

Leben in nächster Nachbarschaft?

Unter der Eiskruste des Saturnmondes Enceladus könnten einfache Lebensformen existieren.

Pia Friend

Flüssiges Wasser, Energie und Bausteine organischer Chemie gelten als Voraussetzung für die Entwicklung des Lebens auf der Erde. Eine Mission zum Saturnmond Enceladus könnte klären, ob dort ebenfalls Leben möglich ist.

Ob die Erde der einzige Ort im Universum ist, an dem es Leben gibt, beschäftigt die Menschheit bis heute so sehr, dass der jüngste Physik-Nobelpreis die Entdeckung eines Exoplaneten um einen sonnenähnlichen Stern auszeichnete. Bei der Suche nach extraterrestrischen Lebensformen geht es zunächst meist darum, flüssiges Wasser zu finden. Daher ist die „habitable Zone“ definiert als der Abstandsbereich, in dem sich ein Planet von seinem Zentralgestirn befinden muss, damit Wasser dauerhaft in flüssiger Form als Voraussetzung für erdähnliches Leben auf der Oberfläche vorliegen kann.

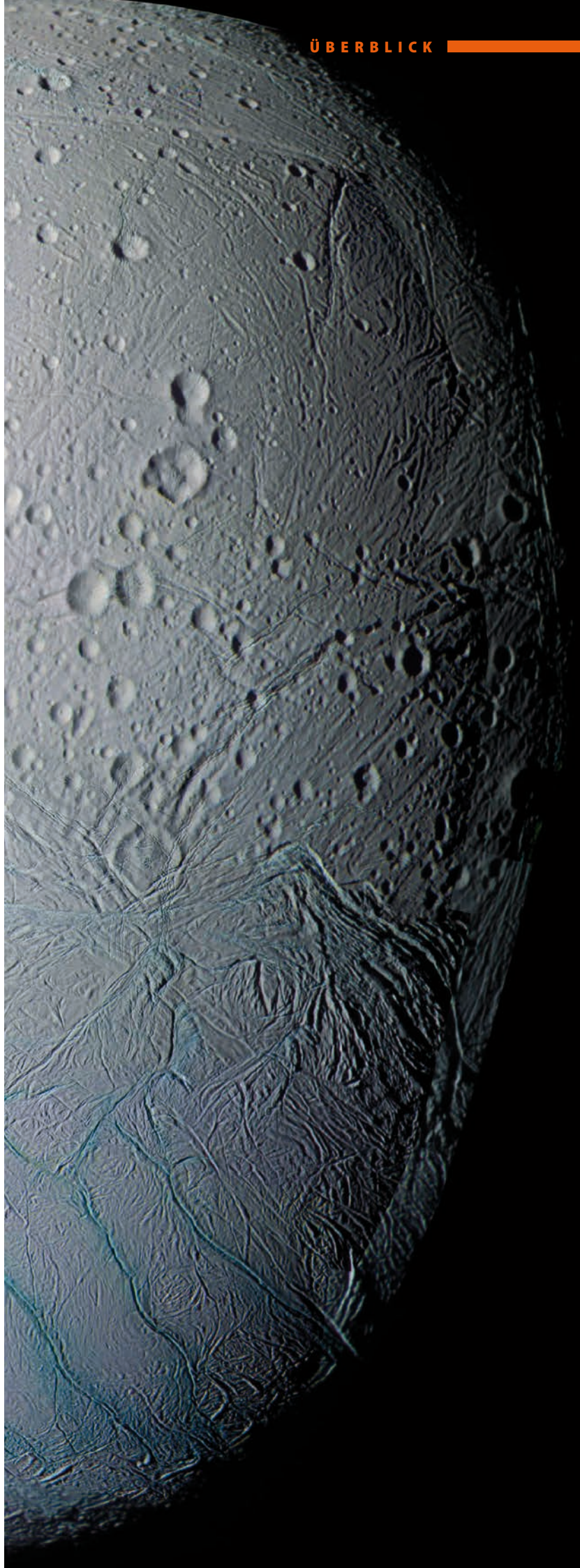
Wasser allein reicht jedoch nicht aus, um Organismen hervorzubringen. Astrobiologen zählen außerdem eine konstante Energiequelle und „biogene“ Elemente, darunter Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel oder Phosphor, als Grundvoraussetzungen auf. Entsprechend beschreiben auch Evolutionsbiologen das Milieu um die sogenannten Schwarzen und Weißen Raucher am Boden der Tiefsee als das optimale Szenario, in dem wahrscheinlich vor mehr als 3,8 Milliarden Jahren aus leblosen Kohlenstoffverbindungen die ersten, wenngleich noch primitiven Lebensformen des Planeten Erde entstanden.

Bei diesen Rauchern handelt es sich um hydrothermale Quellen, angetrieben durch geologische Aktivität: Heißes, mit alkalinen Elementen und Sulfiden angereichertes Wasser dringt aus der Erdkruste durch das Gestein. Beim Kontakt mit dem kalten Ozeanwasser fallen die mitgeführten Stoffe aus und bilden die Schornsteine der Raucher. Außerdem entstehen kleine Partikel die – je nach Zusammensetzung – als schwarze oder weiße Wolken aus den Schornsteinen quellen. Solche Umgebungen, in denen Wasser, Energie und Bausteine organischer Chemie vorliegen, gelten als Voraussetzung, um extraterrestrisches Leben zu ermöglichen. Diese Bedingungen könnten auf Exoplaneten vorliegen. Allem Anschein nach finden sie sich aber auch weit außerhalb der habitablen Zone unseres Sonnensystems, beispielsweise auf dem Saturnmond Enceladus.

Enceladus sieht auf den ersten Blick recht gewöhnlich aus. Er hat einen Durchmesser von etwa 500 Kilometern, und seine äußere Hülle besteht aus gefrorenem Wasser (**Abb. 1**) – ähnlich zu anderen Saturnmonden [1]. Wasser kommt als chemische Verbindung recht häufig im äußeren Sonnensystem vor. Allerdings liegt es weit von der Sonne entfernt normalerweise nicht in flüssiger Form vor, sondern ist zu Eis gefroren. Als Wilhelm Herschel 1789 den Saturnmond Enceladus entdeckte, fiel ihm zunächst nur dessen besondere Helligkeit auf. Im Gegensatz zu anderen Eismonden besteht die Oberfläche auf Enceladus aus besonders reinem, wenig verschmutztem Wassereis, das 99 Prozent des Sonnenlichts reflektiert. Das ist ein Hinweis auf geologische Prozesse im Inneren des Mondes, welche die äußerste Schicht immer wieder erneuern, bevor interstellarer Staub oder Mikrometeoriten diese signifikant verunreinigen können. Gleiches gilt für Einschläge größerer Meteoriten, denen die Saturnmonde wie jeder Himmelskörper ausgesetzt sind, sodass im Laufe der Zeit normalerweise immer mehr Krater entstehen. Nur eine globale Umwälzung und die damit einhergehende Erneuerung der Oberfläche können solche Mulden wieder einebnen. Entsprechend sorgten die 1981 von der Raumsonde Voyager II aufgenommenen Bilder für Aufsehen. Aus einem Abstand von 109 000 Kilometern zeigte sich die vergleichsweise ebene und kraterlose Topographie des Eismondes. Für eine ausgeprägte geologische Aktivität erschien der Himmelskörper jedoch zu klein. Die NASA-Raumsonde Cassini hat von 2004 bis 2017 das Saturnsystem erkundet. Ihre Beobachtungen und Daten belegten schließlich eindeutig, dass Enceladus geologisch aktiv ist [2]. Außerdem ist er wahrscheinlich ein vollständig differenzierter Himmelskörper: Die schweren silikatischen und metallischen Elemente haben sich in seinem Inneren angereichert, während sich in der bis zu hundert Kilometer mächtigen Kruste die leichteren Elemente angesammelt haben, hauptsächlich Wasserstoff und Sauerstoff (**Abb. 2**). Die Gezeitenkräfte des Saturns heizen den massiven Kern von Enceladus so stark auf, dass das angrenzende Eis der unteren Kruste zu flüssigem Wasser geschmolzen ist und einen subglazialen Ozean bildet [3].

Aufnahmen der Raumsonde Cassini zeigen, dass in der Südpolarregion vier etwa einhundert Kilometer lange, parallel verlaufende Gräben existieren, die „Tigerstreifen“ [4]. Innerhalb dieser markanten Streifen ist die Oberflächentemperatur um mehrere Grad Celsius erhöht. Dort befinden sich viele Geysire, die Gas und Staub bis weit ins All ausstoßen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um (Wasser-)Eispartikel sowie im Ozeanwasser gelöste Bestandteile. Der Ursprung dieses Kryovulkanismus befindet sich am Ozeanboden, wo das Wasser auf den erhitzten Kern des Mondes trifft. Während das Wasser das wahrscheinlich poröse Gestein des Kerns umströmt, wäscht es Mineralien

Abb. 1 Eine Eisschicht umhüllt den Saturnmond Enceladus vollständig. Unter ihr herrschen womöglich ähnliche Bedingungen wie an den hydrothermalen Quellen am Ozeanboden der Erde – eine optimale Voraussetzung, damit erste Lebensformen entstehen.



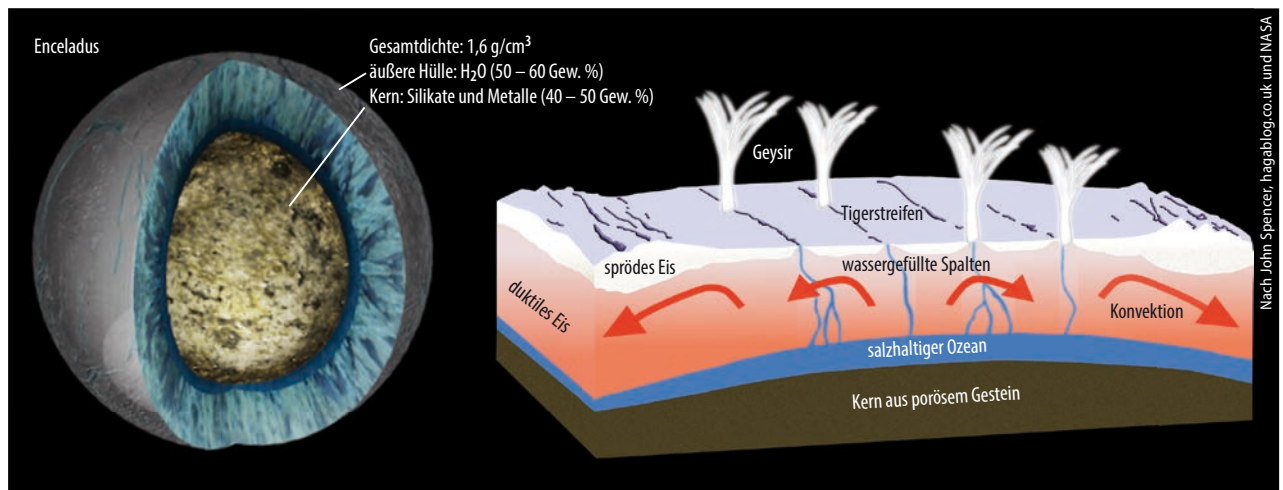


Abb. 2 Obwohl sich Enceladus als einer der Monde des Saturns weit außerhalb der habitablen Zone unseres Sonnensystems befindet, besitzt er unter seiner eisigen Kruste einen globalen Ozean aus flüssigem Wasser. Der Kern des Himmelskörpers besteht aus porösem und zumindest teilweise erhitztem Gestein. In seiner Südpolarregion zeugen Geysire von geothermaler Aktivität.

aus, die potenziell als Bausteine einfacher Lebensformen dienen könnten. Die Bedingungen scheinen denjenigen zu ähneln, die bei den terrestrischen Schwarzen und Weißen Rauchern vorliegen – wie auf der jungen Erde könnten sich hier erste primitive Organismen aus dem biologischen Nichts entwickelt haben.

Neben Wasserdampf und Eisparkeln ließen sich in den Ausstößen der Geysire auf Enceladus auch organische Verbindungen nachweisen. Hauptsächlich handelt es sich dabei um einfache Moleküle wie Methan, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Es finden sich aber auch komplexere, makromolekulare Verbindungen mit Massen größer als 200 u.¹⁾ Obwohl noch nicht alle Daten der Massenspektrometer analysiert sind, steht bereits fest, dass reichlich Aromate und einige Aliphate vorliegen [5]. Beide Gruppen organischer Verbindungen bestehen aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Allerdings enthalten Aromate im Gegensatz zu Aliphaten Ringsysteme. Der organische Anteil in den Eisparkeln liegt im Prozentbereich. Die Verbindung einiger Partikel legt den Schluss nahe, dass sich an der Oberfläche des Enceladus-Ozeans zumindest teilweise ein dünner organisch angereicherter Film befindet. An dieser Grenzschicht zum Eispanzer könnte sich organisches Material in einer separaten Phase aus hauptsächlich unlöslichen und reizunempfindlichen Bestandteilen angereichert haben.

Spätestens mit diesen Resultaten ist Enceladus zu einem der interessantesten Himmelskörper in unserem Sonnensystem avanciert, was die Suche nach extraterrestrischen Lebensformen angeht.

Die EnEx-Initiative

Außerirdisches Leben könnte demnach unter dem mächtigen Eispanzer von Enceladus existieren – einem Himmelskörper unseres Sonnensystems in erreichbarer Entfernung für die Menschheit. Bei den von den Geysiren ausgestoßenen organischen Komponenten handelt es sich aber

lediglich um Bruchstücke, deren Herkunft nicht eindeutig rekonstruierbar ist: Die nachgewiesenen organischen Verbindungen könnten durchaus auch bei anorganischen Prozessen entstanden sein. Um die Frage der Herkunft zu klären, ist es notwendig, das Wasser direkt im Inneren der eisigen Kruste zu untersuchen, noch bevor es ins Vakuum des Weltalls geschleudert wird. Ein Roboter, der sich beispielsweise in der Nähe der Tigerstreifen der aktiven Südpolarregion ins Eis schmilzt, stößt vermutlich schon nach wenigen Kilometern auf eine vom Kryovulkanismus gespeiste wassergefüllte Spalte.

Die Raumsonde Cassini erreichte zusammen mit ihrer ESA-Schwester Huygens gut fünf Jahre nach dem Start das Saturnsystem. Eine Sonde, die einen Schmelzroboter mitführt, bräuchte aufgrund der höheren Nutzlast für den interplanetaren Transfer wohl eher 15 Jahre [6]. Nach weiteren zwei Jahren wäre es möglich, einen Lander von der Sonde abzukoppeln und auf Enceladus innerhalb der Region der Tigerstreifen aufzusetzen. Das Gebiet ist wahrscheinlich sehr rau und uneben, sodass es nötig ist, bereits aus dem Orbit und während des Landevorgangs eine geeignete Position zu ermitteln. Nach der Landung muss der Schmelzroboter eine wassergefüllte Spalte finden und diese im Hinblick auf Lebensspuren untersuchen. Dazu muss er in der Lage sein, in einer Reichweite von mehreren hundert Metern eine wassergefüllte Spalte zu detektieren, sich diese als Ziel zu setzen und schließlich autonom anzusteuern. Wichtig ist, dass er beim Eindringen in die Eiskruste kontinuierlich seine Lage und Position relativ zur Oberflächenstation und zum Ziel ermittelt. Mögliche luftgefüllte Spalten oder Hindernisse im Eis, etwa Meteorite, muss der Roboter erkennen und umfahren (**Abb. 3**).

Die Mission Enceladus Explorer (kurz: EnEx) hat das DLR-Raumfahrtmanagement als Initiative ins Leben gerufen, um einige Schlüsseltechnologien für eine mögliche zukünftige Mission zum Enceladus voranzutreiben. Dazu gehört es, den Schmelzroboter, genannt EnEx-IceMole (**Abb. 4**), zu entwickeln. Die Navigationsfähigkeit und die Autonomie dieser Schmelzsonde stellen besonders große technische Herausforderungen dar.

1) Hier bezeichnet u die Atomare Masseneinheit von Atomen und Molekülen. Dabei entspricht 1 u einem Zwölftel der Masse eines Atoms des Kohlenstoff-Isotops ^{12}C .

Maulwurf mit Schmelzwirkung

Der EnEx-IceMole soll auf den an der FH Aachen entwickelten IceMole-Schmelzsonden beruhen [7]. Mit einem Durchmesser von 15 Zentimetern und einer Länge von zwei Metern besteht er aus einem an der hinteren Haltestruktur der Sonde fest verschraubten Schmelzkopf und einem daran anschließenden Druckkörper. Während herkömmliche Schmelzsonden zylindrisch aufgebaut sind, hat der EnEx-IceMole eine quaderförmige Gestalt. Der mittig auf dem Schmelzkopf sitzende Eisbohrer sowie zusätzliche Thermoelemente an den vier Seitenwänden gehören ebenfalls zur Sonderausstattung. Diese erlaubt ihm eine differenzierte Heizeinwirkung, um sich dreidimensional durch das Eis zu bewegen und dank des Bohrers selbst aufwärts gerichtete Bewegungen auszuführen. Der quadratische Querschnitt wirkt dabei einer Rotation des Roboters durch das Drehmoment der Schraube entgegen. Die Subsysteme, beispielsweise zur Navigation, befinden sich in separaten Boxen im Nutzlastbereich des Druckkörpers, was eine einfache modulare Integration gewährleistet.

Die maximale Heizleistung von 2400 Watt im Kopf des EnEx-IceMole sowie die 600 Watt pro Seitenwand erlauben es ihm, sich mit einer Geschwindigkeit von einem Meter pro Stunde durch das Eis zu schmelzen. Momentan ist die maximale Wegstrecke auf 60 Meter ausgelegt. Stromversorgung, Kommunikation und Datentransfer finden durch ein angeschlossenes Kabel statt. Um ein Zufrieren des Kanals bei der terrestrischen Anwendung zu verhindern, wird das Schmelzwasser abgepumpt. Auf Enceladus wäre das nicht nötig: Aufgrund des geringen Drucks sublimiert das Eis beim Kontakt mit dem heißen EnEx-IceMole dort direkt zu Wasserdampf. Dieser kann bei zunehmender Tiefe allerdings an den Seitenwänden des Schachts rekristallisieren, sodass der Druck bis über den Tripelpunkt von Wasser ansteigt und sich schließlich auch auf dem Saturnmond flüssiges Wasser im Schacht bildet. Im Gegensatz zu den Testreihen mit dem Schmelzroboter auf der Erde, kann der

Das EnEx-Projekt

Am Verbundvorhaben **EnEx – Enceladus Explorer** des DLR-Raumfahrtmanagements waren von 2012 bis 2015 insgesamt acht Partner aus sechs deutschen Hochschulen beteiligt.

Nach seinem Abschluss hat sich die **EnEx-Initiative** gebildet, in deren Rahmen das DLR-Raumfahrtmanagement eine Reihe parallel laufender, eng miteinander verzahnter Einzelvorhaben koordiniert. Die Struktur des Projekts erlaubt es, jederzeit mit neuen Vorhaben zu beginnen und die benötigten Schlüsseltechnologien für eine mögliche Raumfahrtmission zu entwickeln. Dabei fokussieren sich die laufenden Einzel- bzw. Verbundvorhaben jeweils auf einen ganz bestimmten Technologie-Aspekt. Für die notwendige, fortlaufende Abstimmung der einzelnen Vorhaben sorgt unter anderem ein halbjährlich stattfindendes Synergietreffen aller DLR Explorer Initiativen.

Momentane Projektpartner der EnEx-Initiative sind U Bremen, Bergische Universität Wuppertal, FAU Erlangen-Nürnberg, RWTH Aachen, FH Aachen, TU Braunschweig und TU Dresden sowie die Airclip Service GmbH & Co. KG.

FH Aachen / Bernd Dachwald, Clemens Espe

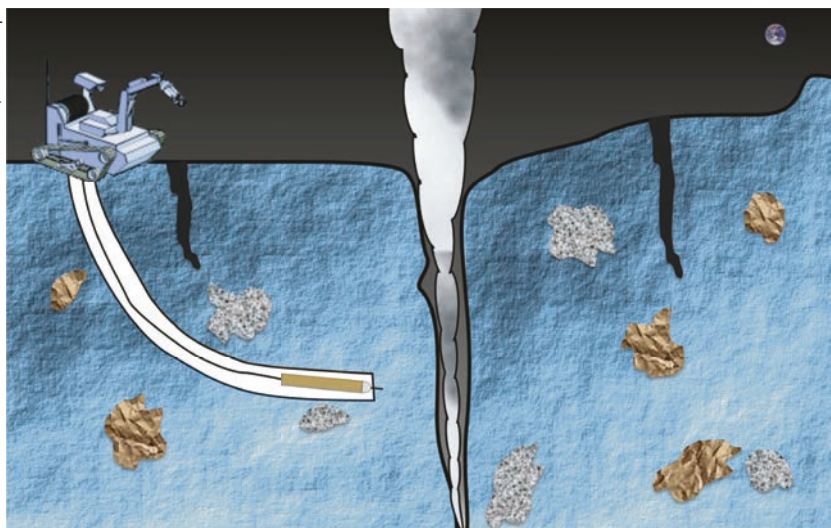


Abb. 3 Im Rahmen der Mission Enceladus Explorer Szenario soll sich ein Roboter durch den Eispanzer des Saturnmondes schmelzen und Proben aus einer wassergefüllten Spalte nehmen.

EnEx-IceMole auf Enceladus auch im Eis verbleiben, nachdem er sein Ziel erreicht hat: Sein biologisches Labor führt er direkt an Bord mit, sodass ein Zufrieren des Schachts nicht zwangsläufig die Mission gefährdet.

Navigieren in eisiger Umgebung

Der EnEx-IceMole muss sich auf Enceladus sicher durch das Eis bewegen und eine wassergefüllte Spalte ansteuern, ohne sich von Hindernissen wie Meteoriten im Eis aufhalten zu lassen. Daher nimmt neben der Ortung und Navigation des Schmelzroboters das Abbilden des Eisuntergrunds auf Enceladus einen besonderen Stellenwert ein. Diesem Thema widmen sich mehrere Teilprojekte der EnEx-Initiative mit unterschiedlichen Ansätzen. Dazu gehören beispielsweise die Ortung mittels akustischer Signale oder mithilfe eines Verfahrens, das auf Magnetfeldmessungen beruht.

Das Abbilden des Eisuntergrunds durch Radarsignale ist ein weiterer Ansatz. Drei auf Radartechnik basierende Systeme sollen den unterschiedlichen Phasen der Enceladus-Mission gerecht werden. Bereits aus dem Orbit (Phase 1) heraus gilt es, die Eisoberfläche abzubilden, um eine geeignete Landeposition ausfindig zu machen. Während des Abstiegs des Landers (Phase 2) ist es wichtig, Strukturen im Eisuntergrund auszumachen und möglichst eine wassergefüllte Spalte zu detektieren. Schließlich befindet sich der EnEx-IceMole auf seinem Weg durch das Eis (Phase 3). Weil die Radartechnik bisher zur Lokalisierung im Eis noch wenig erforscht ist, ergeben sich in allen Phasen besondere Herausforderungen. Brechungseffekte, sowohl am Übergang vom Vakuum zum Eis als auch an möglicherweise vorhandenen Grenzflächen unterschiedlicher Eisschichten, können die Abbildung verzerren und müssen kompensiert werden. Sie beruhen auf den unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Radiowellen in Medien mit verschiedener Permittivität. Ihr Wert lässt sich für das Eis auf Enceladus vor der Mission nicht bestimmen, weil er von Salinität, Temperatur und Porosität des Eises abhängt.

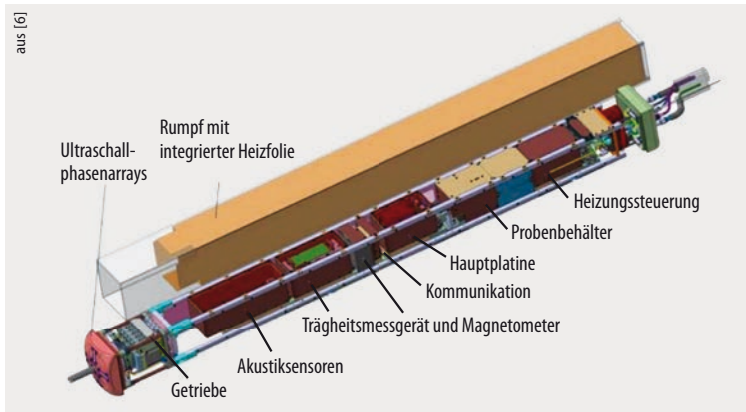


Abb. 4 Die technische Zeichnung des EnEx-IceMoles zeigt den derzeitigen Aufbau mit den wesentlichen Komponenten, die modular austauschbar sind.

Außerdem ist nicht bekannt, ob innerhalb der Eiskruste signifikante Schichtungseffekte auftreten. Um Radiowellen zur Ortung zu nutzen, ist es nötig, die Permittivität während der Mission in situ zu bestimmen.

Darüber hinaus hängt die Abschwächlänge von Radiowellen in Eis von ihrer Frequenz ab: je höher die Frequenz, desto größer die Abschwächlänge. Abstandsmessungen mittels Radar gelingen mit dem FMCW-Verfahren (Frequency-Modulated Continuous Wave radar) nur dann sehr genau, falls sehr hohe Frequenzen von mehreren GHz eine große Bandbreite der Messung ermöglichen. Daher ist ein Kompromiss bei der Wahl der Frequenz nötig, der es zum einen erlaubt, das FMCW-Verfahren anzuwenden, und zum anderen die gewünschte Reichweite gewährleistet. Generell ist die Dämpfung elektromagnetischer Wellen in Eis für Frequenzen unterhalb von 1 GHz gering. Auch im niedrigen einstelligen GHz-Bereich lassen sich in trockenem Eis die benötigten Reichweiten von etwa einhundert Metern erzielen. Allerdings nimmt mit der Frequenz auch die Größe der Antenne signifikant zu: Gute Anpassungseigenschaften bei ausreichender Breitbandigkeit lassen sich nur erzielen, wenn es möglich ist, auch niedrige Frequenzen und damit große Wellenlängen zu senden beziehungsweise zu empfangen. Aus diesen Überlegungen und den Resul-

taten erster Messungen ergibt sich eine Frequenz von etwa 1 GHz als guter Kompromiss: Bei einer Antennengröße des bodengestützten Radars von etwa 15 bis 20 Zentimetern ergibt sich eine Abschwächung in trockenem Eis von etwa 0,05 dB/m. Abhängig vom Signal-Rausch-Verhältnis und den Eiseigenschaften lässt sich damit ein 40 cm³ großes und 200 Meter entferntes Ziel detektieren.

Einmal auf Enceladus gelandet, muss der EnEx-IceMole völlig auf sich alleine gestellt einen Weg durch das Eis finden: Die große Distanz zur Erde verhindert eine Steuerung, weil die Signallaufzeiten wesentlich größer als zwei Stunden sind. Im Rahmen der EnEx-Initiative ist es daher von großer Bedeutung, dem IceMole eine autonome Entscheidungsfindung zu ermöglichen.

Der Mittelbergferner als Testfeld

Um in der Praxis zu testen, ob die Systeme des EnEx-IceMole in eisiger Umgebung funktionieren, dienen Gletscher der Alpenregion als Testfelder. Zuletzt war im Februar vergangenen Jahres der Mittelbergferner in Österreich das Ziel (**Abb. 5**), um erste Messungen von Radiowellen im Eis durchzuführen und die Daten zur Lokalisierung des Roboters zu nutzen. Als Referenzziele dienten Dreifachspiegel mit unterschiedlichen Durchmessern, die mehrere Meter tief im Eis platziert waren. Die einzelnen Spiegel waren verdreht zueinander und übereinander angeordnet, ähnlich wie bei Radarreflektoren, die als Navigationshilfen auf See üblich sind. Ein Flugzeug mit Synthetic Aperture Radar ermittelte Daten des überflogenen Geländeausschnitts (**Abb. 6**). Aus diesen sollte im Anschluss die exakte Lage der Referenzziele bestimmt sowie Informationen zur Eis- und Untergrundstruktur gewonnen werden. Ein Bodenradar lieferte weitere Daten aus dem Eisuntergrund. Um Brechungseffekte an Grenzschichten zu kompensieren, war ein Permittivitätsprofil des Gletschers nötig, das sich aus den Laufzeiten der Radiowellen in unterschiedlichen Tiefen des Gletschers ergab. Dabei dienten die bekannten Abstände der Bohrlöcher für die Spiegel als Referenz, um die Permittivität in Abhängigkeit von der Tiefe zu ermitteln.



Abb. 5 Momentaufnahme vom Testcamp auf dem Mittelbergferner

Erste Auswertungen der Flugzeugdaten erlaubten es, den Untergrund teilweise bis auf das Gestein unter dem Gletscher aufzulösen; auch wasserführende Schichten waren zu erkennen. Die Reflektivität eines Wasserreservoirs auf Enceladus verhält sich wie diejenige des Gesteins. Daher sollte es gelingen, ein Reservoir auf dem Saturnmond aufzuspüren. Allerdings zeigten sich die Referenzziele nur sehr vage, da der Radarquerschnitt der Reflektoren ungefähr in der Größenordnung des umgebenden Schnees liegt. Um deren Sichtbarkeit zu verbessern, müssten bei weiteren Tests andere Reflektoren zum Einsatz kommen.

Ein weiterer Aspekt der Messungen war es, Radar und Akustik gemeinsam zu nutzen, um die Umgebung eines Schmelzroboters zu erkunden. Unter dem Testgelände befand sich zufällig eine wassergefüllte Spalte im Gletscher. Diese nutzt das Forschungsteam, um vor Ort zu testen, ob und wie sich das eingeschlossene Wasserreservoir mit beiden Methoden abbilden lässt. Während sich beim Bodenradar die Spalte recht gut vom überlagernden Schnee absetzt, obwohl dieser sehr feucht war und einen Großteil des Signals absorbiert hat (Abb. 7), konnten die akustischen Daten die Spalte nicht abbilden.

Vom terrestrischen Gletscher zum Enceladus

Alle innerhalb der EnEx-Initiative entwickelten Verfahren und Technologien sowie die gesamte Hardware lassen sich nur in terrestrischem Gletschereis erproben und testen. Aber entspricht dies den Bedingungen, die auf Enceladus vorliegen? Die aus den Cassini-Daten gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass sich diese deutlich von denjenigen in den Alpen oder in der Antarktis unterscheiden (Tabelle). Gletscher entstehen, wenn der Schnee eines Winters im darauffolgenden Sommer nicht vollständig schmilzt. Dann baut sich Jahr für Jahr eine neue Schicht auf und der Gletscher wächst. Frisch gefallener Schnee hat aufgrund der sperrigen sechsstrahligen Form der Schneekristalle ein hohes Luft-zu-Eis-Verhältnis und damit eine geringe typische Dichte von 0,1 bis 0,4 g/cm³. Die Auflast neuer Schneeschichten und thermodynamische Prozesse kom-

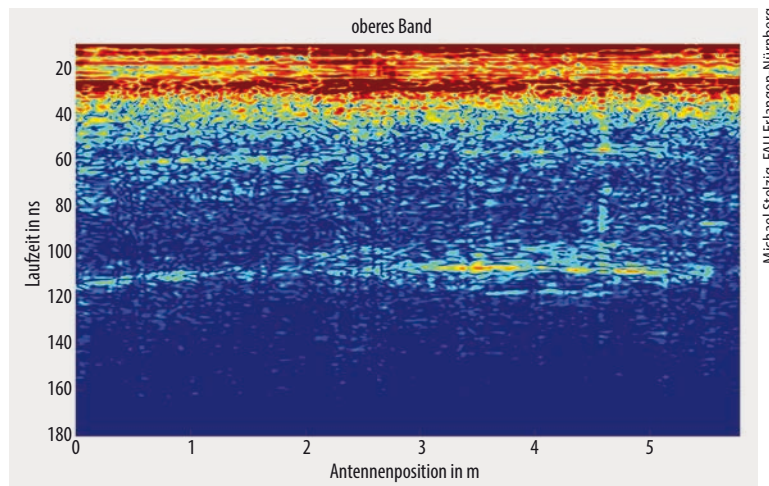
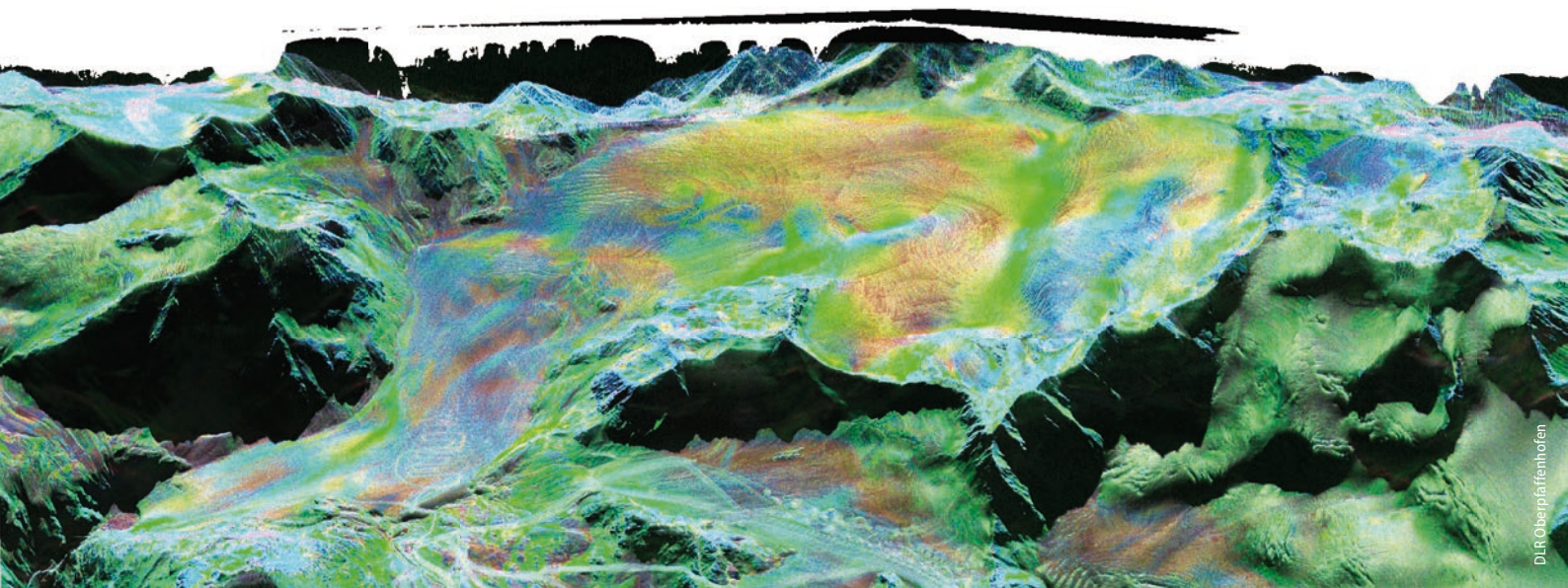


Abb. 7 Das Bodenradar des Gletschers zeigt an der Oberfläche eine stark reflektierende nasse Schneeschicht (rot, gelb) sowie eine wassergefüllte Spalte im Eis.

paktieren diesen Altschnee im Laufe der Zeit: Der Porenraum und das Luft-zu-Eis-Verhältnis verkleinern sich. Bereits nach einem Jahr hat sich Firn gebildet, dessen Dichte per definitionem im Bereich von 0,4 bis 0,83 g/cm³ liegt. Erst in recht großen Tiefen von etwa einhundert Metern ist der Luftanteil so gering, dass von Gletschereis die Rede ist. Selbst hier gibt es noch Porenraum, und die maximale Dichte beträgt zwischen 0,83 und 0,917 g/cm³.

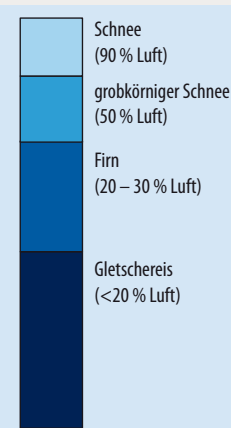
Der größte Teil der Eiskruste auf Enceladus ist hingegen ursprünglicher Natur: Das Eis entsteht, wenn Wasser erstarrt und nicht, wenn Schnee nach und nach kompakter wird. Dies lässt innerhalb der Eiskruste durchgängig eine Dichte von 0,92 g/cm³ vermuten. Allerdings hat der Kryovulkanismus in der Südpolarregion, wo der EnEx-IceMole seinen Abstieg beginnen soll, eine Art Schneeschicht gebildet. Diese Schneedecke könnte wegen der geringeren Gravitation auf Enceladus eine geringere Dichte als Schnee auf der Erde aufweisen. Allerdings stoßen die Kryovulkane keine sternförmigen Schneekristalle aus, sondern abgerundete Eisbruchstücke, die vielleicht kompakter sedimentieren als Schnee. Solche Aspekte können sowohl die Schmelzkraft des EnEx-IceMoles beeinflussen als auch die Ausbreitungs-

Abb. 6 Ein Gletschergebiet lässt sich mithilfe von Radardaten aus der Ferne erkunden. Zur Rekonstruktion der Region um das Testcamp am Mittelferner dienten Aufnahmen nach einem Überflug eines mit Radarantennen bestückten Flugzeugs des DLR Oberpfaffenhofen.




Vergleich der Eiseigenschaften

Eigenschaften	terrestrisches Gletschereis	Eis auf Enceladus
Phase	hexagonale Kristalle (I _h)	hexagonale Kristalle (I _h)
Temperatur	etwa -10 °C	etwa -200 °C
Wasser	enthalten	nicht enthalten
Reinheit	verunreinigt	pures Wassereis
Dichte	30 bis 900 kg/m ³	vermutlich 920 kg/m ³
Schichtung	komplexe Schichtung	vermutlich zwei Schichten



Schnee (90 % Luft)
grobkörniger Schnee (50 % Luft)
Firn (20 – 30 % Luft)
Gletschereis (<20 % Luft)



Schnee
Eis

Tabelle Die Eigenschaften von Eis bei einem terrestrischen Gletscher und unter den auf Enceladus vorherrschenden Bedingungen unterscheiden sich: Insbesondere besteht Gletschereis vermutlich aus einer wesentlich komplexeren Abfolge unterschiedlicher Schichten.

geschwindigkeit der Radiowellen sowie der akustischen Signale – und damit die Lokalisierung im Eis verzerren.

Weitere Bedingungen auf Enceladus lassen sich auf der Erde nur schwer nachstellen, sodass ihre Auswirkungen auf die Mission noch erforscht werden müssen. Berechnungen deuten darauf hin, dass die extrem tiefen Temperaturen des Eises die Schmelzgeschwindigkeit des EnEx-IceMoles stärker beeinflussen als die geringe Anziehungskraft von Enceladus [8]. Eine an der FH Aachen eigens konzipierte Hochvakuumkammer realisiert den Umgebungsdruck auf Enceladus sowie die dort vorherrschenden Temperaturen des Eises von bis zu -196 °C. Eine miniaturisierte und angepasste Schmelzsonde nach Vorbild des EnEx-IceMoles soll in dieser Kammer untersuchen, wie sich diese extremen Bedingungen auf den Schmelzvorgang auswirken.

Unterdessen auf der Erde

Eine Mission zum Enceladus ist derzeit noch nicht konkret geplant. Entsprechend weit in der Zukunft liegt der mögliche Einsatz des EnEx-IceMole im fernen Eis jenseits des Asteroidengürtels. Die Entwicklungen der EnEx-Initiative lassen sich aber auch auf der Erde nutzen. Beispielsweise hat sich im November 2014 der Roboter in der Antarktis knapp zwanzig Meter tief ins Eis geschmolzen. Dabei gelang es erstmals, kontaminationsfrei Proben aus einem subglazialen antarktischen See zu nehmen. Die akustischen Komponenten des EnEx-IceMoles sind Teil von einigen optischen Modulen der neuen Generation der IceCube-Detektoren. Auch die radarbasierten Ortungstechniken könnten sich für das Neutrino-Observatorium am Südpol nutzen lassen.

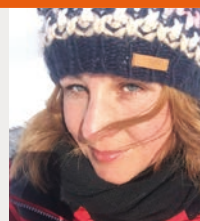
Geophysik und Glaziologie profitieren ebenfalls von der Expertise, die im Rahmen der EnEx-Initiative entsteht. Schon heute sind Radarmessungen das aussagekräftigste Instrument, um Gletscher zu erkunden. Eine optimierte Reichweite und Auflösung der Radiowellen im Eis könnte beispielsweise helfen, neue subglaziale Seen zu kartieren. Aus der Permittivität ergeben sich Informationen zur Be-

schaffenheit des Eises, sodass sich aschereiche Schichten und damit vulkanische Aktivität nachweisen lassen. Bisher sind solche Untersuchungen nur im Labor an Bohrkernen, nicht aber in situ im Gletschereis möglich. Jenseits der Grundlagenforschung könnten die Algorithmen, welche die autonome Entscheidungsfindung des EnEx-IceMoles beschreiben, auch für eigenständig fahrende Autos hilfreich sein. Ein gerade neu angelaufenes Projekt der EnEx-Initiative soll darüber hinaus einen Eislasers entwickeln, der – montiert auf einer Drohne – lawinengefährdete Hänge aufspüren könnte. So finden die Vorbereitungen zum möglichen Nachweis extraterrestrischen Lebens in unserem Sonnensystem auch praktische Anwendungen auf der Erde.

Literatur:

- [1] P. M. Schenk et al. (Hrsg.), Enceladus and the Icy Moons of Saturn, Univ. of Arizona Press, Tucson, USA (2018)
- [2] C. C. Porco et al., Science **311**, 1393 (2006)
- [3] J. H. Waite et al., Nature **460**, 487 (2009)
- [4] J. R. Spencer et al., Science **311**, 1401 (2006)
- [5] F. Postberg et al., Nature **558**, 564 (2018)
- [6] K. Konstantinides et al., Acta Astronautica **106**, 63 (2015)
- [7] B. Dachwald et al., Annals of Glaciology **55**, 14 (2014)
- [8] K. Schüller und J. Kowalski, Icarus **317**, 1 (2019)

Die Autorin



Pia Friend studierte Geologie und Paläontologie in Köln und promovierte anschließend in Mineralogie über Meteorite. Seit Januar 2018 arbeitet sie an der Bergischen Universität Wuppertal am Lehrstuhl für Astroteilchenphysik. Im EnEx-Projekt widmet sie sich speziell der radarbasierten Ortung im Eis.

Ihre Freizeit verbringt sie am liebsten mit ihren beiden Kindern.

Dr. Pia Friend, Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal