

6.4 Modifizierung der Ganymedoberfläche durch Einschlagsprozesse

Im Verlauf der bisherigen Untersuchungen wurde vor allem die Signifikanz von Einschlagsprozessen für die Reflexionseigenschaften der Ganymedoberfläche deutlich. Bisher wurde nur auf morphologisch frische Einschlagskrater hingewiesen, die durch einen hohen Anteil an feinkristallinem Wassereis und CO₂ charakterisiert sind. Die Ganymedoberfläche wird jedoch von Einschlagskratern verschiedenster Form, Alter und Größe geprägt. Vor allem in Abhängigkeit ihres Alters und ihrer Größe unterscheiden sich die Einschlagskrater mehr oder weniger deutlich in Bezug auf den relativen Anteil und die Partikelgrößen von Wassereis sowie hinsichtlich des Gehalts an CO₂ in ihrer unmittelbaren Umgebung. Die Untersuchung der lokalen spektralen Variationen im Bereich von Einschlagskratern soll vor allem dahingehend erfolgen, ob sie:

- die Annahme unterstützen, dass sich im Untergrund der Ganymedoberfläche vor allem Wassereis konzentriert,
- Hinweise für einen exogenen oder endogenen Ursprung von Gesteinsmaterial bergen,
- zeigen, auf welche Art und Weise die Vermischung von Wassereis mit dem Gesteinsmaterial voranschreitet und
- ob sie Hinweise liefern, was im Verlauf der Zeit mit dem CO₂ passiert, welches durch den Einschlagsprozess freigesetzt wird.

Drei Kategorien von Einschlagskratern wurden untersucht:

- Penepalimpseste (siehe unten Kap. 2),
- Einschlagskrater mit mehr oder weniger ausgedehnten hellem oder
- dunklem Auswurfsmaterial.

6.4.1 Penepalimpsest Epigeus

Penepalimpseste sind zusammen mit den Palimpsesten (*Passy & Shoemaker, 1982*; siehe Kap. 2.3.3) eine Besonderheit auf der Oberfläche von Ganymed (und Callisto). Palimpseste besitzen keine signifikante Topographie. Es handelt sich dabei eher um relativ runde und etwas heller als ihre Umgebung erscheinende Flecken, die einen ehemaligen Einschlagskrater repräsentieren (*Smith et al., 1979b*, siehe auch Kap. 2). Palimpseste werden vor allem aufgrund ihrer geomorphologischen Ähnlichkeiten zu Penepalimpsesten als Einschlagsstrukturen interpretiert (*Schenk et al., 2004*). Letztere sind jedoch durch eine deutlicher ausgeprägte Kratermorphologie, die einen zentralen Dom und einen kartierbaren Kratertrand und Ejekta, charakterisiert (*Schenk et al., 2004*). Palimpseste wurden bisher nur im dunklen Gebiet beobachtet und sind nach *Schenk et al. (2004)* die ältesten der von der Ganymedoberfläche bekannten Einschlagsstrukturen. Penepalimpseste wurden dagegen im dunklen und auch im geologisch jüngeren hellen Gebiet beobachtet (siehe Kap. 2). Sie reichen altersmäßig daher bis in die Zeit der Entstehung des hellen Gebietes (siehe Kap. 2). Nach *Schenk & McKinnon (1991)*, *Schenk et al. (2004)* entstanden Palimpseste und Penepalimpseste 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 der Umgebung topographisch angeglichen haben (*Passy & Shoemaker, 1982*; siehe Kap. 2). Die Art und Weise ihrer Entstehung ist jedoch bis heute nicht vollständig geklärt (*Pappalardo et al., 2004*). Das Penepalimpsest Epigeus (22,5°N/180,5°W) ist die älteste Einschlagsstruktur, deren spektrale Eigenschaften im Rahmen dieser Arbeit analysiert wurden.

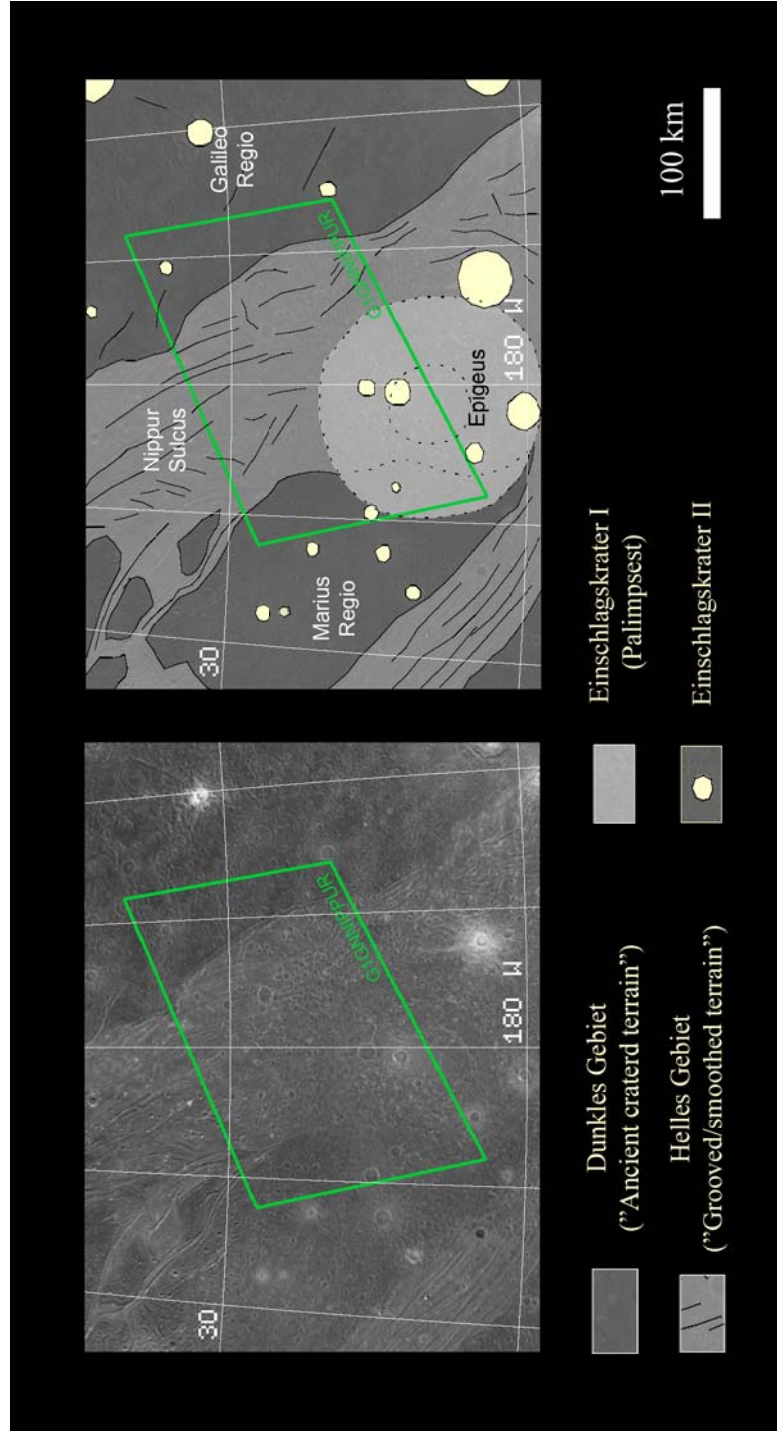


Abb. 6.55: Geologischer Kontext im Bereich von Epigeus basierend auf einem Mosaik aus Kameradaten der Raumsonde Voyager 2 (CLEAR-Filter) und Galileo (SSI-Beobachtung G8GSREGCON01) überlagert mit den Grenzen der NIMS-Beobachtung GIGANNIPPUR (Beschreibung im Text).

Die Abbildung 6.55 zeigt ein Mosaik aus 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 Teilbereich (NIMS-Beobachtung G1GNNIPPUR) liegt zwischen 21,3 und 33,1°N bzw. 173 und 186°W und wurde mit einer räumlichen Auflösung von 12 bis 14,5 km/Pixel aufgenommen (Tab. 6.15, siehe auch Kap. 5, Abb. 5.2).

Epigeus besitzt einen Durchmesser von etwa 400 km und liegt zum größten Teil im hellen Gebiet von Nippur Sulcus (daher als Penepalimpsest eingruppiert), reicht jedoch bis in das im Süden angrenzende dunkle Gebiet von Marius Regio hinein. Im Nordosten grenzt Nippur Sulcus an das dunkle Gebiet von Galileo Regio. In den Kameradaten (Abb. 6.55) ist Epigeus nach seiner Helligkeit kaum von seiner Umgebung zu unterscheiden. Die mehr oder weniger kreisförmige Struktur weist im Inneren konzentrische lineare Strukturen und einen zentralen glatten Bereich auf. Sie markieren eventuell zentrale Kraterstrukturen, wie den ehemaligen Kraterrand, oder einen zentralen Dom (*Schenk & Ridolf, 2002*). Möglicherweise repräsentiert der äußere Bereich die ehemaligen kontinuierlichen Ejekta (Kap. 6.2.2; *Jones et al., 2003*). In der Umgebung von Epigeus sind zahlreiche Sekundärkrater verteilt, die Bestandteil der diskontinuierlichen Ejekta (siehe Kap. 2.3.3, *Wagner, pers., 2005*) sind. Nach seiner stratigraphischen Position in Bezug auf die Umgebung ist Epigeus etwas jünger als oder mindestens gleich alt wie Nippur Sulcus. Zählungen der Einschlagkraterhäufigkeiten im Bereich von Epigeus ergeben nach dem Modell von *Neukum (1997)* und *Neukum et al. (1998)* ein Modellalter von maximal $4,05 \pm 0,05$ Mrd. Jahren. Das gesamte beobachtete Gebiet ist zusätzlich von zahlreichen relativ kleinen (< 20km) Einschlagkratern geprägt, von denen einer, der sich inmitten von Epigeus befindet, deutlich heller im sichtbaren Licht der Kameradaten erscheint als seine Umgebung.

<i>Kategorie</i>	<i>Beobachteter Einschlagskrater</i>	<i>Geographische Position</i>	<i>NIMS- Beobachtung</i>	<i>Räumliche Auflösung</i>	<i>Analysierte Absorptionen</i>
<i>Penepalimpsest</i>	Epigeus	22,5°N/180,5°W	G1GNNIPPUR	12 bis 14 km/Pixel	1,5; 2; 3; 4,25m

Tab. 6.15: Parameter der NIMS-Beobachtung im Bereich von Epigeus.

6.4.1.1 Relativer Anteil von Wassereis

Als Indikator für Veränderungen im relativen Anteil von Wassereis dienen wieder die Absorptionstiefen bei 1,5µm. Diese schwanken zwischen $27,4 \pm 1,9$ % und $43 \pm 1,7$ % (Abb. 6.56). Die Tabelle 6.16 zeigt eine Übersicht über die gemessenen Absorptionstiefen, die getrennt für die unterschiedlichen geologischen Einheiten Marius Regio, Galileo Regio, Nippur Sulcus und Epigeus ausgewertet wurden. Zusätzlich wurde zwischen den Bereichen des Epigeus unterschieden, welche im Bereich von Marius Regio oder Nippur Sulcus liegen. In den Kameradaten ist Epigeus auf der Basis von Helligkeitsvariationen kaum von seiner Umgebung abgegrenzt. In den gemessenen Absorptionstiefen von Wassereis bei 1,5µm sind jedoch leichte Unterschiede zwischen den geologischen Einheiten zu erkennen. In Abhängigkeit vom jeweiligen Substrat schwanken die Intensitäten im Bereich von Epigeus zwischen $29,5 \pm 2,1$ % und $37,6 \pm 1,9$ %. Die Messwerte liegen im Bereich von Marius Regio im Mittel bei $31,7 \pm 2,1$ % und im Nippur Sulcus bei $35,7 \pm 2,0$ %. Die Unterschiede zwischen dem Substrat und dem entsprechenden Teilbereich von Epigeus sind mit 3 % relativ gering. Die Messwerte von Epigeus liegen insgesamt zwischen denen von Marius Regio und Nippur Sulcus. In Marius Regio sind die Messwerte für Epigeus etwa um 3 % höher und im Nippur Sulcus um 3 % niedriger.

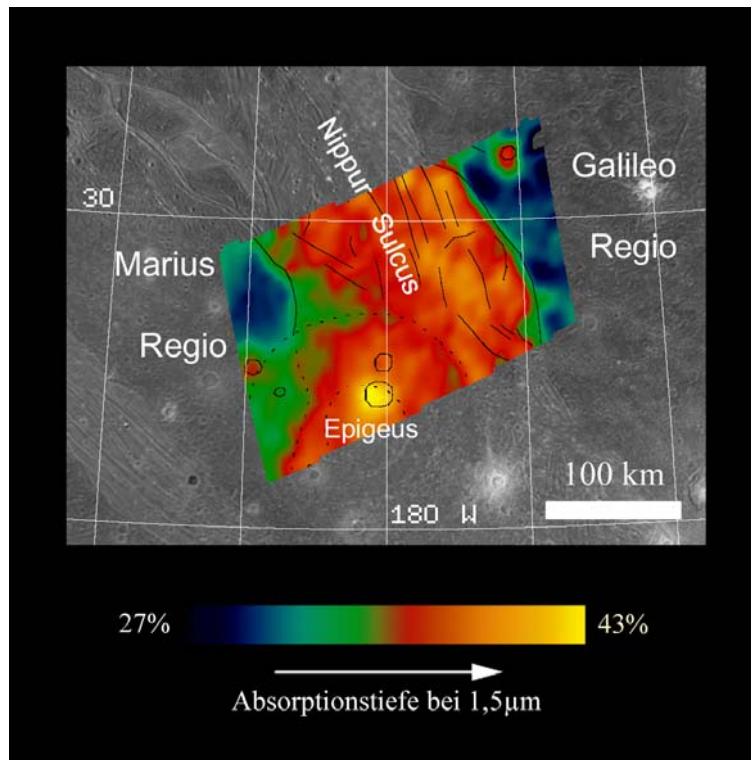


Abb. 6.56: Farbkodierte Darstellung der lokalen Variationen in den Absorptionstiefen von Wassereis bei 1,5µm im Bereich von Epigeus (NIMS-Beobachtung G1GNNIPPUR) überlagert mit den Grenzen der geologischen Einheiten aus Abb. 6.55 (Diskussion im Text).

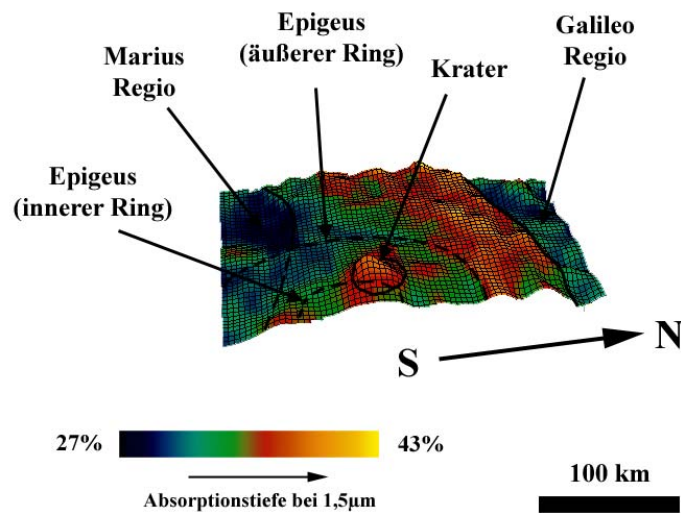


Abb.: 6.57: Dreidimensionale Darstellung der Variationen in der Absorptionstiefe von Wassereis bei 1,5µm aus Abb. 6.56 im Bereich von Epigeus. Die Farbkodierung entspricht den unterschiedlichen Absorptionstiefen bei 1,5µm. Als Grundlage der dreidimensionalen Darstellung dienen die Helligkeitsvariationen im sichtbaren Licht (0,7µm, photometrisch korrigiert) (Diskussion im Text).

Diese Zwischenstellung von Epigeus ist vor allen Dingen gut in der dreidimensionalen Darstellung der Variationen in den Absorptionstiefen in Abbildung 6.57 zu erkennen. Die Farbkodierung entspricht den unterschiedlichen Absorptionstiefen bei 1,5µm. Als Grundlage der dreidimensionalen Darstellung diente der Reflexionsgrad bei 0,7µm (photometrisch korrigiert, siehe Kap. 5). Diese Beobachtung wird

als Hinweis für die seit dem Einschlagsereignis fortschreitende Vermischung des Oberflächenmaterials durch einfallende Mikrometeoriten interpretiert. Die beiden Teilbereiche von Epigeus gleichen sich mehr und mehr dem jeweiligen Substrat an. Dies trifft jedoch nicht für den im Bereich von Epigeus liegenden Einschlagskrater zu, der bereits in den Kameradaten etwas heller als Epigeus erscheint. Im Bereich dieses Einschlagskraters wurden die tiefsten Absorptionen bei 1,5µm bzw. der höchste Anteil von Wassereis gemessen (Abb. 6.56 und 6.57, Tab. 6.16). Wie bereits in Kapitel 6.2.1 diskutiert, wird der hohe Anteil von Wassereis als Hinweis für geologisch junge Einschlagskrater interpretiert, deren ausgeworfenes Material ein Indiz für die Beschaffenheit des Untergrundes ist (Kap. 6.2.1). Somit ist auch im Bereich von Epigeus das Material durch einen hohen Anteil von Wassereis charakterisiert, was die Annahme einer Eiskruste (Anderson *et al.*, 1996) unter dem Oberflächenmaterial unterstützt.

<i>Absorption (µm)</i>	<i>Epigeus (Teil im Nippur Sulcus)</i>	<i>Epigeus (Teil im Marius Regio)</i>	<i>Einschlagskrater (im Bereich von Epigeus)</i>
1,5	33,5 (±2,0) – 37,6 (±1,9)	29,5 (±2,1) – 35,8 (±1,8)	40,0 (±2,0) – 41,1 (±2,1)
<i>Absorption (µm)</i>	<i>Marius Regio (ohne Epigeus)</i>	<i>Nippur Sulcus (ohne Epigeus)</i>	<i>Galileo Regio</i>
1,5	27,4 (±1,9) – 30,1 (±1,8)	33,8 (±2,4) – 43,0 (±2,2)	28,3 (±2,0) – 32,8 (±2,3)

Tab. 6.16: Absorptionstiefen von Wassereis bei 1,5µm im Bereich von Epigeus (NIMS-Beobachtung G1GNNIPPUR) für die einzelnen geologischen Einheiten: 1. Galileo Regio 2. Nippur Sulcus, 3. Marius Regio, 4. Epigeus (zusätzlich aufgeteilt nach Substrat) und 5. im sichtbaren Licht heller Einschlagskrater im Bereich von Epigeus Sulcus. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

6.4.1.2 Partikelgröße von Wassereis

Im Bereich von Epigeus dient vor allem das wechselnde Verhältnis zwischen den Intensitäten der beiden Absorptionen von Wassereis bei 2 und 1,5µm als Indikator für Variationen der Partikelgrößen von Wassereis. Dessen räumliche Variationen über die Ganymedoberfläche im Bereich von Epigeus zeigt die Abbildung 6.58. Die Abbildung 6.59 zeigt diese Variationen zusätzlich in einer dreidimensionalen Darstellung, um Zusammenhänge mit den geologischen Einheiten hervorzuheben. Die Farbkodierung entspricht den unterschiedlichen Quotienten. Als Grundlage der dreidimensionalen Darstellung dient der Reflexionsgrad bei 0,7µm (erster NIMS-Spektralkanal, photometrisch korrigiert, siehe Kap. 5).

Die mit 1,04 höchsten Quotienten, also die kleinsten Wassereispartikel, konzentrieren sich im Bereich von Epigeus. Die Partikelgrößen unterscheiden sich deutlich von denen der unmittelbaren Umgebung. In den von Epigeus nicht beeinflussten Bereichen von Nippur Sulcus und Marius Regio sind die Messwerte erkennbar niedriger. Dies steht im Gegensatz zu den Variationen im relativen Anteil von Wassereis, wo der relative Anteil von Wassereis im Bereich von Epigeus ähnlich dem der Umgebung ist. Dagegen weist der im Bereich von Epigeus liegende Einschlagskrater trotz seines höheren Anteils von Wassereis keine signifikant von Epigeus verschiedenen Partikelgrößen auf. Die Partikelgrößen im Bereich von Epigeus zeigen auch keine Abhängigkeiten von Substrat, da keine Unterschiede zwischen dem in Marius Regio liegenden und dem in Nippur Sulcus liegenden Teil von Epigeus gemessen wurden. Jedoch sind auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Partikelgrößen im Bereich von Marius Regio und Nippur Sulcus zu beobachten. Nur im etwas weiter entfernten Galileo Regio sind die Messwerte mit 0,89 niedriger bzw. sind die Wassereispartikel größer.

Der beobachtete Bereich von Epigeus reicht bis in geographische Breiten von etwa 30°N, wo polare Ablagerungen von Wassereis beginnen, die Reflexionseigenschaften der Ganymedoberfläche zu

dominieren (Kap. 6.2.2). Ein zunehmender Einfluss polarer Ablagerungen kann jedoch nicht die beobachteten Variationen erklären. Auf der Basis der bisherigen Beobachtungen (Kap. 6.1.2 und 6.2.2.2) sollte eher ein Anstieg der Partikelgrößen in südlicher Richtung zu beobachten sein. Jedoch tritt im Bereich von Epigeus der umgekehrte Fall auf.

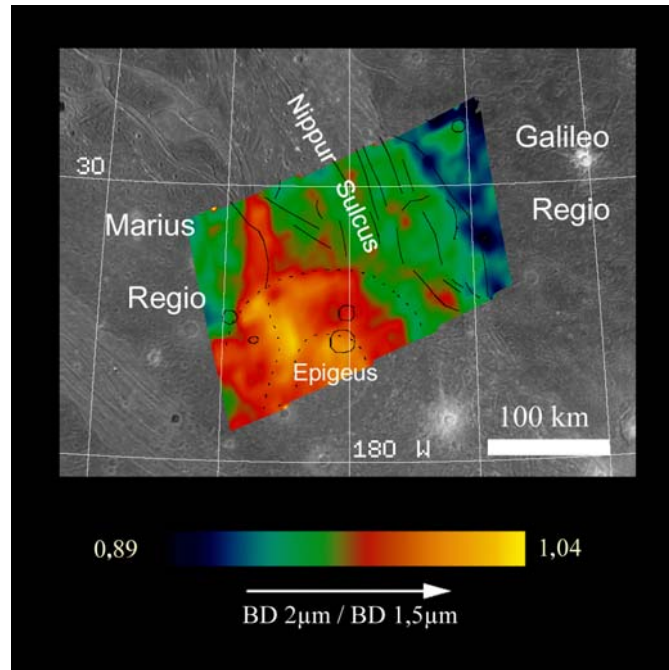


Abb. 6.58: Farbkodierte Darstellung der lokalen Variationen im Quotient der Absorptionstiefen von Wassereis bei 2 und 1,5µm im Bereich von Epigeus (NIMS-Beobachtung G1GNNIPPUR) überlagert mit den Grenzen der geologischen Einheiten aus Abb. 6.55 (Diskussion im Text).

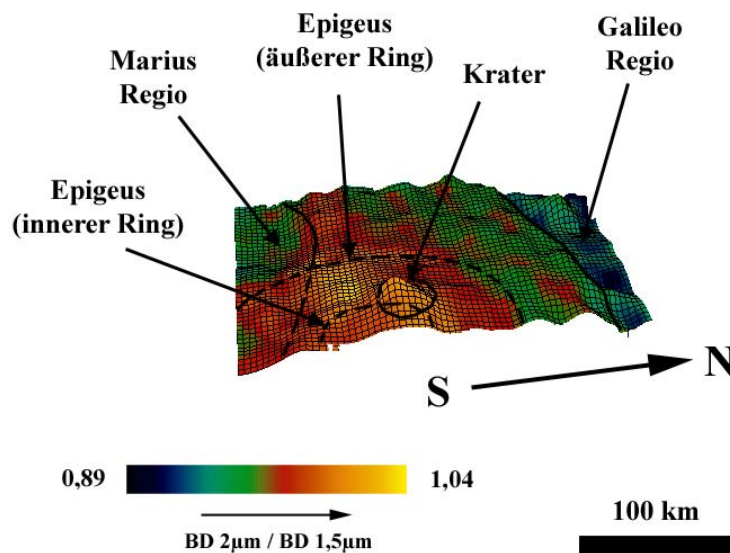


Abb.: 6.59: Dreidimensionale Darstellung der Variationen im Verhältnis der Absorptionstiefen von Wassereis bei 2 und 1,5µm aus Abb. 6.58 im Bereich von Epigeus. Die Farbkodierung entspricht den unterschiedlichen Quotienten. Als Grundlage der dreidimensionalen Darstellung dienen die Helligkeitsvariationen im sichtbaren Licht (0,7µm, photometrisch korrigiert) (Diskussion im Text).

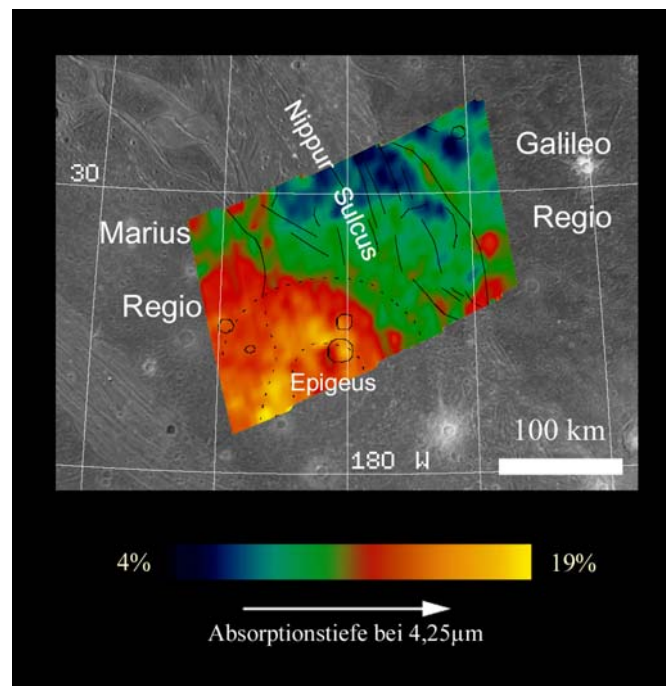


Abb. 6.60: Farbkodierte Darstellung der lokalen Variationen in den Absorptionstiefen von CO₂ bei 4,25µm im Bereich von Epigeus (NIMS-Beobachtung G1GNNIPPUR) überlagert mit den Grenzen der geologischen Einheiten aus Abb. 6.55 (Diskussion im Text).

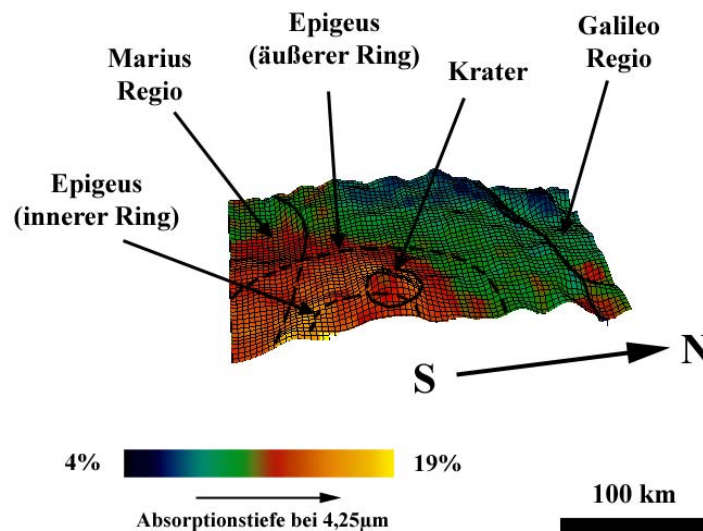


Abb.: 6.61: Dreidimensionale Darstellung der Variationen in den Absorptionstiefen von CO₂ bei 4,25µm aus Abb. 6.60 im Bereich von Epigeus. Die Farbkodierung entspricht den unterschiedlichen Absorptionstiefen. Als Grundlage der dreidimensionalen Darstellung dienen die Helligkeitsvariationen im sichtbaren Licht (0,7µm, photometrisch korrigiert) (Diskussion im Text).

Die beobachteten Veränderungen in der Partikelgröße von Wassereis sind scheinbar eher assoziiert mit Epigeus und deuten auf einen direkten Zusammenhang zwischen den geringen Partikelgrößen und dem Bildungsprozess von Epigeus hin. Dies folgt den Beobachtungen in Kapitel 6.2.1.2, welche geringe Partikelgrößen von Wassereis im Bereich von Einschlagskratern relativ zu ihrer Umgebung zeigen. Sie wurden als ein direktes Resultat des Einschlagsprozesses interpretiert und gelten in Zusammenhang mit einem relativ hohen Anteil von Wassereis als Indikator für frisch ausgeworfenes

Material aus dem Untergrund. Epigeus zählt mit zu den älteren Einschlagsstrukturen auf der Ganymedoberfläche (siehe oben). Die Beobachtungen erwecken daher den Anschein, dass die Angleichung des Oberflächenmaterials von Einschlagskratern an dessen Umgebung infolge von mikrometeoritischen Bombardement und Sublimations- bzw. Kondensationsprozessen in Bezug auf den relativen Anteil von Wassereis schneller voranschreitet als in Bezug auf die Partikelgröße von Wassereis. Möglicherweise spielt hier die Nähe zu den polaren Regionen ebenfalls eine Rolle, in denen der Einfluss von thermal bedingtem Anwachsen der mittleren Partikelgröße von Wassereis infolge von Sublimationsprozessen im Vergleich mit Regionen, die nahe dem Äquator liegen, reduziert ist.

<i>Absorption (μm)</i>	<i>Epigeus (Teil im Nippur Sulcus)</i>	<i>Epigeus (Teil im Marius Regio)</i>	<i>Einschlagskrater (im Bereich von Epigeus)</i>
4,25	12,0 ($\pm 1,2$) – 18,8 ($\pm 1,9$)	12,8 ($\pm 1,3$) – 17,7 ($\pm 1,8$)	12,7 ($\pm 1,3$) – 18,7 ($\pm 1,9$)
<i>Absorption (μm)</i>	<i>Marius Regio (ohne Epigeus)</i>	<i>Nippur Sulcus (ohne Epigeus)</i>	<i>Galileo Regio</i>
4,25	9,6 ($\pm 1,0$) – 12,9 ($\pm 1,3$)	4,2 ($\pm 0,5$) – 10,8 ($\pm 1,1$)	7,5 ($\pm 0,8$) – 13,2 ($\pm 1,3$)

Tab. 6.17: Absorptionstiefen von CO₂ bei 4,25 μm (in %; + absoluter Fehler) im Bereich von Epigeus (NIMS-Beobachtung G1GNNIPPUR) für die einzelnen geologischen Einheiten: 1. Galileo Regio 2. Nippur Sulcus, 3. Marius Regio, 4. Epigeus (zusätzlich aufgeteilt nach Substrat) und 5. im sichtbaren Licht heller Einschlagskrater im Bereich von Epigeus Sulcus. Die vollständige Statistik befindet sich im Anhang der Arbeit.

6.4.1.3 Gehalt an CO₂

In Abbildung 6.60 sind die gemessenen Absorptionstiefen von CO₂ im Bereich von Epigeus farbkodiert dargestellt. Sie schwanken generell zwischen etwa 4 und 19% (Tab. 6.17). Die Abbildung 6.61 zeigt diese Variationen zusätzlich in einer dreidimensionalen Darstellung. Die Farbkodierung entspricht den unterschiedlichen Intensitäten. Als Grundlage der dreidimensionalen Darstellung dient, wie in Abbildung 6.59, der Reflexionsgrad bei 0,7 μm (photometrisch korrigiert, siehe Kap. 5).

Die tiefsten Absorptionen konzentrieren sich mit $18,8 \pm 1,9\%$ im Bereich von Epigeus und nehmen mit zunehmender Entfernung von der Einschlagsstruktur ab. Scheinbar korrelieren die höchsten Messwerte mit der konzentrischen linearen Struktur im Inneren von Epigeus (durch Pfeile in der Abbildung markiert), die womöglich den ehemaligen Kraterrand oder zentralen Dom markiert. Die Variationen in den Absorptionstiefen von CO₂ bei 4,25 μm folgen zwar nicht den Variationen im relativen Anteil von Wassereis (Abb. 6.56), korrelieren aber mit den Variationen in der Partikelgröße von Wassereis (6.58).

Die gemessenen Absorptionstiefen bei 4,25 μm zeigen keine Korrelation mit dem Reflexionsgrad bei 4,25 μm (Abb. 6.62). Somit handelt es sich im Bereich von Epigeus um reelle Unterschiede im Gehalt an CO₂ im Oberflächenmaterial. Dagegen zeigt die graphische Darstellung in Abbildung 6.63 die ausgeprägte Korrelation mit den Variationen in der Partikelgröße bzw. dem Verhältnis der Absorptionstiefen von Wassereis bei 2 und 1,5 μm . So wurde der höchste Anteil von CO₂ in Regionen gemessen, welche relativ kleine Wassereispartikel aufweisen.

Bisher wurden erhöhte Konzentrationen von CO₂ nur im Bereich von geologisch sehr jungen Einschlagskratern gemessen (Kap. 6.2.1.3 und 6.2.2.3). Der im Bereich von Epigeus liegende relativ junge Einschlagskrater zeigt jedoch keine höhere Konzentration von CO₂ als der geologisch deutlich ältere Epigeus (siehe oben) selbst.

