

Die Auswirkung vertikaler Luftströmungen und elektrischer Spannungsfelder in kahlen Sanden

Neue Gedanken zur Dünenmorphologie als Diskussionsbeitrag

Mit 3 Bildern auf zwei Tafeln

ALFONS GABRIEL, Wien

Inhalt:

- I. Einleitung
 - 1. Die vertikalen Luftströmungen in der Wüste
 - 2. Die elektrischen Spannungen in Sanden
- II. 'Aklé (Netzdünen)
- III. Ghurd (Pyramidendünen)
- IV. Zusammenfassung

I.

Einleitung

1. Die vertikalen Luftströmungen in der Wüste

J. WALTHER sah die Hauptursache der Stürme in der Wüste in der Auflockerung der Luftschichten über dem kahlen erhitzten Boden und den ausgehenden Luftströmungen, die nach oben und allen Seiten abzufließen versuchen. Das gleiche Geschehen im Mikroklima der Wüste ist den Ökologen wohlbekannt. Botaniker und Zoologen beschäftigen sich mit den Folgen vertikaler Luftbewegungen in den bodennahen Schichten im offenen Gelände und der Turbulenz, durch die Pflanzensamen und Kleintiere gehoben und versetzt werden.

Wie sehr, besonders an windstillen Tagen, die Luft über dem Boden in der Wüste dauernd wie über einem glühenden Herd in Unruhe ist, weiß jeder Wüstenreisende, der das fortwährende Spiel feinsten Luftfäden beobachtete. Durch die optische Verschiedenheit der einzelnen Luftteile wird das Nebeneinander der schlecht durchmischten, verschieden temperierten Luftmassen sichtbar, und es entsteht ein Flimmern und Flackern. Erzeugt wird es dadurch, daß die unmittelbar an den Boden grenzende, durch direkte Wärmeleitung in der Sonne stark erhitzte Luftschicht, die das Bestreben hat, thermisch bedingte Dichteunterschiede der Luft auszugleichen, aufsteigt und sich an ihrer Stelle Kaltluftmassen abwärts bewegen. Der Turbulenzvorgang wurde als „eine Art Abtropfen erhitzter Luftzellen nach oben“ bezeichnet¹.

Wir wissen nicht, wie die heißen bodennahen Luftschichten sich ablösen und die Übertragung der Wärme von der Erdoberfläche erfolgt. Die Turbulenz vollzieht sich vermutlich mit zahlreichen wirbelähnlichen auf- und absteigenden Zellen in unmittelbarer Bodennähe. Kleintromben, die sich bald nach Beseiti-

¹ BLÜTHGEN, J. Allgemeine Klimageographie, Berlin 1964.

gung der nächtlichen Bodeninversion über der Wüste zu bilden pflegen², springen wahrscheinlich hin und her, wo sie gerade günstige Bedingungen für den Durchbruch der erhitzten Luft nach oben antreffen.

Je rauher der Grund ist, desto turbulenter wird die unterste Luftschicht sein. Eingeleitet wird das Auf- und Absteigen der Luft durch sehr kleine Erwärmungsunterschiede durch die Ungleichheit des Materials, aus dem der Boden besteht, vor allem der Sand, dessen uneinheitliche Temperatur von Korngröße, Farbe, Lagerung u. a. abhängt. Das Spiel der so entstandenen nebeneinander liegenden vertikalen Luftfäden bedingt die Schlierenbildung. Sie läßt, wie Beobachtungen in unseren Breiten ergeben haben, an extrem heißen Sommertagen bis etwa $1\frac{1}{2}$ m über dem Boden auf- und absteigende Luftfäden erkennen. In heißen Wüsten werden durch Schlotströmungen der Luft Spiegelungen durch Reflexion unter bestimmten Gegebenheiten im Landschaftsbild sichtbar, wenn beispielsweise die Spitzen kahler Hügel zu langen Schornsteinen ausgezogen werden, die Kappen bilden und wieder mit der Unterlage verschmelzen.

Die bodennahe Turbulenz der Luft erhält besonders in der pflanzenlosen Wüste durch den thermischen Einfluß des Untergrundes kräftige Impulse. Wieweit der Auftrieb der Luft über der erhitzten Unterlage imstande ist, Sand aufzuwirbeln und umzulagern, ist von manchen Faktoren abhängig, in erster Linie natürlich von der Größe oder richtiger dem Gewicht der Körner. Der Effekt der Hitzeturbulenz in Sanden mag angesichts der wechselnden Bedingungen, unter denen sie sich befinden, sehr verschieden sein, aber er ist gewiß nicht unbeträchtlich. Wir können auf ihn aus der Beobachtung anderer fester Partikel schließen, deren Versetzung durch Luftbewegungen in bodennahen Schichten auch an windstillen Tagen nachzuweisen ist. So hat sich gezeigt, daß schon in unseren Breiten, wo die Turbulenz lange nicht die Auswirkung hat wie in der Wüste, die Luftströmungen in den untersten Schichten die Früchte der Esche 30 m und die der Fichte über 300 m transportieren können.

Bei Sanden ist einer der maßgebendsten Faktoren für eine Umschichtung durch Turbulenz die Lagerung. Je loser die Partikel liegen, desto leichter werden sie aus ihrem Verband zu lösen sein, und diese Beweglichkeit wird durch Wind und Feuchtigkeit bestimmt. Beide können eine gewisse Verfestigung der Oberfläche erzeugen, der Wind durch Pflasterung und die Feuchtigkeit durch Verkittung, die, so gering sie auch in Dünen sein mag, sich doch auch hier, wie fast überall in der Wüste, findet, sofern der Sand nicht dauernd in Bewegung gehalten wird.

Es ist klar, daß die nach aufwärts strebende Luft über dem erhitzten Boden die Schwerkraft nur sehr feinen Sandes überwinden kann und daß zur Hebung und Verfrachtung größerer Körner Luftversetzungen nötig sind, die die Kraft der bodennahen Turbulenz übersteigen. Nach den Untersuchungen von R. A. BAGNOLD³ ist anzunehmen, daß im allgemeinen durch Hitzeturbulenz der Luft nur Partikeln, die kleiner sind als 0,1 bis 0,2 mm, gehoben und schwebend erhalten werden können. Da die durchschnittliche Größe der feinsten Dünensande zwischen 0,15 und 0,25 mm, also zum größten Teil innerhalb der Grenzen einer noch möglichen Aufwirbelung liegt, kann unter bestimmten Bedingungen eine solche und damit eine Umlagerung des Sandkörpers als Folge

² HAUDE, W. Temperatur und Austausch der bodennahen Luft über einer Wüste. Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. Bd. 21 (1935).

³ The Movement of Desert Sand, G. J. 85, 1935, ders. The Transport of Sand by Wind G. J. 89, 1937, ders. Proceedings International Symposium on Desert Research, Jerusalem 1952.

bloßer bodennaher Turbulenz ohne Zutun anderer Luftströmungen erwartet werden.

Mit dem Auge ist der Weg, den ein einzelnes Korn beim vertikalen Luftaustausch der Turbulenz nach Aufhebung von der Unterlage nimmt, nicht zu verfolgen. Ein festes Partikel wird auf seinem Weg nach Erreichung seines höchsten Punktes, wo es zum Abstieg gezwungen wird, in erster Linie mit der Strömung fliegen, die von oben her die leichten heißen Luftschwaden ersetzt. Wir sind über diesen Kreislauf nicht unterrichtet. Möglicherweise ist er mit absteigenden Luftzellen in einem Muster ausgerichtet. Bei einem Versuch im Laboratorium, den BUNT⁴ beschrieb, bildeten sich über einer erhitzten Unterlage Reihen walzenförmiger Luftwirbel. Daß die Sandbewegung in Bodennähe schon zeitig am Tag einsetzt, hat L. J. SPENZER⁵ in der ägyptischen Wüste beobachtet, als er den Sand in den frühen Morgenstunden in seltsamster Weise umhertanzen sah, sodaß die ganze Oberfläche zu leben schien.

Neben der niedrigen Turbulenz, die sich in bodennahen Schichten abspielt, gibt es als Folge der Temperaturschichtung eine thermische Vertikalbewegung der unteren Luftmassen, die in Form eines Großaustausches in größere Höhen führt. Diese Verfrachtung stattdlicher Luftkörper ist eine ständige Erscheinung, wenn der Boden eine entsprechende Erhitzung erfährt und die Windgeschwindigkeit nicht zu hohe Werte annimmt. Aus den bisherigen Untersuchungen mit Segelflugzeugen läßt sich ableiten, daß diese Aufwinde von pulsatorischem Charakter sind und in Form von „Thermikblasen“ mit einem Durchmesser in der Größenordnung von etwa einem Kilometer aufsteigen⁶. Die Ablösungsvorgänge von der Erdoberfläche sind wenig erforscht, und es fehlen weitere Untersuchungen über das Kreisen der Auf- und Abwindströme. In der heißen flachen Wüste machen langegezogene gleichläufige Wolkenbänke und -streifen bei feuchter Luft bisweilen auf das Bestehen dieser oder einer verwandten Zirkulation aufmerksam.

Daß eine solche Luftbewegung lokaler Genese bei der Dünenmorphologie eine Rolle spielt, ergab sich, als BAGNOLD⁷ auf Grund von zehnjährigen Messungen die Resultante der Windrichtungen in verschiedenen ägyptischen Oasen berechnete und fand, daß sie nur dann mit Form und Streichen der den Oasen zunächst gelegenen Dünen in Übereinstimmung zu bringen war, wenn die Summe der Messungen nicht für das ganze Jahr in Betracht gezogen wurde, sondern nur für die heiße Jahreszeit.

Neben den vertikalen Luftströmungen, die die Folge der Erhitzung der Bodenoberfläche bei relativer Windruhe sind, gibt es Aufwärtsbewegungen der Luft, die innerhalb stürmischer horizontaler Luftbewegungen mit großer Kraft in die Höhe streben. Daß bei Sand- und Staubstürmen in der Wüste innerhalb der bewegten Luftmassen starke Aufwindtätigkeit stattfindet, ist schon an den mitgerissenen Staubpartikeln zu erkennen, die hoch über dem treibenden Sand wie der Rauch von Bränden sich erheben. Wahrscheinlich handelt es sich um Schloten, die in der allgemeinen Luftversetzung mitverfrachtet werden, aber bisher hat verständlicherweise niemand vermocht, die Auswirkungen der lotrechten Luftsäulen in einem Sandsturm, in dem es kaum möglich ist, zu atmen, zu messen oder auch nur zu beobachten.

⁴ Quarterly Journal of the Meteorological Soc., July 1937.

⁵ Diskussion zu: BAGNOLD 1935.

⁶ ALBRECHT, F. Die thermische Konvektion etc. Reichsamt f. Wetterdienst (Luftwaffe), Wissenschaftl. Abh. Bd. IX, No. 5, Berlin 1942.

⁷ A. a. O. 1952.

Von welch beträchtlichem Effekt größerräumige Aufwinde sein können, erleben wir auch bei uns an Sommertagen, wenn Kaltluftmassen angreifen. Die abergläubische Phantasie des mittelalterlichen Menschen überlieferte von Fröschen und Eidechsen, die vom Himmel fielen, und wir erfahren, daß Laub und größere Fremdkörper an der Stirnseite einer Kaltfront einige tausend Meter hochgerissen werden können.

Eine eigene Art vertikaler Luftbewegung sind die isoliert auf schmalen Bahnen dahinwirbelnden Windhosen, die in der Wüste durch Aufsteigen einer überhitzten Luftschicht infolge ihres Auftriebes auftreten, oder auch durch das Herabgreifen einer in der Atmosphäre bestehenden Wirbelbewegung bis zur Oberfläche entstehen. Sie schrauben sich vehement in die Höhe und können den Zusammenhang mit dem Boden verlieren und in hohen Luftschichten erhalten bleiben. Flieger haben sie in 1500 m begegnet.

Diese Tromben, die viel Bodenmaterial mitreißen können, sind vielerorts in der Wüste sehr häufig. Man kann bisweilen in einen ganzen Wald kirchturnhoher Luftwirbel geraten. Ihre Wirkung auf die Oberflächengestaltung der Dünen unterlag sehr verschiedenen Einschätzungen. Nach BAGNOLD⁸ haben sie nur nebensächliche Bedeutung, und die Löcher und Senken, die man in Sanden findet, beruhen nur auf der Tatsache, daß die Flügel einer Düne sich mit dem Rücken einer vorausgehenden vereinigen. V. CORNISH⁹ andererseits meinte, daß sogar die Binnenhöfe der Barchane eine Folge rotierender Luftsäulen seien, eine Ansicht, die heute nicht mehr vertreten werden kann. Daß aber die tiefen Kessel mit steilen Wänden, die sog. *Čaleh-Rig* der Perser, wie sie Verf. in oft 50 m Tiefe im *Rig-e-Djinn* traf¹⁰, durch Luftwirbel hervorgerufen werden, ist naheliegend. Solche mögen auch eine Rolle bei der Entstehung der tiefen *Fuldj* in der arabischen *Nafud* gespielt haben. Die seltsamen kleinen Löcher in den Sanden von *Zabulistan*, die G. STRATIL-SAUER skizzierte¹¹, kann nur der Wind ausgekolkt haben. Hier müssen Tromben innerhalb der großen Luftversetzung des „Windes der 120 Tage“ am Werk gewesen sein. In der Ägyptischen Sahara und wahrscheinlich auch anderwärts gibt es Sandzungen, die aus Dünenmassen abzweigen und deren Entstehung wir uns nicht anders erklären können als durch Luftwirbel, die von beiden Seiten wirkten.

Das ganze Ausmaß der Bedeutung räumlich begrenzter, sich drehender Aufwinde in Sanden ist erst durch Luftaufnahmen deutlich geworden. Abb. 1 zeigt eine Sandkraterlandschaft in der Sahara, über deren Entstehung kein Zweifel bestehen kann. Auch innerhalb der mächtigen Sandaufschüttungen in dem Dünenmeer der Südlichen *Lut*, wo die ost-west streichenden Sandmassen in meridionale Richtung einschwenken, sind mitunter eindrucksvolle schüsselförmige Dellen als Folge rotierender vertikaler Wirbel zu erkennen.

J. BALL¹² hat darauf hingewiesen, wie leicht Luftwirbel auf der Höhe einer Düne künstlich durch einen Gegenstand, beispielsweise einen Stock, erzeugt werden können. Der Stock lag schon nach wenigen Stunden am halben Hang der Düne, und das gleiche Schicksal erlitten gut befestigte Stative, die bei Feldvermessungen aufgestellt waren, und selbst schwere gefüllte Benzinbehälter. Als Folge künstlich erzeugter Luftwirbel kommt es zu einer raschen Erniedrigung des Dünenkammes.

⁸ *The physics of blown sands and desert dunes*. London 1941.

⁹ *On the formation of Sand Dunes*, G. J. 9.

¹⁰ GABRIEL, A. *Durch Persiens Wüsten*, Stuttgart 1935.

¹¹ *Geographische Forschungen in Ostpersien*. I. Die ostpersische Meridionalstraße. *Abh. d. Geogr. Ges. Wien*, Bd. XVII, H. 2, S. 76.

¹² *Problems of the Libyan Desert*, G. J. 70, 1927.

2. Die elektrischen Spannungen in Sanden

Diese wenigen Bemerkungen über vertikale Luftbewegungen in der Wüste lassen daran denken, daß die Rolle, die sie bei der Morphologie von nicht durch den Einfluß einer Vegetation gestörten Sandaufschüttungen zu spielen vermögen, größer ist, als bisher angenommen wurde, und dies umsomehr, als sich Sand wegen seiner schlechten Leitfähigkeit besonders stark erhitzt und Aufströmungen begünstigt. Mit diesen Aufströmungen zusammenwirkend setzen wir als weiteres für die Oberflächenformung von Dünen bisher kaum berücksichtigtes Moment die Folgen von elektrischen Spannungen zwischen den fliegenden Körnern und der Dünenoberfläche in Rechnung.

Jeder Reisende in warmen Wüsten hat Gelegenheit, das hohe Ausmaß der Lufterlektrizität kennenzulernen. Wie oft bemüht man sich in der Wüste, die Blätter der Durchschläge einer Schreibmaschine von einander zu lösen. Aus spitzen eisernen Gegenständen kann man wie aus geladenen Leydener Flaschen Funken ziehen, ebenso aus Haaren und Kleidern. Beim Kämmen knistert es, und wenn man nach einem heißen und stürmischen Tag in der Dunkelheit zwei Decken von einander hebt, geschieht es bisweilen, daß der Zwischenraum hell aufleuchtet. Entladungen entstehen naturgemäß besonders beim Aneinanderreiben feiner Teilchen in Staub- und Sandstürmen. Wie sehr Sandkörner mit Elektrizität geladen sind, spürt man bei einem Sturm an den prickelnden Stichen. Manche Erscheinungen, die mit der Lufterlektrizität zusammenhängen, beginnen schon vor dem Einsetzen eines Sturmes. Tiere können merkwürdig unruhig werden, und auf den Menschen kann die Wirkung ähnlich sein wie bei Föhn oder in der Zeit der Sonneneruptionen. Es mag sein, daß ein den heranstürmenden Luftmassen vorauseilendes elektrisches Feld dafür verantwortlich ist, als dessen Ursache eine negative Raumladung angesehen wird. Die Ladungsträger mögen so klein sein, daß sie für das Auge nicht sichtbar sind. In diesem Zusammenhang sei an die magnetischen Störungen erinnert, die ein Kartieren in der Wüste oft erschweren und für den Motorwagen und das Luftzeug unter Umständen gefährlich werden können.

Daß auf das Verhalten von aufgewirbeltem Sand elektrische Ladungen einen erheblichen Einfluß haben, steht außer Zweifel. Bisher jedoch ist die Erforschung dieses Sachverhaltes nicht weit gediehen.

Vor dem 1. Weltkrieg machte W. J. HARDING KING¹³ in Ismailiya Versuche, die Elektrizität des Sandes zu prüfen. Die Untersuchungen ergaben nur so viel, daß die von einer Düne geblasenen Körner schwer mit (positiver) Elektrizität geladen waren. In einem Fall zeigte das Elektrometer 980 Volt bei etwas mehr als 100 gr. Sand. 1927 hat BALL¹⁴ auf Grund von Beobachtungen im freien Feld weiteres über elektrische Ladungen in Flugsanden berichtet. Während mehrerer Sandstürme in Kairo fand er Ladungen von sehr hoher Spannung. Nach BALL zieht eine Sandanhäufung die treibenden Körner über ihr konvergierend an sich unabhängig von der Streichungsrichtung der Luftbewegung.

E. W. B. GILL¹⁵ hat einen einfachen Versuch gemacht, der die meteorologische Bedeutung der durch Reibung entstandenen Elektrifizierung des Sandes beweist. Trockener Sand wurde durch einen Trichter auf ein Elektrometer fallen gelassen, wobei sich eine beträchtliche positive und negative Ladung

¹³ The Nature and Formation of Sand Ripples and Dunes, G. J. 47, 1916, S. 206.

¹⁴ A. a. O.

¹⁵ Nature, vol. 162, 1948.

zeigte und den Schluß zuließ, daß erstere an die kleineren und letztere an die größeren Sandpartikeln gebunden ist. Das Ausmaß der beiden Ladungen war schon bei der kleinen Versuchsreihe erstaunlich groß und mußte bei durch Wind bewegten Sandmassen sehr bedeutend sein.

W. W. WALTER¹⁶ brachte durch verschiedene experimentelle Versuche den Nachweis für die Höhe der durch Flugsande auftretenden Reibungsspannung, die durch zunehmende Trockenheit der Luft und des Sandes und einen hohen Anteil feinen Sandes ansteigt. Er beobachtete auch die Entstehung zweier entgegengesetzter Raumladungen, die sich in Dünengebieten so auswirken, daß die durch die vorausliegende negative Ladungswolke aufgeladene Sandoberfläche auf die hinterher kommenden positiv geladenen Sandkörner eine anziehende Kraft ausübt, sodaß die Sandkörner nicht weiterrollen und es durch die Anziehungskraft der Oberflächenladung zu einer Akkumulation kommt. Es läßt sich verstehen, daß sich diese besonders leicht dort ausbildet, wo bei bloßer Turbulenz der bodennächsten Luftschichten durch Oberflächenüberhitzung es keine maßgebliche Wirkung einer in eine bestimmte Richtung wehenden Luftströmung gibt. Die elektrischen Anziehungskräfte sind in diesem Fall besonders wirksam, weil es sich bei nicht durch den Wind transportierten, sondern durch Hitzeturbulenz gehobenen Sandkörnern nur um kleine Entfernungen von der Erdoberfläche handelt. Messungen während eines Sturmes in dem Flugsandgebiet bei Frankfurt a. M. — Schwanheim ergaben bei Windstärke 4 negative Spannungen von 100—150 Volt und positive Spannungen von 80—100 Volt. Sandstürme mit hohen Windstärken, bei denen Sandmassen von einer Ausdehnung von mehreren Kilometern versetzt werden, sind in Wüsten keine Seltenheit. Bei solchen Stürmen dürften Spannungen von vielen tausend Volt auftreten.

Elektrische Erscheinungen spielen wahrscheinlich eine ausschlaggebende Rolle sowohl bei der Verfrachtung als bei der Anhäufung von Sand. Sie mögen die Ursache sein für unterschiedliche Ausblasungen und Formen ebenso wie für verschieden große Wandergeschwindigkeit bestimmter Dünen. Beobachtungen im Dünenschutzgebiet Frankfurt a. M.—Schwanheim ließen deutlich eine Anziehung von Sandwolken durch Sandkörper erkennen, die akkumuliert und dann nicht mehr versetzt wurden, obgleich die Windverhältnisse die gleichen waren, wie an anderen Stellen, an denen dieser Vorgang nicht zu beobachten war. Daß der elektrisch geladene Sand für den steilen Winkel verantwortlich ist, mit dem Sandmassen sich bisweilen erheben, und daß die scharfe Abgrenzung von Dünen ebenfalls auf die elektrische Anziehungskraft der Sandkörner zurückgeführt werden muß, ist die Meinung KINGS, BALLS u. a. Nach BALL sind die schmalen langen Sandkörper in der Libyschen Wüste eine Folge der seitlichen Anziehung der die Luft durchfließenden elektrisierten Körner durch die Dünen.

II.

‘Aklé (Netzdünen)

Es liegt nahe, bei Sandanhäufungen, deren Entstehung bisher nicht erklärbar war, an noch unbeachtete Faktoren zu denken, die für die Morphologie ins Gewicht fallen. Zu diesen Dünenformen gehören in erster Linie die ‘Aklé oder Netzdünen. Sie sind schon vor längerer Zeit aus dem algerischen Erg beschrieben worden¹⁷ und neuerdings am eindrucksvollsten aus der süd-

¹⁶ Dünenstudien im Schwanheimer Wald bei Frankfurt, Rhein-Mainische Forschungen, Frankfurt 1950.

¹⁷ Unter anderen von L. AUFRERE in Ann. d. Géogr., No. 40, 1911, S. 370.

westlichen Sahara¹⁸. Hier bilden sie ein ganz besonders schwierig zu querendes Terrain, und dies ist der Grund, weshalb sie so lange unbekannt geblieben sind. Die Struktur der Sande ist nicht überall die gleiche. Die Dünen mögen im Durchschnitt 50 m Höhe betragen. Oft sind sie nur sehr klein und heißen dann, nach S. SEVENET¹⁹, „Akéilé“. In den Becken zwischen den Dünen liegt der Untergrund bloß.

Dem Aussehen dieses Sandwüstentyps kommt die Gitterwüste am nächsten, die aus dem Tarimbecken und Transkaspien bekannt, aber wahrscheinlich in ihrer Entstehung mit den 'Aklé nicht verwandt ist. Gitterwüsten lassen sich aus dem periodischen Wechsel zweier sich kreuzender Windrichtungen erklären. Von den vergitterten Dünenystemen erreicht in der Regel das der Strichdünen viel größere Höhen als das nur als niedrige Sandwellen entwickelte System der Querdünen. Bei den weitflächigen 'Aklé des Majabat al-Koubra ist aber die Karierung, ob lockerer oder kompakter, so regelmäßig in Form und auch in der Höhe, daß es kaum möglich erscheint, aus den Maschen des Gewebes eine bevorzugte Windrichtung zu erkennen (Abb. 3). Ob man diese Netzdünenflächen durch Aufeinanderfolge rechtwinkliger Luftströmungen oder durch gleichzeitiges Nebeneinanderlongitudinaler und transversaler Windsysteme deutet, in beiden Fällen müßten sich zwei Sandbewegungen, die sich aus dem Zusammenwirken von zwei gleich starken Luftströmungen ergeben, fortwährend in einem Winkel von 90° die Waage halten. Auch die kleinste Verschiebung des Winkels, aus der der Wind weht, oder das geringste Überwiegen einer der beiden Luftbewegungen müßte die Regularität der Maschen stören, ihre Höhe ändern und ihre Karierung nach einer bestimmten Richtung hin verziehen.

Verwischt sich das Netzmuster und heben sich nur die Knotenpunkte der Maschen hervor, dann entstehen Dünenformen, für deren Auslegung uns jede Kombination horizontaler Luftversetzungen im Stich läßt. Man könnte diese Dünen „Springflutdünen“ nennen, denn sie erinnern an ein Bild, das Verf. bei Springflut und bestimmten Wetterlagen auf der unruhig tanzenden Oberfläche tropischer Meere beobachtete.

Horizontale Luftversetzungen können wir als Ursache für die Ausbildung der 'Aklé-Muster nicht überzeugend heranziehen. 'Aklé-Wüsten machen überhaupt nicht den Eindruck, unter wirkungsvollen Windströmungen zu liegen. Der Raum der Netzdünen des Majabat al-Koubra zeigt mehr oder weniger ein jahreszeitliches Schwanken zwischen Einflüssen des NE-Passates von Oktober bis Mai/Juni und des SW-Monsuns von Mai/Juni bis September. Aus dem Inneren liegen nicht viele Beobachtungen vor. Während MONODS Querungen²⁰ waren die Nächte fast durchwegs windstill. Auch wurde nie ein Sandsturm erlebt, wie er anderwärts in der Westsahara besonders häufig ist.

Wir verzichten zur Erklärung der Ausbildung der Netzstruktur auf die Annahme von zwei Windsystemen, die genau im rechten Winkel zu einander und gleich in ihrer Wirkung wehen müßten, um das regelmäßige Muster zu schaffen, und ziehen zur Auslegung das Verhalten des durch Oberflächenhitze bewegten und unter dem Einfluß bestimmter elektrischer Spannungsfelder stehenden Sandes heran.

Vorbedingung dafür, daß auf 'Aklé-Flächen die vertikalen Strömun-

¹⁸ Siehe vor allem: Th. MONOD, Majabat al-Koubra, IFAN-Dakar, 1958. Dasselbst auch weiteres Schrifttum.

¹⁹ Étude sur le „Djauf“. Bull IFAN, V. 1943 (1948).

²⁰ A. a. O. S. 187.

gen, die durch Auflockerung der Luftschichten über dem kahlen heißen Boden sich bilden, zur Auswirkung kommen und den Sand umlagern können, ist das Vorhandensein von Feinsanden und das Fehlen jeglicher Oberflächenverfestigung. Über die Korngröße des 'Aklé-Materials' besitzen wir Unterlagen dank MONODS Sandproben. Tatsächlich ist nach den Untersuchungen von G. ROUGERIE²¹ der Anteil an Feinsanden in den 'Aklé des Majabat al-Koubra' besonders hoch. Er beträgt bis 68%; an tonigen Bestandteilen sind bis 12% vorhanden. Über die klimatischen Verhältnisse, die die Bodenpartikeln lose erhielten, sodaß Luftströmungen durch Erhitzung der Oberfläche imstande waren, den Sand auf weite Ausdehnung zum „tanzen“ zu bringen, wie SPENZER²² beobachtete, und auch in höhere Lagen zu transportieren, sind wir auf Vermutungen angewiesen. Sie müssen durch lange Zeiträume wirksam gewesen sein, da die Dünen immerhin eine beträchtliche Höhe haben.

Ihre Zusammenwehung stammt, wie wir annehmen, aus den in den drei klassischen BAGNOLDschen Phasen²³, lifting, saltation und reptation, aus den Viereckmitten der 'Aklé dislozierten Sand', wobei es in erster Linie auf den Weg der emporgejagten Körner auf ihrem durch die Schwerkraft eingeleiteten Rückflug ankommt. Auf Grund von BUNTS Laboratoriumsversuchen müßten die Sandkörner bei der bodennahen Turbulenz die Tendenz haben, sich zwischen den walzenförmigen Wirbeln in parallelen Ketten abzulagern.

Es ist aber möglich, daß neben den Auswirkungen der Strömungen in den untersten Luftschichten auch noch die zweite, in I/1 oben erwähnte, stoßweise vor sich gehende Strömung unter dem Einfluß der überhitzten Wüstenfläche in höhere atmosphärische Lagen zur Erklärung der Bildung der 'Aklé-Muster' herangezogen werden muß.

In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, daß BAGNOLD²⁴ bei Durchsicht der Karten der Dünengebiete in der Simpsonwüste in Australien, der Rub' al-Khali in Südarabien und der Erg der Sahara eine Erscheinung fand, die er mit der Luftzirkulation über heißen Wüstenflächen in höheren Lagen in Verbindung brachte. Maskiert durch das Vorhandensein anderer verwickelter Dünenformen ergab sich eine sehr ausgeprägte Neigung des Sandes, sich in weiten gleichläufigen Reihen mit Zwischenräumen von 2—5 km zusammenzuschließen. Diese Anordnung der Dünen würde für das Bestehen von Luftströmungen sprechen, die, mehrere hundert Meter über den Boden reichend, in Walzen zirkulieren, analog wie sie in Laboratoriumsversuchen im Kleinen hervorgerufen wurden. Hier sei auch an CAPOT-REYS²⁵ Beobachtungen aus den Edeyen von Murzuk erinnert, wo Dünenbänder sich konstant in einem Zwischenraum von 1 km folgen, eine Bildung, die nur einem „mouvement ondulatoire“ der Luftbewegung zugeschrieben werden kann.

Wie wäre das Sandmuster bei „Thermikblasen“ von etwa einem halben Kilometer Durchmesser? Die aufsteigenden Luftmassen würden den Sand vielleicht dort ausfallen lassen, wo sie durch die von außen sich ihrer Bewegung entgegenstellenden Druckkräfte zerstört werden. Wie bei der Turbulenz in den unmittelbar dem Boden aufliegenden Schichten muß auch bei der sekundären Luftzirkulation, die sich, wie schon erwähnt, auch andeutungsweise in den Wolkenbildungen zeigt, vieles spekulativ bleiben, solange die nötigen Beobachtungen fehlen.

²¹ MONOD, a. a. O. 1958.

²² Siehe oben 5).

²³ A. a. O.

²⁴ A. a. O. 1952.

²⁵ CAPOT-REY, R. L'Edeyen de Mourzouk, Trav. Inst. Rech. Sahar. Bd. IV, 1947.

Das Gleiche gilt auch für den dritten Faktor, den wir zur Erklärung des 'Aklé-Musters heranziehen, den Einfluß elektrischer Ladungen der schwebenden und der am Boden angehäuften Körner. Gewiß ist, daß die Wege fester Partikel diesem Einfluß unterliegen und daß dadurch eine beträchtliche Abweichung der Sandkörner von der von den Luftzellen eingeschlagenen Bahn verursacht wird.

Nach Meinung des Verf. scheint von besonderer Bedeutung zu sein, daß sich die Ablagerung der von der Erde abgehobenen Partikeln immer mehr der geschlossenen elektrisch geladenen Oberfläche des bereits zusammengetragenen Sandes zuwendet. Die Versuche WALTERS²⁶ haben gezeigt, wie sich auf geladenen Dünenoberflächen gleichmäßig dicke, zur Steigung der Dünenoberfläche parallel laufende Flugsandschichten ablageren. Querschnitte durch verschiedene Dünenformen bestätigen die auffallend gleichmäßige Mächtigkeit dieser Schichten, die sich durch die Windverhältnisse nicht deuten und nur durch eine ausgeglichene Verteilung der Ladungen auf der Dünenoberfläche und eine damit verbundene gleichstarke Anziehung verstehen läßt. Hier versprechen die von WALTER ausgearbeiteten Methoden, für die ein feldverwendungsfähiges Meßgerät entwickelt wurde, eine Klärung.

III.

Ghur d (Pyramidendünen)

Schlotströmungen der Luft, die nicht über weiten Flächen wirken, spielen, nach Ansicht des Verf., eine ausschlaggebende Rolle bei der Entstehung der Pyramiden-, Stern- oder Kegeldünen („Ghur d“ plur. „Oghrud“, „Khurd“, „Guern“, „Demkha“, „Chuchet“ in der Sahara, „Qa'id“ in Südarabien). Wir beschäftigen uns in erster Linie nicht mit den durch Kreuzung zweier Strichdünenysteme entstandenen Sandanhäufungen, sondern mit den isoliert sich erhebenden Sandmassen.

Erstere sind weit verbreitet und bilden sich an Knotenpunkten von aus verschiedenen Richtungen kommenden Längsdünen, vielleicht auch unter Mitwirkung von Querdünen, die sich übereinander geschoben haben. In Persien nennt man solche zu großen Höhen sich auftürmende Sande Qal'äh Rig, „Sandburgen“. Sie ragen unregelmäßig verteilt über die Gipfflur der anderen Dünenmassen hervor und sind häufig zu beobachten²⁷. In diese Gruppe mögen auch die „Dawane“ des Tarimbeckens gehören, während die „Qa'id“ Südarabiens verteilt auf fester Unterlage zu stehen scheinen. Angesichts der völlig verschiedenen Genese der innerhalb eines nach einer Richtung orientierten Dünenmeeres sich erhebenden Sandanhäufungen und der außerhalb stehenden Einzelmassive hält es Verf. für angebracht, nicht beide mit dem gleichen Namen zu belegen. Im Folgenden wird der Ausdruck „Ghur d“ nur für die „Mastodon“ (CAPOT-REY) unter den Dünen verwendet, den auf offener Fläche stehenden pyramiden-, stern- oder kegelförmigen Sandaufschüttungen, die bis 300 m rel. Höhe erreichen können.

In ihrer vollendetsten Ausbildung sind sie im südöstlichen Teil des algerischen Ost-Erg anzutreffen, wo sie den Übergang zu den fingerförmigen Sanden im Raum von Ghadames bilden, welche letztere aber orientiert erscheinen. Je weniger die einzelnen Ghur d nach einer bestimmten Richtung ausgerichtet sind, desto schwieriger ist es, ihre Morphologie aus meteorologischen Gegebenheiten

²⁶ A. a. O.

²⁷ GARIEL a. a. O.

zu erklären. Die Annahme²⁸, Ghurd entstünden dann, wenn die Resultante der Sandbewegung durch den Wind sich dem Nullpunkt nähert, macht die Verteilung der Pyramidendünen an ganz bestimmten Stellen nicht klar. Daß jedoch der Raum nicht in ausgesprochenen Windstrichgebieten liegen darf, ist eine der Voraussetzungen zur Entstehung der Ghurd, wie sie der Verf. vermutet. Ghurdgebiete scheinen auch wirklich windarme Räume zu sein. Das Vorzugsgebiet der Ghurd-Bildungen im Ost-Erg steht nicht mehr unter der Herrschaft der aus dem nördlichen Quadranten wehenden Atlas- und Syrtenwinden und wird auch von S her höchstens von den letzten Ausläufern aus der fast ständigen Antizyklone über dem Hoggar erreicht. Über die Windverhältnisse in der Rub' al-Khali sind wir nicht unterrichtet. Diese Wüste scheint aber keineswegs zu den sturmreichen zu gehören. L. AUFRÈRE²⁹ neigt dazu, bei Bildung der isolierten Sandmassive eine Äquivalenz der Hauptwindrichtungen anzunehmen, doch sind, nach dem Autor, die Hinweise dafür zu unsicher, um in Betracht gezogen zu werden. Es gelingt auch nicht, die Gruppierung der Sandkegel auf der Ebene durch eine regelhafte Differenzierung der Luftbewegung in großem Ausmaß zu erklären, und wir können keine Gesetzmäßigkeit der Anordnung der Ghurd, die an eine Interferenz verschiedener Wellensysteme denken ließe, erkennen.

Folgende Möglichkeit einer Entstehung der Ghurd sei zur Erörterung gestellt, wobei auf eine Mitteilung KINGS³⁰ zurückgegriffen wird, der in der Libyschen Wüste während eines Sandsturmes die Tätigkeit kleiner Tromben im Windschatten von Sandzungen beobachtete:

Ein selbständiger Sandkörper, welcher Entstehung auch immer, wird sich mehr erhitzen als seine Umgebung, und die Bewegung seiner Körner mag die Luft über ihm nicht nachlassend aufheizen, bis eine Wettermaschine angelaufen ist, die immer weiter in gleiche Richtung zielt. Zweifellos wird die erhitzte Luft nach oben streben und rotierende Schlotströmungen werden nun die Formung des Sandkörpers bestimmen. Unter der Voraussetzung, daß die Kraft der Luftwirbel die der im Umkreis herrschenden Winde übersteigt, kann unter Mitwirkung elektrischer Spannungen ein Gebilde aufgebaut werden, das von allen Seiten Luft ansaugt und Sandzug erhält. Man sieht denn auch um manche Ghurd im näheren und weiteren Umkreis mit den Steilabfällen gegen das Massiv gewendete niedrige Dünen, während die Hänge der Ghurd scheinbar durch Aufwindkörper mit konzentrisch streichenden Formen modelliert sind, als wären Schwaden, die einen brennenden Holzstapel umhüllen und an ihm emporzüngeln, am Werk gewesen. Auffallend sind die gewundenen Sandkämme. Was einwandfrei die Tätigkeit einer sich drehenden lotrechten Luftwalze über der Mitte des Massivs beweist, ist ein ins Auge springender flacher Krater (Abb. 2), der einzelne Ghurd krönt.

Wenn schon kleine Gegenstände in Sanden Aufwinde hervorzurufen vermögen, mag dies bei großen Gebilden, wie es Ghurd sein können, in noch ungleich wirkungsvollerem Ausmaß der Fall sein, und so sehen wir in isolierten Pyramidendünen selbständige Wirkungszentren für lokales Wettergeschehen, durch das Schlotströmungen der Luft hervorgerufen werden, unter deren Einfluß der Sand gezwungen wird, sich den Druck- und Strömungsunterschieden der darüber fließenden Luft anzu-

²⁸ BAGNOLD, R. A. *Forme des dunes de sable et régime des vents*, Colloques intern. du centre nat. de la recherche scientifique, XXXV, Alger 1961, S. 32.

²⁹ Essai sur les dunes du Sahara Algérien, Festschrift SVEN HEDIN, Stockholm 1936.

³⁰ KING, W. J. HARDING, *Study of a Dune Belt*, G. J. 61, 1918.

passen, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Diese Art der Entstehung würde auch den Umstand erklären, daß Ghurd festliegen, ohne daß wir für diese Tatsache einen harten Kern in ihrem Inneren oder Feuchtigkeit, die den Sand zusammenhält, annehmen müssen.

Zu dieser Ansicht der Entstehung der Ghurdmassive im Widerspruch scheinen die Erfahrungen über die desintegrierende Wirkung künstlich erzeugter Luftwirbel zu stehen. Sie ist den Landesbewohnern vieler Wüstengebiete bekannt und wird sogar praktisch ausgewertet. W. C. BARCLAY³¹ berichtet, wie in der Pampa del Sacramento Dünen davon abgehalten werden, die Eisenbahnlinie zu verschütten, indem eine Ladung Kieselsteine in dünner Schichte auf die Oberfläche der bedrohlichen Sandanhäufung gelegt wird, worauf diese durch die nun entstehenden Luftwirbel rasch absackt und schließlich völlig verschwindet.

Und doch kommt die auflösende Wirkung vertikal sich drehender Luftströmungen auf kompakte Sandmassen wahrscheinlich nur zustande, wenn die Windstärke hoch genug ist, um die aufgewirbelten Körner zu vertragen und eine Akkumulation zu verhindern. Andernfalls werden Aufwinde, die sich um einen Mittelpunkt gruppieren, zu Sandsammlern. Auch mag die zerstörende Folge von Tromben gebunden sein an ein bestimmtes gleichförmig feines Material und kann in das Gegenteil bei nicht sortierter Korngröße umschlagen.

Bei jedem kleinen „Staubteufel“ auf unseren Straßen sieht man eine Auslese größerer Partikel, die nicht aufs Geratewohl verstreut, sondern akkumuliert werden. Auch die „Rußflecke“ in hellen Sandmeeren der persischen Lut sind vermutlich durch Schlotströmungen der Luft hervorgerufene Ansammlungen ganz bestimmter Körner meist jungeruptiver Genese. Es läßt sich vorstellen, daß der Rückstand einer Trombe unter bestimmten Voraussetzungen zur Keimzelle einer Düne wird, bei deren Formung auch die Art der Sortierung mitspielt, wissen wir doch, wie fein die Morphologie sich anhäufender Sande auf deren Zusammensetzung anspricht. Als BAGNOLD³² beobachtete, wie wandernde Longitudinaldünen sich in Barchane verwandelten, sobald sie auf Nubischen Sandstein gerieten, ließ er die Frage offen, ob die Beimischung anderer Sandkornbestandteile und nicht die veränderte topographische Unterlage für dieses Verhalten verantwortlich sei.

Daß auch ohne besondere Auslese Tromben nicht nur desintegrieren, sondern selbst Sandanhäufungen erzeugen können, wenn ihr Wirkungskreis unter dem Wind liegt und dort beginnt, hat KING³³ nachgewiesen. Er führt sogar auf Grund seiner oben erwähnten Beobachtung zumindest eine Art der Entstehung von Walfischrücken und letztlich von Barchanen auf diese Erscheinung zurück. Wenn der Wind am geraden Zug durch einen größeren Sandkörper gehindert wird, weicht er nach beiden Seiten aus, und es entstehen an den Sandausläufern im Lee Tromben, ähnlich wie Wasserwirbel bei starker Strömung flußabwärts beiderseits von Brückenpfeilern. Da die rotierenden Luftsäulen bei jedem Sandwind Materialzuwachs erhalten und sich immer an gleicher Stelle neu bilden und zusammenfallen, muß Sand in geschützter Lage in ansehnlicher Menge abgelagert werden. Wenn auf dieser Sandanhäufung Rippelmarken entstehen, in deren Mulden die weiter angetriebenen Sandkörner hängen bleiben, sind, nach KING, die Bedingungen zur Bildung von großen Dünen gegeben. Der Autor fand als Bestätigung seiner Ansicht größere Sandbuckel im Windschatten

³¹ Sand Dunes in the Peruvian Desert, G. J. 49, 1917.

³² A. a. O. 1931, S. 29.

³³ A. a. O. 1918.

der Spitzen von Barchanhörnern dort, wo aller Wahrscheinlichkeit nach sich bei Stürmen Tromben einstellen.

Sicherlich weicht die vom Verf. zur Diskussion vorgeschlagene Möglichkeit der Entstehung der Ghurd durch Aufwinde im Einzelnen sehr von der eben geschilderten Entwicklung ab. Es ist vor allem eine Frage, ob die Rippeln die Ursache für das Weiterwachsen des Sandkörpers sind oder ob, wie der Verf. meint, bei einer entsprechenden Größe der Anhäufung diese die weitere Entwicklung selbst übernimmt, indem sie die Vorgänge in der sie umgebenden Lufthülle beeinflusst und bis zu der aerodynamisch günstigsten Form wächst, unter der Voraussetzung, daß durch selbsterzeugte Aufwinde gehobene Körner nicht durch Stürme vertragen werden. Aber gemeinsam für die KINGSche Erklärung der Bildung der Walfischrücken und der hier vertretenen der Ghurd ist beim Einleiten des Vorganges die grundsätzliche Rolle, die vertikale Luftströmungen spielen.

Auf die Mitwirkung elektrischer Spannungsfelder bei Bildung der isolierten Sandmassive läßt sich aus der Analogie zu der Erscheinung schließen, daß dort, wo regellos verstreut einzelne Sandkörper auf blanken Flächen liegen, jedes Sandkorn, das über die Wüste treibt, scheinbar zwingend im Verband einer Düne landet. KING hat es schon vor einem halben Jahrhundert³⁴ so formuliert, daß Dünen die merkwürdige Kraft haben, allen Sand in der Umgebung einzukassieren.

IV.

Zusammenfassung

Wenn auch bisher fast ausschließlich horizontale Luftversetzungen zur Erklärung der Formung von Sanddünen herangezogen wurden, stellen doch, nach Ansicht des Verf., auch vertikale, zumeist rotierende Luftströmungen, verbunden mit elektrischen Ladungen der Sandkörner, in Sandgebieten morphologisch stark ins Gewicht fallende Faktoren dar. Es wird versucht, ihre Bedeutung bei gewissen Vorgängen der Dünenbildung zu erfassen, die uns noch immer unbekannt sind, vor allem bei Netz- und Pyramidendünen. Die Regelmäßigkeit der Karrierung der 'Aklé, besonders im Majabat al-Koubra, legt den Gedanken nahe, daß hier nicht Richtung und Stärke von horizontalen Winden, sondern die Turbulenz der bodennahen Luftschichten und allenfalls auch „Thermikblasen“ im Verein mit elektrischen Anziehungskräften die Muster geschaffen haben. Für die Entstehung der Ghurd, soweit darunter nicht die durch Kreuzung zweier Dünen-systeme gebildeten Sandanhäufungen, sondern die isoliert auf flacher Unterlage sich erhebenden Sandmassive in dem ostalgerischen Erg oder der Rub' al-Khali verstanden werden, können im eigenen Wirkungskreis durch thermodynamische Gegensätze erzeugte, sich drehende Luftschläuche, ebenfalls in Zusammenhang mit elektrischen Erscheinungen, verantwortlich gemacht werden.

Summary

While up to now horizontal currents of air have almost exclusively been drawn upon to explain the formation of sand dunes it is the author's opinion that vertical and usually rotating air currents in connection with electric charges of the grains of sand constitute important morphologic factors in sandy regions too. An attempt is made to explore their importance for certain processes of dune formation that are still unexplained, specially in regard to net- and pyramid

³⁴ A. a. O. 1916.



Abbildung 1.

Sandkraterlandschaft (Großer alger. Erg) nach einer Photographie I. G. N.
aus: J. LARTÉGUY, Le Sahara.



Abbildung 2.

Echte Ghurdbildung im alger. Erg. Nach einer Photographie aus „Atlas
Phot. d'Algerie“ aus: E. MIGLIORINI, L'Esplorazione del Sahara.

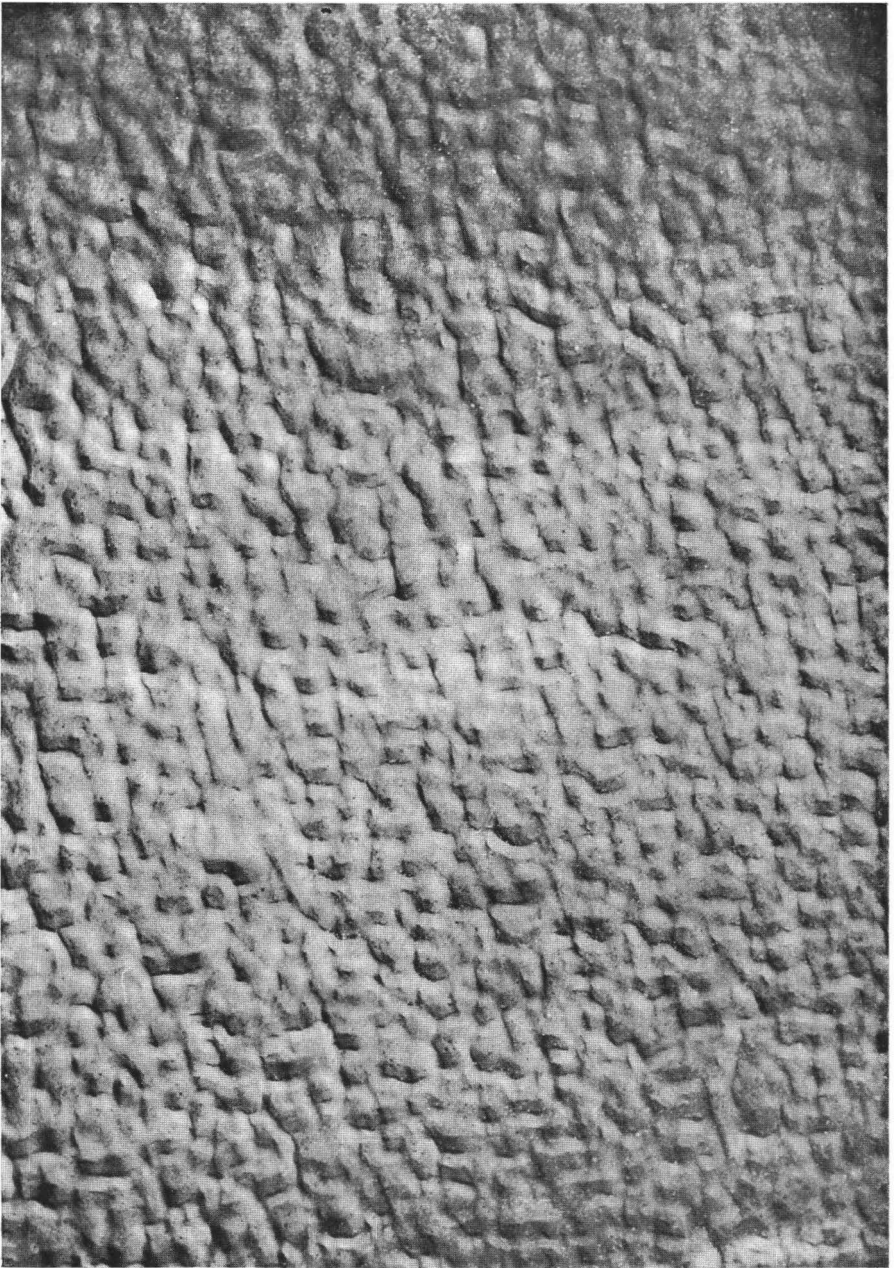


Abbildung 3.
Netzdünen ('Aklé am SW-Rand des 'Aklé 'Awana)
aus: TH. MONOD, Majabat al-Koubra, 1958.

dunes. The regularity of the chequer pattern in the 'Aklé, especially in the Majabat al-Koubra, suggests that in this case the patterns were not formed by the direction and force of horizontal breezes but by the commotion of the layers of air next to the ground and possibly by bubbles of warm air in connection with electric attraction. For the formation of the ghurd, as far as not the sand accumulations formed by the crossing of two systems of dunes are thought of but the isolated heaps of sand on a level base in the East Algerian Erg or in the Rub' al-Khali, rotating tubes of air created within their own sphere of action by thermodynamic contrast, again in connection with electric phenomena, can be made responsible.

R é s u m é

Jusqu'à présent on a essayé d'expliquer la formation des dunes de sable presque exclusivement par des mouvements d'air horizontaux. L'auteur est, par contre, d'avis que des courants d'air verticaux, la plupart du temps rotatoires, en combinaison avec des charges électriques des grains de sable constituent des facteurs importants pour la morphologie des régions sablonneuses. On essaye d'évaluer leur importance pour certains aspects toujours inexplicés de la formation des dunes, surtout réticulaires et pyramidales. La régularité des carreaux des 'Aklé, surtout au Majabat al-Koubra, fait penser que ce n'est pas direction et force de vents horizontaux qui ont formé ces desseins, mais des turbulences des basses couches d'air, à la rigueur aussi des „bulles thermiques“ en combinaison avec des forces attractives électriques. La formation des Ghurd (le terme pris dans le sens d'un massif sablonneux isolé, s'élevant sur une base plate à l'Erg de l'Algérie de l'Est ou au Rub' al-Khali, et non pas d'une accumulation de sable par le croisement de deux systèmes de dunes) peut être expliquée par des trombes d'air créées par des contrastes thermodynamiques dans leur propre domaine, en combinaison avec des phénomènes électriques.

Manuskript abgeschlossen im März 1966