

qualitativ. Sie weist dann in einem sehr kleinen Frequenzbereich in der Nähe der Resonanzfrequenz der einzelnen Getränkedosen einen zusätzlichen Ast auf, für den die Kreisfrequenz ω der Bloch-Wellen mit steigender Wellenzahl k sinkt. Die Gruppengeschwindigkeit $d\omega/dk$ wird damit bezogen auf die Phasengeschwindigkeit ω/k negativ.

Umfangreiche analytische Rechnungen und numerische Simulationen zeigen, dass sich die zugehörigen Bloch-Wellen effektiv wie Schallwellen in einem isotropen Material mit einer negativen Brechzahl verhalten [2]. In Analogie zur Brechzahl in der Optik sind so der scharfe Fokus und die verbesserte Auflösung anschaulich zu verstehen: Entscheidend ist in der Optik gemäß des Fermatschen Prinzips der optische Weg, der in einem homogenen Material durch

das Produkt aus geometrischem Weg und Brechzahl gegeben ist. Bei mehreren Materialien oder Bereichen addieren sich die einzelnen optischen Wege auf. Ist ein Material mit negativer Brechzahl beteiligt, können sich die optischen Wege zu Null wegheben. Optisch gesehen haben damit ein Objekt und sein Bild den Abstand Null [5]. So verwundert es nicht weiter, dass die übliche Beugungsbegrenzung nicht gilt.

Negative Brechzahlen und „perfekte Linsen“ wurden vor einigen Jahren in der Optik heiß diskutiert [5]. Negative optische Brechzahlen, die auf magnetischen Metamaterialien basieren, ließen sich zwar im sichtbaren Spektralbereich experimentell demonstrieren [6], eine verbesserte Auflösung war aber nicht überzeugend nachweisbar. Das lag unter anderem an der hohen

optischen Absorption der Metamaterialien. Lässt sich vielleicht der neue akustische Zugang auf Lichtwellen oder andere Wellen in der Physik übertragen? Nötig wären dafür Resonatoren mit geringen Verlusten, die Abmessungen deutlich unterhalb der Wellenlänge sowie eine große Kopplung untereinander besitzen. Bislang war es noch nicht möglich, diese Bedingungen im optischen Bereich zu realisieren.

Martin Wegener

Prof. Dr. Martin Wegener, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 76128 Karlsruhe

- [1] J. Bewersdorff, Ch. Eggeling und T. A. Klar, *Physik Journal*, Dezember 2014, S. 23
- [2] N. Kaina et al., *Nature* **525**, 77 (2015)
- [3] H. von Helmholtz und J. Reine, *Angew. Math.* **55**, 25 (1858)
- [4] M. Kadic et al., *Rep. Prog. Phys.* **76**, 126501 (2013)
- [5] J. B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3966 (2000)
- [6] C. M. Soukoulis, S. Linden und M. Wegener, *Science* **315**, 47 (2007)

■ Mars mit Hang zum Wasser?

Trotz tiefer Temperaturen und niedrigem Druck scheint es Wasser auf dem Mars zu geben. Möglich ist dies durch verschiedene Salzverbindungen, die den Gefrierpunkt senken.

Im September machte die NASA Schlagzeilen mit der Nachricht, das Geheimnis des Mars sei gelöst. Den Grund für diese Sensationsmeldung lieferten Forscher um Alfred McEwen vom Lunar & Planetary Laboratory der University of Arizona und um Lujendra Ojha vom Georgia Institute of Technology, die ihre neuesten Ergebnisse zu „Recurrent Slope Lineae“ vorgestellt hatten [1]. Der Ausdruck lässt sich am besten mit „wiederkehrende Hanglinien“ übersetzen und beschreibt dunkle Linien bzw. Streifen, die sich wiederholt zu bestimmten Jahreszeiten an manchen Hängen auf dem Mars bilden und wieder verschwinden. Diese Streifen waren vor vier Jahren erstmals entdeckt worden und hatten damals tatsächlich für eine Sensation gesorgt [2]. Sie ließen sich nämlich nicht einfach mit trockenen Hangrutschungen erklären, da sie sich viel langsamer ausbreiteten (Abb. 1), als es von Lawinen aus trockenem, granulearem Material

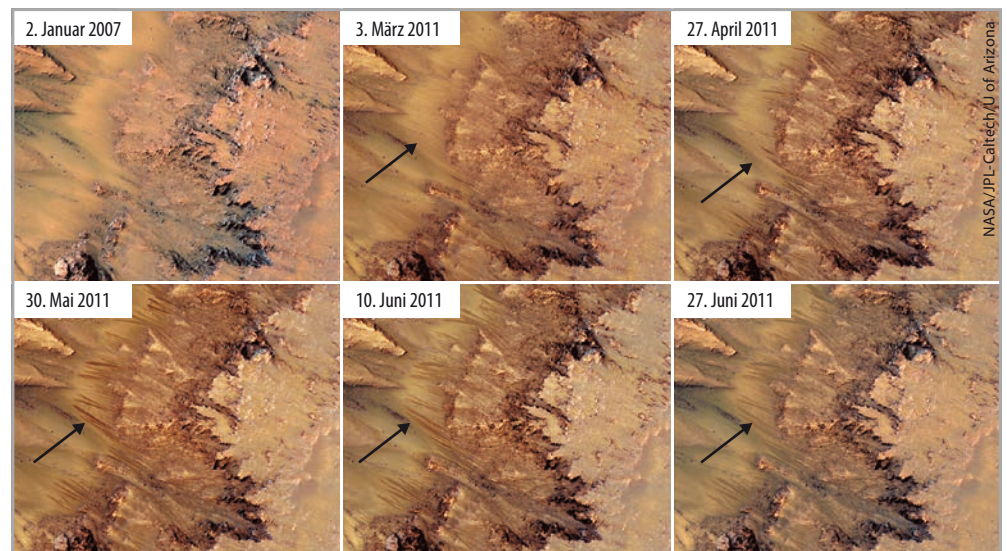


Abb. 1 Im Palikir Krater in der südlichen Hemisphäre des Mars zeigen sich wiederkehrend Hanglinien. Diese erscheinen als dünne, dunkle Streifen, die sich hangabwärts (nach links oben) ausbreiten.

Erstmals tauchten sie sehr schwach auf einem Bild vom 3. März 2011 auf. Besonders deutlich zeigten sie sich zwischen dem 27. April und dem 30. Mai 2011.

zu erwarten wäre. Zwar war es nicht möglich, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Linien direkt zu messen. Denn sie zeigten sich lediglich auf Bildern der hochauflösenden Kamera HiRISE auf dem

Mars Reconnaissance Orbiter, die im Abstand von Tagen oder Wochen aufgenommen wurden. Dennoch war klar, dass nur ein Prozess, der mit Kriechen oder Sickern zu tun hat, die Beobachtungen erklä-

ren kann: Einige Linien haben sich mit durchschnittlich einigen Metern pro Tag ausgebreitet. Daher lag die Vermutung nahe, dass hier Wasser im Spiel sein muss. Diese Interpretation wurde gestützt durch die Orte und Zeitpunkte, an denen die Hanglinien auftraten: Sie bildeten sich offensichtlich nur im Sommer und vorwiegend in den mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre an sonnenzugewandten Hängen. Dort können Temperaturen von 250 bis 300 K vorherrschen.

Diese Abhängigkeit von der Temperatur deutet darauf hin, dass sich tages- und jahreszeitabhängig flüssiges Wasser sammelt, das den Hang hinabsickert. Dieses Wasser müsste nicht direkt an der Oberfläche vorliegen, denn auch eine durch Kapillarkräfte verursachte leichte Feuchtigkeit an der Oberfläche könnte die relativ dunkle Albedo der Hanglinien erklären. Die Hanglinien verblassten allmählich, bildeten sich aber in den darauffolgenden Jahren an denselben Stellen wieder.

Ihre Entdeckung warf sofort Fragen auf: Wie ist flüssiges Wasser an oder nahe der Marsoberfläche zu erklären? Die physikalischen Bedingungen dort sind ziemlich gut bekannt, und bei dem geringen Atmosphärendruck und den tiefen Temperaturen dürfte flüssiges Wasser eigentlich nicht stabil sein, sondern würde sofort kochen und verdampfen oder gefrieren. Einer-

seits deuteten also morphologische Beobachtungen auf Wasser hin, andererseits schien die Physik genau dies auszuschließen.

Schon im ursprünglichen Artikel wiesen die Entdecker der Hanglinien daher auf Salzlösungen als möglichen Ausweg aus diesem Paradoxon hin [2]: Je nach Zusammensetzung können sie den Gefrierpunkt von Wasser deutlich erniedrigen und die Verdampfungsrate um eine Größenordnung verringern. Die Idee war nicht neu: Schon vor mehr als 30 Jahren hatten Forscher über die Existenz von Salzlösungen auf dem Mars nachgedacht. Kandidaten für mögliche hygroskopische Salze gab es ebenfalls: 2009 hatte die Phoenix-Sonde in der Nähe der nördlichen Polargebiete des Mars Perchlorate gefunden [3]. Der Mars-Rover Curiosity war im Gale Krater ebenfalls auf Perchlorate gestoßen [4], zudem hatten nachträgliche Analysen der Viking-Lander-Messungen aus den Siebzigerjahren Hinweise auf diese Salze ergeben.

Als Wissenschaftler Hanglinien in niedrigeren Breiten gefunden haben [5], wurde wieder über Salzlösungen spekuliert. Allerdings erwies sich der Nachweis als schwierig. Anhydrierte Salze besitzen im sichtbaren und nahen Infrarot-Wellenlängenbereich der Spektrometer auf Marssonnen in der Umlaufbahn keine charakteristischen Merkmale. Außerdem ist ihre räumliche Auf-

lösung (bis etwa 20 Meter pro Bildpunkt) im Allgemeinen zu gering, um die Hanglinien individuell erfassen zu können. Denn diese sind meist nur maximal fünf Meter breit. Zunächst verlief die Suche nach Salzen daher erfolglos [6].

Doch war der fehlende Nachweis aus dem Orbit natürlich kein Beweis gegen die Rolle von Salzen beim Hanglinienwachstum. Eine Arbeit des Curiosity-Teams lieferte zusätzliche Argumente für ihre mögliche Bedeutung: Die Forscher um Javier Martín-Torres hatten nachgewiesen, dass in den obersten 5 bis 15 cm des Marsbodens im Gale Krater Bedingungen herrschen, welche die zeitweise Verflüssigung (Deliqueszenz) von Perchloraten ermöglichen [7]. Dies wäre am wahrscheinlichsten in der Nacht und in den frühen Morgenstunden der Fall, wenn die relative Luftfeuchtigkeit ihren maximalen Wert erreicht. Theoretische Überlegungen deuten darauf hin, dass diese Verflüssigung wichtig ist, damit flüssiges Wasser auf dem Mars existieren kann [8]. Ein sog. eutektisches System aus Wasser und Magnesiumperchlorat ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$) erreicht seinen eutektischen Punkt beispielsweise erst bei 210 K – der Gefrierpunkt verringert sich also um etwa 60 K. Dies kann die Hanglinien physikalisch erklären, allerdings fehlte der Nachweis der Salze an ihren Bildungsorten.

Mit der jüngsten Arbeit ist dieser Nachweis nun erbracht [1]. Erstautor Lujendra Ojha hatte die Hanglinien ursprünglich eher durch Zufall entdeckt, als er mehrere HiRISE-Bilder derselben Gegend zu Stereobildpaaren verarbeiten wollte. Mit einer speziellen Technik konnte er die Spektrometerdaten aus der Umlaufbahn punktweise analysieren und fand zum Zeitpunkt der größten Ausdehnung der Hanglinien tatsächlich spektrale Hinweise auf hydrierte (wasserhaltige) Salze. Magnesiumperchlorat, Magnesiumchlorat und Natriumperchlorat besitzen bei 1,4 μm , 1,9 μm und 3 μm Absorptionsbanden. Diese Entdeckung kam allerdings keineswegs unerwartet. Zudem blieb die wichtigste

KURZGEFASST

■ Wo sind die Gravitationswellen?

Elf Jahre lang hat ein Team von der Australian Telescope National Facility mit dem Parkes-Radioteleskop die Ankunftszeit von Radiopulsen untersucht, die 24 Pulsare abgestrahlt haben. Trotz einer Genauigkeit von einer Zehnmilliardstelsekunde entdeckten die Wissenschaftler keine Abweichungen, die durch den Gravitationswellenhintergrund zu erwarten wären. Falls die aktuellen Modelle der Galaxienentwicklung korrekt sind, lautet das Ergebnis der Suche: Mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90 Prozent existieren die vorhergesagten Gravitationswellen nicht.

R. M. Shannon et al., *Science* **349**, 1522 (2015)

■ Domänen heiß auf Draht

Forschern der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) ist es erstmals gelungen, die thermoelektrische Auswirkung einer einzelnen magnetischen Domänenwand zu messen. Beim sog. Seebeck-Effekt führt ein Temperaturunterschied zwischen den Enden eines metallischen Drahtes zu einer elektrischen Spannung zwischen den Drahtenden. Deren Größe hängt von den elektrischen und magnetischen Materialeigenschaften ab. Die PTB-Forscher zeigten, dass die An- oder Abwesenheit der Domänenwand auch die von dem Draht erzeugte Thermospannung messbar ändert.

P. Krzysteczko et al., *Phys. Rev. B* **92**, 140405(R) (2015)

Frage offen: Woher kommt das Wasser?

Jede der möglichen Antworten scheint problematisch: Das Wasser könnte aus der Atmosphäre stammen, doch sie enthält nur sehr wenig Wasser und würde am Boden nur eine wenige Mikrometer dünne Flüssigkeitsschicht bilden. Auch Grundwasserleiter scheiden als Erklärung aus, da die Hanglinien zum Teil hoch oben an Berggipfeln beginnen, wo kein solcher Leiter zu erwarten ist. Schließlich könnte Eis oder Schnee schmelzen, was aber an den fraglichen Stellen und zu den Jahreszeiten ebenfalls wenig plausibel ist. Die Forscher schließen allerdings nicht aus, dass es weitere, noch unbekannte Alternativen gibt und dass sich nicht alle Hanglinien an allen Orten auf die gleiche Weise bilden.

Leben auf dem Mars?

Ein wichtiger Gesichtspunkt ist die mögliche Habitabilität der Hanglinien. Flüssiges Wasser ist die Voraussetzung allen uns bekannten Lebens. Jede solche Entdeckung heizt Spekulationen über extraterrestrisches Leben an. Die Forschung an Analogien auf der Erde kann dabei wichtige Anhaltspunkte liefern. In der Antarktis gibt es sehr ähnliche Phänomene, die durch das Schmelzen von Schneeresten und Eislinsen entstehen [9]. Das Schmelzwasser sickert in oberflächennahen Bereichen langsam hangabwärts und transportiert dabei erhebliche Mengen an Salzen, die von chemischer Verwitterung und der Lösung von Salzen im Boden stammen. Interessanterweise sind diese Erscheinungen trotz des flüssigen Wassers in den ansonsten extrem kalten und trockenen Polarwüsten der antarktischen Trockentäler keine besonders attraktiven Lebensräume. Die hohen Salzgehalte erlauben es nur sehr salztoleranten Organismen, sie zu besiedeln. Insofern ist Zurückhaltung bei der Beurteilung der Hanglinien als mögliche Habitate auf dem Mars angebracht. Das Wasser ist nur sporadisch verfügbar und stark salzhaltig, sodass mögliche Lebewesen sehr widerstandsfähig sein müssen. Andererseits

ist bekannt, dass die Verflüssigung hygroskopischer Salze in hyperariden Wüsten mitunter die einzige Wasserquelle für Lebewesen ist.

Zunächst ist es aber erforderlich, genau zu verstehen, wie sich die Hanglinien bilden und woher das Wasser kommt. Aufschluss könnten zukünftige Beobachtungen geben. Nach wie vor ist unklar, zu welcher Tageszeit genau sich Hanglinien bilden. Die HiRISE-Kamera kann aufgrund der speziellen Umlaufbahn des Orbiters nur am lokalen Nachmittag beobachten. Vermutlich bilden sich die Hanglinien jedoch eher am Morgen.

Eine weitere Aufgabe wird es sein, die Temperatur und den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre hochauflösend zu messen. Tatsächlich gibt es Überlegungen der NASA in diese Richtung. Für zukünftige Landesonden und Rover sind Hanglinien ein attraktives Ziel. Doch alle Stellen, an denen flüssiges Wasser zu erwarten ist, gelten als „Spezielle Regionen“. Dort dürfen nur Sonden landen, die strikte Obergrenzen für ihre Mikrobenlast einhalten. Das soll sinnvollerweise verhindern, dass man irdische

Organismen zum Mars bringt und diese dank des Wassers überleben und sich gar vermehren. Der Nachweis von originär marsianischem Leben auf dem Mars wäre in diesem Fall schwer oder gar nicht möglich. Die Hanglinien spielen hier eine wichtige Rolle. Das Geheimnis auf dem Mars ist jedenfalls nicht – wie die NASA verkündete – vollständig gelöst, weil der Ursprung des Wassers noch unklar ist.

Ernst Hauber

- [1] L. Ojha et al., *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2546 (2015)
- [2] A. S. McEwen et al., *Science* **333**, 740 (2011)
- [3] M. H. Hecht et al., *Science* **325**, 64 (2009)
- [4] D. P. Glavin et al., *J. Geophys. Res.* **118**, 1955 (2013)
- [5] A. S. McEwen et al., *Nature Geosci.* **7**, 53 (2014)
- [6] L. Ojha et al., *Geophys. Res. Lett.* **40**, 5621 (2013)
- [7] F. J. Martín-Torres et al., *Nature Geosci.* **8**, 357–361 (2015)
- [8] D. Möhlmann und D. Thomsen, *Icarus* **212**, 123 (2011)
- [9] J. S. Levy et al., *Geol. Soc. Amer. Bull.* **123**, 2295 (2011)

REGELMÄSSIG ANGEECKT

Wenn glühend heiße Lava an die Erdoberfläche tritt, kühlt sie schnell aus und lässt Basaltsäulen entstehen. Unverkennbar ist dabei die hexagonale Grundfläche der Säulen – ein faszinierendes Beispiel für Musterbildung. Schreitet die Abkühlung von der Oberfläche ins Innere des Materials voran, ergeben sich aber zunächst recht-

eckige Risse. Erst durch weitere Bruchvorgänge entstehen regelmäßige Sechsecke. Kürzlich simulierten Forscher aus Dresden mittels iterativer finiter Elemente, dass die Freisetzung von ortsgebundener Dehnungsenergie die Musterbildung antreibt. M. Hofmann et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 154301 (2015)



Fotolia / aitorphoto