

registrieren, sondern auch das kurzzeitige Auftreten der für Rekonnexion charakteristischen schnellen Plasmaströmungen. Genau dies hat, wie kürzlich berichtet, der Advanced Composition Explorer (ACE) der NASA beobachtet [4].

Aus den Messungen mit einem einzelnen Satelliten wie ACE lassen sich jedoch keine Schlüsse über die Länge der X-Linie ziehen, entlang welcher Rekonnexion stattgefunden haben müsste. Ebenso wenig war klar, ob Rekonnexion länger aktiv war als die wenigen Minuten, die es dauerte, bis die Rekonnexionschicht mit der Geschwindigkeit des Sonnenwindes über den Satelliten hinweggefegt war. Phan et al. sind nun genau diesen Fragen nachgegangen, indem sie eine günstige Konstellation von drei weit voneinander entfernten Satelliten ausnutzten – die NASA-Satelliten ACE und Wind sowie einen der vier Cluster-Satelliten der ESA –, die den Forschern eine große Basislinie für ihre Messungen gab [1]. Am 2. Februar 2002 registrierten die drei Satelliten den Durchgang einer Rekonnexionschicht mit im Wesentlichen gleichen Eigenschaften, insbesondere gleichen Plasma- und Magnetfeldänderungen und Plasmaströmungen.

Die beobachteten Plasma-geschwindigkeiten stimmten quantitativ mit den theoretischen Vorhersagen überein, die sich aus den gemessenen Magnetfeldern und Plasmadichten ergeben. Mittels einer einfachen geometrischen Betrachtung bestimmten die Autoren zunächst die Orientierung der

X-Linie. Aus den Positionen der Satelliten konnten sie dann direkt ablesen, dass die Länge der X-Linie mindestens 2,5 Millionen Kilometer, oder etwa 390-mal den Erdradius, betragen haben musste. Aus dem zeitlichen Abstand der Durchgänge bei den Satelliten ergab sich auch sofort, dass Rekonnexion nicht explosiv ablief, sondern konstant während mindestens 2,5 Stunden.

Diese Beobachtungen werden die heftige Debatte über die Frage, was Rekonnexion eigentlich bedeutet bzw. bewirken kann, neu anfachen. Mit den geplanten NASA-Missionen^{*)} STEREO (Start 2006) und MMS (2013) wird sich die Rekonnexion einerseits auf viel größeren Distanzen, andererseits ganz nahe an der X-Linie studieren lassen. Die Aussichten, endlich die Natur magnetischer Rekonnexion, die damit einhergehende Kopplung kleinräumiger mit großräumigen Phänomenen und ihre Rolle in verschiedenen kosmischen Situationen zu verstehen, sind somit gut.^{*)}

GÖTZ PASCHMANN

- [1] T. D. Phan et al., *Nature* **439**, 175 (2006)
- [2] J. W. Dungey, *Phys. Rev. Lett.* **6**, 47 (1961); H. E. Petschek, *The Physics of Solar Flares*, NASA SP-50, 425 (1964); B. U. Ö. Sonnerup, *J. Plasma Phys.* **4**, 161 (1970)
- [3] G. Paschmann et al., *Nature* **282**, 243 (1979); D. G. Sibeck et al., *Space Sci. Rev.* **88**, 207 (1999); T. D. Phan et al. *Space Sci. Rev.* **118**, 367 (2005)
- [4] J. T. Gosling et al., *J. Geophys. Res.* **110**, A01107 (2005); *Geophys. Res. Lett.* **32**, L05105 (2005)

■ Frischer Wind für die Dünenforschung

Neue Experimente in der Wüste und im Windkanal werfen etablierte Theorien über den Haufen.

Wer sich auf Expedition durch eine der Wüsten dieser Erde begibt, wird fasziniert sein von den elegant geschwungenen Formen der allgegenwärtigen Sanddünen [1]. Weitere markante Strukturen – auf viel kleinerer Längenskala – sind die überall zu findenden Rippeln,



die durch die ständig über die Sandoberfläche wehenden Winde entstehen (Abb. 1). Damit verwandt sind die Rippeln im Sand einer Brandungswelle. Bis heute ist nicht im Detail verstanden, wie sich die Sandmassen unter dem Einfluss von Wind- oder Wasserströmungen verformen und bewegen, eine wichtige Frage sowohl für die Wüstenländer als auch für die küstennahe Schifffahrt. Nun hat sich eine französische Forschergruppe der bisher

Abb. 1: Mit Rippeln verzierte Sanddüne im Great Sand Dunes National Monument, Colorado, USA (Foto: C. Krülle)

ungeklärten Frage angenommen, auf welcher Längenskala sich Sandrippeln entwickeln, wenn sie einem beständigen Wind aus fester Richtung ausgesetzt sind [2]. Die Ergebnisse der Feldforschung in der Sahara wurden ergänzt durch Labor-Experimente in einem Windtunnel

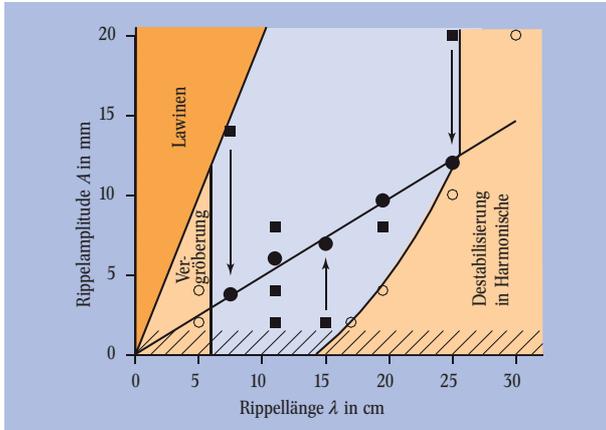


Abb. 2: Stabilitätsdiagramm für Rippelwellenlänge λ und -amplitude A bei einer um 30 % überkritischen Windstärke. Im mittleren Wellenlängenbereich strebt eine zu große oder kleine Amplitude (Quadrate) bei konstanter Wellenlänge zur Stabilitätslinie (Punkte). Zu kleine oder zu große Wellenlängen sind instabil und werden durch Periodenverdopplung bzw. -halbierung in den stabilen Bereich getrieben.

in Grenoble und widersprechen den meisten theoretischen Modellen.

Der Windtunnel dient eigentlich dazu, Schneeverwehungen an Modellen von Lawinenverbauungen zu untersuchen. Zum Glück für die Dünenforschung wurde es den drei Wissenschaftlern aus Paris und Marseille dennoch gestattet, den Tunnel mit 120 μm großen Teilchen aus Hostun-Sand zu befüllen, einem typischen Modellsand für bodenmechanische Untersuchungen. Das Oberflächenprofil der sich entwickelnden Rippelstruktur wurde mithilfe der Laser-Sheet-Technik mit einer Genauigkeit von 40 μm bestimmt. Dabei wird die Oberfläche mit einem Laserstrahl linienweise abgerastert und die beleuchtete Linie mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Bei Windgeschwindigkeiten oberhalb einer kritischen Stärke von ca. 0,2 m/s setzt der Saltationsprozess ein, d. h. einzelne Sandkörner werden vom Wind mitgerissen und folgen einer parabelförmigen Flugbahn. Prallen sie auf die Sandoberfläche auf, schlagen sie weitere Körner heraus, sodass sich insgesamt ein kontinuierlicher Strom von Sandteilchen ergibt, der für die entstehenden Rippel verantwortlich ist. Im Windkanal ist der Sand jedoch aus der

vergleichsweise kurzen Messstrecke schnell weggeweht, sodass dort keine Langzeitstudien möglich sind. Dieses Problem bestand bei den Feldmessungen der Forscher im Dünenfeld zwischen Tarfaya und Laayoune in Marokko nicht, dafür lässt sich im Feld die Windströmung nicht kontrollieren.

Trotz der unterschiedlichen experimentellen Randbedingungen zeigen beide Vorgehensweisen das gleiche Szenario: Auf einer anfangs glatten Sandoberfläche bilden sich bei einer um 30 % überkritischen Windstärke nach nur einer Minute spontan kleine Rippel, die anschließend anwachsen und gleichzeitig zu größeren Strukturen verschmelzen. Nach etwa zehn Minuten scheint das Rippelprofil $h(x, t)$ einen stationären Zustand erreicht zu haben, der sich durch eine konstante Amplitude und Wellenlänge der Rippeln auszeichnet.⁺⁾

Die Autoren gehen noch einen Schritt weiter. Anstatt die Sandoberfläche nur sich selbst zu überlassen, prägen sie ihr mit Hilfe einer Schablone aus Wellpappe eine definierte Struktur mit variabler Anfangsamplitude und -wellenlänge auf. Passt das aufgeprägte Muster zur „natürlichen“ Wellenlänge der Rippeln, so bleibt es erhalten. Ist dabei die Amplitude zu groß oder zu klein gewählt, dann werden bei gleich bleibender Wellenlänge die Rippelkämme abgeschliffen oder aufgebaut, bis ein stabiler Zustand erreicht ist. Interessanterweise zeichnet sich das stabile Regime nicht durch eine einzige fixe Längenskala aus, sondern erstreckt sich über ein breites Band von Wellenlängen (Abb. 2). Solche multistabilen Zustände sind aus einer ganzen Reihe von strukturbildenden, nichtlinearen Systemen bekannt, zum Beispiel in Halbleitern, bei Gasentladungen oder in der Hydrodynamik. Bei den Sandrippeln spielt der Böschungswinkel eine wichtige Rolle: Zu steile Rippelflanken werden über Lawinenabgänge relaxiert, zu kleine Strukturen verschmelzen paarweise, um in den stabilen Bereich zu gelangen. Außerdem werden die Strukturen auch oberhalb einer kritischen Rippellänge, die von der Amplitude abhängt, instabil: Im einfachsten Fall verdoppelt sich die Anzahl der Rippeln, allgemein treten höhere Harmonische der Grundstruktur auf. Dieses im Windkanal gefundene Verhalten haben die Forscher

bei den Feldmessungen bestätigt gefunden, wobei sie allerdings in der Wüste wegen der starken Windfluktuationen nicht den Einfluss der Rippelamplitude untersuchen konnten.

Welche Rolle spielt nun die Windstärke? Systematische Studien des stationären Zustands zeigen, dass sowohl die Wellenlänge λ als auch die Propagationsgeschwindigkeit c der Rippeln oberhalb eines Schwellenwerts u_{crit} linear von der Windgeschwindigkeit u abhängen. Skaliert mit der Korngröße d des verwendeten Sandes ergibt sich

$$\lambda/d \propto (u/u_{\text{crit}} - 1) \text{ bzw. } c/\sqrt{gd} \propto (u/u_{\text{crit}} - 1).$$

Diese Abhängigkeiten haben Geowissenschaftlern bereits vor über vierzig Jahren gefunden [3], sie stehen aber im Widerspruch zu den meisten seither entwickelten theoretischen Modellen. Hier können die neuen Messdaten einen Anstoß geben, die bisherigen Theorien zu überdenken.

Offen bleibt jedoch die Frage, ob in den sehr präzisen, aber – wegen der endlichen Länge des Windkanals – nur kurzen Messreihen (10 bis 15 min) wirklich ein stationärer Endzustand des Rippelfelds $h(x, t)$ erreicht wurde. Die leicht mögliche Überprüfung steht noch aus.^{##)}

Grundsätzlich ist der Vergleich von Feldmessungen mit Experimenten in Windkanälen schwierig, weil sich weder Zeit- noch Längenskalen den in der Wüste herrschenden Bedingungen vollständig anpassen lassen und daher andere Gesetzmäßigkeiten gelten. Es ist erstaunlich, wie gut die von den drei Forschern gefundenen Ergebnisse dennoch zusammenpassen. Für die Zukunft wäre ein System wünschenswert, das es erlaubt, die Rippeldynamik auf längeren Zeitskalen zu verfolgen, z. B. in einem ringförmigen Apparat mit periodischen Randbedingungen. Dann könnte man auch den für einige Modelle wichtigen Aspekt des voll saturierten Sandflusses realisieren. Gerade zu diesem Thema gibt es aktuelle Arbeiten, welche die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Sandteilchen und der Windströmung berücksichtigen [5]. Um den zugrunde liegenden Prozessen auf die Spur zu kommen, werden die Wissenschaftler noch weiter mit Sand „spielen“ müssen – z. B. im Süden Algeriens, wo einer der französischen Forscher, Philippe

⁺⁾ Die Rippelwellenlänge λ wird dabei über die Autokorrelationsfunktion des Profils $C(\lambda, t) = \langle h(x, t) \cdot h(x+\lambda, t) \rangle - \langle h(x, t) \rangle^2$ bestimmt. Diese Funktion besitzt ein erstes Maximum beim charakteristischen mittleren Abstand der Rippeln.

^{##)} Ändert $h(x, t)$ ihre Form nicht mehr, sondern propagiert nur mit konstanter Geschwindigkeit in Windrichtung, so muss gelten: $h(x, t) = f(x-ct)$, d. h. der Ausdruck $\dot{h} + ch'$ muss im stationären Zustand verschwinden. Aus den Messdaten lassen sich die zeitliche Ableitung \dot{h} und der Gradient h' leicht bestimmen. Die mittlere Propagationsgeschwindigkeit c ergibt sich aus einer Kreuzkorrelation von zwei aufeinander folgenden Profilen [4].

Priv.-Doz. Dr. Christof Krülle, Experimentalphysik V, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth

Claudin, zur Zeit weitere Feldforschungen durchführt.

CHRISTOF KRÜLLE

- [1] H.-J. Herrmann, Physik Journal, August/September 2005, S. 57
- [2] B. Andreotti et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 028001 (2006)
- [3] R. P. Sharp, J. Geol. **71**, 617 (1963); M. Seppala und K. Lindé, Geografiska Annaler Series A **60**, 29 (1978)
- [4] A. Betat et al., Eur. Phys. J. E **8**, 465 (2002)
- [5] M. P. Almeida et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 018001 (2006)

Planet in der Linse?

Die Suche nach Planeten außerhalb unserer Sonnensystems, sog. Exo-Planeten, gehört zu den spannendsten Gebieten der Astrophysik. Nach einer vorläufigen Definition der Internationalen Astronomischen Union versteht man dabei unter einem Planeten ein Objekt mit weniger als etwa 13 Jupitermassen (also unterhalb der Massengrenze für die Fusion von Deuterium), das um normale Sterne kreist. In den letzten gut zehn Jahren ist es gelungen, über periodische Variation der (Radial-)Geschwindigkeit ihres Muttersterns mehr als 150 Planetenkandidaten zu entdecken – Kandidaten deshalb, weil man wegen der unbekanntenen Bahninklination i nur die Mindestmasse $m \cdot \sin i$ kennt. Daher könnte es sich auch um massearme Sterne oder sog. braune Zwerge mit 13 bis 78 Jupitermassen handeln. Nur wenn die Inklination der Bahn bekannt ist, z. B. durch das Bedecken (Transit) des Sterns durch den Begleiter einmal pro Umlauf, kann man auf Masse und Radius schließen. Im Jahre 2005 ist es sogar gelungen, ein bis drei Planeten bzw. Planetenkandidaten per Direktaufnahme zu entdecken (z. B. GQ Lupi b). All diese Planeten haben mehr als zehn Erdmassen, sind also vermutlich Gasriesenplaneten wie Jupiter oder Saturn. Mithilfe des Mikrogravitationslinseneffekts hat nun eine internationale Kollaboration, an der auch Astrophysiker aus Heidelberg und Potsdam beteiligt sind, Evidenz für einen erdähnlichen Exo-Planeten mit drei bis elf Erdmassen gefunden, der ein bis drei Astronomische Einheiten ($1 \text{ AE} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ m}$, Abstand Erde-Sonne) von seinem Stern entfernt ist [1].¹⁾

Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt voraus, dass das Licht eines weit entfernten Hintergrund-

sterns (Quelle) von einem näher gelegenen Objekt (Linse) abgelenkt wird. Dieser Gravitationslinseneffekt wird gewöhnlich mit Galaxien als Linse beobachtet. Besteht die Linse nur aus einem Stern, so spricht man von einer Mikrogravitationslinse. Wenn sich Quelle, Linse und Beobachter genau auf einer Linie befinden, entsteht ein ringförmiges Bild der Quelle (Einstein-Ring). Wird dieser Ring räumlich nicht aufgelöst, so beobachtet man eine charakteristische Lichtkurve, einen kurzzeitigen Anstieg der scheinbaren Helligkeit des Hintergrundsterns. Da es nur selten vorkommt, dass zwei wegen der großen Entfernung praktisch punktförmige Objekte von der Erde aus gesehen direkt hintereinander liegen, beobachtet man sehr dichte Sternfelder, also z. B. das galaktische Zentrum.

Wenn nun ein Stern mit Planet direkt vor einem dahinter liegenden Stern durchzieht, sollte der Planet einen zweiten kleinen, kurzen Peak in der Lichtkurve erzeugen. Während sich die Lichtkurve präzise aus den Eigenschaften der Objekte (Radien, Massen, Abstand, Entfernung) berechnen lässt, ist es wesentlich schwieriger, aus der beobachteten Lichtkurve auf die Eigenschaften der beteiligten Sterne zu schließen. So ist ein zweiter Peak auch zu erwarten, wenn ein Doppelstern (Quelle) hinter einem Einzelstern (Linse) herzieht. Handelt es sich um einen Doppelstern mit großem Massen- bzw. Helligkeitsunterschied, so sind die beiden Peaks stark unterschiedlich ausgeprägt.

Die aktuelle Veröffentlichung dreht sich um ein im Sommer 2005 beobachtetes Ereignis und insbesondere um einige Datenpunkte am 9. August (Abb.). Neun davon sprechen um mehr als eine Standardabweichung (1σ) dagegen, dass nur ein Einzelstern hinter einem anderen Einzelstern herzieht. Nach einer Analyse der Datenpunkte sowie einem Vergleich der beobachteten Lichtkurve mit den erwarteten Kurven für einen Doppelstern als Quelle bzw. Linse folgern Beaulieu et al. aufgrund von zwei Datenpunkten, dass ein Doppelstern mit großem Massenunterschied (d. h. Stern mit Planet) vor einem Einzelstern hergezogen ist. Ein weiterer Datenpunkt weicht aber auch von dieser Planeten-Hypothese ab.

Aus dem Helligkeitsunterschied zwischen Haupt- und Nebenpeak ergibt sich der Massenunterschied