

Zu Phasenübergängen

H. Joachim Schlichting

Phasenübergänge spielen von jeher innerhalb der Physik eine wichtige Rolle. Ein grundlegendes physikalisches Verständnis bahnt sich jedoch erst in jüngster Zeit an. Dabei zeigt sich, daß Phasenübergänge durch universelle Prinzipien organisiert sind, die es insbesondere erlauben, in ganz anderen Bereichen als der Gleichgewichtsthermodynamik ein phasenübergangsähnliches Verhalten zu beobachten. Diese Universalität läßt vermuten, daß der Vielfalt der Erscheinungen gemeinsame elementare Vorgänge zugrunde liegen. Wir stellen hier einige Demonstrationen vor, die entweder selbst anschauliche Realisationen solcher elementarer Vorgänge sind oder aber eine anschauliche Modellierung derselben darstellen. Wir gehen davon aus, daß die Anschauung letztlich eine Voraussetzung für ein vertieftes und bleibendes Verständnis ist [1].

1. **Strukturelle Phasenübergänge** treten auf, wenn eine Substanz durch Variation eines äußeren Parameters ihre Struktur ändert (z.B. Graphit \rightarrow Diamant). Diese Änderung manifestiert sich meist in den makroskopischen Eigenschaften, ohne unmittelbare Rückschlüsse auf die atomare Rekonstruktion der Gitterstruktur zu erlauben. Mit Hilfe des folgenden Problems läßt sich diese Rekonstruktion veranschaulichen. Problem: In einem rechteckigen Rahmen (der sich leicht mit Hilfe eines Overheadprojektors projizieren läßt), befindet sich ein quadratisches Gitter von ringförmigen "Atomen" (siehe Abb. 1). Wie läßt sich ein zusätzliches "Atom" darin unterbringen, ohne daß der Rahmen vergrößert werden müßte?

Lösung: Die Lösung besteht darin, die "Atome" zu einer hexagonalen Struktur umzuorganisieren (siehe Abb. 2: Genügend weit vom Rand entfernt ist jedes Atom von sechs nächsten Nachbarn umgeben.) Dadurch reduziert sich der Abstand

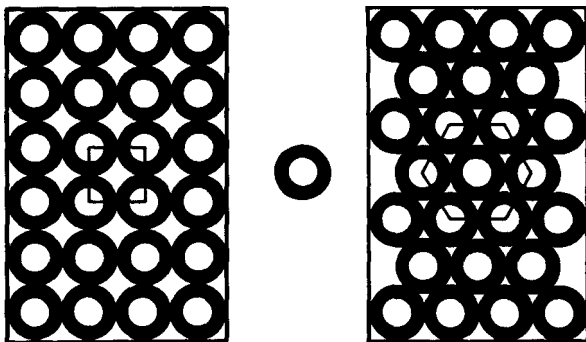


Abb. 1: Kubische Anordnung der "Atome".

Abb. 2: Hexagonale Anordnung der "Atome". Es haben mehr "Atome" Platz als in der kubischen Anordnung.

der "Gitterebenen" um den Faktor $\sqrt{3}$, und es haben mehr "Atome" auf derselben Fläche Platz. Die plötzliche Ordnungsänderung bei einem Phasenübergang wird typischerweise durch den sog. Ordnungsparameter beschrieben. Im vorliegenden Fall könnte der Abstand zwischen den einzelnen "Gitterebenen" die Rolle des Ordnungsparameter spielen. Als "Atome" haben wir Unterlegscheiben verwendet. Münzen und andere Scheiben sind natürlich ebenfalls geeignet.

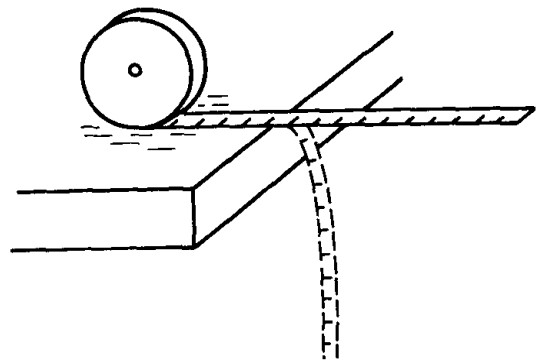


Abb. 3: Maßband über Tischkante hinausragend in gestreckter und geknickter Form (gestrichelt)

2. Bei **diskontinuierlichen Phasenübergängen** tritt ein sog. Hystereseverhalten der das Problem bestimmenden Variablen auf. Damit ist gemeint, daß das System sich gewissermaßen "erinnert", aus welcher Richtung es sich dem kritischen Punkt nähert. Schiebt man beispielsweise ein abgerolltes Metallmaßband langsam über eine Tischkante, so biegt es sich allmählich immer mehr unter der zunehmenden eigenen Masse nach unten durch bis es schließlich bei einer kritischen Überhanglänge plötzlich abknickt, d.h. den Winkel zur Horizontalen sprunghaft vergrößert (siehe Abb. 3). Dieses Abknicken ist von einem deutlich vernehmbaren Knackgeräusch begleitet. Von nun an vergrößert sich der Winkel beim Weiterschieben kaum noch. Zieht man das Band wieder ein, so schnell es nicht etwa wieder bei der Abknicklänge in die gestreckte Lage zurück, sondern bei einer kleineren Länge. Der darin zum Ausdruck kommende Hystereseeffekt ist besonders ausgeprägt, wenn man die konkave Seite nach oben zeigen läßt. Dies hat den weiteren Vorteil, daß man die unterschiedliche Knicklänge direkt ablesen kann.

3. Sowohl der elastische als auch der akustische Effekt eines abknickenden Stahlbandes werden in bekannten Spielzeugen ausgenutzt: In dem einen Fall geht es um ein **Fangballspiel** (siehe Abb. 4). Indem man ein am unteren Ende eines trichterförmigen Korbes angebrachtes fest eingespanntes Metallband

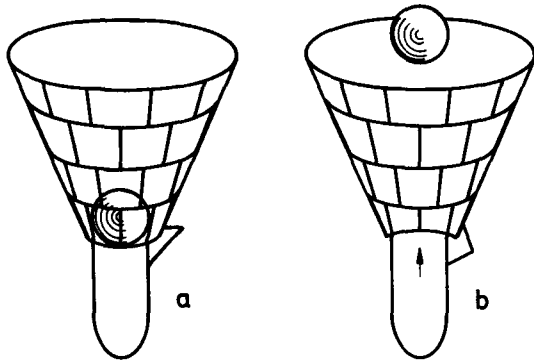


Abb. 4: Fangkorb mit eingespanntem Metallband, a) in normaler Form, b) in durchgeknickter Form.

durch Hebeldruck zum Durchknicken bringt (siehe oben), wird ein darauf liegender Tischtennisball aus dem Korb herausgeschleudert. Er muß dann mit dem Korb wieder aufgefangen werden, um sodann erneut herauskatapultiert zu werden, usw. Dabei können beachtliche Höhen erreicht werden. Woher kommt die entsprechende Energie? Sie wird zunächst durch den gegen einen relativ starken Widerstand ausgeübten Daumendruck als elastische Energie auf das Stahlband übertragen, um sich sodann beim phasenübergangsartigen Durchknicken des Stahlbandes auf einmal zu entladen. In dem anderen Fall geht es um den sog. **Knackfrosch**. Hier wird ebenfalls ein geprägtes Stahlband durchgedrückt. Es kommt in diesem Fall auf das Knackgeräusch an, das beim Überschreiten des kritischen Drucks infolge des Durchknickens entsteht und durch den metallenen "Froschkörper" noch etwa verstärkt wird [2].

4. Im Rahmen der **Katastrophentheorie** sind Phasenübergänge eine spezielle Art von Katastrophen. So stellt etwa das letztgenannte Beispiel eine Katastrophe vom "Kuspen"-Typ dar. Daß diese Bezeichnungsweise durch die Anschauung gerechtfertigt erscheint, erlebt man in eindrucksvoller Weise in dem folgenden Beispiel.

Dazu nehme man eine leere Getränkedose (aus Aluminium). Wenn sie vorher noch geleert werden muß, sollte der Inhalt kein Bier sein. Denn der Versuch erfordert insofern etwas Geschick, als sich der Proband (mit einem Fuß) auf die Dose stellen soll. Er darf sich allerdings mit den Händen an einer Wand u.a. abstützen. Normalerweise ist die Dose so stabil, daß sie die Person trägt, obwohl sie äußerst dünnwandig ist. Zur Katastrophe kommt es allerdings dann, wenn man die Dose aus dieser ihrer stabilen Form bringt, indem man mit einem Stab gegen die seitliche Wandung drückt. Es genügt eine relativ kleine Einbeulung, und die Dose wird - von einem charakteristischen Geräusch begleitet - unter dem Gewicht des

Probanden förmlich zermalmt. Im Unterschied zum letztgenannten "Phasenübergang" ist die Formänderung in diesem Fall allerdings irreversibel.

Dieser effektvolle Versuch kann natürlich auch zur Demonstration der Formstabilität, wie sie in Natur (z.B. Getreidehalm) und Technik (z.B. Leichtbaukonstruktion) häufig anzutreffen ist, eingesetzt werden.

5. Die **Stabilität einer bestimmten Form** bzw. die "Erinnerung" an eine bestimmte Form findet man bei einem Spielzeug vor, das seit kurzem in Spielzeugläden u.a. erhältlich ist. Es handelt sich um eine dickwandige Gummikappe (siehe Abb. 5), deren Form

durch Umstülpung geändert werden soll. Anstatt in dieser neuen (der alten allerdings sehr ähnlichen) Form zu verbleiben oder sich der Umstülpung durch sofortiges Zurückspringen



Abb. 5: Springende Gummikappe, a) in stabiler, b) in umgestülpter, metastabiler Lage kurz vor dem "Phasenübergang".

zu widersetzen, "kriecht" das Spielzeug zunächst mehr oder weniger langsam in Richtung Ursprungsform zurück, um dann - an einem "kritischen" Punkt angelangt - den größten Teil des Weges explosionsartig zurückzulegen. Dieser Phasenübergang kann so drastisch ablaufen, daß die Kappe dabei bis zu zwei Metern hoch springt, sehr zum Schrecken ahnungsloser Zeitgenossen, denen man eine solche Tellermine unauffällig untergejubelt hat.

Die Behandlung dieses Spielzeugs wirft eine Menge weiterer interessanter physikalischer Fragestellungen ab. Beispielsweise ließe sich anhand der Sprunghöhe die potentielle und damit die in der Verformung gespeicherte elastische Energie abschätzen oder das Rückstoßprinzip erforschen und vor allem erfüllen, wenn man die Mine auf der Handfläche losgehen läßt.

6. Ein vom Effekt her ähnliches, vom physikalischen Prinzip her jedoch verschiedenes Spielzeug ist eine kleine **Metallscheibe** (z.B. beim Verlag M. Stark, 8050 Freising erhältlich) die man auf ähnliche Weise umstülpen kann, und die ebenfalls nach kurzer Zeit hochspringend in die Ausgangsform zurückkehrt (siehe Abb. 6). Der für diverse physikalische Untersuchungen interessante Unterschied besteht darin, daß das Metallplättchen ein Bimetall ist.

Daher wird der "Phasenübergang" vor allem durch die thermisch bedingte Verformung des Bimetalls bedingt: Nur dadurch, daß bei der Umstülpung das Plättchen gleichzeitig durch die warme Hand erwärmt wird, verbleibt es in dieser neuen Form. Legt man es danach auf den kälteren Tisch, so kühlt sich das Bimetall wieder ab und kehrt - wiederum an

einem kritischen Punkt angelangt - sprunghaft in die der niedrigeren Temperatur entsprechenden Form zurück. Legt man die Scheibe statt auf einen kälteren Tisch auf eine warme Unterlage so verbleibt sie in der dieser Temperatur entsprechenden Form.

Auch bei diesem simplen Spielzeug liegen weitergehende Versuche (z.B. Abschätzung der Sprungtemperatur) auf der Hand.

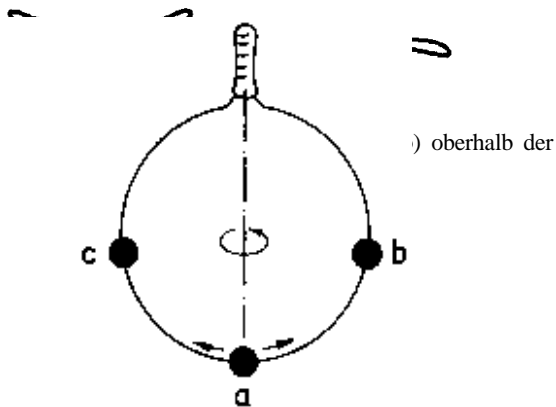


Abb. 9: Drehring mit Perle. In Ruhe befindet sich die Perle in Position a), in Drehung in Position b) oder c).

7. Eine normale **Strickleiter** läßt sich auf die folgende Weise zu einer phasenübergangsähnlichen Gestaltänderung bringen. Zwei Personen halten die Strickleiter an den jeweiligen Endsprossen gespannt und drehen sie unter Aufrechterhaltung der Spannung allmählich aus der flächenhaften Gestalt heraus zu einer dreidimensionalen Spirale auf (siehe Abb. 7).

Aufgrund der damit einhergehenden Verkürzung der Seile baut sich eine rücktreibende Kraft auf. Überschreitet man jedoch einen gewissen kritischen Drehwinkel, so bricht diese Kraft plötzlich abrupt in sich zusammen. Dieser "Phasenübergang"

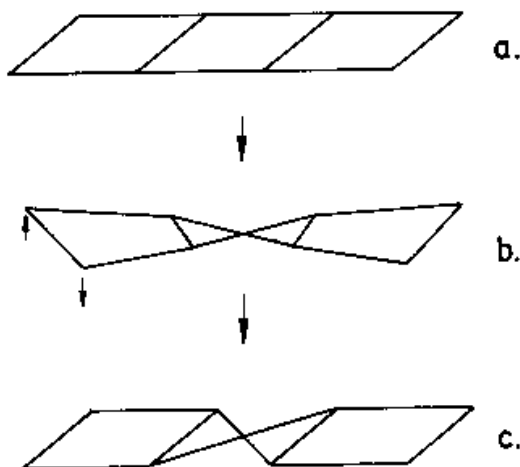


Abb. 7: Strickleiter, a) in normal gestreckter Gestalt, b) in gedrehter Gestalt kurz vor dem Umklappen, c) in umgeklappter Gestalt.

ist begleitet von einer "Gestaltänderung" der Strickleiter: Indem sich zwischen zwei zufällig betroffenen Sprossen die beiden Seile überschneiden, springt die Strickleiter gewissermaßen in die zweidimensionale Gestalt zurück, die sich allerdings durch die Seilüberschneidung von der zweidimensionalen Ausgangsform unterscheidet. Obwohl die Seilüberschneidung nur innerhalb eines (beliebigen) Strickleiterelements auftritt, gelingt es zunächst nicht, durch weitere Drehung weitere "Phasenübergänge" in den übrigen Elementen hervorzurufen: Das Seil drillt sich einfach an der Überschneidungsstelle auf [3].

8. Eine **Bifurkation** ist ein typisches Merkmal eines Phasenübergangs. Sie beinhaltet die häufig durch den Zufall bestimmte "Entscheidung" des Systems in einen von zwei zur "Auswahl" stehenden neuen Zustände überzugehen. Sie läßt sich besonders eindrucksvoll mit Hilfe von normalen Spielkar-

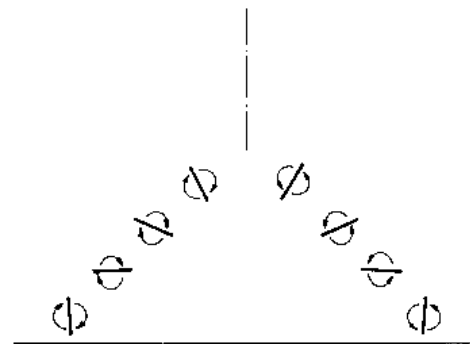


Abb. 8: Bifurkation senkrecht fallender Spielkarten

ten veranschaulichen: Läßt man Spielkarten aus einiger Höhe waagrecht ausgerichtet fallen, so taumeln sie mehr oder weniger regelmäßig zu Boden, wie man es etwa von fallenden Herbstblättern kennt. Wenn man die Spielkarten jedoch möglichst genau senkrecht ausgerichtet fallenläßt, so tritt wiederum eine Art Phasenübergang auf (siehe Abb. 8): Zunächst fällt die Karte genau senkrecht zu Boden. Hat sie eine bestimmte kritische Geschwindigkeit erreicht, so geht sie plötzlich in eine neue "Gestalt" über. Sie beginnt sich mit konstanter Geschwindigkeit zu drehen und driftet dabei von der Senkrechten ab. Läßt man mehrere Karten nacheinander fallen, so stellt man fest, daß sie mal links- und mal rechts herum drehen und entsprechend nach der einen oder anderen Seite driften. Zum Schluß hat man in der Regel etwa gleichviel Karten in gleichem Abstand zur Linken und Rechten auf dem Boden liegen. Das läßt in der Tat auf eine Zufallsentscheidung schließen. Verbindet man gedanklich den Weg der Karten, so erhält man die Form einer zweizinkigen Forke: eine Bifurkation.

9. Ebenfalls vom Zufall entschieden wird die Bewegungsrichtung eines zunächst ruhenden Teilchens, wenn man es einer **Zentrifugalkraft** aussetzt. Dies läßt sich einfach realisieren, wenn man eine **Holzperle auf einen zu einem Ring gebogenen Draht** schiebt und den Draht um die vertikale Achse in Rotation versetzt (siehe Abb. 9). (Um Leichtläufigkeit zu erhalten, empfiehlt es sich, die oben umgebogenen Drahtenden über ein Kugellager in einem Handgriff drehen zu

lassen.) Durch die Drehung wird die stabile Ruhelage der Perle labil. Kleinste Störungen reichen aus, die Perle zur einen oder anderen Seite am Ring unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft hochgleiten zu lassen. Die ursprüngliche **Symmetrie** in Bezug auf die Rotationsachse wird somit **gebrochen**, das System hat seine Gestalt bzw. Phase geändert [4, 5]. Dieses Spielzeug hält auch noch andere physikalische Problemstellungen bereit [6].

10. Phasenübergänge haben Entsprechungen im psycholo-

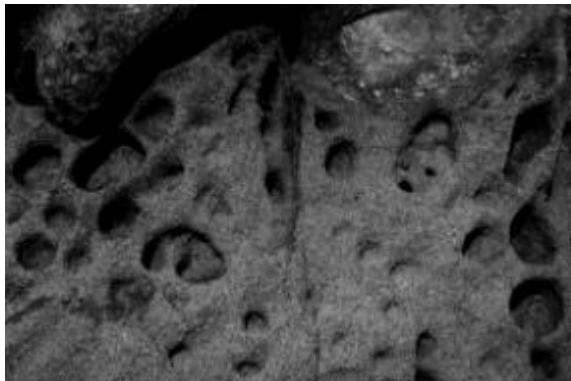


Abb. 13: Kieselsteine eingelagert in einer Sandsteinwand.

gischen und physiologischen Bereich. Das insbesondere in der Gestaltpsychologie bedeutungsvolle Phänomen des Gestaltswitches, jenem plötzlichen Auftreten einer neuen Erkenntnis oder eines neuen Zusammenhanges (z.B. ein "Aha" Erlebnis), ist hier ebenso zu nennen wie die visuellen "Umklappvorgänge".

Letztere kann man leicht selbst herbeiführen und erleben. Dazu betrachte man beispielsweise die Abbildung 10. Die meisten der Personen, denen ich das Bild gezeigt haben, sahen darin eine von links nach rechts heruntergehende Treppe, die bei langsamer Drehung kurz bevor sie auf dem Kopf zu stehen kommt, in eine umgekehrt verlaufende Treppe invertiert, also eine Art plötzlicher Gestaltänderung durchmacht. In einigen Fällen gelang es sogar, eine Analogie zum Hystereseverhalten des diskontinuierlichen Phasenübergangs festzustellen. Man konnte nämlich erleben, daß beim Zurückdrehen des Bildes in die Ausgangslage das Bild viel später, also bei einem kleineren Drehwinkel, in die alte Gestalt zurücksprang.

Solche visuellen **Inversionen** kann man übrigens auch bei der Betrachtung von Fotografien erleben, auf denen Vertiefungen und Erhöhungen dargestellt sind. Dazu betrachte man beispielsweise die Bilder 11 und 12 die Ausschnitte eines Strandbodens zeigen, sowie die Bilder 13 bis 15 auf denen Inversionsfiguren in Stein bzw. ein Bergzug zu sehen ist..

Dreht man die Bilder auf den Kopf, so kann man beobachten, daß die trichterförmigen Senken (in Abb. 11) plötzlich wie kleine Vulkankegel erscheinen und die Täler (in Abb. 12) zu Hügeln werden und umgekehrt. Einen entsprechenden Effekt kann man bei Aufnahmen von der Mondoberfläche feststel-

len, bei denen die Mondkrater in Tafelberge "umkippen". Schließlich sei noch eine **3 D-Inversion** genannt, die man bei der Betrachtung von **Hohlfiguren** erleben kann. Entfernt man sich nämlich von Hohlfiguren, so erscheinen sie vielen

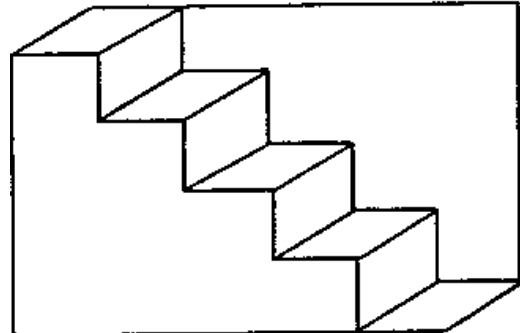


Abb. 10: Umklapptreppe

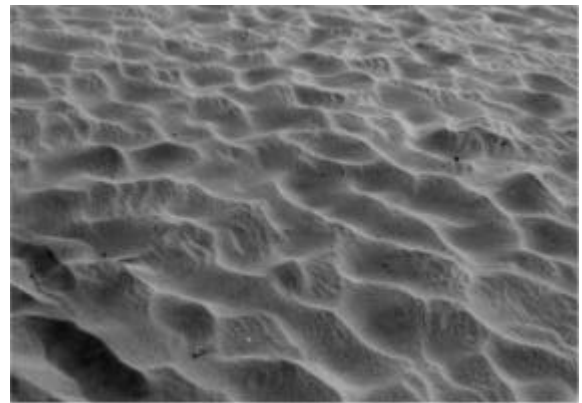


Abb. 11: Sandstrand mit Bergen und Tälern

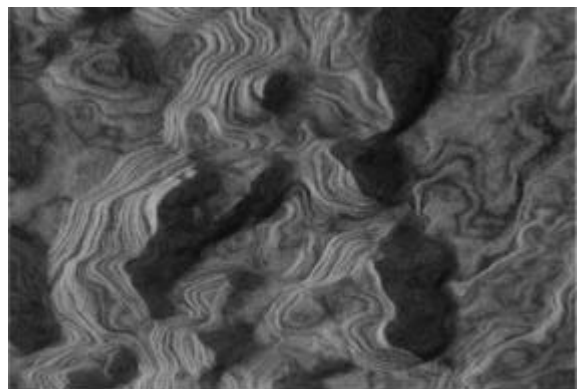


Abb. 12: Strukturen im Sand, wie sie sich nach einem Regenschauer gebildet haben.

Menschen plötzlich als umgestülpt mit sehr merkwürdigen Bewegungseffekten aufgrund der invertierten Parallaxe. Besonders eindrucksvoll werden diese Effekte, wenn man Hohlmasken betrachtet [7].

Diese zuletzt genannten sinnesphysiologischen "Phasenübergänge" sind im Vergleich zu den oben dargestellten physikalischen Beispielen jedoch stark subjektiv geprägt und funktionieren nicht immer so wie dargestellt. Sie vermögen jedoch zu illustrieren, daß die Idee der "phasenübergangsähnlichen" Veränderungen verbreiteter zu sein scheint, als zunächst angenommen. Die physikalische Analyse von "richtigen" Phasenübergängen könnte uns daher umgekehrt zu einem vertieften Verständnis der Umwelt anleiten.

Eingangsdatum: 5. 6.1987

Literatur

[1] Die meisten der hier dargestellten Phänomene dürften bekannt sein. Neu ist vielleicht die Perspektive unter der sie hier betrachtet werden. Einige der Beispiele wurden unter derselben Fragestellung wie hier von L. Jossem auf der Tagung Chaos in Education 1987 in Ungarn vorgestellt

[2] Rodewald, B.: Phasenübergangsähnliche Phänomene in der Mechanik. In: Praxis d. NW/Physik 15/2,35(1983)

[3] Pippard, A. B.: Demonstration Experiments in critical behaviour and broken symmetry. In: Eur. J. Phys. 1, 13(1980)

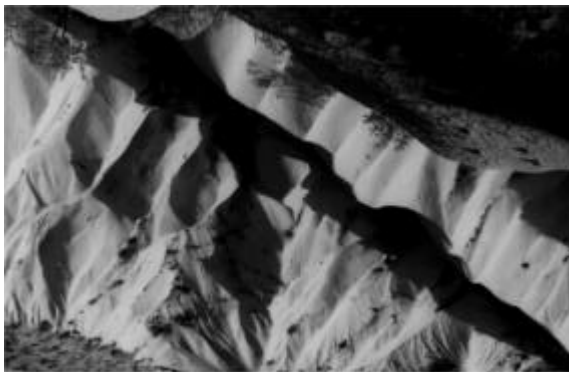


Abb. 14: Bergzug in Kapadokien (Türkei).

[4] Sivardiere, J.: A Simple mechanical model exhibiting a spontaneous symmetry breaking. In: Am. J. Phys. 51/11, 101 (1983)

[5] Blitzer, L.: Dynamical stability and potential energy. In: Am. J. Phys. 50/5, 431 (1982)

[6] Miller, J.S.: Wichtige Punkte im Unterricht der Physik. In: OECD (Hrsg.): Physikunterricht heute. Frankfurt: Diesterweg 1967, S. 61

[7] Schlichting, H. J.: Der geheimnisvolle Blick. In: NiU-PC 35/26, 35 (1987)

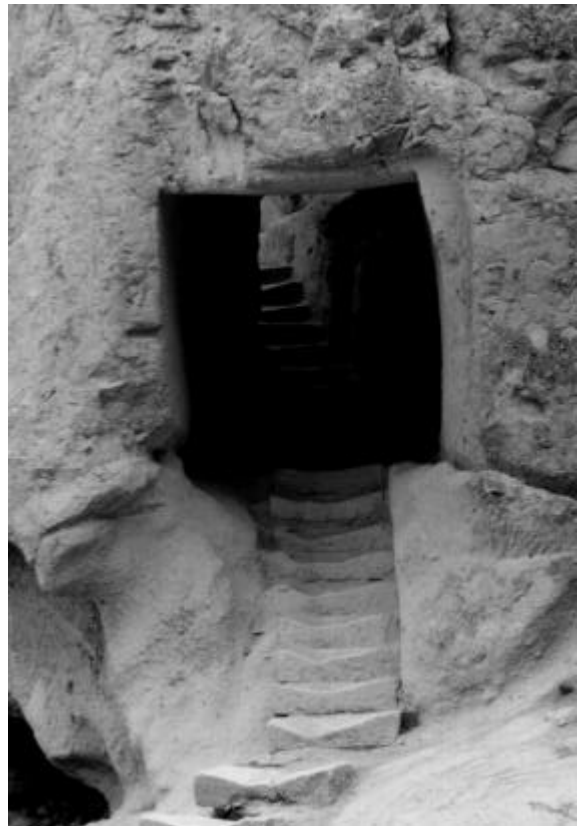


Abb. 15: In Felsgestein eingelassene Treppe.