

2 Ganymed – „Schönster der Sterblichen“

Der Jupitermond Ganymed wurde benannt nach dem schönen trojanischen Königssohn (gr.: *ganymedes* = schöner Knabe oder „Schönster der Sterblichen“; *Irmscher*, 1990) der griechischen Sagenwelt, den Göttervater Zeus in Adlergestalt auf den Olymp entführt hat, damit er dort sein Geliebter und Mundschenk der Götter sei (Abb. 2.1). Ganymed gehört neben Io, Europa und Callisto (benannt nach weiteren Geliebten von Zeus) zu den großen Galileischen Monden, die in einer Entfernung von 5,2 AE (1 AE = 149,6 Mill. km) von der Sonne den Planeten Jupiter umkreisen. Benannt nach Galileo Galilei (1564-1642), wurden sie von diesem und unabhängig davon von Simon Marius (1570-1624) im Jahre 1610 erstmals beobachtet. Letzterer gab den Monden ihre heute gebräuchlichen Namen. Galileo erkannte als erster ihre wahre Natur als Monde, die sich um den Planeten Jupiter bewegen.



Abb. 2.1: Zeus entführt Ganymedes, Terrakottastatue, um 475 v. Chr. (Olympia/Griechenland, Museum).

Mittels erdgebundener Teleskopbeobachtungen im Spektralbereich des visuellen Lichts und des Nahen Infrarots wurde erstmals gefrorenes Wasser auf der Oberfläche von Ganymed (und Callisto) identifiziert (*Kuiper*, 1961).

Nahezu vier Jahrhunderte nach ihrer Entdeckung besuchte die erste Raumsonde Galileos Welt. 1973 und 1974 passierten die Raumsonden Pioneer 10 und 11 die Galileischen Monde (*Fimmel et al.*, 1977; *Morrison & Samz*, 1980; *Rogers*, 1995). Details der wissenschaftlichen Ergebnisse der beiden Missionen finden sich bei *Gehrels* (1976). Im Jupitersystem dienten die beiden Missionen vor allem präzisen quantitativen Messungen der Massen, Gravitationskräfte, Magnetfeldstärken u. a., die vorher nur geschätzt werden konnten.

Die Oberflächenbeschaffenheit von Ganymed und der anderen Galileischen Monde kennt man erst seit den Beobachtungen der Raumsonden Voyager 1 und 2 im Jahre 1979 (5. März und 9. Juli) genauer. Eine detaillierte Zusammenstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse der beiden Missionen während ihres Aufenthalts im Jupitersystem bieten *Stone & Lane* (1979 a, b), *Burns & Matthews* (1986), *Greenberg & Brahic* (1984) und *Dessler* (1983). Im Gegensatz zu den bisher durch erdgebundene Teleskope gesehenen Lichtpunkten, entpuppten sich Ganymed und die anderen Galileischen Monde in den Bilddaten der Raumsonden als einzigartige Himmelskörper. Die Abbildung 2.2 zeigt die Galileischen Monde. Die dem Jupiter am nächsten gelegene Io ist der vulkanisch aktivste Himmels-

körper unseres Sonnensystems. Wenigstens acht aktive Vulkane wurden von Voyager 1 auf Io entdeckt, welche Rauchfahnen (engl.: *plumes*) aufwiesen, die sich bis in 250 km Höhe über die Oberfläche ausdehnten. Sechs von ihnen waren noch aktiv, als Voyager 2 sechs Monate später an Io vorbei flog (Stone & Lane, 1979 a, b). Europas Eiskruste deutete aufgrund der geringen Bedeckung mit Einschlagskratern auf eine geologisch junge Oberfläche hin, die von zahlreichen linearen Brüchen durchzogen wird (Stone & Lane, 1979 a, b). Die beiden äußeren Monde Ganymed und Callisto wirken wie Zwillinge, die bei der Geburt getrennt und unterschiedliche Lebenswege eingeschlagen haben. Beide Monde weisen dunkle, dicht bekraterte geologisch alte Regionen auf. Doch nur Ganymed zeigt zusätzlich helle Gebiete, die vermuten lassen, dass die ehemalige Eiskruste hohen Spannungen ausgesetzt war, die tektonische Vorgänge auslösten (Stone & Lane, 1979 a, b).

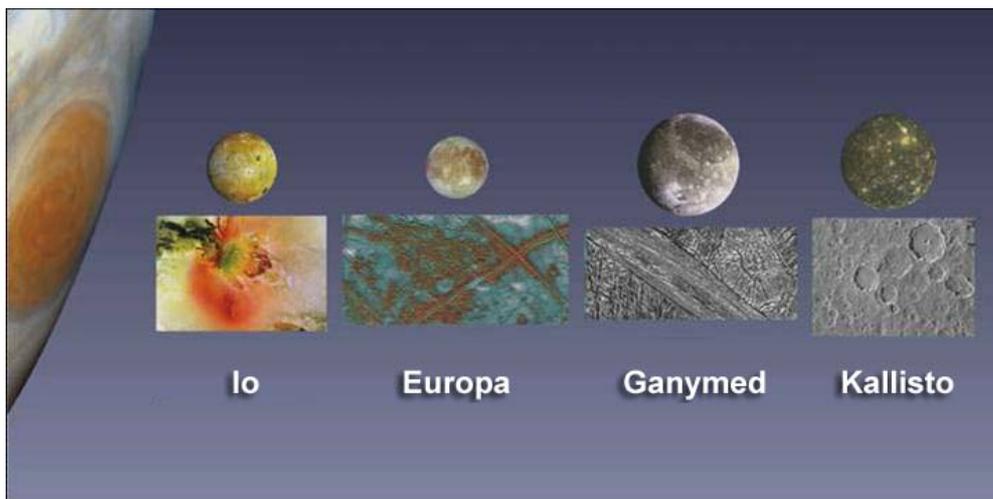


Abb. 2.2: Die Galileischen Monde von Jupiter. Die Größe der Monde in der Abbildung wurde in Abhängigkeit ihrer relativen Größe zueinander skaliert. Die Bilddaten stammen von den Kamerasystemen der Missionen Voyager 1, 2 und Galileo. Die Entfernung Jupiter ist jedoch nicht maßstabsgerecht (nach: *Bagenal et al., 2004*).

Die Kameras der Voyager-Raumsonden zeigten Oberflächenstrukturen bis zu einem kleinsten messbaren Durchmesser von weniger als einem Km (*Smith et al., 1979 a, b*). Jedoch lieferten die Voyager-Missionen nur einen flüchtigen Blick auf die Galileischen Monde. Erst durch die Messungen der unterschiedlichsten Instrumente der Raumsonde Galileo wurden bedeutende Informationen zu den Jupitermonden aufgedeckt (*Harland, 2000; Meltzer, 2004; Johnson et al., 1992*). Die Raumsonde erreichte im Dezember 1995 den Jupiter und erforschte als erste und bisher einzige Raumsonde das Jupitersystem über einen Zeitraum von etwa sieben Jahren. Die folgende Beschreibung der bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse zu Ganymed basiert im Wesentlichen auf den Erkenntnissen der Galileo Mission und folgen den detaillierten Ausführungen in *Bagenal et al. (2004)*.

2.1 Stellung von Ganymed im Sonnen- und Jupitersystem

Mit derzeit 66 bekannten Mitgliedern ist die Familie der Jupitermonde die größte im Sonnensystem (*Burns et al., 2004; Jewitt et al., 2004*). Die Jupitermonde bilden drei Gruppen: Die innerste Gruppe umkreist den Jupiter in nahezu kreisförmigen Bahnen. Zu ihnen gehören die Galileischen Monde, welche zugleich die größten Monde im Jupitersystem sind und vier kleinere Monde (Metis, Adrasteia, Amalthea, Thebe), die sich innerhalb der Umlaufbahn von Io befinden. Die zweite Gruppe wird von vier weiteren Monden (Leda, Himalia, Lysithea, Elara) gebildet, die alle einen mittleren Abstand von 11 Millionen km von Jupiter besitzen. Ihre Bahnen sind etwas exzentrischer als die der inneren Gruppe und mit etwas weniger als 30° zu ihnen geneigt. Die restlichen Monde gehören zur dritten Gruppe. Ihre Anzahl wird mit 49 angegeben (Stand Juni 2003, *Jewitt et al., 2004*). Sie bewegen sich

zum größten Teil in rückläufigen Bahnen, die 150° bis 160° gegen die Äquatorebene von Jupiter geneigt sind. Alle Mitglieder der äußersten Gruppe umkreisen Jupiter in einer mittleren Entfernung von über 21 Millionen km. Ihre Bahnen sind stark exzentrisch. Für einen detaillierten Einblick in die einzelnen Gruppen sei hier auf die Arbeiten von *Burns et al.* (2004) und *Jewitt et al.* (2004) verwiesen. Als größter Mond im Sonnensystem übertrifft Ganymed mit einem Durchmesser von 5262 km seinen Nachbarmond Callisto (4800 km) und sogar den Planeten Merkur. Jedoch liegt die Masse von Ganymed mit $1,49 \times 10^{23}$ kg ($1,065 \times 10^{23}$ kg für Callisto) (*Lewis*, 1997) unter der von Merkur. Die mittlere Dichte von Ganymed beträgt $1,93 \times 10^3$ kg/m³ ist ebenso wie die von Callisto ($1,83 \times 10^3$ kg/m³) (Tab. 2.1) deutlich geringer als die der beiden inneren Galileischen Satelliten Io und Europa (*Lewis*, 1997). Die geringe Dichte ist ein Indikator dafür, dass Ganymed wie auch Callisto neben Gesteinsmaterial zu einem großen Teil aus Wassereis bestehen. Der steigende Anteil von Wassereis mit zunehmender Entfernung vom Jupiter hängt vermutlich mit einem Temperaturgradienten zur Zeit der Entstehung der Monde zusammen, analog zu demjenigen des solaren Urnebels, aus dem sich die Planeten unseres Sonnensystem gebildet haben (*Lunine & Stevenson*, 1982; *Lewis*, 1997). Die heutige Existenz von Wassereis im Jupitersystem geht konform mit der Annahme, dass ab einer Entfernung von der Sonne von ungefähr 5 AE Wassereis geologisch stabil ist, das heißt sich nicht innerhalb des Alters unseres Sonnensystems von ungefähr 4,6 Mrd. Jahre verflüchtigt (*Cruikshank et al.*, 1998). Jupiters mittlerer Abstand von der Sonne beträgt 5,2 AE mit einem Minimum von 4,95 AE. Die Tagestemperaturen auf der Oberfläche von Ganymed (und Callisto) überschreiten 170 K nicht (Tab. 2.1).

Ganymed bewegt sich, wie die anderen Galileischen Monde, rechtläufig und nahezu auf einer Kreisbahn um den Planeten Jupiter. Die Bahn von Ganymed ist nur um $0,2^\circ$, ähnlich der Bahn von Callisto ($0,28^\circ$), gegen die Äquatorebene von Jupiter geneigt. Ganymed bewegt sich in einer Bahn, deren große Halbachse 1 070 000 km (Callisto: 1 883 000) beträgt und eine Exzentrizität von nur 0,001 (Callisto: 0,007) aufweist (Tab. 2.1). Ganymed bewegt sich zusammen mit den anderen Galileischen Monden innerhalb der ausgedehnten Magnetosphäre von Jupiter. Die Größe der Magnetosphäre ist veränderlich. Sie erstreckt sich bis zu Distanzen zwischen 50 und 100 Jupiterradien. In den äußeren Gebieten der Jupitermagnetosphäre, außerhalb von 20 Jupiterradien, ist das Magnetfeld mehr oder weniger auf eine Ebene beschränkt, die den Äquator des Planeten schneidet. In diesem scheibenförmigen Gebiet fließen elektrische Ströme in einem vom Magnetfeld eingefangenen „Plasma“ niedriger Energie. Diese „Stromscheibe“ rotiert wie die gesamte Magnetosphäre mit dem Planeten. Dagegen konzentrieren sich innerhalb von 20 Jupiterradien in das Magnetfeld eingefangene Teilchen hoher Energie (=Hauptstrahlungsgürtel), die sich wie die „Stromscheibe“ um die magnetische Achse bewegen. Mit einer mittleren Entfernung von über 26 Jupiterradien bewegt sich Callisto nicht mehr in den Bereichen der höchsten Intensitäten des Hauptstrahlungsgürtels. Dagegen befindet sich Ganymed, der in einer mittleren Distanz von 15 Jupiterradien Jupiter umläuft, zusammen mit den beiden inneren Galileischen Monden Io und Europa noch vollständig im Bereich des Hauptstrahlungsgürtels und wird von dessen energetischen Teilchen beeinflusst (Tab. 2.1).

Alle Galileischen Monde besitzen eine synchrone Rotation, das heißt, ihre Rotationsperiode ist gleich der Umlaufzeit von Jupiter. Sie kehren daher dem Jupiter ständig die gleiche Seite zu und besitzen eine „Bug-“ und eine „Heckseite“, die beim Umlauf um den Planeten nach vorn bzw. nach hinten weisen. Zwischen Io, Europa und Ganymed besteht eine Resonanzbeziehung (= Laplace Resonanz; Laplace, 1805). So verhalten sich die Umlaufzeiten von Io, Europa und Ganymed um Jupiter (1,769, 3,55 bzw. 7,155 Tage) wie 1:2:4, wodurch sich die Monde alle 436,7 Tage entlang einer gedachten Linie anordnen (*Greenberg*, 1982; *Burns*, 1986 und *Peale*, 1986).

So ähnlich Ganymed und Callisto auf den ersten Blick wirken, desto unterschiedlicher sind die beiden Monde bei näherer Betrachtung. Die Beobachtungen der Raumsonden haben gezeigt, dass es deutliche Unterschiede in der geologischen Entwicklung der beiden Monde, eingeschlossen der heute noch

wirkenden Prozesse, gibt. Zu Beginn verlief die geologische Entwicklung von Ganymed und Callisto vermutlich noch ähnlich. Mit fortschreitender Entwicklung wurden beide Satelliten zwar ähnlichen geologischen Prozessen, jedoch mit unterschiedlicher Intensität und Wirkungsdauer unterworfen. Sie resultieren in deutlichen Unterschieden in der inneren Struktur, der geologischen Oberflächenstrukturen und deren chemischen Zusammensetzung (Smith et al., 1979 a; Kivelson et al., 1996; Zimmer et al., 2000).

	Ganymed	Callisto
Durchmesser (km)	5,262 (> Merkur)	4820
Masse (kg)	1,48x10²³ (< Merkur)	1,07x10 ²³
Mittlere Distanz von Jupiter (km)	1 070 000 (15 R_J)	1 882 700 (26,3 R _J)
Orbitale Exzentrizität	0,001	0,007
Orbitale Inklination (Grad)	0,17	0,187
Rotationsperiode (Tage)	7,15 (rechtläufig)	16,69 (rechtläufig)
Umlaufperiode (Tage)	7,15	16,69
Subsolare Temperatur (K)	90 – 150	80 – 165
Mittlere Dichte (kg/m³)	1,94x10³ (40% Wassereis / 60% Gestein)	1,83x10 ³ (50% Wassereis / 50% Gestein)

Tab. 2.1: Physikalische Eigenschaften von Ganymed im Vergleich mit dem Nachbarmond Callisto (Angaben aus: *Bagenal et al., 2004*).

2.2 Geologische Entwicklung von Ganymed

Die geologische Entwicklung von Ganymed lässt sich in drei Hauptphasen gliedern:

- die Kondensations- und Akkretionsphase,
- die Differenzierung und
- Oberflächengestaltungsprozesse.

2.2.1 Kondensations- und Akkretionsphase

Die Anfangsstadien der Entwicklung von Ganymed und Callisto verliefen vermutlich ähnlich. Beide Satelliten wurden innerhalb eines großen Wirbels aus Gas und Staub, aus dem auch Jupiter selbst hervorgegangen ist, geformt (Coradini et al., 1989; Mizuno, 1980; Pollack & Fanale, 1982; Pollack et al., 1996 a; Stevenson, 1982 b; Stevenson et al., 1986; Peale, 1999). Bei der Bewegung des Gases wurden die im Sonnenebel von Anfang an enthaltenen interstellaren Staubteilchen mitgeführt. Sie wirkten als Kondensationskeime, an die sich die im Gas befindlichen kondensierbaren Elemente und Verbindungen anlagerten. Man nimmt an, dass sich diese Staubkörner durch Zusammenstöße zu immer größeren Körpern, so genannten Planetesimalen vereinigten und sich in der Äquatorebene der Scheibe konzentrierten (Coradini et al., 1995; Coradini & Magni, 1997, Magni & Coradini, 2003; Lunine et al., 2004). Aus millimetergroßen Teilchen wurden allmählich kmgroße Körper, bis sie schließlich die Größe von Asteroiden erreichten und sich zu Satelliten entwickelten. Ein kontinuierlicher Einfall relativ kleiner Himmelskörper des Urplanetensystems aus kondensierter Materie (vom „Urnebel“ übrig gebliebene Trümmer von Planeten), die Planetesimale unterstützten sein beständiges Anwachsen (wurden verschluckt), indem sich die verschiedenen Bestandteile in wechselnden

Verhältnissen in den wachsenden Planetesimalen vereinigen. In den inneren, höher temperierten Bereichen des Sonnennebels handelte es sich dabei im Wesentlichen um Stoffe mit einer hohen Kondensationstemperatur, die man grob als „Gesteinsmaterial“ zusammenfassen kann. Zum einen weit genug entfernt von der Sonne und zum anderen weit genug entfernt von der anfänglichen Wärme des riesigen Jupiter, waren in den äußeren Bereichen des Gasnebels des Protojupiters die Temperaturen niedrig genug, um die Kondensation von leichtflüchtigen Substanzen mit geringer Dichte zu ermöglichen. Zu ihnen gehören vor allem Wasserstoffverbindungen der Elemente Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff wie etwa Wasser, Ammoniak (NH_3) und Methan (CH_4), die hier mit dem Gesteinsmaterial vermischt akkumulierten (Lewis, 1974; Bodenheimer et al., 1980; Prinn & Fegley, 1981).

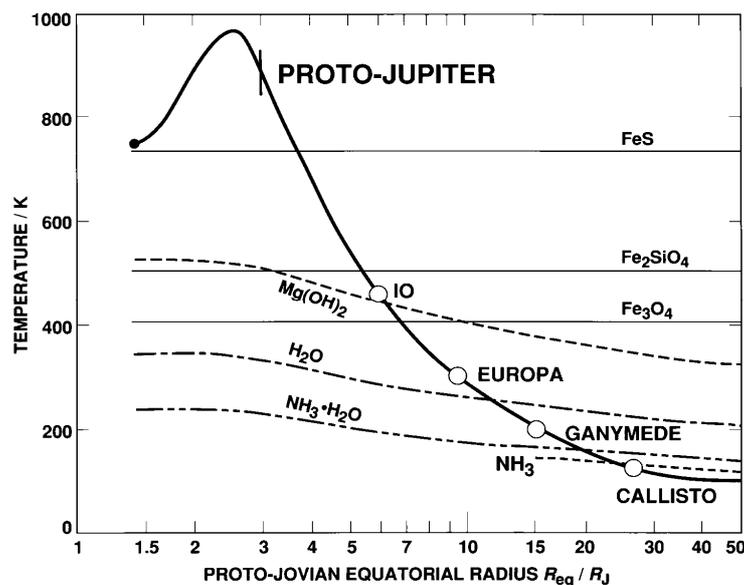


Abb. 2.3: Effektive Temperatur eines Schwarzkörpers T_{eff} im Bereich des Äquators des Gasnebels des Protojupiters (engl.: proto-Jovian cloud = PJC) aufgetragen gegen den Radius der Gasnebels R_{eq} , ausgedrückt in Einheiten des gegenwärtigen äquatorialen Radius von Jupiter mit $R_J=71.492$ km. Dargestellt ist die Temperatur des Gasnebels, die mit wachsender Entfernung vom Zentrum des Nebels im Bereich der Position der vier Galileischen Monde stark abnimmt. Die gestrichelten Linien definieren die Kondensationstemperaturen der im Gasnebel befindlichen leichtflüchtigen Substanzen in Abhängigkeit vom äquatorialen Radius des Gasnebels R_{eq} (aus: Prentice, 2001).

Abbildung 2.3 verdeutlicht, dass hauptsächlich Wassereis im Bereich von Ganymed und auch Callisto kondensierte. Wogegen Methan in Bereichen des Gasnebels des Protojupiters nicht stabil ist, könnten im Bereich von Callisto, das heißt in den äußeren Regionen Gasnebel durchaus die Kondensation von Ammoniak in Verbindung mit Wassereis erfolgt sein (Lunine & Stevenson, 1982, Prentice, 2001). Für ausführliche Diskussionen zu Modellen der Planetenentstehung, vor allem in Bezug auf das Jupitersystem sei hier auf Arbeiten von Lunine et al., (2004) und Schubert et al. (2004) und den darin aufgeführten Referenzen verwiesen. Nach Erkenntnissen der Galileo Mission wird auf Grund der Größe und Dichte von Ganymed (Tab. 2.1) eine Mischung von 60 Prozent Gestein und 40 Gew.-% leichtflüchtiger Komponenten wie Wassereis angenommen (Pappalardo, 1999; Pappalardo et al., 2004).

2.2.2 Differenzierung

Obwohl die Wirkung der Gravitation während des Wachstums von Ganymed zu einem größeren Himmelskörper außerordentlich wichtig war, spielten nach der Akkretionsphase bei der individuellen Entwicklung Ganymeds andere, interne Prozesse eine entscheidende Rolle. Vermessungen des Gravitationsfeldes während der Galileo-Vorbeiflüge haben gezeigt, dass Ganymed differenziert ist

(Anderson *et al.*, 1996 a; Abb. 2.2). Ganymeds Trägheitsmoment von $0,3105 \pm 0,0028$ ist der kleinste Wert, der bisher für einen festen Himmelskörper gemessen wurde und lässt auf eine starke Konzentration der Masse in Richtung des Zentrums von Ganymed schließen (Anderson *et al.*, 1996b). Abbildung 2.4 zeigt die unterschiedlichen Modelle des inneren Aufbaus von Ganymed im Vergleich mit Callisto. Der größte Teil des Inneren von Callisto besteht aus einer Mischung von Gestein (zusammen mit etwas Metall) und Wassereis. Die Verteilung dieser Materialien im Inneren ist nicht gesichert. Daher gibt es unterschiedliche Modelle der inneren Struktur von Callisto. Die Modelle A und B zeigen Möglichkeiten eines Zwei-Schichtenmodells nach Anderson *et al.* (2001a). Die beiden unteren Modelle entsprechen den Drei-Schichtenmodellen nach Müller & McKinnon (1988) und Nagel *et al.* (2003) (Bagenal *et al.*, 2004).

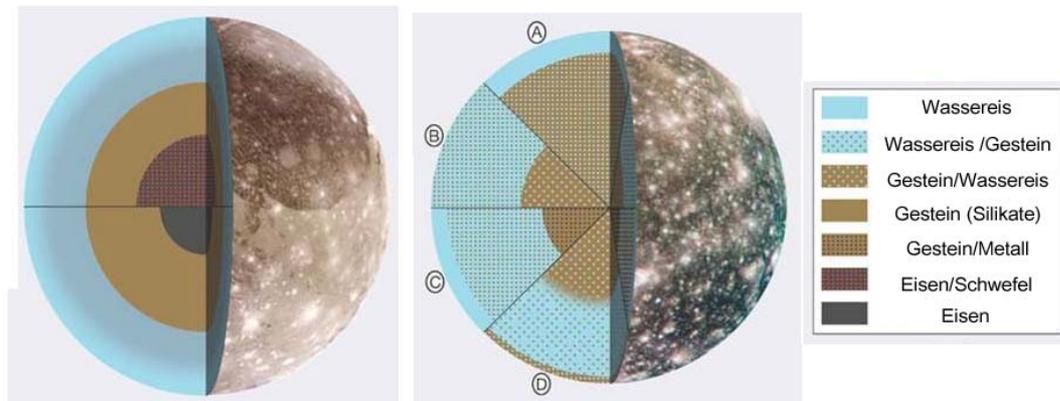


Abb. 2.4: Modelle der inneren Struktur von Ganymed (links) im Vergleich mit Callisto (rechts). Die Monde sind in ihrer relativen Größe zueinander dargestellt. Die unterschiedlichen Modelle entsprechen den Modellen, die im Rahmen der Messungen der Gravitationskräfte und Magnetfeldstärke der Monde im Verlauf der Galileo Mission realistisch sind (nach: Bagenal *et al.*, 2004) (Erklärung im Text).

Im Gegensatz zu der wahrscheinlich nur wenig differenzierten inneren Struktur von Callisto besitzt Ganymed vermutlich einen metallischen Kern bestehend aus Eisen (Fe) und/oder Eisensulfid (FeS), der von einem silikatischen Mantel und einer äußeren Schicht aus Wassereis umgeben ist (Anderson *et al.*, 1996 a, b). Ganymed ist der einzige Mond, der ein selbsterzeugtes Magnetfeld besitzt, welches am besten durch ein Modell eines gleichförmigen Feldes und eines Dipols im Zentrum von Ganymed beschrieben wird (Kivelson *et al.*, 1996, 1997 a, 1998, 2002 b; Williams *et al.*, 1998). Man vermutet, dass Strömungsbewegungen in dem vermutlich flüssigen metallischen Kern dieses Magnetfeld erzeugt (Schubert *et al.*, 1996, Anderson *et al.*, 1996a, b). Die Größe des Kerns variiert in den Modellen in Abhängigkeit des möglichen Anteils von Eisensulfid und reicht im Falle eines reinen Eisenkerns von etwa 650 bis zu etwa 900 km im Fall eines reinen Eisensulfid-Kern (Schubert *et al.*, 2004). Den Kern umgibt ein etwa 800 bis 1000 km dicker Silikatmantel (Bagenal *et al.*, 2004).

Die äußere Schicht aus Wassereis ist etwa 900 km dick (Schubert *et al.*, 2004). Aufgrund der Druck- und Temperaturzunahme mit der Tiefe ist anzunehmen, dass Wassereis in größeren Tiefen in Hochdruckphasen übergeht (Abb. 2.5). Wassereis, welches sich an der Oberfläche (geringer Druck) befindet, wird als Eis I, welches im Allgemeinen in hexagonaler Kristallform vorliegt, bezeichnet. In Abhängigkeit vom Druck unterscheidet man mit zunehmender Tiefe des Weiteren: Eis III (oder Eis II in Abhängigkeit von der Temperatur), Eis V und Eis VI (Abb. 2.4).

Es wird angenommen, dass Ganymed in einer relativ geringen Tiefe zwischen 170 und 460 km zusätzlich eine durchgehende elektrisch leitende flüssige Schicht (Ozean, z.B. Salzwasser) aufweist. Der durchgängige Stromfluss in diesem Ozean wird als Ursache für das zweite induzierte jedoch deutlich schwächere Magnetfeld von Ganymed angesehen (Kivelson *et al.*, 2000, 2002 b).

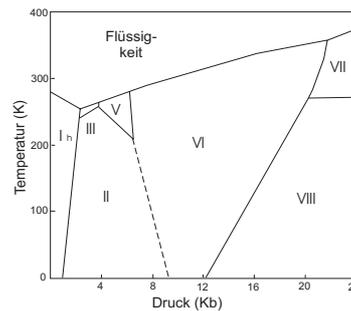


Abb. 2.5: Phasendiagramm von Wassereis mit den P-T-Bereichen in denen flüssiges Wassereis, gewöhnliches Eis I_h (hexagonale Kristallstruktur) und unterschiedliche Hochdruckphasen von Wassereis stabil sind (nach Lewis, 1997).

Für die Differenzierung von Ganymed wurden bisher folgende unterschiedlichen Energiequellen vermutet:

- Akkretionsenergie
- Einschlagsprozesse und
- Gezeitenkräfte.

Akkretionsenergie

Die Rolle der Akkretionsenergie, die im Inneren eines Mondes nach Ende der Akkretionsphase zurückbleibt, während der weiteren Entwicklung von Ganymed und der anderen Galileischen Monde ist bis heute nicht vollständig geklärt. Nach der Akkretion wurde durch den raschen Zerfall radioaktiver Elemente insbesondere U, Th und K, die im Gesteinsmaterial von Ganymed eingeschlossen waren, Wärmeenergie erzeugt. Die Stärke dieser Quelle ist verbunden mit dem Massenanteil an Silikaten, der zudem stark die interne Struktur des differenzierten Satelliten bestimmt. (Schubert *et al.*, 1986). Der Betrag an Energie, der zur Umwandlung in Wärme zur Verfügung steht und im Inneren eines wachsenden Himmelskörpers verbleibt, ist vor allem abhängig von der Akkretionsrate und der Tiefe bis zu der individuelle Einschläge das Innere von Ganymed erwärmen. Dynamische Modelle haben gezeigt, dass die akkretionsbedingte Energie und die radioaktive Aufheizung groß genug gewesen wären, um Ganymed komplett aufzuschmelzen (Consolmagno & Lewis, 1978, Schubert *et al.*, 1981) und chemische Differentiationsprozesse einzusetzen, die zur heutigen inneren Struktur von Ganymed führten (Kirk & Stevenson, 1987)(Abb. 2.4). Im Vergleich mit dem nur wenig differenzierten Nachbarmond Callisto ist Ganymed etwas größer und dichter (Tab. 2.1 und Abb. 2.3). Möglicherweise besteht darin ein leichter Vorteil für die durch Akkretieren und radioaktiven Zerfall angetriebene Differentiationsprozesse von Ganymed (Schubert *et al.*, 1986; Pappalardo *et al.*, 2004). Nach Schubert *et al.* (1986) waren etwa 10% der akkretionsbedingten Energie für eine Differentiation verfügbar.

Einschlagsprozesse

Während des Endstadiums des Akkretionsprozesses werden häufige große Zusammenstöße, die im gesamten Sonnensystem stattfanden, mit einer beträchtlichen Umverteilung des Materials des jungen Satelliten bewirkt haben. Lokale Aufschmelzungsprozesse und chemische Differentiationsvorgänge infolge der Zusammenstöße trugen vermutlich wesentlich zur Entwicklung der Lithosphäre von Ganymed und zur Schichtung der chemischen Verbindungen im Inneren von Ganymed bei. Sie könnten ebenfalls zum inneren Aufbau von Ganymed, wie man ihn heute annimmt, beigetragen haben. Das Bombardement hielt noch Hunderte von Millionen Jahren an und bestimmt die Phase, in der die

zahlreichen großen Einschlagskrater auf Ganymed (und auch Callisto) entstanden (*Shoemaker & Wolfe*, 1982; *Neukum*, 1997)(siehe Kap. 2.3).

Gezeitenkräfte

Möglicherweise sind die Unterschiede in der inneren Struktur von Ganymed und Callisto zusätzlich bedingt durch die orbitale Resonanzbeziehung zwischen Ganymed und den näher zu Jupiter positionierten Galileischen Monden Io und Europa, in die Callisto nicht mit einbezogen ist (*Greenberg*, 1982; *Burns*, 1986; *Peale*, 1986 und *Pappalardo et al.*, 2004). Infolge dieser Resonanzbeziehung bewegen sich vor allem Io und Europa in einem exzentrischen Orbit um Jupiter und werden von Gezeitenkräften beeinflusst. *Peale et al.* (1979) verdeutlichen, dass auf Io die Aufheizung durch Gezeitenkräfte groß genug ist, um die teilweise Aufschmelzung des silikatischen Materials zu verursachen. Im Falle von Europa reichen nach *Cassen et al.* (1982), *Squyres et al.* (1983a), *Ross & Schubert* (1987), *Segatz et al.* (1988), *Ojakangas & Stevenson* (1989) und *Fischer & Spohn* (1992) die Gezeitenkräfte aus, um einen Ozean unter einer dünnen Lithosphäre zu erhalten. Es besteht ebenfalls die Vermutung, dass die drei Monde bereits temporär in ähnlichen Resonanzbeziehungen gefangen waren, bevor sie ihre gegenwärtige Konfiguration erreichten (*Malhotra*, 1991). Die orbitale Exzentrizität von Ganymed könnte während seiner Passage durch diese Resonanz verstärkt worden und der Mond durch Gezeitenkräfte substantiell aufgeheizt worden sein (*Malhotra*, 1991; *Showman & Malhotra*, 1997; *Showman et al.*, 1997), bevor er sich in die Laplace-Resonanz entwickelt hat (*Malhotra*, 1991; *Showman & Malhotra*, 1997; *Showman et al.*, 1997).

Möglicherweise resultiert die verglichen mit Callisto ausgeprägte Differenzierung von Ganymed aus der Kombination von der der höheren Viskosität durch den höheren Anteil an Gesteinsmaterial, der Erwärmung von Ganymed durch Akkretion, der radioaktiven Aufheizung und letztendlich der Gezeitenkräfte (*McKinnon & Parmentier*, 1986, *Schubert et al.*, 1986). Jedoch gibt es bis heute keine zufrieden stellende Erklärung für diese Dichotomie.

Globale Expansion von Ganymed

In direktem Zusammenhang mit der thermalen Entwicklung und Differentiation von Ganymed steht die „Globale Expansion“ von Ganymed. So verursachen Veränderungen in der inneren Struktur von Ganymed und der orbitalen Parameter ebenfalls Veränderungen der Form bzw. Größe von Ganymed (*Zuber & Parmentier*, 1984; *Showman et al.*, 1997). Dies bezieht sich vor allem auf Phasenänderungen im Wassereis und/oder die Dehydratisierung des Gesteinsmaterials im Innern von Ganymed. Im Verlauf der Differentiation, dass heißt der Aufschmelzung und Entmischung von Wassereis und Gesteinsmaterial, steigt Wassereis in Richtung der Oberfläche auf. In geringeren Tiefen ist jedoch die Dichte von Wassereis deutlich geringer als tief im Inneren von Ganymed (Abb. 2.4). Gefriert das Wassereis nahe der Oberfläche wieder, dehnt es sich gegenüber dem ursprünglichen Zustand tief im Inneren eines undifferenzierten Ganymeds räumlich aus. Das Gefrieren eines Mantels aus flüssigem Wasser infolge einer kompletten Differentiation eines anfänglich homogenen Ganymeds würde daher eine Expansion des Mondes verursachen. Die Oberfläche könnte sich nach den Modellen von *Squyres* (1980a) und *Müller & McKinnon* (1988) um etwa 9 Prozent vergrößern (*Pappalardo et al.*, 2004). Die Expansion von Ganymed könnte jedoch ebenfalls ein Resultat der graduellen radioaktiven Erwärmung eines Silikat- oder Silikat-Eisenkerns sein (*Cassen et al.*, 1982; *Zuber & Parmentier*, 1984 b). Die Entgasung hydratisierter Silikate tief im Innern von Ganymed während der ersten Phase der Erwärmung würde ebenfalls zur Erhöhung des globalen Volumens beigetragen.

Die Expansion von Ganymed resultiert möglicherweise in einer Dehnungstektonik, welche vor allem die Oberfläche von Ganymed sichtbar prägt hat. Jedoch ist nicht gesichert, ob sich eine globale

Expansion von Ganymed in dem Zeitraum der Entstehung der geologischen Oberflächenstrukturen von Ganymed, welche tektonischen Ursprungs sind (Kap. 2.3), ereignet haben (*Pappalardo et al.*, 2004). Zwar ist die Existenz der Erwärmung von Ganymed durch Gezeitenkräfte bisher nicht gesichert (*Peale & Lee*, 2002). Möglicherweise sind eher temporäre Resonanzbeziehungen eine Erklärung für spätere Deformationsprozesse der Ganymedoberfläche (*Pappalardo et al.*, 2004).

2.2.3 Oberflächengestaltungsprozesse

Neben der endogenen Entwicklung von Ganymed wurden im Laufe der Galileo Mission zusätzlich exogene Oberflächenprozesse, d.h. Prozesse welche die Ganymedoberfläche noch heute beeinflussen, beobachtet. Im Wesentlichen sind folgende Hauptfaktoren für die Prozesse verantwortlich:

- Wechselwirkungen mit einfallender Strahlung aus dem interplanetaren Raum
- (Mikro-) Meteoriten-Bombardement
- Sublimation von Wassereis infolge von Temperaturschwankungen und
- gravitationsbedingte Massenverlagerungen.

Wechselwirkungen mit einfallender Strahlung aus dem interplanetaren Raum beeinflussen alle Galileischen Monde, jedoch in unterschiedlichem Maße. Sie umfassen alle durch Partikel des Sonnenwindes, der UV-Strahlung, kosmischer Strahlung und Partikel der Magnetosphäre von Jupiter injizierten chemischen und/oder physikalischen Veränderungen im Oberflächenmaterial (*Clark & Johnson*, 1996; *Hudson & Moore*, 1995; *Strazulla et al.*, 1992). Ganymed bewegt sich wie Io und Europa während seines Umlaufs um Jupiter vollständig innerhalb dessen Magnetosphäre und ist so dem Bombardement der geladenen Partikel der Magnetosphäre ausgesetzt. Kollisionseffekte und elektronische Anregungen zwischen den einfallenden Partikeln verursachen zum einen Defekte in der Kristallstruktur des Oberflächenmaterials, die vom Aufbrechen chemischer Bindungen (Dissoziation) bis hin zum vollständigen Herausschlagen (engl.: *sputtering*) von Atomen und Molekülen reichen (*Strazulla et al.*, 1992; *Hudson & Moore*, 1995, *Johnson*, 1998). Im Falle einer Mischung von gefrorenen leichtflüchtigen Verbindungen (wie z.B. $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$) wird vor allem die am leichtesten sich verflüchtigende Verbindung (also CO_2) beeinflusst. Somit verarmen stark von einfallenden Partikeln beeinflusste planetare Oberflächen nach und nach in Bezug auf ihre am leichtesten sich verflüchtigende Komponente (*Johnson*, 1998).

Elektronische Anregungen können als Folge von Dissoziationsprozessen jedoch auch Radikale produzieren, welche wiederum chemische Reaktionen im Oberflächenmaterial auslösen können. Im Falle von Wassereis als Ausgangsprodukt sind dies zum Beispiel H , OH , H_2 oder O ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}+\text{OH}$ oder $\rightarrow \text{H}_2 + \text{O}$) (*Johnson*, 1998). Radikale können jedoch ebenfalls durch Implantation einfallender Partikel (z.B. H) entstehen (*Lane et al.*, 1981). Jedoch dominiert die Produktion von Radikalen durch elektronische Anregungen über deren Implantation (*David & Michl*, 1989; *Haring et al.*, 1984 a; *Balaji et al.*, 1995). Im Falle von Wassereis werden vor allem die gegenüber Wassereis leichter flüchtigen Moleküle O_2 und H_2 (*Brown et al.*, 1982, 1984; *Bar-Nun et al.*, 1985; *Calvin et al.*, 1996) aber auch O_3 (*Noll et al.*, 1996) produziert. Produziertes H_2 wird in der Regel an den planetaren Raum abgegeben und geht verloren (*Cheng & Lanzarotti*, 1978; *Lanzarotti et al.*, 1987; *Brown et al.*, 1987; *Frank et al.*, 1997). O_2 und O_3 bilden eine dünne Atmosphäre (*Barth et al.*, 1997, *Noll et al.*, 1996; *Spencer et al.*, 1995). Zu einem geringen Anteil entstehen auch sich schwerer als Wassereis verflüchtigende Verbindungen wie OH_2 und H_2O_2 (*Haring et al.*, 1984 b; *Bar-Nun et al.*, 1985; *Matich et al.*, 1993). Jedoch ist nicht zu vergessen, dass ebenfalls chemische Reaktionen dieser Radikale ausgeprägt sind, aus denen wieder Wassereis (H_2O) entsteht (*Johnson*, 1998).

Wie der Einfall energetischer Partikel trägt auch der Einfall von (Mikro-) Meteoriten zur Modifizierung der Oberflächen bei (Lanzerotti *et al.*, 1978). Dies erfolgt durch Freilegung von Material aus dem Untergrund und Bedeckung des älteren Oberflächenmaterials mit diesem „frischen“ Material. Einerseits erfolgt somit eine Vermischung des Oberflächenmaterials mit dem des Untergrunds, andererseits auch der Eintrag meteoroidischen Materials.

Die Sublimation und Kondensation der Wassereis-Komponente des Oberflächenmaterials von Ganymed wird als der wichtigste Prozess für die Umverteilung von Wassereis im Maßstab kleiner als einem Kilometer gesehen (Lebofsky, 1975; Purves & Pilcher, 1980; Squyres, 1980b; Spencer, 1987a; Colwell *et al.*, 1990; Moore *et al.*, 1996). Die Prozesse sind begründet durch die Temperaturschwankungen im Verlauf eines Tages auf Ganymed. Infolge der Erwärmung der Ganymedoberfläche während des Tages (1 Ganymedtag = 70 Stunden oder 7,1 Erdentage) sublimiert Wassereis. Eine dünne Schicht von im Wassereis befindlichen Verunreinigungen (Gesteinsmaterial, siehe Kap. 3) bleibt zurück und sammelt sich vor allem in topographisch niederen Regionen der Ganymedoberfläche (Prockter *et al.*, 1998). Während der Abkühlung in der Nacht erfolgt jedoch die erneute Ablagerung von Wassereis, vorwiegend in kälteren Regionen, wie zum Beispiel im Bereich schattiger Hänge. Der Prozess trägt somit zur Segregation von Wassereis aus der Mischung mit dem Gesteinsmaterial auf der Ganymedoberfläche bei. Der Prozess wirkt der oben genannten Vermischung mit einfallendem meteoritischem Material entgegen.

2.3 Geologische Oberflächenstrukturen

Als Resultat der oben beschriebenen endogenen und exogenen Oberflächengestaltungsprozesse ist die Oberfläche von Ganymed durch markante Oberflächenstrukturen geprägt. Die Abbildung 2.6 zeigt ein Mosaik aus Kameradaten der Raumsonden Voyager 1 und 2 und Galileo mit den wichtigsten Oberflächenstrukturen von der Ganymedoberfläche. Im Großen und Ganzen lassen sich zwei großräumige Einheiten unterscheiden.

Neben dunklen, mit zahlreichen Einschlagskratern bedeckten Flächen, die als dunkles Gebiet (engl.: *dark ancient cratered terrain*) bzw. „**Regiones**“ (e.g. Galileo Regio) bezeichnet werden, gibt es helle Gebiete, die von einem komplizierten System von Gräben, Verwerfungen und Rillen durchzogen sind. Der Ausdruck „**Sulcus**“ (z. B. Uruk Sulcus), der Rinne oder Furche bedeutet, wird zu ihrer Beschreibung verwendet. Einschlagskrater verschiedenster Art, Größe und Alter sind über die gesamte Oberfläche von Ganymed verteilt. Im Folgenden werden die Oberflächenstrukturen näher vorgestellt.

2.3.1 Dunkles Gebiet der „Regiones“

Das dicht mit Kratern besetzte relativ dunkle Gebiet der *Regiones* nimmt etwa 35 Prozent der gesamten Oberfläche von Ganymed ein (Collins *et al.*, 2000). Basierend auf Messungen der Einschlagshäufigkeiten wird für dieses Gebiet im Allgemeinen ein Alter von höher als 4 Mrd. Jahren angenommen (Neukum, 1997; Neukum *et al.*, 1998; Zahnle *et al.*, 2003) und entspricht dem der Oberfläche des Nachbarmonds Callisto (Moore *et al.*, 2004). Jedoch sprechen lokale Variationen der Einschlagshäufigkeiten dafür, dass Teile des dunklen Gebietes durch jüngere Ereignisse überprägt wurden (Prockter *et al.*, 1998).

Das dunkle Gebiet wird von etwa 10 km breiten Furchen (engl.: *furrows*; Smith *et al.*, 1979a, b) durchlaufen. Systeme mehr oder weniger parallel verlaufender Furchen werden *Fossae* genannt (Abb. 2.7). Die *Fossae* sind jünger als das dunkle Gebiet und sind einander überlagert bzw. in sich selbst stratigraphisch gestaffelt. Sie werden als Resultat extensiver Tektonik während der Expansion von Ganymed angesehen (Squyres, 1980 a; Patel *et al.*, 1999; Prockter *et al.*, 2000).

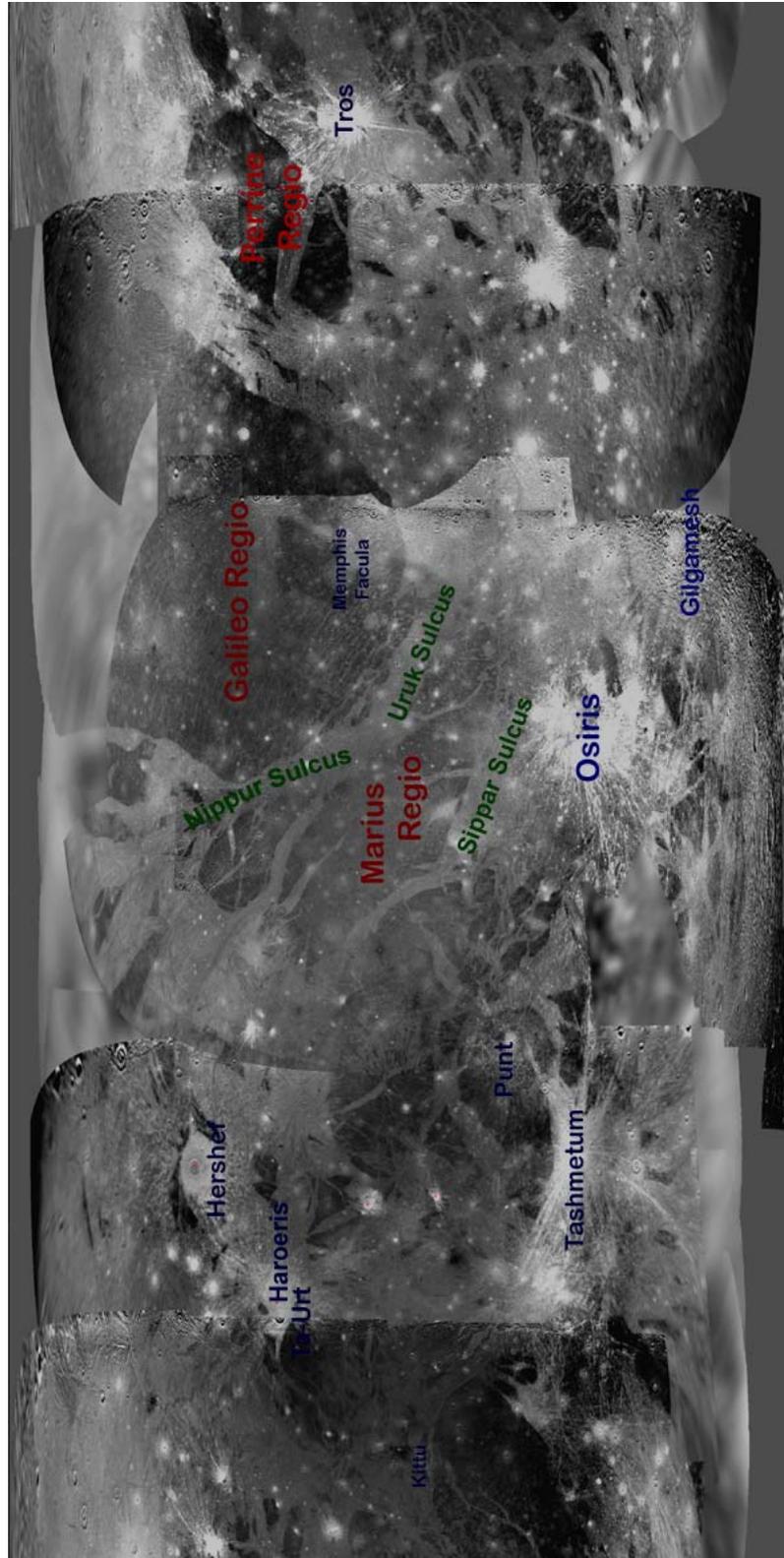


Abb. 2.6: Mosaik aus Kameradaten der Raumsonden Voyager 1, 2 und Galileo in äquidistanter Kartenprojektion mit einer Übersicht der wichtigsten Oberflächenstrukturen: 1. das dunkle Gebiet der „Regiones“ (rot), das helle Gebiet der „Sulci“ (grün) sowie Einschlagskrater unterschiedlicher Form und Größe (blau).

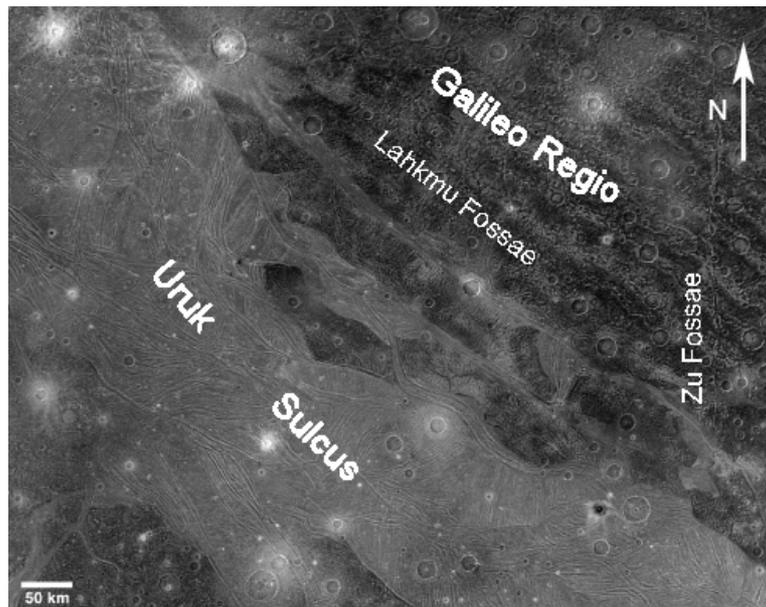


Abb. 2.7: Übergang zwischen einem Teilbereich des dunklen Gebietes von Galileo Regio, welches durch extensive Tektonik in Form subparalleler Furchen (Lahmu Fossae) geprägt ist und dem hellen Gebiet von Uruk Sulcus. Das Furchensystem der Lahmu Fossae verläuft NW/SE, das der Zu Fossae dagegen in Richtung N/S, welches dem der Lahmu Fossae überlagert und somit stratigraphisch jünger ist (nach Pappalardo et al., 2004).

Geologische Untersuchungen auf der Basis räumlich hoch aufgelöster Kameradaten der Raumsonde Galileo lassen vermuten, dass das dunkle Gebiet durch einen hohen Anteil an Gesteinsmaterial charakterisiert ist. Dieses bildet eine mit wenigen Metern Dicke relativ dünne Schicht, welche über hellerem an Wassereis reichem Material abgelagert ist (Prockter et al., 1998, 2000, Abb. 2.2). Jedoch ist das dunkle Gesteinsmaterial nicht gleichmäßig über das Gebiet verteilt. Es konzentriert sich vor allem in lokalen topographischen Vertiefungen, wie Einschlagskratern und den Böden von Furchen (Oberst et al., 1999). Im Gegensatz dazu sind die topographisch höher gelegenen Regionen (wie Bergkämme und Kraterränder) von einem relativ höheren Anteil an Wassereis geprägt (Prockter et al., 1998, Abb. 2.8 und 2.9). Weiterhin erscheinen Hänge, welche entgegen der Sonneneinstrahlung geneigt sind, dunkler als Bereiche, deren Neigung von der Sonneneinstrahlung weg weisen.

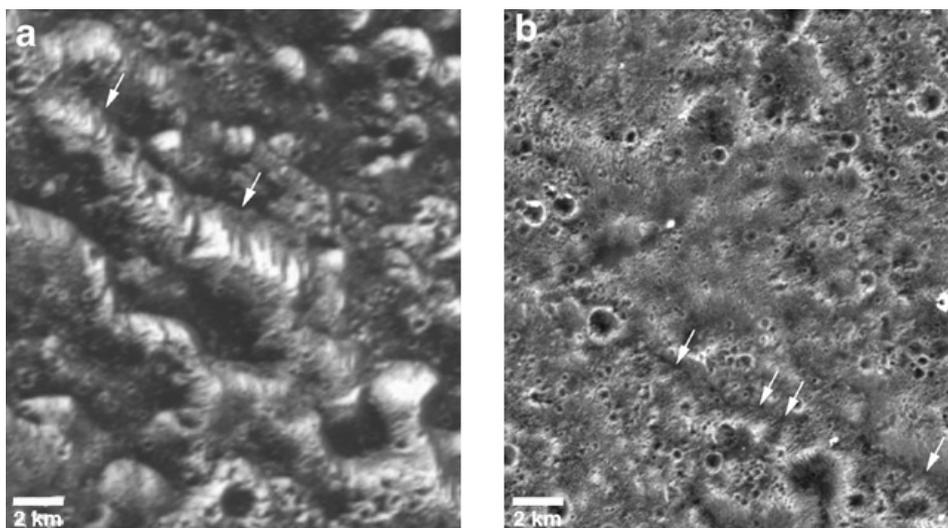


Abb. 2.8: Detailansichten vom dunklen Gebiet: (a) – Galileo Regio und (b) – Nicholson Regio. In beiden Regionen liegt dunkles Gesteinsmaterial vorwiegend in topographisch niedrigeren Regionen, während sich an Wassereis reicheres Material im Bereich von Bergkämmen und Kraterrändern konzentriert (Galileo Beobachtungen G1GSGALREG01 mit 75m/Pixel und 28GSNICHOL01 mit 28m/Pixel, aus Pappalardo et al., 2004).

Die Heterogenität des dunklen Gebietes ist wahrscheinlich als ein direktes Resultat der thermisch bedingten Segregation von Wassereis und dem Gesteinsmaterial anzusehen (Spencer, 1987 b). Dunkles Material verbleibt als dünne Schicht und sammelt sich aufgrund gravitationsbedingter Hangrutschungen in den topographisch niederen Regionen. In den topographisch höheren Regionen kommt dagegen Wassereis aus dem Untergrund zum Vorschein. Im Bereich der Sonneneinstrahlung entgegen gerichteten Hänge erfolgt der Sublimationsprozess schneller. Dagegen verbleibt Wassereis länger an schattigen Hängen. In den kälteren topographisch höher gelegenen bzw. schattigen Regionen erfolgt zusätzlich eine teilweise Wiederablagerung von Wassereis.

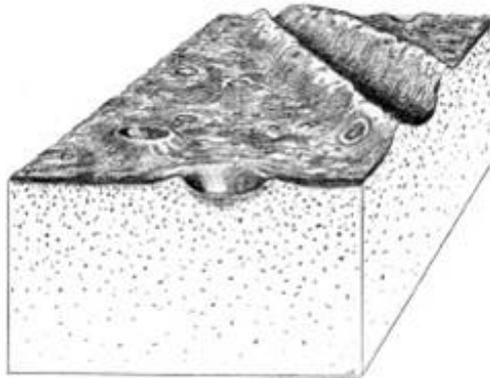


Abb. 2.9: Schematische Darstellung der Interpretation des dunklen Gebietes auf der Basis der Beobachtung der Galileo-SSI-Kamera. Das dunkle Gebiet wird interpretiert als dünne Schicht von relativ hoch konzentriertem Gesteinsmaterial über einem eisreichen Untergrund. (aus Prockter et al., 1998).

2.3.2 Helles Gebiet der „Sulci“

Das helle Gebiet der Sulci bedeckt etwa zwei Drittel der Oberfläche von Ganymed (Collins et al., 2000; Shoemaker et al., 1982) und teilt das dunkle Terrain der „Regiones“ in isolierte Polygone von Größen bis zu mehrere Tausend Kilometer. Das helle Gebiet besteht aus einem komplexen Netzwerk heller Bänder, die kreuz und quer über die Ganymedoberfläche laufen (Abb. 2.6). Die einzelnen Bänder erreichen Ausdehnungen von mehreren zehn bis hunderten von Kilometern, sind gerade oder unregelmäßig gestaltet, überschneiden sich gegenseitig, sind teilweise unterbrochen oder verzweigen (Abb. 2.10).

Die im hellen Gebiet gemessenen Einschlagshäufigkeiten sind im Mittel etwa zwei bis zehn Mal niedriger als im dunklen Gebiet und weisen auf ein deutlich jüngeres Alter des hellen Gebietes verglichen mit dem dunklen Gebiet hin. Je nach Kratermodell können einzelne Bänder des hellen Gebietes vor 4 bis 3,6 Mrd. Jahren (Neukum 1997; Neukum et al., 1998) oder vor 2 bis 0,6 Mrd. Jahren (Zahnle et al., 2003) entstanden sein.

Neben relativ glatten Bereichen werden die einzelnen Bänder teilweise von ausgedehnten Rillensystemen und Gebirgrücken durchzogen, die zwischen fünf und fünfzehn Kilometer breit und mehrere Kilometer lang sein können. Daher wird das helle Gebiet auf Ganymed auch oft als zerfurchtes Gebiet (engl.: *grooved terrain*) bezeichnet. Im Vergleich zu den Regiones zeichnen sich die Bänder des hellen Gebietes deutlich durch geringere topographische Unterschiede aus (Abb. 2.11).

Das helle Gebiet wird als ein System bestehend aus tektonisch entstandenen Verwerfungen und Gräben interpretiert (Abb. 2.10), die möglicherweise infolge Krustendehnung während der Expansion von Ganymed (siehe Kap. 2.2.2) entstanden sind (Shoemaker et al., 1982; Parmentier et al., 1982; Golombek, 1982; Grimm & Squyres, 1985; Golombek & Barnerdt, 1986; McKinnon & Parmentier, 1986; Collins et al., 1998a; Pappalardo et al., 1998a, 2004). In Abbildung 2.10 ist das Entstehungsmodell des hellen Gebietes von Pappalardo et al. (1998a) dargestellt. Der Bildungsprozess beginnt

vermutlich mit der Reaktivierung tektonischer Strukturen, vermutlich Schwächezonen in der Lithosphäre, die den oben genannten Furchen im dunklen Gebiet entsprechen. Dem folgt eine intensive extensionale Deformation des dunklen Gebietes, die möglicherweise lokal mit Eisvulkanismus verbunden ist, was zur teilweisen Überlagerung des Gebiets mit eisreichen vulkanischen Ablagerungen aus dem Untergrund führt (Parmentier *et al.*, 1982; Shoemaker *et al.*, 1982; Schenk *et al.*, 2001; Giese *et al.*, 2001).

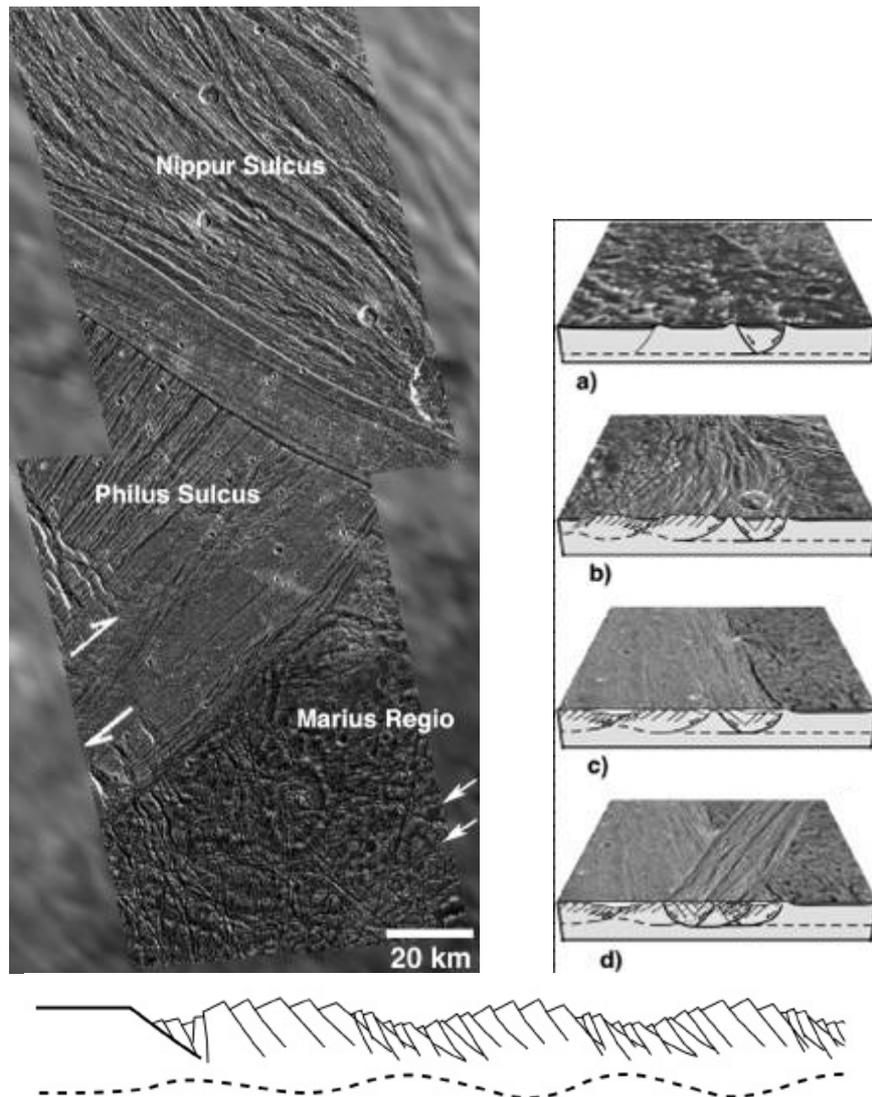


Abb. 2.10: Das helle Gebiet von Ganymed:

1. Sich überschneidende helle Bänder von Nippur und Philus Sulcus (oben links).
2. Entstehungsmodell des hellen Gebietes auf Ganymed (oben rechts) bestehend aus vier Hauptstufen:
 - a) Reaktivierung tektonischer Strukturen im dunklen Gebiet, vermutlich Schwächezonen in der Lithosphäre im Bereich der im dunklen Gebiet beobachteten Furchen,
 - b) Extensionale Deformation des dunklen Gebietes ohne expliziten Vulkanismus,
 - c) Platznahme möglicher vulkanischer Ablagerungen aus dem Untergrund (evtl. Überfließen des ursprünglichen Gebiets)
 - d) Überkreuzung unterschiedlicher Bänder, welche das dunkle Gebiet in einzelne Polygone teilen.
3. Idealisierte Darstellung der Topographie und inneren Struktur des hellen Gebietes. Die gestrichelte Linie repräsentiert den Übergangsbereich zwischen der spröden und duktilen Eiskruste von Ganymed während der Bildung des hellen Gebietes (unten) (aus Pappalardo *et al.*, 2004).

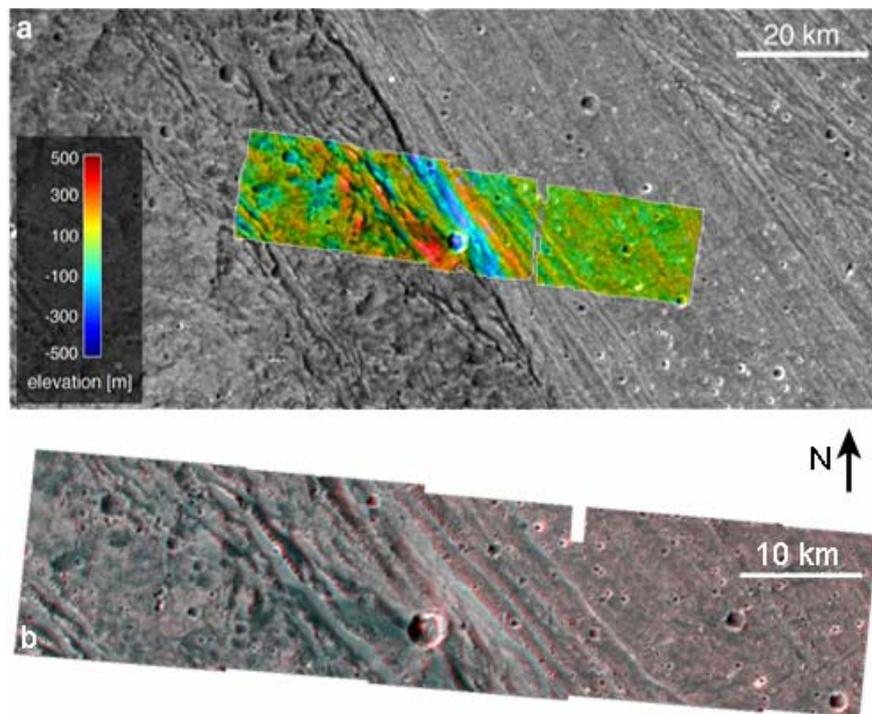


Abb. 2.11: Übergangsbereich zwischen dem hellem Gebiet (Harpagia Sulcus) und dem dunklen Gebiet (Nicholson Regio) der Galileo-SSI-Beobachtung GS28BRTDRK02: Kontextbild überlagert mit topographischer Höheninformation (oben) basierend auf Stereobilddaten (unten). Höhenunterschiede sind größer im dunklen als im hellen Gebiet. Der Kontaktbereich zwischen dem dunklen und hellen Gebiet ist charakterisiert durch einen tiefen Graben mit einem benachbarten Höhenzug (nach Giese et al., 2001 und Nimmo et al., 2002)

2.3.3 Einschlagskrater

Einschlagskrater auf der Ganymedoberfläche weisen die größte Vielfalt an Einschlagskratermorphologien auf, die auf einer planetaren Oberfläche in unserem Sonnensystem bisher beobachtet wurde. Einige von ihnen sind nur auf Ganymed und seinem Nachbarmond Callisto zu finden (*Lucchitta & Ferguson, 1988*). Detaillierte Beschreibungen der Einschlagskrater der Ganymedoberfläche finden sich in den Arbeiten von *Passey & Shoemaker (1982)*, *Chapman & McKinnon (1986)*, *Pappalardo et al. (2004)*, *Schenk (1991, 1993, 2002)*, *Schenk & Ridolfi (2002)* und *Schenk et al. (2004)*.

Neben der Bestimmung des geologischen Alters der Ganymedoberfläche (relativ und absolut; siehe Neukum 1997; Neukum et al., 1998 und Zahnle et al., 1998, 2003) dienen die morphologischen Merkmale der Einschlagskrater als Indikator für die thermale Entwicklung von Ganymed und der Beschaffenheit der Lithosphäre und der darunter liegenden Eiskruste (siehe Kap. 2.2) zur Zeit des Einschlagsereignisses. Aufgrund der temperaturabhängigen physikalischen Eigenschaften von Wassereis unterliegen die Einschlagskrater Degradationsprozessen. So passen sich die Einschlagskrater zum einen durch Relaxation topographisch ihrer Umgebung an (*Passey & Shoemaker, 1982*). Zum andern „verblasen“ sie infolge der thermal bedingten Sublimation von Wassereis (*Schenk et al., 2004*) und degradieren durch die fortschreitende Vermischung mit dem Oberflächenmaterial durch das Bombardement der Ganymedoberfläche mit Mikrometeoriten und hochenergetischen Partikeln aus dem interplanetaren Raum (Abb. 2.12; *Melosh, 1989; Prockter et al., 1998*).

Wie auch auf den Oberflächen terrestrischer Planeten und dem Erdmond weisen Einschlagskrater auf Ganymed (wie auch Europa und Callisto) mit zunehmender Kratergröße komplexere morphologische Merkmale auf (*Schenk et al., 2004*). Die kleinsten bisher beobachteten Einschlagskrater (< 3 km) sind schüsselförmig. Je größer der Durchmesser eines Einschlagskraters ist, desto komplexer ist seine

Form. Einschlagskrater mit einem Durchmesser zwischen 2 bis 35 km zeigen eine zentralen Spitze (engl.: *peak*) und zwischen 35 bis 60 km die Ausbildung einer zentralen Depression oder Mulde (engl.: *pit*). Letztere ist die am häufigsten zu beobachtende Kratermorphologie auf Ganymed (und Callisto) (Schenk *et al.*, 2004).

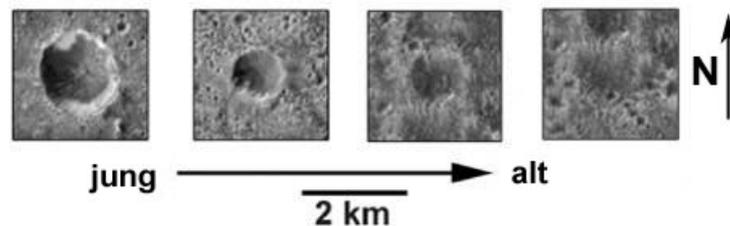


Abb. 2.12: Einschlagskrater im dunklen Gebiet (nahe 14°S/319°W) auf Ganymed, die den Einfluss von einfallenden Mikrometeoriten auf die Kratermorphologie zeigen. Die Beispiele stammen von den Galileo-Beobachtungen 28GSSMOOTH01 und 02 (21 m /Pixel)

Morphologisch relativ frische bzw. geologisch junge Einschlagskrater mit Durchmessern größer als 60 km sind meist charakterisiert durch einen zentralen Dom (engl.: *dome*). Große Einschlagskrater sind jedoch besonders empfindlich für Veränderungen in der Lithosphäre aber auch der Beschaffenheit der darunter liegenden Eiskruste. Sie weisen zum Teil Morphologien auf, welche kein Gegenstück auf terrestrischen Planeten besitzen (Schenk *et al.*, 2004) und wurden bisher nur auf den Galileischen Monden beobachtet (Pappalardo *et al.*, 2004). Zu diesen gehören:

- Ringstrukturen ähnlichen denen auf Callisto (Valhalla-Typ),
- Palimpseste und Penpalimpseste (siehe unten) und
- Einschlagskrater mit einem zentralen Dom.

Ringstrukturen

Mindestens eine Einschlagsstruktur auf Ganymed, Gilgamesh (Abb. 2.13), weist Morphologien ähnlich den Multiringstrukturen bzw. Einschlagsbecken des Erdmondes auf, wie zum Beispiel das Mare Orientale (Passey & Shoemaker, 1982; Shoemaker *et al.*, 1982). Mit einem Durchmesser von 590 km ist Gilgamesh die mit Abstand größte Einschlagsstruktur auf Ganymed, die vollständig erhalten ist. Der zentrale, relativ glatte Bereich (~150 km) repräsentiert eventuell einen ehemaligen Kraterdom (Schenk *et al.*, 2004). Umgeben wird dieser Bereich von einem fast kreisförmigen hügeligen Gebiet (~225 km), welches den Kraterboden um den zentralen Dom bildet. Den äußeren Bereich bilden mindestens 4 konzentrische Ringe, die morphologisch Bergrücken und/oder Gräben (max. 1,5 km hoch) repräsentieren (Schenk *et al.*, 2004), wobei der innerste Ring den ehemaligen Kraterrand kennzeichnet.

Einschlagsstrukturen mit Durchmessern größer als 350 km ähneln den Ringstrukturen auf Callisto, wie zum Beispiel Valhalla (McKinnon & Melosh, 1980; Passey & Shoemaker, 1982; Schenk & McKinnon, 1987; Prockter *et al.*, 1998) und werden daher als Valhalla-Typ bezeichnet. Der hauptsächliche Unterschied zwischen den Ringstrukturen auf Callisto und denen auf Ganymed (bzw. dem Erdmond) ist, dass die Ringe um den ehemaligen Einschlagskrater auf Callisto enger beieinander liegen.

Ringstrukturen repräsentieren vermutlich Einschläge in eine im Vergleich zum Kraterdurchmesser noch relativ dünne Lithosphäre (McKinnon & Melosh, 1980; Melosh, 1989). Der Einschlagskörper durchschlug die spröde Lithosphäre und tauchte in mobileres Material ein (Melosh, 1989). Bisher wurden auf 4 Ringstrukturen, die einen Durchmesser von mehr als 300 km besitzen identifiziert (Schenk *et al.*, 2004). Möglicherweise gehen die im dunklen Gebiet beobachteten mehr oder weniger

parallelen, leicht gekrümmten Furchen, wie zum Beispiel die der Lakhmu Fossae und Zu Fossae in Galileo Regio (Abb. 2.6 und 2.7) ebenfalls auf einen ehemaligen Einschlag zurück, der sich in der Frühzeit der Entwicklung von Ganymed ereignet hat (Smith et al., 1979 a, b; McKinnon & Melosh, 1980). Der Durchmesser ist unbekannt. Er ist jedoch vermutlich größer als 2000 km (Schenk et al., 2004). Die Furchen stellen demnach ringförmige Vertiefungen dar, die nahezu konzentrisch um das alte Einschlagszentrum verlaufen.

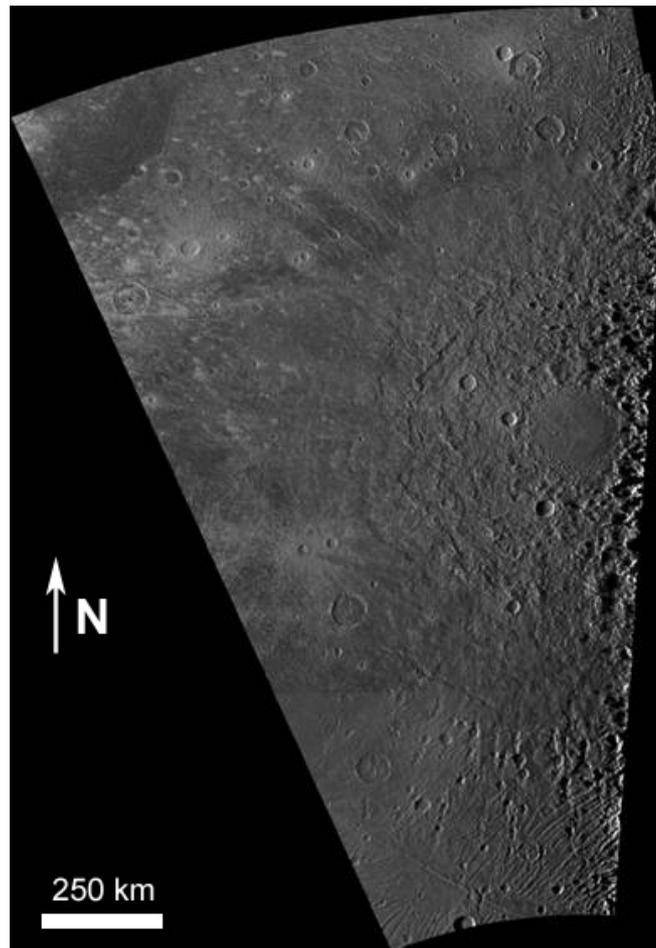


Abb. 2.13: Mosaik von Gilgamesh, der mit einem Durchmesser von 590 km größten Einschlagsstruktur auf Ganymed (59°S, 123°W) basierend auf Aufnahmen der ISS-Kamera von Voyager 1 (siehe auch Abb. 2.6).

Palimpseste und Penepalimpseste

Palimpseste (Passey & Shoemaker, 1982) sind eine Besonderheit auf der Oberfläche von Ganymed. Sie wurden bisher nur im dunklen Gebiet beobachtet und werden als die ältesten Einschlagsstrukturen auf Ganymed angesehen (Schenk et al., 2004; Abb. 2.14). Die Einschlagstrukturen sind daher teils nur noch schwach erhalten, so dass es schwierig ist detaillierte morphologische Merkmale zu identifizieren. Sie erreichen Durchmesser bis zu mehreren hundert Kilometern und erscheinen im Vergleich zu ihrer Umgebung oft nur als relativ runde helle Flecken mit geringem Relief, welche den ehemaligen Einschlagskrater repräsentieren (Smith et al., 1979b). Sie sind benannt nach wieder verwendetem Pergament, von dem der ältere geschriebene Text fast nicht mehr zu erkennen ist.

Ein zentraler glatter Bereich markiert möglicherweise das ehemalige Kraterzentrum in Form eines Doms oder einer Vertiefung. Dieser Bereich ist von mehr oder weniger gut erkennbaren konzentri-

schen linearen Strukturen umgeben, die den ehemaligen Kraterrand markieren (Schenk et al., 2004). Teilweise zeigen Palimpseste eine beckenähnliche Morphologie.

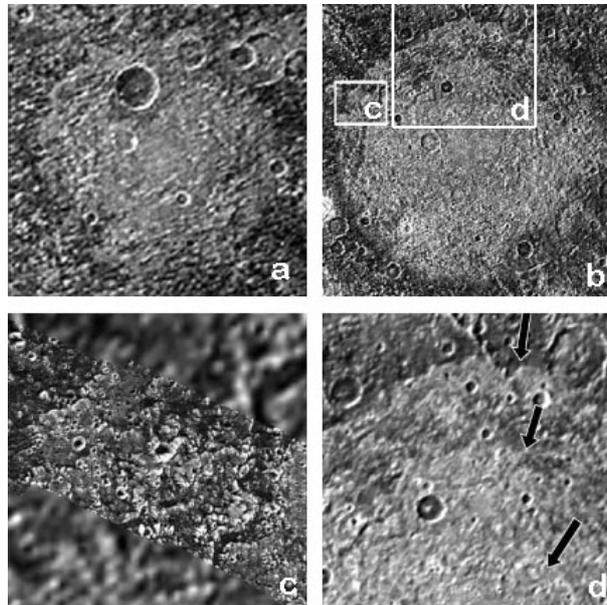


Abb. 2.14: Palimpseste auf Ganymed: Ausschnitte von ISS-Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (a) Edfu Facula (~185 km), (b) Memphis Facula (~355 km), (c) Nahaufnahme der konzentrischen Strukturen in Memphis Facula (~50 km) und (d) eine Galileo-SSI- Nahaufnahme des äußeren Bereichs von Memphis Facula. Die beiden oberen schwarzen Pfeile in (d) markieren den äußeren Bereich von Memphis Facula, während der untere Pfeil den Übergang zum zentralen relativ glatten Bereich kennzeichnet, welcher als ehemaliger zentraler Domkomplex interpretiert wird (aus: Schenk et al., 2004).

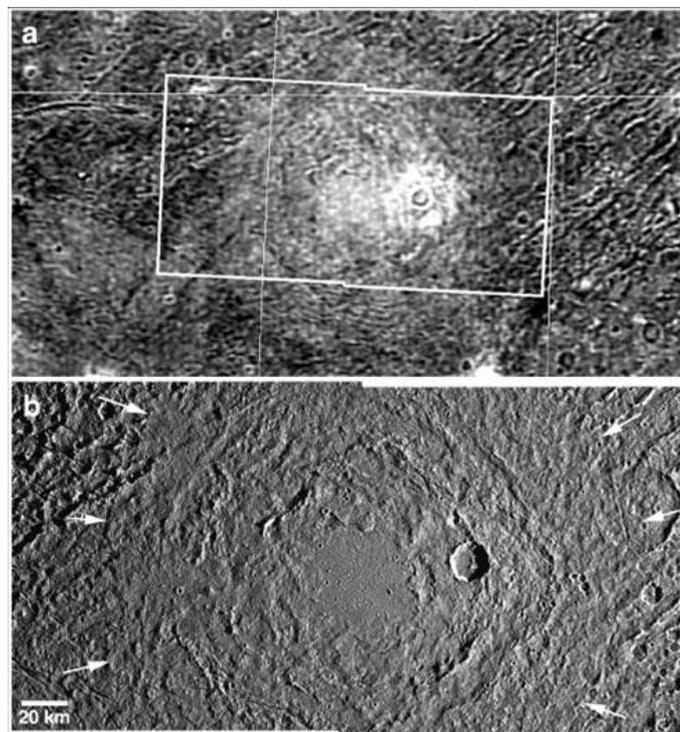


Abb. 2.15: Palimpsest Buto Facula im dunklen Gebiet von Marius Regio ($12^{\circ}\text{N}/203^{\circ}\text{W}$): (a) Die Aufnahme der ISS-Kamera der Raumsonde Voyager 1 (Bildnr. FDS 20635.45) mit einer räumlichen Auflösung von 1.3km /Pixel zeigt einen relativ zur Umgebung helleren Fleck ohne signifikantes Relief. (b) Die Aufnahme der SSI -Kamera Galileos (Beobachtung G8GSBUTOFC01) mit 180m/Pixel zeigt dagegen eine eher beckenähnliche Struktur. Der Rand der nahezu kreisförmigen Struktur korrespondiert mit der einst fluiden Ejekta (mit Pfeilen gekennzeichnet) (aus: Pappalardo et al., 2004).

Die Abbildung 2.15 zeigt ein Palimpsest im dunklen Gebiet von Marius Regio, namens Buto Facula ($12^{\circ}\text{N}/203^{\circ}\text{W}$), in unterschiedlichen Aufnahmen der Raumsonden Voyager und Galileo mit räumlichen Auflösungen von 1,3 und 0,18 km/Pixel. Während Buto Facula in der Voyager-Aufnahme nur als heller Fleck ohne sichtbares Relief erscheint, zeigt es in der Galileo-Aufnahme eine beckenähnliche Struktur, die dem Gilgamesh-Becken ähnelt. Der Rand des Palimpsests korrespondiert mit den ehemals fluiden Ejekta. Jedoch ist nicht klar ob dieser Rand sockelähnliche Ablagerungen um den Einschlagskrater (*Schenk et al.*, 2004) oder ausgedehnte kontinuierliche Ejekta repräsentiert (*Jones et al.*, 2003).

Palimpseste werden vor allem aufgrund ihrer geomorphologischen Ähnlichkeiten zu Penepalimpsesten (Abb. 2.16; *Passey & Shoemaker*, 1982), welche mehr Topographie zeigen, als Einschlagsstrukturen interpretiert (*Schenk et al.*, 2004). Penepalimpseste zeigen jedoch eine deutlicher ausgeprägte Kratermorphologie, die oft einen zentralen Dom, eine konzentrische Zonierung und kartierbare Ejekta aufweist. Palimpseste und Penepalimpseste werden in der Literatur oft nicht unterschieden (*Thomas & Squyres*, 1990, *Jones et al.*, 2003). Nach *Schenk et al.* (2004) erscheinen Palimpseste nur im dunklen Gebiet, wohingegen Penepalimpseste im dunklen und im hellen Gebiet zu finden sind. Die Unterscheidung basiert somit eher auf deren Krateralter, wobei die Entstehung des hellen Gebietes die beiden Einschlagsstrukturen separiert.

Nach *Schenk & Mc Kinnon* (1991), *Schenk et al.* (2004) entstanden die Palimpseste durch Einschläge in der frühen Geschichte von Ganymed, als infolge des höheren inneren Wärmeflusses das Mantelmaterial noch warm und verformbar war und sich die Einschlagskrater durch Relaxation (engl.: relaxation) der Umgebung topographisch angeglichen haben (*Passey & Shoemaker*, 1982; siehe Kap. 2). Die Art und Weise ihrer Entstehung ist jedoch bis heute nicht vollständig geklärt (*Pappalardo et al.*, 2004).

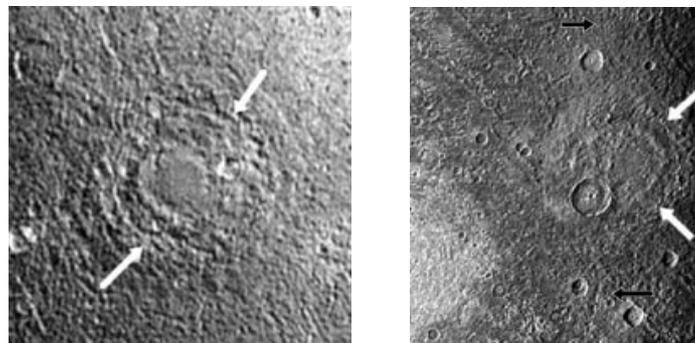


Abb. 2.16: Penepalimpseste auf Ganymed: links: Hathor (~120 km) und rechts: Nidaba (~180 km). Die weißen Pfeile markieren den ehemaligen Kraterwall, während die schwarzen Pfeile in der Aufnahme von Nidaba den äußeren Rand der kontinuierlichen Ejekta kennzeichnen (aus: *Pappalardo et al.*, 2004).

Auswurfsmaterialien

Zu den wesentlichen morphologischen Merkmalen eines Einschlagskraters zählen, neben dem Einschlagskrater selbst, auch dessen Auswurfsmaterial. Dieses wird im Allgemeinen in die kontinuierlichen und diskontinuierlichen Ejekta unterteilt (*Melosh*, 1989). Die kontinuierlichen Ejekta umfassen die dichte Ablagerung von ausgeworfenem Material, welches sich im Allgemeinen bis zu einem Kraterradius vom Kraterwall erstreckt. Zu den diskontinuierlichen Ejekta gehören vor allem ausgedehnte Strahlensysteme und/oder Gruppen oder Ketten von Sekundärkratern (*Schenk et al.*, 1996). Letztere entstehen, wenn ausgeworfenes Material zusätzlich zum primären Einschlagskrater weitere, also sekundäre Einschlagskrater erzeugen (*Melosh*, 1989).

Strahlenkrater gehören zu den jüngsten Einschlagsstrukturen der Ganymedoberfläche. Diese Strahlensysteme sind zum einen durch helles Material, welches vermutlich an Wassereis reich ist,

gekennzeichnet. Sie können jedoch zum anderen auch hohe Konzentrationen an Gesteinsmaterial enthalten. Die Strahlensysteme dehnen sich vom Einschlagszentrum aus gesehen teilweise über Hunderte von Kilometern aus. So besitzt zum Beispiel der Einschlagskrater Osiris ($39^{\circ}\text{S}/161^{\circ}\text{W}$) einen Durchmesser von etwa 150 km (Abb. 2.17). Seine hellen Strahlen sind bis in eine Entfernung von weit über 1000 km um den Einschlagskrater verteilt. Die Strahlen bestehen im Wesentlichen aus ausgeworfenen, aus dem Untergrund freigelegten, eventuell teilweise geschmolzenen und an der Oberfläche erstarrten Ejekta.

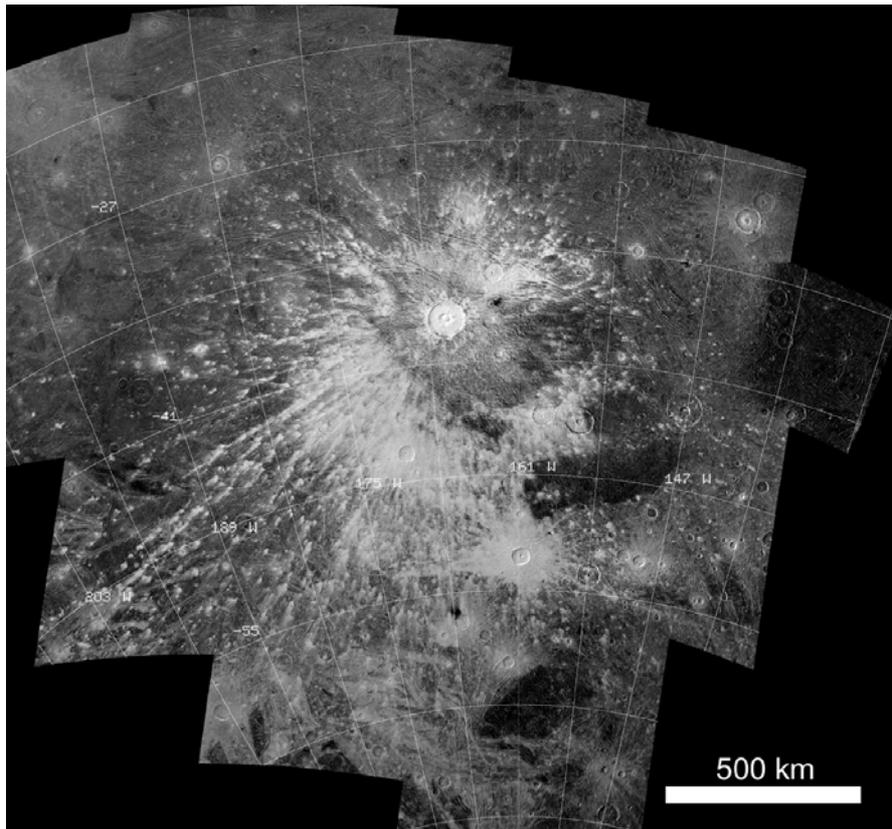


Abb.2.17: Bildmosaik von Osiris, dem größten Strahlenkrater auf Ganymed ($39^{\circ}\text{S}/161^{\circ}\text{W}$) auf der Basis von Aufnahmen der Raumsonde Voyager 2.

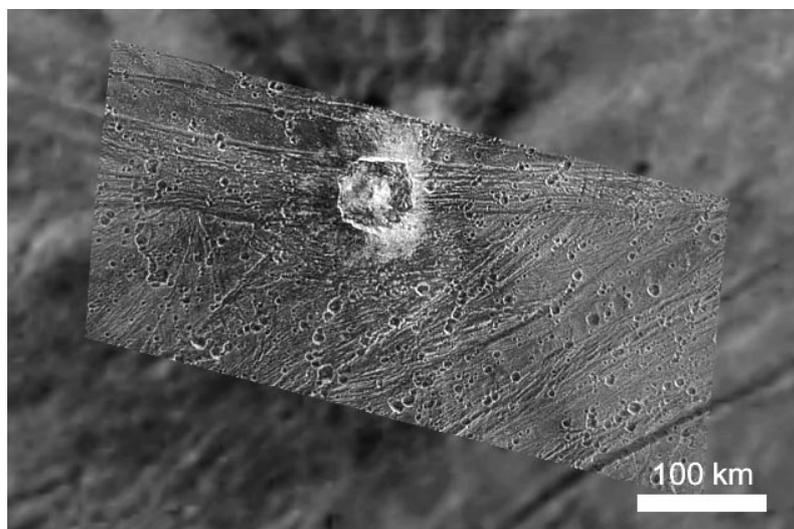


Abb. 2.18: Dunkler Strahlenkrater Kittu ($0,54^{\circ}\text{N}/334^{\circ}\text{W}$) in einem Mosaik aus Kameradaten der Raumsonde Voyager und Galileo SSI (Beobachtung G7GSKITTU_01_02).

Der Ursprung dunkler Strahlenkrater wie zum Beispiel Kittu ($0,54^{\circ}\text{N}/334^{\circ}\text{W}$; Abb. 2.18) ist bis heute nicht geklärt. Eventuell sind die dunklen Strahlen ein Indikator für im Untergrund vorhandenes Gesteinsmaterial, was durch den Einschlagsprozess freigelegt wurde (*Hartmann*, 1980). Möglichweise repräsentieren sie jedoch das Material des Einschlagskörpers, dem Projektil (*Conca*, 1981; *McKinnon & Parmentier*, 1986; *Schenk & McKinnon*, 1991). Aus dem Untergrund freigelegtes Gesteinsmaterial vermutete man auch im Falle von einigen Einschlagskratern im hellen Gebiet von Ganymed, die von einem dunklen Schein (engl.: *halo*) umgeben sind (*Schenk & McKinnon*, 1991).