

Spuren im Sand

Die Physik der Dünen

Hans J. Herrmann

Sand und Wind sind die notwendigen Zutaten, damit Dünen entstehen können. Diese faszinierenden Landschaftsformen, die selbst auf dem Mars existieren, werden nach ihrem Aussehen in über hundert verschiedene Typen klassifiziert. Die Transportvorgänge der Sandkörner auf der Oberfläche liefern den Schlüssel, um zu verstehen, wie sich Dünen bilden und verändern.

Jedem sind entweder aus eigener Urlaubserfahrung oder von Fernsehberichten die herrlichen Landschaftsbilder geläufig, welche Dünen erzeugen. Elegant geschwungene Flächen werden von scharfen Kanten durchzogen wie ein erstarrtes Meer, welches gleichwohl in langsamer Bewegung ist. Seit Urzeiten werden Dünen von den Menschen besungen. Geographen und Geomorphologen klassifizieren sie seit über hundert Jahren nach ihrem Aussehen und geben ihnen klangvolle Namen, meist türkischen oder arabischen Ursprungs. Doch interessanterweise ist es erst kürzlich gelungen zu verstehen, wie sie entstehen und warum.

Auf der Erde gibt es Dünen im Wesentlichen entweder an Küsten oder in Wüsten. Sie treten oft in gigantischen Feldern auf, deren Ausmaß sich bloß aus dem Flugzeug oder auf Satellitenaufnahmen wie in Abb. 1 würdigen lässt. Sie werden ständig vom Wind verändert und bewegen sich typischerweise mit Geschwindigkeiten, die umgekehrt proportional zu ihrer Höhe sind. Vegetation, chemische Verwitterung oder klimatische Änderungen können Dünen zum Stillstand bringen oder sogar regelrecht versteinern. Solche Fossildünen geben Geologen Aufschlüsse über die neuere Geschichte der Erdkruste. Besonders interessant für Planetologen sind in diesem Zusammenhang Marsdünen (Abb. 2). Sie treten in großer Vielfalt an verschiedensten Stellen dieses Himmelskörpers auf und haben umstrittene Spekulationen angestoßen.

Die meist studierten Dünenformen sind die Wander- oder Sicheldünen (sog. Barchane), welche halbmondförmig sind, mit den Hörnern in Windrichtung (Abb. 2). Sie entstehen dann, wenn der Wind immer aus der gleichen Richtung kommt und sich relativ wenig beweglicher



Abb. 1: Satellitenaufnahme der Lençóis-Maranhenses im Nordosten Brasiliens. Der Sand wird vom Meer landeinwärts getrieben, und zwischen den einzelnen Dünenzügen entstehen in der Regenzeit Seen, welche als dunkle Flecken erkennbar sind. (Quelle: NASA/JSC)

Sand auf einer Ebene befindet. Falls mehr Sand vorhanden ist, entstehen so genannte Transversaldünen in regelmäßigen Abständen senkrecht zur Windrichtung, ähnlich wie in Abb. 1. Ändert sich die Windrichtung regelmäßig um ca. 40° , so entstehen bei ausreichend viel Sand Longitudinaldünen, und dreht sich der Wind, findet man Sterndünen. Insgesamt lassen sich über hundert Dünentypen unterscheiden.

KOMPAKT

- ▶ Bei Dünen handelt es sich physikalisch gesprochen um hydrodynamische Instabilitäten, d. h. sie sind nur aus dem Wechselspiel von Fluid und Granulat erklärbar.
- ▶ Neue Einsichten in der Physik der Schüttgüter haben es ermöglicht, Bewegungsgleichungen für Sandoberflächen aufzustellen.
- ▶ Durch Lösung dieser Gleichungen lassen sich die Entstehung, Bewegung und Morphologie der verschiedenen Dünentypen besser beschreiben und verstehen.

Nicht nur die Luft produziert Dünen, sondern auch andere Fluide wie Wasser oder die Atmosphäre vom Mars. Auf dem Ozeanboden werden zum Teil kilometergroße Dünen beobachtet. Entscheidend ist die Kopplung der Geschwindigkeitsfelder dieser Fluide mit den Körnern und der Veränderbarkeit der Oberfläche. Die Düne ist eine hydrodynamische Instabilität, d. h. nur aus dem Wechselspiel von Fluid und Granulat erklärbar. Entscheidend zum Verständnis sind die Transportvorgänge der Körner auf der Oberfläche.

Prof. Dr. Hans J. Herrmann, Institut für Computerphysik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 27, 70569 Stuttgart – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Gentner-Kastler-Preises 2005 auf der Jahrestagung der Société Française de Physique Ende August.

Aeolischer Transport

Während des Zweiten Weltkriegs kämpfte ein englischer Brigadier namens Ralph A. Bagnold in der libyschen Wüste gegen die Truppen Rommels. Der ausgebildete Ingenieur Bagnold verbrachte die vielen müßigen Stunden in der Wüste mit Untersuchungen



Abb. 2: Auch auf dem Mars gibt es Dünen, wie auf dieser Aufnahme vom 20. Juli 2004 des Mars Global Surveyor zu sehen ist, die ein Barchanfeld in der nördlichen Polarregion zeigt. Der Ausschnitt ist rund 3 km breit. (Foto: NASA/JPL/MSSS)

windgetriebener Sandbewegung und wurde somit zum Pionier der Dünenforschung. Sein klassisches Buch „The physics of blown sand“ [1] beschreibt die grundlegenden Konzepte der physikalischen Vorgänge.

Im Wesentlichen unterschied Bagnold drei Arten von Sandtransport: Körner, die kleiner sind als $80 \mu\text{m}$, geraten in Suspension und können über viele Kilometer in der Luft verweilen. Besonders feines Material wird sogar über die Ozeane auf andere Kontinente geweht, sodass selbst in unseren Landen gelegentlich Saharastaub vom Regen auf die trocknende Wäsche gerät. Körner mit Durchmessern jenseits von 300 bis $400 \mu\text{m}$ können vom Wind normalerweise nicht hochgewirbelt werden und bleiben somit auf dem Boden liegen. Ihre Zitterbewegung führt zu einem diffusiven Oberflächentransport, auch „Reptation“ genannt. Körner, deren Größe zwischen diesen beiden Bereichen liegt, d. h. typischerweise zwischen 100 und $300 \mu\text{m}$, kommen für den für Dünenbewegungen relevantesten Prozess, genannt „Saltation“, in Frage.

Saltation funktioniert folgendermaßen: Ein Korn, welches aufgrund eines kleinen lokalen Wirbels des Windes vom Boden hochgezogen wird, gerät in Zonen höherer Geschwindigkeit und wird somit beschleunigt. Prallt es anschließend wieder auf die Oberfläche mit nun erhöhter Energie, schlägt es beim Aufprall gleich mehrere neue Körner nach oben. Dieser so genannte „splash“ produziert also denselben Vorgang in mehrfacher Ausfertigung. Bei jeder Iteration wird kaskadenartig die Anzahl der fliegenden Körner vermehrt. Jedes Korn entzieht aufgrund des zweiten Hauptsatzes der

Mechanik, „*actio = reactio*“, dem Windfeld Impuls. Zunehmend wird bei ansteigender Teilchenzahl der Wind in der Nähe des Bodens geschwächt, sodass schließlich die Anzahl der transportierbaren Teilchen zu einem Grenzwert, dem saturierten Sandfluss q_s , strebt, der von der Windstärke abhängt. Bereits Bagnold stellte empirisch fest, dass q_s für große Geschwindigkeiten wie die dritte Potenz der Windgeschwindigkeit anwächst. Seitdem wurden sehr detaillierte Experimente in Windkanälen durchgeführt und mannigfaltige, mit mehreren Anpassungsparametern behaftete empirische Ausdrücke postuliert, um den Zusammenhang zwischen saturiertem Fluss und Windstärke zu beschreiben.

Der Saltationsprozess ist natürlich in Wirklichkeit komplizierter. Beim Aufprall fliegen die Körner aufgrund der zufällig ungeordneten Packung des Sandbettes in verschiedene Richtungen und mit unterschiedlichen Energien. Auch der Wind fluktuiert stark. Ein genaueres Verständnis der Grenzschicht, in der der Transport stattfindet, ist zur Zeit Gegenstand sowohl intensiver experimenteller als auch numerischer Forschung. Die Splash-Funktion, d. h. die Verteilungsfunktion der Ejektionswinkel und Geschwindigkeiten, ist mittlerweile gut bekannt. Dagegen ist die Wechselwirkung mit dem Fluid, insbesondere die Änderung des Geschwindigkeits- und Druckprofils der Luft als Funktion der Höhe in der Nähe des Bodens, heutzutage noch so gut wie unbekannt. Interessanterweise stellt sich eine charakteristische Höhe ein, welche typischerweise 5 bis 20 cm über dem Boden liegt, bei der die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Teilchen und somit auch der Impulsverlust der Luft am größten ist. Wer schon einmal in der Wüste oder am Strand bei starkem Wind den Boden betrachtet hat, mag eine flimmernde Decke beobachtet haben, welche in dieser Höhe anscheinend über dem Boden schwebt.

Das vereinfachte Bild des kaskadenförmigen Anwachsens und der anschließenden Sättigung der Saltation erlaubt eine mathematische Modellierung, welche in ihrer heutigen Form in der Doktorarbeit von Gerd Sauer mann entwickelt wurde. Durch sie lässt sich die Zeitentwicklung des Sandflusses durch die logistische Gleichung beschreiben, welche auch in der Populationsdynamik eine große Rolle spielt. Demzufolge wächst der Fluss exponentiell bis zu einer charakteristischen Sättigungslänge an, um schließlich den Wert q_s anzunehmen. Die Sättigungslänge selbst ist eine nichtlineare Funktion der Windgeschwindigkeit.

Bewegungsgleichungen für die Sandoberfläche

Die Beschreibung des Sandflusses als Funktion der Scherkraft des Windes in Form der oben beschriebenen logistischen Gleichung hat es ermöglicht, ein geschlossenes System von Differentialgleichungen für die Bewegung der granularen Oberfläche zu formulieren. Man betrachtet drei kontinuierliche Felder, welche auf der zweidimensionalen (x, y) -Ebene definiert sind: die Scherspannung des Windes $\tau(x, y)$, den Sandfluss an der Oberfläche $q(x, y)$ und die Topographie $h(x, y)$, d. h. die lokale Höhe des Terrains. Die lokale Scherspannung $\tau(x, y)$ aus dem dreidimensionalen turbulenten Geschwindigkeitsfeld des Windes zu gewinnen ist eine tour de force, welche schon Ende der Siebzigerjahre von einer Gruppe englischer Mathematiker in Cambridge durchgeführt wurde. Ein Ausgangspunkt ist dabei eine von Ludwig Prandtl 1924 entdeckte Bezie-

hung, nach der die Geschwindigkeit über einer Ebene als Funktion der Höhe logarithmisch anwächst. Unter Einbeziehung der Inkompressibilitätsbedingungen der Luft und der Näherung geringer lokaler Steigung des Bodens (hügelige Landschaft) leiteten Jackson und Hunt [2] nach fast zehnjähriger Arbeit einen Integralausdruck her, welcher die Scherspannung am Boden als Funktion der lokalen Steigung ∇h und der charakteristischen Windgeschwindigkeit u_* beschreibt, wobei u_* der Vorfaktor des erwähnten logarithmischen Profils ist. Benutzt man diesen wohlherprobten Ausdruck in der logistischen Gleichung des Sandflusses und beschreibt man die Änderung der Topographie $h(x, y)$ mit Hilfe der Massenerhaltung durch die räumliche Änderung des Oberflächenstroms $q(x)$, so ergibt sich ein geschlossenes Gleichungssystem, das Minimalmodell [3].

Allerdings ist es mit dem Gleichungssystem für windgetriebenen Sand nicht getan. Granulare Medien haben eine weitere typische Eigenschaft, nämlich die Existenz eines Böschungswinkels. Jeder steilere Abhang ist instabil und wird sogleich durch eine Rutschung so verändert, dass danach die lokale Steigung genau den Böschungswinkel annimmt. Treibende Kraft dieser Bewegung ist die Schwerkraft. Teile der granularen Landschaft, welche durch Rutschungen auf die Steigung des Böschungswinkels eingestellt wurden, nennt man Gleitflächen.

Dort, wo die Gleitflächen ansetzen, entstehen scharfe Kanten, welche, wie schon anfangs erwähnt, jedermann als ein charakteristisches Merkmal von Dünenlandschaften erkennt. Pfeift der Wind über eine solche Kante, so wird an ihr der Luftstrom aufgetrennt in eine obere Zone, in welcher der Wind relativ ungestört weitergeht, und eine untere mit einem rückströmenden Wirbel. In dieser unteren Zone, der so genannten Trennblase, kann der Sand aufgrund des schwachen Windfeldes nicht mehr transportiert werden. Mit anderen Worten, gerät ein Sandkorn erst einmal in die Trennblase, so befindet es sich im Windschatten der Düne und ist dort gefangen. Die Dünen sind somit aus Sand gebaute Fallen für Sand. Dies ist der wesentliche Mechanismus, welcher Dünen stabilisiert.

Die Entstehung der Gleitzonen als Gebiete mit einem anderen Transportmechanismus stellt für die numerische Lösung der Bewegungsgleichungen natürlich eine besondere Komplexität dar. Die Größe und Form der Trennblasen muss zur Lösung eingesetzt werden. Hierzu stehen zur Zeit nur empirische Ausdrücke zur Verfügung, welche aus Windtunnelmessungen oder numerischen Rechnungen stammen. Die vollständige Evolution der windgetriebenen Sandoberfläche erfolgt iterativ: Ausgehend von einer Anfangslandschaftsform mit gegebenen Gleitebenen und den dazugehörigen Trennblasen wird das Scherspannungsfeld des Windes am Boden und daraus der Sandfluss berechnet. Die Kontinuitätsgleichung ergibt eine erste vorläufige Topographie. Dort, wo dessen Steigung den Böschungswinkel überschreitet, werden die Gleitflächen bestimmt, an die man wieder Trennblasen ansetzt. Erst auf dieser neuen, mit den Trennblasen behafteten Landschaftsform wird dann erneut die Scherspannung des Windes bestimmt.

Trotz seiner Komplexität ist dieses beschriebene Lösungsverfahren zur Zeit die einfachste Methode, die Dünenentwicklung zu berechnen. An Wanderdünen wurde dieses Verfahren ausgiebig geprüft und sehr erfolgreich quantitativ an Feldmessungen bestätigt.

Ausgehend von gaussförmigen Hügeln erhält man bei vorgegebenem Wind stabile, d. h. in der Zeit invariante Dünenformen, wenn das Anfangsvolumen des Hügels oberhalb eines Maximalwertes liegt. Kleinere Dünen entwickeln keine Gleitflächen und bilden somit auch keine Sandfalle. Dies erklärt, weshalb Dünen unterhalb einer bestimmten Größe in der Praxis nicht stabil sind. Mit den numerischen Untersuchungen gelang es auch zu zeigen, dass die Endform unabhängig von der Anfangsform des Hügels ist, solange das Volumen gleich ist. Aufgrund der klimatischen Schwankungen und der langen Dauer solcher Entwicklungen (typischerweise 100 bis 1000 Tage) sind solche Untersuchungen in Feldmessungen nicht möglich. Laborexperimente mit Dünen sind ebenfalls aufgrund ihrer Ausmaße ausgeschlossen, schließlich sind bereits die kleinsten stabilen Wanderdünen ca. 50 m breit und 70 m lang.

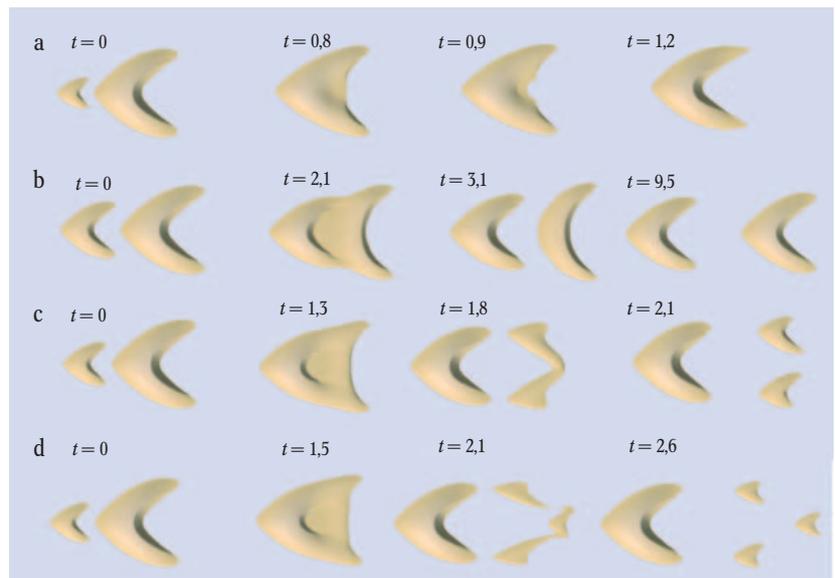


Abb. 3: Vier Momentaufnahmen der Kollision zweier Wanderdünen, berechnet von O. Duran aus den Bewegungsgleichungen. Die Fälle (a) bis (d) entsprechen verschiedenen anfänglichen Größenverhältnissen der beiden Dünen. Der Wind bläst von links.

Der bedeutendste Vorteil der Modellierung der Dünenentwicklung ist die enorme Reduktion in der Zeitskala. Entwicklungen, die hundert Jahre dauern, lassen sich in wenigen Tagen auf der Workstation nachvollziehen. Besonders eindrucksvoll hat dieses Zeitraffen die Kollisionseffekte von Wanderdünen erklärt. Da kleine Dünen schneller sind als große, wird eine kleine Düne, welche sich hinter einer großen befindet, zwangsläufig mit ihr zusammenstoßen. Falls die hintere Düne sehr klein ist, wird sie von der davorliegenden einfach verschluckt (Abb. 3a). Sind die beiden aber fast gleich groß, so nähern sie sich derart langsam, dass sie nie richtig zusammenstoßen, sondern sich vorher gegenseitig abbremsen. Dabei verliert die vordere Düne Sand nach hinten, sodass nach einer gewissen Zeit die Hintere größer wird als die Vordere. Nach dieser Inversion gelingt es schließlich der Vorderen, da sie jetzt kleiner und somit schneller ist, wieder zu entkommen (Abb. 3b). Effektiv sieht es fast so aus, als ob die kleinere Düne die Größere durchdringt und dabei beide ihre Formen asymptotisch beibehalten. Dieses Verhalten ist typisch für Solitonen. Vor acht Jahren beschrieb die Kölner Geographin Helga Besler in den Physikalischen Blättern die Möglichkeit, dass sich Dünen wie Solitone

durchdringen können [4]. Sie stützte ihre Aussage auf Momentaufnahmen. Kaum jemand wollte ihr Glauben schenken. Die hier beschriebenen Rechnungen zeigen, in welchem Sinne Frau Besler recht hatte.

Die Kollision von zwei Wanderdünen kann allerdings auch noch andere Situationen hervorrufen, je nach Größenverhältnis der Dünen. So können z. B. zwei (Abb. 3c) oder, wie seit kurzem entdeckt, sogar drei (Abb. 3d) Ableger entstehen. Diese „Babies“ verschwinden in einigen Fällen auch wieder, wenn sie unter den angegebenen Randbedingungen nicht stabil sind.

Küsten- und Wüstendünen unterscheiden sich im Rahmen der Modellierung im Wesentlichen durch die Transportbedingungen am Boden. In der Wüste ist es trocken, sodass zwischen den Dünen ein Geröllboden liegt, über den der Sand durch den Wind transportiert werden kann. Somit gibt es einen Sandaustausch zwischen den Dünen. An den Küsten ist es meistens feucht, und Vegetation sprießt aus dem Boden. Deshalb befindet sich dort zwischen den Dünen meist Gras oder Gebüsch, welches den Sandtransport verhindert. In diesem Fall sind Dünen voneinander isoliert. Aus diesem Grund haben auch Küsten- und Wüstendünen verschiedene Formen. Durch Änderung der Randbedingungen und der Parameter lassen sich die beiden Fälle numerisch sehr gut unterscheiden.

Dünenfelder in der Wüste oder auf dem Mars, wie in Abb. 2 gezeigt, laufen meist entlang von Korridoren, welche wie von magischer Hand zusammengebündelt werden. Dieser Effekt lässt sich durch die Kopplung der Dünen aufgrund ihres Sandaustausches verstehen. Innerhalb solcher Felder können die Dünen nämlich auch seitwärts wandern, und zwar mit einer starken Tendenz in Richtung des Zentrums des Feldes, da dort der globale Sandstrom am stärksten ist. Des Weiteren werden auch interessante Muster beobachtet, welche ebenfalls auf die räumliche Verteilung des Sandflusses zwischen den Dünen zurückzuführen sind.

Erst kürzlich ist es gelungen, auch den Effekt der Vegetation miteinzubeziehen. Diese lässt sich durch ein skalares Vektorfeld beschreiben, welches im Allgemeinen anwächst, jedoch bei starken Fluktuationen der lokalen Höhe wieder abnimmt, da Pflanzen, die mit Sand überhäuft oder deren Wurzeln freigelegt werden, absterben. Baut man in die Sandtransportgleichungen nun den bodenfestigenden Effekt und den Widerstand gegen den Sandtransport durch die Vegetation mit ein, so erhält man ein gekoppeltes System von Gleichungen, in der das Wechselspiel von Dünenbewegungen und gleichzeitigem Pflanzenwachstum berücksichtigt wird. Mithilfe dieses Ansatzes ist es gelungen, den Übergang von Sicheldünen zu „Paraboldünen“ zu verstehen. Die beiden nach vorn gerichteten Hörner der Wanderdünen werden nämlich von der Vegetation als erstes festgehalten und bleiben somit zurück, sodass nach einer gewissen Zeit die Hörner der Wanderdünen nach hinten zeigen und die Düne immer länger wird. Solche Paraboldünen werden sehr oft auch in fossiler Form an Küsten beobachtet.

Singender Sand

Die Welt der Dünen ist noch voller Rätsel. Ein besonders markantes Phänomen, welches sich bis zum heutigen Tage gänzlich unserem Verständnis entzieht, ist der berühmte Gesang der Dünen. Es gibt etwa 15 Dünen auf unserem Planeten, welche singen können, jede von ihnen mit einer anderen Frequenz und Kadenz. Sie liegen in verschiedenen Kontinenten, verschiedenen Klimazonen und sind entweder Küsten- oder Wüstendünen. Auch die Form der Körner oder die Stärke des Windes ist nicht einheitlich. Dieser Gesang, welcher letztes in der Zeitschrift des CNRS auf einer CD an sämtliche Mitglieder dieser französischen Organisation verschickt wurde, kann über 110 Dezibel erreichen und ist somit über mehrere Kilometer deutlich zu hören. Seit 50 Jahren gibt es verschiedene theoretische Erklärungsversuche, die sich jedoch bislang leicht haben widerlegen lassen. Das Fehlen eines einheitlichen Merkmals und die anscheinend geringe Anzahl von Beispielen solcher Dünen erschwert ungemein die Aufstellung eines allgemein zusammenhängenden Prinzips.

Es gibt also noch viel Forschungsbedarf zu diesem eigentlich ganz alltäglichen, makroskopischen und klassischen Phänomen der Dünen.

Literatur

- [1] R. A. Bagnold, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London (1941); Nachdruck der Ausgabe von 1954: Dover Publications, Mineola (N. Y.) (2005)
- [2] P. S. Jackson und J. C. R. Hunt, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **101**, 929 (1975)
- [3] K. Kroy, G. Sauer mann und H. J. Herrmann, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 054301 (2002)
- [4] H. Besler, *Physikalische Blätter*, Oktober 1997, S. 983

Der Autor

Hans-Jürgen Herrmann studierte Physik in Göttingen und Köln, wo er 1981 promovierte. Nach Aufenthalt in Georgia und Boston ging er 1983 nach Saclay und beschäftigte sich dort besonders mit Wachstums- und Aggregationsphänomenen sowie zellularen Automaten. 1990 nahm er eine Leitungsfunktion am HLRZ in Jülich wahr und forschte auf dem Gebiet ungeordneter Materialien. Seit 1996 leitet Hans-Jürgen Herrmann das Institut für Computerphysik an der Universität Stuttgart. Sein jüngeres Forschungsinteresse gilt ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen, z. B. zur Bodenmechanik und zu Verbundwerkstoffen, aus der Perspektive der Theoretischen Physik und der Computerphysik.

