
WILHELM FOERSTER STERNWARTE ^{E.}_{V.} MIT ZEISS-PLANETARIUM BERLIN

BERLIN 41 • Munsterdamm 90 • Insulaner • Ruf 7962029

P r o t o k o l l

der

260. Sitzung der

Gruppe Berliner Mondbeobachter

1982 Mai 10

Beginn: 20.05 Uhr

Es sind erschienen die Damen K i r s c h k e , S ä v e c k e , T i e t e n b e r g , sowie die Herren A b r a h a m s o n , B l a n c k e n b u r g , B o c k , E h l e r s , E r f u r t h , F r e i t a g , F r e y d a n k , G a r n a c h , G ü d d e , J a h n , K e r s t e i n , K u n e r t , L i e b o l d , M a c k o w i a k , M e n d e , J . M e y e r , W . M e y e r , S y d o w , V o i g t , W i e d e b a c h .

Herr K u n e r t eröffnet die Sitzung und begrüßt die Teilnehmer. Er weist auf einen Brief von Herrn B e y e r hin, über die Beobachtung der Rille bei Marius, das Thema soll in der nächsten Sitzung besprochen werden.

Dann gibt er das Wort Herrn L i e b o l d zur Besprechung des Buches "The Moon, our sister planet" von Peter H. Cadogan, Cambridge University Press 1981.

Herr L i e b o l d betont, daß das Buch als erste Einführung gut geeignet ist, jedoch wider Erwarten nicht überall in die Tiefe führt. Er zeigt, daß in dem Kapitel über M i k r o m e t e o r i t e n und M e t e c r i t e n der Unterschied in der Größe besteht, wie der Name schon sagt. Dabei führt er aus:

Ein Mikrometeorit wird definiert als ein Partikel, der groß genug ist, um auf der Oberfläche eines Steines einen Krater zu hinterlassen. In der Praxis liegt die Größe eines Mikrometeoriten zwischen einigen Zentimetern und zehntel Millimetern. Vor den Apollo-Missionen war kaum etwas über Mikrometeoriten bekannt, da der größte Teil den Flug durch die Erdatmosphäre nicht überlebt. Das Auffinden von Mikrometeoriten wird auf der Erde durch Verwitterung, Vulkanismus, geologische Prozesse und Industriestäube erschwert. Die besten Plätze, um Mikrometeoriten nachzuweisen, sind heute die tiefen ozeanischen Böden, oder das Eisschild der Antarktis.

Um mehr über Mikrometeoriten und kosmischen Staub zu erfahren, mußten daher die Experimente und die Suche außerhalb der Erdatmosphäre stattfinden. Erfolgreich waren Raketen und Satelliten, die Mikropartikelkollektoren mit sich führten.

Die Proben und Messungen, die die Apollo-Missionen mitbrachten, ergänzten und bestätigten bisherige Ergebnisse. Im Gegensatz zur Erde sind die Gesteine der Mondoberfläche keiner Erosion ausgesetzt, so daß Spuren von Mikrometeoriten über Millionen Jahre erhalten bleiben. Deshalb liefern uns diese Proben Informationen über lange zeitliche Intervalle.

Über die Häufigkeit der Zusammenstöße gaben alle Kapseln und Satelliten Auskunft, die nach ihrer Rückkehr peinlich genau untersucht worden waren. Aus diesen Untersuchungen bildete man die Mikrokrateruhr, zur Altersbestimmung von Mondgestein, die aber nur dann einen brauchbaren Wert liefert, wenn die Dichte des interplanetarischen Materials für Millionen Jahre konstant ist.

Der beste Platz, um nach Mikrokratern zu suchen, sind kristalline Steine oder solche mit glasiger Oberfläche. Die glatte Oberfläche läßt nämlich eine schnelle Entdeckung zu. Hierbei ist festzustellen, daß mit zunehmender Anzahl der Krater ihre Größe bzw. Durchmesser abnimmt. Gleichzeitig entdeckt man, daß mit hoher Verteilung von Sonnenflare-Spuren die Anzahl der Mikrokratern ebenso zunimmt. Die Größe der Krater hängt ab von der Geschwindigkeit, die ein Mikrometeorit erreichen kann, wenn er auf den Mond fällt.

Die höchste beträgt 60 Meilen pro Sekunde, im Mittel beträgt sie 5 bis 25 Meilen pro Sekunde.

Dann erhält Herr Freydanck das Wort zu seinem Abschlußbericht über die visuellen Beobachtungen der totalen Mondfinsternis vom 9. Januar dieses Jahres.

Er betont, daß er hauptsächlich über die dabei durchgeführten Schattenantrittsbeobachtungen und deren Auswertungsergebnisse sprechen will. Im einzelnen berichtet er: Zu den hier in Berlin erzielten Meßergebnissen kommen jetzt noch die Beobachtungsreihen der Bruno H. Bürgel-Sternwarte in Hartha (DDR) hinzu. Es wurden uns von den Mitarbeitern dieses Instituts jeweils drei Reihen Eintritts- und drei Reihen Austrittsbeobachtungen zur Verfügung gestellt. An ihnen waren folgende Amateurastronomen beteiligt: H. Busch, R. Braune, G. Reinhold, S. Müller und H. Zimmermann. Die Witterungsverhältnisse waren in Hartha ebenso ideal wie bei uns in Berlin (Sicht: 2, Temperatur - 15,0 °C). Dazu wäre noch zu bemerken, daß die niedrige Temperatur hier in Berlin auf der Sternwarte noch ein Problem zur Folge hatte, das wir vorher nicht berücksichtigen konnten. Die aufladbaren Taschenlampen fielen bei der hier herrschenden Temperatur von - 15,1 °C häufig aus. Sie mußten also in kurzen Abständen nachgeladen werden. Dies stellte einen beachtlichen Störfaktor dar.

Insgesamt standen jetzt 8 Meßreihen der Schatteneintritte mit 96 Einzelmessungen und 7 Meßreihen der Schattenausritte mit 93 Meßwerten für die Auswertung zur Verfügung. Die anderen Meßreihen, d.h. die Beobachtungen hier in Berlin und deren Beobachter, hatte der Referent schon in den ersten Berichten aufgeführt.

Die Auswertung:

Die dazu benötigten Formeln sind zum großen Teil im Handbuch für Sternfreunde, 1. und 2. Auflage veröffentlicht (von A. Güttler).

Die mathematische Auswertung wurde zum größten Teil von Frau Erika Freydank durchgeführt. Die Auswertungsarbeit wurde allerdings durch die später hinzugekommenen Reihen sehr verzögert. Sie mußte dadurch dreimal wiederholt werden, da ja alle Meßwerte in die Mittelwertbildungen einbezogen werden sollten. Als Ergebnis der Fehler- und Reduktionsrechnungen kann festgestellt werden, daß alle Beobachtungsreihen erstaunlich gut übereinstimmen. Es mußten zwar von 96 Eintrittsmessungen 9 herausgenommen werden, und von den 93 Austrittsmessungen waren es fünf. Das sind aber nur 7,4 % aller Meßwerte. Sie fielen durch offensichtliche Beobachtungsfehler heraus, oder sie betrafen ein nicht im "Berliner System" enthaltenes Objekt der Mondoberfläche (Krater Delambre).

Die Messungen schwanken bei den Eintrittsbeobachtungen in einer Fehlergrenze von $\pm 0,2$ min bis $\pm 1,4$ min. Bei den Schattenausritten liegt die Schwankungsbreite nur zwischen $\pm 0,1$ min und $\pm 0,2$ min, das sieht natürlich wesentlich besser aus als bei den Eintritten.

Aus den jetzt reduzierten Meßwerten ergeben sich folgende Resultate:

Der Erdschatten-Vergrößerungsfaktor σ für den Kernschatten, bedingt durch die Erdatmosphäre beträgt $1,023 \pm 0,004$, berechnet aus den Werten für die jeweils 16 Mondformationen. Der Vergrößerungsfaktor σ ist für die Ein- und Austritte fast völlig identisch.

Die damit berechnete Dauer der Finsternis vom 9. Januar beträgt $205,3 \text{ min} = 3^{\text{h}} 25,3^{\text{m}}$. Vom Kontakt 1 bis zum Kontakt 4 des Kernschattens. Das sind in % ausgedrückt $2,29 \% = 4,7 \text{ min}$ Verlängerungszeit der Finsternisdauer durch die Einwirkung der Atmosphäre. Extremwerte wären $1,5 \%$ als kleinste und $3,8 \%$ als größte Dauer der Verlängerung. Diese Werte beziehen sich auf die vorausberechnete Dauer der Finsternis, als deren Grundlage der geometrische Durchmesser der Erde diente.

Eine Deformierung des Kernschattens wurde nicht festgestellt. Es konnte auch keine stärkere Beeinträchtigung der Hochatmosphäre anhand dieser Meßreihen festgestellt werden. Dies betrifft insbesondere die Vulkantätigkeit (z.B. der große Ausbruch des Mt. St. Helens im Mai 1980), aber auch andere Störfaktoren, wie Meteorstaub, die die Hochatmosphäre beeinträchtigen können. Ob noch eine weitergehende Auswertung möglich ist, ist sehr fraglich.

Schätzungen der Farbe und Dunkelheit der Finsternis:

Die Beobachtergruppe an der Sternwarte in Hartha führte ebenfalls wie wir in Derlin, eine Schätzung der Farbe und Dunkelheit der Finsternis durch. Als Grundlage diente, wie bei uns die 5-stufige Skala des französischen Astronomen Danjon. Sie bestätigten unseren hier von allen 7 Beobachtern geschätzten Wert; und zwar die Stufe 3 dieser Skala. Dieser Wert wurde also von allen Beobachtern angegeben (insgesamt 12 Beobachter). Die Stufe 3 lautet nochmals: Eine ziegelrote Finsternis, der Kernschatten ist häufig von einem hellen oder gelblichen Rand umsäumt:

Eine photometrische Meßreihe (Beobachtungsreihe) erhielten wir von Herrn Ing. D. Böhme aus Nessa (DDR).

Diese Beobachtungsreihe geht wohl auf die früher angewandte Methode der Silberkugel-photometrie zurück (Dr. N. Richter).

Leider war das lichtelektrische Photometer, eine blauempfindliche Vakuumzelle mit Operationsverstärker, nicht empfindlich genug. Es konnte damit nur in Teilbereichen des Helligkeitsabfalles und des Wiederanstieges gemessen werden. Für die Totalität reichte das Photometer nicht mehr aus.

Herr Böhme nahm dann, um die Kurve zu ergänzen, einige visuelle Schätzungen vor. Die Extinktion wurde dabei berücksichtigt. Leider fehlen alle weiteren Angaben zur Meßreihe, so daß eine weitergehende Auswertung nicht möglich ist. Eine Abschätzung der Kurve ergab eine Amplitude, für diese Finsternis, von etwa $11,6^{\text{m}}$.

Weitere photometrische Meßreihen von dieser Finsternis, die einen Vergleich ermöglichen würden, liegen nicht vor.

Dann erhält Herr M a c k o w i a k das Wort. Er berichtet über die Planetengeologie "Der Saturnmond Titan und seine Atmosphäre".

1. Die Geschichte der Erforschung Titans

Der Saturnmond Titan nimmt aufgrund seiner Atmosphäre nicht nur eine Sonderstellung unter den Trabanten des Saturnsystems, sondern auch unter den Körpern des gesamten Planetensystems ein. Seine Entdeckung fällt in das Frühjahr des Jahres 1665, als er durch den holländischen Physiker und Astronom Christian Huygens aufgefunden wurde, kurz nachdem er die Ringe beobachtet hatte. Aber erst nahezu zwei Jahrhunderte später erhielt der rote Riesenmond seinen Namen. Das zweite in der Geschichte der Erforschung Titans wichtige Datum stellt der 12. November 1980 dar, als es der Raumsonde "Voyager 1" erstmals gelang, in einem Abstand von nur 7000 km einen Saturnmond gleichsam unter die Lupe zu nehmen. Allerdings mußte dafür ein hoher Preis bezahlt werden: Die Raumsonde ließ sich nicht mehr - wie ursprünglich geplant - in eine Bahn zu den Planeten Uranus

und Neptun lenken. Aber - so viele Wissenschaftler - der Mond war diesen Preis wert. Denn die Instrumente an Bord der Voyager-Sonde konnten durch ihre Messungen aus geringer Distanz immerhin einiges darüber hinausfinden, wie es in und unter der Gashülle Titans aussieht.

So stellte sich beispielsweise heraus, daß es auf diesem Trabanten des Saturn flüssiges Methan gibt, womit er - neben der Erde - der einzige bekannte Himmelskörper im Sonnensystem ist, dessen Oberfläche - ganz oder teilweise - von einer Flüssigkeit bedeckt wird. Weiterhin ergaben die Messungen, daß Titan eine dichtere Atmosphäre besitzt als die Erde; insbesondere enthält sie Kohlenstoff, Stickstoff und Wasserstoff, allerdings keinen molekularen Sauerstoff. Auf Titan herrschen offenbar noch heute ganz ähnliche Bedingungen, wie sie bei allen Planeten kurz nach ihrer Entstehung angenommen werden, die, wenn es zum Ablauf chemischer Reaktionen kommt, zum Entstehen organischer Moleküle führen könnten, aus denen sich wahrscheinlich das erste Leben auf der Erde entwickelte.

2. Die Entstehung der Titanatmosphäre

Den ersten Hinweis auf die Existenz einer Atmosphäre auf Titan lieferten die Beobachtungen des katalanischen Astronomen Jose Comas Sola im Jahre 1908. Er hatte bemerkt, daß die winzige Scheibe des Mondes im Zentrum heller war als am Rand und das als Hinweis auf eine Atmosphäre gedeutet. Allerdings werden seine Beobachtungen heute angezweifelt, da er in der Folgezeit auch Wolkenflecken auf den großen Jupitermonden beobachtet haben will, die sich als Irrtum herausstellten. Solas Beobachtungen veranlaßten wohl aber seinen Zeitgenossen Sir James Jeans, Titan und die Riesenmonde des Jupiter mit in seine theoretischen Studien über die Entwicklung von Planetenatmosphären mit einzubeziehen. Jeans untersuchte, unter welchen Bedingungen sich die Gashüllen der Planeten verflüchtigen konnten und kam zu dem Schluß, daß Titan trotz seiner - verglichen mit der Erde - geringen Größe und seinem entsprechenden schwachen Schwerfeld wahrscheinlich eine Atmosphäre besitzt. Der Grund dafür sind die niedrigen Temperaturen, die auf diesem Mond herrschen und die sich aus dem Abstand zwischen Titan und der Sonne sowie dem Reflexionsvermögen abschätzen lassen. Auf diese Weise erhält man für die Oberfläche und die Atmosphäre des Großmondes Werte zwischen sechzig und hundert Kelvin. Nach Jeans war es bei diesen Temperaturen für Gase mit einem Molekulargewicht von über 16 unmöglich, den Titan zu verlassen; sie blieben im Umkreis des Satelliten gefangen. Als Gase dafür - also mit Molekulargewichten oberhalb der kritischen Grenze - kamen in Frage: Ammoniak (NH_3) mit einem Molekulargewicht von 17; Argon (Ar), Neon (Ne), molekularer Stickstoff (N_2) sowie Methan (CH_4), das 1944 von Gerard P. Kuiper im Spektrum des Mondes nachgewiesen wurde, womit die Wissenschaftler den ersten Beweis für die Existenz einer Lufthülle auf diesem Mond in den Händen hielten.

3. Atmosphärenmodelle

Um eine Vorstellung vom Absorptionsvermögen der Titanatmosphäre zu bekommen, stellte Kuiper Vergleiche mit Laborspektren an, die bei niedrigen Drucken gemessen worden waren. Er kam zu dem Ergebnis, daß die Titanatmosphäre das senkrecht einfallende - und reflektierte - Sonnenlicht genauso stark absorbiert wie eine 200 m hohe Methansäule unter Normalbedingungen, also bei einem Luftdruck von einer Atmosphäre und einer Temperatur von 273 Kelvin. Man kann sich die Stärke dieser Absorption deutlich machen, wenn man bedenkt, daß eine vertikale Säule in der irdischen Atmosphäre unter Normalbedingungen nur eine Höhe von 8 km erreichen würde. Eine andere, zunächst unerwartete Beobachtung wies in eine ähnliche Richtung: Sonnenlicht, daß Titan unter kleinen Winkeln zur Erde reflektierte, war positiv polarisiert, was vermuten ließ, daß das

einfallende Sonnenlicht nicht durch eine völlig durchsichtige Atmosphäre lief und an einer festen Oberfläche reflektiert wurde, sondern daß es auf eine tiefe, wolkenreiche Atmosphäre traf. In der Zwischenzeit hatte Laurence M. Trafton von der Universität Texas in Austin durch Untersuchung des Spektrums des Mondes mit Hilfe eines gerade entwickelten Infrarot-Bildverstärkers herausgefunden, daß die Gashülle des Mondes möglicherweise beträchtlich mehr Methan enthielt, als von Kuiper behauptet. Die deutliche Absorptionsbande des Methan bei einer Wellenlänge von ungefähr einem Mikrometer ließ diese Möglichkeit vermuten oder auch das Vorhandensein weiterer - bislang freilich unentdeckter - Gase, und zwar in großen Mengen. Da die deutlicheren Absorptionsbanden des Methan im Infrarotspektrum Titans ganz anders aussahen (schwächer und gleichzeitig breiter) als vergleichbare Banden von Jupiter und Saturn, schloß Trafton, daß die Atmosphäre des Mondes genau wie die Gashüllen der beiden Riesenplaneten fein verteilte kleine Schwebeteilchen enthält, die allerdings in anderen Mengen und einer anderen Höhenverteilung auftreten. Weitere Untersuchungen ergaben schließlich, daß die Titanatmosphäre 120 m hoch sein mußte mit einem Druck halb so groß wie der Luftdruck auf der Erde in Meereshöhe. Damit war klar, daß es auf Titan neben Methan noch große Mengen anderer Gase geben mußte.

Ein anderes Problem waren die Temperaturen. Schon 1965 hatte man in dieser Hinsicht Unstimmigkeiten bemerkt. Aus der Intensität der beobachteten Strahlung, die Titan bei einer Wellenlänge von 10 Mikrometern aussendet, ergab sich ein Wert von 165 K. Das war fast doppelt soviel, wie zu erwarten wäre, wenn die Mondoberfläche und untere Atmosphäre ausschließlich von der Sonne aufgeheizt würden. Auch weitere Untersuchungen, zum Beispiel im Radiowellenbereich, lieferten ähnlich hohe und noch höhere Werte. Um diese widersprüchlichen Temperaturmessungen zu erklären, nahm man einen "Treibhauseffekt" an, wonach die Titanatmosphäre für sichtbares Licht durchlässig wäre, nicht aber für die infrarote Strahlung. Das Sonnenlicht würde in diesem Fall durch die Atmosphäre bis zur Mondoberfläche gelangen und sie aufheizen, jedoch ginge die Wärmestrahlung der Mondoberfläche nicht verloren, weil sie bereits in der unteren Atmosphäre abgefangen würde. Dieses "Treibhauskonzept" war allerdings nicht mehr haltbar, als eine Reihe von Messungen zeigte, daß die Temperatur in der Titanatmosphäre keineswegs nach oben abnimmt, sondern die oberen Schichten sogar wärmer sind, als die Mondoberfläche.

In dieser Situation schlugen Robert E. Danielson und John J. Caldwell von der Princeton Universität folgendes Modell vor: Die Titanatmosphäre enthält eine Inversionschicht, wo die Temperatur mit zunehmender Höhe ansteigt, anstatt wie im Normalfall zu sinken. Die Aufheizung der Atmosphäre geschieht durch sogenannte Aerosolteilchen (Schwebepartikel), die das einfallende Sonnenlicht absorbieren und vielleicht aus Methan und anderen Gasen bestehen (Methan/Acetylen). Die Temperatur der Oberfläche beträgt 86 Grad Kelvin, der Methangehalt der Atmosphäre neunzig Prozent und der Oberflächendruck zwanzig Millibar. Die Aerosolteilchen streuen das Sonnenlicht und verbreitern die Absorptionsbanden, so daß sich trotz des geringen Druckes die Breite der Absorptionsbanden des Methan erklären läßt.

Ein ganz anderes Modell entwickelte Donald M. Hunten von der Universität von Arizona: Die Titanatmosphäre enthält Ammoniakmoleküle (NH_3), die vom Sonnenlicht aufgespalten werden. Dabei wird Stickstoff frei, der sich anreichert, während der freigesetzte Wasserstoff in den Weltraum entweicht. Obwohl sich Stickstoff von der Erde aus spektroskopisch nicht nachweisen läßt, weil er keinen meßbaren Einfluß auf die sichtbare und infrarote Strahlung ausübt, könnte er trotzdem Absorptionsbanden im Infrarotbereich hervorrufen, wenn nämlich die Titanatmosphäre so viel molekularen Stickstoff besitzt, daß sich der Gasdruck an der Mondoberfläche um 20 Bar erhöht. Dadurch ereignen sich häufige Zusammenstöße zwischen den Stickstoffmolekülen: Sie werden in Schwingungen versetzt und können durch den Prozeß der sogenannten stoßinduzierten Absorption infrarote Strahlung absorbieren. Auf diese Weise könnte sich nach diesem

Modell ein "Treibhauseffekt" einstellen, der zu einer Aufheizung der Oberfläche auf 200 Kelvin führt.

Auch in Huntens Modell existiert eine Aerosolschicht und somit eine Temperaturinversion, wie sie Danielson und Caldwell in der oberen Atmosphäre annehmen. Sonst aber gibt es zwischen beiden Modellen gravierende Unterschiede: Danielson und Caldwell nehmen eine Oberflächentemperatur von 86 Kelvin und einen Methangehalt von 90 Prozent an, Huntens eine Oberflächentemperatur von 200 Kelvin und eine Atmosphäre mit 90 Prozent Stickstoff. Am meisten klaffen aber die Werte für den Oberflächendruck auseinander: Huntens kommt auf zwanzig Bar, also tausendmal mehr als die zwanzig Millibar von Danielson und Caldwell. Um diesen großen Unterschied zwischen den beiden Modellen zu beseitigen, beschlossen Walter J. Jaffe, Tobias Owen und Caldwell, Titan durch genauere Helligkeitsmessungen im Radiobereich mit dem Very Large Array in Mexiko zu untersuchen. Bei einer Wellenlänge von 1,3 bzw. 2 und 6 cm ergab sich eine Oberflächentemperatur von 87 Kelvin - mit einer Genauigkeit von 9 Kelvin. Dieser Wert paßte sehr gut zu dem Modell von Danielson und Caldwell. Aber auch Huntens Modell war damit noch nicht aus dem Rennen. Es mußte nur so abgeändert werden, daß der Stickstoffanteil zum gesamten Oberflächendruck nicht 20 bar, sondern weniger als 2 bar beträgt. Die Diskrepanz zwischen beiden Modellen war auf diese Weise verringert worden.

4. Der Aufbau der Titanatmosphäre nach Voyager

Beim Vorbeiflug der Voyager-Sonde konnten in der Titanatmosphäre mehrere Dunstschichten identifiziert werden. In einer Höhe von ca. 400 km beginnt eine UV-absorbierende Schicht, während weitere Dunstschichten im optischen Bereich zwischen 200 und 300 km liegen. Die Grenze der optischen Durchlässigkeit liegt in einer Höhe von ca. 200 km. Besonders interessant ist das Temperaturprofil der Titanatmosphäre. In 70 km Höhe liegt die Temperatur bei 100 K, zwischen 30 und 50 km wird ein Minimum von 70 K erreicht; danach steigt die Temperatur wieder an, um in Bodennähe einen Durchschnittswert von 95 K zu erreichen. Die bodennahen Schichten zeichnen sich durch eine ungewöhnliche Temperaturkonstanz aus. Tag- und Nachtwechsel haben praktisch keinen Einfluß, die breitengradabhängige Variation liegt nur bei 3 K, und auch Modellrechnungen für jahreszeitenabhängige Änderungen zeigten Werte von nur etwa 1 K. Die Bodentemperatur von 95 K und der Druck von 1,6 bar reichen zur Kondensation des atmosphärischen Stickstoffs nicht aus, so daß Spekulationen über Ozeane aus Stickstoff hinfällig geworden sind.

5. Die Zusammensetzung der Titanatmosphäre

Die große Überraschung war, daß die Titanatmosphäre zu etwa 99 Prozent aus Stickstoff besteht. Den Rest teilen sich die Verbindungen Methan, Äthan, Propan, Acetylen, Äthylen, Methylacetylen, Diacetylen, Dicyan, Cyanwasserstoff und Cyanoacetylen. In welcher Form kommen nun diese Verbindungen in der Titanatmosphäre vor? Um eine Antwort zu erhalten, muß man die Dampfdruckwerte mit dem gemessenen Temperaturprofil vergleichen. Danach kondensiert Cyanwasserstoff beispielsweise entlang einer Grenze von 15 Millibar und Äthan bei etwa 60 Millibar. Mit Ausnahme von Propan, das in flüssigen Tröpfchen auskondensiert, liegen die anderen Kondensationsprodukte alle in fester Form vor. Stickstoff bleibt als permanentes Gas in der Atmosphäre. Da Methan der weitaus häufigste Kohlenwasserstoff in der Atmosphäre ist, vermutet man in einer Höhe von 30 bis 50 km, wo sich auch ein Temperaturminimum befindet, Wolken aus Methaneiskristallen. Man kann sie jedoch nicht direkt nachweisen, da sie sich unterhalb der optischen Sperrschicht befinden. Methan verfügt bei Normaldruck nur über

ein kleines flüssiges Intervall zwischen 91 und 112 K. Da die mittlere Oberflächen-temperatur von 95 K jedoch mit diesem Intervall zusammenfällt, gibt es möglicherweise flüssiges Methan auf der Titanoberfläche, was aber voraussetzt, daß der Methangehalt in den bodennahen Schichten wesentlich höher ist als in der Stratosphäre. Die Inversionsschicht innerhalb der Atmosphäre wirkt wie eine Kühlfalle für Methan. Wie groß der Methanvorrat ist, kann nicht abgeschätzt werden, aber vielleicht besitzt er die gleiche Bedeutung wie das Wasser für die Erde. Die orangerote Dunstschicht, die Titan umgibt, könnte durch polymeren Cyanwasserstoff (Blausäure) und die Kondensation des Acetylens zum Cupren hervorgerufen werden.

6. Die Titanoberfläche

Wie sieht nun die Oberfläche des Großmondes Titan aus? Tobias Owen schreibt dazu: "Methan könnte auf Titan ... die gleiche Rolle spielen wie Wasser auf der Erde; In flüssiger Form bedeckt es Teile der Mondoberfläche, während es als Gas in der unteren Atmosphäre zu finden ist. Vielleicht schweben hier auch Methanwolken, aus denen sich möglicherweise sogar ab und zu Methanregen ergießt... Zukünftige Astronauten werden es allerdings bedauern, daß auf diesem Mond so eisige Temperaturen herrschen.

Welcher Anblick würde sich wohl einem Besucher bieten, der in einem Boot über einen Methansee auf Titan führte? Zum Horizont hin hätte er eine gute Sicht, denn nach O.Brian Toon vom Ames Research Center fallen normalerweise nur ganz vereinzelt Aerosolteilchen aus der Atmosphäre herunter. Während eines Methanregens wäre die Sicht natürlich wesentlich schlechter. In jedem Fall aber würde er feststellen, daß es auf Titan ziemlich dunkel ist. Einmal deshalb, weil dieser Saturnmond ungefähr zehnmal weiter von der Sonne entfernt ist als die Erde und daher die Intensität der einfallenden Sonnenstrahlung hundertmal schwächer ist als auf der Erde, außerdem aber, weil ein Teil des Lichts in der Aerosolschicht verschluckt wird. Und wenn zufällig Methanwolken am Himmel vorüberziehen, wird es noch dunkler. Doch ist es schwer abzuschätzen, wie stark sich das Licht insgesamt abschwächt. Nach einigen Modellen von Toon ist die Sicht auf Titan selbst zur Mittagszeit nicht besser als bei einer mond hellen Nacht auf der Erde. Die Navigation des Bootes wäre also eine schwierige Angelegenheit ... In welcher Art von Boot könnte man nun eine Fahrt auf dem Methansee wagen? Ein Segelboot wäre wohl ungeeignet - denn auf Titan wehen wahrscheinlich nur sehr schwache Winde, weil in der Atmosphäre keine ausgeprägten Temperaturunterschiede auftreten, die Winde entfachen könnten. Würde man mit einem Außenbordmotor weiterkommen?

Die Antwort verdeutlicht den Unterschied zwischen Erde und Titan: Auf der Erde steht das für den Betrieb eines Verbrennungsmotors erforderliche Oxidationsmittel als Sauerstoff in der Atmosphäre zur Verfügung; allerdings müssen wir für den Treibstoff sorgen. Auf dem Titan wäre es umgekehrt: Das Boot würde auf einem See von Treibstoff schwimmen, aber diesmal wäre das Oxidationsmittel schwierig zu beschaffen. Hier müßte man also nicht nach Erdgas bohren, sondern versuchen, Wassereis aus dem Mondinnern zu fördern und daraus den Sauerstoff zu gewinnen. Möglicherweise gibt es aber auf Titan sogar ganze Kontinente aus Wassereis, die von Kohlenwasserstoffen und Stickstoffpolymeren aus der Aerosolschicht bedeckt sind."

7. Entstehung der Atmosphäre

Man muß sich natürlich nach alledem die Frage stellen, weshalb Titan beispielsweise keine kohlendioxidreiche Atmosphäre wie Mars und Venus besitzt oder im Gegensatz zu

Jupiter und Saturn hauptsächlich aus Stickstoff besteht. Der Grund ist darin zu suchen, daß sämtlicher Sauerstoff aus Titan im Mondinnern in Form von Wassereis gebunden ist und damit der Atmosphäre nicht mehr zur Verfügung steht. Außerdem treffen bei Titan Größe und Temperatur so einzigartig zusammen, daß seine Atmosphäre bis hinein in die Gegenwart reduziert blieb. Es wird heute allgemein angenommen, daß Titan im Protosaturn entstand, einem isolierten Teil der Gas- und Staubwolke, aus der sich das Sonnensystem entwickelte. Wahrscheinlich hat er sich vor 4,5 Mrd. Jahren zusammen mit den anderen Monden und den Ringen des Saturn gebildet. Später sind dann Wasserstoff und Helium aufgrund der geringen Gravitation rasch in den Weltraum diffundiert, und zurück blieb nur eine Uratmosphäre, die beträchtliche Mengen von Methan und Ammoniak enthielt. Aber auch diese Atmosphäre unterlag einer allmählichen Umwandlung. Es erfolgte zunächst eine sukzessive photochemische Zersetzung des Ammoniakmoleküls in Wasserstoff und Stickstoff. Während der Wasserstoff entwich, konnte sich der schwere Stickstoff in der Atmosphäre anreichern. Die gleichzeitige Zersetzung von Methan führte über die CH_3 -Radikale zu einer Reaktion mit dem noch vorhandenen Ammoniak zum Methylamin, das schließlich unter H_2 -Abspaltung zum HCN (Cyanwasserstoff) führte. In Modellversuchen konnte diese Synthese verifiziert werden.

8. Titans Nord-Süd-Asymmetrie

Bei erdgebundenen Messungen in den Jahren 1972 - 1976 der Gesamthelligkeit Titans tauchte der Verdacht einer Asymmetrie zwischen der Nord- und Südhemisphäre des Saturntrabanten auf, der durch die Voyager-Aufnahmen bestätigt wurde. Die südliche Halbkugel erschien bedeutend heller als die nördliche. Zur Erklärung dieses Phänomens werden zur Zeit zwei Hypothesen herangezogen. Die eine führt den Helligkeitsunterschied darauf zurück, daß die Rotationsachse des Titans um 26 Grad gegen die Ekliptik geneigt ist. Dadurch kommt es zu einer jahreszeitlichen Variation der Sonneneinstrahlung und der Aufheizung der Aerosolschicht. Sollte diese Vermutung richtig sein, dann dürfte die südliche Halbkugel nicht ewig die hellere Hälfte bleiben, sondern müßte periodisch ihre Rolle mit der nördlichen tauschen. Da Saturn rund dreißig Jahre benötigt, um die Sonne einmal zu umrunden, fände ein solcher Wechsel alle 15 Jahre statt.

Die zweite Hypothese erklärt die unterschiedliche Helligkeiten damit, daß beide Hemisphären den Sonnenwind unterschiedlich stark zu spüren bekommen. Mit anderen Worten: In der Atmosphäre über der Südhalbkugel fallen weniger energiereiche Teilchen ein wie auf der Nordhälfte, es entstehen auf diese Weise nicht gleich viele Aerosolteilchen. Sollte das tatsächlich der Grund für den Helligkeitsunterschied sein, müßten sich aber auch Schwankungen in der Stärke des Sonnenwindes in Helligkeitsschwankungen der Titanoberfläche niederschlagen, was man in den letzten acht Jahren nachzuprüfen versuchte. Tatsächlich stellte man fest, daß die Mondhelligkeit geringfügig variierte, während gleichzeitig die Zahl der Sonnenflecken - und damit auch die Stärke des Sonnenwindes - zunahm. Bislang läßt sich allerdings noch nicht sagen, welche der beiden Hypothesen richtig ist.

9. Ein riesiges, natürliches Labor

Titans Atmosphäre könnte uns auch einiges über die Verhältnisse auf der jungen Erde verraten. Man muß zwar wohl die Vorstellung aufgeben, daß die Uratmosphäre stark reduzierend war und überwiegend aus Methan, Ammoniak und Wasserstoff sowie Wasserdampf bestand, aber trotzdem findet man noch viele Parallelen. So geht man neuerdings immer häufiger von einer nur mäßig reduzierenden Uratmosphäre aus Kohlenmonoxid,

molekularem Stickstoff und Kohlendioxid mit einem Wasserstoffgehalt von weniger als 10 Prozent aus. Entscheidend ist jedoch, daß in jedem Fall kein freier Sauerstoff vorhanden war, da in einer oxidierenden Atmosphäre organische Moleküle sicherlich hätten entstehen können, weil der Kohlenstoff dort schnell in einfachen Molekülen wie Kohlendioxid gebunden worden wäre. Die Wissenschaftler versuchen schon seit längerer Zeit, die chemischen Reaktionen auf der Urerde in ihren Labors nachzuahmen. Das Problem liegt nach Andrew Marvell aber darin, nicht "genug Masse und Zeit" zur Verfügung zu haben. Die Versuchsgefäße sind einfach zu klein und Jahre ein zu kurzer Zeitraum, um ein sich selbst reproduzierendes Molekül entstehen zu lassen. Titan bietet hier neue, bisher ungeahnte Möglichkeiten.

Tobias Owen in seinem Aufsatz:

"Ist er doch ein gigantisches, natürliches Labor, das nicht vom Experiment selbst beeinflußt wird. Hier können die chemischen Reaktionen ungestört ablaufen - gibt es keine Einflüsse durch die Wände des Reaktionsgefäßes oder das Schmiermittel an den Absperrhähnen des Vakuumsystems. Und die Reaktionsprodukte haben sich in diesem natürlichen Labor seit der Entstehung des Sonnensystems auf der Mondoberfläche angesammelt, wo wir sie vielleicht eines Tages in aller Ruhe untersuchen können - ein faszinierender Gedanke."

Dann setzt Herr M a c k o w i a k sein Referat über die Körper des Sonnensystems fort - s. folgende Seiten 10 - 20

Zum Schluß weist Herr V o i g t darauf hin, daß er die RIAS-Schulfunksendung über die Wilhelm-Foerster-Sternwarte von Herrn Mackowiak qualitativ gut mitgeschnitten hat und bereit ist, auf Wunsch, auf angelieferten Kassetten den Text zu überspielen.

Die Sitzung endet um 21.50

Die nächste Sitzung der GRUPPE BERLINER MONDBEOBACHTER (die letzte vor den Sommerferien) findet am :

M o n t a g , d. 14. Juni 1982, 20 Uhr

im Zeiss-Planetarium (am Fuße des Insulaners) statt.

gez. Freydank , Liebold , Mackowiak , Ina Tieten-
berg und Kunert

IV. Planetengeologie: Die Monde des Saturnsystems

1. Saturn und seine Monde vor den Voyager-Flügen

Jahrhundertlang galt Saturn als letzter Planet unseres Sonnensystems, der als einziger die Besonderheit eines freischwebenden Ringes aufwies. Seine Erforschung geschah bis in die jüngste Gegenwart ausschließlich durch auf der Erde stationierte astronomische Fernrohre. Die Meilensteine irdischer Saturnforschung sind in der nachfolgenden Tabelle kurz zusammengefaßt, die aus der Zeitschrift "Der Elektriker" (9-1981, S.24) übernommen wurde:

Datum	Ereignis
<hr/>	
1610	Erste Teleskopbeobachtungen durch Galileo zeigen, daß der Saturn eine völlig ungewohnte Form aufweist.
25.3.1655	Die Entdeckung des größten Saturnmondes Titan durch Huygens ermöglicht die Bestimmung der Masse und Dichte des Saturns
1656 - 1659	Huygens erkennt die wahre Gestalt des Saturns und stellt durch jahrelange Beobachtungen fest, daß der Saturn von einem freischwebenden Ring umgeben ist.
25.10.1671	Cassini entdeckt den zweiten Mond Japetus.
23.12.1672	Entdeckung des Saturnmondes Rhea durch Cassini
21. 3.1684	Cassini erhöht mit der Entdeckung von Dione und Tethys die Zahl der bekannten Saturnmonde auf fünf
13. 3.1781	Nach der Entdeckung von Uranus durch Herschel muß Saturn seinen bis dahin gehaltenen äußersten Platz im Sonnensystem aufgeben.
18. 7.1789	Herschel entdeckt den Saturnmond Mimas
29. 8.1789	Entdeckung von Enceladus durch Herschel
1838	Galle entdeckt den bis 1969 als innersten geltenden C-Ring
16. 9.1848	Dond erhöht mit der Entdeckung von Hyperion die Anzahl der Saturnmonde auf acht.
16. 8.1898	W.H. Pickering entdeckt dank der neuen fotografischen Aufnahmetechnik den bis heute äußersten Saturnmond Phoebe
1944	Kuiper gelingt der spektrometrische Nachweis, daß in der Atmosphäre von Titan auch Methan enthalten ist.
Dez. 1966	Dollfuß entdeckt den innersten Saturnmond Janus.
1969	Der vierte, innerste Ring (D-Ring) von Saturn wird entdeckt.

Alle auf der Erde angefertigten Fotos des Ringplaneten besaßen wegen der störenden Atmosphäre nur eine geringe Auflösung, und so blieb das Bild dieses Planeten, seiner Ringe und Monde bis Anfang der achtziger Jahre recht konstant. Man hatte trotz der Raumsondenflüge auch über die anderen Planeten des Sonnensystems sowie ihrer Monde nur wenige Kenntnisse en detail, um zum Beispiel Rückschlüsse auf ihre Entwicklungsgeschichte wagen zu können. Neben Erde und Mond waren es Merkur sowie Mars mit seinen

Monden Phobos und Deimos. All diese Himmelskörper bestanden im wesentlichen aus Gesteinsmaterial, und es schien so, als würde dieser Aufbau eine geologische Entwicklung widerspiegeln. Die Saturnmonde, die durch die Raumsonden Voyager 1 und 2 zum ersten Mal richtig untersucht wurden, zeigten, daß das nicht stimmte, da sie sich nicht nach den theoretischen Erwartungen richteten. Nachdem die beiden Raumsonden bereits den Jupiter passiert hatten, konnte man in der Liste der genau beobachteten Himmelskörper bereits doppelt so viele Namen verzeichnen - unter denen sich auch erstmals planetengroße "Eismonde" befanden. Und diese Anzahl verdoppelte sich nochmals, nachdem beide Voyager-Sonden am Saturn vorbeigeflogen waren. In nur wenigen Monaten hatte sich den Wissenschaftlern der Blick auf 17 neue Welten geöffnet, mußte ein weiteres, neues Kapitel der Planetengeologie geschrieben werden.

2. Allgemeine Eigenschaften der Saturnmonde

Betrachtet man die Saturnmonde allgemein, so fällt auf, daß nur Titan über eine deutlich erkennbare Atmosphäre verfügt. Da die Oberfläche dieses Mondes darunter verborgen ist, gibt es nur wenige direkte Hinweise auf seine geologische Entwicklung. Ferner zeigten die Voyageraufnahmen, daß die meisten Saturnmonde synchron zum "Mutterplaneten" rotieren, was aufgrund theoretischer Rechnungen auch zu erwarten war. Die erwartete Ausnahme von dieser Regel macht ganz sicher der äußerste Saturnmond Phoebe, da er zu klein und zu weit vom Planeten entfernt ist, um durch Gezeitenkräfte den Eigendrehimpuls zu verlieren. Seine Rotation beträgt 9 Stunden, sein Umlauf 1,5 Jahre. Wahrscheinlich ist auch die Rotation bei Hyperion nicht synchron, was sich aber noch nicht mit Sicherheit entscheiden läßt, da er nur innerhalb eines kleinen Ausschnitts seiner Umlaufbahn beobachtet und fotografiert werden konnte.

Die Umlaufbahnen fast aller Monde des Ringplaneten sind nahezu kreisförmig und liegen in der Äquatorebene. Ausnahmen bilden Japetus, der zweite Mond von außen und Phoebe, wobei Phoebe noch eine Sonderstellung dadurch hat, daß er Saturn in umgekehrtem Sinn wie alle anderen Monde umkreist. Bei zwei weiteren Planeten des Sonnensystems laufen die Monde nahezu auf Kreisbahnen: Jupiter und Uranus. Es ist vermutlich auch kein Zufall, daß diese Planeten genauso wie Saturn Ringe aufweisen, und vielleicht sind Ringe und exakt kreisende Monde natürliche Nebenprodukte ein- und desselben Akkretionsprozesses. Die Monde müssen in jedem Fall aus den Eis- und Staubmassen hervorgegangen sein, die jeden Riesenplaneten im Anfang seiner Entwicklung umgaben. Bei ihrer Entstehung haben sich wohl ähnliche Vorgänge abgespielt wie bei der Geburt der Planeten in der Umgebung der jungen Sonne.

Schon vor den Voyager-Sonden wußte man durch Beobachtungen mit Teleskopen von der Erde aus, daß Titan als einziger Mond Dimensionen aufweist wie die vier galileischen Jupitermonde (ihr Radius beträgt im Durchschnitt 2000 km). Alle anderen Saturnmonde sind kleiner als der Erdtrabant (Äquatorradius 1738 km). Die kleinsten Saturnmonde weisen sogar Größenordnungen wie die Asteroiden auf. Ein schwieriges Unterfangen ist es auch - selbst nach den Voyager-Missionen - die Massen der verschiedenen Monde zu bestimmen. Nach bisherigen Messungen weist vieles darauf hin, daß sämtliche Saturnmonde eine Dichte von weniger als 2g/cm^3 haben, einige sogar weniger als 1,5 Gramm. Diese Werte lassen die Vermutung zu, daß die Monde zum größten Teil aus Eis bestehen, die deshalb auch "Eismonde" genannt werden. Eine Ausnahme bildet Titan, der sich in einer 50:50 Mischung aus Eis und Gestein zusammensetzt.

Interessant ist, daß die Dichten der Saturnmonde sich anders verhalten, wie wir es bei den Planeten des Sonnensystems gewohnt sind. Während sie dort mit wachsendem Abstand von der Sonne abnehmen und auch bei den Monden des Jupiter zunehmen, je näher sie am Planeten liegen, läßt sich bei den Saturnmonden mit wachsenden Bahnradien keine Dichteabnahme oder Eiszunahme erkennen. Verglichen mit den Jupitermonden haben die Saturntrabanten allgemein eine geringere Dichte, was auf einen

höheren Eisanteil hinweist. James B. Pollack und seine Mitarbeiter vom Ames Research Center der NASA haben ein Modell ausgearbeitet, das den verhältnismäßig geringen Gehalt an Gesteinsmaterial erklären soll. Nach ihren Vorstellungen wurde das Gesteinsmaterial in der Umgebung des gerade entstehenden Saturn in den kontrahierenden Planeten gefegt, bevor sich vor etwa 4,5 Mrd. Jahren seine Monde bildeten. Jedenfalls zeigen die Beobachtungen der Saturnmonde, daß es auf ihnen Eis gibt. So enthalten ihre Spektren im Infrarotbereich Absorptionslinien, die in der Nähe der für Wassereis charakteristischen Wellenlängen liegen. Auch die sehr hohe Albedo, welche für Eis charakteristisch ist, konnte bei den Monden nachgewiesen werden; bei den meisten beträgt das Reflexionsvermögen zwischen sechzig und neunzig Prozent, und bei Enceladus sogar nahezu hundert Prozent, womit er der am stärksten reflektierende Körper des Sonnensystems ist.

Wie kommt es zu dem hohen Anteil an Eismonden in diesen Regionen des Sonnensystems? Daß Eis hier überall gegenwärtig ist, stellte kein großes Novum dar, denn dafür spricht zuerst einmal die Tatsache, daß Wassereis um so schneller verdampft, je höher seine Umgebungstemperatur ist. So würde ein ungeschützter Eiskörper, der auf einer Bahn in der Nähe der Sonne läuft, in relativ kurzer Zeit verdunsten - ein Eiskörper dagegen in größerer Entfernung für Milliarden von Jahren erhalten bleiben. Außerdem sprachen die meisten Modelle der Planetenentstehung für reichhaltige Eisvorkommen im äußeren Sonnensystem. Nach diesen Modellen muß nämlich Wasser ein Hauptbestandteil von Himmelskörpern sein, die sich durch Zusammenballung (Akkretion) von Materie bei niedrigen Temperaturen bilden. Kühlt sich nämlich ein Gas, das eine ähnliche Zusammensetzung aufweist wie die Sonne, unter ähnlichen Druck- und Temperaturbedingungen ab, wie sie vermutlich im jungen Sonnensystem anzutreffen waren, kommt es zunächst zu einer Verbindung eines Teils des Sauerstoffs in der Gaswolke mit Silicium zu Silikatgestein. Da dieser Vorgang bei sehr hohen Temperaturen abläuft, erschöpfen sich schließlich die Siliciumvorräte, und übrig bleibt eine beträchtliche Menge an ungebundenem Sauerstoff, der sich bei weiter sinkender Temperatur mit Wasserstoff - dem häufigsten Element in der solaren Gaswolke - zu Wasser verbindet. Wenn man solche Entwicklungsmodelle durchrechnet, dann zeigt sich, daß bei niedrigen Temperaturen Monde entstehen, deren Gehalt an Gesteinsmaterial und Eis ein ganz ähnliches Verhältnis aufweist, wie man es bei den Jupiter- und Saturnmonden aufgrund von Messungen vermutet.

3. Die neuentdeckten Saturnmonde

Das gesamte Saturnsystem reicht vom Planetenmittelpunkt aus gerechnet, bis nahezu 13 Mio. km in den Raum hinaus, was etwa dem 43fachen Abstand Erde - Mond entspricht. Die Beilage 1 gibt den augenblicklichen Stand (1982/3) wieder, wonach 17 Monde bis heute bekannt sind, die im folgenden von innen nach außen besprochen werden sollen. Man kann sie in die großen und kleinen Monde des Saturn einteilen, deren Daten die beiden Tabellen aus "Science" vom 10. April 1981, S. 170 zeigen:

Die großen Monde des Saturn

Mond	Bahnradius (R_S)	Radius (km)	Dichte (gcm^{-3})	Albedo
Mimas	3,08	195 \pm 5	1,2 \pm 0,1	0,6 \pm 0,1
Enceladus	3,97	250 \pm 10	1,1 \pm 0,6	1,0 \pm 0,1
Thetys	4,91	525 \pm 10	1,0 \pm 0,1	0,8 \pm 0,1
Dione	6,29	560 \pm 10	1,4 \pm 0,1	0,6 \pm 0,1
Rhea	20,4	765 \pm 10	1,3 \pm 0,1	ebenso
Titan	24,7	2560 \pm 26	1,9 \pm 0,06	
Hyperion	59,3	145 \pm 20		0,3 \pm 0,1
Japetus		720 \pm 20	1,2 \pm 0,5	0,5 \pm 0,3

Die kleinen Monde des Saturn

Mond	Bahnradius	Bahnperiode	Radius (km)
1980S1	$1,51 \times 10^5$	16 h 40,3 min	
1980S3	$1,51 \times 10^5$	16 h 39,8 min	
1980S6	$3,78 \times 10^5$	65 h 44,2 min	
1980S26	$1,41 \times 10^5$	15 h 05 min	100
1980S27	$1,39 \times 10^5$	14 h 42,7 min	110
1980S28	$1,37 \times 10^5$	14 h 25,7 min	15

Alle Saturnmonde, die man in den vergangenen zehn Jahren entdeckt hat, zeichnen sich durch irgendeine Besonderheit in ihrer Dynamik aus. Den Zentralkörper am nächsten umläuft - soweit man bisher sagen kann - der erst von Voyager 1 entdeckte Minimon 1980S28 mit einem Durchmesser von nur 30 km. Seine Bahn ist mit der Außengrenze des A-Ringes identisch. 1980S28 besitzt eine längliche Form mit einem Durchmesser von rund vierzig Kilometer. Sein Gravitationsfeld ist möglicherweise die Ursache für die scharfe Außenkante des A-Ringes. Etwas weiter außen liegen die Trabanten 1980S27 und 1980S26, die ebenfalls von Voyager 1 entdeckt wurden, die den Saturn auf beinahe identischen Bahnen in rund 150.000 km Abstand vom Planetenmittelpunkt umkreisen und fast gleich groß (200 und 220 km Durchmesser) sind. Sie benötigen für einen Umlauf um den Planeten rund 15 Stunden. Zwischen den Umlaufbahnen der beiden Trabanten befindet sich der aus vielen schmalen Einzelringen bestehende F-Ring, und es ist gut möglich, daß die Gravitationsfelder dieser beiden Monde den Ring zusammenhalten, weshalb man sie auch als "Schafhirtenmonde" bezeichnet. In etwa zehntausend Kilometer Entfernung jenseits des F-Ringes - etwa auf halbem Weg zwischen F- und G-Ring - wandern die Satelliten 1980S1 und 1980S3 auf einer gemeinsamen Bahn. Einer von ihnen wurde bereits 1966 von Dollfuß fotografiert - allerdings welcher, ist heute schwer zu sagen. Erst 1968 stellte man fest, daß es sich in Wirklichkeit um zwei Monde handelt. Die mittleren Bahnradien der beiden Monde unterscheiden sich nur wenig, und deshalb bewegen sich die beiden mit fast der gleichen Bahngeschwindigkeit: Der innere, schnellere Mond kann den äußeren langsam überholen. Dabei vertauschen die beiden Trabanten ihre Position, worauf dann er innere Mond zum äußeren wird und hinter seinem Gefährten zurückbleibt. Ursache hierfür ist die Veränderung des Bahndrehimpulses durch die wechselseitige Massenanziehung: Der innere Mond gewinnt Impuls und wird aus diesem Grund in eine höhere Umlaufbahn getragen, wo er etwas langsamer kreist als zuvor, während der äußere Mond Impuls verliert und aus diesem Grund in eine niedrigere Umlaufbahn absinkt, wo er entsprechend schneller wird. Rund alle vier Jahre wiederholt sich dieses kosmische Ballett.

In den Jahren 1979/80 wurde durch die Kantenstellung der Ringe die Entdeckung von drei weiteren Monden möglich. Zwei von ihnen - 1980S13 und 1980S25 - haben die gleiche Umlaufbahn wie Tethys und halten einen konstanten Abstand zu diesem Trabanten. Der eine läuft Tethys immer um einen Winkel von 60 Grad voraus, der andere Mond bleibt ständig um sechzig Grad hinter Tethys zurück. Der dritte Mond läuft dem Saturnmond Dione immer um sechzig Grad voraus (1980S6). Die Positionen, wo sich die Monde befinden, sind Punkte dynamischer Stabilität, die sogenannten "Lagrangepunkte".

Wenn auch die kleinen Saturnmonde von ihrer Dynamik her einige Besonderheiten aufweisen, so sehen sie doch allesamt sehr ähnlich aus. Es sind ziemlich kleine

Körper, und die meisten von ihnen haben eine unregelmäßige Form. Jeder dieser Monde muß bei der Zertrümmerung eines größeren Körpers entstanden sein. Ferner ist ihre unregelmäßige Oberflächengestalt ein deutliches Zeichen dafür, daß sie seit der Zeit, als sich ihre Gesichter prägten, nicht mehr beträchtlich erwärmt wurden.

4. Mimas

Der erste große Saturnmond, der auf die Gruppe der kleinen 1980S-Monde folgt, ist Mimas. Seine Oberfläche besitzt eine gleichmäßige Albedo und ist dicht von Einschlagkrater übersät. Die auffälligste Erscheinung ist ein riesiger Krater mit einem Durchmesser von etwa 130 km, was rund einem Drittel des Gesamtdurchmessers von Mimas ausmacht. Für die Planetengeologen ist es ein Rätsel, weshalb nicht noch mehr solcher Krater und größere entstanden sind. Die Vermutung liegt nahe, daß einst ein großes Geschloß den möglicherweise kalten und spröden Mond in Stücke geschlagen hat, worauf dann die Trümmer so schnell davongeflogen sind, daß sie den Mond gerade verlassen konnten. Daraufhin konzentrierten sich die Überreste zunächst auf ein schmales Band um die ursprüngliche Umlaufbahn des unversehrten Mondes und vereinigten sich danach wieder zu einem einzigen Körper. Das Ergebnis wäre eine kalte Masse aus Schutt - überwiegend Eis mit einige Prozent Gesteinsmaterial. Daß sich etwas Derartiges auf Mimas abgespielt hat, darauf deutet die statistische Größenverteilung der Krater hin. Der größte Krater mißt heute 130 km; dann tut sich eine große Lücke bis zu den nächstkleineren Kratern auf, deren Durchmesser nur einige Dutzend Kilometer betragen. Ansonsten steigt die relative Häufigkeit der Krater mit abnehmenden Durchmesser exponentiell an. Es sieht also tatsächlich so aus, als ob ein heftiger Einschlag den ursprünglichen Mondkörper zertrümmert hat und sich die Überbleibsel danach wieder zu einem neuen Körper vereinigten. Die Einschläge dieser Bruchstücke waren dann der Grund für die gegenwärtige Verteilung der Krater. Der 130 km-Krater könnte seine Entstehung einer Kollision verdanken, die nicht heftig genug war, um den Mond erneut auseinanderbersten zu lassen; die Dimensionen des Kraters reichen an das Maximum dessen heran, das ohne ein Auseinanderbrechen des gesamten Körpers verursacht werden kann. Neben diesem Krater zeigt die Oberfläche des Trabanten bis zu 90 km lange Rinnen und Furchen, die 10 km breit und bis zu 2 km tief sind. Ihre Entstehung könnte mit der des großen Kraters zusammenhängen, sie könnten sich aber auch bei Abkühlung des Mondes durch Gezeitenwirkung gebildet haben.

5. Enceladus

Im Gegensatz zu Mimas' umgepflügter und von Kratern zernarbter Oberfläche zeigt sich die des Enceladus viel glatter. Er weist, wie schon erwähnt, die höchste Albedo auf und umläuft den Saturn auf einer exentrischen Bahn, die durch den Mond Dione verursacht wird. Das könnte zu einer Erhitzung durch Gezeitenkräfte führen, die wiederum die Oberflächenstruktur laufend verändert. Wahrscheinlich nimmt auch Saturn selbst mit seinem Ring Einfluß auf diesen Mond. So könnten die Gezeitenkräfte des Saturn den Mondkörper unter einer dünnen Eisschicht flüssig halten. Diese These wird auch durch die Erkenntnis untermauert, daß der E-Ring in der Nähe der Enceladus-Bahn ein deutliches Ansteigen seiner Helligkeit zeigt. Der Ring könnte in diesem Bereich vor allem aus Teilchen zusammengesetzt sein, deren Herkunfts-ort der Mond Enceladus ist. So schlägt dieses Modell vor, daß Meteoriteneinschläge zum Entweichen von Wasser führen, das sich beim Austreten sofort in Eiskristalle umwandelt, die dann teilweise in den E-Ring wandern - verursacht durch das Wechselspiel mit der Magnetosphäre des Saturn und seinem Plasma. Auf der Oberfläche des Mondes gibt es mindestens sechs verschiedene Arten von Terrains. Die beiden ältesten sind von Kratern mit Durchmessern zwischen zehn und dreißig Kilometern zerfurcht. Drei andere Regionen sind jüngerem Datums und zeichnen

sich durch "Korridore" aus, die die älteren Gebiete durchschneiden und die Krater gleichsam ausradieren. Schließlich gibt es noch Ebenen, auf denen man keine Krater findet, deren Gebietsrand verzweigte Gebirgsrücken markieren, für deren Entstehung 2 verschiedene Erklärungsversuche existieren: entweder drang Wasser in ein System von Verwerfungen ein, fror, das Eis dehnte sich aus und hob dabei die Topographie an, oder die Ebenen sind eine Folge von Konvektionsprozessen, in deren Verlauf im Zentrum der Ebene langsam festes Material nach oben steigt, anderenorts wieder absinkt und dabei ein Muster konzentrischer Falten erzeugt.

6. Tethys

Tethys umkreist den Saturn im Abstand von fünf Planetenradien und hat mit nur $1,0 \text{ gcm}^{-3}$ die bisher niedrigste Dichte aller untersuchten Trabanten, was zu der Vermutung Anlaß gibt, daß er nur aus gefrorenem Wasser besteht. Das würde aber bedeuten, daß er beim Frieren der größten Expansion unterworfen war. Vielleicht liegt hierin auch die Erklärung für den etwa 100 km breiten und mehrere hundert Kilometer langen Graben, der sich quer über die Oberfläche des Mondes zieht und im Durchschnitt 3 km tief ist. Er zieht sich zwischen der Nord- und Südpolarregion über die dem Saturn zugewandte Seite des Mondes hin und reicht über den Nordpol hinweg bis hinunter zum Äquator der dem Saturn abgewandten Hemisphäre, was von der Länge her drei Vierteln eines Großkreises auf der Mondkugel entspricht! Die Begrenzung dieser Furche wird zu beiden Seiten durch einen 0,5 km hohen Wall gebildet; und entlang dieses Canons erkennt man eine deutliche Schichtbildung wie von übereinanderliegenden Eisplatten. Wahrscheinlich ist die Entstehungsursache des Trabanten in internen Veränderungen zu suchen. Darüber hinaus finden sich auf Tethys auch Spuren vieler Kratereinschläge. Der größte Krater ist ein Ringgebirge von 400 km Durchmesser.

7. Dione

Dieser Mond ist nur unwesentlich größer als Tethys, zeigt jedoch eine weit höhere Dichte und auffällige Schwankungen in der globalen Albedo. Wie auf Mimas sind auch auf Dione nur wenige Krater mit einem größeren Durchmesser als 30 km anzutreffen, aber die Kraterdichte ist auf Dione sehr gering. Die eine Hemisphäre setzt sich aus mindestens 2 topographische voneinander abweichenden Gebieten zusammen. Die eine Region ist offenbar älter und stark gekratert, die andere zeigt sich als gering gekraterte Ebene. Ohne Zweifel wurde das jüngere Terrain mit Material eingeebnet, welches dick genug war, um frühere Kratergebiete zu überdecken. Man vermutet, daß interne Hitzeentwicklung Dione aktiv gehalten hat. So könnten flüssige Massen aus dem Innern an die Oberfläche gequollen und dort erstarrt sein. Ursache hierfür könnte vielleicht eine relativ hohe Konzentration radioaktiver Isotope sein. In den Polgegenden dieses Mondes finden sich andere wichtige Oberflächenmerkmale: ein langes, ziemlich gerades Tal von über 500 km Länge am Südpol, ein komplexes System von zusammenhängenden Tälern in der nördlichen Hemisphäre, dessen Entstehung noch diskutiert wird.

8. Rhea

Es ist der Saturnmond, der aus der größten Nähe untersucht werden konnte. Er zeigt zwei ganz verschiedene Gesichter: eine leuchtende, ebenmäßige Bugseite mit einer einzigen auffallenden Struktur, die an einen großen, relativ jungen Einschlagkrater erinnert und eine dunkler aussehende Heckseite, deren Untergrund in einem

komplizierten Muster von hellen Schwaden durchzogen wird. Vermutlich kam dieses hellere Material aufgrund einer inneren Aktivität des Mondes an die Oberfläche - vielleicht trat es an Bruchlinien aus. Auf keinen Fall lassen sich die hellen Strukturen mit Kratern erklären, da in diesem Fall das Muster ganz anders aussehen müßte. Rheas Oberfläche ist ansonsten dicht mit Kratern übersät, ähnlich den Hochländern des Mondes und Merkur. Die großen Krater sind irregulär - oft polygonal -, was zu dem Schluß Anlaß gibt, daß die oberste Kruste des Mondes aus Gesteinsschutt besteht. Mindestens zwei unterschiedliche Familien von eingestürzten Körpern lassen sich auf diesem Mond feststellen, die zu verschiedenen Zeiten auf Rhea herniederprallten. In einigen Kratern sind merkwürdige helle Flecken auszumachen, die unter Umständen lokale Frostbestände sind oder - und das ist wahrscheinlicher - von ständig neu an die Oberfläche gebrachten Eisablagerungen herrühren.

9. Hyperion

Das Aussehen dieses Mondes erinnert an den Marsmond Phobos. Hyperion gleicht wie dieser einer unförmigen Kartoffel. Er mißt in seiner Länge etwa 400 km - bei einer Breite von 220 km. Wahrscheinlich war dieser Satellit einmal in eine kosmische Kollision verwickelt, bei der er seine Längsachsenorientierung verloren hat.

10. Japetus

Auffallend ist bei diesem Mond der starke Helligkeitsunterschied seiner zwei Halbkugeln. So weist die dem Saturn zugewandte Seite eine geometrische Albedo von 0,05 auf, während die dem Planeten abgewandte Seite nur 0,01 zeigt, sie erscheint rot, womit sie dem dunklen Material auf dem Jupitermond Callisto ähnelt. Nicht viele Substanzen weisen eine so niedrige Albedo auf - dazu gehören Ruß und auch das Material bestimmter einfacher Meteoriten, sogenannter kohligter Chondriten, in denen beträchtliche Mengen organischer Verbindungen enthalten sind. Mehrere Erklärungen kommen für diese Divergenzen infrage: die exogenen und endogenen Ursachen. Nimmt man exogene Prozesse an, so müßte man das Austreten von Eis in Betracht ziehen, das die dunklen Felsen freigelegt hat oder sich vorzugsweise auf einer Seite ablagerte. Als endogene Erklärung wäre ein Ausstoß innerer Materie anzunehmen.

Eine andere Erklärung für die dunklen Gebiete auf Japetus bot im Jahre 1974 Steven Soter von der Cornell Universität an. Er vermutet, daß der Saturnmond Phoebe die Quelle dieses dunklen Materials ist.

11. Phoebe

Bei diesem Mond hatte man schon seit langem eine sehr niedrige Albedo vermutet, und die Untersuchungen mit irdischen Teleskopen zeigten, daß dieser Mond eine ähnliche Farbe aufweist wie viele dunkle Asteroiden. Soter nimmt nun an, daß Mikrometeoriten aus Phoebe dunkles Material herausschlagen, die dann auf einer Spiralbahn langsam nach innen zum Saturn sinken und von Japetus aufgefangen werden. Auf den Aufnahmen von Voyager 2 lassen sich einige Details der Phoebe-Oberfläche erkennen. Der Mond hat eine nahezu kugelförmige Gestalt und eine Albedo von nur etwa fünf Prozent. Es ist nicht die einzige Besonderheit dieses Außenseiters unter den Saturntrabanten, der andersherum kreist als die meisten übrigen Satelliten und eine gegen die Äquatorebene geneigte Bahn durchläuft. Möglich ist, daß wir es bei diesem Mond mit einem eingefangenen dunklen Asteroiden zu tun haben, der sich seit seiner Entstehung in der Frühgeschichte des Sonnensystems nicht mehr verändert hat. Vielleicht ist er aber auch ein "Urkörper", der vom Gravitationsfeld des noch wachsenden Planeten Jupiter aus dem inneren Sonnensystem vertrieben wurde und schließlich in eine Bahn um den Saturn einschwenkte. Anhand der Voyagerbilder allein kann man nicht entscheiden, ob Phoebe tatsächlich die dunkle Bugseite von Japetus "eingestaubt" hat, und so steht diese Hypothese

immer noch in der Diskussion.

12. Kraterentstehung

Für die Kraterpopulationen der einzelnen Monde, die sowohl hinsichtlich ihrer Zahl variieren, als auch hinsichtlich ihrer Häufigkeit in Abhängigkeit von der Größe der Monde, sind folgende Möglichkeiten denkbar: 1. Einsturz von Trümmern, die bei der Entstehung des Ringsystems übriggeblieben sind; 2. Einsturz von Trümmern, die sich aufgrund mächtiger Kollisionen innerhalb des Systems gebildet haben; und 3. Einsturz von Trümmern, deren Ursprung außerhalb des Saturnsystems liegt, zum Beispiel in den Kometen und Planetoiden. Nach den bisherigen Auswertungen kann man folgendes Modell erstellen: Die Saturnmonde waren seit ihrer Bildung einem heftigen Bombardement von Objekten ausgesetzt, die eine Population I von Kratern mit einem Durchmesser von 20 bis 100 km auf den Oberflächen erzeugten und vor etwa 4 Mrd. Jahren entstanden. Auf den Monden Dione und Rhea sind diese Krater in der Folgezeit wieder eingeebnet worden. Später kam es dann zur erneuten Kollision der Monden mit Fragmenten, die innerhalb des Saturnsystems entstanden und die Population II schufen. Wenn der Ursprung dieser Trümmer außerhalb des Saturnsystems gelegen hätte, dann hätte man die Einschläge vor allem auf der dem Saturn abgewandten Seite feststellen müssen, was aber de facto nicht der Fall ist. In astronomisch jüngster Zeit kam es schließlich zu Einschlägen von Materie, die außerhalb des Sonnensystems entstand und zu weiteren Kratern auf der ungeschützten, vom Saturn abgewandten Seite der Monde führte.

13. Titan

Unter den Monden des Saturnsystems, unter den Trabanten der Planeten des Sonnensystems steht Titan aufgrund seiner Atmosphäre einzigartig da. Er ist der einzige uns bekannte Satellit, der über eine Lufthülle verfügt, die hauptsächlich aus Stickstoff besteht und als zweithäufigstes Element Methan besitzt. Über dieser dichten Atmosphäre liegen drei Dunstschleier. Der erste befindet sich 150 km über der Wolkengrenze, der zweite 300 km und der dritte 500 km darüber. Diese Schichten bestehen vor allem aus Polymeren und anderen kohlenwasserstoffhaltigen Verbindungen, die sich durch die chemische Umwandlung des Methans durch Sonnenlicht bilden. Nord- und Südhalbkugel dieses Mondes sind unterschiedlich gefärbt, was auf wechselnde Jahreszeiten schließen läßt. Außerdem setzt sich Titan in einer 50:50 Mischung aus Eis und Gestein zusammen. Seinen Rang als größter Mond des Sonnensystems mußte er aufgrund neuer Messungen an den Jupitermond Ganymed (5270 km Ø) abtreten. Der Durchmesser Titans wird jetzt auf kleiner als 5140 km geschätzt. Eine ausführliche Besprechung seiner Atmosphäre wird in einem gesonderten Referat in einer der nächsten Mondgruppen geschehen.

V. Planetengeologie: Der augenblickliche Stand

Wo steht die Planetengeologie nach den Flügen der Voyagersonden heute?

Die Raumsondenflüge allgemein haben zu einer neuen Betrachtungsweise unseres Sonnensystems geführt. Die Erde stellt keine Besonderheit mehr da, sie ist wie alle anderen Mitglieder ein Planet, der als solcher im Rahmen des Sonnensystems betrachtet werden muß. Umgekehrt kann man sagen, die anderen Planeten und Monde sind im wahrsten Sinne des Wortes Geschwister unseres Planeten und seines Trabanten. Alle Planeten und Monde des Sonnensystems weisen im Laufe ihrer Geschichte eine

Reihe von Katastrophen auf, so daß wir in der (Planeten-)Geologie von dem Konzept des Uniformitarianismus ("die Gegenwart ist der Schlüssel zur Vergangenheit") Abschied nehmen müssen. Die Körper des Sonnensystems - also auch unsere Erde - haben sich in einer Richtung fortentwickelt, und ihr Zustand in ihrer frühen Geschichte war von dem heutigen ganz verschieden. So haben wir also begonnen, die Erde als umfassendes geologisches System zu studieren und mit den anderen Planeten zu vergleichen.

Auf der anderen Seite muß man bei aller Gemeinsamkeit feststellen - und die Voyagerdaten zeigten es recht deutlich -, daß es doch unterschiedliche Entwicklungsgeschichten der Planeten und Monde des Sonnensystems gibt, wie man sie auf einer dreidimensionalen Karte, auf deren Achsen die Meßwerte von Größe, Zusammensetzung und thermischer Entwicklung eines Körpers aufgetragen sind, recht anschaulich darstellen kann. Vor den Voyagermissionen konnte man auf solch einer Karte (Beilage 2) nur die Planeten, Monde und Asteroiden des inneren Sonnensystems auftragen. Sie gehören der gleichen Klasse von Objekten an, die aus Gesteinsmaterial bestehen und deren Entwicklungszustand eng mit ihrer Größe verknüpft ist. Das läßt den Schluß zu, daß ihre thermische Entwicklung im wesentlichen durch radioaktive Zerfallsprozesse bestimmt ist, die eine Erwärmung als Konsequenz haben. Mit Hilfe der durch die Voyagerflüge gewonnenen Aufnahmen fanden in großen Teilen der Karte neue Objekte Eingang, die zeigten, daß es einige Körper im Sonnensystem gibt, die ihre Energie aus anderen Quellen erhalten und sich nicht nur durch Kernprozesse, sondern auch durch Gezeitenreibung aufheizen können und die die einfache Annahme zu Fall brachten, daß die Entwicklung eines Körpers nur von seiner Größe abhängt.

Bernhard Mackowiak

Verwendete und empfehlenswerte Literatur:

DER ELEKTRONIKER 9-1981, fachbeitrag: Voyager erforscht Saturn, S. 23-28

DER ELEKTRONIKER 11-1981, fachbeitrag: Wissenschaftliche Ergebnisse der Voyagermission, S. 61-64

Guest, John u.a.: Planetengeologie, Herder Freiburg 1981

Ingersoll, Andrew: Das "Wetter" auf Jupiter und Saturn; Spektrum der Wissenschaft Februar 1982, S. 100 - 112

Köhler, Horst W.: Voyager 1 an Saturn vorbei; Sterne und Weltraum 1981/2, S. 44-52

ders.: Voyager 2 an Saturn vorbei - ein Bildbericht; ebenda 1981/11, S. 402-404

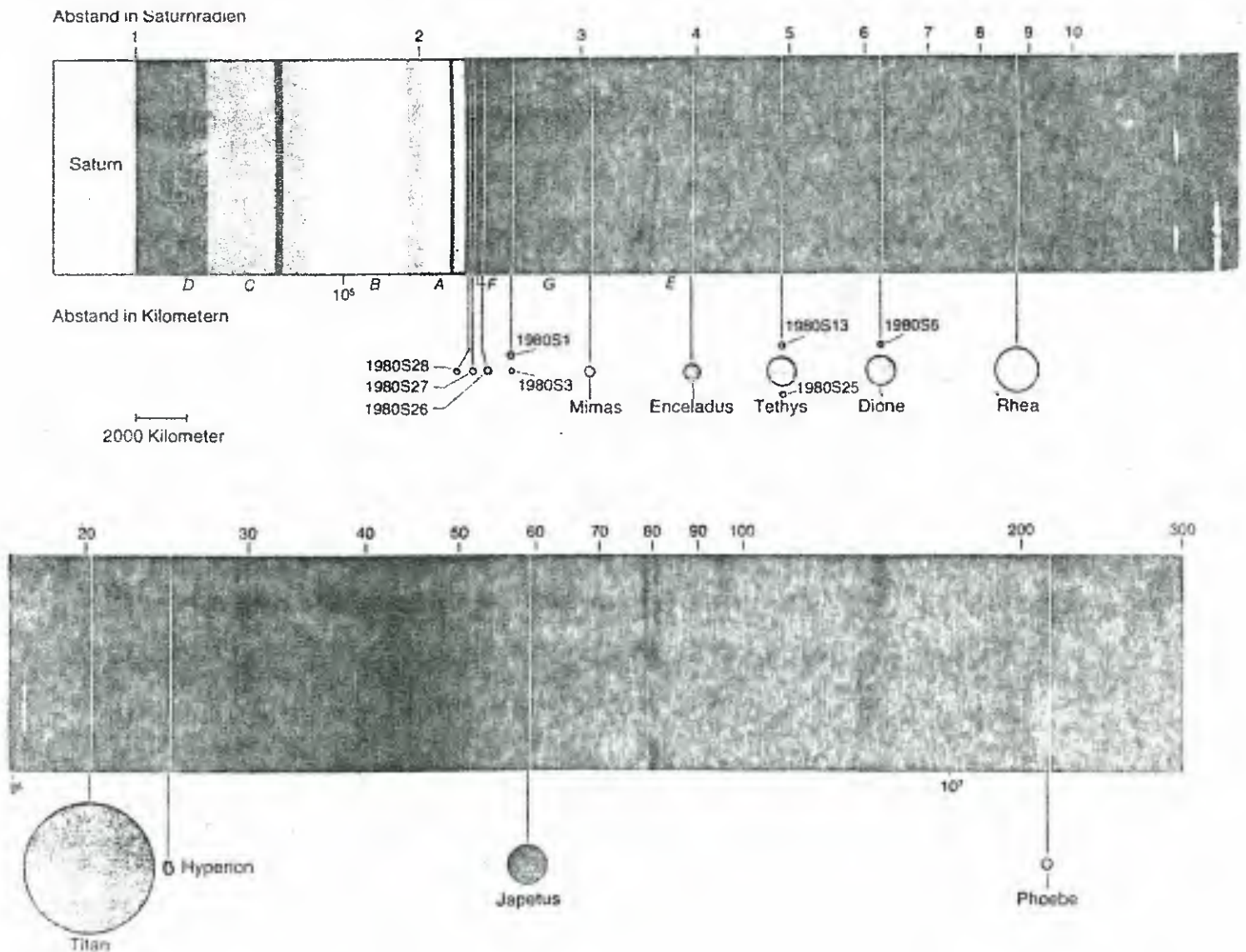
ders.: Ringplanet Saturn, Unser Kenntnisstand 1981, Teil 1; ebenda 1982/3, S. 110-14

ders.: Die Monde des Saturn - Der Großmond Titan - Zur Chemie der Titanatmosphäre; ebenda, 1982/4

Owen, Tobias: Titan - ein Mond mit Atmosphäre; Spektrum der Wiss., Apr. 82, S. 64-75

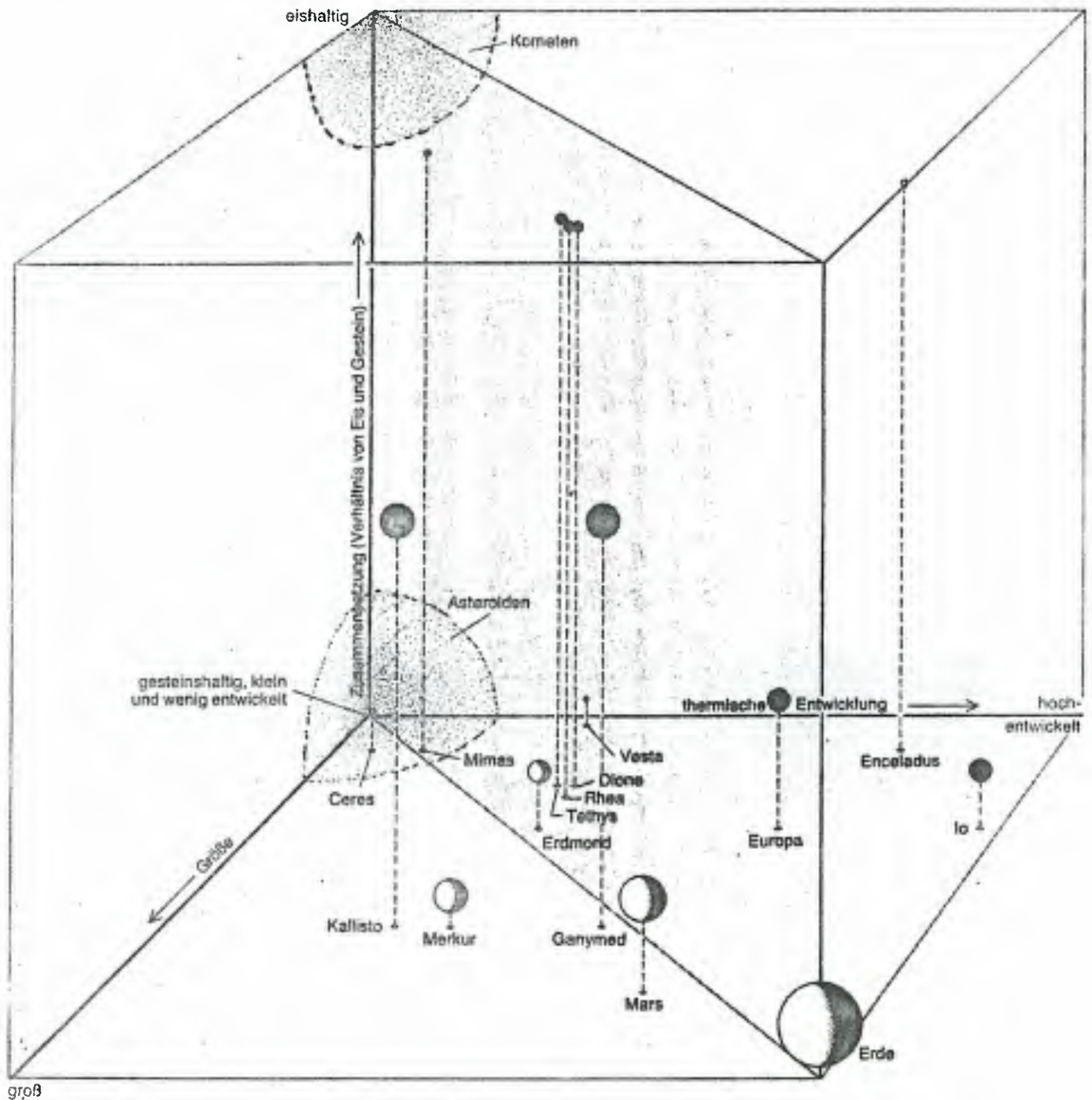
Päch, Susanne Dr.: Saturn nach Voyager; Luft und Raumfahrt 1/82, S. 15 - 23

Soderblom, Laurence A./Johnson, Torrence V.: Die Monde des Saturn; Spektrum der Wissenschaft, März 1982, S. 102 - 116



Beilage 1, entnommen aus "Spektrum der Wissenschaft", März 82, S. 104 -105

zeigt das Saturnsystem mit seinen Ringen und 17 Monden, wie es bis heute bekannt ist. Das gesamte Saturnsystem erstreckt sich vom Planetenmittelpunkt aus gerechnet, bis nahezu 13 Mio. km in den Raum hinaus, was etwa dem 43fachen Abstand Erde - Mond entspricht. Man unterscheidet bei den Monden zwischen den großen und kleinen, wobei diese die Neuentdeckungen sind, die durch Buchstaben und Ziffern gekennzeichnet werden. Nach neusten Meldungen (Spektrum 4/82) hat Voyager 2 im letzten August noch weitere Trabanten zwischen 10 und 20 km Durchmesser entdeckt, so daß vorläufig die Zahl der bekannten Monde des Ringplaneten bei über zwanzig liegt!



Beilage 2 aus derselben Zeitschrift, S. 115

zeigt die Planeten des Sonnensystems, die ganz verschiedene Entwicklungsgeschichten hinter sich haben, in eine Karte eingetragen. Man unterscheidet je nach thermischer Entwicklung (waagerechte Achse) kalte, unentwickelte (links) von den vulkanischen, hochentwickelten Körpern (rechts). Die schwarz-weißen Kugeln stellen die Planeten dar, deren Stellung man schon vor den Voyagermissionen kannte und fast ausschließlich aus Gesteinen bestehen. Bei ihnen hängen Größe (linke Achse) und thermischer Entwicklungsgrad annähernd linear zusammen. Die schwarzen Kugeln zeigen die Objekte, die sich nicht an das alte Schema halten. Sie verteilen sich fast über das ganze Würfelvolumen.