

Bestimmung der Topographie und Lovezahl von Merkur aus simulierten Daten des BepiColombo-Laseraltimeters

Christian Koch, Jürgen Müller, Ulrich R. Christensen und Reinald Kallenbach

Zusammenfassung

Laseraltimetrie ist neben der Bildaufnahme eine wichtige Messmethode zur Kartierung von Planeten und Monden und findet verstärkt Anwendung in den planetaren Wissenschaften. Viele zukünftige Weltraummissionen haben Laseraltimeter zur Erforschung der Geologie und der inneren Struktur von planetaren Körpern vorgesehen. Das erste europäische Laseraltimeter, BELA, wird an Bord der Raumsonde BepiColombo der ESA im August 2014 gestartet und soll nach sechsjähriger Flugphase in eine Umlaufbahn um Merkur einschwenken, um ihn zu kartieren. Rückschlüsse auf den inneren Aufbau von Merkur werden über die Gezeiten- und Librationsamplituden gewonnen. Koch et al. (2008, 2009a) zeigen, dass diese Amplituden mit einer Genauigkeit besser als 14% (2σ) bestimmt werden können. In diesem Beitrag sollen einige Anwendungsmöglichkeiten von Laseraltimetrie in den planetaren Wissenschaften, speziell für Merkur, aufgezeigt werden.

Summary

In addition to cameras, laser altimetry is a powerful method for mapping planets and moons and therefore has increasing importance in planetary science. Many future space missions will carry laser altimeters to explore the geology and the interior structure of planetary bodies. The first European laser altimeter, BELA, will be launched in August 2014 on board ESA's BepiColombo spacecraft in order to map Mercury after a six-years cruise. Conclusions on the interior structure of Mercury can be obtained from the tidal and libration amplitudes. Koch et al. (2008; 2009a) have shown that these amplitudes can be determined with an uncertainty of less than 14% (2σ). In this paper, a few applications of laser altimetry in planetary sciences, mainly for Mercury, are investigated.

1 Einleitung

Merkur ist der innerste Planet im Sonnensystem und hat die größte, unkomprimierte Dichte, die ein Verhältnis von 0.6 zwischen schweren Metallen (Eisen) und leichten Verbindungen (Silikate) impliziert (Solomon et al. 2007). Es wird angenommen, dass Merkur einen großen inneren Kern aus reinem Eisen hat, dessen Radius etwa 75% des Planetenradius beträgt. Mariner10 beobachtete 1974/75 ein schwaches Magnetfeld, das über einen hydromagnetischen Dynamo erklärt werden kann. Modelle dieses Dynamos (Christensen 2006) setzen voraus, dass die äußere Kernschale ein leichtes Element enthält, vermutlich Schwefel (Harder und Schubert 2001) und daher flüssig ist, und dass der innere Kern fest ist. Van Hoolst

und Jacobs (2003) haben den inneren Aufbau von Merkur untersucht. Dabei haben sie die Größenordnung der Lovezahl h_2 in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt der äußeren Kernschale diskutiert. Sie bestimmen die Größe des Kernradius auf etwa 80% des Planetenradius und schätzen den Wertebereich für die Lovezahl h_2 zu 0,6 bis 0,9 und der Lovezahl k_2 zu 0,3 bis 0,5. Dies entspricht einem äußeren Kernradius von 1850 bis 2000 km. Die Lovezahl h_2 beschreibt die Variation der Topographie bezogen auf eine Potenzial-Referenzfläche erzeugt durch eine Gezeitenkraft. Die Lovezahl h_2 charakterisiert die Gezeitenamplitude gemäß

$$\delta r = h_2 F_{\text{tide}}(\Psi, r) = h_2 \frac{M_{\text{Sun}}}{M_{\text{Merc}}} \frac{R^4}{r^3} \left[\frac{3}{2} \cos^2(\Psi - \delta_{\text{tide}}) - \frac{1}{2} \right], \quad (1)$$

wobei $\Psi(\theta, \lambda, t)$ der Winkel zwischen der Verbindungslinie der Massenzentren von Merkur und Sonne und dem Radiusvektor von Merkurs Massenzentrum zum Oberflächenpunkt ist, mit θ als die Ko-Breite und λ als die Länge zur Zeit t ; R ist der mittlere Planetenradius, r die Entfernung von Merkur zur Sonne, M_{Sun} und M_{Merc} sind die Massen von Sonne und Merkur und δ_{tide} die Gezeitenphasenverzögerung, die als 0 angenommen wird (Van Hoolst und Jacobs 2003). Für Merkur wird ein Aufbau wie in Abb. 1 angenommen. Dabei ist die Dichte im inneren Eisenkern höher als in der äußeren Kernschale.

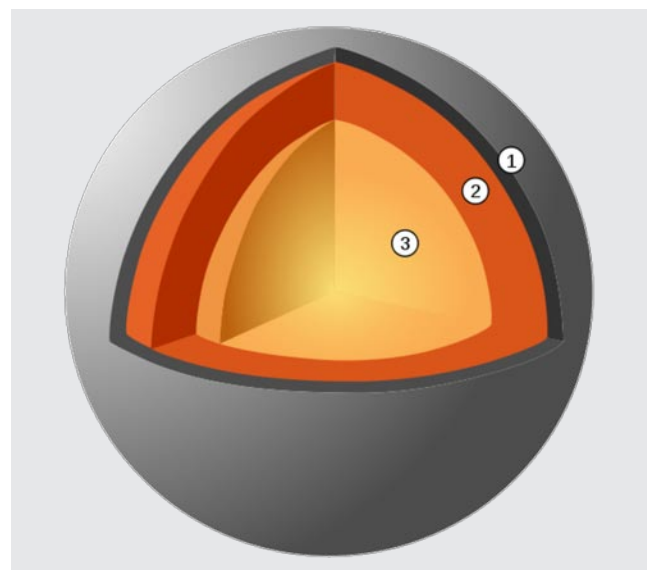


Abb. 1: Struktur des inneren Aufbaus von Merkur mit einem dünnen Mantel (1), einer äußeren, flüssigen Kernschale (2) und einem festen, inneren Eisenkern (3), wobei die Größe des Eisenkerns etwa 75% des Planetenradius beträgt.

Die Lovezahl k_2 beschreibt die Änderung des Gravitationspotenzials des Planeten aufgrund von gezeitenbedingten Massenverschiebungen im Planeten und kann durch eine präzise Bestimmung der Umlaufbahn der BepiColombo-Raumsonde gemessen werden (Milani et al. 2001). Für eine flüssige Kernschale liegt die Lovezahl h_2 zwischen 0,6 und 0,9, wohingegen diese Zahl für den Fall eines komplett gefrorenen Kerns ungefähr 0,1 wäre. Wenn die Lovezahl k_2 zusätzlich mit beobachtet wird, können Unsicherheiten des inneren Aufbaus eliminiert werden.

Eine weitere Möglichkeit den inneren Aufbau eines Planeten zu bestimmen, stellt die Beobachtung der Librationsamplitude dar, wobei Merkur eine Resonanz von 2:3 zwischen dem siderischen Jahr und der Eigenrotation des Planeten hat. Die Sonnengravitation übt auf die permanente nicht-symmetrische Masseverteilung von Merkur Drehmomente aus, die zu einer ungleichmäßigen Rotation führen. Peale (1972, 1976) und Peale et al. (2002) zeigten in ihren Untersuchungen, dass die Librationsamplitude Φ_{lib} groß ist, falls die Rotation des Mantels von der Rotation des Kerns aufgrund eines flüssigen äußeren Kerns entkoppelt ist. Margot et al. (2007) haben mit erdgebundener Radarinterferometrie den Wert $\Phi_{lib} = 35,8 \pm 2,0$ arcsec bestimmt, was darauf hinweist, dass Merkurs Kern mindestens zum Teil flüssig ist.

2 Laseraltimeter in den planetaren Wissenschaften

In der Geodäsie wird Laseraltimetrie für die topographische Datenaufnahme eingesetzt. Einige dieser Anwendungen sind das terrestrische Laserscanning oder Laseraltimetrie von Satelliten und vom Flugzeug. Die Anwendung in den planetaren Wissenschaften hat die gleiche Grundaufgabenstellung. Aber die Anforderungen an das Messsystem verändern sich durch die veränderte Umgebung. Dabei muss das System sehr leicht sein, wenig Strom verbrauchen und eine lange Lebensdauer haben, da die Raumsonden meist mehrere Jahre unterwegs sind und die Ressourcen limitiert sind. Außerdem kann es sein, wie im Fall von BepiColombo, dass die Laseraltimetrie erschwert wird, da statt eines zirkularen Orbits, der nur unter hohem Energieaufwand realisiert werden kann, ein elliptischer Orbit für die Raumsonde ausgewählt wurde.

Laseraltimetrie arbeitet bislang in drei Bereichen des Lichtspektrums: bei 532, 1064 und 1500 nm, da die aktuell verwendeten Festkörperlaser am besten diese Wellenlängen erzeugen können. Laseraltimetrie misst die Entfernung zwischen der Raumsonde und einer (Planeten-) Oberfläche. Die Angabe der topographischen Höhe des Laserfußpunktes über einer Referenzfläche benötigt die genaue Position der Raumsonde bezüglich Merkurs Massenzentrums. Weiterhin werden die Winkel, um die das Instrument von der Nadirausrichtung abweicht, gemessen,

um von der Position der Raumsonde durch Vorwärtschnitt die Koordinaten und Höhe des Laserfußpunktes zu berechnen.

Bei der Laseraltimetrie erhält man einen großen Datensatz mit einigen hundert Millionen Messpunkten, was ein gutes Datenmanagement für eine effiziente Nutzung erfordert. Im Folgenden werden verschiedene Verfahren beschrieben, die neben der globalen Topographie Informationen über den inneren Aufbau eines Planeten liefern. Die Bestimmung des inneren Planetenaufbaus ist ein gutes Beispiel für die Anwendung einer geodätischen Messmethode für eine geophysikalische Fragestellung.

Zukünftige Missionen der Raumfahrtagenturen sollen vermehrt Laseraltimeter zur Vermessung von Planeten mitführen. Schon in der letzten Dekade lieferten das Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) der ICESat Mission und das Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) der Mars Global Surveyor (MGS) Mission wichtige Daten. GLAS vermisst die Eisflächen-Elevationen auf der Erde, speziell in den polaren Regionen. Sie erlauben Rückschlüsse auf die Variation der Eisdicke (Abshire et al. 1998). Die Mars-Topographie wurde sehr präzise mit MOLA vermessen und untersucht. Ein Ergebnis von MOLA deutet auf saisonale Variationen der Dicke der polaren Eiskappen des Mars (Smith et al. 1998, 1999 und 2001) von der Größenordnung 50 cm hin. Beide Laseraltimeter waren Vorreiter und Wegbereiter für aktuelle und zukünftige Weltraummissionen. Die MESSENGER-Mission der NASA (Solomon et al. 2007, Zuber et al. 2008) ist im Moment auf ihrem Weg zu Merkur und soll 2011 in die Umlaufbahn des Planeten eintreten.

BepiColombo soll 2014 gestartet werden und ab 2020 Merkur untersuchen. BepiColombo besteht aus zwei Raumsonden. Der »Mercury Magnetospheric Orbiter« (MMO), der von der japanischen Raumfahrtagentur gebaut wird, soll hauptsächlich Merkurs Magnetosphäre untersuchen. Der »Mercury Planetary Orbiter« (MPO) wird von der ESA gebaut und soll, u. a., mithilfe des BepiColombo Laseraltimeters (BELA) hauptsächlich den Planeten selbst beobachten. Beide Sonden werden Merkur in elliptischen Orbits umkreisen. Das Periherm liegt für beide Raumsonden bei 400 km und das Apoherm bei 1500 km (MPO) bzw. bei 16000 km (MMO). Die wichtigsten Parameter von Merkur sind in Tab. 1 aufgelistet; zum Vergleich sind die entsprechenden Werte für die Erde mit angegeben.

Tab. 1: Parameter von Merkur

Parameter	Symbol	Merkur	Erde
Mittlerer Radius	R [km]	2439,7	6371
Mittlere Entfernung zur Sonne	r [km]	$57,909 \times 10^6$	$149,597 \times 10^6$
Exzentrizität	e	0,20563	0,0167
Bahnperiode	T [Tage]	87,969	365,25

BELA wird in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der Universität Bern (UBE), dem Institut für Astrophysik in Andalusien (IAA), Industriepartnern und dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) entwickelt. Die für die Arbeit relevanten, wissenschaftlichen Ziele sind neben der genauen topographischen Aufnahme der Planetenoberfläche die Bestimmung der Lovezahl h_2 und die Librationsamplitude. Thomas et al. (2007) beschreiben das Instrument im Detail. Es sind erste Simulationen zur Bestimmung der Lovezahl, Librationsamplitude und der Topographie durchgeführt worden, wobei die Unsicherheit bei der Bestimmung der zeitabhängigen, globalen Parameter besser als 14% (2σ) ist. Die verwendeten Analyse-Ansätze werden im Folgenden näher erläutert (Kap. 3). Weitere Anwendungsmöglichkeiten werden für eine kombinierte Analyse mit anderen Messmethoden kurz diskutiert (Kap. 4). Die Librationsamplitude wird im Weiteren nicht vertieft behandelt.

3 Bestimmung der Lovezahl h_2 von Merkur aus Daten des BepiColombo-Laseraltimeters

Smith et al. (2001) haben die saisonale Variation der Dicke der Polkappen aus Kohlendioxid-Eis beim Mars aus den Daten von MOLA mit einer Präzision von etwa 10 cm bestimmt. Dieser Ansatz wurde von Koch et al. (2009b) bei Merkur angewendet, um die Lovezahl h_2 aus synthetischen Daten an polaren Kreuzungspunkten des BepiColombo-Laseraltimeters zu bestimmen.

Die Lovezahl kann bei einer großen Anzahl von Messpunkten mit einer Genauigkeit von unter 3% (2σ) bestimmt werden. Die Amplitude des Gezeitensignals hätte dann eine Unsicherheit von 9 mm. Der Wert von 3% ergibt sich aus einer statistischen Analyse. Dabei wurden die Hauptfehlerquellen bei der Bestimmung der Unsicherheit des Kreuzungspunktes untersucht. Der zu erwartende Maximalfehler von 8,6 m wurde durch die Wurzel der zu erwartenden Anzahl an Kreuzungspunkten mit $N = 910$ dividiert. Die Anzahl der Kreuzungspunkte ergibt sich zu

$$N = \sqrt{I \cdot J^2}, \quad (2)$$

wobei I die nominelle Missionszeit in Merkurjahren (vier Jahre) und J die Anzahl an MPO-Orbits, die sich kreuzen (455), angibt. Die Anzahl der MPO-Orbits wurde halbiert, da nicht alle Orbits für eine Berechnung von Kreuzungspunkten sinnvoll sind. Der äußere Kernradius könnte damit bis auf wenige Zehnerkilometer genau bestimmt werden. Es wurden ebenfalls die Unsicherheiten eines einzelnen Laserschusses untersucht, um eine statistische Aussage über die notwendige Anzahl der Messpunkte zu machen. Die klein-skalige Topographie zwischen zwei Lasermessungen dominiert den Fehler.

Koch et al. (2008, 2009a) beschreiben zwei weitere detaillierte Analysemethoden, die hier kurz zusammengefasst werden sollen. Dort werden die Topographie von Merkur und die Amplitude des Gezeitensignals aus simulierten Topographien bestimmt. Dabei wird die synthetische Eingabetopographie mittels einer Kugelfunktionsentwicklung bis zu Grad und Ordnung $l_{max} = 1024$ beschrieben. l_{max} ist frei wählbar; hier wurde l_{max} als eine 2er-Potenz gewählt. Die Standardabweichung der Eingabekoeffizienten wird mit dem folgenden Potenzgesetz variiert:

$$E_l = \sum_m (C_{lm}^2 + S_{lm}^2) = \frac{A^2}{l^k}, \quad (3)$$

wobei C_{lm} und S_{lm} die Koeffizienten der Kugelfunktionsentwicklung sind, k der Exponent des Potenzgesetzes ist und A so gewählt ist, dass die Topographie des Merkurs bestmöglich approximiert wird. Merkurs Topographie ähnelt der Südhemisphäre von Mars, die geologisch alt ist (Aharonson et al. 2001).

Eine simulierte Messung von BELA setzt sich aus drei Teilen zusammen: 1) die interpolierte Höhe am Laserschuss-Fußpunkt, 2) ein normal verteiltes Rauschen und 3) eine Unsicherheit wegen instrumenteller und raumsondenbezogener Fehler. Die Koordinaten der Raumsonde MPO werden für einen reinen Keplerorbit berechnet; für diese Koordinaten wird die exakte topographische Höhe interpoliert. Das normal verteilte Rauschen basiert auf der Restpower für Grade und Ordnungen von $(l_{max} + 1) \rightarrow \infty$, was einer Standardabweichung von 62,5 m entspricht. Die Fehler des Instrumentes und die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Orbits sind als relative Fehler mit einem Maximalwert von 5 m angenommen. Die Erstellung der synthetischen Eingabetopographie ist im Detail in Koch et al. (2008) beschrieben.

Es werden zwei Ansätze näher erläutert, um die Topographie simultan mit der Gezeiten-Lovezahl zu bestimmen: 1) globale Basisfunktionen, repräsentiert als Kugelfunktionsentwicklung (Koch et al. 2008) und 2) lokale Basisfunktionen, angewendet auf ein äquidistantes Rechteckgitter (Koch et al. 2009a). Die Topographie wird in beiden Fällen als Kugelfunktionsentwicklung dargestellt, wobei die extrahierte Topographie für den zweiten Ansatz transformiert werden muss. Zur genaueren Analyse der einzelnen Fehler werden die Unsicherheiten für die einzelnen Grade bestimmt nach

$$E_l = \sqrt{\sum_{m=0}^l (C_{lm}^{inv} - C_{lm})^2 + (S_{lm}^{inv} - S_{lm})^2}, \quad (4)$$

wobei inv die Indizes der bestimmten Topographie darstellen. Es können keine Daten von BELA für Abstände von größer als 1000 km über der Planetenoberfläche erwartet werden, da dann das Hintergrundrauschen stärker ist als das zu erwartende Signal. Um eine bessere statistische Aussage über die Genauigkeit der Simulation geben

zu können, werden die Resultate für N_{sim} verschiedene Topographie-Realisierungen bestimmt. Die Genauigkeit Δx_i für die einzelnen Kugelfunktionsgrade, die Lovezahl und Librationsamplitude ergibt sich dann aus

$$\Delta x_i = \sqrt{N_{sim}^{-1} \sum_{j=1}^{N_{sim}} (x_{i,inv}^j - x_i^j)^2}, \quad (5)$$

wobei für i die bestimmten Topographie-Koeffizienten oder die Lovezahl h_2 und für inv die extrahierten Koeffizienten einzusetzen sind. x_i sind die Eingabwerte.

Die extrahierte Topographie, die Lovezahl und die Librationsamplitude werden mit dem Ansatz der globalen

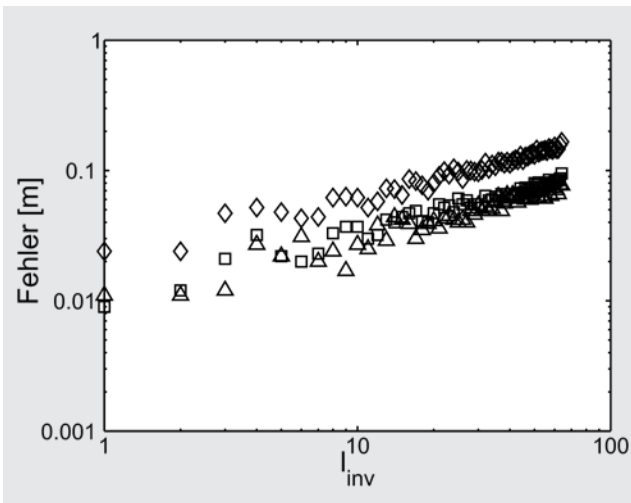


Abb. 2: Mittlerer Fehler der statischen Topographie-Koeffizienten als Funktion der harmonischen Grade für einen resonanten Orbit (Dreieck), einen nicht-resonanten Orbit (Quadrat) und einen nicht-resonanten Orbit mit Höhenbeschränkung (Rauten).

Basisfunktionen beschrieben. Die Basisfunktionen für die Darstellung der Topographie sind Kugelfunktionen, d.h. Änderungen in den Koeffizienten wirken sich global aus. Die Kugelfunktionsentwicklung wird bis zum Grad l_{inv} entwickelt. Hier werden drei Fälle ansatzweise beschrieben: 1) ein resonanter Orbit, 2) ein nicht-resonanter Orbit und 3) ein nicht-resonanter Orbit mit Limitierung der Höhe, bis zu der voraussichtlich Messungen vorgenommen werden können (1055 km). Die Wahl der Bahnparameter eines angenommenen Keplerorbits hat großen Einfluss. Bei der Analyse verschiedener Bahnparameter zeigte sich, dass eine Bahn, die keine Resonanz innerhalb der Missionszeit aufweist, am realistischsten ist. Ein – hypothetisch gewählter – resonanter Orbit ergab aber die besseren Resultate. Die Fehler der Grade der Kugelfunktionsentwicklung sind kleiner als 10 cm (Abb. 2). Die Resultate der Lovezahl h_2 sind in Abb. 3 (links) für den nicht-resonanten Orbit mit Höhenbeschränkung als realistischer Fall dargestellt. Die Genauigkeit für diesen Fall ist besser als 14% (2σ). Die erreichten Standardabweichungen der Lovezahl werden für die drei Fälle in Abb. 3 (rechts) gezeigt. Die Steigerung der Genauigkeit kann mit einem Potenzgesetz der Form

$$\Delta h_2 = a \cdot l_{inv}^b \quad (6)$$

beschrieben werden. Die Genauigkeit verbessert sich bei steigendem Inversionsgrad l_{inv} mit einem Exponenten $b = -2/3$. Der große Vorteil dieser Analysemethode liegt darin, dass eine gleichzeitige Analyse mit den Schwerfelddaten erfolgen kann. Die Analysemethode ist allerdings durch zwei Faktoren limitiert: 1) Die räumliche Auflösung ist begrenzt, da die Topographie nur bis zu einem Kugelfunktionsgrad von 64 bestimmt wurde, und 2) die Berechnungszeiten sehr hoch sind. Die Berech-

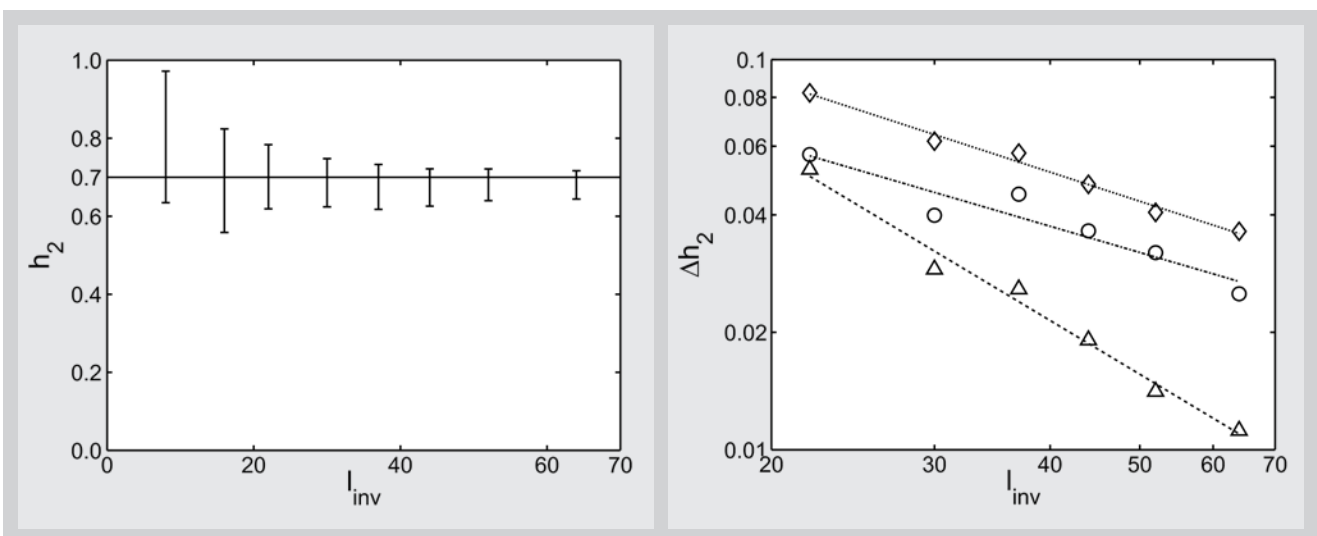


Abb. 3: Resultate für die Lovezahl für verschiedene Grade der Kugelfunktionsentwicklung, mit der die globale Topographie extrahiert wurde (links). Die durchgezogene Linie zeigt den Eingabwert der Lovezahl. Die bestimmten Unsicherheiten der Lovezahl sind für die drei Fälle rechts dargestellt (Symbole analog zu Abb. 2). Die Linien verdeutlichen das bestimmte Potenzgesetz für die im Text beschriebenen verschiedenen Fälle.

nungszeit wird durch den Aufbau der Inversionsmatrix beschränkt. Alle Untersuchungen im Detail sowie die Ergebnisse für die Librationsamplitude können in Koch et al. (2008) nachgelesen werden.

Ein anderer Ansatz beschreibt die extrahierte Topographie als ein äquidistantes Rechteckgitter mit lokalen Basisfunktionen, die als Stufenfunktionen, lineare Funktionen und kubische Splinefunktionen gewählt wurden. Die Basisfunktionen sind nur in einem kleinen Bereich um den Laserfußpunkt ungleich 0. Durch den geplanten, polaren Orbit ergibt sich ein geringer Abstand der Messpunkte entlang der Umlaufbahn, weshalb die Basisfunktionen entlang der Spur der Umlaufbahn nur als Stufenfunktionen gewählt sind. Rechtwinklig zur Umlaufbahn ist der Abstand zwischen den Messpunkten, der durch den Abstand benachbarter Satellitenspuren gegeben ist, höher. Es werden hier zusätzlich lineare Funktionen und kubische Splinefunktionen verwendet. Es ergibt sich dann die in Abb. 4 dargestellte Blockmatrix mit Bandstruktur. Die Lovezahl h_2 wird als globaler Parameter bestimmt, wodurch sich eine zusätzliche Zeile und Spalte (grau schattiert) ergeben. Man erhält die Lovezahl mit einer Unsicherheit von 14% (2σ). Die Topographie wird mit hoher Auflösung an den einzelnen Gitterpunkten extrahiert. Eine Transformation in eine Darstellung als Kugelfunktionsentwicklung zeigt, dass die Topographie mit einer Unsicherheit von besser als 30 cm für die einzelnen Grade bestimmt ist. Diese Methode hat Vorteile, da die Auflösung der Topographie wesentlich höher ist. Die Anzahl der Gitterpunkte ist von der Wahl der Basisfunktion und des Gitterabstandes abhängig. Ideal für beste Resultate ist ein Gitterabstand, der in etwa dem Abstand der Satellitenspuren auf der Oberfläche am Ende der Mission entspricht. Die vollständigen Ergebnisse sind in Koch et al. (2009a) publiziert.

4 Zusammenfassung

Hier wurde gezeigt, dass Laseraltimeter-Datensätze auch gut für die Analyse der inneren Struktur von Planeten verwendet werden können (Koch et al. 2008, 2009a). Untersuchungen wurden für Merkur auf der Basis von simulierten Messungen des BepiColombo Laseraltimeters durchgeführt. Die Topographie, beschrieben als Kugelfunktionsentwicklung, kann mit einer Unsicherheit für die bestimmten Grade l_{inv} von besser als 30 cm extrahiert werden. Außerdem kann die Lovezahl h_2 mit einer Unsicherheit besser als 14% (2σ) bestimmt werden, womit wichtige Rahmenbedingungen für den inneren Aufbau und die Zusammensetzung der äußeren, flüssigen Kernschale gegeben werden. Wenn Merkurs Kern teilweise flüssig ist, kann der Kernradius unter Verwendung der Resultate von van Hoolst und Jacobs (2003) mit einer Unsicherheit von 75 km für die erreichte Genauigkeit abgeleitet werden.

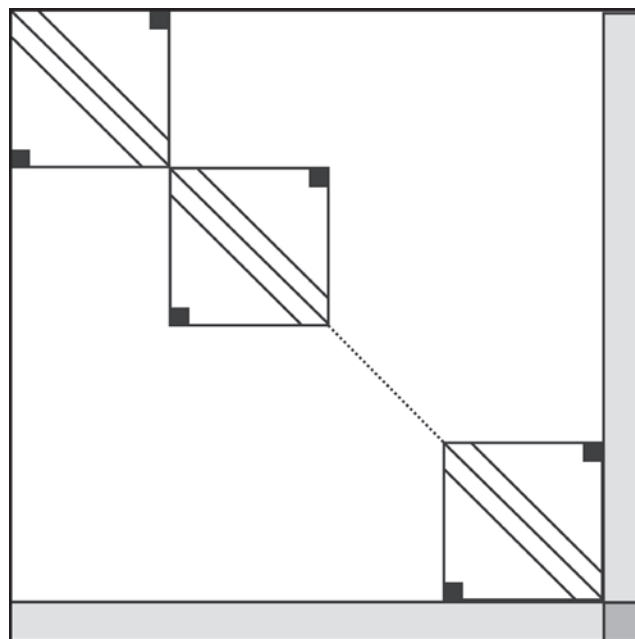


Abb. 4: Illustration der Block- und Bandstruktur der Designmatrix für den Ansatz von Koch et al. (2009b). Die grau schraffierte Zeile und Spalte entsprechen dem Produkt aus lokaler Basisfunktion mit der globalen Gezeitenfunktion. Die Blöcke innerhalb der Matrix haben eine Bandstruktur, wobei die Bandbreite durch die Komplexität der lokalen Basisfunktionen in Längsrichtung gegeben ist.

5 Ausblick

Laseraltimeter-Datensätze enthalten noch weitere Informationen, die weitergehende Untersuchungen der Planetenoberfläche ermöglichen. Über die Intensität und die Form des empfangenen und ausgesandten Pulses können Rückschlüsse über die topographische Variation und die Oberflächeneigenschaften innerhalb der Ausstrahlungsfläche des Laserpulses gezogen werden.

Laseraltimetrie kann mit anderen Messprinzipien (z. B. Kameraaufnahmen) kombiniert werden, um die Daten zu verifizieren und weitergehende wissenschaftliche Ziele zu erreichen. So können genaue Karten von Oberflächen erstellt werden, wobei eine Schwachstelle in der Wahl des Orbits der Raumsonde liegt. Bei kombinierter Analyse von verschiedenen Messmethoden lassen sich die Stärken der Laseraltimetrie, die vereinfacht als Punktmessung angesehen werden kann, noch besser nutzen. Kameras nehmen einen größeren Bereich der Oberfläche auf. Laseraltimeterdaten können wiederum helfen, die Bilder exakt im Raum zu orientieren. Weitere ergänzende Messsysteme wären z. B. Radio Science Experimente zur Bestimmung von Gravitationsdaten oder Spektrometer. Aufschlüsse über den inneren Aufbau des Planeten, wie z. B. die langwellige, globale Struktur der Kruste oder des Mantels, können dann durch die Kombination der Kugel-

funktionsentwicklungen der Laseraltimeterdaten und der Gravitationsfelddaten erzielt werden.

Eine weitere Möglichkeit für eine kombinierte Analyse sind (Multi-)Spektraldaten. Laseraltimetrie verwendet eine einzelne Wellenlänge, während Spektrometer Wellenlängenbereiche abtasten. Wenn beide Datensätze korreliert werden, können neben geologischen auch geotektonische Analysen der Umgebung durchgeführt werden.

Literatur

- Abshire, J.B.; Smith, J.C.; Schutz, B.E.: The Geoscience Laser Altimeter (GLAS). Space Technology and Applications International Forum, The American Institute of Physics, 211–214, 1998.
- Aharonson, O.; Zuber, M.T.; Rothman, D.H.: Statistics of Mars' topography from the Mars Orbiter Laser Altimeter: slopes, correlations and statistical models. *J. Geophys. Res.* 106, 23723–23735, 2001.
- Christensen, U.R.: A deep dynamo generating Mercury's magnetic field. *Nature* 444, 1056–1058, 2006.
- Harder, H.; Schubert, G.: Sulfur in Mercury's core? *Icarus* 151, 118–122, 2001.
- Koch, C.; Christensen, U.R.; Kallenbach, R.: Simultaneous determination of global topography, tidal Love number and libration amplitude of Mercury by laser altimetry. *Planet. Space Sci.* 56, 1226–1237, 2008.
- Koch, C.; Christensen, U.R.; Kallenbach, R.: Mercury's global topography and tidal signal from laser altimetry by using a rectangular grid. *Planet. Space Sci.*, eingereicht, 2009a.
- Koch, C.; Christensen, U.R.; Kallenbach, R.; Hilchenbach, M.: Study of the interior structure of planetary bodies by laser altimetry. *Advances of Geoscience*, accepted, 2009b.
- Margot, J.L.; Peale, S.J.; Jurgens, R.F.; Slade, M.A.; Holin, I.V.: Large longitude libration of Mercury reveals a molten core. *Science* 316, 710–714, 2007.
- Milani, A.; Rossi, A.; Vokrouhlický, D.; Villani, D.; Bonanno, C.: Gravity field and rotation state of Mercury from the BepiColombo radio science experiments. *Planet. Space Sci.* 49, 1579–1596, 2001.
- Peale, S.J.: Determination of parameters related to the interior of Mercury. *Icarus* 17, 168–173, 1972.
- Peale, S.J.: Does Mercury have a molten core? *Nature* 262, 765–766, 1976.
- Peale, S.J.; Phillips, R.J.; Solomon, S.C.; Smith, S.E.; Zuber, M.T.: A procedure for determining the nature of Mercury's core. *Meteorol. Planet. Sci.* 37, 1269–1283, 2002.
- Smith, D.E.; Zuber, M.T.; Neumann, G.A.: Seasonal variations of snow depth on Mars. *Science* 294, 2141–2146, 2001.
- Smith, D.E.; Zuber, M.T.; Frey, H.V.; Garvin, J.B.; Head, J.W.; Muhlemann, D.O.; Pettengill, G.H.; Phillips, R.J.; Solomon, S.C.; Zwally, H.J.; Banerdt, W.B.; Duxbury, T.C.: Topography of the Northern Hemisphere of Mars from the Mars Orbiter Laser Altimeter. *Science* 279, 1686–1691, 1998.
- Smith, D.E.; Zuber, M.T.; Solomon, S.C.; Phillips, R.J.; Head, J.W.; Garvin, J.B.; Banerdt, W.B.; Muhlemann, D.O.; Pettengill, G.H.; Neumann, G.A.; Lemoine, F.G.; Abshire, J.B.; Aharonson, O.; Brown, C.D.; Hauck, S.A.; Ivanov, A.B.; McGovern, P.J.; Zwally, H.J.; Duxbury, T.C.: The Global topography of Mars and Implications for Surface Evolution. *Science* 284, 1495–1502, 1999.
- Solomon, S.C.; McNutt, R.L.; Gold, R.E.; Domingue, D.L.: Messenger mission overview. *Space Sci. Rev* 131, 3–39, 2007.
- Thomas, N.; Spohn, T.; Barriot, J.-P.; Benz, W.; Beutler, G.; Christensen, U.; Dehant, V.; Fallnich, C.; Giardini, D.; Groussin, O.; Gunderson, K.; Hauber, E.; Hilchenbach, M.; Iess, L.; Lamy, P.; Lara, L.-M.; Lognonn_e, P.; Lopez-Moreno, J.J.; Michaelis, H.; Oberst, J.; Resendes, D.; Reynaud, J.-L.; Rodrigo, R.; Sasaki, S.; Seiferlin, K.; Wicczorek, M.; Whitby, J.: The BepiColombo Laser Altimeter (BELA): concept and baseline design. *Planet. Space Sci.* 55, 1398–1413, 2007.
- Van Hoolst, T.; Jacobs, C.: Mercury's tides and interior structure. *J. Geophys. Res.* 108, 7-1-7-16, doi:10.1029/2003je002126, 2003.
- Zuber, M.T.; Smith, D.E.; Solomon, S.C.; Phillips, R.J.; Peale, S.J.; Head III, J.W.; Hauck II, S.A.; McNutt Jr., R.L.; Oberst, J.; Neumann, G.A.; Lemoine, F.G.; Sun, X.; Barnouin-Jha, O.; Harmon, J.K.: Laser Altimeter Observations from MESSENGER's First Mercury Flyby, *Science* 321, 77–79, 2008.

Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Christian Koch
 Prof. Dr. rer. nat. Ulrich R. Christensen
 PD. Dr. rer. nat. Reinald Kallenbach
 Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung
 Max-Planck-Straße 2, 37191 Katlenburg-Lindau
 koch@mps.mpg.de

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Müller
 Leibniz Universität Hannover, Institut für Erdmessung
 Schneiderberg 50, 30167 Hannover
 mueller@ife.uni-hannover.de