

# BEITRAG AUS DER REIHE:

Karl-Heinz Lotze, Werner B. Schneider (Hrsg.)

## Wege in der Physikdidaktik Band 5 Naturphänomene und Astronomie

ISBN 3 - 7896 - 0666 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 2002

### Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.  
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle  
genutzt werden. Auf der Homepage

[www.solstice.de](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Peter Schuster

# Topographie des Jupitermondes Io

## 1 Einleitung

Die Extraktion von Höheninformation aus Bilddaten ist ein nichttriviales Problem. Verschiedene Verfahren existieren, die jeweils ihre Vorteile und Nachteile aufweisen, sich insgesamt jedoch gut ergänzen. Ihre Anwendbarkeit zum Studium der Topographie von Io wird untersucht und ein Überblick über das zu diesem Zweck geeignete Datenmaterial aus der Galileo Mission gegeben. Beispielhafte Ergebnisse sind angeführt. Eine Publikation der vollständigen und detaillierten Ergebnisse wird in naher Zukunft erfolgen.

## 2 Erkennen der Dritten Dimension

In Millionen von Jahren durch die Evolution geformt, ist das menschliche Auge-Gehirn-System ein beeindruckendes Instrument zur Gewinnung dreidimensionaler Information. So entsteht im Betrachter einer Kameraaufnahme eines Himmelskörpers unwillkürlich ein dreidimensionaler Eindruck, der für eine geologische Interpretation hilfreich sein kann, jedoch im wesentlichen auf einer qualitativen Ebene bleibt und der außerdem (insbesondere beim Betrachten eines ungewohnten Anblicks) anfällig für Irrtümer ist (optische Täuschungen). Für wissenschaftliche Analysen ist jedoch eine exakte Höhenmessung erforderlich. Folgende Verfahren existieren, die im Text genauer beschrieben werden:

1. Randvermessungen
2. Vermessung des Terminatorverlaufs
3. Schlagschattenmessungen
4. Photoclinometrie
5. Stereophotogrammetrie
6. Kontrollnetze

## 3 Randvermessung

Die Vermessung der beleuchteten Begrenzung des Himmelskörpers gegenüber dem dunklen Himmelshintergrund ist methodisch sehr einfach. Als Topographie im engeren Sinne wird der über der mittleren Ellipse liegende Teil des Himmelskörpers betrachtet. Erlaubt man für die anzupassende Ellipse eine freie Optimierung der Ellipsenachsen, so kann diese Methode zugleich dazu benutzt werden die Form des Himmelskörpers zu bestimmen. Problematisch ist die zu erzielende Genauigkeit, die ausschließlich durch die Bildauflösung bestimmt ist. Die Herausforderung liegt deshalb darin eine möglichst exakte Subpixelmessung zu erzielen. Das Messergebnis ist die Einhüllende der randnahen Topographie. Deshalb ist diese Methode nahezu nutzlos um topographische Senken zu analysieren. Bei Erhebungen stellt sich das Problem, dass lediglich die den Rand überragende

Topographie gemessen wird. Zum Beispiel hat ein Berg am Äquator von Io, der den Rand mit 1 km überragt, eine Mindesthöhe von 1 km. Das würde der gemessenen Höhe entsprechen, wenn er sich exakt auf dem Rand befände. Ist er jedoch lediglich 5 Längengrade vom Längengrad des Iorandes entfernt, so beträgt seine tatsächliche Höhe 8 km. Das Beispiel veranschaulicht, weshalb es unbedingt notwendig ist, für Einzelobjekte eine weitere Aufnahme einzubeziehen, in welcher die exakte Position des Messobjektes bestimmbar ist.

Die Datenlage der Aufnahmen von Galileo ist zur Anwendung dieser Methode sehr vorteilhaft. Während der ersten Jahre der Mission betrug die minimale Distanz der Raumsonde zu Io immer noch mehr als 250 000 km. Aus dieser Entfernung gewonnene Aufnahmen von Io sind stets globale oder nahezu globale Ansichten, ein Rand ist also vorhanden. Während dieser Jahre wurde ein Monitoring von Io durchgeführt. Dies diente sowohl als Vorbereitung zu den nahen Vorbeiflügen um die Jahrtausendwende, als auch dem Studium der zeitlich variablen Prozesse auf Io. Insgesamt existieren mehr als dreißig für diese Anwendung geeignete Aufnahmen mit Bildauflösungen von 1,2 - 8 km/Pixel. Eine Auswertung der Daten der ersten beiden Jahre findet sich bei Thomas et al. [1]. In dieser Arbeit bestimmen wir die Form von Io als dreiaxiales Ellipsoid mit erhöhter Genauigkeit. Unter anderem zeigt sich in dieser Messung, dass Io in einen Kern und



Abb. 1: Ausschnitt aus einer Randvermessung. Zu sehen ist die Nachtseite von Io vor dem hellen Hintergrund des Planeten Jupiter. Graue Punkte markieren die mittlere Oberfläche, weiße Punkte den tatsächlichen Rand von Io. Bei der Erhebung handelt es sich um Gish Bar Mons mit einer gemessenen Höhe von 9,6 km.

Mantel unterschiedlicher Dichte differenziert ist. Ebenfalls beschrieben ist eine erste Analyse der Topographie von Io. Eine vertiefte Auswertung der von uns zu dieser Zeit benutzten Aufnahmen und die Einbeziehung der neueren Daten ist im Gange. Die Höhen mehrerer Berge wurden bestimmt, darunter auch in einigen Fällen die ersten Höhenbestimmungen überhaupt.

#### 4 Vermessung des Terminatorverlaufs

Verfahren 1 und 2 sind in ihrer Anwendung sehr ähnlich. Die zu gewinnende topographische Information hat einen linienförmigen Charakter. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass bei der Randbestimmung ein diskontinuierlicher Übergang vom hellen Himmelskörper zum dunklen Weltraum (im Regelfall) gefunden werden muss, während das wesentlich schwierigere Problem bei der Terminatorbestimmung darin besteht, den kontinuierlichen Übergang zwischen der in Richtung Terminator immer schwächer beleuchteten Tagseite und der dunklen Nachtseite zu finden. Während dieser messtechnische Aspekt eine geringere Genauigkeit erwarten lässt, hat diese Methode jedoch einen entscheidenden prinzipiellen Vorteil: man misst die Topographie nicht direkt, sondern die durch sie

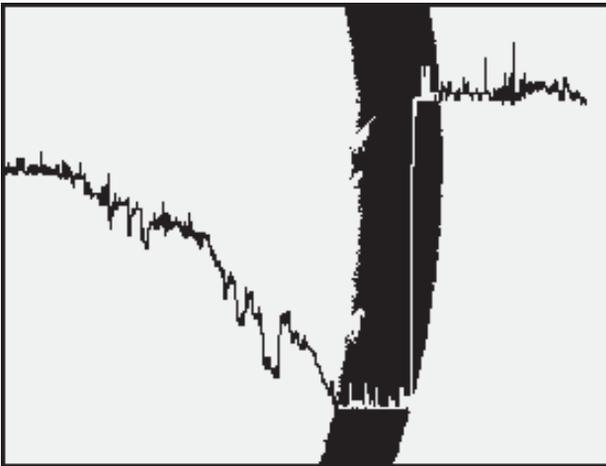


Abb. 2: Eine binäre Darstellung der Bildhelligkeiten. Von links nach rechts ist die Tagseite von Io (weiß), die Nachtseite (schwarz) und Jupiter (weiß) zu sehen. Man erkennt die bessere topographische Auflösung einer Terminatormessung. Der Übergang von Io zu Jupiter (Mondrand) wird durch eine deutlich glattere Kurve markiert als die Terminatorlinie. Der Abbildung überlagert ist die Bildhelligkeitskurve. Bei der Annäherung an den Terminator von der Tagseite nimmt die Helligkeit ab, auf der Nachtseite bleibt sie, abgesehen von einem überlagerten Rauschen, konstant, bevor sie beim Übergang zu Jupiter auf ein konstantes höheres Niveau ansteigt.

hervorgerufene Änderung der Beleuchtungsverhältnisse. Durch den streifenden Einfall des Sonnenlichtes am Terminator können schon sehr geringe Höhenunterschiede lange Schatten werfen. Die topographische Information, die man erhält ist folgende: Für jeden Punkt entlang eines Sonnenstrahles vom Terminator zur Nachtseite gibt es eine Grenze für den Höhenunterschied zum zugehörigen Terminatorpunkt. Würde ein Punkt diesen Höhenunterschied überschreiten, so würde er in die Sonne ragen. Es kann jedoch keine Aussage darüber gemacht werden, um welchen Betrag er diesen Grenzwert übertrifft.

Zur Anwendung dieser Methode eignen sich die globalen Galileo-Aufnahmen nur sehr vereinzelt, da sich der Terminator oftmals in der Nähe des Mondrandes befindet und deshalb sehr verkürzt erscheint. Zudem wurde bei den meisten dieser Aufnahmen vor der Übertragung zur Erde eine Datenkomprimierung durchgeführt, die zu Artefakten an der Tag- und Nachtgrenze führte. Eine Serie von terminatornahen Aufnahmen mit wenigen Hunderten von Metern Bildauflösung wurde bei den Vorbeiflügen I24-I27 gewonnen. Kurze Terminatorabschnitte sind in diesen Bildern enthalten, eine Auswertung steht jedoch noch aus.

## 5 Schlagschattenmessungen

Der besondere Vorzug dieses Verfahrens ist seine einfache Anwendbarkeit. In terminatornahen Gebieten wirft jedes Objekt einen Schatten sofern das Gefälle den Sonneneinfallswinkel übersteigt. Diese Methode erlaubt somit zum einen die Angabe einer unteren Grenze von Steigungswinkeln, zum anderen eine relative Höhenangabe zwischen dem Anfangspunkt eines Schattens und dem Endpunkt. Je näher sich das Objekt am Terminator befindet, desto exakter wird die Höhenmessung. Die Höhe ergibt sich nach der einfachen trigonometrischen Beziehung  $\text{Höhe} = \text{Schattenlänge} \cdot \tan(\text{Sonneneinfallswinkel})$ . Schatten dieser Art treten an einzelnen geologischen Objekten wie Bergen oder Calderen auf. Der Charakter der topographischen Information ist deshalb nahezu punktförmig, genauer von kurzen Höhenprofilen. Der Nachteil dieser Methode ist zum einen die Beschränkung auf Höhenmessungen an Objekten mit steilen Flanken, zum anderen die Begrenzung der topographischen Information auf den Höhenunterschied zwischen dem Schattenbeginn und seinem Ende. So ist es z. B. bei Messungen an Bergen oftmals der Fall, dass der Schatten nicht am Berggipfel beginnt, sondern an einer tiefergelegenen Kante, die gewonnene Höheninformation ist deshalb nicht die gesamte Berghöhe.

Für Galileo wurde ein systematisches Beobachtungsprogramm zur Anwendung dieser Methode geplant. Während der Phase der globalen Aufnahmen waren die Berge von Io das Hauptziel dieser Kampagne. Hierbei lag die besondere Betonung auf einer Studie der Verteilung dieser Objekte auf der Oberfläche. Beobachtungen aus der Voyagerära hatten zu der Vermutung geführt, dass die Verteilung von Bergen auf Io eine starke longitudinale Abhängigkeit zeigt. Das wiederum hätte interessante Implikationen für den Aufbau der Kruste und die Aktivität

geologischer Prozesse ergeben. Messungen von Galileo zeigten jedoch, dass es sich bei dieser Schlussfolgerung aus Voyagerbeobachtungen lediglich um einen Artefakt gehandelt hat, das sich durch die longitudinal ungleichmäßigen Beobachtungsbedingungen während eines Vorbeifluges ergeben hatte [2]. Während der Vorbeiflüge I24-I27 wurde eine Serie von terminatornahen Aufnahmen gewonnen, die auf wenige hundert Meter genaue Höhenmessungen an mehreren Bergen, Calderen und Böschungen ermöglichten [3]. Zusätzlich sind in vielen Aufnahmen ungeplante Schatten enthalten, die insbesondere bei hoher Auflösung uns den ersten Blick in den kleinskaligen Bereich der Topographie von Io erlauben. In einer Aufnahme im Gebiet des Vulkans Pillan sind Höhenunterschiede bis zu einer unteren Grenze von einem Meter zu erkennen.

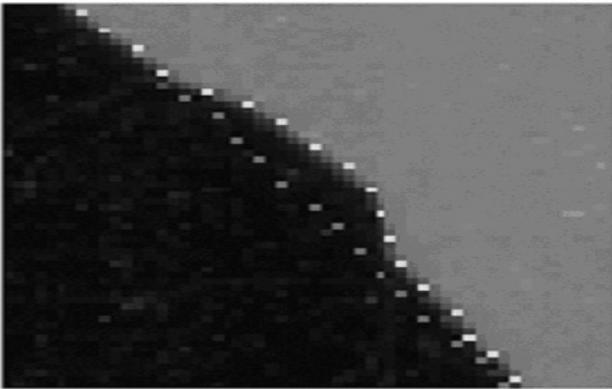


Abb. 3: Schattenwurf des Nordgipfels von Hi'iaka Mons. Durch die Nähe zum Terminator (rechts im Bild) entsteht ein sehr langer Schatten, die Gipfelhöhe beträgt 11,2 km.

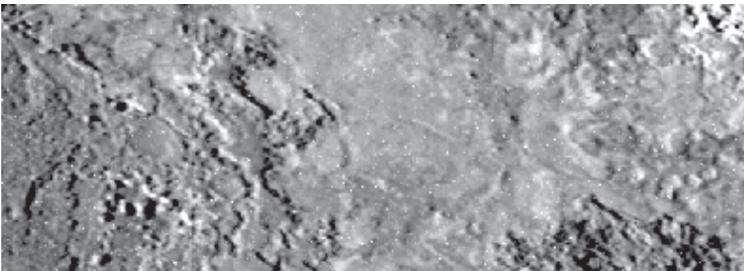


Abb. 4: Diese terminatornahe Aufnahme eines Lavagebietes in der Nähe vom Vulkan Pillan enthält mit einer Höhengenaugigkeit von einem Meter die bislang höchst aufgelöste topographische Information von Io. Eine 1-Meter Erhebung wirft einen Schatten von 9m. Die Bildauflösung beträgt 9m/pixel.

## 6 Photoclinometrie

Die bisher vorgestellten Verfahren zur Gewinnung von Höheninformation zeichnen sich durch einen vergleichsweise geringen Aufwand und methodische Einfachheit aus. Die mit ihrer Hilfe gewonnenen Höheninformationen sind jedoch sehr eingeschränkt. Mit der Photoclinometrie haben wir das erste Verfahren, das prinzipiell in der Lage ist, relative Höheninformationen mit einem flächenhaften Charakter zu liefern. Grundsätzlich basiert diese Methode auf der Tatsache, dass die Abstrahlung des einfallenden Sonnenlichtes von der Neigung der beleuchteten Fläche zur Sonne und dem Blickwinkel des Beobachters abhängig ist, d.h. die durch Topographie verursachte variable Neigung der Oberfläche sich in Helligkeitsunterschieden in der Aufnahme bemerkbar macht. Diese variable Helligkeit kann jedoch ebenso durch Unterschiede in der Oberflächenalbedo erzeugt werden. Da eine Trennung der beiden Ursachen nicht möglich ist, kann dieses Verfahren nur angewandt werden, wenn die Albedovariationen vernachlässigbar sind. Ein weiteres Problem ist, dass die Streueigenschaften einer realen Planetenoberfläche mit Modellen nur unzureichend beschrieben werden können und die notwendigen Modellparameter mangels ausreichender Winkelabdeckung der Beobachtungen oftmals nur unzureichend bekannt sind. Mit diesem Verfahren werden direkt Steigungswinkel bestimmt. Zwar lassen sich diese in relative Höhenunterschiede umrechnen, doch die Fehler in den Steigungen summieren sich über die Entfernung; die Genauigkeit einer Höhenunterschiedsmessung nimmt deshalb für entferntere Objekte stark ab.

Bei Io handelt es sich um einen sehr farbenprächtigen Körper mit großen Albedovariationen auf seiner Oberfläche. Außerdem zeigt er ein ungewöhnliches photometrisches Verhalten. Geringe Änderungen der Beobachtungswinkel führen zu starken Helligkeitsvariationen, die zudem noch regional unterschiedlich sein können. Diese Eigenheiten sind dafür verantwortlich, dass bisherige Versuche mit dieser Methode sich auf Io als nicht sehr ergiebig erwiesen haben. Vereinzelt konnten jedoch die Hangneigungen von Schildvulkanen bestimmt werden [4]. Auf den höher aufgelösten Aufnahmen von Io um die Jahrestausendwende wurden provisorisch als Dünenfelder bezeichnete rätselhafte Strukturen entdeckt. Topographische Informationen sind wichtig für ihr Verständnis, und die Photoclinometrie bietet sich in diesem Fall sowohl als das einzige als auch das erfolgversprechende Verfahren an.

## 7 Stereophotogrammetrie

Diese Methode basiert auf exakten Positionsmessungen geologischer Objekte in zwei oder mehreren Aufnahmen. Bei Kenntnis der Position der Raumsonde, der Position von Io und der Kameraorientierung ergibt sich aus jeder Messung ein von der Raumsonde ausgehender Strahl. Im messfehlerfreien Fall treffen sich diese Strahlen an einem Punkt im Raum, der dem Ort des gemessenen Objektes auf der Oberfläche von Io entspricht. Im Prinzip kann dieses Verfahren für jeden

Punkt der Oberfläche angewandt werden, der in mehr als einer Aufnahme identifiziert werden kann. Damit haben wir ein weiteres Verfahren, das topographische Information mit Flächencharakter liefert. Da der Arbeitsaufwand bei der Betrachtung einer Fläche sehr groß wird, kommen im Normalfall automatische Verfahren, sogenannte Matcher zum Einsatz, die konjugierte Punkte in den Stereobildpaaren suchen. Da genau gesprochen nicht konjugierte Punkte identifiziert werden können, sondern kleine Flächen verglichen werden, reduziert sich die horizontale Auflösung der Höheninformation. Grundsätzlich kann diese Aufgabe auch von einem menschlichen Operator ausgeführt werden. Die menschlichen Fähigkeiten zum Erkennen von identischen Strukturen übertreffen oftmals die eines Programmes, doch gelangt damit ein unerwünschtes und schwer abschätzbares subjektives Element in die Auswertung. Die Genauigkeit der mit diesem Verfahren gewonnenen Höheninformation ergibt sich aus der Bildauflösung, der Genauigkeit der Positionsmessung und dem Stereowinkel.

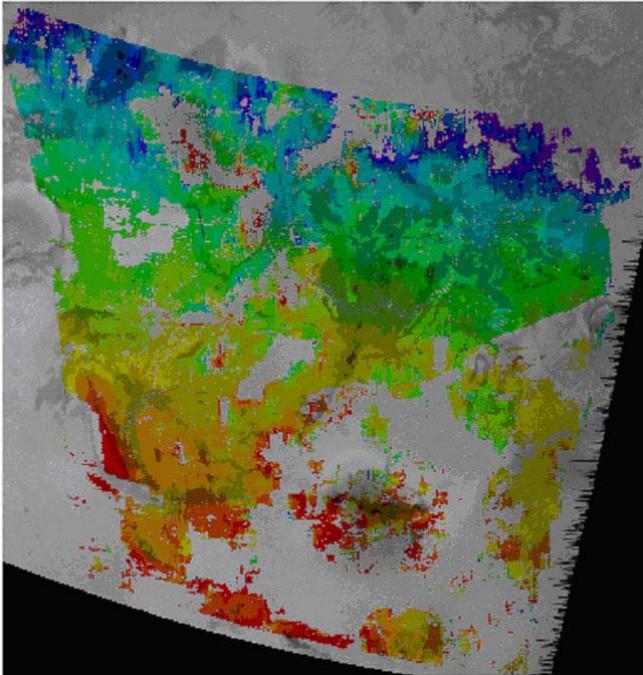


Abb. 5: Digitales Geländemodell der Volund-Region. In den Lücken des Geländemodells war ein Auffinden konjugierter Punkte des Stereopaars nicht möglich. Die über die Farbe kodierte Höhe ist in der S/W-Wiedergabe nur begrenzt erkennbar. Die Höhe nimmt von oben nach unten zu. Höchste Bereiche sind unten dunkel dargestellt.

Die Bestimmung von konjugierten Punkten erweist sich im Fall von Io als sehr anspruchsvoll. Die starke Teilchenstrahlung in der Nähe von Io führt zu einem Rauschen im CCD-Sensor der Kamera. Obwohl durch Filteralgorithmen eine wesentliche Verbesserung erzielt werden kann, bleibt doch oftmals (insbesondere in den durch Vulkanasche bedeckten Gebieten) das Strahlungsrauschen die dominierende Bildinformation. Ein weiteres Problem sind die oben erwähnten photometrischen Effekte. Während es teilweise gelang, Aufnahmen unter identischen Einfallswinkeln zu gewinnen, haben die Stereopartner sehr unterschiedliche Phasenwinkel und Ausfallswinkel, die sich in der Bildhelligkeit bemerkbar machen und die Identifizierung konjugierter Punkte erschweren.

Die in der ersten Phase der Galileomission gewonnenen globalen Aufnahmen zeigen naturgemäß häufige Stereoüberlappungen, doch der Fehler der Höheninformation ist aufgrund der geringen Bildauflösungen groß. Er liegt typischerweise im Bereich von einigen Hunderten von Metern bis zu mehreren Kilometern und somit in derselben Größenordnung wie viele der interessanten Oberflächenstrukturen. Dennoch konnte so das durchschnittliche Gefälle von langgestreckten Lavaflüssen bestimmt und die Höhen einiger Schildvulkane gemessen werden. Drei Stereopaare wurden geplant für die nahen Vorbeiflüge I24-I27. Eine vermutlich durch Strahlung verursachte Störung der Kameraelektronik in Orbit I24 führte zu nicht vollständig rekonstruierbaren Bildfehlern, ein Ausfall der Sonde in I25 zum Verlust einiger Aufnahmen. Deshalb blieb lediglich ein geplantes Stereopaar aus I24-I27 übrig. Der Bildfehler in I24 verhindert in diesem Fall ein automatisches Matching. Eine Bestimmung von konjugierten Punkten von Hand ist im Moment im Gange. Trotz dieses Ausfalls sind mehrere nicht für diesen Zweck optimierte Stereopaare entstanden. Während die mit ihnen erreichbare Genauigkeit unter dem maximal Möglichen liegt, wurden dennoch die Höhen einiger Plateaus und die Höhenstrukturen von Tvashtar Catena, dem Ort der spektakulären Lavaeruption während des Vorbeifluges I25 gemessen.

## **8 Kontrollnetze**

Diese Methode ist der vorhergehenden sehr ähnlich. Auch sie basiert auf Positionsmessungen eines Objektes in mehreren Aufnahmen. Der Unterschied besteht darin, dass mehr als zwei Messungen verwendet werden, dadurch das Problem überbestimmt ist und eine Minimierung des Fehlers durch eine Ausgleichsrechnung möglich ist. Da dieses Verfahren mit einer wachsenden Zahl von Punktmessungen sehr schnell einen extremen Rechenaufwand erfordert, werden nur besonders deutlich erkennbare Punkte vermessen. Die Höheninformation besitzt dementsprechend Punktcharakter. Man erhält jedoch eine absolute Höheninformation, keine relativen Höhenunterschiede, und die Auswahl der Punkte ist nur durch das schwache Kriterium der Erkennbarkeit eingeschränkt.

Zwei globale Kontrollnetze mit leicht unterschiedlichen Methoden wurden aus den Galileodaten der Jahre 1996-1999 bestimmt [5,6]. Durch das Fitten von Ellip-



Abb. 6: Das DLR Io Kontrollnetz. Darstellung der auf der jupiterabgewandten Hemisphäre liegenden Kontrollpunkte. Eine gleichmäßige und homogene Abdeckung bis in hohe Breiten wurde erzielt.

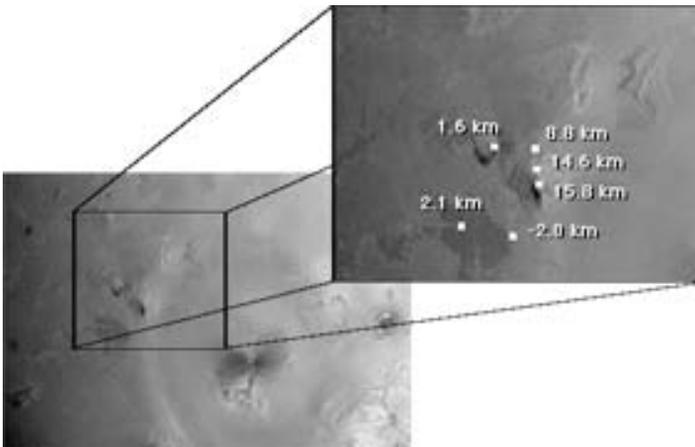


Abb. 7: Zur Vermessung von Boosäule Mons verwendete Kontrollpunkte. Boosäule Mons ist mit einer absoluten Höhe von 15,8 km über der mittleren Iooberfläche die höchste Erhebung auf Io.

soiden wurde die exakte Form von Io vermessen, wodurch ebenfalls die Existenz eines Kerns in Io nachgewiesen wurde. Die Kontrollnetzpunkte dienen auch dazu, relative Höheninformationen aus stereophotogrammetrischen Messungen in absolute Höhen umzuwandeln und so z.B. räumlich getrennte Höhenmodelle vergleichbar zu machen. Die erreichte Qualität des Kontrollnetzes erlaubt mittlerweile sowohl Aussagen zu einzelnen Objekten, wie auch zu Klassen von Objekten. So wurden die Höhen von ca. zwanzig Bergen erstmalig bestimmt und gezeigt, dass die Ursprungsorte der Plumes nicht signifikant über dem Nullniveau auf Io liegen. Letztere Erkenntnis steht im Widerspruch zu der über Jahrzehnte geltenden Hypothese, nach der die Plumes ihren Ursprung in Vulkanschlotten haben, stützt jedoch neuere Modelle bei denen angenommen wird, dass die Plumes durch das Austreiben von Gasen aus dem Boden durch voranschreitende Lavaströme entstehen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] THOMAS, P. C. ET AL.: *The Shape of Io from Limb Measurements*, Icarus 135 (1998), pp 175-180
- [2] CARR, P. C. ET AL.: IO MOUNTAINS AND CALDERAS, Icarus 135 (1998) pp 146-165
- [3] TURTLE, E. ET AL.: *Mountains on Io: High-resolution Galileo Observations and Formation Models*, J. Geophys. Res., submitted
- [4] MOORE, J. M. ET AL.: *Topographic evidence for shield volcanism on Io*, Icarus 67 (1986) pp 181-183
- [5] DAVIES, M. E. ET AL.: *The Control Networks of the Galilean Satellites and Implications for Global Shape*, Icarus 135 (1998) pp 372-376
- [6] OBERST, J. ET AL., in Vorbereitung