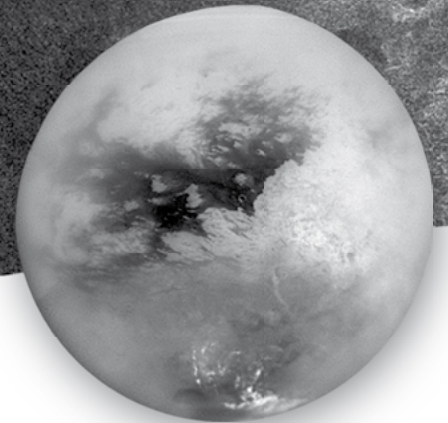


Großwetterlage auf Titan: Permanenter Nieselregen

... mit gelegentlichen Wolkenbrüchen



Nur der Saturnmond Titan weist wie die Erde ein Wettergeschehen mit Niederschlägen auf. Während die dichte Atmosphäre fast immer mit Feuchtigkeit gesättigt ist, prasseln mitunter heftige Sturzbäche nieder – aus eisig kaltem flüssigen Methan.

Seit der Landung der ESA-Sonde HUYGENS auf der Oberfläche von Titan im Januar 2005 versuchen zahlreiche Wissenschaftler aus aller Welt, mit den neu gewonnenen Daten das Klima und das Wetter des Saturnmondes besser zu verstehen. Messungen des Temperaturprofils, der Methankonzentration und anderer Eigenschaften der Titanatmosphäre erlauben nun sogar eine Wetterprognose für die nächsten Jahre.

Titan ist rund zehnmal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde, erhält also pro Flächeneinheit nur ein Hundertstel so viel Sonnenenergie. Seine Oberflächentemperatur beträgt deshalb im Mittel nur -179 Grad Celsius (94 Kelvin). Methan, zu wenigen Prozent in der überwiegend aus Stickstoff bestehenden Atmosphäre vorhanden, kann unter diesen Bedingungen als Gas, als Flüssigkeit oder als Eis vorkommen. Demgemäß wird das Wetter auf dem Saturnmond nicht durch einen Wasserkreislauf bestimmt wie auf unserer Erde, sondern durch einen Methankreislauf. Infolgedessen gibt es trotz aller Unterschiede zwischen beiden Himmelskör-

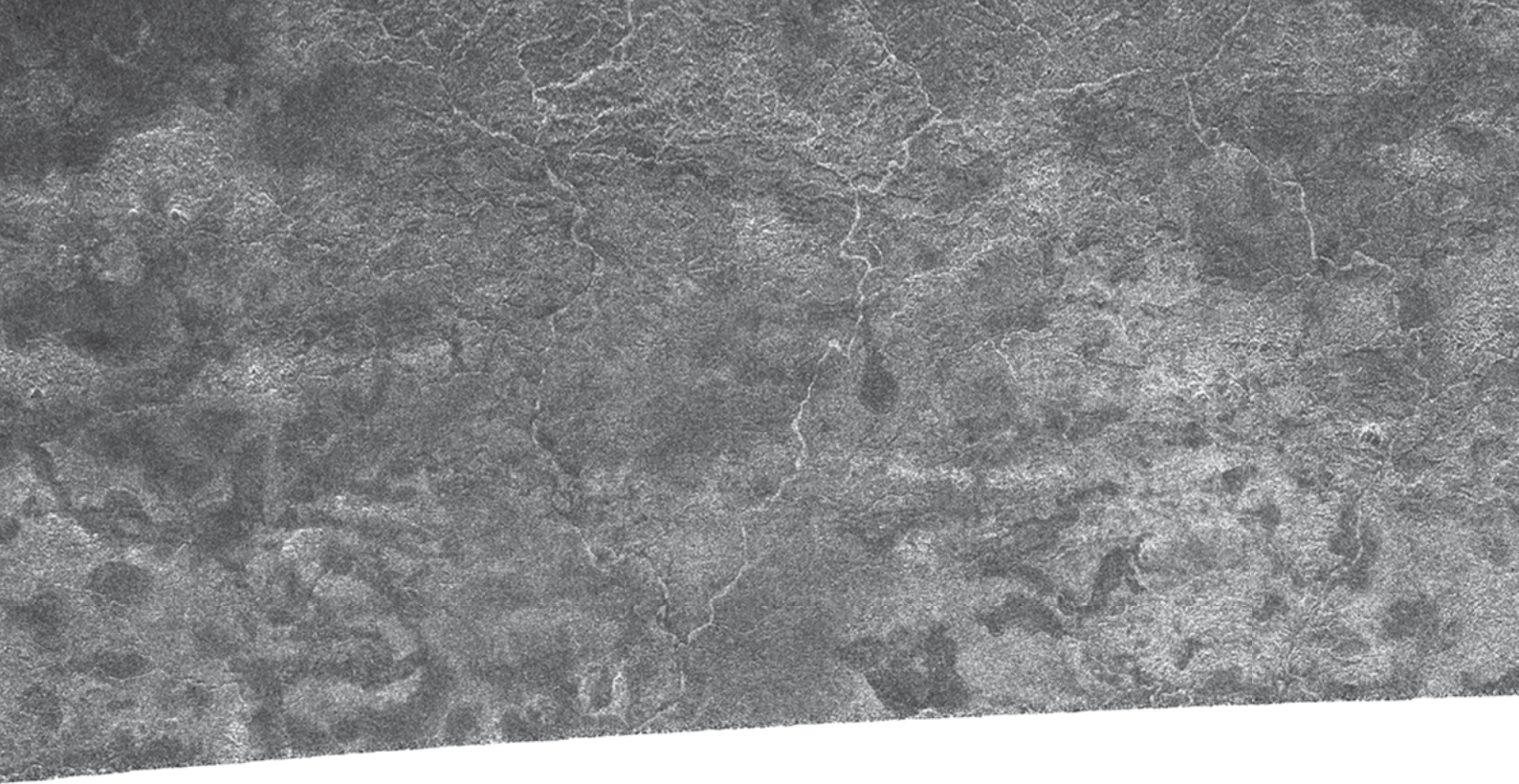
pern verblüffende Ähnlichkeiten in den Witterungsbedingungen. So lassen die Bilder, die HUYGENS und ihre Muttersonde CASSINI von der Titanoberfläche lieferten, eine Landschaft erkennen, die durch Flüsse und Seen geprägt wird (Abb. 1).

Nieselregen aus Stratuswolken

Eine direkte Konsequenz aus den HUYGENS-Daten ist das Vorhandensein von beständigem Hochnebel. Auf der Erde sind derartige Stratuswolken typisch für ruhige Wetterlagen, wenn der untere Teil der Atmosphäre feucht und kalt ist – etwa infolge nächtlicher Abkühlung oder durch Verdunstung nach starkem Regen. Stratuswolken sind fast völlig strukturlös, können den gesamten Himmel bedecken, und aus ihnen fällt leichter Nieselregen. Ein internationales Team, dem unter anderem Tetsuya Tokano und Fritz M. Neubauer vom Institut für Geophysik und Meteorologie in Köln angehören, hat die Daten der HUYGENS-Mission analysiert und gezeigt, dass es ganz ähnliche Wolken auch auf dem Titan geben muss (Nature **442**, 432–435 [2006]).

▲ Abb. 1: Mit Radar (großes Bild) und im Infraroten (kleines Bild) konnte die Sonde CASSINI durch die Dunstschichten in der Titanatmosphäre hindurch auf die Oberfläche des größten Saturnmondes schauen. Mäanderförmige beziehungsweise dunkle Strukturen weisen auf Gewässer hin. (Bilder: NASA/JPL/Space Science Institute)

Dieser Befund ergibt sich aus der Berechnung der relativen Methansättigung in der Atmosphäre, welche die Wissenschaftler aus gemessenen Eigenschaften wie dem Methan-Mischungsverhältnis, Temperatur und Druck abgeleitet haben. Durch den im flüssigen Methan gelösten Stickstoff sinkt der Gefrierpunkt um zehn bis 15 Kelvin, sodass die Methan-Stickstoff-Mischung bis in eine Höhe von 15 Kilometern flüssig bleiben kann. Unter diesen Umständen erhält man bereits ab einer Höhe von sechs Kilometern eine Sättigungsrate von 90 Prozent. Stratuswolken aus flüssigem Methan-Stickstoff-Gemisch sollten dann ab einer Höhe von etwa acht Kilometern auftreten und sich bis in eine Höhe von 15 Kilometern erstrecken, wo schließlich der Gefrierpunkt erreicht wird. Darüber befindet sich eine schmale wolkenfreie Schicht, oberhalb der wiederum eine Eiswolke aus fast



reinem gefrorenem Methan bis in 30 Kilometer Höhe reicht.

Der Hochnebel hüllt Titan praktisch permanent ein, da die Temperatur seiner Oberfläche um ein bis zwei Kelvin zu niedrig ist, um Konvektion zu ermöglichen. Auch andere Effekte, die Instabilitäten in der Atmosphäre auslösen könnten, lassen sich aufgrund der Beobachtungen ausschließen. Der aus den Wolken fallende Nieselregen von etwa 50 Millimetern pro Jahr erklärt die Bodenfeuchtigkeit, die HUYGENS gemessen hat. Da auch schon die Raumsonde VOYAGER 1 während ihres Vorbeiflugs an Titan im Jahre 1980 fast identische Temperaturprofile gefunden hat, geht man davon aus, dass die HUYGENS-Daten für einen großen Teil der Titanoberfläche repräsentativ sind und mehr als die Hälfte der Oberfläche des Saturnmonds von Stratuswolken bedeckt wird.

Zirkulationsmodelle für Erde und Titan

Dennoch reicht dies nicht aus, um die auf Titan beobachteten Flusslandschaften und Seen zu erklären – hierfür sind heftigere Wetterphänomene erforderlich. Anders als auf der Erde sieht man auf dem Saturnmond strukturierte Wolken nur in einem schmalen Band bei 40 Grad südlicher Breite und innerhalb von 30 Grad um den Südpol (Abb. 2).

Irdische Wolken gibt es prinzipiell bei allen Breitengraden, doch auch hier treten charakteristische Strukturen auf, die mit der atmosphärischen Zirkulation zusammenhängen. Die Sonneneinstrahlung ist am Äquator am stärksten; dort erwärmt sich die Luft und steigt auf bis

in eine Höhe von etwa 15 Kilometern. Dabei dehnt sie sich aus und kühlt ab. Dadurch kondensiert der Wasserdampf, und tropische Regengüsse können ausgelöst werden. Da sich die ausgetrocknete Luft nicht weiter erheben kann, weicht sie zu höheren Breiten zwischen 15 und 35 Grad beiderseits des Äquators aus, wo sie allmählich abkühlt und auf trockenere Landstriche herabsinkt. In den gemäßigten Zonen zwischen 40 und 60 Grad nördlicher beziehungsweise südlicher Breite trifft kühle und dichte Polarluft auf warme Luft aus niedrigeren Breiten. Während die kühlere Luft unter den wärmeren Schichten hinweggleitet, steigt die warme Luft auf. Dabei dehnt sie sich aus und kühlt ab, sodass der Wasserdampf kondensiert und Kumuluswolken bildet.

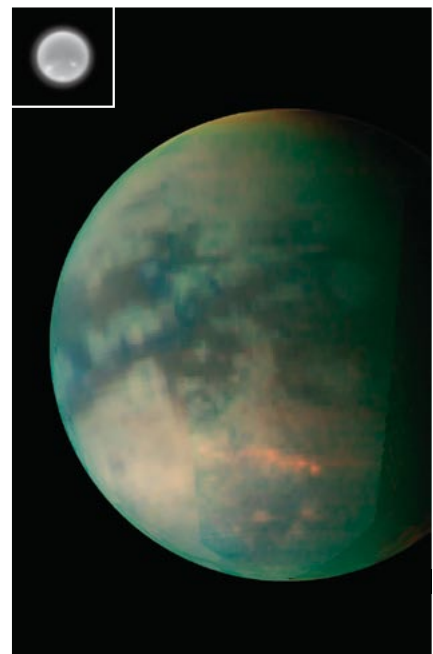
Die Wolkenbildung auf Titan lässt sich auf ähnliche Weise erklären: Auf seiner südlichen Hemisphäre herrscht derzeit Sommer. Durch die Sonneneinstrahlung

steigt dort erwärmte Luft auf, insbesondere bei 40 Grad südlicher Breite, so dass dort ein Band aus Kumuluswolken beobachtet wird. Bei 70 Grad südlicher Breite mischt sich die warme Luft aus niedrigeren Breiten mit kühler Polarluft, wodurch auch hier Kumuluswolken entstehen. Ist Sommer auf der nördlichen Hemisphäre, so spielt sich dort Entsprechendes ab.

Heftige Methanschauer

Zwei spanische Forscher der Universität Bilbao, Ricardo Hueso und Agustin Sánchez-Lavega, haben nun die auf Titan auftretenden Schauer mit Hilfe von Computermodellen im Detail untersucht (Nature 442, 428–431 [2006]). Ihr Modell beinhaltet die gesamte Mikrophysik der Methantropfen (mit Ausnahme von Eisprozessen), insbesondere das Kondensieren, Wachsen, Verdunsten, Verschmelzen und den Niederschlag einzelner Trop-

► Abb. 2: Strukturierte Wolken sind in Titans Atmosphäre im Allgemeinen nur im Bereich des Südpols und in einer Zone bei 40 Grad südlicher Breite zu beobachten. Das Falschfarbenbild nahm die CASSINI-Sonde am 22. Juli 2006 aus 160 000 Kilometer Entfernung auf; das kleine Schwarzweißbild gewann das KECK-Teleskop auf Hawaii am 2. September 2004, als Saturn und Titan knapp 1,5 Milliarden Kilometer von der Erde entfernt waren. (Bilder: NASA/JPL/University of Arizona; KECK Observatory Titan Monitoring Project)



fen. Dabei haben sie zahlreiche Daten der HUYGENS- und VOYAGER-Mission zugrunde gelegt. In einem Ausschnitt der Titanatmosphäre mit einer Grundfläche von 39×39 Quadratkilometern und einer Höhe von 37 Kilometern studierten sie, unter welchen Bedingungen Methan-schauer auftreten können.

Es stellte sich heraus, dass bei 90 Prozent Sättigung der Atmosphäre bereits geringe Temperaturschwankungen von nur einem halben Kelvin heftige Regengüsse auslösen können. Denn dabei kondensiert ein wenig Methan, wodurch Wärme frei wird, die zu Aufwinden mit Geschwindigkeiten bis zu 18 Metern pro Sekunde führt. In einer Wachstumsphase von etwa ein bis drei Stunden Dauer entstehen immer mehr einzelne Tröpfchen, die schließlich Wolken mit bis zu 25 Kilometer Höhe bilden. In der zwei bis vier Stunden währenden Hauptphase setzt dann starker Niederschlag ein, wobei pro Quadratmeter bis 110 Kilogramm Methan abregnen können. Auch danach fallen noch über mehrere Stunden Tropfen nieder.

Doch nicht nur geringe Temperaturvariationen können solche Unwetter auslösen: Auch Aufwinde von etwa einem Meter pro Sekunde reichen aus, wie die Modellrechnungen in ähnlicher Weise gezeigt haben. Nach einem solchen Starkregen sollte sich die Titanoberfläche vorübergehend um etwa ein Kelvin abkühlen. Die Messgeräte der CASSINI-Sonde, die noch immer das Saturn-System erkundet, müssten solche Temperaturänderungen nachweisen können.

Im nächsten Schritt untersuchten die Forscher Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Schauern, wie sie in den dichten Wolkenbändern auftreten. Hierzu simulierten die Forscher einen größeren Ausschnitt aus der Atmosphäre mit einer Grundfläche von 79×49 Quadratkilometern und einer Höhe von 49 Kilometern, in dem zwei Schauer toben. Es zeigte sich, dass bei einem Abstand von 20 Kilometern praktisch keine Wechselwirkung zwischen den Schauern stattfindet. Bei geringerer Distanz ziehen sie sich jedoch gegenseitig an, da beim Kondensieren von gasförmigem Methan ein Unterdruck in beiden Wolken entsteht. Somit bildet sich aus beiden Schauern eine einzige große Wolke mit etwas geringerer Aktivität. Die Wolkenhöhe, Lebenszeit und auch die Entfernung verschiedener Schauer stimmen mit den CASSINI-Daten und bodengebundenen Beobachtungen überein. Die gefundenen Niederschlagsmengen entsprechen schweren Unwettern auf der Erde und sind durchaus geeignet, die beobachtete Flusslandschaft zu erklären.

Allerdings gelang es in den Simulationen nicht, die höchsten beobachteten Dampffahnen mit 40 Kilometer Höhe zu reproduzieren. Dies könnte daran liegen, dass aus Gründen der Rechenkomplexität keine Eisprozesse bei der Entwicklung der Flüssigkeitstropfen betrachtet wurden, die ab der Gefriergrenze in 15 Kilometer Höhe eine Rolle spielen. Die Erfahrung mit dem irdischen Wetter weist jedoch darauf hin, dass solche Prozesse noch heftigere Schauer in noch größeren Höhen erzeugen könnten.

Insgesamt können wir uns inzwischen sicherlich schon ein recht deutliches Bild vom Wettergeschehen auf Titan machen – dem einzigen Himmelskörper im Sonnensystem außer der Erde, der einen »hydrologischen« Kreislauf aufweist. Dennoch sind noch viele Detailfragen offen, und selbst der Ursprung des Methans in der Titanatmosphäre ist noch ungeklärt. Der Saturnmond wird daher sicherlich auch weiterhin ein spannendes Forschungsobjekt bleiben.

DOMINIK SCHLEICHER

PROMISE holt das magnetische Universum ins Labor

Dass Magnetfelder in vielen kosmischen Phänomenen eine zentrale Rolle spielen, ist zwar bekannt, doch hapert es weitgehend an experimentellen Befunden. Mit PROMISE, einem gemeinsamen Experiment des Astrophysikalischen Instituts Potsdam und des Forschungszentrums Rossendorf, gelang der Laborastrophysik nun ein bedeutender Durchbruch.

Vor 13 Milliarden Jahren gab es weder Sterne noch Galaxien. Seitdem hat sich der Kosmos gewaltig ausgedehnt, während sein stofflicher Inhalt sich infolge der Schwerkraft zu Sternen, Planeten, Schwarzen Löchern und anderen Himmelskörpern zusammenballte.

Unser Sonnensystem beispielsweise ist entstanden, als eine lichtjahre-große interstellare Wolke aus Gas und Staub instabil wurde und in sich zusammenstürzte.

Jeder Kubikkilometer der Ursprungswolke findet sich heute auf weniger als einen Kubikmillimeter zusammengepresst wieder.

Wie aber kann ein solcher Kollaps ablaufen? Sollte nicht die Zentrifugalkraft der Schwerkraft entgegenwirken? Denn nicht nur Planeten und Sterne drehen sich – auch die Materiewolke, aus der diese Himmelskörper einst hervorgegangen sind, hat sich gedreht. Sie besaß Drehimpuls, und zwar viel zu viel.

Damit kompakte Gebilde wie Sterne oder gar Schwarze Löcher aus einer kollabierenden Gas- und Staubwolke entstehen können, muss die Rotation der einfallenden Materie fast komplett abgebremst werden. Dies geschieht in einer Akkre-

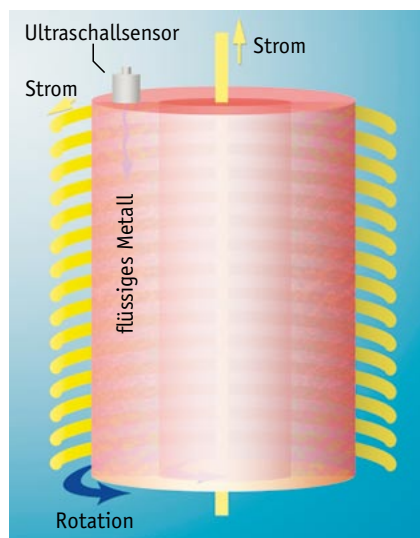


Abb. 1: Das Experiment PROMISE besteht aus zwei ineinander gestellten Zylindern, zwischen denen sich flüssiges Metall befindet. Innerer und äußerer Zylinder rotieren mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Ultraschallsensoren messen die Auf- und Abbewegung des flüssigen Metalls. (Bild: AIP/FZR)