

4 Einführung in die Oberflächenzusammensetzung von Ganymed

Die bisherigen Kenntnisse zur Oberflächenzusammensetzung von Ganymed stammen im Wesentlichen von erdgebundenen Teleskopbeobachtungen (*Pilcher et al.*, 1972; *Kieffer & Smythe*, 1974; *Clark*, 1980 a, b; 1981 a, b) und ersten Untersuchungen der Reflexionsspektren des NIMS-Instruments (*Carlson et al.*, 1996, *McCord et al.*, 1998, *McCord et al.*, 2001). Die Oberfläche von Ganymed besteht hauptsächlich aus Wassereis. Daneben gibt es Hinweise auf bisher nicht eindeutig identifiziertes Gesteinsmaterial sowie in Spuren vorhandene leichtflüchtige Verbindungen wie zum Beispiel CO_2 und SO_2 . In Abbildung 4.1. ist eine Kombination bisher gewonnener Reflexionsspektren von Ganymed dargestellt und die Absorptionen bisher identifizierten Komponenten gekennzeichnet. Im Folgenden werden die bisher gewonnenen Erkenntnisse zu den einzelnen Bestandteilen und zu deren chemischen und physikalischen Eigenschaften vorgestellt.

4.1 Wassereis

Wassereis war der erste und einzige Hauptbestandteil im Oberflächenmaterial der Galileischen Monde, der vor der Ankunft der Raumsonde Galileo im Jupitersystem eindeutig identifiziert wurde. Die Kenntnisse beruhen im Wesentlichen auf Beobachtungen mit erdgebundenen Teleskopen. *Pilcher et al.* (1972) vermutete auf der Basis von Spektren im NIR als einer der ersten, dass sich Wassereis an der Oberfläche von Ganymed befindet. *Kieffer & Smythe* (1974) bestätigten Wassereis als Hauptkomponente auf Ganymed auf der Basis von NIR-Spektren zwischen 1,25 und 2,5 μm (Abb. 4.1). Sowohl die chemischen als auch die physikalischen Eigenschaften von Wassereis zeigen deutlich Einflüsse auf das Reflexionsvermögen. Die Erkenntnisse dazu stammen weitestgehend aus Laboruntersuchungen (*Clark*, 1980 a, b; 1981 a, b).

4.1.1 Spektrale Eigenschaften von Wassereis im NIR bis IR

Vor allem in den Wellenlängenbereichen des nahen Infrarots weist Wassereis charakteristische Absorptionen auf. Hierzu gehören die Absorptionen bei 1,04, 1,25, 1,5, 1,65, 2 und nahe 3 μm (Abb. 4.1; *Kuiper*, 1961; *Moroz*, 1965; *Johnson & McCord*, 1971; *Clark* 1980 a; *Clark & McCord*, 1980; *Sill & Clark*, 1982; *Clark*, 1982). Diese basieren im Wesentlichen auf drei molekularen Grundschrwingungen im Wassereismolekül (Abb. 4.2). Es handelt sich dabei um eine symmetrische Valenzschwingung ν_s (O-H) bei 3,17 μm , eine Deformationsschwingung δ (H-O-H) bei 6,27 μm und einer asymmetrischen Valenzschwingung ν_{as} (O-H) bei 2,96 μm (Abb. 4.2). Oberschwingungen und Kombinationen aus Grund- und Oberschwingungen resultierenden in weiteren charakteristischen Absorptionen. In Tabelle 4.1 sind alle bisher identifizierten Kombinationen in Verbindung mit der Wellenlängenposition der resultierenden Absorptionen im Wassereis zusammengefasst.

Zu den für Wassereis charakteristischen Absorptionen zählt auch die Grundschrwingung $\nu_{s(\text{OH})}$ nahe 2,79 μm der funktionellen Gruppe OH^- , die ebenfalls in Hydroxiden (z.B. Goethit) und Hydraten (z.B. Phyllosilikate) zu finden ist (Kap. 4.2, Tab. 4.2). Aus der Tabelle 4.1 wird ersichtlich, dass die relativ breiten Absorptionen im Reflexionsspektrum von Wassereis bei 1,5, 2 und 3 μm das Resultat der Überlagerung verschiedener Schwingungen sind und vor allem der Absorption bei 3 μm , die sich zwischen 2,6 und 4 μm erstreckt, ihre charakteristische antisymmetrische Form geben.

Rotationen (Kap. 3.1) sind infolge der Wechselwirkungen zwischen den benachbarten Molekülen in einem Kristallgitter nicht möglich. Diese Wechselwirkungen verursachen Gitterschwingungen ν_g , die in Kombination mit molekülinternen Schwingungen relativ schwache Absorption bei 1,65, nahe 1,8 und 2,5 μm produzieren (*Bayly, et al.*, 1963).

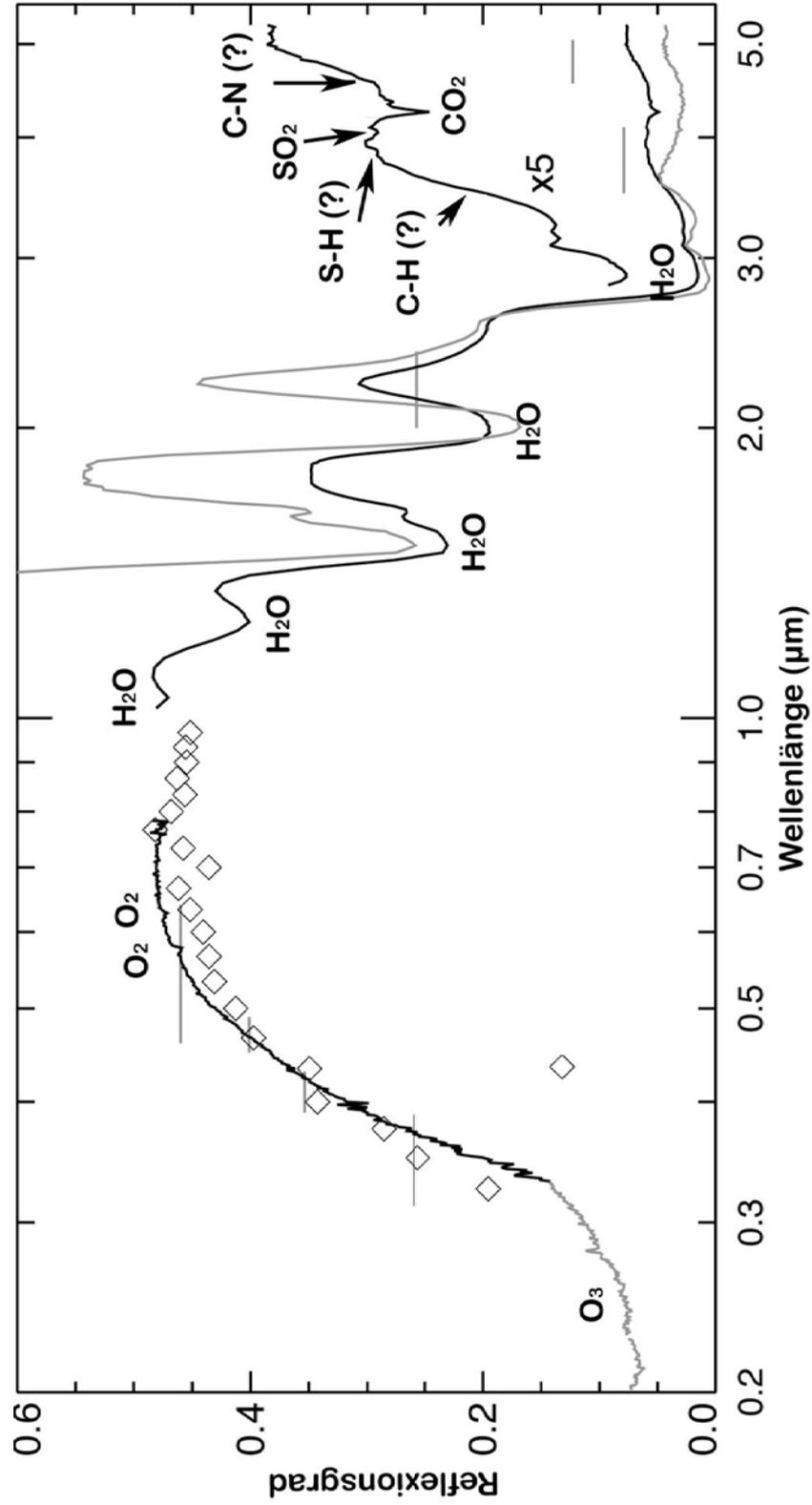


Abb. 4.1: Reflexionsspektrum von Ganymed, mit Wasseris als Hauptkomponente aber auch weiteren Nebenbestandteilen im Oberflächenmaterial von Ganymed. Es repräsentiert Einzelmessungen im Wellenlängenbereich von 0,23 bis 0,33µm (Noll et al., 1996), 0,33 bis 0,78µm (Spencer et al., 1995), 0,32 bis 0,97µm (McFadden et al., 1980) und 2x von 1,02 bis 5,23µm (Galileo-NIMS-Beobachtung GINGLOBAL, Carlson et al., 1996; McCord et al., 1998). Zur besseren Darstellung wurde das Reflexionsspektrum zwischen 0,8 und 5,23µm unterschiedlich skaliert (5x)(nach Bagenal et al., 2004).

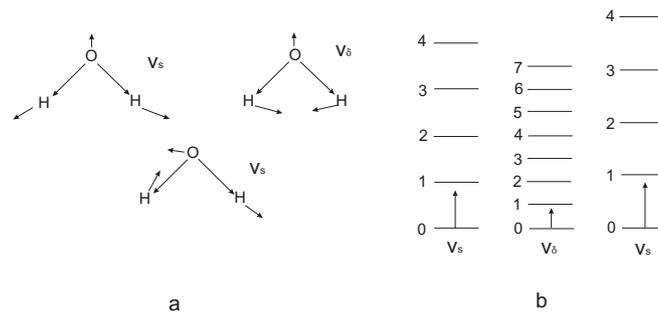


Abb. 4.2: (a) Molekulare Grundschwingungen im Wassereismolekül: v_s - symmetrische Valenzschwingung (O-H) bei $3,17\mu\text{m}$, δ - Deformationsschwingung (H-O-H) bei $6,27\mu\text{m}$ und v_{as} - asymmetrischen Valenzschwingung (O-H) bei $2,96\mu\text{m}$. (b) Jede Grundschwingung ist assoziiert mit einer Schwingungsfrequenz bzw. Wellenlänge, die der Energiedifferenz zwischen dem Schwingungszustand $v=0$ und $v=1$ entspricht (angezeigt durch die Pfeile) (adaptiert von McMillan & Hofmeister, 1988).

<i>Schwingungsmodus</i>	<i>Wellenlängenposition (μm)</i>
v_s	3,17
v_{as}	2,96
$\delta + v_{as}$	2,02
$v_s + v_{as}$	1,94
$2v_{as}$	1,52
$v_s + \delta + v_{as}$	1,25
$3v_{as}$	1,04
$3v_s + v_{as}$	0,81

Tab. 4.1: Wellenlängenpositionen der Absorptionen von Wassereis und deren Zuweisung der entsprechenden molekularen Schwingungen im NIR und IR, die auf den drei molekularen Grundschwingungen basieren: v_s – symmetrische O-H-Valenzschwingung (engl.: symmetric stretch), δ – H-O-H-Deformationsschwingung (engl.: bending mode), v_{as} – antisymmetrische O-H-Valenzschwingung (nach Pieters & Englert, 1993; Hunt & Salisbury, 1970).

4.1.2 Physikalische Eigenschaften von Wassereis

Die Reflexionseigenschaften von Wassereis variieren insbesondere in Abhängigkeit von den physikalischen Parametern Partikelgröße und Temperatur aber auch in Abhängigkeit von der Kristallstruktur (McCord *et al.*, 1999; Hapke, 1993; Verbiscer & Helfenstein, 1998).

Partikelgröße

In Abbildung 4.3 sind theoretische Reflexionsspektren von Wassereis für Partikelgrößen zwischen $10\mu\text{m}$ und $100\mu\text{m}$ dargestellt. Deutlich ist der Einfluss der Partikelgröße auf den generellen Verlauf des Spektrums und den Intensitäten der einzelnen Absorptionen zu erkennen. So sinkt der Reflexionsgrad zwischen ~ 1 und $3\mu\text{m}$, je größer die Partikel von Wassereis sind. Des Weiteren zeigen die Spektren deutliche Veränderungen in der Intensität der Absorptionen. Die Intensitäten steigen im Allgemeinen mit der Partikelgröße an. Dies gilt, solange die Absorptionen nicht gesättigt sind. Tritt die Sättigung ein, verbreitert sich die Absorption und die Intensität nimmt wieder ab (Clark 1980 a).

Die Reflexionsspektren von Wassereis sind zusätzlich durch ein lokales Reflexionsmaximum bei $3,6\mu\text{m}$ charakterisiert, welches als Spiegelreflexion an der Oberfläche einzelner Partikel verstanden wird (Lebosfky & Feierberg, 1985). Mit abnehmender Partikelgröße geht die Zunahme der Reflexionsgrenzen im Wassereis einher (siehe Kap. 3.1), was in einem steigenden Reflexionsmaximum bei $3,6\mu\text{m}$ resultiert.

Temperatur und Kristallstruktur

Untersuchungen der Effekte von Temperaturveränderungen und Kristallmodifikationen auf das Reflexionsvermögens von Wassereis zeigten bisher, dass vor allem die Absorption bei $1,65\mu\text{m}$ und das lokale Reflexionsmaximum bei $3,1\mu\text{m}$ auf Veränderungen dieser Parameter reagieren. In Abbildung 4.4 sind die Reflexionsspektren von Wassereis aus Abbildung 4.3 detailliert für den Spektralbereich um $3\mu\text{m}$ einschließlich des lokalen Reflexionsmaximums bei $3,1\mu\text{m}$ dargestellt. Die Intensität und Form dieser spektralen Signatur ist unabhängig von der Partikelgröße aber ein Indikator für das Vorhandensein von amorphem (gestrichelte Linie) und kristallinem Wassereis (durchgezogene Linie). In kristallinem Wassereis ist dieses Reflexionsmaximum durch eine dreiteilige Form gekennzeichnet, während in amorphem Wassereis nur ein relativ breites einfaches Reflexionsmaximum zu beobachten ist. Hansen & McCord (2004) untersuchten die globale räumliche Verteilung von amorphem und kristallinem Wassereis über die Ganymedoberfläche. Sie zeigen, dass die Oberfläche von Ganymed sowohl amorphes als auch kristallines Wassereis aufweist. Sie vermuten einen höheren Anteil von amorphem Wassereis auf der Heckseite und in den polaren Regionen und mehr kristallines Wassereis in niedrigen geographischen Breiten der von Jupiter abgewandten Hemisphäre. In den äquatorialen Regionen von Ganymed treten beide Kristallstrukturen auf. Im Gegensatz zu Ganymed weist die Oberfläche von Europa vorwiegend amorphes Wassereis und Callisto vorwiegend kristallines Wassereis auf (Hansen & McCord, 2004). Spektrale Unterschiede zwischen den verschiedenen kristallinen Strukturen von Wassereis (kubisch, hexagonal) sind vernachlässigbar gering (Schmitt *et al.*, 1998).

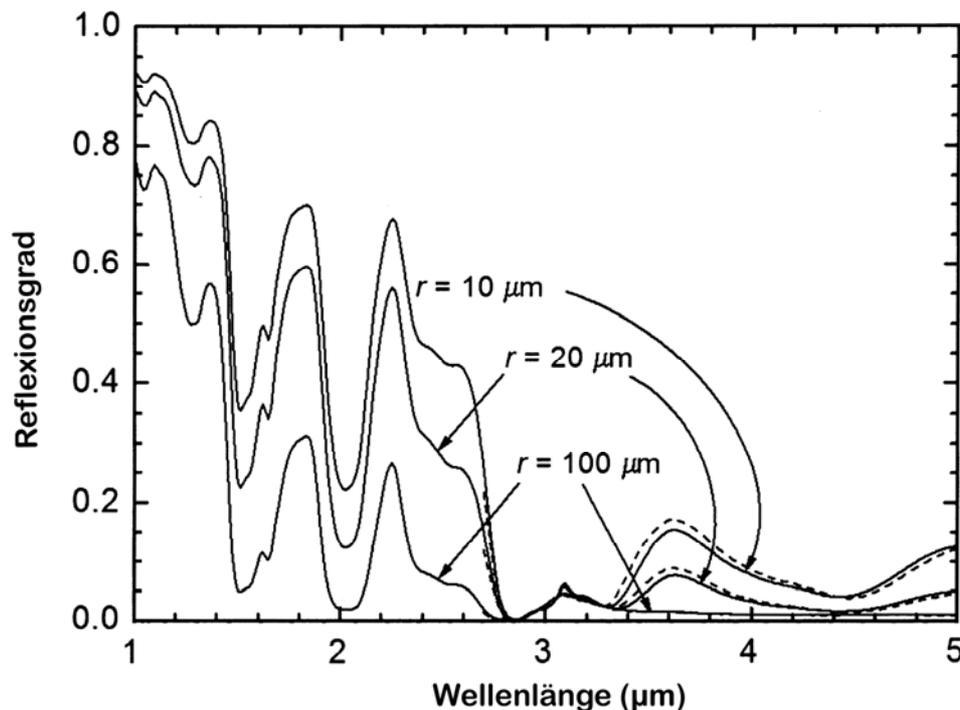


Abb. 4.3: Modellspektren von Wassereis: kristallines Wassereis (durchgezogene Linien) mit Partikelgrößen von 10, 20 und $100\mu\text{m}$ (Temperatur: 130 – 150 K) und amorphes Wassereis (gestrichelt) im Wellenlängenbereich von 2,5 bis $5\mu\text{m}$ mit den gleichen Partikelgrößen (nach Hansen & McCord, 2004) (Erklärung siehe Text).

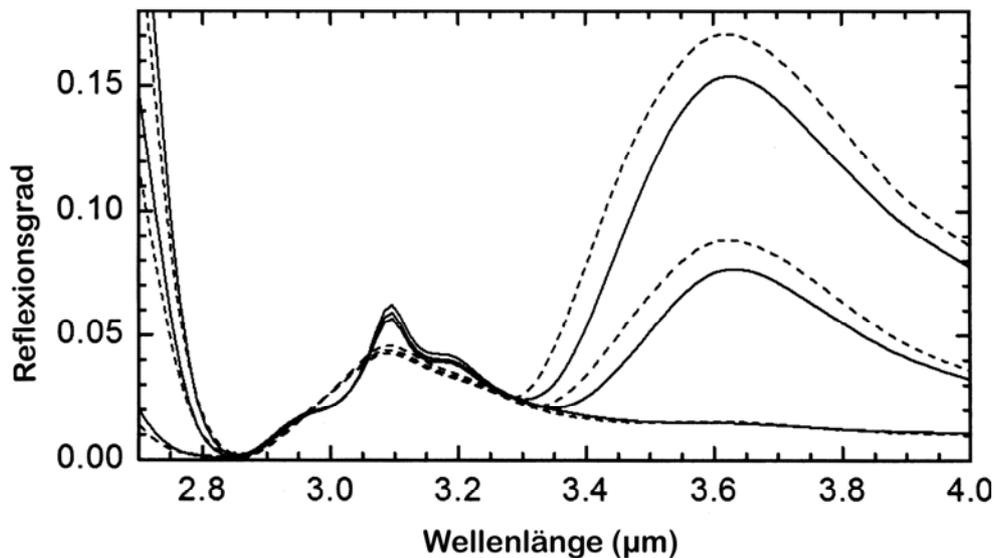


Abb. 4.4: Vergleich des Wellenlängenbereichs um $3\mu\text{m}$ der Modellspektren von Wassereis aus Abb. 4.3 einschließlich des Reflexionsmaximums bei $3,1\mu\text{m}$. Das Reflexionsmaximum zeigt eine einfachen Verlauf im amorphen Wassereis (gestrichelt) und eine komplexe dreiteilige Struktur im kristallinen Wassereis (durchgezogene Linie). Es zeigt keine signifikanten Abhängigkeiten mit der Partikelgröße von Wassereis. Deutliche Unterschiede mit der Partikelgröße zeigt dagegen das Reflexionsmaximum bei $3,6\mu\text{m}$ (nach Hansen & McCord, 2004).

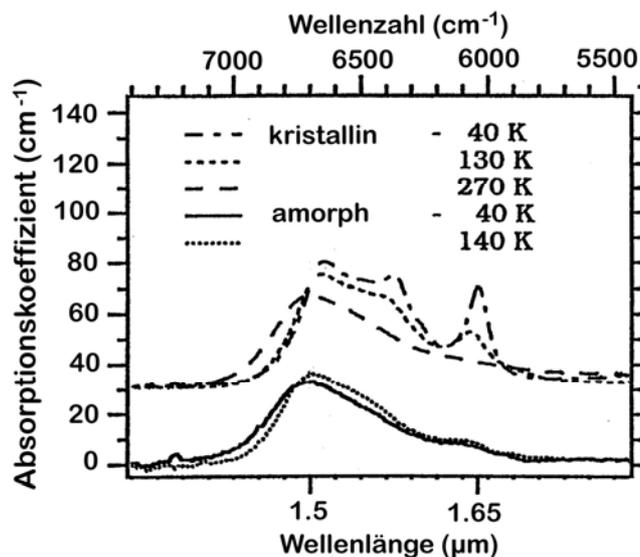


Abb. 4.5: Vergleich der Absorption von Wassereis bei $1,5\mu\text{m}$ in amorphem und kristallinem Wassereis bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Reflexionsspektren von amorphem Wassereis wurden bei 40 K unmittelbar nach der Kondensation bzw. bei 140 K kurz vor der Kristallisation gemessen. Die schwache Absorption bei $1,65\mu\text{m}$ erscheint zum einen deutlich temperaturabhängig im kristallinen Wassereis und ist kaum erkennbar in amorphem Wassereis (nach Schmitt et al., 1998).

Die Absorption bei $1,65\mu\text{m}$ zeigt ebenfalls eine hohe Variabilität in Anhängigkeit der Kristallstruktur (Abb. 4.5). Sie ist gut ausgebildet in kristallinem Wassereis, fehlt jedoch fast ausschließlich in amorphem Wassereis (Schmitt et al., 1998; Hansen & McCord, 2004). Ein ähnlicher Effekt ist bei Veränderungen der Temperatur von Wassereis zu beobachten. Die Absorption fehlt im relativ „warmen“ kristallinen Wassereis bei 270 K und verstärkt sich mit abnehmender Temperatur (Grundy & Schmitt, 1998; Hansen und McCord, 2004). Im Bereich der Temperaturen der Ganymedoberfläche von 90 bis 150 K (Kap. 2) sind im kristallinen Wassereis keine wesentlichen Unterschiede in Ausprägung der Absorption zu erwarten. Die beiden Kristallmodifikationen sind daher in diesem Temperaturbereich zumindest qualitativ gut voneinander zu unterscheiden. Clark (1981b) weist

zusätzlich darauf hin, dass die Temperaturabhängigkeit der Absorption bei $1,65\mu\text{m}$ nur für Wassereis mit relativ großen Partikeln gilt.

4.2 Eismineralmischungen

Neben Wassereis wird Gesteinsmaterial im Oberflächenmaterial von Ganymed vermutet, dessen mineralogische Zusammensetzung bisher nicht identifiziert werden konnte. Fraglich ist auch, ob es sich bei diesem Gesteinsmaterial um ein oder mehrere unterschiedliche Materialien handelt. Die wenigen Hinweise im Reflexionsspektrum bilden bisher der niedrige Reflexionsgrad im sichtbaren Licht, die Abschwächung und Modifizierung der spektralen Signaturen von Wassereis sowie ein starker Abfall des Reflexionsgrades zwischen $0,6$ und $0,3\mu\text{m}$ (Clark, 1980 a, b).

Der Abfall des Reflexionsgrades in Richtung des ultravioletten Lichts zwischen $0,6$ und $0,3\mu\text{m}$ lässt sich zurückführen auf Elektronenübergänge infolge des Fe^{3+} -Ions (Kap. 3.1) und deutet auf Komponenten mit einem hohen Anteil an oxidiertem Eisen hin (Clark, 1980 a, b).

Untersuchungen um das Gesteinsmaterial zu identifizieren, konzentrierten sich bisher auf das Gesteinsmaterial von Ganymeds Nachbarmond Callisto auf der Basis von erdgebundenen Teleskopspektren (Roush *et al.*, 1990; Calvin & Clark, 1991, 1993). Roush *et al.* (1990) modellierte das Spektrum mit den drei Komponenten Wassereis, Magnetit und Serpentin. Magnetit ist ein gesteinsbildendes Eisenoxidmineral und Serpentin (gehört zur Gruppe der Phyllosilikate) ein hydrothermales Alterationsprodukt von Silikaten (Olivin und Pyroxen). Nach ihnen stimmt eine mikroskopische Mischung dieser drei Komponenten am besten mit dem Spektrum von Callisto überein. Calvin & Clark (1991, 1993) schlagen an Magnesium (Mg) und Eisen (Fe) reiche Phyllosilikate als Kandidaten für das Gesteinsmaterial auf Callisto vor. Diese Phyllosilikate wurden in einigen an Kohlenstoff reichen Meteoriten (engl.: *carbonaceous meteorites*, CM) gefunden. Solche Alterationsprodukte könnten auf eisartigen Oberflächen als Konsequenz lokaler Schmelzvorgänge infolge von Einschlagsprozessen entstanden sein. Das Gesteinsmaterial umspannt möglicherweise die gesamte Abfolge von ausgetrocknet bis vollständig hydratisiert (Fanale & Cannon, 1979).

Hydrate sind wie Hydroxide (z.B. Goethit - FeOOH) durch spektrale Signaturen charakterisiert, welche sich geringfügig von denen von Wassereis unterscheiden. In den Tabellen 4.2 und 4.3 sind die Wellenlängenpositionen der Absorptionen von in den Kristallgittern von Mineralen eingelagerten OH-Ionen und H_2O -Molekülen zusammengefasst.

<i>Schwingungsmodus</i>	<i>Wellenlängenposition (μm)</i>
ν_s	3,05
ν_{as}	2,94
2δ	3,04
$\delta + \nu_{as}$	1,9
$2\nu_{as}, 2\nu_s$	1,4
$2\nu_{as} + \delta$	1,21
$3\nu_{as}, 3\nu_s$	0,9

Tab. 4.2: Wellenlängenpositionen der Absorptionen von Wasser eingelagert im Kristallgitter und deren Zuweisung zu den entsprechenden molekularen Schwingungen im NIR und IR, welche auf den drei molekularen Grundschnwingungen basieren: ν_s – symmetrische O-H-Valenzschwingung (engl.: symmetric stretch), δ – H-O-H-Deformationsschwingung (engl.: bending mode), ν_{as} – antisymmetrische O-H-Valenzschwingung (nach Pieters & Englert, 1993).

Der Spektralbereich um $3\mu\text{m}$ in den Spektren von Hydraten und Hydroxiden wird wie im Falle von Wassereis von Absorptionen infolge der molekularen Grundschnwingungen ν_a und ν_{as} von H_2O und ν_a

von OH⁻ dominiert. Die genaue Wellenlängenposition variiert, je nachdem an welcher Stelle sie sich im Kristallgitter befinden. Verschiedene Absorptionen, die auf diesen Grundschnwingungen basieren sind möglich, wenn verschiedene Plätze im Kristallgitter besetzt sind. Eine Unterscheidung der einzelnen Gruppen wird daher erschwert. Es existieren jedoch Unterschiede bei kürzeren Wellenlängen infolge von Oberschnwingungen und Kombinationen der Grund- und Oberschnwingungen (*Miller & Willis, 1956*). Sowohl H₂O als auch OH⁻ weisen eine Absorption bei 1,4µm ($2\nu_{as}$, $2\nu_s$ bzw. nur $2\nu_s$) auf. Hydratisierte Verbindungen zeigen weiterhin infolge von Oberschnwingungen und Kombinationen von Grund- und Oberschnwingungen Absorptionen bei 1,2 und 1,9µm ($2\nu_{as} + \delta$ und $\delta + \nu_{as}$). Falls nur Hydroxide vorhanden sind, treten diese Absorptionen nicht auf. Dagegen besitzen sie Absorptionen zwischen 2 und 2,4µm infolge der Kombination von ν_s von OH⁻ und δ der Metall-O-H – Bindung (*Aines & Rossman, 1984; Chapman & Nacey, 1958; Hunt, 1977; Hunt & Ashley, 1979*).

<i>Schwingungsmodus</i>	<i>Wellenlängenposition (µm)</i>
ν_s	~2,79
$2\nu_s$	1,4
$3\nu_s$	0,9

Tab. 4.3: Wellenlängenpositionen der Absorptionen der funktionellen Gruppe im Kristallgitter und deren Zuweisung zu den entsprechenden molekularen Schwingungen im NIR und IR, welche auf der molekularen Grundschnwingung ν_s , eine symmetrische O-H-Valenzschwingung (engl.: symmetric stretch) (nach *Pieters & Englert, 1993*).

Physikalische Eigenschaften

Um quantitative Aussagen zum Massenanteil von Wassereis und dem Gesteinsmaterial zu machen, sind zum einen Kenntnisse der mineralogischen und physikalischen Eigenschaften des Gesteinsmaterials notwendig. Dies ist jedoch wegen der bisher nicht erfolgten Identifizierung des Gesteinsmaterials auf Ganymed nicht möglich. Ein weiterer Faktor ist zum anderen auch die Art und Weise, wie die beiden Komponenten des Oberflächenmaterials, also Wassereis und das Gesteinsmaterial miteinander vermischt sind (Kap. 3.1). Dafür gibt es bisher nur wenige Hinweise. So wird vor allem für das dunkle Gebiet von Ganymed (und Callisto) vermutet, dass Wassereis und das Gesteinsmaterial im Zuge der fortschreitenden thermal bedingten Entmischung der beiden Komponenten (siehe Kap. 2) räumlich voneinander getrennt wurden. Sie sind somit in separaten Gebieten als reine Substanzen abgelagert (*Dollfus, 1975; Mills & Thompson, 1975; Pollack et al., 1978; Spencer & Maloney, 1984; Spencer, 1987 b; Prockter et al., 1998; Oberst et al., 1999*).

Bisherige Berechnungen des Massenanteils von Wassereis wurden auf der Grundlage der Referenzspektren von im sichtbaren Licht dunklen, stark absorbierenden opaken und im NIR spektral neutralen Materialien (z.B. Pyrit, Kohle) anstelle des Gesteinsmaterials auf Ganymed durchgeführt. So geben *Clark & McCord (1980)* und *Clark (1980 a, b)* den Massenanteil von Wassereis im Oberflächenmaterial von Ganymed für eine makroskopische Mischung mit etwa 65 % und unter der Annahme einer mikroskopischen Mischung mit etwa 90 % an.

Untersuchungen der physikalischen (z. B. Porosität) und photometrischen Eigenschaften des Oberflächenmaterials von Ganymed auf der Basis der empirischen photometrischen Modelle zeigten bisher keine wesentlichen (v. a. hemisphärische) Veränderungen in den physikalischen Eigenschaften über dessen Oberfläche (*Veverka, 1977; Squyres & Veverka, 1981; Johnson et al., 1983; Helfenstein, 1986; Buratti, 1991, 1995; Buratti et al., 1988*). Vermutlich gleichen sich die Effekte des Bombardements mit (Mikro-)Meteoriten und der einfallenden Strahlung aus Jupiters Magnetosphäre auf Ganymed aus (*Buratti, 1991*). Jedoch ist Ganymed infolge des stärkeren Einfalls von (Mikro-)

Meteoriten auf die Bugseite hier im sichtbaren Licht um etwa 10 bis 15 % heller als auf der Heckseite (Veverka, 1977).

4.3 Volatile Verbindungen

Das Reflexionsspektrum von Ganymed in Abbildung 4.1 zeigt neben Wassereis zusätzliche Absorptionen, welche mit unterschiedlichsten chemischen Verbindungen in Zusammenhang gebracht wurden. Diese sind nur zu geringen Anteilen im Oberflächenmaterial von Ganymed enthalten. Einige sind eventuell *in situ* entstanden. Andere sind wahrscheinlich das Resultat chemischer Veränderungen, welche durch die Wechselwirkung des Oberflächenmaterials mit einfallenden Partikeln aus der Magnetosphäre von Jupiter oder ultravioletter Sonneneinstrahlung induziert werden.

Beobachtungen erdgebundener Teleskope und des Hubble Weltraum Teleskops (HST, *Hubble Space Telescope*) ermöglichten die Entdeckung von Sauerstoffverbindungen, wie O₂ (Spencer et al., 1995) und O₃ (Ozon) (Noll et al., 1996). Ozon wurde auf Grund einer breiten ultravioletten Absorption bei 2600Å (Noll et al., 1996; Hendrix et al., 1999 a, b) und die Existenz von molekularem Sauerstoff wurde durch zwei Absorptionen im sichtbaren Licht bei 1304 und 1356Å (Spencer et al., 1995) nachgewiesen. Spencer et al. (1995) vermuten, dass sich O₂ vor allem auf der Heckseite von Ganymed konzentriert und im eisreichen Oberflächenmaterial eingeschlossen ist. Die Moleküle liegen dadurch dicht genug zusammen, um Elektronenübergänge hervorzurufen. Vidal et al. (1997) vermuten dagegen, dass O₂ eine dünne Atmosphäre um Ganymed bildet und während der Nacht kondensiert (Barth et al., 1997).

Das abbildende Spektrometer NIMS („*Near Infrared Mapping Spectrometers*“) an Bord der Raumsonde Galileo (Kap. 4) zeigt durch eine Absorption bei 4,25µm Hinweise auf CO₂ (McCord et al. 1997, 1998a; Hibbitts et al., 2000, 2003b). Die Wellenlängenposition, die Absorptionstiefe und –breite variieren in Abhängigkeit der Zustandsform, der Temperatur, der Partikelgröße und des Anteils von CO₂ (McCord et al., 1998). Die exakte Wellenlängenposition der Absorption wird mit $4,256 \pm 0,008\mu\text{m}$ angegeben (McCord et al., 1998), welche sich von der Absorption von gefrorenem CO₂ bei 4,27µm deutlich unterscheidet und eher dem von gasförmigen CO₂ entspricht. Die Absorption von gasförmigem CO₂ ist jedoch gewöhnlich deutlich breiter, was aus der Überlagerung der zusätzlichen Rotationsschwingungen der freien CO₂-Moleküle im Gas resultiert (siehe Kap. 3.1.2; Goody & Yung, 1989). Die Absorptionsbreite entspricht wiederum eher der von gefrorenen oder flüssigen CO₂ und wird als Indikator dafür gewertet, dass gasförmiges CO₂ in der Kristallstruktur anderer Minerale eingeschlossen ist (Spencer et al. 1995; Calvin et al., 1996; Noll et al., 1996; Johnsen & Jesser, 1997) und spektroskopisch mehr dem CO₂ in flüssiger oder fester Zustandsform ähnelt.

Neben Kohlendioxid werden Schwefel und Schwefeldioxid (SO₂) auf Ganymed vermutet. Sie wurden durch Absorptionen im Ultraviolett entdeckt (Nelson et al., 1987 a). Domingue et al. (1997a, 1998) beobachten eine schwache Absorption bei 0,32µm in den Aufnahmen des IUE (*International Ultraviolet Explorer*) von 1984 bis 1986 und 1996 und schlussfolgerten ebenfalls SO₂ auf der Ganymedoberfläche. SO₂ wurde ebenfalls mit NIMS im NIR durch eine jedoch sehr schwache Absorption in den Reflexionsspektren von Ganymed bei 4,05µm identifiziert (Carlson et al., 1996; McCord et al., 1997, 1998). Die Wellenlängenposition unterscheidet sich sowohl von der für gefrorenes SO₂ typischen Wellenlängenposition (4,07µm, Fanale et al., 1979; Smythe et al., 1979) als auch von der für „freies“ gasförmiges SO₂ (4,03µm, Pierson et al., 1956). Vermutlich befindet sich das SO₂ im gasförmigen Zustand und ist im Oberflächenmaterial eingeschlossen (McCord et al., 1998). Es wurde sowohl in Regionen, die reich und arm an Wassereis sind, beobachtet.

Und letztendlich deuten Absorptionen zwischen 3 und 5µm auf die chemischen Verbindungen C-H, C≡N (eventuell HCN), C-H und S-H im Oberflächenmaterial von Ganymed hin (McCord et al. 1997, 1998). Die Absorptionen in den Reflexionsspektren von NIMS bei 4,57 und 3,4µm, die als Folge von

C≡N- und C-H-Verbindungen interpretiert werden, sind konsistent mit denen, wie sie in den Reflexionsspektren von Tholinen entstehen (*McCord et al.*, 1998). Es handelt sich dabei um Rückstände, welche im Labor durch Energiezufuhr in einer Gasmischung von Molekülen, die chemischen Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N) enthalten, entstehen. Diese einfachen organischen Moleküle könnten das Resultat chemischer Reaktionen infolge einfallender magnetosphärischer Partikeln sein aber auch eingebrachtes Material von Asteroiden und Kometen repräsentieren (*McCord et al.*, 1997, 1998).