

### 6.4.3 Einschlagskrater mit dunklem Auswurfsmaterial

Einschlagskrater mit dunklem Auswurfsmaterial gehören zu den eher ungewöhnlichen Oberflächenstrukturen von Ganymed und wurden bisher nur auf diesem beobachtet (Conca, 1981; Schenk & McKinnon, 1991). Es handelt sich dabei um wahrscheinlich geologisch junge Einschlagskrater, die durch an im sichtbaren Licht dunkle mehr oder weniger ausgeprägte Strahlen charakterisiert sind. Dagegen sind die Kraterböden im sichtbaren Licht relativ hell und weisen wahrscheinlich einen deutlich höheren relativen Anteil von Wassereis auf. Die dunklen Strahlen dehnen sich ähnlich im Falle des hellen Strahlenkraters Osiris bis zu mehrere Krateradien vom Kraterand entfernt aus. Gewöhnlich besitzen die jeweiligen Strahlensysteme eine asymmetrische Form, obwohl die Einschlagskrater selbst kreisförmig sind (Schenk & McKinnon, 1991). Nach Schenk & McKinnon (1991) schwanken die Durchmesser von dunklen Strahlenkratern zwischen 160 km bis zu einer durch die räumliche Auflösung der Kameradaten bedingten Größe von etwa 2 km. Diese dunklen Strahlen bilden nach Conca (1981) die im sichtbaren Licht dunkelste Einheit auf Ganymed und reflektieren somit eine ungewöhnlich hohe Konzentration an Gesteinsmaterial. Ihre Entstehung ist bis heute nicht erklärt.

Poscolieri & Schultz (1980) und Poscolieri (1982) vermuteten, das dunkle Strahlenkrater nur in den dunklen Gebieten gebildet werden, nur in einer bestimmten Größe vorkommen und während des Einschlagsprozesses aufgearbeitetes Oberflächenmaterial der dunklen Gebiete repräsentieren. Hartmann (1980b) geht bei der Entstehung der dunklen Ejekta von einer Mischung aus Wassereis und Gesteinsmaterial im Oberflächematerial aus und vermutet, dass leichtflüchtige Bestandteile wie Wassereis während des Einschlagsereignisses vaporisieren und das Gesteinsmaterial der Mischung zurücklassen (Hartmann, 1980). Möglicherweise sind sie ein Indikator für tiefer liegende Schichten von Gesteinsmaterial (Hartmann, 1980). Conca (1981) zeigt jedoch, dass dunkle Strahlenkrater sowohl im dunklen und hellen Gebiet zu beobachten sind und schließt daraus, dass die dunklen Strahlen durch den Einschlagskörper verunreinigtes Material, also möglicherweise Überreste des ehemaligen Einschlagskörpers repräsentieren (Conca, 1981, Schenk & McKinnon, 1991). Schenk & McKinnon (1991) schlugen weiterhin vor, dass sich häufende Einschläge von Himmelsobjekten, wie Asteroiden der Klassen C und D (Gaffey et al., 1989, Kap. 6.1.4) und Kometen für die Farbgebung der dunklen Ejekta auf Ganymed verantwortlich sein könnten. Die dunklen Strahlenkrater konzentrieren sich nach Conca (1981) und Schenk & McKinnon (1991) zusätzlich vor allem in den äquatorialen Regionen der Heckseite von Ganymed. Sie vermuteten, dass der Einfall magnetosphärischer Partikel zu der auffallenden Farbgebung der Strahlen in den Kameradaten, das heißt zur Bildung und/oder Erhaltung der dunklen Strahlen beiträgt. Shoemaker et al. (1982) weist zusätzlich darauf hin, dass thermal bedingte Sublimation ebenfalls einen bedeutenden Anteil an der Bildung dunkler Strahlen nahm.

<i>Beobachteter Einschlagskrater</i>	<i>Geographische Position</i>	<i>NIMS-Beobachtung</i>	<i>Räumliche Auflösung</i>	<i>Analysierte Absorptionen</i>
<i>Tammuz</i>	12,3°N/231,3°W	G2GNTAMMUZ	10 bis 13 km/Pixel	1,04; 1,25; 1,5; 2;2,4; 3; 4,25µm
<i>Mir</i>	4,5°S/230,7°W	G1GNMIRRAY	5 bis 7 km/Pixel	1,04; 1,25;1,5; 2; 2,4; 3; 4,25m
<i>Kittu</i>	0,54°N/334,0°W	G7GNKITTU	4 bis 6 km/Pixel	1,5; 2; 3; 4,25µm

Tab. 6.28: Parameter der NIMS-Beobachtungen im Bereich der untersuchten dunklen Strahlenkrater auf Ganymed.

Alle bisher durchgeführten Untersuchungen basieren auf Bilddaten der Raumsonde Voyager 2, welche die Charakterisierung der spektralen Eigenschaften der dunklen Ejekta in nur wenigen breitbandigen Spektralkanälen (Bandbreite: 70 bis 360 nm), deren Empfindlichkeit zwischen etwa 0,3 und 0,7 $\mu$ m liegt (Kap. 5.1.3, Tab. 5.4), ermöglichen. Mit den Spektraldaten von NIMS bietet sich die Möglichkeit, die spektralen Eigenschaften der dunklen Strahlenkrater bis in die Wellenlängenbereiche des Nahen Infrarot und mit einer deutlich höheren spektralen Auflösung (Bandbreite: mindestens ~26 nm) zu untersuchen (Kap. 5.1.1). Die Analyse der Reflexionseigenschaften im Bereich der dunklen Strahlenkrater in Abhängigkeit der Geologie bzw. des Substrats erfolgt in erster Linie im Hinblick auf Hinweise der Herkunft und des Bildungsprozesses des dunklen Auswurfsmaterials. Die Diskussion erfolgt am Beispiel der dunklen Strahlenkrater Tammuz, Kittu und Mir (Tab. 6.24). Sie wurden von NIMS mit einer räumlichen Auflösung zwischen 13 und 3 km/Pixel aufgenommen. Sie befinden sich alle nahe dem Äquator zwischen 12°N und 4,5°S und im Bereich der Heckseite von Ganymed. Mit Ausnahme von Kittu liegen sie zwischen 219 und 231°W im westlichen Bereich der von Jupiter abgewandten Hemisphäre Ganymeds. Der dunkle Strahlenkrater Kittu befindet sich dagegen bei 334° W auf der dem Jupiter zugewandten Hemisphäre Ganymeds.

#### **Einschlagskrater Mir (4,5°S/230,7°W)**

Die Abbildung 6.83 zeigt den dunklen Strahlenkrater Mir (4,5°S/230,7°W) in einem Ausschnitt von Bilddaten der ISS-Kamera an Bord der Raumsonde Voyager 2 zusammen mit einer geologischen Karte, welche die für die Interpretation der NIMS-Daten wichtigsten geologischen Einheiten enthält. Der von NIMS beobachtete Bereich (NIMS-Beobachtung G1GNMIRRAY) liegt zwischen 6,1 und 2,9°S bzw. 228,4 und 236,2°W und wurde mit einer räumlichen Auflösung von 5 bis 7 km/Pixel aufgenommen (Tab. 6.28). Der mit einem Durchmesser von weniger als 13,8 km (Schenk & McKinnon, 1991) relativ kleine Einschlagskrater Mir liegt innerhalb des dunklen Gebietes von Marius Regio. Wegen der geringen räumlichen Auflösung der Kameradaten von etwa 2 km/Pixel im Verhältnis zur Größe des Einschlagskraters sind spezifische morphologische Charakteristika nicht zu erkennen. Die dunklen Strahlen von Mir sind bis in eine Entfernung von 200 km vom Einschlagskrater entfernt zu beobachten und überlagern hier ein maximal 50 km breites Band des hellen Gebietes. In der geologischen Karte sind die Bereiche der Ejekta, welche die Oberfläche von Ganymed vollständig bedecken, (kontinuierliche Ejekta) von denen vereinzelter Strahlen (diskontinuierliche Ejekta) unterschieden. In unmittelbarer Umgebung von Mir befindet sich in westlicher Richtung vermutlich ein weiterer Einschlagskrater mit dunklen Ejekta (~4°S/232°W) und ebenso ein weiterer im südwestlichen Abschnitt der NIMS-Beobachtung (~6°S/236°W). Beide liegen, wie Mir, innerhalb von Marius Regio. Sie sind jedoch um mindestens die Hälfte kleiner als Mir und in den Kameradaten nur undeutlich zu erkennen. Jedoch läßt sich, wie im Falle von Mir ein helles Zentrum, welches vermutlich den Krater selbst repräsentiert und diesen umgebende dunkle Ablagerungen, vermutlich die Ejekta, erkennen.

Aufgrund der nicht ausreichenden Qualität der Kameradaten läßt sich das geologische Alter des Einschlagskraters Mir nicht bestimmen. Nur auf der Basis der vorhandenen dunklen Strahlen und der Überlagerung des hellen Gebietes durch die dunklen Strahlen von Mir wird ein relativ junges Alter vermutet.

#### **Einschlagskrater Tammuz (12,3°N/231,3°W)**

Der dunkle Strahlenkrater Tammuz (12,3°N/231,3°W) stellt eine Besonderheit unter den dunklen Strahlenkratern dar. Er weist scheinbar sowohl helles als auch dunkles Auswurfsmaterial auf, welches sich in entgegengesetzten Himmelsrichtungen ausdehnt (Conca, 1981).

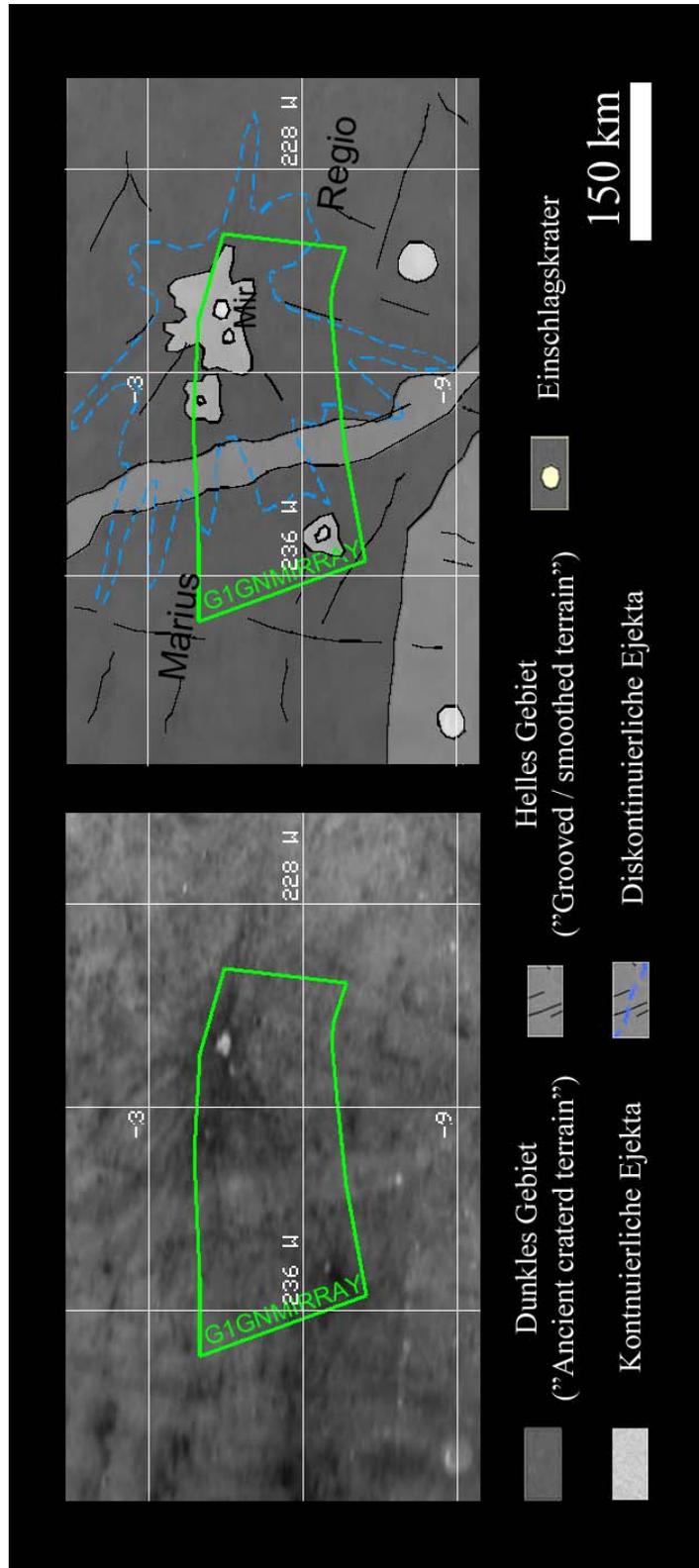


Abb. 6.83: Geologischer Kontext im Bereich des dunklen Strahlenkraters Mir basierend auf einem Mosaik aus Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (Bildnummer: 0386J2-001; CLEAR-Filter) überlagert mit den Grenzen der NIMS-Beobachtung GIGNMIRRAY.

Die Abbildung 6.84 zeigt Tammuz in einem Ausschnitt aus einer Aufnahme der ISS-Kamera an Bord der Raumsonde Voyager 2 zusammen mit einer geologischen Karte, welche die für die Interpretation der NIMS-Daten wichtigsten geologischen Einheiten, enthält. Der von NIMS beobachtete Teilbereich (NIMS-Beobachtung G2GNTAMMUZ) liegt zwischen 9,62 und 15,41°N bzw. 225,7 und 238,5°W und wurde mit einer räumlichen Auflösung um etwa 11,5 km/Pixel aufgenommen (Tab. 6.28, siehe auch Kap. 5, Abb. 5.2). Mit einem Durchmesser von weniger als 50 km zählt Tammuz zu den Strahlenkratern mittlerer Größe auf Ganymed. Das geologische Alter wurde aufgrund der geringen Qualität der Kameradaten bisher nur geschätzt. Nach dem Modell von Neukum (1997) und Neukum et al. (1998) besitzt Tammuz ein Modellalter von maximal 3,79 Mrd. Jahren (*Stephan et al.*, 2003). Jedoch erscheint Tammuz wegen seiner ausgeprägten Kratermorphologie relativ jung. Im Kraterzentrum befindet sich möglicherweise ein zentraler Dom. Jedoch reicht die räumliche Auflösung der Kameradaten von etwa 2 km/Pixel nicht aus um diesen eindeutig zu identifizieren. Dagegen ist deutlich zu erkennen, dass der Krater von seinem Auswurfsmaterial durch einen scharfen Kratertrand abgegrenzt ist. Die ausgedehnten Ejekta lassen sich in drei verschiedene Faziesbereiche unterteilen:

Die ausgeprägten kontinuierlichen Ejekta prägen die Umgebung von Tammuz bis zu einer Entfernung von etwa einem Krateradius (~ 25 km). Die diskontinuierlichen Ejekta beinhalten zum einen die sich in nördlicher Richtung bis auf eine Entfernung von etwa 200 km ausdehnenden hellen Strahlen von Tammuz. Die Strahlen sind in den Kameradaten durch ihre Helligkeit deutlich von der Umgebung abgesetzt. Die Grenze zwischen den hellen Strahlen und der Umgebung ist relativ scharf.

Die dunklen Strahlen dehnen sich vor allem in südlicher Richtung aus. Sie sind am deutlichsten in den Bereichen der dunklen Gebiete zu erkennen, durchziehen aber auch die hellen Gebiete im Süden von Tammuz. Sie setzen sich nicht so deutlich wie die hellen Strahlen von der Umgebung ab, dehnen sich dagegen jedoch bis zu einer Entfernung von 600 km vom Kratertrand aus und sind somit etwa dreimal so lang wie die hellen Strahlen. Die äußeren Bereiche der dunklen Strahlen liegen weit ausserhalb des von NIMS beobachteten Bereiches.

Die Zugehörigkeit der dunklen Strahlen zu Tammuz konnte bisher nicht sicher geklärt werden (*Conca*, 1981; *Schenk & McKinnon*, 1991). *Conca* (1981) sieht in den hellen und dunklen Ejekta das Resultat eines einzigen Einschlagsereignisses. *Schenk & McKinnon* (1991) dagegen vermuten eher, dass die dunklen Strahlen von der dunklen Region ausgehen, die sich unmittelbar südlich von Tammuz ausdehnt (mittlerer Durchmesser ~25 km). Diese Region wird von einer diffusen kreisförmigen dunklen Region umgeben (~300 km), die von den hellen Strahlen überlagert wird und von der die dunklen Strahlen ausgehen. *Schenk & McKinnon* (1991) sehen in Tammuz ein sich asymmetrisch entwickeltes helles Strahlensystem, welches einem älteren dunklen Strahlensystem überlagert ist. Sie interpretieren die Asymmetrie als ein Resultat der Schwierigkeit, helle Strahlen auf dunklem Material zu bilden, was ein gut bekannter Effekt auf Ganymed ist (*Shoemaker et al.*, 1982, *Hawke et al.*, 1983). Ebenso wie die Zugehörigkeit der dunklen Strahlen zu Tammuz ist auch das Substrat von Tammuz aufgrund der geringen Qualität der Bilddaten nicht eindeutig bestimmbar. Tammuz liegt im Grenzbereich von Tiamat Sulcus und dem, aus unzähligen Bruchstücken bestehenden dunklen Gebiet südwestlich von Marius Regio (siehe Abb. 6.1 in Kap. 6.1). Die gesamte Region ist durch zahlreiche weitere Einschlagskrater geprägt und hier vor allem von zahlreichen Penepalimpsesten (siehe Kap. 2.3.3). Nach *Schenk & McKinnon* (1991) liegt Tammuz im hellen Gebiet (vermutlich Tiamat Sulcus). Bei genauer Analyse der Kameradaten und der zur Kontrolle benutzten geologischen Karten von Ganymed (z.B. Tiamat Sulcus Quadrangle / Jg-9) des U.S Geological Survey wird angenommen, dass Tammuz mindestens zum Teil im Bereich der Bruchstücke des dunklen Gebietes liegt. Vor allem östlich von Tammuz sind die Grenzen zwischen diesen und Tiamat Sulcus zu erkennen. Südlich von Tammuz zieht sich ein Band des hellen Gebietes von West nach Ost, was durch seine internen linearen Strukturen, die mehr oder weniger parallel zum Verlauf des Bandes orientiert sind, deutlich von der Umgebung abzugrenzen ist.

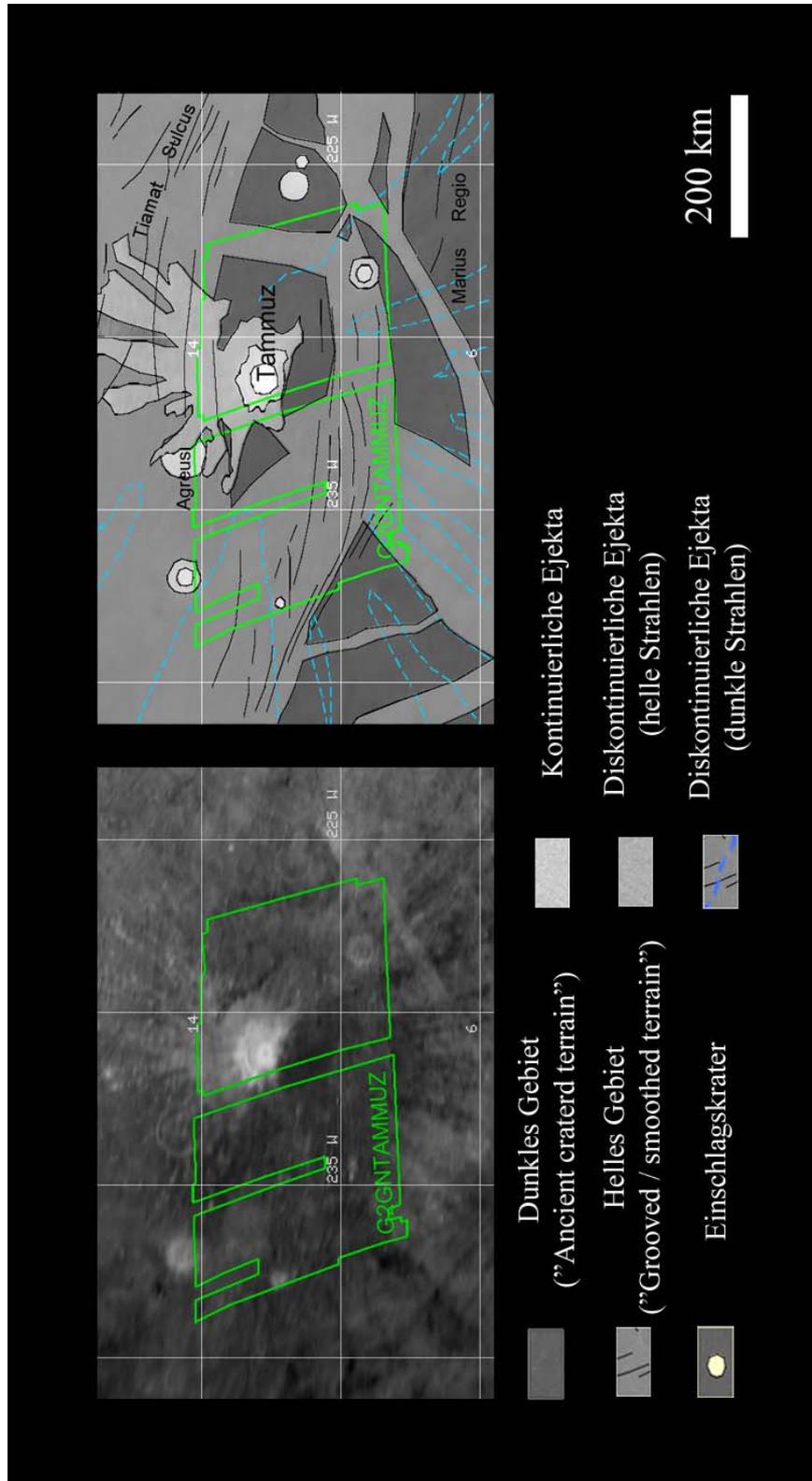


Abb. 6.84: Geologischer Kontext im Bereich des dunklen Strahlenkraters Tammuz basierend auf Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (Bildnummer: 0374J2-001; CLEAR-Filter) überlagert mit den Grenzen der NIMS-Beobachtung G2GENTAMMUZ.

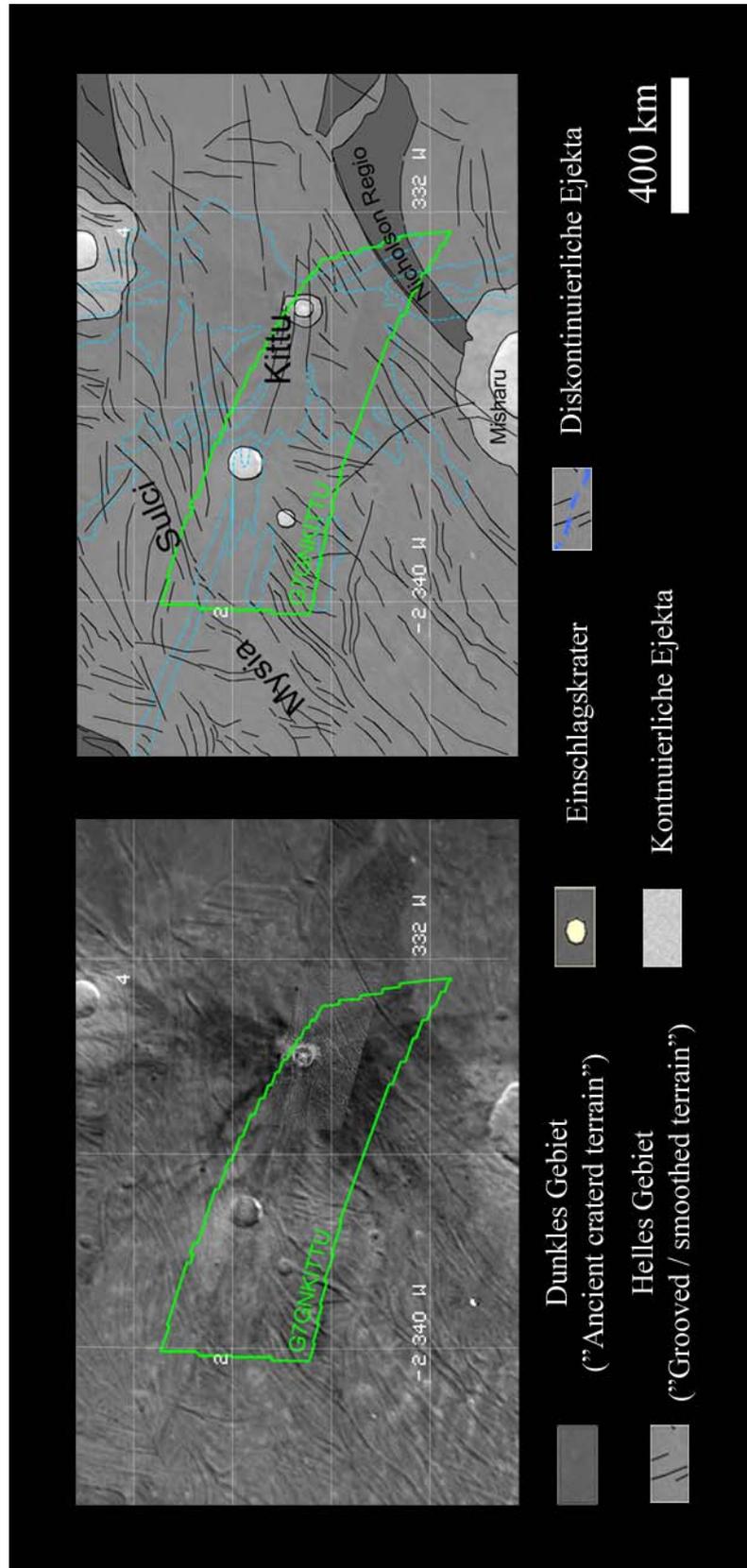


Abb. 6.85: Geologischer Kontext im Bereich des dunklen Strahlenkraters Kituu basierend auf einem Mosaik aus Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (Bildnummer: 0955J1-000; CLEAR-Filter) und Galileo (SSI-Beobachtungen G7GSKITTU\_01 und 02; CLEAR-Filter) überlagert mit den Grenzen der NIMS-Beobachtung G7GNKITTU.

Verzweigungen des Bandes in nördlicher und südlicher Richtung trennen die einzelnen Bruchstücke des dunklen Gebietes. Im Südosten von Tammuz im Bereich der dunklen Strahlen befindet sich ein weiterer im Vergleich zu Tammuz kleiner Einschlagskrater, der zudem in dem von NIMS beobachteten Bereich liegt. Die Kratermorphologie ist noch gut zu erkennen, jedoch nicht so deutlich ausgeprägt wie Tammuz. Scheinbar überlagert dieser Einschlagskrater die dunklen Strahlen, was die These von *Schenk & McKinnon* (1991) unterstützen würde.

### **Einschlagskrater Kittu (0,54°N/334,0°W)**

Kittu (0,54°N/334°W) ist der einzige dunkle Strahlenkrater für den neben den Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 zusätzlich Kameradaten der Galileo-SSI-Kamera mit räumlichen Auflösungen besser als 0,5 km/Pixel vorliegen. Die Abbildung 6.85 zeigt Kittu in einem Mosaik aus den Bilddaten der beiden Kameras zusammen mit einer geologischen Karte, welche die für die Interpretation der NIMS-Daten wichtigsten geologischen Einheiten enthält, beinhaltet. Der von NIMS beobachtete Teilbereich (NIMS-Beobachtung G7GNKITTU) liegt zwischen 2,9°S und 3°N bzw. 332,3 und 341°W und wurde mit einer räumlichen Auflösung von etwa 4 bis 6 km/Pixel aufgenommen (Tab. 6.28, siehe auch Kap. 5, Abb. 5.2). Kittu ist mit einem Durchmesser von 33 km etwas kleiner als Tammuz (~50 km) und der einzige der beobachteten Einschlagskrater, welcher zum einen in der dem Jupiter zugewandten Hemisphäre und zum anderen vollständig im hellen Gebiet (Mysia Sulcus) liegt. Nur vereinzelt sind innerhalb von Mysia Sulcus Bruchstücke dunkler Gebiete zu beobachten. Sie weisen teilweise ähnliche interne lineare Strukturen auf, wie sie den gesamten Mysia Sulcus prägen und werden als Indikator gesehen, dass die Bruchstücke mehr oder weniger stark in das Material von Mysia Sulcus eingearbeitet sind. Kittu ist charakterisiert durch eine komplexe Kratermorphologie. Im Zentrum des Einschlagskraters befindet sich ähnlich dem Dom von Melkart eine zentrale Erhebung (Kap. 6.4.1). Ein scharfer Kraterrand trennt den Einschlagskrater von seinen kontinuierlichen Ejekta. Der Einschlagskrater und dessen kontinuierliche Ejekta besitzen eine ovale Form, was auf einen schrägen Einschlag schließen lässt, bei dem der Einschlagskörper in einem schrägen Winkel ( $< 30^\circ$ ) auf die Ganymedoberfläche traf (*Melosh*, 1989).

Diese Annahme wird unterstützt von der asymmetrischen Ausbildung der Strahlen (=diskontinuierliche Ejekta). Sie dehnen sich vor allem in westlicher, nördlicher und südlicher Richtung von Kittu bis zu einer Entfernung von 1200 km vom Kraterrand bis in Regionen die weit ausserhalb des beobachteten Bereichs liegen, aus. Die ausgeprägte Morphologie und die Strahlen von Kittu weisen auf ein geologisch junges Alter von Kittu hin. Dies wird bestätigt durch die Messung bzw. Abschätzung der Einschlagskraterhäufigkeiten. Nach dem Modell von *Neukum* (1997) und *Neukum et al.* (1998) beträgt das maximale Modellalter von Kittu 730 Mill. Jahre (*Stephan et al.*, 2003). Kittu ist damit der jüngste, der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einschlagskrater. Die Umgebung von Kittu ist zusätzlich geprägt von weit verstreuten hellen Ejekta. Diese sind mit dem südlich von Kittu gelegenen etwa 300 km großen Einschlagskrater Misharu assoziiert. Dessen kontinuierliche Ejekta werden von den dunklen Strahlen von Kittu überlagert. Somit ist Misharu stratigraphisch gesehen älter als Kittu.

#### **6.4.3.1 Relativer Anteil von Wassereis**

Die Untersuchung der lokalen Variationen im relativen Anteil von Wassereis im Bereich von dunklen Strahlenkratern basiert wie bisher auf der Analyse der Absorptionstiefen von Wassereis bei 1,5µm. Hohe Messwerte weisen auf einen relativ hohen Anteil von Wassereis hin und abnehmende Messwerte werden als Indikator für einen sinkenden Anteil von Wassereis bzw. zunehmenden Anteil an Gesteinsmaterial interpretiert. Der relative Anteil von Wassereis in den einzelnen geologischen



Absorption ( $\mu\text{m}$ )	Mir	Ejekta	Marius Regio
1,5	34,4 ( $\pm 2,4$ ) – 38,5 ( $\pm 2,7$ )	17,9 ( $\pm 1,3$ ) – 21,1 ( $\pm 1,5$ )	23,7 ( $\pm 1,7$ ) – 32,3 ( $\pm 2,3$ )

Tab. 6.29: Absorptionstiefen von Wassereis bei  $1,5\mu\text{m}$  (in %; + absoluter Fehler) im Bereich des Einschlagskraters Mir (NIMS-Beobachtung G1GNMIRRAY) der Abbildung 6.86 aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskrater und dessen Ejekta sowie Marius Regio. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

Höhere Messwerte für Tammuz im Vergleich zu Mir sind eventuell dadurch bedingt, dass Tammuz deutlich größer ( $\sim 50$  km) als Mir ( $\sim 13,8$  km) ist und dessen spektrale Signatur in den NIMS-Beobachtungen räumlich besser von seiner Umgebung abgegrenzt ist. Im Falle von Mir ist dessen spektrale Signatur wahrscheinlich mit derjenigen der Ejekta vermischt. Jedoch erklärt dies nicht den geringeren Anteil von Wassereis der dunklen Ejekta von Mir im Vergleich zu denen von Tammuz. Vielmehr sind reelle Unterschiede im relativen Anteil zu erwarten. Vermutlich steht dies eher mit der Größe der Einschlagskrater in Zusammenhang.

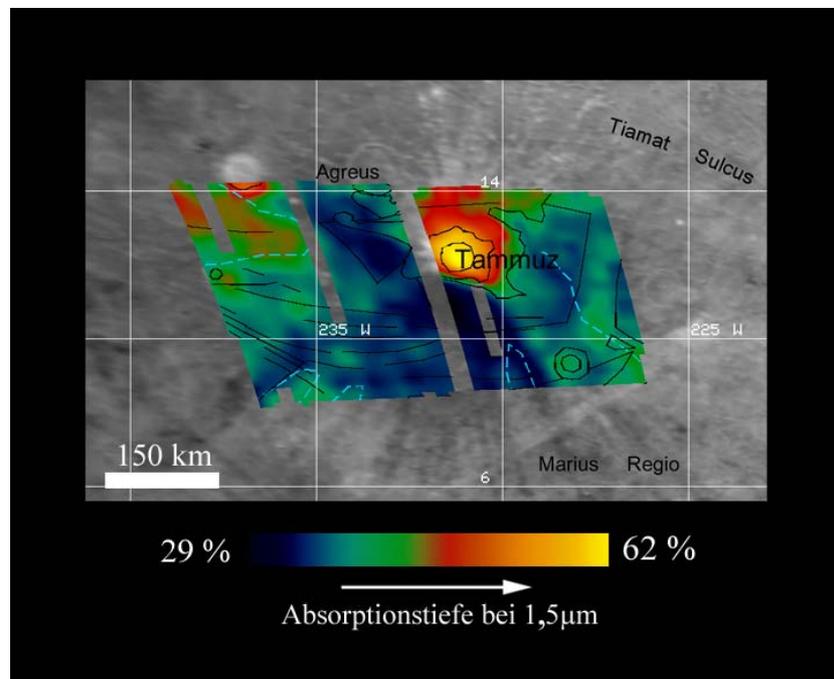


Abb. 6.87: Variationen in der Absorptionstiefe von Wassereis bei  $1,5\mu\text{m}$  im Bereich des dunklen Strahlenkraters Tammuz (NIMS-Beobachtung G2GNTAMMUZ) im Vergleich mit dem geologischen Kontext in Abb. 6.84 basierend auf Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (Diskussion im Text).

Krater- und Ejekta repräsentieren im Allgemeinen freigelegtes Material aus dem Untergrund (*Melosh*, 1989). Jede Phase des Einschlagsereignisses trägt seinen Anteil zum Auswurfsmaterial bei. Im Falle der dunklen Strahlenkrater im dunklen Gebiet von Marius Regio wäre es denkbar, dass die Ejekta dem Material entstammen, das zu Beginn des Einschlagsprozesses mit hohen Geschwindigkeiten aus dem Bereich des Einschlagskraters herausgeschleudert wurde. In diesem konzentriert sich vor allem die oberste Schicht an dunklem Oberflächenmaterial von Marius Regio selbst (Abb. 6.88). Dringt das Projektil kaum in die darunter liegende Schicht von Wassereis ein, werden die Ejekta von dem aufgearbeiteten Material der Oberfläche dominiert, da nur Material bis zu einer Tiefe, die etwa ein Drittel der gesamten Tiefe des resultierenden Einschlagskraters entspricht, ausgeräumt wird (*Melosh*, 1989). Im Falle von Tammuz ist der Einschlagskörper im Vergleich zu Mir vermutlich tiefer in den Untergrund von Ganymed eingedrungen. Deutlich mehr Wassereis wurde während des Einschlagsprozesses an die Oberfläche befördert. Im Falle von Mir ist aufgrund der geringen Kratergröße die

Eindringtiefe deutlich geringer. Es wurde weniger Wassereis an die Oberfläche befördert. Vor allem die Ejekta sind von einem höheren Anteil an Gesteinsmaterial der ursprünglichen Oberfläche von Marius Regio geprägt.

Im Falle von Kittu trifft dies jedoch nicht zu. Kittu liegt als einziger der von NIMS beobachteten dunklen Strahlenkrater im Bereich des hellen Gebietes. In Abbildung 6.89 sind Variationen in der Absorptionstiefe von Wassereis bei 1,5µm überlagert mit den Grenzen der geologischen Einheiten von Abbildung 6.85 farbkodiert dargestellt. Die Variationen im Bereich von Kittu zeigen den gleichen Trend wie im Falle von Mir und Tammuz. Im Bereich des Einschlagskraters sind die Absorptionstiefen mit maximal  $59,9 \pm 3,6\%$  relativ hoch und vergleichbar mit denen von Tammuz (Tab. 6.31). Dagegen sind die dunklen Ejekta von den niedrigsten Messwerten ( $17,9 \pm 1,1\%$ ) geprägt, welche denen der dunklen Ejekta von Mir entsprechen. Die Absorptionstiefen innerhalb von Mysia Sulcus schwanken zwischen  $33,6 \pm 2,0\%$  und  $43,0 \pm 2,6\%$ . Die Messwerte ähneln denen der Umgebung von Tammuz. Höhere Messwerte in der Umgebung von Kittu von maximal  $48,9 \pm 2,9\%$  sind eher mit den im sichtbaren Licht hellen Ejekta des Einschlagskraters Misharu assoziiert.

<i>Absorption (µm)</i>	<i>Tammuz</i>	<i>Ejekta (hell)</i>	<i>Ejekta (dunkel)</i>
<i>1,5</i>	58,1 (±3,5) – 62,1 (±3,1)	45,4 (±2,7) – 54,8 (±2,8)	29,0 (±2,0) – 33,1 (±2,3)

<i>Absorption (µm)</i>	<i>Substrat</i>	<i>Kleiner Einschlagkrater im NW</i>
<i>1,5</i>	33,7 (±2,4) – 45,1 (±2,7)	48,9 (±2,9) – 52,8 (±2,7)

Tab. 6.30 Absorptionstiefen von Wassereis bei 1,5µm (in %; + absoluter Fehler) im Bereich des Einschlagskraters Tammuz (NIMS-Beobachtung G2GNTAMMUZ) der Abbildung 6.87 aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskrater Tammuz und dessen helle und dunkle Ejekta, Marius Regio als Substrat und der relativ kleine Einschlagskrater im NW von Tammuz. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

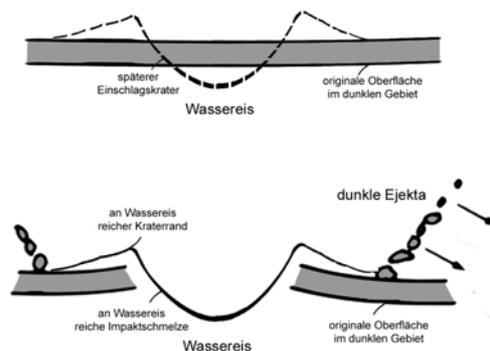


Abb. 6.88: Querschnitt eines dunklen Strahlenkraters im dunklen Gebiet zur Zeit des Impaktprozesses. (modifiziert nach Melosh, 1989) (Diskussion im Text).

Kittu besitzt verglichen mit Tammuz (~ 50 km) einen etwas kleineren Durchmesser. Die räumliche Auflösung der entsprechenden NIMS-Beobachtung ist jedoch etwas höher (G7GNKITTU: 4 bis 6 km/Pixel gegenüber G2GNTAMMUZ: 10 bis 13 km/Pixel). Auch gegenüber Mir ist die räumliche Auflösung etwas besser (NIMS Beobachtung G1GNMIRRAY: 5 bis 7 km/Pixel). Die unterschiedlichen Kratergrößen und die räumlichen Auflösungen erklären die leichten Unterschiede in den Absorptionstiefen der Krater und dunklen Ejekta.

In den Kameradaten sind innerhalb von Mysia Sulcus vereinzelt Bruchstücke von dunklen Gebieten zu beobachten, die mehr oder weniger stark in das helle Material von Mysia Sulcus tektonisch eingearbeitet wurden. Die Kameradaten lassen nicht eindeutig erkennen, ob das Bruchstück von

Nicholson Regio bis an den Einschlagskrater heran reicht. Kittu würde sich dann nahe an einer Grenze zwischen dunklem und hellem Gebiet befinden und das Material der Strahlen könnte wie die im Falle der dunklen Strahlenkrater im Marius Regio aufgearbeitetes Oberflächenmaterial verkörpern. Möglicherweise repräsentieren die dunklen Ejekta auch dunkles Material, welches aus dem Untergrund freigelegt wurde. Bereits in Uruk Sulcus wurde auf Bruchstücke von dunklem Gebiet hingewiesen, die möglicherweise vom hellen Material überflossen wurden (Kap. 6.2.1). Die dunklen Ejekta von Kittu entstammen dann eventuell einer tiefer liegenden Schicht oder lokalen Anreicherung von Gesteinsmaterial. Die These wird unterstützt von Untersuchungen von *Schenk & McKinnon* (1991), welche bereits im Falle von Einschlagskratern, die im hellen Gebiet identifiziert wurden und von einem dunklen Ring außerhalb des Kraterrandes charakterisiert sind, vermuten, dass dunkles Material des Untergrundes freigelegt und ausgeworfen wurde.

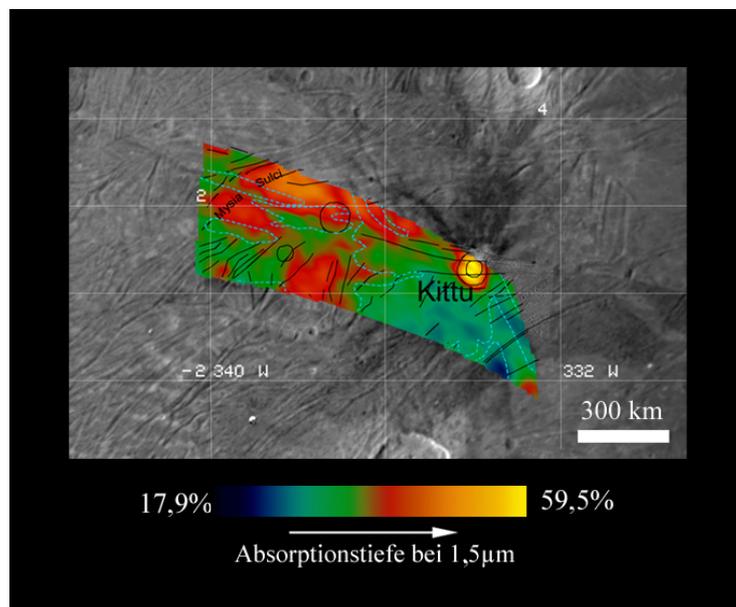


Abb. 6.89: Variationen in der Absorptionstiefe von Wassereis bei 1,5µm im Bereich des dunklen Strahlenkraters Kittu (NIMS-Beobachtung G7GNKITTU) im Vergleich mit dem geologischen Kontext in Abb. 6.85 basierend auf einem Mosaik aus Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 und Galileo (Diskussion im Text).

Absorption (µm)	Kittu	Dunkle Ejekta	Mysia Sulcus	Helle Ejekta (nahe Kittu)
1,5	45,0 (±2,7) – 59,5 (±3,6)	17,9 (±1,1) – 35,4 (±2,1)	33,6 (±2,0) – 43,0 (±2,6)	39,0 (±2,4) – 48,9 (± 2,9)

Tab. 6.31: Absorptionstiefen von Wassereis bei 1,5µm (in %; +absoluter Fehler) im Bereich des Einschlagskraters Kittu (NIMS-Beobachtung G7GNKITTU) der Abbildung 6.89 aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskrater Kittu und dessen dunkle Ejekta, Mysia Sulcus und die hellen Ejekta von Misharu im Süden von Kittu außerhalb ders von NIMS beobachteten Bereiche. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

In der Abbildung 6.90 sind die Reflexionsspektren der dunklen Ejekta von Mir, Tammuz und Kittu im Vergleich mit dem von Galileo Regio dargestellt. Im Rahmen der globalen Untersuchungen wurden keine Verschiebungen in den Wellenlängenpositionen der Absorptionen von Wassereis gemessen, die auf mögliche Unterschiede in der Oberflächenszusammensetzung hinweisen (siehe Kap. 6.1.4). Die Reflexionsspektren zeigen im Wesentlichen nur Unterschiede in den Absorptionstiefen von Wassereis, die zum einen vom relativen Anteil von Wassereis und Gesteinsmaterial als auch von der Partikelgröße von Wassereis abhängen. Zwischen dem dunklen Material der Regiones und den dunklen Ejekta wurden ebenfalls keine Unterschiede in den Wellenlängenpositionen der einzelnen Absorptionen gemessen. Des Weiteren erfolgt ein vergleichbarer Anstieg des Reflexionsgrades im Wellenlängenbe-

reich größer als  $3\mu\text{m}$ . Zwischen dem Gesteinsmaterial der Regionen und dem der dunklen Ejekta wurden daher im Wellenlängenbereich von NIMS keine chemischen Unterschiede identifiziert. Entweder sind diese nicht vorhanden oder die Gesteinsmaterialien in den dunklen Ejekta und den Regionen sind beide im NIR spektral neutral bzw. werden von der spektralen Signatur von Wassereis maskiert. Geringe Unterschiede in den Absorptionstiefen von Wassereis bei  $1,5\mu\text{m}$  und im Verlauf des dem Reflexionspektrum überlagerten Kontinuums zwischen  $0,7$  und  $2,5\mu\text{m}$  werden durch geringe Unterschiede im relativen Anteil von Wassereis oder auch gegebenenfalls von der Partikelgröße von Wassereis (siehe unten) verursacht.

Die hohe Konzentration von Gesteinsmaterial in den Ejekta relativ junger Strahlenkrater deutet zwar auf einen direkten Zusammenhang mit dem Einschlagsprozess hin, jedoch unterstützen sie nicht die Theorie von *Conca* (1981) und *Schenk & McKinnon* (1991), dass es sich dabei um das Resultat der Verunreinigung mit dem Material des Projektils handelt. Diese Theorie ist schwer vorstellbar. Vor allem da das entsprechende Projektil in der Regel viel kleiner als der Einschlagskrater ist (*Melosh*, 1989), ist es unklar, wie dieses Projektil verantwortlich sein soll für die teilweise weit ausgedehnten dunklen Strahlen. Auf der Basis der Untersuchungen des relativen Anteils von Wassereis, scheint die Konzentration von aufgearbeitetem Material der Oberfläche oder von aus dicht unter der Oberfläche freigelegtem Material in den dunklen Strahlen, am plausibelsten zu sein.

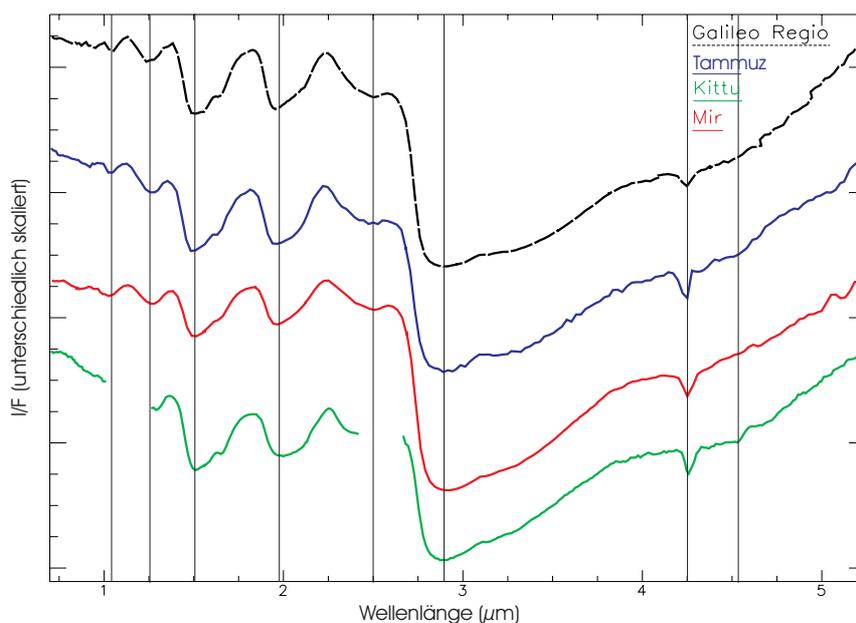


Abb.6.90: NIMS-Spektren der dunklen Auswurfmaterialien von Tammuz, Kittu und Mir im Vergleich mit einem Mittelwertspektrum des dunklen Gebiets von Galileo Regio.

#### 6.4.3.2 Partikelgröße von Wassereis

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich geologisch junge Einschlagskrater in der Regel durch eine zur Umgebung relativ geringe Partikelgröße von Wassereis auszeichnen. Geringe Partikelgrößen von Wassereis die mit Einschlagskratern assoziiert sind, werden daher als Indikatoren für geologisch junge Einschlagskrater gesehen. Im Falle der dunklen Strahlenkrater helfen sie einerseits die dunklen Ejekta als frisch ausgeworfenes Material zu kennzeichnen und andererseits die, wenn auch geringen Unterschiede im Verlauf des Kontinuums der Reflexionspektren in Abbildung 6.90 zwischen  $0,7$  und  $2,5\mu\text{m}$  zu erklären.

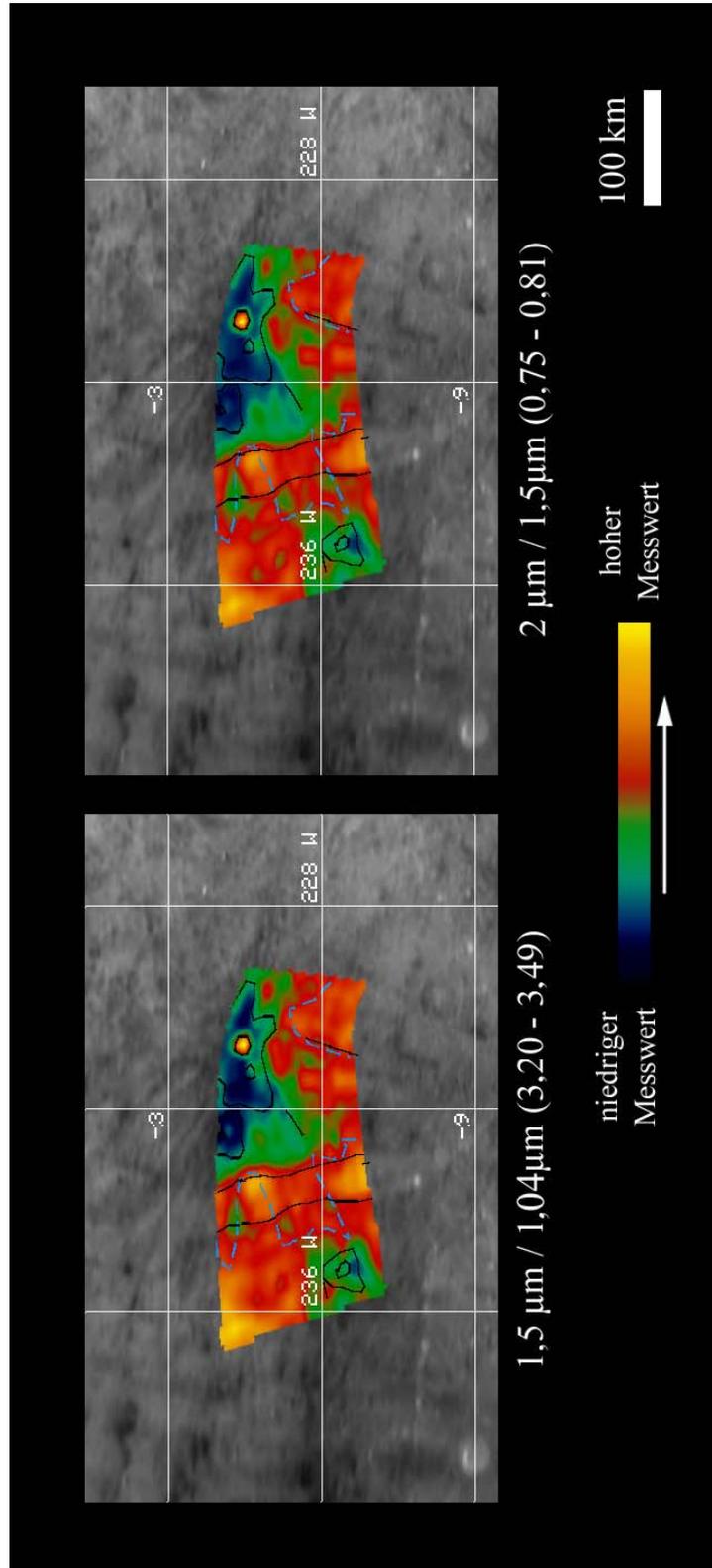


Abb. 6.91: Variationen im Verhältnis der Absorptionstiefe von Wassereis bei 1,5 und 1,04μm bzw. 2 und 1,5μm im Bereich des dunklen Strahlenkraters Mir (NIMS-Beobachtung GIGNMIRRAY) im Vergleich mit dem geologischen Kontext in Abb. 6.83 basierend auf Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (Diskussion im Text).

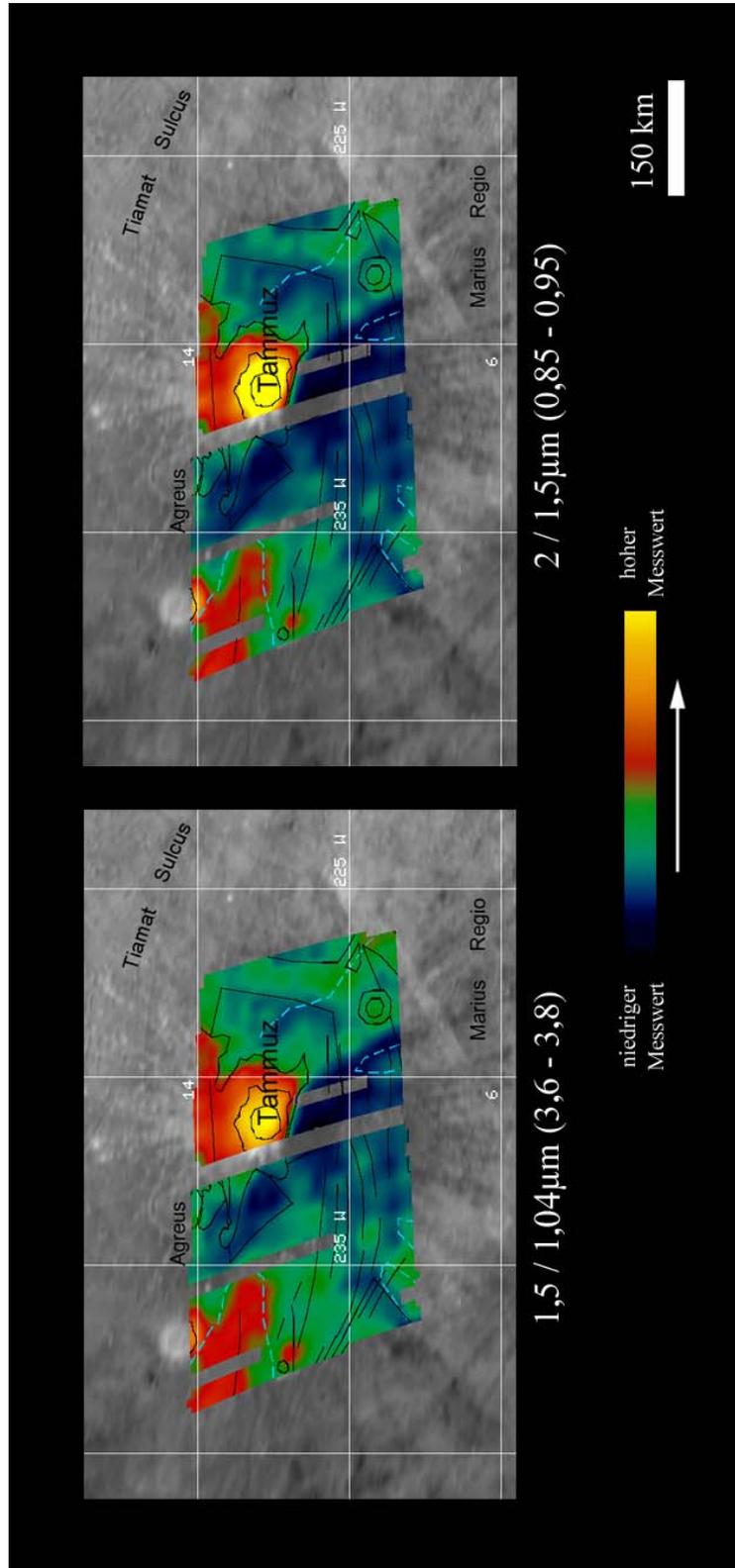


Abb. 6.92: Variationen im Verhältnis der Absorptionstiefen von Wassereis bei 1,5 und 1,04 µm bzw. 2 und 1,5 µm im Bereich des dunklen Strahlenkraters Tammuz (NIMS-Beobachtung G2GNTAMMUZ) im Vergleich mit dem geologischen Kontext in Abb. 6.84 basierend auf Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (Diskussion im Text).

Zur Analyse der relativen Unterschiede in der Partikelgröße von Wassereis wurde wie bisher das Verhältnis der Absorptionstiefen bei 2 und  $1,5\mu\text{m}$  genutzt. Auf der Basis der bisherigen Untersuchungen wurde gezeigt, dass dieser Quotient trotz der zunehmenden Sättigung der Absorption bei  $2\mu\text{m}$  im äquatorialen Bereich von Ganymed, ein Indikator für Veränderungen in der Partikelgröße von Wassereis ist. Im Falle der NIMS-Beobachtungen im Bereich von Mir und Tammuz konnte weiterhin das Verhältnis der Absorptionstiefen bei 1,5 und  $1,04\mu\text{m}$  untersucht werden. Da es sich bei dieser Kombination um den Quotienten von zwei ungesättigten Absorptionen handelt, wurde der Quotient im Vergleich mit dem Verhältnis der Absorptionen bei 2 und  $1,5\mu\text{m}$  eingesetzt.

In Abbildung 6.91 sind die Variationen im Verhältnis der Absorptionen 1,5 und  $1,04\mu\text{m}$  bzw. 2 und  $1,5\mu\text{m}$  im Bereich des Einschlagskraters Mir überlagert mit den geologischen Grenzen aus Abbildung 6.83 farbkodiert dargestellt. Die Messwerte beider Quotienten schwanken scheinbar wie die Absorptionstiefen bei  $1,5\mu\text{m}$  (Abb. 6.86) bzw. dem relativen Anteil von Wassereis. Sie schwanken aber nur gering und liegen mehr oder weniger vollständig im Bereich des jeweiligen absoluten Messfehlers (Tab. 6.32). Die Variationen zeigen also kaum Veränderungen in der Partikelgröße von Wassereis an. Wahrscheinlich sind die Partikelgrößen im Bereich von Mir mehr oder weniger konstant ist. Es ist denkbar, dass bei konstanter Partikelgröße im Quotienten Residuen (=Bestandteil des Messfehlers) des Einflusses des relativen Anteils von Wassereis sichtbar werden und die scheinbare Korrelation zwischen den Variationen des Quotienten in Abbildung 6.91 und denen des relativen Anteils hervorrufen.

Die Abbildung 6.92 zeigt die Variationen der Quotienten im Bereich des dunklen Strahlenkraters Tammuz überlagert mit den geologischen Grenzen aus der Abbildung 6.84. Wie im Falle von Mir wird vermutet, dass die Partikelgröße von Wassereis im Bereich von Tammuz relativ konstant ist bzw. sich nur geringfügig ändert. Die Variationen bieten daher auch keinen Beweis, ob die dunklen Ejekta zu Tammuz gehören oder nicht. Die Quotienten liegen insgesamt etwas höher als bei Mir (Tab. 6.33 und 6.34) und weisen auf kleinere Wassereispartikel im Bereich von Tammuz hin. Im Vergleich mit den Messwerten theoretischer Wassereismodelle, implizieren die Quotienten Partikelgrößen von größer als 1 mm für Mir und zwischen  $500\mu\text{m}$  und 1mm für Tammuz (Abb. 6.93 und 6.94). Dies entspricht den globalen Variationen. Es wurde gezeigt, dass die äquatorialen Regionen von Ganymed durch Wassereis mit relativen großen Partikeln charakterisiert sind, die in Richtung höherer geographischer Breiten abnehmen (Kap. 6.1.2). Mir liegt unmittelbar am Äquator und Tammuz in etwas höheren geographischen Breiten (Tab. 6.28). Da Mir näher am Äquator liegt als Tammuz erscheint die Annahme der vergleichsweise feineren Partikel von Tammuz reell.

Bereits im Kapitel 6.4.2 wurde auf die rasche Angleichung der Partikelgrößen von Einschlagskratern an die des jeweiligen Substrats hingewiesen, die sich nahe dem Äquator von Ganymed und zugleich im dunklen Gebiet befinden. Ähnliches wird auch für die Bereiche von Mir und Tammuz vermutet. Eine leicht geringere Partikelgröße im Bereich der Einschlagskrater kann nicht ausgeschlossen werden. Die Variationen bieten daher keinen eindeutigen Hinweis auf die Herkunft der dunklen Ejekta. Sie sprechen jedoch auch nicht gegen die oben angeführte Vermutung, dass es sich dabei um aufgearbeitetes Material des dunklen Gebietes handelt.

Im Gegensatz zu Mir und Tammuz wurden im Bereich des dunklen Strahlenkraters Kittu signifikante Veränderungen in der Partikelgröße von Wassereis beobachtet. Im Falle von Kittu standen nur die Absorptionen von Wassereis bei 2 und  $1,5\mu\text{m}$  zur Verfügung um die Variationen in der Partikelgröße von Wassereis zu untersuchen. In der Abbildung 6.95 sind die Variationen überlagert mit den geologischen Grenzen der Abbildung 6.85 dargestellt. In Tabelle 6.34 sind die Messwerte aufgeschlüsselt nach den geologischen Einheiten zusammengefasst.

Die vollständige Statistik für Kittu wie für die beiden anderen dunklen Strahlenkrater befindet sich im Anhang dieser Arbeit. Die Quotienten schwanken im Bereich von Kittu zwischen  $0,65 \pm 0,1$  und  $0,96 \pm 0,1$ . Die geringsten Messwerte liegen in dem Bereich, wo das dunkle Auswurfsmaterial direkt an den Einschlagskrater grenzt. Im Gegensatz zu den Variationen im relativen Anteil von Wassereis sind die Unterschiede zwischen dem Einschlagskrater und den dunklen Ejekta gering. Die Bereiche des Einschlagskraters und die restlichen Bereiche des dunklen Auswurfsmaterials weisen zusammen mit den im sichtbaren Licht hellen Ejekta des Einschlagskraters Misharu mittlere Messwerte auf. Die mit  $0,96 \pm 0,1$  höchsten Messwerte bzw. die kleinsten Wassereispartikel wurden jedoch nicht im Bereich des Einschlagskraters sondern in dessen Umgebung (Mysia Sulcus) gemessen.

<i>Absorption (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Mir</i>	<i>Ejekta</i>	<i>Marius Regio</i>
<b>1,5/1,04</b>	3,41 ( $\pm 0,2$ ) – 3,49 ( $\pm 0,2$ )	3,20 ( $\pm 0,2$ ) – 3,32 ( $\pm 0,2$ )	3,36 ( $\pm 0,2$ ) – 3,5 ( $\pm 0,2$ )
<b>2/1,5</b>	0,77 ( $\pm 0,1$ ) – 0,81 ( $\pm 0,1$ )	0,72 ( $\pm 0,1$ ) – 0,76 ( $\pm 0,1$ )	0,75 ( $\pm 0,1$ ) – 0,77 ( $\pm 0,1$ )

Tab. 6.32: Verhältnis der Absorptionstiefen von Wassereis bei 1,5 und 1,25 $\mu\text{m}$  (oben) bzw. 2 und 1,5 $\mu\text{m}$  (unten) im Bereich des Einschlagskraters Mir (NIMS-Beobachtung G1GNMIRRAY) der Abbildung 6.91 aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskraters und dessen Ejekta sowie Marius Regio. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

<i>Absorption (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Tammuz</i>	<i>Ejekta (hell)</i>	<i>Ejekta (dunkel)</i>
<b>1,5/1,04</b>	3,76 ( $\pm 0,2$ ) – 3,80 ( $\pm 1,5$ )	3,67 ( $\pm 0,2$ ) – 3,74 ( $\pm 1,5$ )	3,66 ( $\pm 0,2$ ) – 3,67 ( $\pm 1,5$ )

<i>Absorption (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Substrat</i>	<i>Kleiner Einschlagkrater im NW</i>
<b>1,5/1,04</b>	3,65 ( $\pm 0,2$ ) – 3,67 ( $\pm 1,5$ )	3,69 ( $\pm 0,2$ ) – 3,71 ( $\pm 1,5$ )

Tab. 6.33 Verhältnis der Absorptionstiefen von Wassereis bei 1,5 und 1,04  $\mu\text{m}$  im Bereich des Einschlagskraters Tammuz (NIMS-Beobachtung G2GNTAMMUZ) der Abb. 6.92, aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskrater Tammuz und dessen helle und dunkle Ejekta, Marius Regio als Substrat und der relativ kleine Einschlagskrater im NW von Tammuz. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

<i>Absorption (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Tammuz</i>	<i>Ejekta (hell)</i>	<i>Ejekta (dunkel)</i>
<b>2/1,5</b>	0,92 ( $\pm 0,1$ ) – 0,94 ( $\pm 0,1$ )	0,86 ( $\pm 0,1$ ) – 0,91 ( $\pm 0,1$ )	0,85 ( $\pm 0,1$ ) – 0,86 ( $\pm 0,1$ )

<i>Absorption (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Substrat</i>	<i>Kleiner Einschlagkrater im NW</i>
<b>2/1,5</b>	0,85 ( $\pm 0,1$ ) – 0,87 ( $\pm 0,1$ )	0,88 ( $\pm 0,1$ ) – 0,90 ( $\pm 0,1$ )

Tab. 6.34 Verhältnis der Absorptionstiefen von Wassereis bei 2 und 1,5 $\mu\text{m}$  im Bereich des Einschlagskraters Tammuz (NIMS-Beobachtung G2GNTAMMUZ) der Abb. 6.92, aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskrater Tammuz und dessen helle und dunkle Ejekta, Marius Regio als Substrat und der relativ kleine Einschlagskrater im NW von Tammuz. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

Die Messwerte im Bereich des Einschlagskraters und der Ejekta entsprechen denen des Einschlagskraters Mir (Abb. 6.91). Beide Einschlagskrater liegen direkt am Äquator. Die Messwerte der Umgebung liegen jedoch deutlich über den Messwerten der nahe dem Äquator gelegenen Region der von Jupiter abgewandten Hemisphäre. Sie entsprechen eher denen des Einschlagskraters Tammuz. Sie liegen jedoch knapp unter denen des hellen Gebietes im Bereich des Einschlagskraters Melkart. Die Beobachtungen widersprechen den bisherigen Beobachtungen, dass geologisch junge Einschlagskrater

und ihre Ejekta im Vergleich mit ihrer unmittelbaren Umgebung kleinere Partikel oder zumindestens ähnliche Partikelgrößen aufweisen. Scheinbar dreht sich dieses Verhältnis im Bereich Kittu um. Die Beobachtung begrenzt sich jedoch nicht nur auf Kittu sondern schließt die hellen Ejekta des Einschlagskraters Misharu ein. Es besteht daher ein Gegensatz zwischen Auswurfmaterial und Umgebung unabhängig vom relativen Anteil von Wassereis.

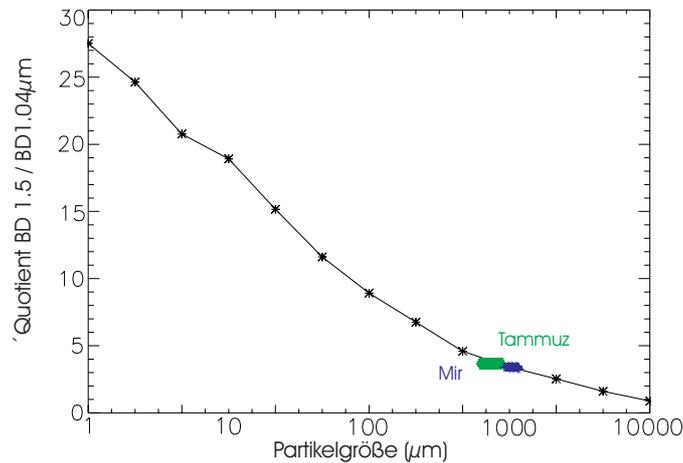


Abb. 6.93: Quotienten der Absorptionstiefen bei 1,5 und 1,04 $\mu\text{m}$  der dunklen Strahlenkrater mit den Messwerten für spezifische Partikelgrößen von Wassereis. Zum Vergleich sind die Quotienten der bereits untersuchten hellen Strahlenkrater beigefügt.

<i>Absorption</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>Kittu</i>	<i>Dunkle Ejekta</i>	<i>Mysia Sulcus</i>	<i>Helle Ejekta</i> (nahe Kittu)
<i>2/1,5</i>	0,73 ( $\pm 0,1$ ) – 0,83 ( $\pm 0,1$ )	0,66 ( $\pm 0,1$ ) – 0,86 ( $\pm 0,1$ )	0,71 ( $\pm 0,1$ ) – 0,96 ( $\pm 0,1$ )	0,79 ( $\pm 0,1$ ) – 0,83 ( $\pm 0,1$ )

Tab. 6.35: Verhältnis der Absorptionstiefen von Wassereis bei 2 und 1,5 $\mu\text{m}$  im Bereich des Einschlagskraters Kittu (NIMS-Beobachtung G7GNKITTU) der Abbildung 6.95 aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskrater Kittu und dessen dunkle Ejekta, Mysia Sulcus und die hellen Ejekta von Misharu im Süden von Kittu assuerhalb ders von NIMS beobachteten Bereichs. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

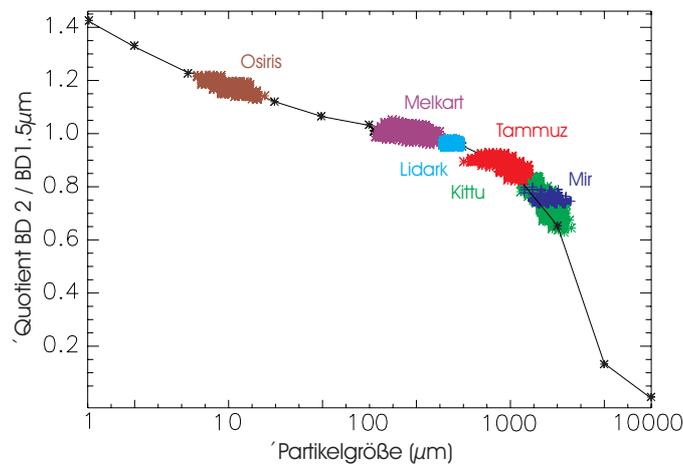


Abb. 6.94: Quotienten der Absorptionstiefen bei 2 und 1,5 $\mu\text{m}$  der dunklen Strahlenkrater mit den Messwerten für spezifische Partikelgrößen von Wassereis. Zum Vergleich sind die Quotienten der bereits untersuchten hellen Strahlenkrater beigefügt.

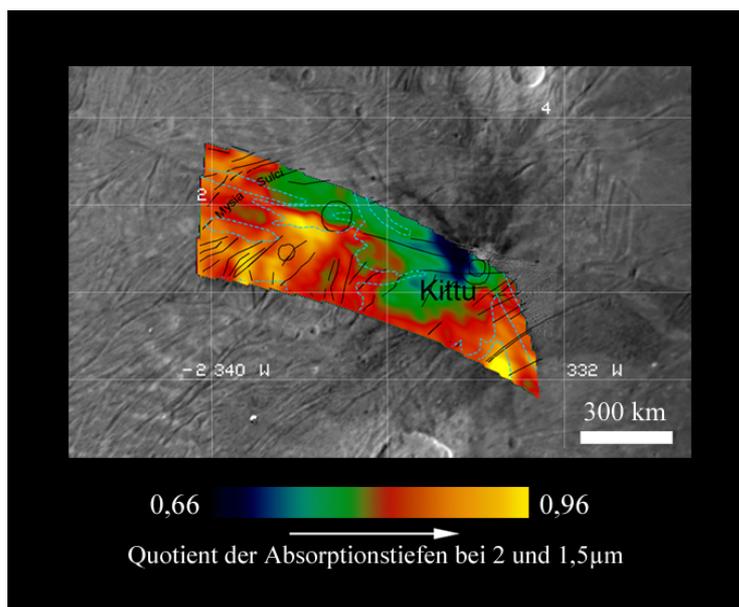


Abb. 6.95: Variationen im Verhältnis der Absorptionstiefen von Wassereis bei 2 und  $1,5\mu\text{m}$  im Bereich des dunklen Strahlenkraters Kittu (NIMS-Beobachtung G7GNKITTU) im Vergleich mit dem geologischen Kontext in Abb. 6.85 basierend auf einem Mosaik aus Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 und Galileo (Diskussion im Text).

Unter Umständen handelt es sich dabei um einen generellen Unterschied in der Partikelgröße von Wassereis zwischen der Jupiter zugewandten und abgewandten Hemisphäre. Kittu liegt zum einen als einziger der beobachteten dunklen Strahlenkrater gerade noch im Bereich der Heckseite und auf der dem Jupiter zugewandten Hemisphäre. Zum anderen stellt diese Beobachtung zugleich die einzige verfügbare NIMS-Beobachtung dieser Hemisphäre dar. Um die Richtigkeit der Beobachtung zu untermauern, dass die hellen Gebiete um Kittu größere Wassereispartikel aufweisen als geologisch junge Einschlagskrater und deren Ejekta, wären weitere Spektraldaten der benachbarten Regionen von Kittu notwendig. Um die Partikelgrößenunterschiede zu bestätigen, wurde auf die Kameradaten der Raumsonden Voyager 1 und 2 zurückgegriffen.

In Abbildung 6.96 sind ein Grautonbild des CLEAR-Filters ( $\sim 0,5\mu\text{m}$ ) im Vergleich mit einem Quotientenbild der Filter OR ( $\sim 0,6\mu\text{m}$ ) und VIO ( $\sim 0,42\mu\text{m}$ ) dargestellt. Das Farbkompositenbild zeigt deutlich die unterschiedlichen geologischen Einheiten im Bereich von Kittu mit dem Krater selbst und seinen dunklen Ejekta, den Einschlagskrater Misharu mit seinen hellen Ejekta und weitere Einschlagskrater in der Umgebung. Das Substrat dieses Einschlagskraters wird vom hellen Gebiet und teilweise von Bruchstücken des dunklen Gebietes gebildet. Das Verhältnis des Reflexionsgrades der Filter OR und VIO zeigt vergleichbare Variationen, wie die Partikelgrößen von Wassereis in Abbildung 6.95. Niedrige Messwerte konzentrieren sich im Bereich der im sichtbaren Licht hellen und dunklen Einschlagskrater und deren Ejekta. Vergleichsweise hohe Messwerte charakterisieren dagegen die gesamte Umgebung.

Dies widerspricht den Ergebnissen von *Schenk & McKinnon* (1991). Sie weisen auf der Basis von Untersuchungen des Verhältnisses im Reflexionsgrad der Filter OR und VIO auf spektrale Unterschiede zwischen Kittu und den übrigen dunklen Strahlenkratern hin und sehen in den dunklen Strahlen Anzeichen für verschiedene Einschlagskörper. Im Falle der dunklen Strahlenkrater der von Jupiter abgewandten Hemisphäre wie z.B. Mir vermuten sie Einschläge von Asteroiden der Klasse D, die sich durch eine höhere Reflexion im Bereich des roten Lichts auszeichnen. Im Gegensatz dazu interpretieren sie die spektralen Charakteristika der dunklen Strahlen von Kittu als Ergebnis des Einschlages eines mehr neutralen Asteroiden der Klasse C. Der Reflexionsgrad repräsentiert jedoch stets eine Mischung aus Gesteinsmaterial und Wassereis und *Schenk & McKinnon* (1991) vernachlässigen bei ihren Auswertungen den Einfluss der Partikelgröße von Wassereis.

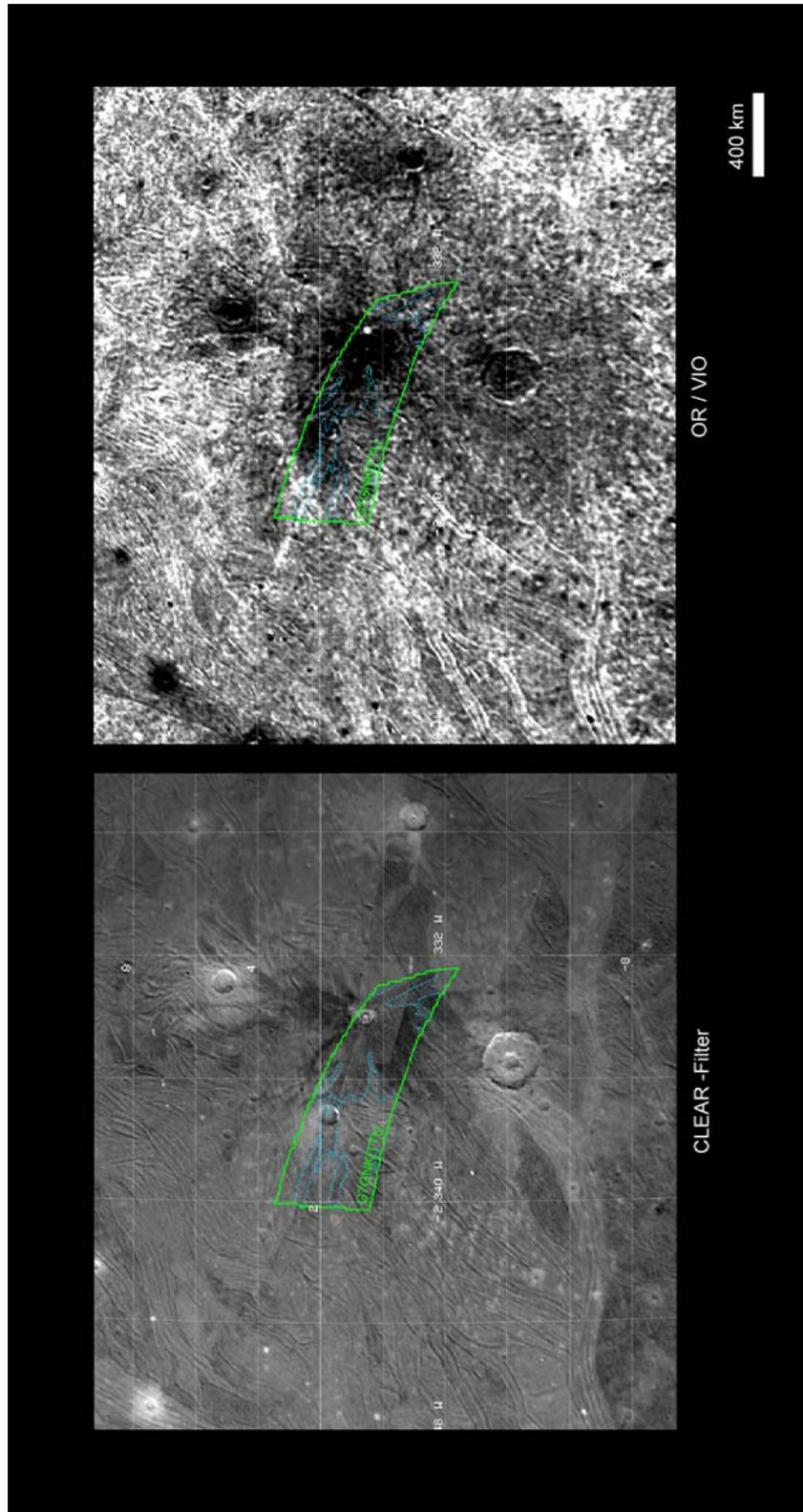


Abb. 6.96: Grautonbild des CLEAR-Filters ( $\sim 0,5\mu\text{m}$ ) im Vergleich mit dem Verhältnis des Reflexionsgrades der Filter OR ( $\sim 0,6\mu\text{m}$ ) und VIO ( $\sim 0,42\mu\text{m}$ ) im Bereich des dunklen Strahlenkraters Kittu (NIMS-Beobachtung G7GNKITTU) basierend auf Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (Diskussion im Text).

Die Abbildung 6.97 zeigt die Wellenlängenbereiche der Filter VIO und OR der Voyager-Sonden in Bezug auf Reflexionsspektren von Wassereis mit unterschiedlichen Partikelgrößen. Die Reflexionsspektren repräsentieren den Effekt einer makroskopischen Mischung (Kap. 5 und 5.1.4) eines Gesteinsmaterials mit 20 % Anteil an Wassereis mit unterschiedlichen Partikelgrößen. Als Gesteinsmaterial diente ein Reflexionsspektrum der im sichtbaren Licht dunklen Hemisphäre des Saturnmondes Iapetus. Diese Hemisphäre zeigt spektrale Ähnlichkeiten zum Gesteinsmaterial von Callisto, welches vermutlich eine ähnliche Zusammensetzung besitzt wie das von Ganymed (siehe Kap. 6.1.4). Das Reflexionsspektrum von Iapetus wurde mit dem abbildenden Spektrometer VIMS („Visual Infrared Mapping Spectrometer“) an Bord der Raumonde Cassini aufgenommen, welches als Weiterentwicklung von NIMS auch Spektraldaten im sichtbaren Licht zwischen  $0,35$  und  $0,7\mu\text{m}$  detektiert. Die resultierenden spektralen Mischungen verdeutlichen, wie das Verhältnis des Reflexionsgrades der Voyager-Filter OR und VIO mit abnehmender Partikelgröße steigt. Dies unterstützt die Annahme, dass die Umgebung von Kittu im Verhältnis zu diesem und den benachbarten Einschlagskratern durch größere Wassereispartikel geprägt ist. Möglicherweise besteht ein Zusammenhang mit der Modifizierung der Ganymedoberfläche durch einfallende Partikel aus Jupiters Magnetosphäre, welche insbesondere die Heckseite (siehe Kap. 6.1.1; Delitzky & Lane, 1998) und bisher nicht identifizierte Einflüsse Jupiters, welche vor allem die ihm zugewandte Hemisphäre von Ganymed prägen.

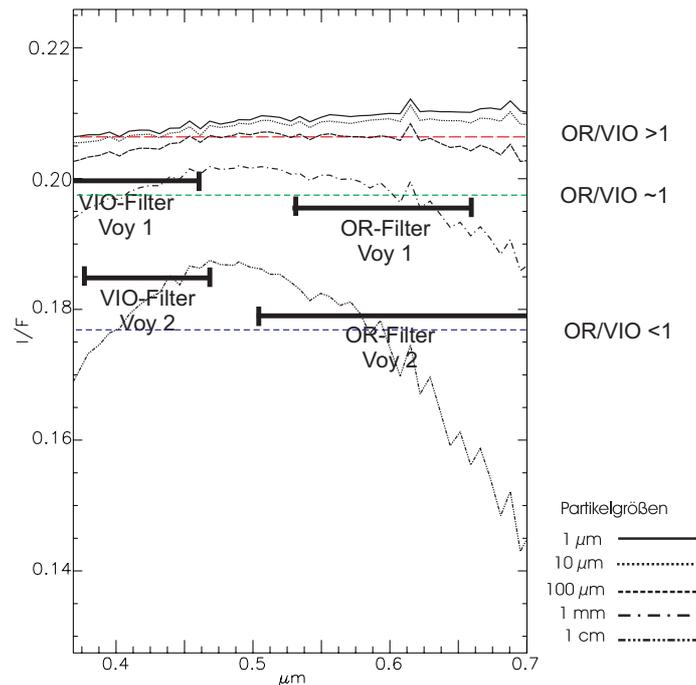


Abb. 6.97: Effekt der Partikelgröße von Wassereis mit einem Anteil von 20% an einer räumlichen Mischung (engl.: „areal mixture“) von Wassereis und Gesteinsmaterial im Bereich der Voyager-Filter OR und VIO. Als Gesteinsmaterial diente ein Reflexionsspektrum der im sichtbaren Licht dunklen Hemisphäre des Saturnmondes Iapetus. Diese Hemisphäre zeigt spektrale Ähnlichkeiten zum Gesteinsmaterial von Callisto (siehe Kap. 6.1.4) (Diskussion im Text).

### 6.4.3.3 Gehalt an $\text{CO}_2$

Im Rahmen der Untersuchung erwiesen sich die Absorptionstiefen von  $\text{CO}_2$  bei  $4,25\mu\text{m}$  stark abhängig vom Reflexionsgrad und spiegelten nicht die reelle Verbreitung von  $\text{CO}_2$  im Oberflächenmaterial von Ganymed wider. Nur im Falle einiger junger im sichtbaren Licht heller Einschlagskrater wurde eindeutig eine Anreicherung von  $\text{CO}_2$  nachgewiesen und wurde zusammen mit einem hohen Anteil und geringen Partikelgrößen von Wassereis als Indikator für junge Einschlagskrater gewertet.

In Abbildung 6.98 sind die Variationen in der Absorptionstiefe von CO<sub>2</sub> bei 4,25µm im Bereich des dunklen Strahlenkraters Mir überlagert mit den geologischen Grenzen der Abbildung 6.83 dargestellt. Die Absorptionstiefen schwanken zwischen  $17,4 \pm 1,7$  % und  $17,7 \pm 1,8$  % (Tab. 6.36). Der Unterschied von 0,3 % liegt weit unterhalb des absoluten Messfehlers. Die geringen Variationen innerhalb der NIMS-Beobachtung sind daher vernachlässigbar gering und zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den dunklen Ejekta und ihrer unmittelbaren Umgebung. Mit maximal  $17,7 \pm 1,8$  % ist die Absorption bei CO<sub>2</sub> jedoch relativ tief. Die Messwerte entsprechen denen, welche im Rahmen der globalen Untersuchungen nahe dem Äquator gemessen wurden.

Im Gegensatz zu Mir schwanken die Absorptionstiefen im Bereich von Tammuz um mehr als 15% (Abb. 6.99). Die Variationen der Absorptionstiefen erscheinen zu denen des relativen Anteils und der Partikelgrößen von Wassereis umgekehrt proportional. Die mit  $5 \pm 1,0$ % niedrigsten Messwerte wurden im Bereich des Einschlagskraters selbst gemessen (Tab. 6.37). Die Absorption ist etwas stärker in den hellen Ejekta und dem benachbarten hellen Einschlagskrater. Die tiefsten Absorptionen wurden mit  $21,6 \pm 2,2$  % und  $20,6 \pm 2,1$  % im Bereich der dunklen Ejekta bzw. im Tammuz umgebenden Gebiet gemessen (Tab. 6.34). Daraus folgt jedoch nicht, dass der Gehalt von CO<sub>2</sub> von den spektralen Eigenschaften von Wassereis bedingt ist. In Abbildung 6.98 sind die gemessenen Absorptionstiefen bei 4,25µm dem jeweiligen Reflexionsgrad bei 4,25µm gegenübergestellt. Der Graph zeigt eine ausgeprägte Korrelation. Sie wird vor allen dadurch bedingt, dass sich im äquatorialen Bereich von Ganymed vor allem Wassereis mit relativ großen Partikeln konzentriert.

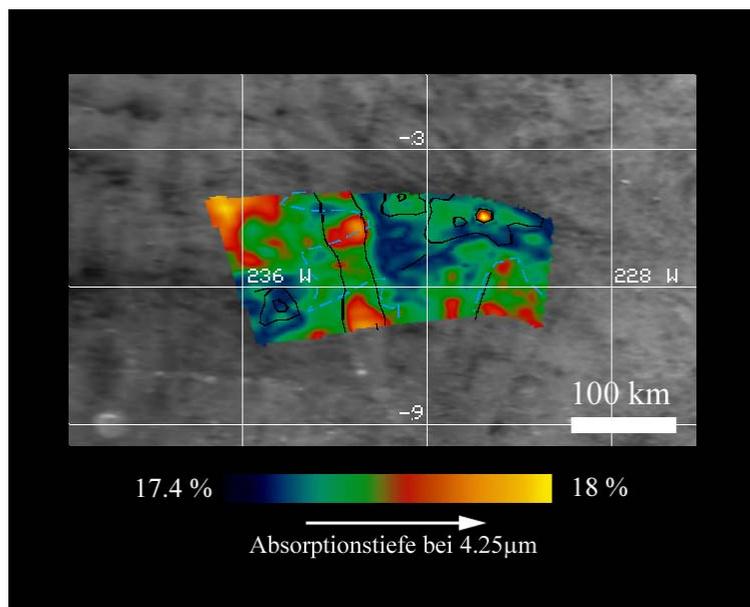


Abb. 6.98: Variationen in der Absorptionstiefe von CO<sub>2</sub> bei 4,25µm im Bereich des dunklen Strahlenkraters Mir (NIMS-Beobachtung G1GNMIRRAY) im Vergleich mit dem geologischen Kontext in Abb. 6.83 basierend auf Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (Diskussion im Text).

<i>Absorption (µm)</i>	<i>Mir</i>	<i>Ejekta</i>	<i>Marius Regio</i>
<b>4,25</b>	17,6 (±1,8) – 17,7 (±1,8)	17,4 (±1,7) – 17,5 (±1,8)	17,4 (±1,8) – 17,7 (±1,8)

Tab. 6.36: Absorptionstiefen von CO<sub>2</sub> bei 4,25µm (in %; + absoluter Fehler) im Bereich des Einschlagskraters Mir (NIMS-Beobachtung G1GNMIRRAY) der Abbildung 6.98 aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskrater und dessen Ejekta sowie Marius Regio. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

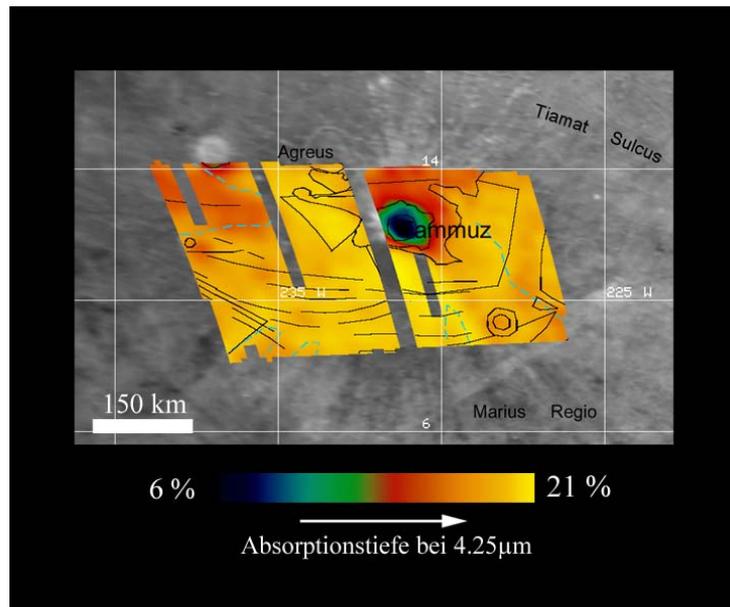


Abb. 6.99: Variationen in der Absorptionstiefe von CO<sub>2</sub> bei 4,25µm im Bereich des dunklen Strahlenkraters Tammuz (NIMS-Beobachtung G2GNTAMMUZ) im Vergleich mit dem geologischen Kontext in Abb. 6.84 basierend auf Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (Diskussion im Text).

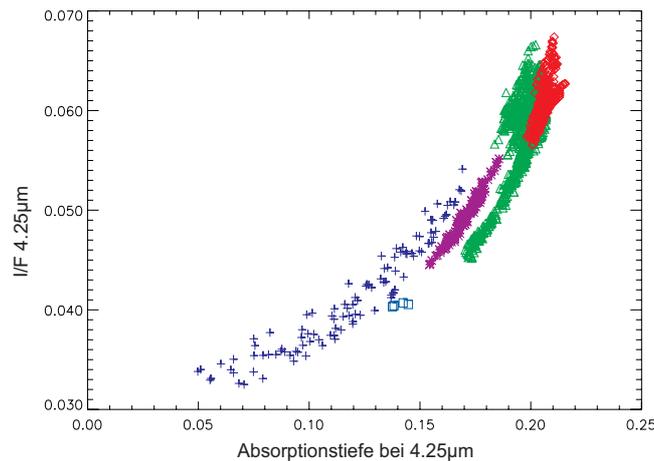


Abb. 6.100: Vergleich der Absorptionstiefen von CO<sub>2</sub> bei 4,25µm mit dem Reflexionsgrad bei 4,25µm (photometrisch korrigiert nach Kap. 5) im Bereich des dunklen Strahlenkraters Tammuz (NIMS-Beobachtung G2GNTAMMUZ) separat für die geologischen Einheiten: 1. Tammuz (**blau**), 2. benachbarter heller Einschlagskrater im NW (**hellblau**), 3. helle Ejekta von Tammuz (**violett**), 4. dunkles Gebiet / Marius Regio (**grün**) und dunkle Ejekta von Tammuz (**rot**) (Diskussion im Text).

<i>Absorption (µm)</i>	<i>Tammuz</i>	<i>Ejekta (hell)</i>	<i>Ejekta (dunkel)</i>
<b>4,25</b>	5 (±0,5) - 10 (±1,0)	12,4 (±1,3) – 17,3 (±1,7)	20,7 (±2,1) – 21,6 (±2,2)

<i>Absorption (µm)</i>	<i>Substrat</i>	<i>Kleiner Einschlagkrater im NW</i>
<b>4,25</b>	17,4 (±1,7) – 20,6 (±2,1)	13,8 (±1,4) – 15,9 (±1,6)

Tab. 6.37 Absorptionstiefen von CO<sub>2</sub> bei 4,25µm im Bereich des Einschlagskraters Tammuz (NIMS-Beobachtung G2GNTAMMUZ) der Abbildung 6.99 aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskrater Tammuz und dessen helle und dunkle Ejekta, Marius Regio als Substrat und der relativ kleine Einschlagskrater im NW von Tammuz. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

Dieses ist durch einen sehr niedrigen Reflexionsgrad bei  $4,25\mu\text{m}$  charakterisiert. In Bereichen mit einem relativ hohen Anteil von Wassereis ist eine Detektierung der ohnehin schwachen Absorption bei  $4,25\mu\text{m}$  nahezu unmöglich. Dies erklärt die schwache Absorption bei  $4,25\mu\text{m}$  im Bereich von Tammuz. Mit dem zunehmenden Anteil von Gesteinsmaterial steigt der Reflexionsgrad und erreicht im Bereich der dunklen Ejekta sein Maximum. Hier wurden auch die tiefsten Absorptionen gemessen. Die Absorptionstiefen sind daher im Bereich von Tammuz kein direkter Indikator für den Gehalt an  $\text{CO}_2$  im Oberflächenmaterial. Die Absorptionstiefen zeigen jedoch, dass es keine signifikanten Unterschiede im Gehalt an  $\text{CO}_2$  zwischen den dunklen Strahlen und dem dunklen Gebiet gibt, da beide Regionen einen vergleichbaren Reflexionsgrad aufweisen. Dies bietet jedoch keinen Beweis dafür, ob die dunklen Ejekta zu Tammuz gehören oder nicht. Im Bereich des Einschlagskraters Kittu variierten bereits die Partikelgrößen von Wassereis unabhängig von dessen relativen Anteil der geologischen Einheiten. Ähnliches ist auch für die Absorption von  $\text{CO}_2$  bei  $4,25\mu\text{m}$  zu beobachten. In Abbildung 6.101 sind die Variationen der Absorptionstiefe bei  $4,25\mu\text{m}$  überlagert mit den geologischen Grenzen aus Abbildung 6.85 dargestellt. Die niedrigsten Messwerte konzentrieren sich mit Krater, mittlere Messwerte in den dunklen Ejekta von Kittu und den hellen Ejekta von Misharu. Im hellen Gebiet der Umgebung wurden die tiefsten Absorptionen gemessen. Mysia Sulcus weist mit maximal  $26,8 \pm 2,7 \%$  die tiefsten Absorptionen von  $\text{CO}_2$  auf, die im Rahmen der gesamten Untersuchungen gemessen wurden (Tab. 6.38). Die graphische Gegenüberstellung der gemessenen Absorptionstiefen mit dem jeweiligen Reflexionsgrad in Abbildung 6.102 zeigt keine Korrelation zwischen den beiden Größen. Der Reflexionsgrad schwankt gegenüber den Absorptionstiefen bei  $4,25\mu\text{m}$  nur gering. Die Messwerte liegen zwischen  $\sim 0,02$  und  $\sim 0,032$ . Dies ist deutlich niedriger als im Bereich von Tammuz, wo der Reflexionsgrad stets deutlich über  $0,03$  liegt. Dennoch sind die Absorptionstiefen in der Gegend von Kittu deutlich tiefer.

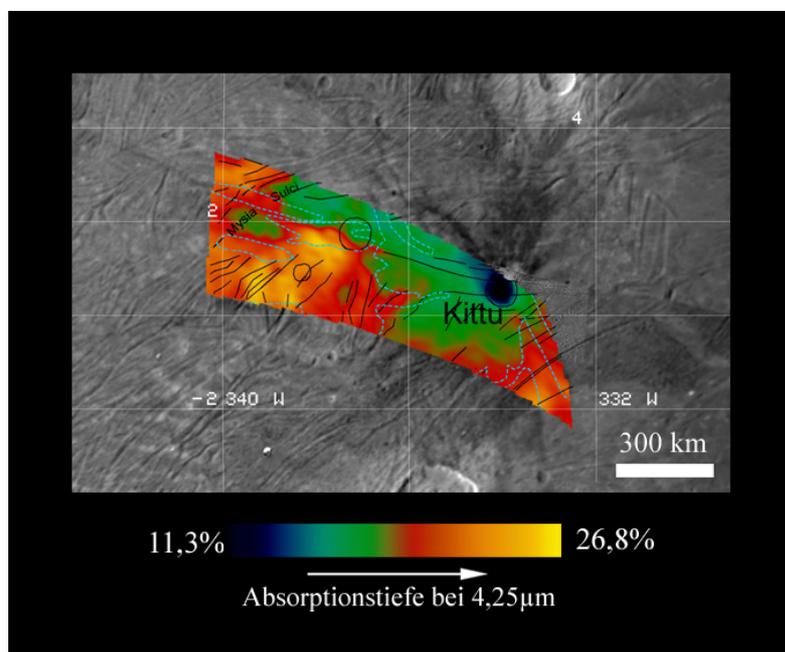


Abb. 6.101: Variationen in der Absorptionstiefe von  $\text{CO}_2$  bei  $4,25\mu\text{m}$  im Bereich des dunklen Strahlenkraters Kittu (NIMS-Beobachtung G7GNKITTU) im Vergleich mit dem geologischen Kontext in Abb. 6.85 basierend auf einem Mosaik aus Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 und Galileo (Diskussion im Text).

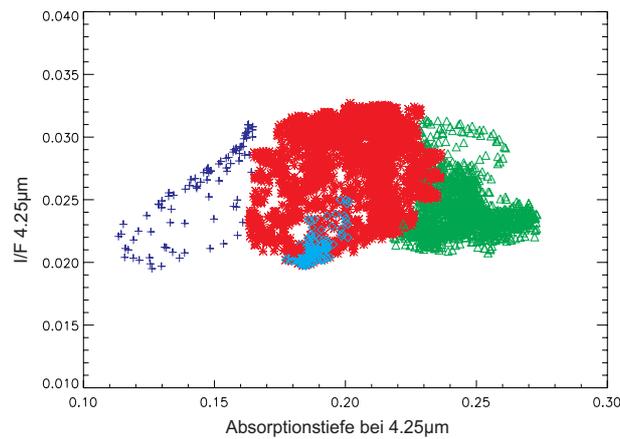


Abb. 6.102: Vergleich der Absorptionstiefen von  $\text{CO}_2$  bei  $4,25\mu\text{m}$  mit dem Reflexionsgrad bei  $4,25\mu\text{m}$  (photometrisch korrigiert nach Kap. 5) im Bereich des dunklen Strahlenkraters Kittu (NIMS-Beobachtung G7GNKITTU) separat für die geologischen Einheiten: 1. Kittu (blau), 2. helle Ejekta von Misharu (hellblau), 3. Mysia Sulcus (grün) und dunkle Ejekta von Kittu (rot) (Diskussion im Text).

Absorption ( $\mu\text{m}$ )	Kittu	Dunkle Ejekta	Mysia Sulcus	Helle Ejekta (nahe Kittu)
4,25	11,3 ( $\pm 1,2$ ) – 17,8 ( $\pm 1,8$ )	18,2 ( $\pm 1,8$ ) – 25,8 ( $\pm 2,6$ )	15,4 ( $\pm 1,6$ ) – 26,8 ( $\pm 2,7$ )	17,5 ( $\pm 1,8$ ) – 22,6 ( $\pm 2,3$ )

Tab. 6.38: Absorptionstiefen von  $\text{CO}_2$  bei  $4,25\mu\text{m}$  im Bereich des Einschlagskraters Kittu (NIMS-Beobachtung G7GNKITTU) der Abbildung 6.101 aufgeschlüsselt für die einzelnen geologischen Einheiten: Einschlagskrater Kittu und dessen dunkle Ejekta, Mysia Sulcus und die hellen Ejekta von Misharu im Süden von Kittu außerhalb des von NIMS beobachteten Bereichs. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

Wenn auch die Absorptionen keine signifikanten lokalen Variationen im Gehalt von  $\text{CO}_2$  zeigen, weisen sie dennoch auf einen deutlich höheren Gehalt an  $\text{CO}_2$  im äquatorialen Bereich des dem Jupiter zugewandten Teils der Heckseite von Ganymed hin. Dies unterstützt die Vermutung, dass generelle hemisphärische Differenzen im relativen Anteil von  $\text{CO}_2$  vorherrschen. Für einen eindeutigen Nachweis ist jedoch nur die vollständige Analyse von Spektraldaten der gesamten Hemisphäre notwendig. Somit zeigt keiner der untersuchten dunklen Strahlenkrater signifikante Veränderungen im Gehalt an  $\text{CO}_2$  in Bezug auf seine dunklen Ejekta im Vergleich zur Umgebung. Es wurde ebenso kein zusätzlicher Hinweis auf einen endogenen Ursprung gefunden. Unterschiede im Gehalt an  $\text{CO}_2$  zwischen den dunklen Strahlenkratern und der Umgebung waren entweder nie vorhanden oder wurden durch exogene Oberflächenprozesse bereits vollständig angeglichen.

#### 6.4.3.4 Fazit

Die höchste Konzentration von Gesteinsmaterial in den Ejekta dunkler Strahlenkrater weist auf einen direkten Zusammenhang zwischen diesen und dem Einschlagsprozess hin. Jedoch bieten die Spektraldaten keinen Hinweis auf eine Konzentration von Material des ursprünglichen Projektils. Chemische Unterschiede zwischen den dunklen Ejekta und dem dunklen Gebiet können mit NIMS nicht bestätigt werden. Geringe Unterschiede in den Reflexionseigenschaften sind bedingt durch geringe Variationen des relativen Anteils und der Partikelgröße von Wassereis. Obwohl zu den Einschlagsprozessen in Wassereis noch viele Fragen unbeantwortet bleiben, scheint die Konzentration von aufgearbeitetem Material der Oberfläche. Dies ist erklärbar, wenn das Projektil kaum in die darunter liegende Schicht von Wassereis eindringt. Die dunklen Ejekta nach Schenk & McKinnon (1991) und Conca (1981) als Resultat der Verunreinigung mit dem Material des Projektils zu sehen, ist schwer vorstellbar. Vor allem da das entsprechende Projektil viel kleiner als der Einschlagskrater ist,

ist es unklar wie dieses Projektil verantwortlich sein soll für die teilweise weit ausgedehnten dunklen Strahlen.

Die Unterschiede zwischen den dunklen Strahlenkratern der dem Jupiter abgewandten Hemisphäre und Kittu beruhen nicht auf spektralen Unterschieden der dunklen Ejekta als Hinweis auf ein unterschiedliches Impaktormaterial, sondern werden vielmehr verursacht von den unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Umgebung. Dies schließt den Gehalt an CO<sub>2</sub> im Oberflächenmaterial mit ein. Kein Hinweis auf lokale Variationen des Gehalts an CO<sub>2</sub> wurde beobachtet. Die Variationen im Gehalt an CO<sub>2</sub> sind eher das Resultat der global wirkenden Oberflächenprozesse.