

Zeitschrift: Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft
Band: 91 (2008)

Artikel: Geheimnisvoller Saturnmond Titan : erfolgreiche Saturnmission Cassini/Huygens
Autor: Schmidt, Men J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-832618>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.11.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Geheimnisvoller Saturnmond Titan Erfolgreiche Saturnmission Cassini/Huygens

Men J. Schmidt

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	355
1. Einleitung	356
2. Titan, Mond mit Atmosphäre	357
3. Erster Blick auf eine rätselhafte Welt	358
4. Rollentausch: Methan statt Wasser ...	360
5. Irdisches Aussehen und doch völlig anders	362
6. Berge und Ozeane	365
7. Schweizer Hightech für Huygens	367
8. Schlussbemerkungen	368
Literaturverzeichnis	368

Zusammenfassung

Seit Oktober 2004 ist die amerikanisch-europäische Raumsonde Cassini über 30 mal sehr nahe am Saturnmond Titan vorbei geflogen und hat diese bis dahin unbekannte Welt mit verschiedenen Instrumenten im sichtbaren-, ultravioletten-, infraroten- und Radarbereich untersucht und viele Geheimnisse des Titans entschlüsselt. Bereits vor dem Start der Cassini-Huygens Mission hatte man die Existenz von Seen auf Titan erwartet. Bei den ersten nahen Vorbeiflügen am Titan, erlebten die Astronomen allerdings eine handfeste Überraschung. Von stehenden Gewässern war nichts zu sehen. Erst spätere Vorbeiflüge zeigten dann doch die so lange erwarteten Seen. Bei diesen Manövern nähert sich Cassini bis zu 950 Kilometer der Titan-Oberfläche, so dass das Cassini Radar (RADAR), das die Atmosphäre des Mondes durchdringen kann, eine hochauflösende Kartierung der Oberfläche ermöglicht. Jetzt, vier Jahre später, hat sich das Bild vom grössten Saturnmond völlig gewandelt. Mit der Ankunft am Saturn am 1. Juli 2004 hat die lange Reise des Cassini-Raumschiffs durch das Saturn-System begonnen. 20 Tage nach ihrer Abtrennung von der Muttersonde Cassini am 25. Dezember 2004 hat Huygens nach einem Alleinflug über 4 Millionen km die

äussere Atmosphäre des Titans erreicht (Abbildung 1). Am 14. Januar 2005 um 13.34 Uhr landete die Kapsel erfolgreich auf Titans Oberfläche. Huygens ist der erste erfolgreiche Versuch der Menschheit, eine Sonde in einer anderen Welt im fernen Sonnensystem zu landen. Mit Huygens wurde erstmals vor Ort eine gründliche Analyse der Chemie der Titanatmosphäre vorgenommen, auch hat die Sonde die ersten Photos von der verborgenen Oberfläche des Titan aufgenommen und einen detaillierten «Wetterbericht» erstellt.

1. Einleitung

Die Cassini-Huygens-Mission ist eines der ehrgeizigsten Projekte, die jemals im Rahmen der Planetenerforschung unternommen wurden. Gestartet am 15. Oktober 1997, war die amerikanisch-europäische Planetensonde Cassini-Huygens fast sieben Jahre im Weltraum unterwegs zu Saturn, dem zweit-

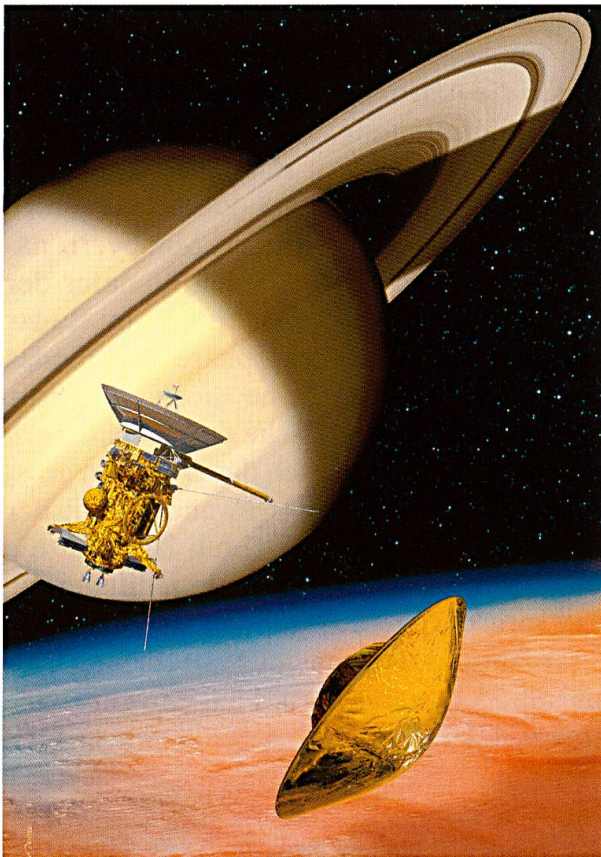


Abbildung 1:
Künstlerische Darstellung der Cassini-Huygens-Raumsonde beim Saturn.
Bild: NASA-ESA/Archiv Schmidt.

grössten Planeten unseres Sonnensystems. Die Sonde hat Mitte 2004 den riesigen Gasplaneten erreicht. Zurückgelegte Flugstrecke: rund 3,5 Milliarden Kilometer. Bislang sind drei amerikanische Raumsonden an Saturn vorbeigeflogen: Pioneer 11 (Vorbeiflugdistanz 20800 Kilometer), Voyager 1 (Vorbeiflugdistanz 38000 Kilometer) und Voyager 2 (Vorbeiflugdistanz 124000 Kilometer). Cassini-Huygens soll vier Jahre lang das Saturn-System erforschen und den Ringplaneten in den nächsten vier Jahren 76 Mal umkreisen. Dabei wird sie den Planeten, sein Ringsystem, seine Magnetosphäre und sieben seiner über 30 bekannten Monde viel genauer erforschen, als dies mit allen bisherigen Raumsonden möglich war. Die Landsonde Huygens wurde am 25. Dezember 2004 von der Hauptsonde Cassini abgetrennt und hat am 14. Januar 2005 in einer dreistündigen Mission die Atmosphäre und Oberfläche des grössten Saturnmondes Titan erfolgreich untersucht (Abbildung 1).

Die Sonde ist ausgestattet mit einem breiten Spektrum an Kameras und Instrumenten, die es ihr ermöglichen, akkurate Messungen und detaillierte Aufnahmen von der Atmosphäre des Planeten Saturn zu machen. Das Cassini-Huygens Projekt besteht aus dem Cassini Orbiter, der von der NASA gefertigt wurde, und dem Huygens Lander, der von der europäischen Weltraumorganisation ESA entwickelt wurde. Benannt sind der Orbiter und der Lander nach zwei berühmten Astronomen, die sich intensiv mit dem Saturn und seinen zahlreichen Monden beschäftigt haben. Der Orbiter ist nach dem italienisch-französischen Astronomen Jean-Dominique Cassini (Geburtsname Giovanni Cassini) benannt, der die Saturnmonde Iapetus, Dione, Rhea und Tethys in dem Zeitraum von 1671–1684 entdeckte und die Eigenschaften des Ringsystem näher untersuchte, daher trägt auch die grösste Ringspalte den Namen Cassini. Der Lander ist nach dem holländischen Astronomen Christiaan Huygens benannt, der den grössten Saturnmond Titan 1655 entdeckte.

Cassinis Mission endet offiziell am 30. Juni 2008, vier Jahre nach der Ankunft am Saturn und 33 Tage nach dem letzten Titan-Vorbeiflug, der am 28. Mai 2008 stattfinden soll.

Cassini und Huygens sind ausgestattet für 27 verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen. Dazu ist der Cassini Orbiter mit 12 Instrumenten und der Huygens Lander mit 6 Instrumenten ausgestattet. Die Cassini Experimente sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Sechs europäische Instrumente auf Huygens

Die sechs Instrumente an Bord der Huygens-Sonde dienen im Wesentlichen der Messung von Temperatur, Druck sowie Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in der Titanatmosphäre. Ausserdem können beim Flug durch die Atmosphäre Proben der Titanluft genommen und mit Hilfe eines Gas-Chromatographen chemisch und physikalisch auf ihre Zusammensetzung hin analysiert werden. Eine seitwärts blickende Optik erlaubt infolge der Eigendrehung von Huygens einen perma-

nenten Rundblick, der mittels der DISR-Kamera (Descent Imager/Spectral Radiometer) in Schwarz-Weiss-Bildern festgehalten wird, die immer kleinere Details zeigen, je tiefer die Sonde sinkt. Ein weiteres Experiment mit deutscher Beteiligung, das ‹Huygens Atmospheric Structure Instrument› (HASI), soll während des 90-minütigen Abstiegs die physikalischen und elektrischen Eigenschaften der Titanatmosphäre untersuchen. Instrumente des ‹Surface Science Package› (SSP) werden physikalische Parameter der Mondoberfläche messen, beispielsweise die Wucht beim Aufschlag auf der Oberfläche, die Neigung der Sonde gegen die Normalrichtung sowie die optischen Eigenschaften, Temperatur und Wärmekapazität des Oberflächenmaterials.

2. Titan, Mond mit Atmosphäre

1655 von dem niederländischen Astronomen Christiaan Huygens entdeckt, ist Titan der grösste der 52 bisher bekannten Saturnmonde. Mit seinen 5150 Kilometer Durch-

Imaging science subsystem:	zum Aufnehmen von Bildern im sichtbaren, nahen Ultraviolett- und nahen Infrarot-Bereich
Cassini radar:	um die Oberfläche von Titan zu kartographieren
Radio science subsystem:	sucht nach Gravitationswellen im Universum und studiert die Atmosphäre, die Ringe und das Gravitationsfeld von Saturn und seinen Monden
Ion and neutral mass spektrometer:	begutachtet neutrale und geladene Partikel nahe Titan, Saturn und den restlichen Eiswelten, um mehr über die Atmosphären und Ionosphären herauszufinden
Visible and infrared mapping spektrometer:	bestimmt die chemische Zusammensetzung der Oberfläche, der Atmosphäre, der Ringe von Saturn durch das Messen der Farben im sichtbaren Bereich und der Infrarot Strahlung
Composite infrared spektrometer:	untersucht die Temperatur und die Zusammensetzung der Planeten- und Mondatmosphären
Cosmic dust analyzer:	studiert die Eis- und Staubpartikel im Saturnsystem
Radio and plasma wave spektrometer:	erforscht Plasmawellen und natürliche Emissionen von Radiowellen
Cassini plasma spektrometer:	erforscht das Plasma, speziell das des Magnetfeldes
Ultraviolet imaging spectrograph:	Misst die Ultraviolette Strahlung der Atmosphäre und der Ringe
Magnetospheric imaging instrument:	zeichnet die Magnetosphäre von Saturn auf und misst die Interaktion mit dem Solarwind
Dual technique magnetometer:	studiert das magnetische Feld und deren Wechselwirkung mit dem Solarwind

Tabelle 1:
Übersicht der wissenschaftlichen Experimente an Bord der Cassini Raumsonde.

messer ist Titan der zweitgrösste Mond unseres gesamten Sonnensystems – nur der Jupitermond Ganymed übertrifft ihn mit seinen 5262 Kilometer Durchmesser.

Titan besitzt als einziger Mond in unserem gesamten Sonnensystem eine Atmosphäre. Das macht ihn für die Wissenschaftler zu einem besonders interessanten und faszinierenden Forschungsobjekt. Aufgrund einer Aerosolschicht (eine Schicht kleinster Schwebeteilchen aus Kohlenwasserstoffen) in 200 bis 300 Meter Höhe und einem hohen Methananteil in seiner Stickstoffatmosphäre ist diese für Teleskope und Kameras undurchdringlich (Abbildung 2). Sie besteht zum Grossteil aus Stickstoff, sowie Argon, Methan und Spuren von Äthan, Propan, Methylacetylen. Wie die Erde besitzt Titan eine dichte Atmosphäre, die hauptsächlich aus Stickstoff besteht. Neben dem weit entfernten Pluto ist Titan der letzte grosse Körper im Sonnensystem, von dessen Oberfläche bis zur Huygens Landung fast nichts bekannt war. Dabei handelt es sich immerhin um eine Fläche von der Grösse Afrikas, Asiens und Europas zusammen. Der Saturnmond ist für die Forscher wie eine Zeitreise zurück in die Vergangenheit unseres Planeten, die ihnen einen Blick auf die «Ur-Erde» ermöglichen könnte.

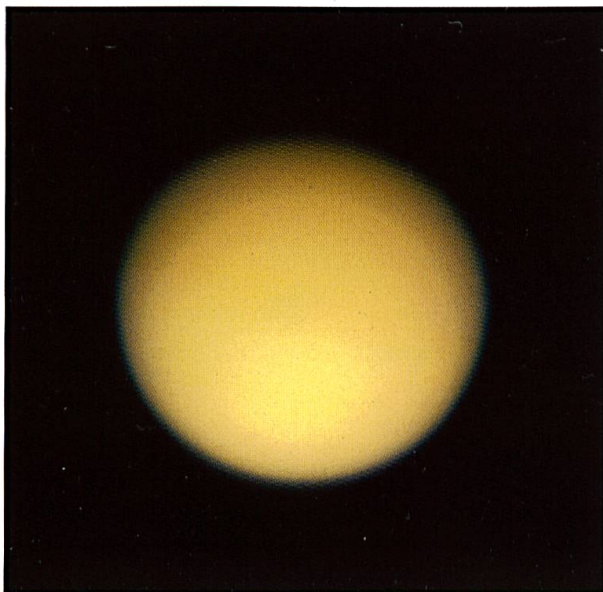


Abbildung 2:
Der zweitgrösste Mond im Sonnensystem ist Titan, der einzige Mond mit einer dichten undurchsichtigen Atmosphäre.
Bild: JPL-NASA/Archiv Schmidt.

3. Erster Blick auf eine rätselhafte Welt

Nachdem der Cassini-Orbiter den Saturnmond Titan intensiv unter die Lupe genommen hat, präsentiert das Team des «Imaging Science Subsystem» (ISS) eine erste Zwischenbilanz, aus der hervorgeht, dass Titan einst ein höchst dynamischer Himmelskörper war.

Es gibt unter der Dunstschicht Wolken, jedoch viel weniger als man sich erhofft hatte. Nur in der Nähe der Pole gibt es ein knapp 1000 km grosses bewölktes Gebiet. Dies ist offenbar seit den allerersten Aufnahmen vom Juli deutlich gewachsen. Sonst sind nur ganz vereinzelt Wolken auszumachen. Aus was die Wolken bestehen, ist unklar. Jedenfalls muss die Tröpfchen- oder Partikelgrösse die Grösse der Dunstteilchen (Grössenordnung Mikrometer) deutlich übertreffen.

Auf der Oberfläche sind dunkle und helle Gebiete auszumachen, die zum Teil durch scharfe Grenzen geteilt sind. Einschlagkrater sind kaum zu sehen. Ebenso fehlen deutliche Schatten. Dies bedeutet, dass die Titanoberfläche an keiner der beobachteten Stellen eine hügelige Topografie aufweist. Die Oberfläche ist geologisch gesehen jung. Linienartige Strukturen konnten auch beobachtet werden. Doch müssen erst Stereodaten und Radardaten die Oberflächentopografie genauer vermessen, bevor genauere Aussagen über die Oberfläche und ihre Umgestaltungsprozesse gemacht werden können. Möglicherweise werden Krater durch aus der Atmosphäre ausfallende Partikel mit der Zeit zugedeckt.

Im Juli, Oktober und Dezember 2006 sowie im Januar, Februar, März und April 2007 wagte der Saturn-Orbiter Cassini einen Blick hinter die graue Kulisse. Während mehrerer Vorbeiflüge schoss die Sonde mit der ISS-Kamera aussagekräftige Bilder, deren Auswertung noch lange nicht abgeschlossen ist. Alles in allem deuten sie auf einen bizarren Mond hin, der einst sehr aktiv und dynamisch war. Dank der Vorbeiflüge konnte Cassini dem Mond noch weitere, höchst interessante Geheimnisse entlocken, wie die Forscher berichten.

Ein dichter, orange-brauner, höchst bizarr geformter Wolkenteppich schleppt sich scheinbar mühsam in einer Höhe von 400 Kilometern über die Oberfläche des Saturnmondes Titan hinweg. Vereinzelt Wolken sind hier selten. Der Dunst aus Stickstoff, Methan und anderen Kohlenwasserstoffen, der das wahre Antlitz des «mystischen» Gebildes seit jeher vollkommen bedeckt, ist sehr dick. Wie es unterhalb dieses trüben Schleiers aussieht und woraus die Oberfläche sowie die Atmosphäre des grössten Begleiters Saturns im Einzelnen besteht, konnten bislang selbst fantasievolle Astronomen bestenfalls nur erahnen.

3.1 Erfüllte Träume für ESA-Wissenschaftler

Dies änderte sich an Weihnachten 2004 als die europäische Landekapsel Huygens vom Mutterschiff Cassini getrennt wurde und auf Kollisionskurs zum Mond Titan geschickt wurde. *«Alle Huygens-Wissenschaftler sind begeistert. Das lange Warten hat sich gelohnt»*, meinte der Huygens-Missionsleiter der ESA, Dr. Jean-Pierre Lebreton im ESA-Kontrollzentrum in Darmstadt.

Einer der Hauptgründe für die Entsendung von Huygens zum Titan ist die Möglichkeit, dass dessen stickstoff- und methanreiche Atmosphäre und seine Oberfläche chemische Eigenschaften aufweisen, die denen der Erde in ihrem frühen Stadium ähneln. In Kombination mit den Beobachtungen der Muttersonde Cassini wird Huygens völlig neue Erkenntnisse über den geheimnisvollen Saturnmond liefern.

3.2 Huygens DWE erfolgreich

Radioastronomen konnten ein erstes Profil der Windgeschwindigkeiten auf dem Titan aus dem Trägersignal von Huygens ableiten, das das Green-Bank-Teleskop (USA) aufgezeichnet hatte. In 50 Kilometer Höhe über dem Titan stellten sie einen «zonal positiv gerichteten Wind» (auf Deutsch: in Titan-Ost-richtung) mit einer Geschwindigkeit von 40

bis 50 Meter pro Sekunde fest, die bis zur Oberfläche bis auf wenige Meter pro Sekunde sank. Demnach bewegt sich die Atmosphäre tatsächlich schneller als der Mond selbst. Diese «Superrotation» zu messen, war das Hauptziel des DWE-Experiments.

Ein Wind von 45 Meter pro Sekunde, das entspricht rechnerisch knapp Windstärke 14. Solche Orkanwinde sind zwar in mittleren Höhen nichts Besonderes. Speziell zu dem Zeitpunkt, als sich der dritte und letzte Fallschirm entfaltete, kam es zu dramatischen Sprüngen im Trägersignal. Dazu passen auch frühere Meldungen über die Auswertung von Daten anderer Experimente, wonach die Sonde in der oberen Atmosphäre heftiger durchgeschüttelt wurde, als die Wissenschaftler vorher erwartet hatten.

Die Daten stammen aus ersten Auswertungen des Doppler-Wind-Experiments (DWE). Der Sender des Datenkanals A von Huygens strahlte sein Trägersignal mit einer bekannten Frequenz im Gigahertz-Bereich aus, die durch Verwendung eines neuartigen, in der Raumfahrt erstmals eingesetzten Oszillators auf Rubidiumbasis extrem genau eingehalten wurde. Die Frequenzschwankungen, die während des Abstiegs auftraten, resultierten also allein aus dem Dopplereffekt des Signals, hervorgerufen durch Änderungen der Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger. Damit können selbst kleinste Effekte erfasst werden, wie etwa die Drehung der Sonde um sich selbst. Dank hoch entwickelter Auswertungssoftware kann der momentane räumliche Bewegungszustand und die Position der Sonde erstaunlich genau bestimmt werden.

3.3 Eiskalte Landung

Zweieinhalb Stunden lang hat Huygens auf der Titanoberfläche gemessen, sehr viel länger als die Wissenschaftler je zu hoffen gewagt hatten. Martin Tomasko von der Universität in Arizona, der Erbauer der Huygens-Kamera: *«Wir sehen helle Bergketten, die etwa 100 Meter hoch sind – und wir*

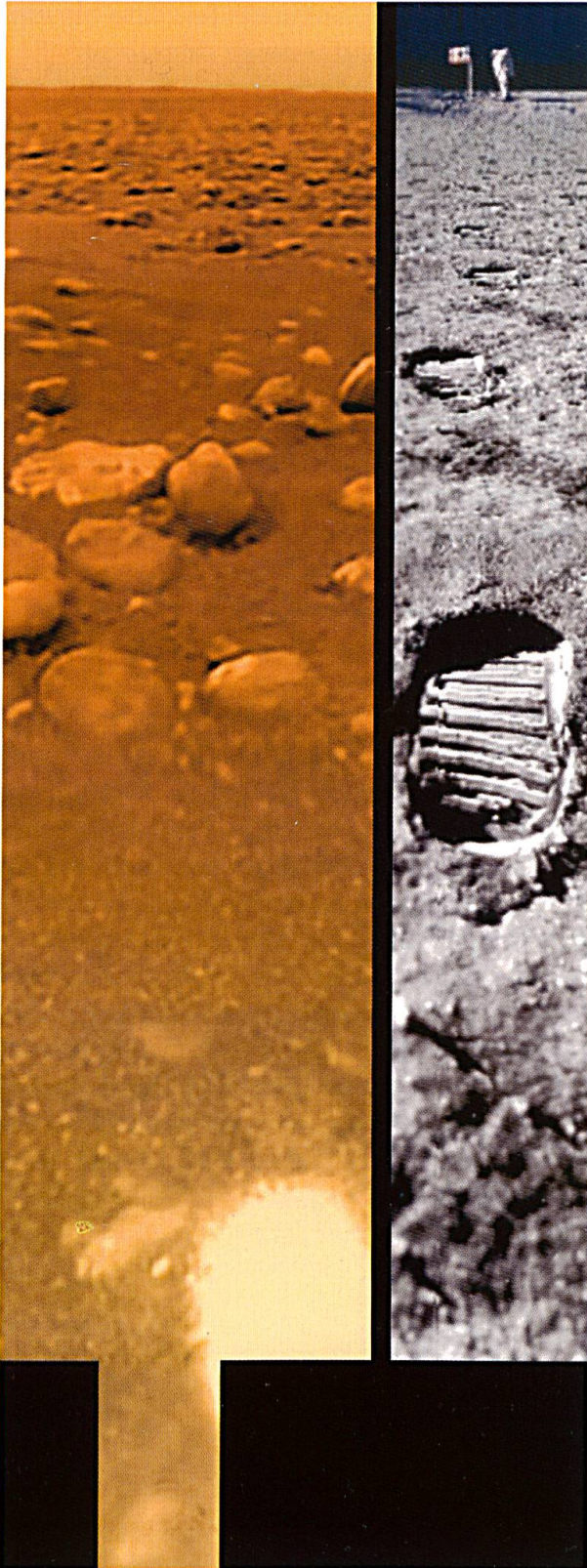


Abbildung 3:
 «Kieselsteine» aus gefrorenen Kohlenwasserstoffen und Wassereis zeigt das Bild der ESA Landekapsel Huygens nach der Landung auf Titans Oberfläche.
 Bild: ESA-LPL Arizona/Archiv Schmidt.

sehen viele Hinweise auf Regen. Der dunkle Stoff in den Tälern ist Material aus organischer Chemie. Vermutlich fallen Smogpartikel aus der Atmosphäre aus und bedecken die ganze Landschaft. Regen aus Methan wäscht den Dreck dann in die Täler. Vielleicht hat es noch einen Tag vor der Landung geregnet. Die Berge sind nicht aus Silikatgestein wie auf der Erde, sondern aus steinhart gefrorenem Wassereis.» Viele Prozesse, wie wir sie von der Erde kennen, haben entsprechende auf dem Titan, allerdings mit ganz anderen Bestandteilen. Berge bestehen nicht aus Gestein, sondern aus Wasser. Dafür fließt kein Wasser, sondern Methan über die Oberfläche. Offenbar gibt es sogar Vulkane, aber die spucken keine Lava, sondern Ammoniak und schmutziges Eis. Darauf deutet die verblüffende Entdeckung des Edelgases Argon 40. Neben Methan und Stickstoff konnten die Wissenschaftler Argon 40 und Ammoniak in der Atmosphäre ausfindig machen, was für eine Vulkantätigkeit spricht, doch statt Lava spuckt der titanische Vulkan Wassereis, statt Staub wirbelt er Kohlenwasserstoff-Teilchen in die Methan-Atmosphäre.

4. Rollentausch: Methan statt Wasser

Die Wissenschaftler gehen davon aus, dass aus dem Boden des Saturn-Mondes immer neues Methan austritt, können sich den Vorgang aber noch nicht genau erklären. Das auf der Erde als Grubengas bekannte Methan ist eine organische Verbindung, die bei den Temperaturen auf dem Titan – unter minus 170 Grad – flüssig oder gasförmig vorkommt.

Steinhart ist die Titanoberfläche dennoch nicht, das zeigen die Huygens-Messungen ebenfalls. John Zarnecki von der Open University in Grossbritannien: «Auf der Unterseite der Kapsel ist ein Dorn, der sich bei der Landung als erstes in den Titanboden bohrte. Für einen Moment musste der Dorn starken Widerstand überwinden, danach waren die Kräfte eher gering.» Die Forscher vermuten,

dass der Boden am Landeplatz von Huygens eine Konsistenz von nassem Sand oder Lehm hat, der von einer dünnen Kruste bedeckt ist. Unterhalb dieser Kruste kommt offenbar sehr schnell flüssiges Methan zum Vorschein. Toby Owen von der Universität von Hawaii: *«Das ist hier nicht wie auf dem Mars, wo die Flüssigkeiten, die die Landschaft geformt haben, jetzt tief im Boden eingefroren sind. Titan ist ein Mond, auf dem die Flüssigkeiten noch vorhanden sind. Wir sind in einem Sumpfgebiet gelandet.»*

Dort, wo «Huygens» am 14. Januar 2005 gelandet ist, sieht es aus wie in einem ausgetrockneten Flussbett in Arizona, meinte «Huygens»-Projektleiter Jean-Pierre Lebreton (Abbildung 3).

4.1 Regenbögen auf Titan

Titans «Wasser» ist flüssiges Methan, CH_4 , besser bekannt als natürliches Gas auf der Erde. Gewöhnliches Erd-Wasser, H_2O , wäre auf Titan gefroren, wo die Oberflächentemperatur 170°C unter Null beträgt. Methan, auf der anderen Seite, ist eine fließende Flüssigkeit, eine Art die nicht anfällig für Frost ist. Jonathan Lunine, Professor an der University of Arizona, ist ein Mitglied des Huygens Missionsteams. Er und seine Kollegen glauben, dass Huygens auf Titans Äquivalent zu Arizona landete, einem zumeist trockenen Gebiet mit einer kurzen, aber intensiven, feuchten Jahreszeit. *«Die Flussläufe in der Nähe der Huygens Sonde sehen derzeit leer aus»*, sagt Lunine, aber er glaubt, dass dort erst vor kurzem Flüssigkeit vorhanden war (Abbildung 4). Titans Atmosphäre ist «feucht», gemeint ist reich an Methan. Niemand weiss wie oft es regnet, *«aber wenn es regnet»*, sagt Lunine, *«könnte der hohe Anteil an Dampf in der Atmosphäre, verglichen mit der Erdatmosphäre, sehr intensive Regenfälle hervorbringen.»*

Und vielleicht auch Regenbögen. *«Die Zutaten, die man für einen Regenbogen benötigt, sind Sonnenlicht und Regentropfen. Titan hat beides»*, sagt der Atmosphärenoptik-Spezialist Les Cowley. Auf der Erde

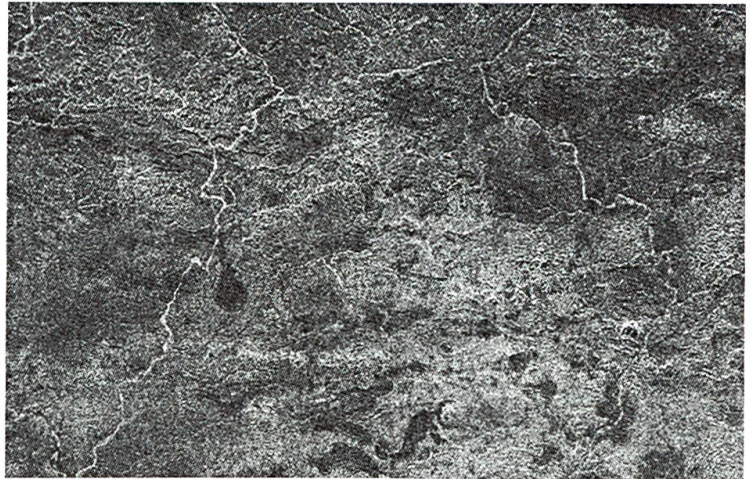


Abbildung 4:
Mäanderförmig schlängeln sich die Flussbette durch die Hügellandschaft in der Xanadu Region auf Titan.
Bild: JPL-NASA / Archiv Schmidt.

bilden sich Regenbögen, wenn Sonnenlicht auf transparente Wassertropfen trifft. Jeder Tropfen funktioniert wie ein Prisma und teilt Licht in das bekannte Farbspektrum auf. Auf Titan würden sich Regenbögen bilden, wenn Sonnenlicht auf Methan-Tröpfchen trifft die, wie Wassertropfen, transparent sind. Ein Methan-Regenbogen wäre grösser als ein Wasser-Regenbogen, mit einem Primärradius von mindestens 49° im Gegensatz zu $42,5^\circ$ bei Wasser. Dies liegt daran, dass der Brechungsindex von flüssigem Methan (1,29) sich von dem von Wasser (1,33) unterscheidet. Die Reihenfolge der Farben jedoch wäre gleich: innen blau und rot an der Aussenseite, mit einem insgesamt orangenen Farbton, der durch Titans orangefarbenen Himmel hervorgerufen wird.

4.2 Kieselsteine am Landeplatz

Nach ihrer Landung auf dem Saturnmond Titan hatte die Sonde Huygens Bilder von «Kieselsteinen» zur Erde gesandt. Anhand der Radiosignale des Landegeräts konnte eine europäisch-amerikanische Forschergruppe nun die Grösse dieser Objekte bestimmen.

Vermutlich aus steinhartem Wassereis, durchsetzt mit Kohlenwasserstoffen bestehend, sind die Kiesel im Umkreis der Landestelle fünf bis zehn Zentimeter gross (Abbildung 3). Die ESA-Forscher erfuhren das durch Zufall. Denn Funkwellen von «Huygens» gelangten nicht nur auf direktem Wege zu «Cassini» ins Weltall, sondern wurden auch von der Umgebung reflektiert und nach oben geworfen. «Cassini» fing die Reflexionen ebenso auf wie die Originalsignale. Mit ein wenig Tüftelei konnte sich Miguel Pérez-Ayúcar vom «Huygens»-Team der ESA aus den winzigen Unterschieden einen Eindruck von der Oberfläche an der Landestelle machen. Er und seine Kollegen schliessen dies aus wiederholten Intensitätsschwankungen der Radiosignale. Verantwortlich für diesen Effekt wäre demnach die Reflexion der Radiowellen an der Oberfläche des Mondes, schreiben die Forscher im «Journal of Geophysical Research».

4.3 Radiosignale erklären Oberflächenbeschaffenheit

Huygens hatte 71 Minuten lang Signale mit einer Wellenlänge von 14,3 Zentimeter (2098 Megahertz) an die Saturnsonde Cassini geschickt. Diese zog derweil über den Kopf des Landegeräts hinweg und verschwand schliesslich hinter dem Horizont Titans. Ein Teil der Radiowellen lief direkt zu der Sonde, während ein anderer zunächst am Boden re-

flektiert wurde und daher einen etwas längeren Weg hatte. Pérez-Ayúcar und Kollegen vermuteten, dass die Überlagerung dieser direkten und indirekten Wellen die Intensitätsschwankungen erklären könnten. Die Computermodelle der Forscher bestätigten diese Vermutung nicht nur, sie zeigten auch, dass die Stärke des Effekts empfindlich von der Gestalt der Oberfläche abhängt. Indem der Winkel zwischen Huygens und Cassini immer flacher wurde, wanderte der anfänglich einen Meter von Huygens entfernte Reflexionspunkt in eine Entfernung von rund zwei Kilometern. Um die Schwankungen der Signalstärke akkurat reproduzieren zu können, mussten die Forscher von einer relativ ebenen Oberfläche mit einem Belag aus fünf bis zehn Zentimeter grossen Kieseln ausgehen.

5. Irdisches Aussehen und doch völlig anders

Gemütlich und einladend klingt das Bild von Titan nicht gerade, welches durch die Erkenntnisse der Cassini-Raumsonde langsam Gestalt annimmt. Auf die minus 180 Grad Celsius kalte Oberfläche des Saturnmondes Titan nieselt ein beständiger dünner Regen aus flüssigem Methan. Die Wolken, die Titan verhüllen, rühren von Stürmen her, die um den unwirtlichen Mond ziehen.

Bereits vor Start der Cassini-Huygens Mission hatte man die Existenz von Seen auf Titan erwartet. Als die Cassini-Sonde am 24. Oktober 2004 zum ersten Mal in 1200 Kilometern Entfernung am Titan vorbeiflog, erlebten Astronomen allerdings eine handfeste Überraschung. Von stehenden Gewässern war nichts zu sehen. Man hatte diese in der Äquatorregion vermutet, allerdings konnten dort keinerlei Anzeichen davon gefunden werden. Erst als Cassini am 22. Juli 2006 in der Nähe des Nordpols vorbei flog, wurden Seen entdeckt. Nun wusste man, wo man suchen musste: Folgerichtig konzentrierte man die nächsten Vorbeiflüge auf po-

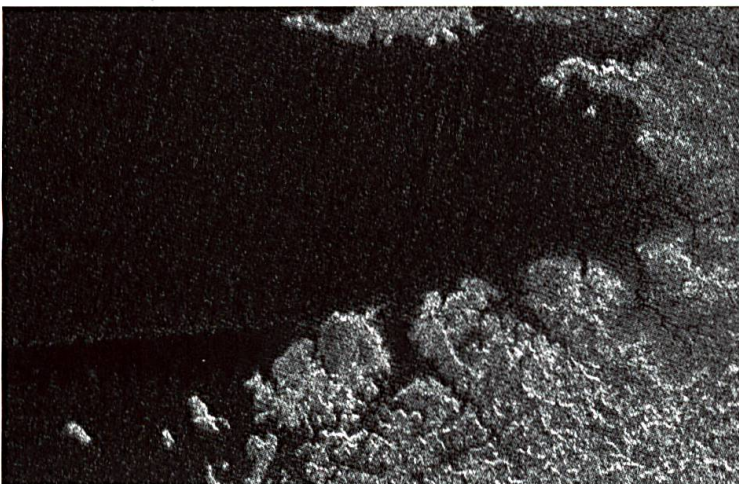


Abbildung 5:
Eine Seenplatte von über 100 Kilometern Ausdehnung wurde am 9. Oktober 2006 durch das Cassini Radarinstrument in Nordpolnähe entdeckt. Bild: JPL-NASA/Archiv Schmidt.

larnahe Regionen und prompt wurden weitere Seen gefunden. Sie weisen abermals verblüffende Ähnlichkeiten zu irdischen Seenlandschaften auf. Es gebe eine richtige Häufung derartiger Seen in der Nähe des Titan-Nordpols, berichteten die Forscher (Abbildung 5). Die von der internationalen Sonde Cassini entdeckten Seen haben eine Länge von zehn bis 100 Kilometer. Zudem wurden verästelte Flussläufe entdeckt, die in die Seen münden, und es sind auch deutlich Küstenlinien zu erkennen.

Wenige Tage zuvor hatte eine andere Forschergruppe gemeldet, die Landschaft in der Xanadu-Region des Himmelskörpers habe durchaus Ähnlichkeit mit Formationen auf der Erdoberfläche. Hügelketten waren schon auf Bildern von der Landung der Raumsonde «Huygens» zu erkennen gewesen. Das Mutterschiff «Cassini» hatte Dünen auf dem Mond entdeckt.

Nun veröffentlichen gleich zwei Teams Aufsätze mit neuen Erkenntnissen über das Wetter auf dem Saturnmond in der Wissenschaftszeitschrift «Nature»: Vom «Methan-Nieselregen» am Boden des Mondes berichten Tetsuya Tokano von der Universität Köln und seine Kollegen. «Methanstürme» als Urheber der Schauer beschreiben R. Hueso und A. Sánchez-Lavega von der Universidad del País Vasco im spanischen Bilbao.

5.1 Bruder der Erde

«Der Titan wird oft wie ein Bruder der Erde betrachtet, weil es auf beiden Himmelskörpern Regenwetter und von Flüssen geformte Landschaften gibt», schreibt die Planetenforscherin Caitlin Griffith von der University of Arizona in einem Kommentar. Doch sie betont: Je mehr der Mensch diese Gemeinsamkeiten untersuche, desto mehr erscheine der Titan ihm doch als eine «faszinierend fremdartige Welt».

Im Modell von Hueso und Sánchez-Lavega genügen kleine Temperaturunterschiede von rund einem halben Grad Celsius und geringe Aufwinde, um die Bildung jener

gewaltigen Kumuluswolken anzuschieben, die für die wolkige Atmosphäre des Titans so charakteristisch sind. Das Wettermodell hat eine Auflösung von einem halben Kilometer. Mit ihm konnten die Wissenschaftler auch heftige Stürme mit überraschend starkem Niederschlag plausibel erklären. Den hatten Wissenschaftler der Europäischen Weltraumorganisation ESA zwar auf dem Mond vermutet, konnten ihn aber zumindest an der Landestelle von «Huygens» nicht nachweisen.

5.2 Konstanter Kreislauf

Wolkenbildung und Niederschläge hängen von den - nach irdischen Massstäben – langsam wechselnden Jahreszeiten auf dem Mond ab. Über einen langen Zeitraum haben sich die Wolken aufgebaut, die jetzt über Titans Südhälfte ausregnen. Während der Trockenzeiten verdunsten Flüsse und meter-tiefe Seen wieder.

In den Regionen um die nördlichen und südlichen Wendekreise des Mondes herum fällt hingegen während des grössten Teils des Jahres ein feiner Nieselregen aus flüssigem Methan. Dort sind die untersten Atmosphärenschichten dermassen gesättigt, dass kleine Tröpfchen eines Methan-Stickstoff-Gemischs ausregnen – und nach Berechnungen der Kölner Wissenschaftler auch den Boden des Mondes erreichen.

Das schliessen Forscher von der Universität Köln aus den Beobachtungen der europäischen Landesonde «Huygens». Der Regen entsteht ähnlich wie bei unserem Wasserkreislauf auf der Erde. Titan ist damit, soweit bekannt, abgesehen von der Erde der einzige Ort im Sonnensystem, wo Regen auf den Boden fällt, wie der britische «New Scientist» berichtet. Trotz relativ kleiner Niederschlagsmengen halte das Methan die Oberfläche des Mondes feucht und beeinflusse damit aktiv ihre Struktur. Bisher konnte man durch Teleskope immer nur Wolken sehen. Mit Hilfe der «Huygens»-Daten konnte jetzt auch Regen festgestellt werden.

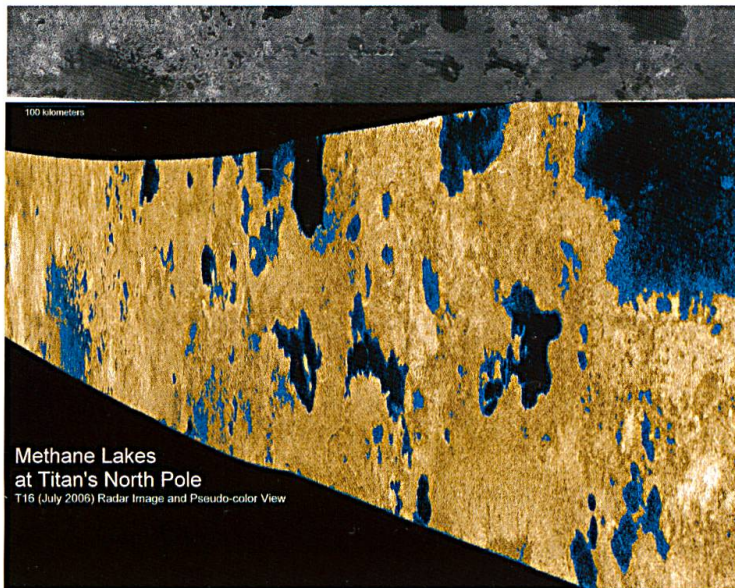


Abbildung 6:
Endlich, am 22. Juli 2006 wurden die ersten Kohlenwasserstoff-Seen in den nördlichen Breiten des Mondes Titan entdeckt. Das Radarbild oben zeigt eine ganze Gruppe von Methanseen, unten ist eine Pseudodarstellung der Region in Farbe dargestellt.
Bild: JPL-NASA/Archiv Schmidt.

5.3 Heftige Methanschauer

Forscher hatten angesichts der Flüsse und Seen auf dem Titan bereits über möglichen Flüssiggasregen spekuliert (Abbildung 6). Zusätzliche Flüssigkeit könnten daher die heftigen Regenschauer liefern, die einem theoretischen Modell zufolge über den Saturnmond toben. Die Wissenschaftler Ricardo Hueso und Agustin Sanchez-Lavega von der Universität Bilbao stellen ihr Rechenmodell in der Wissenschafts-Zeitschrift *«Nature»* vor. Unter bestimmten Bedingungen bilden sich demnach innerhalb weniger Stunden in einer Höhe von etwa 30 Kilometern dicke Wolken und es komme zu sturmartigen Methan-Schauern, heisst es in dem Artikel.

5.4 Atmosphärenchemie

Auch über die Atmosphärenchemie des Saturnmondes Titan hat es spannende neue Erkenntnisse gegeben. Schon länger war bekannt, dass sich in den tieferen Regionen der

Titanatmosphäre – in der Höhe von mehreren hundert Kilometern – organische Aerosole befinden, so genannte Tholine. Diese bilden sich dadurch, dass einfache Moleküle wie Methan und Stickstoff, die sich in den oberen Atmosphärenschichten befinden, durch UV-Strahlung und hochenergetische Teilchen aktiviert werden. Es wird angenommen, dass diese Tholine verantwortlich sind für den leicht orangefarbenen Nebel, der die Oberfläche Titans bedeckt (Abbildung 7).

In einer neuen Studie ist nun herausgefunden worden, dass sich Tholine auch in höheren Schichten der Titanatmosphäre gebildet haben, auf über 1000 km. Wissenschaftler des Southwest Research Institute (SWRI), der Universität von Kansas, des University College London und der University of Texas, San Antonio, haben die Ergebnisse ihrer Untersuchungen am 11. Mai 2007 im Wissenschaftsjournal *«Science»* veröffentlicht. Tholine sind sehr grosse, komplexe Moleküle, von denen angenommen wird, dass einige ihrer Komponenten chemische Vorläufer von Leben sind.

Bei den ersten Fly-bys von Cassini beim Titan hat das INMS eine Atmosphäre entdeckt, die vorwiegend aus Stickstoff und Methan besteht. Bei späteren Messungen wurde allerdings die Anwesenheit von Benzen und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen festgestellt, das den Grundbaustein aromatischer Kohlenwasserstoffe darstellt. Gleichzeitig detektierten zwei andere Sensoren, die zur Cassini Plasma Spectrometer (CAPS)-Apparatur gehören, das Ion Beam Spectrometer (IBS) und das Electron Spectrometer (ELS), grosse positiv und negativ geladene Ionen. Angenommen wird der folgende Reaktions-Mechanismus:

Nachdem die UV-Strahlung und die hochenergetischen Teilchen die einfachen Moleküle Stickstoff und Methan aktivieren, bilden diese kleine Moleküle wie Cyanwasserstoff sowie kleine Ionen, aus denen sich dann polycyclische Aromate sowie Nitrile bilden. Hieraus entstehen grosse negativ geladene Teilchen, die als Aerosole in der Ti-

tanatmosphäre auftreten und aus denen sich die Tholine bilden, die sich schliesslich auf der Titanoberfläche niederlassen (Abbildung 7).

6. Berge und Ozeane

6.1 Dünen aus Ethan

Die Radaraufnahmen der Cassini-Sonde zeigen, dass eine helle, Xanadu genannte Region von dunkleren Arealen umgeben ist. Die Wissenschaftler konnten in diesen Bereichen Dünen, Berge und Täler und sogar Flussläufe ausmachen, wie die Wissenschaftler des Jet Propulsion Laboratory (JPL) mitteilten (Abbildung 4). Dazu Jonathan Lunine, Wissenschaftler an der Universität von Arizona: *«Obwohl Titan nur äusserst wenig Sonnenlicht erhält und viel kleiner und kälter ist als die Erde, ist Xanadu eine Gegend, wo Flüsse sich in sonnenlose Ozeane ergiessen.»*

Fachleute gehen davon aus, dass in der Xanadu-Region flüssiges Methan als Regen fällt oder als Quellen an die Oberfläche tritt, wo es sich zu regelrechten Flüssen sammelt. Diese Ströme würden laut der NASA Material mit sich führen, das sich schliesslich an anderer Stelle auf dem Titan in Form von Sanddünen anhäuft. Woraus die als Sanddünen interpretierte Formationen bestehen, ist noch nicht mit Sicherheit bekannt. Eine Erklärung dafür hat der Wissenschaftler Donald Hunten von der University of Arizona. Noch vor kurzem hatten einige Planetenforscher erwartet, einen kilometertiefen Ozean aus Ethan auf dem Saturnmond Titan zu finden. Tatsächlich ist dessen Oberfläche von grossen Mengen der Verbindung bedeckt, ist Hunton überzeugt. Allerdings geht sie nicht in flüssiger Form nieder, sondern gebunden an Smogpartikel. Aus eben diesen Partikeln könnten auch die kürzlich auf Titan entdeckten Dünen bestehen, schreibt Donald Hunten von der University of Arizona im Magazin *«Nature»*. Seiner Überschlagsrechnung zufolge ist der Titan von einer mehr als zwei Kilometer mächtigen Schicht ethanhal-

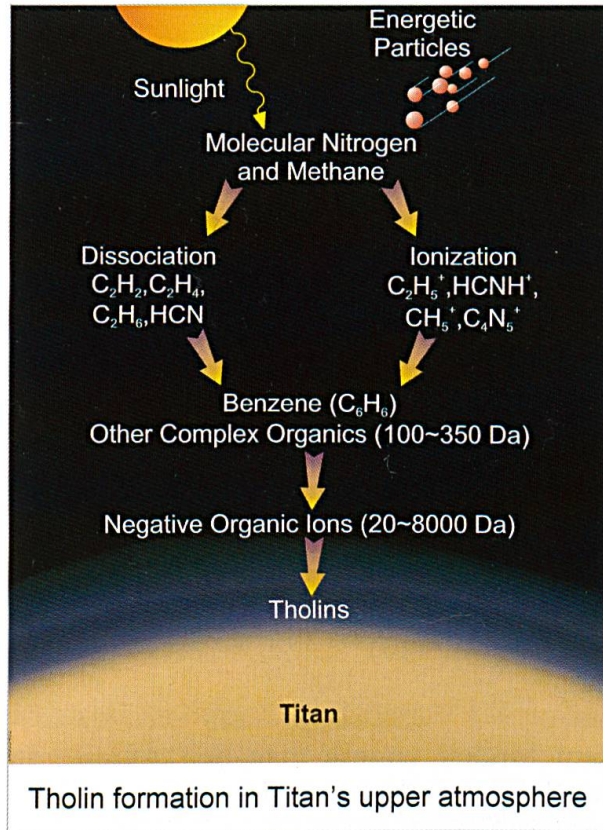


Abbildung 7:
Vermutetes Schema der Tholine-
Bildung auf dem Titan.
Bild: JPL-NASA/Archiv Schmidt.



Abbildung 8:
Mit dem ISS Kamerasystem gelang diese sehr
detaillierte Ansicht der Titanhalbkugel im
nahen Infrarotbereich. In Polnähe (Kreis) sind
ausgedehnte Seen zu erkennen, die dunklen
Stellen in der Äquatorregion ist von gigan-
tischen Sanddünen aus gefrorenen Kohlenwas-
serstoffpartikeln bedeckt.
Bild: JPL-NASA / Archiv Schmidt.

tiger, unter dem eigenen Gewicht zusammengepresster Körnchen bedeckt (Abbildung 8).

6.2 Ozean unter der Oberfläche?

Auf dem Saturnmond Titan gibt es offenbar doch einen grossen Ozean. Das vermuten Wissenschaftler zwar schon länger. Französische Forscher von der Université de Nantes glauben, dass sich der gesuchte Ozean unter einer Eiskruste verbirgt, die zehn bis hundert Kilometer dick ist. Das Team um Gabriel Tobie erstellte aus den Daten von Huygens und Cassini ein geologisches Modell des Titans. Demzufolge liegt zwischen dem steinigen Kern des Mondes und der festen Kruste aus gefrorenem Grubengas (Methan) und Eis ein grosses Reservoir aus Wasser und Ammoniak. Mit diesem Modell könnte man den Anteil von Methan und Stickstoff in der Atmosphäre erklären.

Mehr als neunzig Prozent der Atmosphäre des Titan besteht aus Stickstoff; Methan macht nur sechs Prozent aus. Die Forscher glauben, dass der Stickstoff aus dem Ammoniak-Meer stammt und dass das Methan aus der Eiskruste entweicht. Ihrem Modell zufolge sammelt sich das Methan von Zeit zu Zeit an der Unterseite der Kruste zu einer gigantischen Blase und gelangt bei einem grossen Ausbruch in die Atmosphäre. Zurzeit dringen Methan und Stickstoff durch Risse im Eis an die Oberfläche. Das Methan spielt auf Titan dabei eine ähnliche Rolle wie das Wasser auf der Erde und wurde in drei Episoden freigesetzt. Zunächst gab es eine Ablagerungs- und Staffelungsperiode, gefolgt von einer weiteren Episode vor etwa 2 Milliarden Jahren, als die Konvektion im silikatreichen Kern begann und der Mond zunehmend abkühlte, inklusive der Kruste. Deswegen ist es möglich, dass Titans Methan in methanreichem Eis gespeichert wurde, der Fachbegriff dafür lautet *«clathrate hydrate»*, und es auch einen flüssigen unterirdischen Ozean aus Wasser und Ammoniak gibt.

6.3 Aktive Eisvulkane?

Bereits im Juli 2004 entdeckte die Raumsonde *«Cassini»* in der Atmosphäre des Saturnmonds Titan einen hellen Fleck: eine Wolke? Nebel am Boden? Oder eine Gegend vulkanischer Aktivität? Seinerzeit wurden einige Erklärungen für möglich gehalten für den Fleck mit einem Durchmesser von rund 400 Kilometern südöstlich der grösseren, ebenfalls recht hellen Region Xanadu.

«Wir haben einen aktiven Vulkan gesehen», behauptet nun der US-Astronom Robert Nelson, nachdem er Daten eines *«Cassini»*-Spektrometers ausgewertet hat. Dass es Vulkane auf dem Saturnmond gibt, hatten bereits frühere Radarmessungen erahnen lassen. Ob diese aktiv sind, konnte bislang jedoch noch nicht bewiesen werden. Der Fleck zeige wirklich den Standort eines Vulkans, und die regelmässigen Aufhellungen seien Eruptionen, erklärte Nelson auf einer Tagung der American Astronomical Society.

Der Titan-Fleck wird immer wieder heller und dunkler: Im März 2005 leuchtete er doppelt so hell wie bei seiner Entdeckung im Sommer 2004. Bis zum November 2005 dimmte er sich wieder auf seine einstige Helligkeit ab, einen Monat später strahlte er schon wieder stärker.

Eine Wolke könne das nicht sein, meint Astronom Nelson vom Jet Propulsion Laboratory. Wolken würden sich innerhalb von Stunden oder Tagen auflösen und markante Farben haben. Auch Bodennebel schliesst der Planetenforscher aus. Stattdessen deutet Nelson die Beobachtungen als Zeichen eines Vulkanausbruchs. Atmosphärische Effekte wie Wolken seien wirklich ausgeschlossen, so der Planetenforscher Ralf Jauman vom DLR. Solange noch nicht etwas ganz anderes, noch Unbekanntes den hellen Fleck erkläre, sei Wassereisvulkanismus die einzige Erklärung. Man habe immerhin gesehen, dass die Oberfläche des Titans recht jung ist – also müsse da etwas aktiv sein, eben ein Vulkan. Aus diesem Vulkan werde Wassereis herausgeschleudert – daher die Aufhellung des Flecks. Das gefrorene Wasser

entweiche dann aber in die Atmosphäre oder werde durch Dreck überdeckt – und der Fleck wird wieder dunkler.

6.4 Eisvulkan von 30 Kilometern Grösse

Auf Bildern des VIMS-Instrumentes erkannten die Wissenschaftler eine helle, rund 30 Kilometer breite Struktur, die sie mit einiger Wahrscheinlichkeit als Vulkankegel identifizierten. Je nach genutzter Wellenlänge tritt die schneckenförmige Struktur mehr oder weniger deutlich hervor (Abbildung 9).

Der Vulkan entstand offenbar, als sich heaufwallende Massen eines Eiswasser-Kohlenwasserstoff-Gemisches einen Weg vom Untergrund durch die Oberfläche bahnten. Beim Schmelzen während eines Ausbruchs des Eisvulkans würde gasförmiges Methan freigesetzt, vermuten die Wissenschaftler. Als Energiequelle solcher Ausbrüche könnten Gezeitenkräfte zwischen Titan und Saturn dienen, die im Inneren des Mondes zu tektonischen Verschiebungen führen. Diese Kräfte variieren auf Titan stark wegen der stark elliptischen Umlaufbahn des Mondes. Eine dunkle Fläche im Zentrum des vermeintlichen Vulkans erkennen die Forscher als Caldera, wie sie beim Ausbruch eines Vulkans durch lokales Absinken des Bodens entsteht. In Richtung Westen verlaufen nahe dem Kegel zwei längere Materialzungen, die mit ihrer überlappenden Materialschichtungen ebenfalls typischen vulkanischen Strukturen auf Venus und Erde ähneln (Abbildung 10).

7. Schweizer Hightech für Huygens

Für die europäische Sonde Huygens hat die Schweizer Raumfahrtsunternehmung Oerlikon Space (früher Contraves Space) das Trennsystem und die Struktur für den Hitzeschild (Front-Shield) entwickelt und gebaut. Im Weiteren wurde durch das gleiche Unternehmen die Alublech-Nietkonstruktion für die Struktur des Back Cover entwickelt und

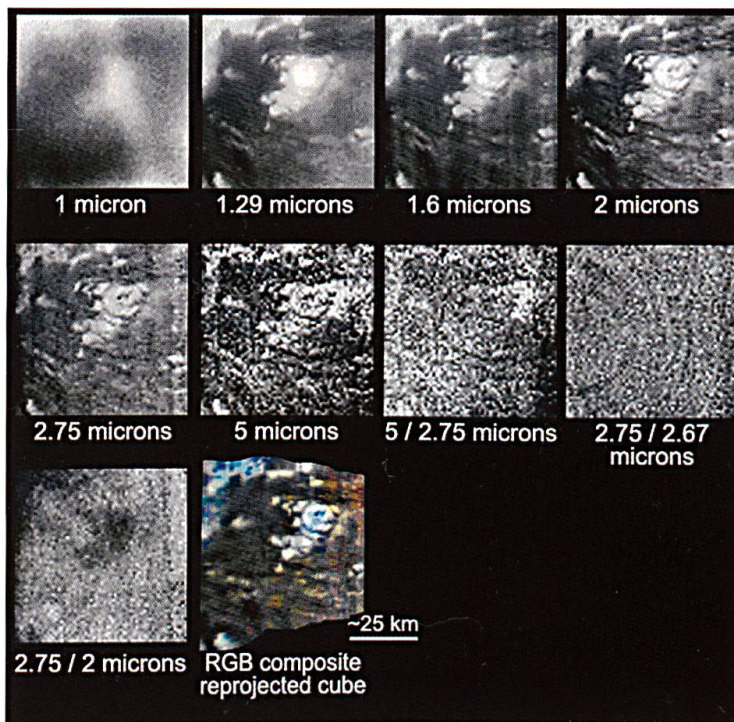


Abbildung 9: Bildserie des potentiellen Eisvulkans auf Titan, aufgenommen in verschiedenen Wellenbereichen des Infrarotspektrums. Die 30 Kilometer grosse und schneckenförmige Struktur stellt vermutlich einen Eisvulkankegel dar. Bild: JPL-NASA/Archiv Schmidt.

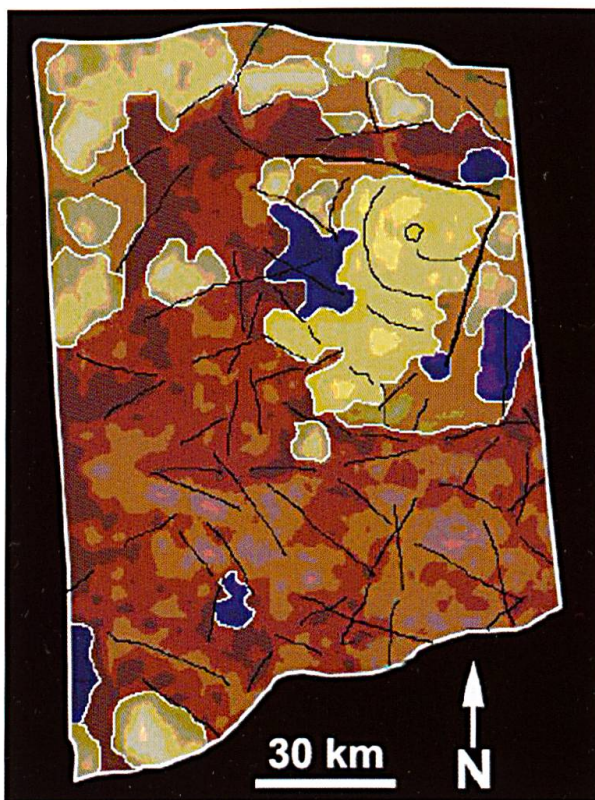


Abbildung 10: Geologische Karte mit Erklärungen zum Eisvulkan. Bild: JPL-NASA / Archiv Schmidt.

von der Firma APCO Technologies in Vevey gebaut.

Das Separationssystem mit dem dazugehörenden Hohlring von 1.9 Meter Durchmesser besteht aus drei Teilsystemen:

- Einem Mechanismus, welcher der Sonde eine Axialgeschwindigkeit und Rotation (7 Umdrehungen/Min) erteilt, kombiniert mit einem elektrischen Separationssystem. Sie dienten zur mechanischen Trennung vom US-Mutterschiff Cassini am 25. Dezember 2004.
- Ferner einem Back-Cover und Front-Shield Separationsmechanismus zur mechanischen Trennung des Back-Cover und des Front-Shield vom Abstiegsmodul am 14. Januar 2005.

Diese Mechanismen sind in jedem der drei «Knoten» untergebracht, mit denen Huygens mittels acht Streben (Struts) isostatisch, d.h. verspannungsfrei am Mutterschiff Cassini befestigt war. 1994 wurden alle Teile der Trennmechanismen bei Oerlikon Space umfangreichen Tests unterzogen und erfolgreich auf ihre Funktionalität hin überprüft. Zur Freude der Beteiligten, hat das ganze System wie vorgesehen nach sieben Jahren «Schlafzustand» funktioniert und so wesentlich zum Gelingen der Huygens Mission beigetragen. Schliesslich sind verschiedene auf Raumfahrtsanwendung entwickelte Koaxialkabel und Kabelverbinder (Kabelassemblies) zur Kommunikation an Bord der Huygens Sonde untergebracht. Diese Hochfrequenzkoaxialkabel wurden durch die Ostschweizer Firma Huber & Suhner in Herisau entwickelt.

8. Schlussbemerkungen

Noch ist die Cassini-Huygens Mission nicht abgeschlossen. Die US-Raumsonde wird bis mindestens Mitte 2008 im Monatsrythmus am grössten Saturnmond vorbeifliegen und weitere Mosaiksteinchen in die bereits gewonnenen Erkenntnisse über Titan einfügen. Es

ist denkbar, dass die Mission verlängert wird, da sich Cassini bislang in hervorragender Verfassung befindet und durchaus noch weitere Forschungen beim Saturnsystem anstellen kann. Möglicherweise wollen dann die Wissenschaftler die Sonde noch näher an Titan heran fliegen lassen, um mit Hilfe des Radars Bilder von höherer Auflösung von ausgewählten Gebieten zu gewinnen. Fest steht aber, dass die amerikanisch-europäische Mission bereits jetzt ein voller Erfolg war und unser Wissen über den rätselhaften Mond Titan gewaltig gesteigert hat. Es ist durchaus möglich, dass diese Erkenntnisse eines Tages auch für den Kreislauf des irdischen Wetters von Nutzen sein können. Jean-Pierre Lebreton wagte einen Ausblick auf weitere Missionen zum Titan. Der nächste Schritt sei sicher ein mobiles Forschungsgerät auf den Titan zu bringen. Mit seiner dichten Atmosphäre und niedrigen Gravitation ist diese Welt geradezu prädestiniert für Fluggeräte. So sei etwa eine Titansonde auf Basis eines Ballons oder Zeppelins denkbar. Der Erfolg der Sonde gibt der europäischen Wissenschaft und Raumfahrt Auftrieb. «Noch nie war das Interesse der Öffentlichkeit an einer europäischen Mission so stark», sagte ESA-Generaldirektor Jean-Jacques Dordain.

Literaturverzeichnis

- Zeitschrift «NATURE» versch. Ausgaben 2004–2007.
 Zeitschrift «New Scientist» versch. Ausgaben 2004–2007.
 «Journal of Geophysical Research» (Vol. 111. Doi: 10.1029/2005JE002613, 2006).
 Wissenschaftsjournal «Science» Mai 2007.
 Press Releases NASA-JPL versch. 1997–2007.
 Press Releases ESA versch. 1997–2007.
 Presse Informationen Oerlikon Space 2004.
 Pressemitteilungen des DLR versch. 2005/2006.