

■ Rätsel der Mars-Wüsten

Der Sandtransport auf dem Roten Planeten zeigt überraschende Unterschiede zu irdischen Verhältnissen.

Wind erzeugt beeindruckende Landschaften aus Sand in Wüsten und Küstengebieten unseres Planeten. Wichtigster Sandtransportmechanismus ist dabei die „Saltation“: Vom Wind beschleunigt, vollführen die Sandkörner ausgedehnte Sprünge und schleudern beim Aufprall auf den Boden weitere Partikel nach oben („Splash“), die wiederum Teil der Saltationswolke werden [1]. Dieser Prozess lässt auch auf dem Mars Dünen entstehen (Abb. 1), deren Formen identisch zu irdischen Dünen sind. Doch der Rover Curiosity machte bei seinem ersten Ausflug in einem Marsdünenfeld eine Entdeckung, die auf eine einzigartige Physik des Sandtransports auf dem roten Planeten hindeutet [2].

Auf der Erde gibt es hauptsächlich zwei Arten winderzeugter, „äolischer“ Sandgebilde: Rippel, deren Breite λ etwa 10 Zentimeter beträgt, und Dünen, die nie kleiner als 10 Meter sind, aber über 100 Meter breit sein können [1]. Die typischen Längenskalen von Rippeln und Dünen weichen also um mehrere Größenordnungen voneinander ab, da sie aus völlig verschiedenen physikalischen Instabilitäten stammen.

Eine Düne ist eine hydrodynamische Instabilität [3, 4]. Trifft der Wind auf einen Sandhügel, verdichten sich über diesem die Stromlinien, und die Windgeschwindigkeit nimmt zu (Abb. 2a). Die Fernwirkung turbulenter Fluktuationen führt dazu, dass die maximale Windstärke bereits an der windzugewandten (Luv-)Seite auftritt,



Abb. 1 Auch auf dem Mars gibt es Dünen, etwa in der Region „Nili Patera“ im ausgedehnten Plateau „Syrtis Major“. Das

Foto stammt von der HiRISE-Kamera des Mars Reconnaissance Orbiter. Der gezeigte Ausschnitt ist rund 750 Meter breit.

doch die maximale Winderosion zeichnet sich nicht gleich an derselben Stelle ab. Der Saltationsfluss, d. h. der Massenfluss der Teilchen pro Zeit- und Längenskala, benötigt eine Relaxations- bzw. Satturationslänge (L_s), um sich an eine neue Windstärke anzupassen [1, 3]. Diese Relaxationslänge wird hauptsächlich von der Trägheit der Partikel und einen durch Splash bedingten, kaskadenartigen Anstieg der Teilchenanzahl in der Saltationswolke bestimmt [3, 4]. Wird der maximale Saltationsfluss noch an der Luv-Seite erreicht, kommt es am Hügelkamm zur Netto-Sandabscheidung, und der Hügel entwickelt sich zu einer Düne. Diese Bedingung erfüllen Hügel, die eine Mindestgröße $\lambda \sim 20 L_s$ überschreiten [3].¹⁾ Erst

vor wenigen Jahren ist es gelungen, die wichtigsten Faktoren für L_s zu erfassen und eine Gleichung als Funktion der atmosphärischen Dichte und Viskosität aufzustellen [5]. Daraus ergeben sich beim Mars Werte für L_s von etwa fünf bis zehn Metern. Das stimmt sehr gut mit den beobachteten Mindestdünenhöhen von 100 bis 200 Metern überein. Durch die Sandabscheidung am Dünenkamm wird der Lee-Hang zunehmend steiler. Überschreitet dessen Steigung den Böschungswinkel des Granulats ($\sim 34^\circ$), wird die Lage instabil, und die Körner rutschen den Lee-Hang hinab [1, 3].

Die Dünenoberfläche ist jedoch nie glatt, sondern mit Rippeln bedeckt – auch Impact-Rippel genannt. Diese setzen sich aus Teilchen zusammen, deren Energie für die Saltation nicht ausreicht, wohl aber wenige kleine Sprünge (Reptation) vor dem endgültigen Halt erlaubt (Abb. 2b). Die Rippelinstabilität beginnt, wenn sich solche Partikel in einige Korngrößen mächtige Hügel zusammenballen. Die Lee-Seite der Hügel bleibt weitgehend geschützt vor den Stößen saltierender Körner. Geraten Teilchen in Reptation an diese Seite, bleiben

1) Auf der Erde beträgt diese etwa 10 m, da L_s bei 50 cm liegt.

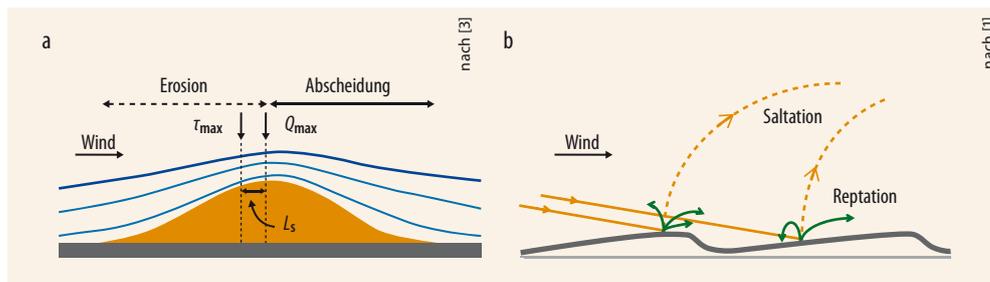


Abb. 2 Wenn die Stromlinien des Windes auf einen Sandhügel treffen und sich verdichten (a), kann eine Düne entstehen. Gezeigt sind die Punkte maximaler

Windstärke bzw. Scherspannung τ_{\max} des Windes am Boden und maximalen Sandflusses Q_{\max} . Impact-Rippel entstehen durch Sprünge der Sandkörner (b).

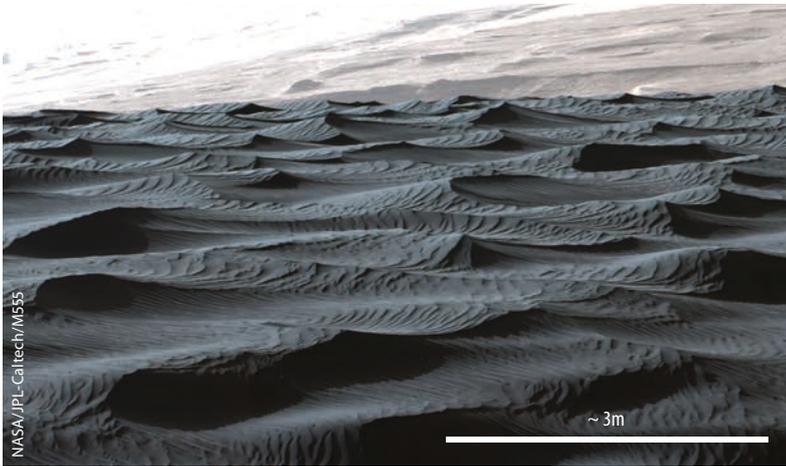


Abb. 3 Auf der Bagnold-Düne im Gale-Krater fand der Rover Curiosity zwei Rippelarten. Die größeren „Large Martian

Ripples“ (LMR) sind etwa drei Meter breit und besitzen keine Entsprechung auf der Erde.

sie dort gefangen. Auf diese Weise wachsen die Hügel in Rippeln heran. Die Winderosion nimmt mit zunehmender Rippelgröße jedoch immer stärker zu, sodass Impact-Rippel nie höher als ein bis zwei Zentimeter werden. Die von den Marssonnen gesichteten Rippel sind mit etwa drei Metern Breite hingegen viel größer. Lange wurden diese „Large Martian Ripples“ (LMR) als Gegenstücke irdischer Impact-Rippel angesehen, bis Curiosity sie unter die Lupe nahm. Das haben nun Mathieu Lapotre und Kollegen genauer analysiert [2].

Die Rover-Aufnahmen zeigen eine geschmeidige Form der LMR, die mit der Morphologie der Impact-Rippel nichts gemeinsam hat. Doch auf ihrem Rücken wandern kleinere Rippel, die mit den irdischen Impact-Rippeln in Form und Größe identisch sind (Abb. 3). Eine Einstufung als Dünen ist für die LMR ebenso ausgeschlossen, da $\lambda < 20 L_s$. Vielmehr stellen diese ein einzigartiges Beispiel eines äolischen „Zwischengebilde“ dar.

Die LMR besitzen verblüffende morphologische Ähnlichkeiten zu Strömungsrippeln unter Wasser [2]. Die Wichtigste davon ist die Skalierung ihrer Breite mit der Dicke der viskosen Unterschicht der Fluidströmung unmittelbar über dem Boden [2]. Wie die Windströmungen in der viskosen Unterschicht der Marsatmosphäre zu LMR führen, bleibt allerdings ein Rätsel. Unter Wasser bewegen sich die Partikel in viel kleineren Flug-

bahnen, die kaum Splash erzeugen. Doch es ist schwierig, solch einen Transport mit der Marsatmosphäre zu vereinbaren. Dort können Sandkörner aufgrund der dünnen Luft und geringen Schwerkraft viel höher fliegen und dadurch höhere Geschwindigkeiten erreichen als in unseren Wüsten [1].

Die Physik äolischen Sandtransports birgt noch viele Überraschungen. Ihre Erforschung wird von immer komplexeren Computermodellen unterstützt und ist für viele Forschungsgebiete wie die Planetenforschung sehr wichtig. Übrigens wurden rippelförmige Sedimentgebilde sogar auf dem Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko entdeckt [6]. Wahrscheinlich beherrschen eindrucksvolle Dünen und Rippel auch weite Flächen des Pluto [7]. Eins ist sicher: Die LMR wan-

dern schon seit mindestens 3,7 Millionen Jahren auf dem Mars. Dies ließ sich anhand der aus ihnen hervorgegangenen Schrägschichtung in Sedimentgesteinen feststellen [2]. Ursache der Schrägschichtung ist Sandablagerung durch Lawinen am Lee der LMR. Da die Größe der LMR von der atmosphärischen Dichte abhängt, lässt sich aus der Dimension der Schrägschichtung auf das Klima des frühen Mars schließen [2].

Dem Physiker bleibt nun die Aufgabe, die Entstehung und Dynamik der LMR zu klären. Als Hilfsmittel bieten sich teilchenbasierte Simulationen des Sandtransports zur Berechnung der Teilchenflugbahnen sowie morphodynamische Simulationen der damit verbundenen Dünenbildung an [1, 3, 8]. Zunächst gilt es, diese Simulationen um den Effekt der viskosen Unterschicht auf den Sandtransport in der dünnen Marsluft zu erweitern.

Eric Parteli

- [1] J. F. Kok et al., Rep. Prog. Phys. 75, 106901 (2012)
- [2] M. G. A. Lapotre et al., Science 353, 55 (2016)
- [3] K. Kroy, G. Sauermann und H. J. Herrmann, Phys. Rev. E 64, 031305 (2002)
- [4] F. Charru, B. Andreotti und P. Claudin, Ann. Rev. Fluid Mech. 45, 469 (2013)
- [5] T. Pähtz et al., Phys. Rev. Lett. 111, 218002 (2013)
- [6] N. Thomas et al., Science 347, doi:10.1126/science.aaa0440 (2015)
- [7] J. M. Moore, Icarus 246, 65 (2015)
- [8] E. J. R. Parteli und H. J. Herrmann, Physik in unserer Zeit 39, 229 (2008)

KURZGEFASST

■ Sterile Neutrinos vor dem Aus

Vor zwanzig Jahren kam die Idee auf, Anomalien in verschiedenen Experimenten mit Beschleunigern und Reaktoren mithilfe eines sterilen Neutrinos zu erklären. Das postulierte Teilchen zeigt sich nur, wenn es sich in eines der drei bekannten Neutrinos umwandelt. Seine Existenz ist im Standardmodell nicht vorgesehen. Physiker untersuchten nun etwa 100 000 Neutrinoereignisse, die der IceCube-Detektor registrierte. Dabei fanden sie keinen Hinweis auf die Existenz steriler Neutrinos und schließen diese daher mit einer Sicherheit von 99 Prozent aus. M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. 117, 071801 (2016)

■ Deuteron kleiner als gedacht

Der mittlere Radius des Deuterons ist ein wichtiges Maß, um Kernkräfte und Kernstruktur zu verstehen. Eine internationale Forschergruppe nutzte kürzlich die weltweit leistungsstärkste Myonenquelle am PSI, um diese Größe aus dem Zerfall von myonischem Deuterium zu bestimmen. Mittels Laserspektroskopie stellten sie fest, dass das Deuteron mit 2,12562(78) fm fast ein Prozent kleiner ist als bisher angenommen. Ein ähnliches Resultat liegt auch für den Protonenradius vor, sodass eine minimale Korrektur der Rydberg-Konstante notwendig sein könnte. R. Pohl et al. (The CREMA Collaboration), Science 353, 669 (2016)

Dr. Eric Parteli,
Department Geo-
wissenschaften,
Universität zu Köln,
Pohligstr. 3, 50969
Köln