

Atomix

Christian Ucke und Hans Joachim Schlichting

Atomix ist ein kinetisches Kunstobjekt, das zugleich ästhetisch ansprechend und lehrreich ist. Es ermöglicht eine Anschauung des frappierenden Verhaltens der Selbstordnung von vielen Kügelchen als Analogie des atomaren Aufbaus und wesentlicher Aspekte des Umordnungsverhaltens von Festkörpern und Flüssigkeiten.

Wenn Kunstobjekte auch noch eine didaktische Funktion erfüllen, dann ist das meist ein Zufall. Atomix ist hingegen von dem franko-kanadischen Künstler Francois Dallegret mit der erklärten Absicht entworfen worden, als Anschauungshilfe im Physikunterricht der Schule eingesetzt zu werden. Dabei geht es wie in dem Namen bereits angelegt, eine Analogie dazu herzustellen, wie sich Atome „mischen“. Atomix lädt dazu ein, durch spielerische Handhabung ein Ensemble von winzigen Kugeln wie von ordnender Hand geführt zu kollektiven An- und Umordnungsvorgängen zu bewegen, ohne direkten Zugriff auf die Kugeln zu haben. Man erhält dadurch zumindest per Analogie einen direkten Einblick „ins innere Walten der Natur“. Physik, Kunst und sinnliches Erleben erscheinen hier in kreativer Weise miteinander verbunden.



Abb.1: Atomix 2009

Francois Dallegret [1] entwarf 1966 ein Modell, in dem zwischen zwei etwa 12mm dicken Plexiglasplatten an die 6000 kleine Edelstahlkugeln so eingeschlossen waren, dass sie sich in zwei Dimensionen frei bewegen konnten. 1996 entwickelte er ein erweitertes Modell, bei dem man manuell (durch einen von außen geführten Stab) in die Ebene der Kugeln eingreifen konnte. 2009 ist das ursprüngliche Modell in einer etwas abgespeckten Fassung mit etwa 3000 Kugeln wieder auf den Markt gekommen (Abbildung 1)[2]. Das jetzige Modell besteht aus drei Schichten, zwei 11,6 mm dicken Plexiglasblöcken und einem zwischen den beiden Blöcken befindlichen, 1,55mm dicken und im Inneren quadratisch ausgehöhlten Abstandhalter ebenfalls aus Plexiglas.

Die selbsttätige Anordnung der kleinen Kugeln mit einem Durchmesser von 1,41mm fordern den Vergleich mit den typischerweise etwa 0,1nm großen Atomen in einem Festkörper geradezu heraus und ermöglicht dank eines Vergrößerungsfaktors von etwa zehn Millionen eine Anschauung für weit unter der Wahrnehmungsschwelle ablaufende Vorgänge zu erhalten.

Atomare Strukturen mit Atomix

In liegender Position bietet Atomix ein relativ ungeordnetes Bild der Kugeln dar. Es reizt sofort, das Objekt in eine senkrechte Position zu bringen und unter dem Einfluss der Schwerkraft die Anordnung in Teilstrukturen zu erleben (Abbildung 1).

Wenn man das Objekt in die Hand nimmt lassen sich durch Drehen, Schwenken, Rütteln, aber auch durch vorsichtiges Anstoßen von der Seite dynamische Umordnungen initiieren mit denen grundlegende Eigenschaften und Verhaltensweisen von Kristallgittern gezeigt und erfahren werden können [3]. Es gibt jedoch wichtige Unterschiede. In der Realität wechselwirken Atome bzw. Moleküle untereinander und das in drei Dimensionen (van der Waals- Kräfte). Bei Atomix gibt es außer der (hard core) Abstoßung bei direkter Berührung keine Wechselwirkungskräfte zwischen den Kugeln (siehe jedoch später elektrostatische Wirkungen) und die Kugeln bewegen sich – fast nur – in zwei Dimensionen. Da die Tiefe des Abstandhalters zwischen den Platten etwas größer als der Durchmesser der Kugeln sein muss, gibt es kleine Abweichungen aus der Zweidimensionalität, die sich in – kleinen – Unregelmäßigkeiten äußern. Man kann das bei schräg auffallender Beleuchtung erkennen.

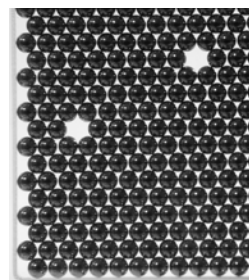


Abb.2: Hexagonale Struktur mit Leerstellen

In Abbildung 2 ist ein Ausschnitt einer 90°-Ecke dargestellt. Auffallend ist die hexagonale Struktur, die sich immer dann ergibt, wenn sich (gleichgroße) Kugeln in einer Ebene alle gegenseitig berühren und jede Kugel von 6 nächsten Nachbarn umgeben ist. Das ist eine der Basisstrukturen in der Natur. Sie zeigt sich außer bei Kristallstrukturen auch zum Beispiel bei den Bienenwaben, die aus Gründen der Materialeinsparung von den Bienen zunächst kugelförmig gebaut werden, dann aber aufgrund der hexagonalen Struktur des so entstehenden Gitters sechseckig werden. Im Dreidimensionalen, wo jede Kugel von 12 nächsten Nachbarn umgeben ist, findet man im atomaren Bereich die hexagonal dichteste Kugelpackung bei zahlreichen Festkörpern vor. Sie ist besonders stabil.

Mit einem kleinen Rätselspiel kann man sich den unterschiedlichen Flächenbedarf eines einfach kubischen und eines hexagonalen Gitters in der Ebene veranschaulichen. Die Rätselfrage lautet: Kann man in demselben Rahmen, in dem 24 Münzen (bzw. Scheiben) Platz haben, eine weitere unterzubringen? Des Rätsels Lösung läuft darauf hinaus, dass man zu einer hexagonalen Anordnung übergehen muss, in der wegen des Platzgewinns die zusätzliche Kugel eingebaut werden kann.

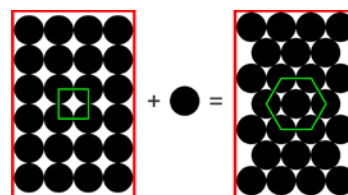


Abb. 3: Ein Spiel mit Münzen den größeren Flächenbedarf eines quadratischen im Vergleich zum hexagonalen Gitter

Bei sehr genauer Inspektion von Atomix erkennt man, dass die Breite des inneren Hohlteils etwas größer ist als ein ganzzahliges Vielfaches des Kugeldurchmessers. Das bedeutet, dass sich bei senkrecht gehaltenem Atomix die Kugeln irgendwo in diesem Gitter im Inneren nicht alle gegenseitig berühren können. Es gibt geringfügige Abstände. Diese wirken sich in weniger deutlich sichtbaren, langkettigen Versetzungen auf die hexagonale Struktur aus.

Da der innere Hohlteil von Atomix rechteckig gestaltet ist, können die Kugeln mit der hexagonalen Form nicht an allen Rändern glatt anliegen. Das wäre der Fall, wenn dieser Hohlteil mit Winkeln von 120° konstruiert wäre. In einer Erweiterung von 1996 hat Dallegret das auch so realisiert [1].

Mit einer quadratischen (im Dreidimensionalen kubischen) Grundstruktur könnten die Kugeln an allen Rändern eines rechtwinkligen Hohlteils glatt anliegen (Abbildung 4). Diese Struktur ist mit Atomix schwer und nur in Teilbereichen zu verwirklichen, da sie sehr instabil ist. Bei leichtem Schütteln bzw. Anstoßen geht sie schnell in die hexagonale Struktur über. Hier kommt auf einfache Weise die allgemeine Tendenz der Natur zum Ausdruck, unten den gegebenen Umständen so viel wie möglich Energie zu dissipieren (2. Hauptsatz der Thermodynamik).

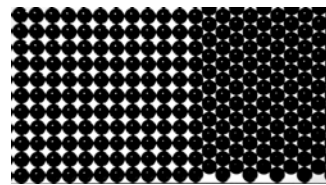


Abb.4: Quadratische und hexagonale Struktur

Sogenannte Leerstellen oder auch Gitterlücken sind Fehlstellen im Kristallgitter die von keinem Atom besetzt sind. Fehlt nur das Atom in der Mitte eines Sechserings, sind sie gegen Erschütterungen sehr stabil, da keine der umgebenden Kugeln ausweichen kann. In den Abbildungen 2 und 4 sind derartige Fehlstellen vorhanden, bei denen genau eine Kugel in der hexagonalen Struktur fehlt. Seltener lassen sich mit Atomix Leerstellen mit mehr als einem Atom sehen. Die sind gegen Erschütterungen (Energiezufuhr) relativ instabil, da Nachbarkugeln in die Leerstelle eindringen können und die Leerstelle dann sogar wandern kann.

Stapelfehler sind Unterbrechungen in der regelmäßigen Anordnung von Atomen. Sie führen zur Bildung von sogenannten Korngrenzen. In Abbildung 5 ist die Reihe der Kugeln am unteren Rand unterbrochen. Die darüber befindlichen Kugeln setzen diese Unterbrechung versetzt in einem Winkel von 60° gegen die Waagerechte fort. In diesem Fall ist die Korngrenze eine klar begrenzte Linie (im Dreidimensionalen eine Fläche) zwischen zwei gleich orientierten Kristallen. Andere Winkel können auch vorkommen. Derartige Korngrenzen können sich durch Anstoßen (Energiezufuhr) verändern.

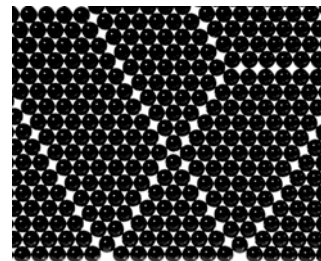


Abb.5: Stapelfehler und Korngrenzen

Es können auch zwei verschieden orientierte Kristalle aneinander grenzen (Abbildung 6). Die hexagonale Struktur ist in den beiden Bereichen um einen Winkel von 30° gegeneinander verdreht. Deutlich erkennbar ist dies auch an den Leerstellen.

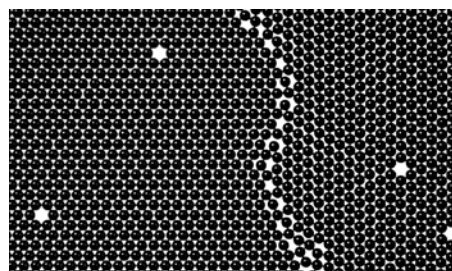


Abb.6: Korngrenzen mit unterschiedlich orientierten Bereichen

Korngrenzen verhindern in der Realität die Bildung von Einkristallen, d.h. Kristallen, die durchgehend regelmäßig aufgebaut sind.

Es bedarf einiger Geduld, mit den Kugeln von Atomix einen ‚Einkristall‘ zu erzeugen. Der ermöglicht es dann allerdings auch sehr leicht, die genaue Gesamtanzahl der Kugeln in Atomix zu ermitteln. Im vorliegenden Beispiel waren es genau 2697 Kugeln.

Elektrostatistische Aufladung

Es befinden sich bei dem senkrecht gehaltenen Atomix fast immer einige Kugeln scheinbar schwebend über der ‚Oberfläche‘ (Abbildung 1). Dies stellt für sich genommen ein Modell

einer Flüssigkeitsoberfläche bzw. eines Festkörpers und der darüber als Dampf vorhandenen Phase dar.

Die ‚schwebenden‘ Kugeln sind elektrostatisch durch Reibung aufgeladen. Das ist bei jeder Bewegung von Atomix nicht zu vermeiden. Die Kugeln stoßen sich gegenseitig ab. Da Luft und Plexiglas sehr gute Isolatoren sind, bleibt die Ladung an den Kugeln auch sehr gut haften und erhalten. Nur durch längeres Stehenlassen entladen sich die Kugeln langsam von selbst. Mittels ionisierender Strahlung kann man das schneller erreichen. Aber wer hat schon derartige Strahlungsquellen präsent?

Hat man sich selbst elektrostatisch aufgeladen und berührt mit einem Finger die Oberfläche des flach liegenden Atomix, bewegen sich die Kugeln deutlich um die Fingerspitze herum. Die elektrische Spannung von typischerweise einigen tausend bis zehntausend Volt ist stark genug um durch das Plexiglas Einfluss auszuüben.

Eigenbau

Mit nicht allzuviel Aufwand kann man ein eigenes „Atomix“ bauen (Abbildung 8). Und dann natürlich auch andere Geometrien verwirklichen. In Abbildung 7 befindet sich zwischen zwei 100mmx100mm großen und 10mm dicken Plexiglasplatten eine 1,6mm dicke Plexiglasplatte mit vier Eckschrauben. Im inneren Hohlteil wurde auf einer Seite ein Winkel von 120° realisiert. Die Zwischenschicht wurde mit einer Dekupiersäge innen ausgehöhlt. Etwa 1500 Stahlkugeln mit 1,5mm Durchmesser erlauben die schon beschriebenen und weiteren Experimente. Deutlich erkennbar ist hier eine stufenförmige Versetzung an der eindimensionalen ‚Oberfläche‘. Man kann auch beispielsweise eine oder mehrere Verunreinigungen bzw. ‚Fremdatome‘ mit anderen Durchmessern einbauen und sehen, wie sich darum Kristallbereiche formen. Fremdatome können Ausgangspunkt für Versetzungen sein (Abbildung 9), wenn sie nicht in die ursprüngliche Basisstruktur hinein passen.

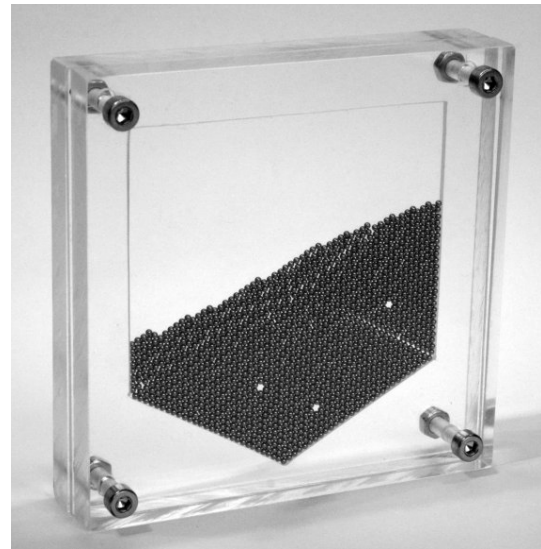


Abb.8: Eigenbau

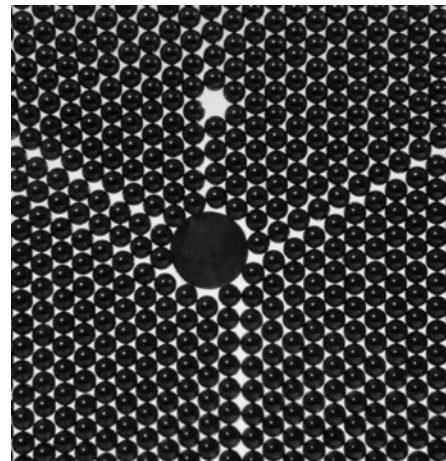


Abb. 9: Fremdatom mit Versetzungen

Es gibt in der Literatur eine Reihe von Vorschlägen für die Herstellung von Modellen mit Kugeln aus Stahl, Glas oder Kunststoff und Veranschaulichung von Kristallisationsvorgängen. Pohl schlug derartige Experimente schon 1952 vor [4]. Koppelman hat sehr praxisnahe Demonstrationen für die Lehre dargestellt [5]. Turnbull konzentriert sich besonders auf dynamische Vorgänge [6].

Eine sehr einfach zu realisierende Idee mit einer Plastikhülle für CD's und Stahlkugeln findet man unter [7].

Aufwendiger ist ein Aufbau mit 45.000 Kunststoffkugeln mit einem Durchmesser von 3,2mm [8]. Es zeigt mittels eines exzentrisch laufenden Rüttelmotors dynamische Aspekte der Rekristallisation.

Zusammenfassung:

Der franko-kanadische Künstler Francois Dallegret entwickelte 1966 ein einfaches, jetzt wieder erhältliches Modell namens Atomix, mit dem sich atomar-kristalline Strukturen wie hexagonale Gitterstruktur, Stapelfehler, Korngrenzen und Leerstellen spielerisch erzeugen und anschaulich demonstrieren lassen. Elektrostatische Effekte und optische Interferenzerscheinungen lassen sich darüber hinaus beobachten und beeinflussen.

Literatur bzw. weblinks:

- [1] www.arteria.ca
- [2] www.areaware.com/proddetail.asp?prod=fdat
- [3] Miller, W.A., Weatherly, G.C.: The ‘Atomix’: a teaching model of atomic structures in solids and liquids, *Metals and Materials* **6**, 1972, 158-159
- [4] Pohl, R.W.: Die Bedeutung von Kristallbaufehlern für die Physik fester Körper, *Naturwissenschaften* **39** (1952), 9-13
- [5] Koppelman, G.: Kristallisationsvorgänge im einfachen zweidimensionalen Stahlkugelmodell, *Praxis der Naturwissenschaften – Physik* **39** (1990), Heft 6, 5-9
- [6] Turnbull, D. et al.: A dynamic hard sphere model, *Journal of applied Physics* **31** (1960), 674-677
- [7] <http://www.youtube.com/watch?v=JTNS26izFB8> und <http://www.arvindguptatoys.com/toys/structure.html>
- [8] www.youtube.com/watch?v=VLsLS74AM9o

Stichwörter:

Atomix, Kristallstruktur, Stapelfehler, Korngrenze, Phasengrenze, Grenzfläche, Leerstelle, elektrostatische Aufladung

Die Autoren

Christian Ucke und Hans-Joachim Schlichting sind die Begründer der Kolumne Spielwiese.

Anschriften:

Dr. Christian Ucke, Rofanstr. 14B, 81825 München

e-mail: ucke@mytum.de

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Didaktik der Physik, Universität Münster, 48149 Münster

e-mail: schlichting@uni-muenster.de