Zweidimensionale Kristalle

Mario Markus

Mit wenigen Handgriffen lassen sich ca. 20 Mikrometer dünne Schichten mit Kristallen auf eine Glasscheibe erzeugen. Die Strukturen unterscheiden sich stark von dreidimensionalen Kristallen. Ihr Entstehungsmechanismus ist ähnlich dem der Eisblumen an gekühlten Fenstern. Sie veranschaulichen sowohl Selbstorganisation wie auch die Chaostheorie. Schüler können mit einem einfachen »Kochrezept« solche Strukturen erzeugen, aber auch forschen, indem sie die Substanzen und die Versuchsbedingungen variieren.

1 Das experimentelle Verfahren

1.1 Allgemeines

Man unterscheidet zwischen zwei Formen von zweidimensionalen Kristallen. Die einen sind so dünn wie Atome, zum Beispiel das »Graphen« aus Kohlenstoff oder das »Stanen« aus Zinn. Die anderen haben eine Dicke im Mikrometer-Bereich und werden in diesem Bericht betrachtet. Zu ihrer Herstellung und Untersuchung breitet man einen Tropfen (50 Mikroliter) einer Lösung des zu untersuchenden Stoffes auf einem Mikroskop-Objektträger aus. Dazu kann man eine Dosierpipette oder einfach einen gewöhnlichen Tropfenzähler benutzen. Nachdem die ausgebreitete Lösung getrocknet ist, betrachtet man Ausschnitte von circa 1 mm^2 was mit einer 50fachen Mikroskop-Vergrößerung erreicht wird. Es empfiehlt sich ein Mikroskop mit PC-Anschluss zu benutzen, um die Bilder zu speichern.
Besonders komfortabel aber teurer sind LCD-Mikroskope mit integriertem Fotoapparat.

Es sei bemerkt, dass man mit dem Fotografieren nicht lange warten sollte, nachdem sich die Kristalle gebildet haben, denn diese verlieren ihre Form innerhalb von einigen Stunden oder Tagen. Die Bilder erhält man in der Regel in Schwarz-Weiß. Möchte man zur besseren Visualisierung Grauwerte in Farben verwandeln, wie es in diesem Bericht getan wurde, so gibt es hierzu kostenlose Bildverarbeitungsprogramme im Internet, zum Beispiel GIMP *(https://www.gimp.org/)*.

1.2 Substanzen

Für die Fälle, die zu diesem Bericht führten, wurden Lösungen von anorganischen Salzen, Aminosäuren, Zitronensäure, Ascorbinsäure, Coffein und Taurin benutzt. Interessant waren auch Urin und Tränen. Zufällig gefundene Haushaltsmittel haben ebenfalls überraschende Strukturen gebildet, so zum Beispiel das Süßungsmittel »Leichte Süße« der Firma K-Classic (z. B. Kaufland). Es wäre sicher interessant für Schüler/innen, im Supermarkt oder in den Schränken zuhause nach Substanzen für

weitere Versuche zu stöbern. Man achte aber darauf, dass keine Beimengungen dabei sind. Besonders störend sind Mischungen mit Kohlenhydraten oder Zuckeralkohole; sie verhindern oft die Kristallbildung.
Die Konzentrationen der gelösten Substanzen können zwischen 0,5 % und 50 % liegen, wobei es sich empfiehlt, eine Messreihe mit verschiedenen Konzentrationen durchzuführen, bis die Löslichkeitsgrenze des Stoffes erreicht ist. Den starken Einfluss der Konzentration kann man exemplarisch beim Vergleich von Abbildung 1 und 2 sehen.
Die Substanzen kann man auch mit Polymeren mischen, womit man drastische Strukturänderungen erhält. Diesbezüglich wurde mit Gelatine, Polyvinylalkohol, Gummi arabicum, Agar-Agar, Traganth und Lysozym experimentiert (Markus, 2017). Solche Zusätze wirken schon ab 0,01 %. Auch hier empfiehlt es sich, eine Messreihe mit variierenden Konzentrationen durchzuführen. Beispiele mit Zusätzen von Polymeren sind in den Abbildungen 3 und 4 zu sehen. Man beachte in diesen Beispielen, das

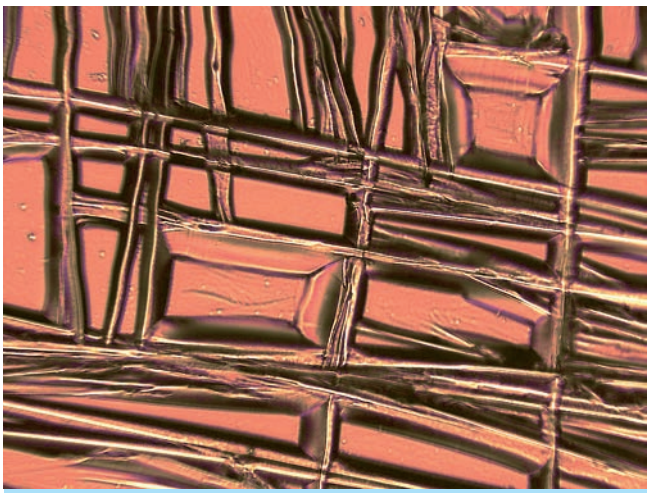

Abb. 3. Bildung von linearen Strukturen bei Zusatz eines Polymers (Lysozym; 0,1 %) zu Kuperchlorid (6 %)

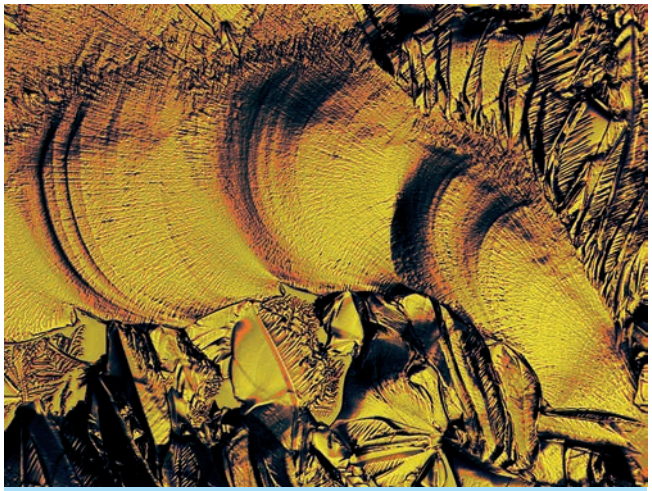

Abb. 1. Selbstorganisation von kristallisierter Zitronensäure (48 %)

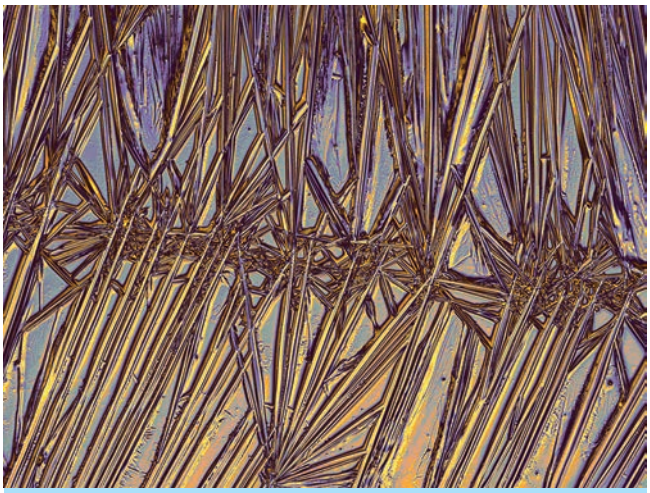

Abb. 4. Lineare Strukturen bei Zusatz eines Polymers (Gelatine; 0,8 %) zu Ammoniumchlorid (6 %)

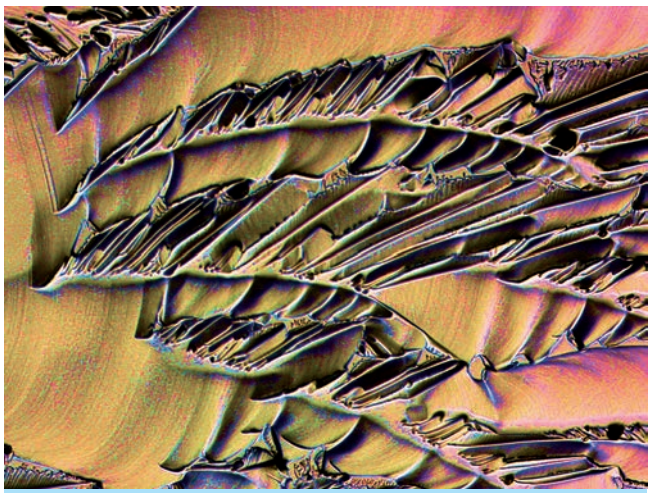

Abb. 2. Veränderung der Kristallisation bei Verminderung der Konzentration von Zitronensäure (hier 12 %; man vergleiche mit Abb. 1)

Polymere tendenziell lange, lineare Strukturen bilden, die sich ähnlich zu einem Spinnengewebe anordnen.
Bei manchen Polymeren, zum Beispiel bei Gummi arabicum, sieht man diese linearen Strukturen jedoch nicht (Abb. 5).

Weitere Substanzen, die man zumischen kann, sind Kohlenhydrate oder Zuckeralkohole, wobei kleine Konzentrationen Formänderungen hervorbringen, größere Konzentrationen aber die Kristallbildung verhindern. Diesbezügliche Messreihen kann man im Prinzip mit Konzentrationen zwischen 0,1 % bis 45 % durchführen. Die Wirkung des Kohlenhydrats Trehalose sieht man in Abbildung 6. Trehalose und ähnliche Zuckerarten erzeugen in den Zellen von vorübergehend ausgetrockneten oder eingefrorenen Lebewesen oft rundliche Formen der Kristalle, so wird das Zerschneiden oder Durchstechen der Zellmembranen durch eckige oder nadelartige Formen vermieden (Markus, 2014). Dieser Effekt ist unabhängig davon, ob die Kristalle durch Austrocknen, wie in der vorliegenden Arbeit, oder durch Einfrieren entstehen.

Hinweis: Beim Experimentieren ist zu beachten, dass manche Substanzen, zum Beispiel Agar-Agar, Gelatine oder größere Mengen Coffein, sich nur in hinreichend erwärmten Wasser lösen. Wichtig ist auch, dass alle Lösungen und Waschvorgänge mit destilliertem Wasser durchgeführt werden sollten. Der Einfluss von im Leitungswasser gelösten Stoffen ist oft nicht zu vernachlässigen.

1.3 Ausbreitung der Lösung auf dem Glas

Der allerwichtigste Teil des experimentellen Verfahrens ist die Verbreitung des Lösungstropfens auf dem Objektträgerglas, denn ein Tropfen neigt in der Regel dazu, zu »perlen« statt sich auszubreiten. Dies liegt daran, dass die Gläser eine nicht hinreichend hydrophile Oberfläche haben. Je nach Lieferant sind manche Objekträger bei der ersten Benutzung hydrophil, verlieren aber diese Eigenschaft durch Waschen bzw. Reiben. Notfalls hilft die Beschichtung des Objekträgers mit einem Anti-Beschlag-Spray, zum Beispiel, der Firma »Liqui-Moly«. Solch ein Spray erzeugt ein Schaum, den man einige Minuten wirken lassen sollte. Dann entfernt man den Schaum, indem man ein Papiertaschentuch darauf legt und leicht drückt ohne zu reiben. Nachdem dann das Spray getrocknet ist, legt man den Tropfen mit der Lösung in die Mitte des Glases und hilft der Ausbreitung, soweit notwendig, mit einem Glas- oder Plastikstab nach.

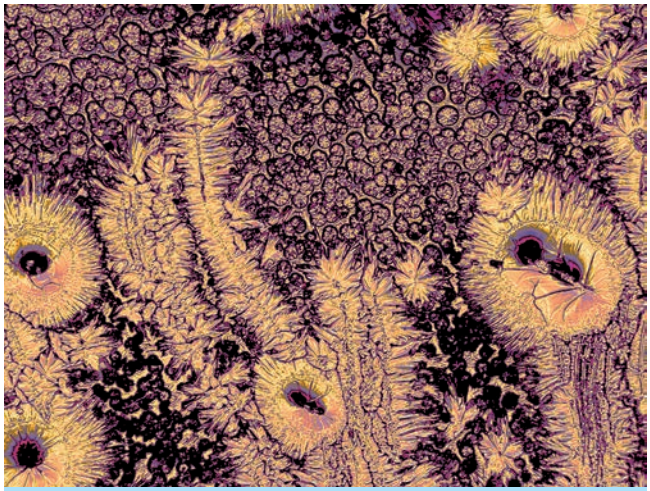

Abb. 5. Bei Zusatz von Gummi arabicum (hier 0,8 % mit 3 % Threonin) bilden sich keine linearen Strukturen, wie mit anderen Polymeren, wie in Abb. 3 und Abb. 4 zu erkennen ist.

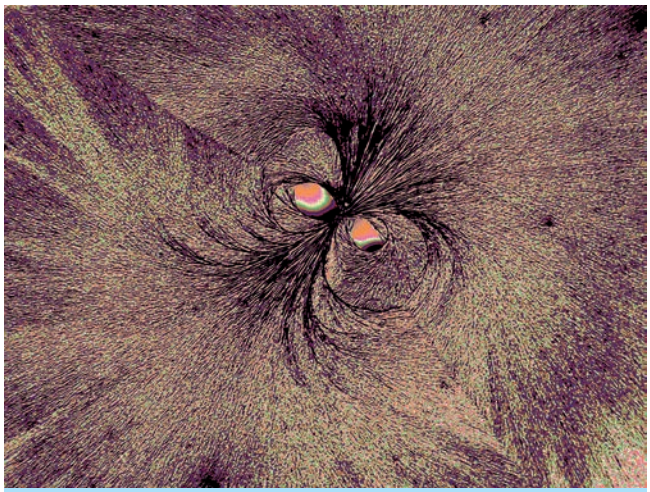

Abb. 6. Nadelförmige Kristalle (hier Kupferchlorid; 6 %), werden durch Kohlenhydrate (hier Trehalose; 4 %) gebogen.

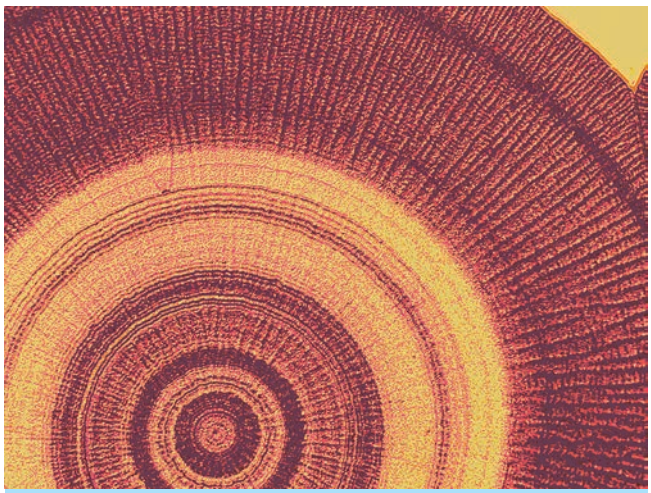

Abb. 7. Kristalle von Ascorbinsäure aus einer Lösung in Wasser (3 %)

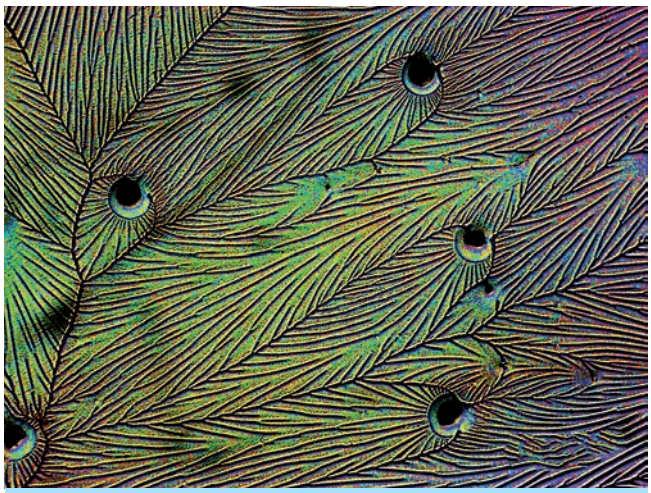

Abb. 8. Wie Abb. 7, jedoch aus einer Lösung in Ethanol (3 %)

Man hat das Problem der schlechten Ausbreitung des Tropfens meistens nicht, wenn man mit geeigneten Lösungsmitteln statt Wasser arbeitet, zum Beispiel mit Ethanol. Die 2D-Kristalle fallen dann aber unterschiedlich aus, wie der Vergleich von Abbildung 7 mit Abbildung 8 zeigt.

Abgesehen von Wasser und (in sehr wenigen Fällen) Ethanol, wurden andere Lösungsmittel bislang nicht benutzt, und ihr Einsatz könnte Gegenstand eines Forschungsprojektes von Schüler/innen sein.
Alternativ zeigten einige Versuche bei der Vorbereitung dieses Berichtes, dass der Zusatz von circa 0,2 ‰ des Geschirrspülers Pril in die wässrige Lösung die Ausbreitung des Tropfens begüns-

tigt und die Kristallbildung nicht beeinflusst. Man könnte auch die glatte Fläche einer angeschnittenen Kartoffel auf dem Glas reiben und die hydrophile Wirkung von dem dort enthaltenen Solanin nutzen. Danach sollte man ein Papiertaschentuch darauf sehr leicht drücken und die Schicht trocknen lassen. Es ist nicht erforscht, wie dies die Kristallbildung beeinflusst, so dass auch dies eine interessante Forschungsaufgabe für Schüler/innen wäre, da man sich aufwendigere Maßnahmen in der Zukunft sparen könnte. Wie immer man auch verfährt, ist bei manchen Substanzen das »Perlen« der Lösung besonders stark, also die Ausbreitung der Lösung sehr schwer, so zum Beispiel bei Magnesiumsulfat, Coffein oder Saccharin. In diesen Fällen muss man der Ausbreitung besonders hartnäckig mit einem Plastik- oder Glasstab nachhelfen.

1.4 Probleme bei der Trocknung

In der Regel braucht ein über das Glas ausgebreiteter Tropfen circa 20 Minuten, um zu trocknen und dabei Kristalle zu bilden. Einige Lösungen sind aber dermaßen hydrophil, dass sie bei hinreichend hoher Luftfeuchtigkeit Wasser aus der Umgebung anziehen und deshalb sehr langsam und manchmal gar nicht trocknen. Dies ist zum Beispiel der Fall bei wässrigen Lösungen der Zitronensäure sowie der Aminosäuren Prolin und Beta-Alanin. Oft hilft dabei der Zusatz von Kristallisationskeimen. Hierzu wartet man am besten bis die Lösung so weit ausgetrocknet ist, dass sie rein optisch eine sirupähnliche Konsistenz angenommen hat. Dann legt man einige Körner der Substanz auf die Lösungsschicht und drückt sie sanft hinunter.

1.5 Die Beobachtungen mit dem Mikroskop

Nach dem Trocknen erlebt man abenteuerlich-spielerische Überraschungen, wenn man verschiedene Orte des Objektträgers mit dem Mikroskop betrachtet, denn man sieht durchaus sehr unterschiedliche Strukturen. Der Grund ist, dass die Schichtdicke vom Rand bis hin zur Mitte zunimmt und die sich bildenden Strukturen von der Schichtdicke abhängen. Auch eine nicht exakt horizontale Lage des Glases führt zu unterschiedlichen Schichtdicken. Hinzu kommt noch, dass kleinste, nicht wahrgenommene Staubkörnchen oder Schmutzflecken das Kristallwachstum beeinflussen. Deshalb heißt es: suchen und finden, indem man den Objektträger unter dem Mikroskop langsam und wachsam bewegt. Man sollte nach und nach Ausschnitte von circa 1 mm × 1 mm beobachten. Es ist bei einigen Mikroskoptypen empfehlenswert, die Halterungsvorrichtungen unter dem Objektiv des Mikroskops zu entfernen, um die Bewegungen des gesamten Objektträgers bequem mit der Hand durchzuführen.

Neben der Schichtdicke sorgt auch die Abhängigkeit der Kristallisation von der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit für Überraschungen. Die Schüler könnten an verschiedenen Arbeitstagen die Werte eines Thermometers und eines Hygrometers notieren, um deren Einfluss festzustellen. Die Bilder in diesem Bericht entstanden bei circa 20 °C, da der Raum thermostatisiert war, und bei relativen Luftfeuchtigkeiten zwischen 40 % und 70 %. Möchte man diese Parameter wählen wollen und konstant halten, dann sollte man die Lösungschicht in einer

Rezeptur (Zusammenfassung)

1. Besorgung eines einfachen Mikroskops. Das Sichtfeld sollte ungefähr eine Fläche von 1 mm × 1 mm darstellen, was man mit einem Lineal unter dem Objektiv feststellen kann. Nützlich ist ein Mikroskop mit integriertem Fotoapparat oder mit einen Anschluss an einen PC.
2. Man stellt eine Lösung mit destillierten Wasser oder einem anderen Lösungsmittel her. Benutzt man Substanzen aus dem Haushalt, so sollten diese laut Packungsbeilage keine Beimengungen zuckeratiger Substanzen haben, da diese Beimengungen meistens so groß sind, dass sie die Kristallisation verhindern.
3. Man kann die Lösung auch mit Substanz-Mischungen herstellen. Das ist aufgrund der großen Zahl der Möglichkeiten sehr spannend.
4. Mit einer Pipette setzt man ein Tropfen der Lösung in die Mitte eines Objektträgers und verteilt ihn auf die ganze Fläche mit einem Glas- oder Plastikstab.
5. Falls der Tropfen »hartnäckig perlt«, also sich nicht verteilen lässt, so sprühe man vorher ein Anti-Beschlag-Spray (für Winduschtzscheiben) über den Objektträger, lasse es einige Minuten wirken, tupfe dann den Schaum ohne Reiben ab und warte bis das Spray trocknet.
6. Jetzt wie **4** und trocknen lassen.
7. Mit dem Mikroskop die Fläche nach interessanten Ausschnitten absuchen, indem man den Objektträger unter dem Mikroskop langsam bewegt.
8. Erstellen von Fotos mit einem im Mikroskop eingebauten Fotoapparat oder durch Anschluss an einem PC. Aufbewahren lohnt sich nicht, da die Kristalle nach Stunden oder Tagen zerfallen.
9. Nach dem Zerfall ist eine Wiederholung mit der gleichen Substanz leicht herzustellen: Man lege ein Tropfen Lösungsmittel, z. B. Wasser, in die Mitte, verschmiere den Tropfen bis sich die vertrocknete Substanz löst und lässt die entstandene Lösung trocknen.
10. Nachfärben oder Färben kann man mit im Internet frei verfügbare Programme, z. B. GIMP *(https://www.gimp.org/)*.

Klimakammer trocknen, zum Beispiel in einem Terrarium mit regulierbarem Befeuchter und Heizung, wie man es auch zur Haltung empfindlicher tropischer Tiere verwendet.

2 Was zeigen uns die zweidimensionalen Kristalle?

2.1 Kristalline Ordnung versus chaotische Wärmebewegung

Hängt man ein Wollfaden in eine gesättigte Lösung, so bilden sich innerhalb einiger Tage oder Wochen 3D-Kristalle mit symmetrischen Formen, zum Beispiel Würfel, Oktaeder, usw. Diese Kristalle entstehen wie Ziegelbauten, indem die Moleküle der Lösung nach und nach an den stabilsten Stellen binden. Diese Stellen sind jene, welche die größte Anziehungskraft bei einer hinreichenden großen Zahl von Nachbarn ausüben. Auf diese Weise ergibt sich am Ende eine geordnete Struktur. Bindungen an anderen Stellen sind auch möglich, halten aber nicht lange aufgrund der Wärmebewegung, das heißt die Moleküle reißen sich vom Kristall wieder los oder sie wandern auf der Oberfläche des Kristalls, bis sie eine der stabileren Stellen erreichen. Solche Prozesse wurden detailliert und unabhängig voneinander in den theoretischen Arbeiten von Walther Kossel (1930) und Iwan Stranski (1931) beschrieben.

In den hier beschriebenen Experimenten ist die auf dem Glas aufgetragene Schicht so dünn, dass das Lösungsmittel innerhalb von Minuten verdampft und die schwach oder gar nicht gebundenen Moleküle keine Zeit haben, die stabilsten Bindungsstellen zu erreichen. Nur ein Bruchteil der Moleküle bildet deshalb geordnete Strukturen, während der Rest aufgrund der Wärmebewegung dem Zufall unterliegt. Die Bilder in diesem Bericht stellen also eine Mischung von Ordnung und Chaos dar. Aufgrund des Letztgenannten gleicht kein Kristall einem anderen in seinen Eizelheiten, auch wenn die experimentellen Bedingungen gleich sind. Abbildung 9 zeigt besonders deutlich das Vorhandensein von kristalliner Ordnung, insbesondere durch das wiederholte Auftreten eines charakteristischen Winkels, so wie auch das Auftreten von Chaos in den kleineren, ungleichen »Ästen«. Insgesamt beobachtet man in dieser Abbildung auch eine sogenannte Fraktalstruktur, die mathematisch so definiert wird, dass die Formen »selbstähnlich« sind: Kleine Bildteile ähneln größere Teile, etwa wie bei Bäumen.

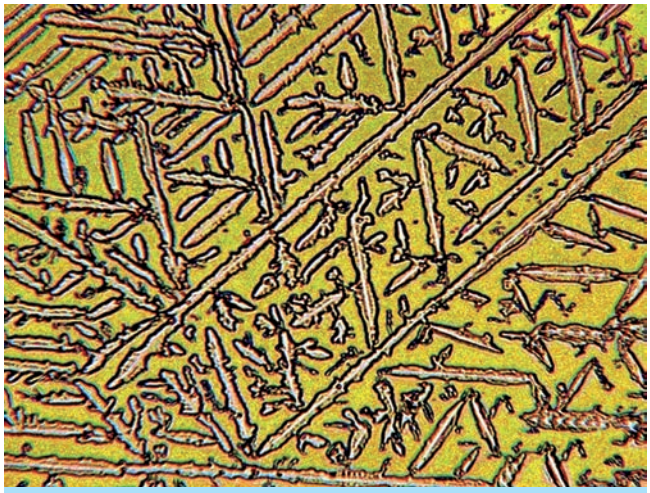

Abb. 9. Kristalle von Silbernitrat (3 %) mit geordneten, charakteristischen Winkeln und chaotischen Verästelungen mit fraktaler Struktur, d. h. die Formen sind im Kleinem ähnlich wie im Großen

2.2 Analogie zu Eisblumen

Als früher die Zimmerfenster noch nicht so gut die Wärme isolierten wie heutzutage, traten im Winter oft so genannte Eisblumen auf den Fenstern auf. Sie sind wie folgt zu erklären: Außerhalb des Raumes ist die Temperatur niedrig und innen die Luft feucht. Der Wasserdampf im Raum legt sich schnell als Eis an der Fensterscheibe ab und verhält sich analog dem gelösten Stoff bei den hier vorgestellten Experimenten. Hätte die Eisbildung genug Zeit, dann würden sich nur die für Wasser charakteristischen hexagonalen Formen ausbilden, doch das Chaos der Wassermoleküle der Luft wird in Form von nie gleichen »Blumen« eingefroren.

An den Scheiben von Autos ist die Situation ein klein wenig anders, hat aber ähnliche Wirkung. Die Luft ist außerhalb in unmittelbarer Nähe des Fensters kalt und in etwas weiterer Entfernung hinreichend feucht. Dies ist auch die Situation bei den sogenannten Meereseisblumen in der Arktis, die in »malerischer« Form die Wasseroberfläche, anstatt eines Glasfensters bedecken.

Obwohl die Strukturen bei den vorgestellten Experimenten durch Austrocknung entstehen und die Eisblumen durch Einfrieren zustande kommen, finden analoge physikalische Vorgänge in beiden Systemen statt.

2.3 Chaostheorie

In den oberen Abschnitten wurde das Wort »Chaos« im Sinne von Unordnung verwendet.

In den 1960er Jahre prägte man das Wort »Chaos« für eine wichtige Eigenschaft der Unordnung, nämlich die der Unvorhersagbarkeit. Diese hat weitreichende Konsequenzen, zum Beispiel bei der Wettervorhersage oder bei Herzrhythmusstörungen. Ursache der Unverhersagbarkeit ist das Phänomen »Kleine Ursache, große Wirkung«, bzw. der sogenannte Schmetterlingseffekt: »Der Flügelschlag eines Schmetterlings in Indien kann Monate später einen Sturm in Nordamerika auslösen«. Zur Veranschaulichung der Ernsthaftigkeit dieser Behauptung kann man zum Beispiel Karambolagen beim Billiardspiel betrachten. Stößt man Kugel A mit Kugel B und Kugel B mit Kugel C an, so kann man als geübter Spieler den Verlauf von Kugel A vorhersagen. Doch schon bei fünf hintereinander stoßenden Kugeln spielen nicht kontrollierbare Muskelzuckungen im Arm des Spielers eine Rolle. Bei 17 Kugeln ist die Gravitationskraft eines Beobachters oder eines draußen parkenden Autos am Verlauf der letzten Kugel beteiligt. Bei 49 Kugeln müsste man für eine Vorhersage die Gravitation der gesamten Milchstraße berücksichtigen (Markus, 2009).

Mit 2D-Kristallen kann man den Schmetterlingseffekt leicht verifizieren, wenn man winzige Mengen einer fremden Substanz in die Lösung hinzumischt. Dies kann drastische Konsequenzen

Abb. 10. Eine kleine Beimischung von Taurin (1 %) zu Zitronensäure (48 % wie in Abb. 1) verursacht drastische Veränderung gemäß dem sogenannten »Schmetterlingseffekt«

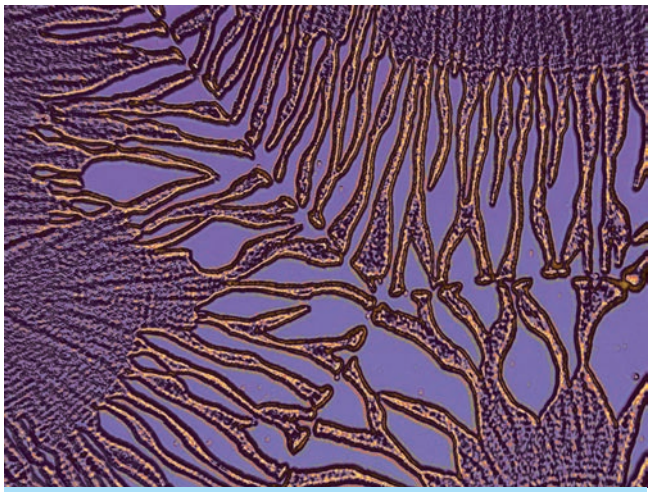

Abb. 11. Eine kleine Beimischung von Ammoniumchlorid (0,015 %) zu Ascorbinsäure (3 % wie in Abb. 7) verursacht große Änderungen, so wie auch in Abb. 10

Abb. 12. Ein kleiner Zusatz von Glycin (0,1 %) zu Kupfersulfat (10 %) verursacht unerwartete Änderungen. Dies ähnelt dem Effekt in Abb. 10 und Abb. 11.

haben, wie man in Abbildung 10, verglichen mit Abbildung 1 oder in Abbildung 11, verglichen mit Abbildung 7 erkennt. Auch Abbildung 12 zeigt diesen Effekt. In diesen Fällen ist der »Schmetterling« nicht an einem bestimmten Ort, sondern winzig und überall, wie bei der Gravitation im oben angegebenen Beispiel der Billiardkugeln.

2.4 Selbstorganisation

Es ist erstaunlich, dass trotz der Unordnung der Wärmebewegung geordnete Strukturen entstehen, die eher wie Blumen, Bäume oder angenehm zu betrachtende Formen aussehen und nicht ein wildes Durcheinander bilden. Zur Erklärung dieser unerwarteten Ordnung kommt uns die Theorie der Selbstorganisation entgegen, für die der russisch-belgische Physikochemiker Ilya Prigogine 1977 den Nobelpreis für Chemie erhielt.

Nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik muss die Entropie, also die Unordnung in einem geschlossenen System zunehmen, so dass keine geordneten Strukturen in einem solchen System entstehen können. Die Theorie von Ilya Prigogine betrachtet dagegen offene Systeme. In ihnen kann die Entropie innerhalb eines Systems abnehmen, es kann also dort Ordnung entstehen. Dann muss aber außerhalb des offenen Systems die Entropie, also die Unordnung, dermaßen zunehmen, dass insgesamt (innen und außen) die Entropie zunimmt (Glansdorff & Prigogine, 1971).

Bei den 2D-Kristallen in diesem Bericht gibt es eine beträchtliche Entropiezunahme durch die Verdampfung des Wassers. Dies liegt daran, dass die Wassermoleküle sich zunächst relativ geordnet in der Flüssigkeitsschicht befinden und später als Gas in stärker ungeordneter Form in die Luft des Labors diffundieren. Dieses »Guthaben« an Unordnung fällt den halbwegs geordneten Strukturen zu, die wir auf den Bilder sehen, wobei insgesamt die Unordnung zunimmt, wie es der Zweite Haupsatz fordert.

2.5 Diagnose von Krankheiten und Artenbestimmung

Verschiedene Forscher haben den Anspruch erhoben, durch Zusatz von Schleim, Urin, Blutserum und anderer Körperflüssigkeiten erkrankter Personen in die Lösungen von Salzen oder anderen kristallisierfähigen Substanzen Krankheiten über die Analyse der 2D-Kristalle diagnostizieren zu können (Lehman-Grube, 1954; Selawry & Selawry, 1957; Solé, 1960; Murube, 2004). Andere Autoren haben berichtet, dass man die Art von Pflanzen (Pfeiffer, 1930) oder von Tieren (Solé,1955) durch Zusatz ihrer Säfte bzw. Körperflüssigkeiten bestimmen kann. Untersuchungen mit einer Klimakammer, die die Temperatur und Feuchtigkeit konstant hält, haben jedoch gezeigt, dass Änderungen der Klimakammer-Einstellungen innerhalb von Grenzen, die in einem Labor auftreten, einen größeren Einfluss auf die 2D-Kristalle haben, als die Zusätze von Körperflüssigkeiten bei Krankheitsdiagnosen (Fasel, 2009). Auch die Dicke der Schicht auf dem Glas hat einen enormen Einfluss. Die Konstanthaltung aller beeinflussenden Parameter ist so aufwendig, dass sich die genannte Methode zur Krankheitsdiagnose nicht durchsetzen konnte. Die Bestimmung von Pflanzen- und Tierarten mit dieser Methode ist allerdings noch ein offenes Thema, das von Schüler/innen als Forschungsarbeit betrieben werden könnte.

3 Fazit

Die hier beschriebene Methode erlaubt es, mit sehr einfachen und preiswerten Mitteln, eine große Vielfalt von Kristallen zu beobachten. Man braucht nur preiswerte Substanzen (zum Beispiel Natron, Zitronensäure, Bittersalz, Vitamin C oder die für das Fitnesstraining heute leicht erhältlichen Aminosäuren) und Stoffe zum Zumischen (zum Beispiel Gelatine, Gummi arabicum oder kleine Mengen Kohlenhydraten), eine Waage (0,1 bis 10 Gramm), eine Rühr- und Heizvorrichtung, destilliertes Wasser, Glasbehälter, Objektträger, Anti-Beschlags-Spray und ein Mikroskop (Vergrößerung 50×) mit Zugang zum PC bzw. ein LCD-Mikroskop. Zum Färben der Bilder eignet sich das im Internet kostenlose Programm GIMP. Schüler könnten die Experimente auch zuhause machen und allerlei Lösungen, Zusätze und Mischungen ausprobieren.

Literatur

Fasel, J. (2009). Einfluss von Polysacchariden und Proteinen auf anorganische Kristallisation. *Diplomarbeit an der Technischen Universität Dortmund.*

Glansdorff & Prigogine (1971). *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and fluctuations,* New York: Wiley.

Kossel, W. (1930). Über Kristallwachstum. *Naturwissenschaften 18*, 901–910.

Lehman-Grube, F. (1954). Über die Beeinflussbarkeit der Kupferchlorid-Kristallisation durch Liquor cerebrospinalis bei Meningitis tuberculosa. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten 192*, 207–219.

Markus, M. (2009), Die Kunst der Mathematik. Frankfurt: Verlag Zweitausendeins, 27–28.

Markus, M. (2014). Unsere Welt ohne Insekten? Stuttgart: Franckh-Kosmos, 78, 180–181.

Markus, M. (2017). Bildkraft der Substanzen, 2D-Kristalle zum Selbermachen. Neustadt an der Orla: Arnshaugk.

Murube, J. (2004). Tear crystallisation test: Two centuries of history. *Ocular Surface 2*, 7–9.

Pfeiffer, E. (1930) Kristalle. Stuttgart: Orient-Occident-Verlag.

Selawry, A. & Selawry, O. (1957). Die Kupferchlorid-Kristallisation in Naturwissenschaft und Medizin. Stuttgart: Gustav-Fischer.

Solé, A. (1955). Vergleichende Stagoskopie des Blutserums. *Österreichsche Zoologische Zeitschrift 5*, 366–376.

Solé, A. (1960). *Stagoskopie*. Wien: Franz Deuticke.

Stranski, I. N. (1931). Beitrag zur Theorie der orientierten Ausscheidung von Ionenkristallen aufeinander und zur Frage der Bildung von Grimmschen Mischkristallen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie, Bodenstein-Festband*, 230–238.

Dr. Mario Markus, emeritierter Physik-Professor der Universität Dortmund, war lange Zeit Arbeitsgruppenleiter im Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie. mariomarkus@hotmail.com