von Wassereis birgt sie in Zusammenhang mit den Symmetrieeigenschaften der Absorption vor allem im Falle von Wassereis Hinweise auf dessen physikalischen Eigenschaften wie zum Beispiel die Größe der Partikel. Der zentrale Teil dieser Arbeit besteht daher in der quantitativen Erfassung der spektralen Parameter Wellenlängenposition, Absorptionstiefe und Symmetrie separat für jede in den Reflexionsspektren von Ganymed identifizierbare Absorption von Wassereis als auch der leichtflüchtigen Bestandteile und in der Kartierung der Veränderungen dieser Parameter über die Ganymedoberfläche.

Das Ziel dieser Arbeit ist die geowissenschaftliche Untersuchung der gemessenen spektralen Parameter im Hinblick auf Veränderungen in den Reflexionseigenschaften in Abhängigkeit geologischer Oberflächenstrukturen und global, regional bzw. lokal wirkender Prozesse der Oberflächengestaltung. Die Auswertung erfolgt im Vergleich mit dem geologischen und geomorphologischen Inhalt der räumlich hoch aufgelösten SSI-Kameradaten der Raumsonde Galileo. Dabei werden folgende Fragestellungen untersucht:

- Welche Oberflächenkomponenten sind in den Reflexionsspektren von Ganymed messbar. Wie verbreiten sich diese über die Ganymedoberfläche in Abhängigkeit der geologischen Einheiten, und welche Hinweise geben die Reflexionseigenschaften der unterschiedlichen geologischen Einheiten auf deren Entstehung, Alter und rezent wirkende Oberflächengestaltungsprozesse. Gibt es von den geologischen Einheiten unabhängige Verbreitungskriterien der Komponenten im Oberflächenmaterial? Sind hemisphärische Unterschiede zu beobachten. Mit welchen Oberflächengestaltungsprozessen lassen sich diese erklären?
- Sind Variationen in den physikalischen Eigenschaften von Wassereis, insbesondere dessen Partikelgröße über die Ganymedoberfläche messbar? Besteht ein Zusammenhang zwischen Veränderungen der Partikelgröße und des relativen Anteils von Wassereis? Sind Regionen identifizierbar in denen Gesteinsmaterial getrennt von Wassereis detektierbar ist? Gibt es Hinweise auf die Beschaffenheit und die Herkunft (endogen, exogen) des Gesteinsmaterials?
- Wo befinden sich die höchsten Konzentrationen von Wassereis, Gesteinsmaterial. Welche geologischen Oberflächengestaltungsprozesse bewirken dies? Gibt es Hinweise auf die Beschaffenheit des Untergrundes oder aus dem planetaren Raum eingetragenes Material?
- Bietet die Analyse Hinweise auf die Herkunft oder den Entstehungsmechanismus von CO₂. Befinden sie sich im Wassereis und/oder im Gesteinsmaterial?

Die vorliegende Arbeit gliedert sich grob in fünf Bereiche:

In einem geologisch ausgerichteten Teil wird zunächst das Beobachtungsobjekt Ganymed unter verschiedenen wissenschaftlichen Gesichtspunkten vorgestellt, welche die Grundlage der Arbeit bilden. Dies umfasst die Stellung im Sonnen- bzw. Planetensystem und die bisherigen Erkenntnisse zur Geologie, das heißt zur geologischen Entwicklung einschließlich heute noch wirkender Prozesse und der Einführung der wesentlichen Oberflächenstrukturen.

Es folgt eine Einführung in die Reflexionsspektroskopie, die sowohl die Grundlage zum Verständnis bisheriger Erkenntnisse der Oberflächenzusammensetzung von Ganymed als auch zum Verständnis der in dieser Arbeit angewandten Methodik darstellt. Die Beschreibung der Oberflächenzusammensetzung beinhaltet die bisherigen Kenntnisse zu den chemischen aber auch zu den physikalischen Eigenschaften des Oberflächenmaterials von Ganymed.

Im methodischen Teil der Arbeit wird die verwendete Datenbasis vorgestellt, da genaue Kenntnisse des Aufnahmesystems und der Aufnahmetechnik essentiell für die Grenzen der Interpretation der Daten und die Wahl der Auswertungsmethoden sind. Die Beschreibung der Verarbeitung der vorliegenden Daten erfolgt in zwei Hauptabschnitten: 1. die *Datenvorverarbeitung* und 2. die *Datenanalyse*. Die Datenvorverarbeitung umfasst die Verarbeitung der Rohdaten mit dem Ziel instrumentenspezifische Störeffekte zu reduzieren, sowie die Kombinierung der unterschiedlichen Datensätze. Die Datenanalyse beinhaltet alle Arbeitsschritte, die der quantitativen Messung der spektralen Parameter der einzelnen Absorptionen und deren statistischer Auswertung in Abhängigkeit der geologischen Einheiten dienen.

Die Darstellung der Ergebnisse gliedert sich in einen globalen, einen regionalen und einen lokalen Teil. Der globale beschreibt die Charakterisierung großräumiger Zusammenhänge zwischen spektralen Variationen und den wesentlichen geologischen Einheiten der Ganymedoberfläche, welche den regionalen und lokalen Variationen überlagert sind. Im regionalen Teil werden spektrale Variationen innerhalb der äquatorialen Region von Ganymed zwischen 30°N und 30°S sowie im Übergangsbereich zwischen der äquatorialen und den polaren Regionen in Abhängigkeit der geologischen Einheiten untersucht. Der lokale Teil umfasst letztendlich alle spektralen Variationen, die mit der Modifizierung der Ganymedoberfläche durch lokale Einschlagsprozesse in Zusammenhang stehen.

Den Abschluss bildet die Einschätzung der Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse und Ausführungen zu Möglichkeiten für die weitere wissenschaftliche Arbeit.