

Saturnmond Titan

Forschungsinfo 1/2006

Entdeckung und Erforschung

Der größte Saturnmond wurde am 25. März 1655 durch Christiaan Huygens (1629 – 1695) entdeckt. In den folgenden Monaten beobachtete Huygens ihn immer wieder und bestimmte die Umlaufzeit des Satelliten um den Saturn mit 16 Tagen. 1656 veröffentlichte er seine Entdeckung in Den Haag.

Huygens bezeichnete „seinen“ Mond lediglich als „Luna Saturni“. Den Namen „Titan“ gab ihm, nachdem bis dahin insgesamt acht Saturnmonde entdeckt worden waren, erst 1858 Sir John Herschel (1792 – 1871).

1907 hatte der Katalane José Comas Solà (1868 – 1937) Titan mit sehr dunkelfarbigem, sich in der Dunkelheit des Himmels verwischenden Rändern gesehen und daraus auf die Existenz einer stark absorbierenden Atmosphäre geschlossen. Er gab diese Entdeckung 1908 in den „Astronomischen Nachrichten“ bekannt, doch sie scheint allmählich in Vergessenheit geraten zu sein. 1944 wies Gerard Peter Kuiper (1905 – 1973), ein US-amerikanischer Astronom niederländischer Herkunft, eine Titanatmosphäre durch die spektroskopische Entdeckung von Methan nach.

Die amerikanischen Raumsonden Voyager 1 und 2 erreichten 1980 bzw. 1981 den Saturn. Während Voyager 2 nach dem Vorbeiflug auch noch Uranus und Neptun besucht hat, ließ man Voyager 1 von der Schwerkraft des Saturn auf eine Bahn lenken, die dicht an Titan vorbeiführte. Für diesen Blick aus der Nähe nahm man in Kauf, dass Voyager 1 aus der Ebene der Planetenbahnen herauskatapultiert wurde und keine weiteren äußeren Planeten mehr erreichen konnte.

Voyager 1 fand Titan in dichten orangegelben Dunst gehüllt vor, der für die Kamera-Augen der Sonde undurchdringlich war. So blieb die Oberfläche von Titan zwar zunächst verborgen, aber das Vorhandensein der Dunstschicht bestätigte theoretische Vorstellungen über die

fotochemischen Vorgänge in der Atmosphäre und nährte Hypothesen über einen globalen Methan- oder Ethan-Ozean und über einen Methankreislauf (flüssiges Methan verdunstet auf der Oberfläche, bildet in der Atmosphäre Wolken und fällt als Methanregen wieder hinab).

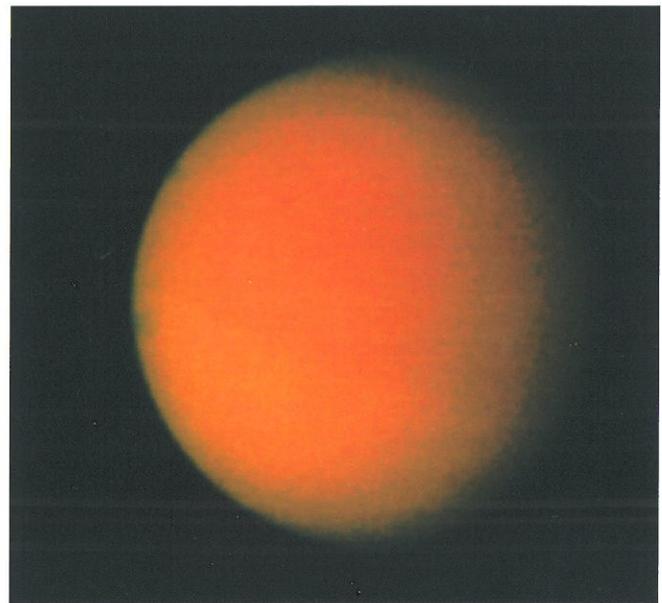


Abb. 1: Die Kamera-Augen von Voyager 1 konnten Titans orangefarbene Dunstschicht beim Vorbeiflug 1980 nicht durchdringen.

Die Vorbeiflüge der Voyager-Sonden brachten viele neue Erkenntnisse über Titan, warfen aber auch neue Fragen auf und zeigten vor allem, dass Titan eine sehr interessante, exotische Welt ist. So begannen Wissenschaftler bereits 1982 mit den Vorbereitungen für eine gemeinsame NASA/ESA-Mission, die aus dem Saturn-Orbiter Cassini und der Titan-Landesonde Huygens bestehen sollte. Die Mission Cassini/Huygens wurde 1997 gestartet. Cassini und die huckepack mitreisende Landesonde Huygens erreichten das Saturnsystem am 1. Juli 2004. Huygens landete am 14. Januar 2005 am Fallschirm auf Titan. Cassini sondierte den Titan während mehrerer naher Vorbeiflüge mit verschiedenen Instrumenten (u. a. mit Radar und im infraroten Licht).



Abb. 2: Die künstlerische Vision des Einschusses in die Saturn-Umlaufbahn ist mit einem von Raumfahrzeugen Cassini am 1. Juli 2004 aufgenommenen Foto Wirklichkeit geworden.

Die Sonde Huygens hatte sechs wissenschaftliche Instrumente an Bord, die vor allem auch während des Abstiegs durch die dichte Atmosphäre die unterschiedlichsten Messungen durchgeführt haben. An der Auswertung dieser einmaligen Daten wird auch über ein Jahr nach der erfolgreichen Landung auf Titan immer noch gearbeitet. In dieser Zeit sind wir dem Verständnis dieser fremdartigen Welt, in der Eis und Methan die Rollen von Gestein und Wasser übernehmen, ein ganzes Stück näher gekommen.

Daten

Masse	1,345 x 10 ²³ kg (2 ¼ % der Erdmasse)
Durchmesser	2.575 km 5150 km
durchschnittliche Dichte	1,881 g/cm ³
Radius der Umlaufbahn	1 221 830 km
Umlaufzeit und Rotationszeit	15,945 Tage

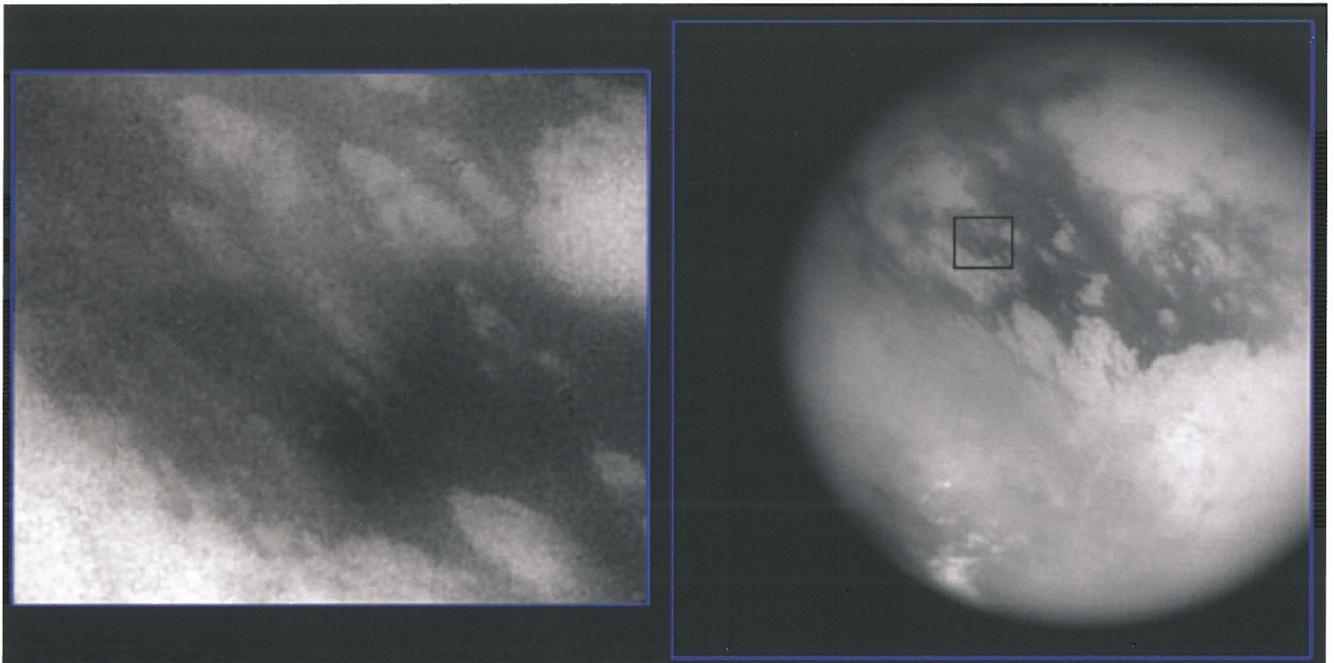


Abb. 3: Während des zweiten Titan-Vorbeiflugs am 26. Oktober 2004 rückte das Landegebiet der Sonde Huygens zum ersten Mal ins Blickfeld von Cassinis Kamera.

Die Oberfläche

Nach dem Start von Cassini/Huygens wurde es mit dem Hubble Space Telescope, das nicht durch die störenden Turbulenzen der Erdatmosphäre schauen muss, und auch mit neuen bodengebundenen Teleskopen, bei denen der atmosphärische Einfluss durch selbstanpassende optische Systeme korrigiert wird, möglich, Titans Oberfläche zumindest in grober Auflösung von der Erde aus zu beobachten. Auf den Bildern sind keine Einzelheiten zu erkennen, doch es wurde zumindest klar, dass es unterschiedliche Strukturen gibt, z. B. ein „Xanadu“ genanntes helles Gebiet von der Größe Australiens. Damit war ausgeschlossen, dass ein globaler Methan-Ozean die Oberfläche vollständig bedeckt.

Es blieb also zunächst die Möglichkeit beschränkter Ozeane, die wie auf der Erde von Kontinenten begrenzt werden. Aber diese Vorstellung ist schwer mit der beobachteten Exzentrizität der Umlaufbahn von Titan um Saturn vereinbar. Die Gezeitenkräfte müssten auf Titan – ähnlich wie auf der Erde – Gezeitenströme erzeugen. Die Energie zum Antrieb solcher Ströme kommt aus den Bahnbewegungen. Das führt dazu, dass der Erdmond sich langsam von der Erde entfernt, und es müsste bei Titan dazu führen, dass die Exzentrizität der Umlaufbahn abnimmt. Tatsächlich hätte jegliche Exzentrizität seit der Entstehung von Titan vor viereinhalb Milliarden Jahren längst vollständig aufgezehrt sein sollen. Falls die Exzentrizität der Bahn nicht erst kürzlich – z.B. durch einen Kometeneinschlag – erzeugt worden ist, sind ausgedehnte Methan-Ozeane damit ausgeschlossen.

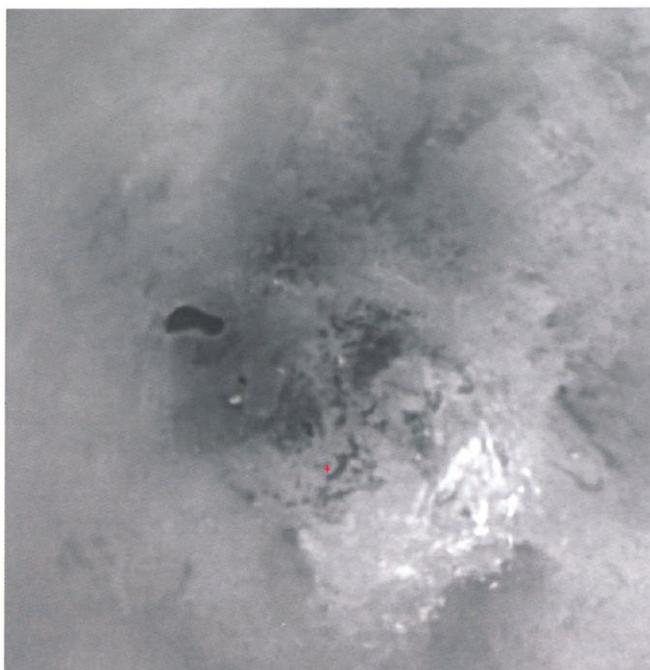


Abb. 4: Bei dem fußabdruckförmigen dunklen Gebiet in der Nähe von Titans Südpol (rotes Kreuz) könnte es sich um einen Methan-See handeln.

Vor der Landung von Huygens flog Cassini bereits dreimal an Titan vorbei und lieferte die ersten detaillierten Bilder der Oberfläche. Im Gegensatz zu den Voyager-Sonden ist die Kamera von Cassini mit Filtern ausgestattet, die es erlauben, die dichte Dunstschicht von Titan zu durchdringen. Wenn die beobachteten Strukturen auch sehr wolkenhaft anmuten, sehen wir doch tatsächlich die Oberfläche. Überraschend war auch das fast völlige Fehlen von Einschlagkratern. Aufgrund der dichten Atmosphäre hatte man zwar erwartet, dass Titan längst nicht so kraterübersät ist wie der Mond

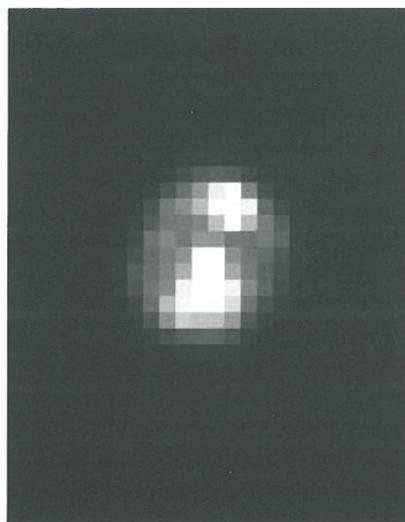
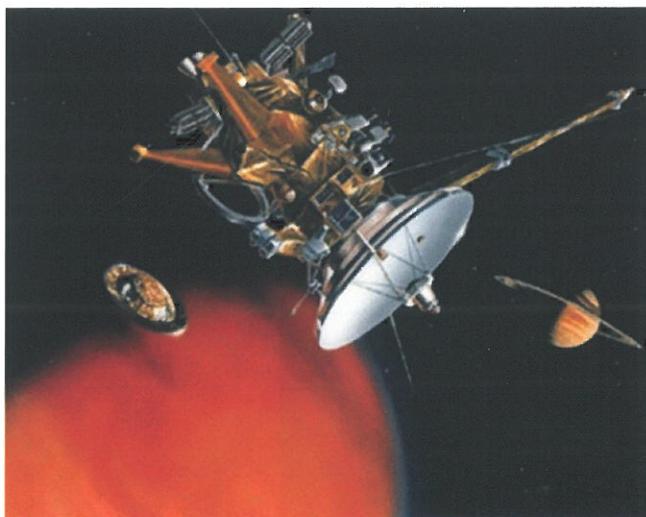


Abb. 5: Weihnachten 2004 brachte Cassini die Landesonde Huygens auf Kurs zum Titan und nahm zwei Tage später ein Foto von ihr auf. Auch wenn darauf nicht viel zu erkennen ist, trug es zu einer genaueren Berechnung der Flugbahn von Huygens bei.

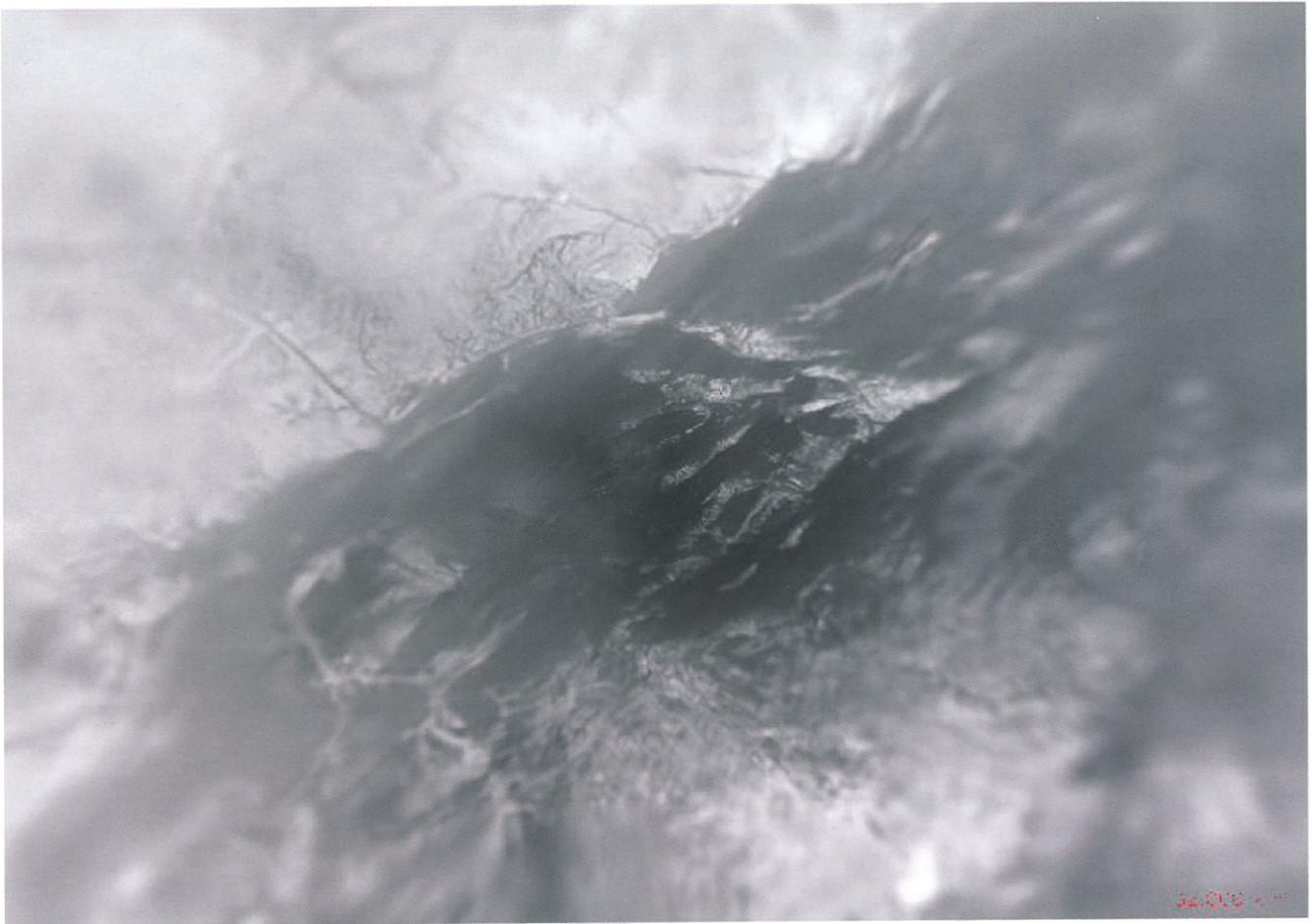


Abb. 6: Dieses Bild des Landegebiets wurde aus zahlreichen von Huygens während des Abstiegs durch die Atmosphäre gemachten Einzelaufnahmen zusammengesetzt. Die lange Kante entspricht 32 km auf der Oberfläche. Die Landestelle befindet sich in der Mitte des Bildes.

oder der Mars, aber ausreichend große Körper können die Atmosphäre durchdringen, und diese hätten deutlich mehr große Krater hinterlassen müssen, als wir sehen. Daraus kann man folgern, dass die Oberfläche relativ jung ist, d. h. dass sie – wie auf der Erde – durch geologische Prozesse ständig neu geformt wird. Ausgedehnte Ozeane lassen sich auf den von Cassini aufgenommenen Bildern nicht erkennen, allerdings hat man nahe des Südpols einen ausgesprochen gleichmäßig dunklen Fleck entdeckt, bei dem es sich um einen Methan-See handeln könnte.

Die bei den ersten Titan-Vorbeiflügen von Cassini aufgenommenen Bilder zeigten, dass der vorgesehene Landeplatz von Huygens gerade an der Grenze zwischen einem helleren und einem dunkleren Gebiet liegt. Die Landung von Huygens am 14. Januar 2005 bot dann die erste und für viele Jahre sicher auch die einzige Gelegenheit, die Oberflächen von Titan aus nächster Nähe zu untersuchen.

Als die von Huygens aufgenommenen Bilder, zunächst auf Cassini zwischengespeichert und dann zur Erde weitergesendet, am Nachmittag des 14. Januar 2005 im europäischen Raumfahrtkontrollzentrum in Darmstadt ankamen, war man zunächst überrascht, wie verblüffend vertraut Titan auf manchen Bildern wirkte. Man vermeinte Flusslandschaften und Küstenstriche zu erkennen. Diese scheinbare Vertrautheit mag daher rühren, dass die Oberfläche Titans – zumindest im Huygens-Landegebiet – von strömenden Flüssigkeiten geformt wurde, wie auch viele Gebiete auf der Erde. Auch die unterschiedlich vielen Steine verschiedener Größe in einem Bild, das nach der Landung aufgenommen wurde, deuten darauf hin, dass diese Steine durch ein Überflutungsereignis dorthin transportiert worden sind. Dabei ist der Begriff Stein hier nicht wörtlich zu nehmen, es handelt sich vielmehr um Eisbrocken. Die Oberflächen der Monde im äußeren Sonnensystem, die ja auch

Eismonde genannt werden, bestehen im wesentlichen aus Wassereis. Gestein, das die Oberfläche der terrestrischen Planeten ausmacht, kommt nur tief im Inneren der Eismonde vor.



Abb. 7: Dieses Bild wurde nach der Landung von Huygens auf der Oberfläche von Titan aufgenommen. Die vermeintlichen Steine im Bild sind in Wirklichkeit Eisbrocken von 10 bis 15 cm Größe.

Zum Zeitpunkt der Huygens-Landung lassen sich keine Flüssigkeiten an der Oberfläche erkennen. Allerdings flog Huygens in so großer Entfernung an dem wie eine Flusslandschaft wirkenden Gebiet vorbei, dass sich ein vielleicht nur wenige Meter breiter Bach fließenden Methans am Grunde eines etwa 200 m breiten Flussbetts auch nicht ausschließen lässt. Der Boden an der Landestelle von Huygens hatte die Konsistenz von nassem oder trockenem Sand; die Sonde sank allmählich einige Millimeter ein. Wenige Minuten nach der Landung stieg der Methangehalt der die Sonde umgebenden Luft um 40% an; erst nach 50 Minuten sank er wieder. Vermutlich erwärmte die Sonde den Boden und setzte darin enthaltenes flüssiges Methan frei.

Die Atmosphäre

Nach dem Methan wurden durch bodengebundene Messungen in den 1970er Jahren auch Ethan, Ethen und Ethin auf Titan entdeckt.

Durch die Voyager 1-Daten und sich darauf stützende Modelle wurde die Kenntnis der Zusammensetzung, Struktur und Temperatur der Titanatmosphäre stark erweitert. Die untere Atmosphäre enthält danach als Hauptbestandteil Stickstoff, außerdem einige Procente Methan und ca. 0,2 % Wasserstoff. Auch weitere einfache Kohlenwasserstoffe (Propan, $\text{CH}_3\text{C}\equiv\text{CH}$, $\text{HC}\equiv\text{CC}\equiv\text{CH}$), einige Nitrile (HCN , NC-CN und $\text{HC}\equiv\text{C-CN}$) und Kohlendioxid wurden nachgewiesen. 1982 wurde auf spektroskopischem Weg auch Kohlenmonoxid gefunden. Der Argongehalt (Ar) der Atmosphäre ist umstritten und vermutlich sehr niedrig. Der Oberflächendruck liegt bei 1500 hPa, die Oberflächentemperatur bei 94 K (-179°C). Die Titanatmosphäre lässt sich, ähnlich wie die Erdatmosphäre, nach thermischen Gesichtspunkten in mehrere Schichten einteilen. Sie besitzt auch eine Ionosphäre, die zur Zeit des Voyager 1-Vorbeiflugs durch eine Ionopause begrenzt wurde. Die Ionisation kann durch solare UV-Strahlung, kosmische Strahlung oder Elektronen der Saturnmagnetosphäre erfolgen.

Das Methan in der Atmosphäre von Titan wird durch die ultraviolette Sonnenstrahlung zerstört und bildet zusammen mit dem Stickstoff komplexe organische Verbindungen, die zu Schwebeteilchen – sogenannten Aerosolen – verklumpen und so in einigen hundert Kilometer Höhe eine Dunstschicht bilden, deren feste Bestandteile allmählich herabsinken und sich auf der Oberfläche in dicken Sedimentschichten ablagern könnten. Durch diesen Prozess müsste alles Methan innerhalb von einigen Millionen Jahren verschwunden sein. Da Titan aber – wie die Erde und das ganze Sonnensystem – etwa viereinhalb Milliarden Jahre alt ist und wir immer noch Methan in der Atmosphäre vorfinden, muss man entweder annehmen, dass das Methan erst vor relativ kurzer Zeit durch ein katastrophales Ereignis freigesetzt wurde oder dass es einen Prozess gibt, durch den das zerstörte Methan fortlaufend ersetzt wird. Letzteres hätte ein Methan-Ozean durch die Verdunstung von seiner Oberfläche leisten können. Da aber kein ausgedehnter Ozean existiert, nimmt man an, dass das Methan aus dem Inneren von Titan stammt und durch geologische Prozesse freigesetzt wird.

Für die erwähnten komplexen organischen Verbindungen (Polymere) erfanden Carl Sagan (1934 – 1996) und Bishun N. Khare den Sammelbegriff „Tholine“ (vom griechischen $\theta\omicron\lambda\epsilon\rho\acute{\omicron}\zeta$ = „schlammig“, „schmutzig“). Im Labor wurden durch Energieentladungen in Stickstoff/Methan-Gemische, die manchmal auch andere Beimischungen (Wasserstoff, Ammoniak) enthielten, neben gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen und Nitrilen die verschiedensten bräunlichen Tholine erzeugt. Durch Hydrolyse dieser Labor-Tholine entstanden zahlreiche Aminosäuren und Harnstoff.

Die Tholine könnten ein Bindeglied zwischen der Titanatmosphäre und der Entstehung des Lebens in der Uratmosphäre der Erde vor mehreren Milliarden Jahren sein. Die in der Vergangenheit von Wissenschaftlern häufig angesprochene Beinahe-Gleichsetzung von Titanatmosphäre und Erd-Uratmosphäre geht jedoch zu weit. Sie erfolgte erstmals zu einer Zeit, in der die Vorstellungen von der Zusammensetzung beider Atmosphären noch sehr vage waren (die Erd-Uratmosphäre enthielt vermutlich Kohlendioxid und Wasserdampf statt Methan) und berücksichtigt nicht den gravierenden Temperaturunterschied.

Die zum Teil bereits ausgewerteten Daten der Sonden Cassini und Huygens vervollständigen und festigen unser Bild von der Titanatmosphäre. Die Atmosphäre ist geschichtet. Die Messung ihres Temperaturprofils weist der Tropopause eine Temperatur von ca. -203 °C in 44 km Höhe bei 115 hPa, der Stratopause eine Temperatur von -87 °C in 250 km Höhe bei 0,3 hPa und der Mesopause eine Temperatur von -121 °C in 490 km Höhe bei 2×10^{-3} hPa zu; es wurden eine Oberflächentemperatur von $-179,5\text{ °C}$ und ein Oberflächendruck von 1467 hPa gemessen. In der Thermosphäre schwankt die Temperatur zwischen 500 und 1020 km Höhe mehrfach wellengleich mit Abweichungen von 10 bis 20 Grad um einen Mittelwert von -103 °C . Zwischen 40 und 140 km Höhe befindet sich eine niedrige ionosphärische Schicht, deren elektrische Leitfähigkeit bei ca. 60 km am größten ist. Die Atmosphäre endet bei ca. 1500 km Höhe mit einer Dichte unter 10^{-10} g/l.

In der Atmosphäre wurden folgende Isotopenverhältnisse gemessen:

$$^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 82,3 \pm 1;$$

$$^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 183 \pm 5;$$

$$\text{D}/\text{H} = (2,33 \pm 0,5) \times 10^{-4}.$$

Der Gehalt an ^{36}Ar liegt bei $2,8 \times 10^{-5}\%$, der von ^{40}Ar bei $4,32 \times 10^{-3}\%$. Die Edelgase ^{38}Ar , Krypton und Xenon wurden nicht nachgewiesen. Unter Annahme einer gleichmäßigen Verteilung liegt der Kohlenmonoxid-Gehalt der Atmosphäre bei $4,5 \times 10^{-3}\%$. Die Stratosphäre enthält 1,41 %, die Troposphäre nahe der Oberfläche 4,9 % Methan. Cassini hat Wolken in der Atmosphäre gefunden – Methan-Regentropfen ließen sich durch Huygens aber nicht nachweisen. Bei der Pyrolyse (600 °C) von in der Titanatmosphäre gesammelten Aerosolen entstanden, wie bei den im Labor hergestellten Tholinen, Ammoniak und Cyanwasserstoff. Eine Abhängigkeit der Aerosol-Zusammensetzung von der Höhe war nicht erkennbar; die Aerosole entstehen offenbar in großer Höhe und sinken anschließend zur Oberfläche hinab.

Auch Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen und Breiten wurden gemessen. In bis zu 5 km Höhe und in 60 bis 100 km Höhe treten nur sehr schwache Winde auf.

Björn Grieger
Bernd Wöbke

Internet Seiten:

<http://www.mps.mpg.de/de/projekte/cassini/>

<http://huygens.esa.int/sciencee/www/area/index.cfm?fareaid=12>

<http://www.esa.int/SPECIALS/Cassini/>

[Huygens/index.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Cassini/Huygens/index.html)

<http://saturn.jpl.nasa.gov/home/index.cfm>

http://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/main/index.html

<http://www.dlr.de/saturn/>

<http://www.wappswelt.de/tnp/nineplanets/titan.html>

<http://www.solarviews.com/eng/titan.htm>

[http://de.wikipedia.org/wiki/Titan_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Titan_(Mond))

http://www.spaceweltraum.de/4images/categories.php?cat_id=153

<http://www.astronomia.de/mondesat.htm>