

## Spielwiese

# Atomix – handliche Festkörperphysik

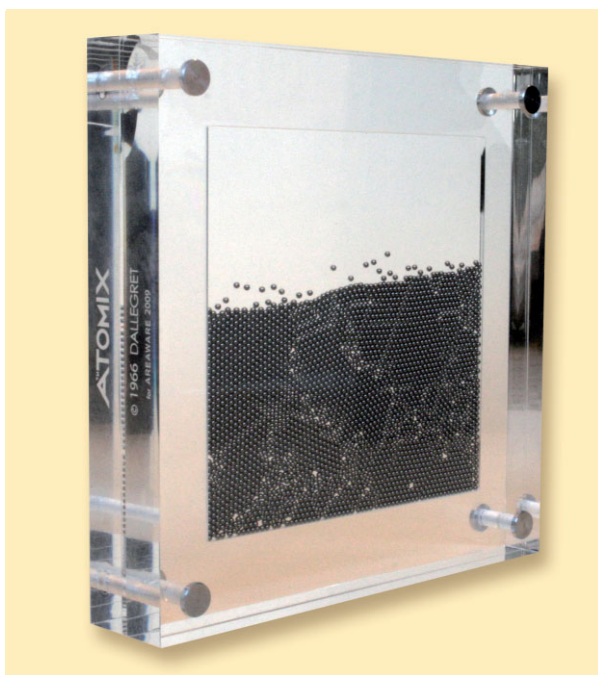
CHRISTIAN UCKE | HANS JOACHIM SCHLICHTING

*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 des Umordnungsverhaltens von Festkörpern und Flüssigkeiten.*

Wenn Kunstobjekte auch noch eine didaktische Funktion erfüllen, dann ist das meist ein Zufall. Atomix hingegen wurde von dem frankokanadischen Künstler François Dallegret mit der erklärten Absicht entworfen, als Anschauungshilfe im Physikunterricht eingesetzt zu werden. Dieses Objekt soll eine Analogie dazu herstellen, wie sich Atome in Festkörpern und Flüssigkeiten „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

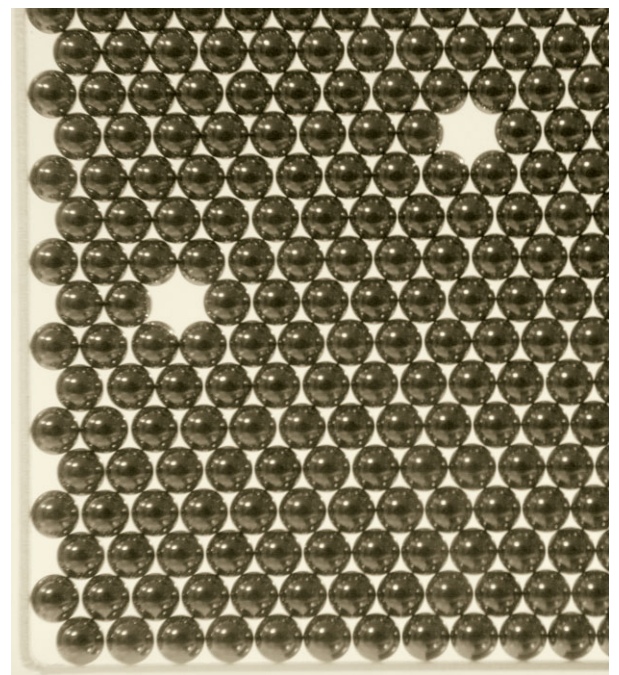
erhält dadurch zumindest per Analogie einen direkten Einblick „ins innere Walten der Natur“. Physik, Kunst und sinnliches Erleben erscheinen hier in kreativer Weise miteinander verbunden.

François Dallegret [1] entwarf 1966 ein Modell, in dem zwischen zwei etwa 12 mm dicken Plexiglasplatten an die 6000 kleine Edelstahlkugeln so eingeschlossen waren, dass sie sich in zwei Dimensionen frei bewegen konnten. Dreißig Jahre später entwickelte er ein erweitertes Modell, bei dem man manuell (durch einen von außen geführten Stab) in die Ebene der Kugeln eingreifen konnte. 2009 kam das ursprüngliche Modell in einer etwas abgespeckten Fassung mit etwa 3000 Kugeln wieder auf den Markt (Abbildung 1) [2]. Es besteht aus drei Schichten, zwei dicken Plexiglasblöcken und einem zwischen den beiden Blöcken befindlichen, 1,55 mm dicken Abstandhalter ebenfalls aus Plexiglas. Dieser ist im Inneren ausgehöhlt und bildet so den quadratischen Hohlraum für die Kugeln mit einem Durchmesser von 1,41 mm. Es dient uns im Folgenden als Modell eines Festkörpers im Maßstab von etwa eins zu zehn Millionen.

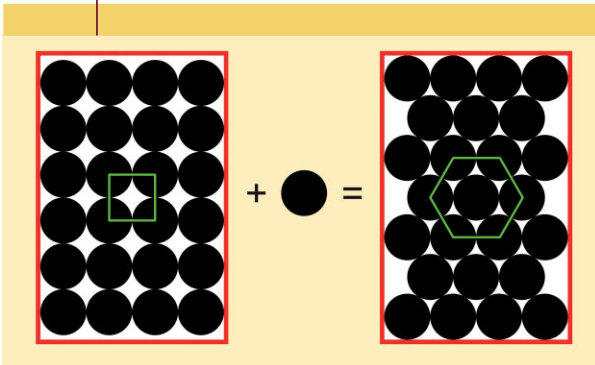


**Abb. 1** Das neueste Atomix aus dem Jahr 2009. >

**Abb. 2** Hexagonale Struktur mit Leerstellen. >>



**ABB. 3 FLÄCHENBEDARF**



**Dieses Spiel mit Münzen beweist den größeren Flächenbedarf eines quadratischen Gitters im Vergleich zum hexagonalen Gitter.**

**Atomare Strukturen mit Atomix**

In liegender Position bietet Atomix ein relativ ungeordnetes Bild der Kugeln dar. Dreht man es hingegen in eine senkrechte Position, so ordnen diese sich unter dem Einfluss der Schwerkraft zu bestimmten Teilstrukturen an (Abbildung 1). Durch Drehen, Schwenken, Rütteln, aber auch durch vorsichtiges Anstoßen von der Seite initiiert man dynamische Umordnungen, mit denen man grundlegende Eigenschaften und Verhaltensweisen von Kristallgittern zeigen und erfahren kann [3].

Natürlich gibt es wichtige Unterschiede. In der Realität wechselwirken Atome oder Moleküle untereinander – und das in drei Dimensionen (Van-der-Waals-Kräfte). Bei Atomix gibt es außer der Abstoßung bei direkter Berührung keine Wechselwirkungskräfte zwischen den Kugeln, die sich zudem fast ausschließlich in zwei Dimensionen bewegen. Weiter unten gehen wir noch auf tatsächlich auftretende elektrostatische Wirkungen ein. Da die Tiefe des Abstandhalters zwischen den Platten etwas größer als der Durchmesser der Kugeln sein muss, gibt es geringfügige Abweichungen aus der Zweidimensionalität, die sich in kleinen Unregelmäßigkeiten äußern. Man kann das bei schräg auf fallender Beleuchtung erkennen.

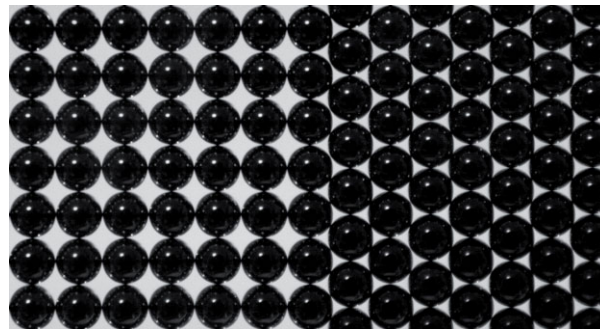
Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt in einer Ecke. Auffallend ist die hexagonale Struktur, die sich immer dann ergibt, wenn sich (gleich große) Kugeln in einer Ebene alle gegenseitig berühren und jede Kugel von sechs nächsten Nachbarn umgeben ist. Das ist eine der Basisstrukturen in der Natur. Sie zeigt sich im Mikroskopischen bei vielen Kristalloberflächen und zum Beispiel auch bei Bienenwaben. Im Dreidimensionalen, wo jede Kugel von zwölf nächsten Nachbarn umgeben ist, findet man im atomaren Bereich die hexagonal dichteste Kugelpackung bei zahlreichen Festkörpern vor. Sie ist besonders stabil.

Hierzu gibt es ein Rätselspiel (Abbildung 3) mit einem Rahmen, in dem 24 in einem kubischen Gitter angeordnete, gleich große Münzen Platz haben: Kann man darin eine weitere Münze unterbringen? Des Rätsels Lösung lautet, dass man zu einer hexagonalen Anordnung übergehen

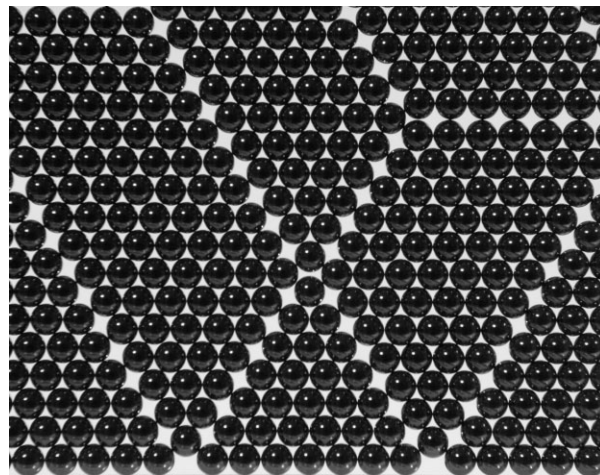
muss, in der wegen des Platzgewinns die zusätzliche Münze eingebaut werden kann.

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 im Inneren dieses Gitters nicht alle gegenseitig berühren können. Es gibt geringfügige Abstände. Diese wirken sich in weniger deutlich sichtbaren, langkettigen Versetzungen auf die hexagonale Struktur aus, was in Abbildung 1 erkennbar ist.

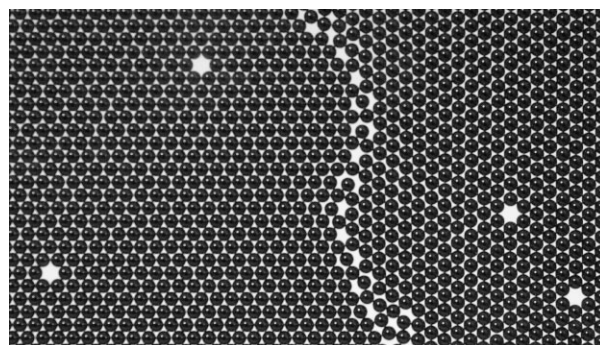
Da der Hohlraum rechteckig ist, können die Kugeln mit der hexagonalen Anordnung nicht an allen Rändern glatt anliegen. Das wäre der Fall, wenn dieser Hohlraum mit Winkeln von 120° konstruiert wäre. In einer Erweiterung von 1996 hat Dallegret das auch so realisiert [1].



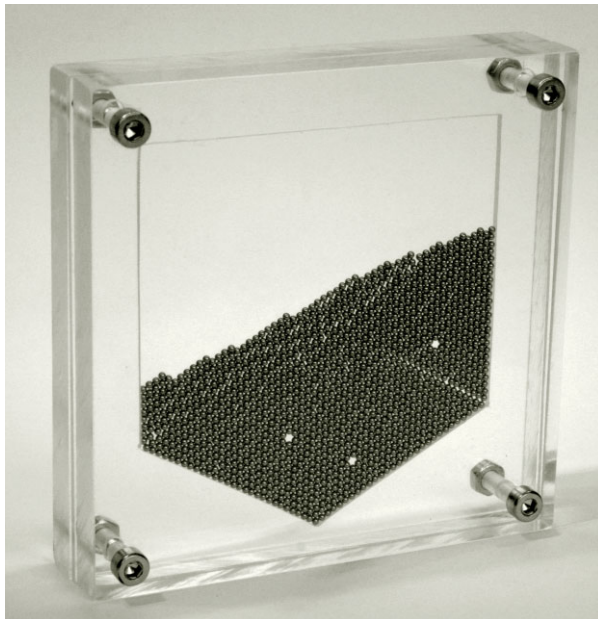
**Abb. 4 Quadratische und hexagonale Strukturen.**



**Abb. 5 Stapelfehler und Korngrenzen.**



**Abb. 6 Korngrenzen mit unterschiedlich orientierten Bereichen.**

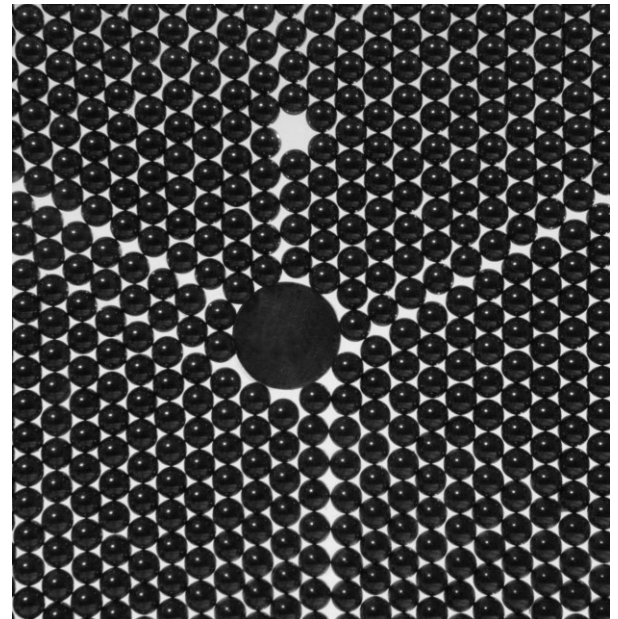


**Abb. 7** Bei einem selbst gebauten Atomix lassen sich auch andere Geometrien realisieren.

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 geht sie schnell in die hexagonale Struktur über. Hier kommt auf einfache Weise die allgemeine Tendenz der Natur zum Ausdruck, unter den gegebenen Umständen so viel wie möglich Energie zu dissipieren – wie es der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik formuliert.

Leerstellen oder Gitterlücken sind Fehlstellen im Kristallgitter, die von keinem Atom besetzt sind. Fehlt nur das Atom in der Mitte eines Sechserings, so sind die Fehlstellen gegen Erschütterungen sehr stabil, da keine der umgebenden Kugeln ausweichen kann. In den Abbildungen 2 und 6 sind derartige Fehlstellen vorhanden, bei denen genau eine Kugel in der hexagonalen Struktur fehlt. Seltener tauchen Leerstellen mit mehr als einem Atom auf. Die sind gegen Erschütterungen (Energiezufuhr) relativ instabil, da Nachbarkugeln in die Leerstelle eindringen können. In diesem Fall kann die Leerstelle sogar wandern.

Auch Stapelfehler treten auf. Das sind Unterbrechungen in der regelmäßigen Anordnung von Atomen, die zur Bildung von Korngrenzen führen. In Abbildung 5 ist die Reihe der Kugeln am unteren Rand unterbrochen. Die darüber befindlichen Kugeln setzen diese Unterbrechung versetzt in einem Winkel von  $60^\circ$  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, also Energiezufuhr, verändern.



**Abb. 8** Fremdatom mit Versetzungen.

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

Korngrenzen verhindern in der Realität die Bildung von Einkristallen, die durchgehend regelmäßig aufgebaut sind. Es bedarf einiger Geduld, um mit den Kugeln von Atomix einen Einkristall zu erzeugen. Der ermöglicht es dann allerdings auch sehr leicht, die genaue Gesamtanzahl der Kugeln zu ermitteln. Im vorliegenden Beispiel waren es genau 2697.

### Elektrostatiche Aufladung

Bei dem senkrecht gehaltenen Atomix befinden sich fast immer einige Kugeln scheinbar schwebend über der „Oberfläche“ (Abbildung 1). Dies stellt für sich genommen ein Modell einer Flüssigkeitsoberfläche oder eines Festkörpers und der darüber als Dampf vorhandenen Phase dar.

Die „schwebenden“ Kugeln sind elektrostatisch durch Reibung aufgeladen. Das ist bei den Bewegungen im 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. Mit ionisierender Strahlung kann man das schneller erreichen. Aber wer hat schon derartige Strahlungsquellen parat?

Hat man sich selbst elektrostatisch aufgeladen und berührt mit einem Finger die Oberfläche des flach liegenden Atomix, so bewegen sich die Kugeln deutlich um die Fingerspitze herum. Die elektrische Spannung von typi-

scherweise einigen tausend bis zehntausend Volt ist stark genug, um durch das Plexiglas Einfluss auszuüben.

### Eigenbau

Mit nicht allzu großem Aufwand kann man ein eigenes Atomix bauen – und damit auch andere Geometrien verwirklichen. In Abbildung 7 befindet sich zwischen zwei 100 mm mal 100 mm großen und 10 mm dicken Plexiglasplatten eine 1,6 mm 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 1,5 mm Durchmesser erlauben die beschriebenen und weitere Experimente. Deutlich erkennbar ist hier eine stufenförmige Versetzung an der eindimensionalen „Oberfläche“. Man kann auch beispielsweise eine oder mehrere Verunreinigungen oder „Fremdatome“ mit anderen Durchmessern einbauen und sehen, wie sich darum Kristallbereiche formen. Fremdatome können Ausgangspunkt für Versetzungen sein (Abbildung 8), wenn sie nicht in die ursprüngliche Basisstruktur hinein passen.

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. Robert Pohl schlug derartige Experimente schon 1952 vor [4]. Gerd Koppelman hat sehr praxisnahe Demonstrationen für die Lehre dargestellt [5]. David Turnbull konzentriert sich besonders auf dynamische Vorgänge [6]. Eine sehr einfach zu realisierende Idee mit einer Plastikhülle für CDs und Stahlkugeln findet man unter [7]. Aufwendiger ist ein Aufbau mit 45 000 Kunststoffkugeln mit einem Durchmesser von 3,2 mm. Ein daran montierter exzentrisch laufender Rüttelmotor ermöglicht das Studium dynamischer Aspekte der Rekristallisation, die ein Film sehr eindrucksvoll zeigt [8].

### Zusammenfassung

Der frankokanadische Künstler François Dallegret entwickelte 1966 ein einfaches, jetzt wieder erhältliches Modell namens Atomix, mit dem sich atomar-kristalline Strukturen wie die hexagonale Gitterstruktur, Stapelfehler, Korngrenzen und Leerstellen spielerisch erzeugen und anschaulich demonstrieren lassen. Darüber hinaus lassen sich elektrostatische Effekte beobachten.

### Literatur

- [1] [www.arteria.ca](http://www.arteria.ca)
- [2] [www.areaware.com/proddetail.asp?prod=fdat](http://www.areaware.com/proddetail.asp?prod=fdat)
- [3] W.A. Miller, G. C. Weatherly, *Metals and Materials* **1972**, 6, 158.
- [4] R. W. Pohl, *Naturwissenschaften* **1952**, 39, 9.
- [5] G. Koppelman, *Prax. Naturwiss., Phys.* **1990**, 39 (6), 5.
- [6] D. Turnbull et al., *J. Appl. Phys.* **1960**, 31, 674.
- [7] [www.arvindguptatoys.com/toys/structure.html](http://www.arvindguptatoys.com/toys/structure.html)
- [8] [www.youtube.com/watch?v=VLsLS74AM9o](http://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, Rofanstraße 14B, 81825 München, [Ucke@mytum.de](mailto:Ucke@mytum.de)  
 Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Didaktik der Physik, Universität Münster,  
 48149 Münster, [Schlichting@uni-muenster.de](mailto:Schlichting@uni-muenster.de)