

Makromoleküle – Strukturbildner mit besonderen Eigenschaften

Thematische Einführung

Makromoleküle sind „Riesenmoleküle“, die aus kovalent verknüpften, gleichen oder verwandten Einheiten aufgebaut sind. Es ist noch keine 100 Jahre her, dass ihre Existenz unter Wissenschaftlern anerkannt wurde. Lange hatten sie darüber gestritten, ob es sich dabei nicht eher um Assoziate (micellare Kolloide) handle. Den Beweis für ihre Existenz trat *Hermann Staudinger* (1881-1965, Nobelpreis 1953, s. Abb. 1) an, den man daher auch als Begründer der *Makromolekularen Chemie* betrachtet.



Abb. 1 Hermann Staudinger (1881-1965), 1917 in Zürich (Bildarchiv der ETH Zürich)

Der synonym verwendete Begriff **Polymer** besagt, dass hier einzelne Grundbausteine (das Monomer) zu langen Ketten (dem Polymer) miteinander verknüpft werden. Die Architektur der entstehenden Gebilde ist vielfältig und bestimmt ganz wesentlich die Eigenschaften.

Die Natur folgt hier einem ökonomischen Prinzip: einem hierarchischen Aufbau von „klein“ zu „groß“, vergleichbar dem Bau eines Fertighauses aus vorgefertigten Bauteilen. Die Elementarteilchen bilden die Atome, aus den Atomen kann man verschiedene Moleküle aufbauen, und geeignete Moleküle lassen sich zu Makromolekülen verknüpfen (vergl. Abb. 2). Die Materie organisiert sich zu komplexeren Strukturen, wie wir sie in der Natur, aber auch im Labor immer wieder bewundern können, z.B. die Stärkekette in einem kunstvoll geschichteten Stärkekorn. Makromoleküle bringen für solche Strukturbildungen besondere Voraussetzungen mit.

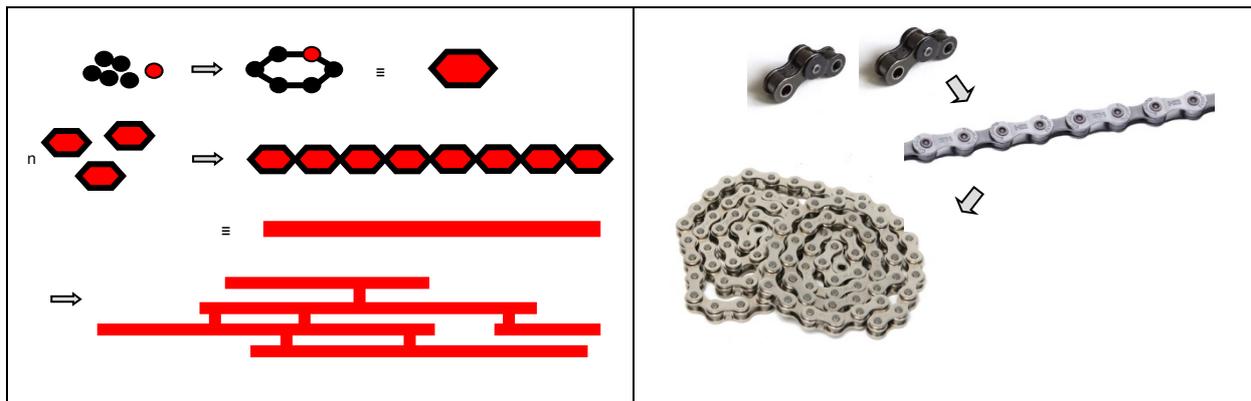


Abb. 2 Links: Das Konzept: Hierarchisches Bauprinzip vom Atom zu Polymerketten, die räumlich vernetzt werden können. Rechts: Die Fahrradkette als Modell für den Aufbau einer „komplexeren Struktur“, gestreckte und helicale Konformation

Makromoleküle haben viele Eigenschaften, die man mit bloßem Auge erkennen und verfolgen kann, etwa Viskosität, Gelbildung, Elastizität, Kleben oder Filmbildung. Hieraus ergibt sich eine besondere Attraktivität für das chemische Experimentieren im Schülerlabor. SchülerInnen, insbesondere jüngere, bringen noch keine vertieften Kenntnisse über den Molekülaufbau mit und andererseits stehen i.d.R. keine aufwändigen Analysengeräte zur Verfügung. Will man also den für die Chemie so wichtigen Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften erkennen, ist es hilfreich, wenn dies ohne Hilfsmittel möglich ist, zumal z.B. eine spektroskopische Charakterisierung für SchülerInnen nicht so einfach in Struktur übersetzbar ist und der Alltagsbezug ausgeklammert bleibt. Makromoleküle begegnen oder begleiten uns hingegen allerwärts: in der Nahrung, als Textilien, Verpackungs- und Baumaterial. Ein zweites Argument für Polymere ist die Deutung von molekularen Eigenschaften mit Modellen. Auch diese sind auf der hierarchischen Ebene der Strukturbildung von Polymeren leichter zu vermitteln und zu verstehen, etwa, wenn ich demonstriere, dass eine Tripelhelix von Molekülketten stabiler ist als der einzelne Strang oder wenn ich die Gelbildung im Modell demonstriere.

Es war daher Ziel unseres Projekts "Von Groß zu Klein", den Aufbau und die Eigenschaften vieler bekannter Makromoleküle experimentell zu erschließen und anhand von Modellen zu verstehen [1]. Um dem verbreiteten Irrglauben zu begegnen, dass Naturstoffe etwas grundlegend anderes (besseres) als synthetische (= schlecht) seien, werden jeweils Vertreter der Biopolymere und der synthetischen Kunststoffe einbezogen, so etwa die Polyelektrolyte Alginat (aus Algen) und Polyacrylat (auf Erdölbasis produziert). Für Vertreter beider Gruppen werden die Architektur, d.h. Auf- und Abbau thematisiert, die Eigenschaften wie die Gelbildung und die Anwendung, bei der die Struktur-Eigenschaftsbeziehungen genutzt werden. Dabei werden auch verschiedene Formen des Recycling thematisiert, worunter z.B. Umformungsexperimente fallen. Vertreter sind Stärke, Cellulose, Alginat, Protein, Polystyrol, Polyester, Polyacrylat sowie Polyamid.

Zwei Polyelektrolyte: Alginat und Polyacrylat

In diesem Beitrag sollen beispielhaft die beiden bereits genannten Polyelektrolyte Alginat und Polyacrylat vorgestellt werden.

Alginate werden aus Braunalgen (*Macrocystis*, *Laminaria*) gewonnen, in denen sie interzellulär als strukturgebendes Element im Zellwandbereich vorkommen. Sie sind Polysaccharide, die aus zwei 1,4-verknüpften Uronsäurebausteinen aufgebaut sind, der β -D-Mannuron- (ManA, M) und der α -L-Guluronsäure (GulA, G) (Abb. 3) Homopolymere Bereiche, in denen Mannuronsäure oder Guluronsäure jeweils als Block (G- oder M-Blöcke) vorliegen, wechseln mit heterogenen Abschnitten, in denen die beiden Bausteine alternierend auftreten (GM-Blöcke) [2].

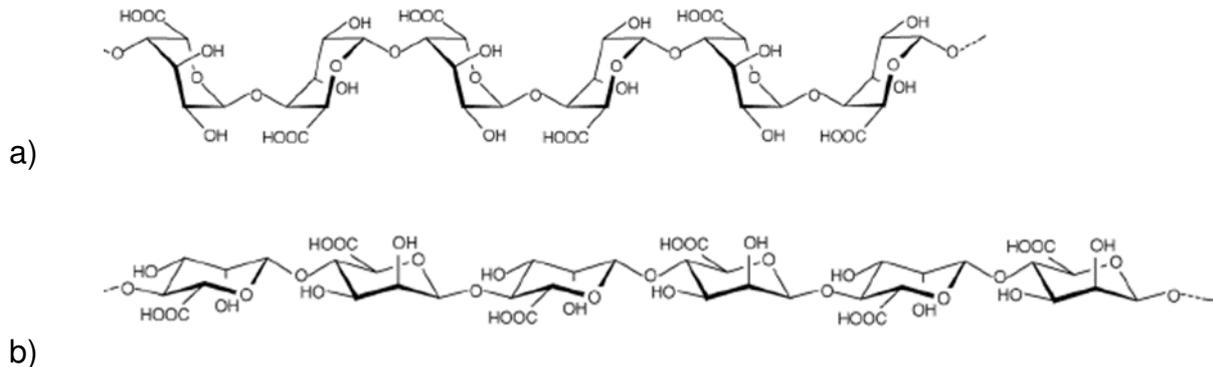


Abb. 3: Homopolymere Bereiche in Alginaten: a) G-Block aus α -1,4-L-Guluronsäure, und b) M-Block aus β -1,4-D-MannuronsäureA

Aus der Stereochemie und der Verknüpfung der beiden Uronsäuren ergibt sich teils eine lineare (M-Blöcke), teils eine zickzackartige Kettenkonformation (G-Blöcke), während die alternierenden GM-Bereiche treppenartig angeordnet sind. Diese Kettenkonformation ist essentiell für die Art der Gelbildung mit Calciumionen, die in die "Taschen" der G-Blöcke passen und dort mit mehreren Sauerstoffen in geeigneter räumlicher Anordnung koordinieren. So können zwei oder mehr Polymerketten physikalisch miteinander vernetzt werden. Ebenso wichtig sind M-Blöcke, die frei beweglichen Verbindungen zwischen den G-Zonen darstellen. Ohne diese würde das Polymer mit Calciumionen einfach ausfallen.

Es kommt so zur Ausbildung eines dreidimensionalen Netzwerks, in das Wasser eingelagert wird. Der osmotische Druck der wässrigen Phase und der mechanische Gegenruck des Netzwerks bestimmen den Quellungszustand. Die Calciumionen befinden sich in den Hohlräumen der Zickzack-Strukturen, was an Eier in einem Eierkarton erinnert. Daher wird dieses Modell auch als „Eggbox-model“ bezeichnet (Abb. 4).

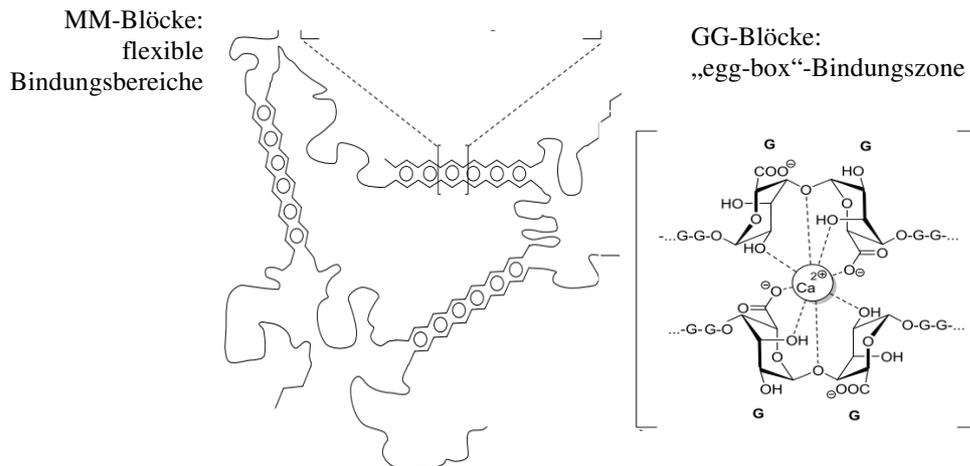


Abb. 4: Ca^{2+} -Ionen vermittelte Gelbildung durch Wechselwirkung zwischen G-Blöcken in Alginaten: „Eggbox-model“ (aus [3] mit freundlicher Genehmigung des Verlages)

Bereits 0,5 – 2 %ige Alginate-Lösungen gelieren beim Einbringen in ausreichend konzentrierte Calcium-Lösungen schnell und wirkungsvoll. Die GM-Blöcke tragen auch zur Gelbildung bei, bewirken aber eine geringere Festigkeit und werden im Rahmen der hier vorgestellten Versuche zwecks Vereinfachung nicht thematisiert.

Ohne Zusatz von G-verbrückenden divalenten Kationen, neben Ca^{2+} auch die zur Mikroverkapselung eingesetzten Vertreter Sr^{2+} , Ba^{2+} und Zn^{2+} [4] oder auch das dreiwertige Al^{3+} [5], bilden die wasserlöslichen Salze der Alginsäure (Na-, K-, NH_4 -Alginate, E401-403) in Wasser viskose Lösungen.

Säuert man Alginate an und drängt so die Dissoziation der Uronsäuren zurück (pK_s ManA: 3,38, pK_s GulA: 3,65) bildet sich neutrale Alginsäure, die nicht mehr wasserlöslich ist, sondern durch Wasserstoffbrücken der Carboxylgruppen chelatartig vernetzt sogenannte Säuregele bilden kann.

Die Ausbildung eines stabilen dreidimensionalen Netzwerks über physikalische Wechselwirkungen erfordert das kooperative Zusammenwirken mehrerer solcher schwacher G-Ca-G-Wechselwirkungen. Man geht davon aus, dass etwa 6-10 Wechselwirkungspunkte pro Verbindungszone (s. Abb. 4) erforderlich sind, damit eine ausreichend stabile Struktur entsteht. Die Stabilität der Alginategele und ihre Festigkeit (Elastizität versus Brüchigkeit) hängen also auch von den Blocklängen der GG-, MM- und GM-Sequenzen ab. Ein anschauliches Modell für die Kooperativität stellt der Klettverschluss dar, bei dem auch nur das Zusammenspiel vieler kleiner Verhakungen zu einer stabilen Verbindung führt.

Bei hohen Calciumkonzentrationen ist nach der Gelierung ein Alterungseffekt zu beobachten. Das Gel schrumpft, zunächst gebundenes Wasser tritt teils wieder aus. Diesen Effekt nennt man Synärese. Man beobachtet ihn auch bei anderen Gelen, z.B. bei stichfesten Joghurts.

Alginate finden u.a. in der Medizin (Abformmasse, Wundauflagen, Mikroverkapselung) wie auch für Lebensmittel als Dickungsmittel und Gelbildner (E400-E404, "molekulare

Küche", "retextured food") Verwendung. Aufgrund der schnellen Gelbildung in der Kälte ist es auch im künstlerischen Bereich als Abformmasse beliebt. Da ihre Gelbildungseigenschaften von der individuellen Struktur abhängen, beschäftigt sich die Forschung damit, diese genauer zu analysieren [6]. Neben dem Verhältnis von G und M interessiert die Anordnung in den drei genannten Sequenzen und deren Längenverteilung. Die Isolierung und Charakterisierung der an der Biosynthese beteiligten Enzyme, die in die anfänglich reine Mannuronsäurekette durch Inversion an einem Stereozentrum G-Abschnitte und alternierend angeordnete Einheiten generieren, erlaubt es Wissenschaftler/innen, die Struktur gezielt zu modifizieren. Unsere Gruppe hat sich in kleineren Forschungsarbeiten damit befasst, die Alginatstruktur mittels Massenspektrometrie genauer zu erforschen. Da G und M Stereoisomere sind, also die gleiche Masse besitzen, kann ein Massenspektrometer sie nicht einfach unterscheiden. In Zusammenarbeit mit Gudmund Skjåk-Bræk von der Universität Trondheim [7] wurden daher die M-Bausteine in Alginat mit dem Enzym Epimerase in G-Bausteine überführt, so wie es auch in der Biosynthese passiert. Diese Inversion eines Stereozentrums wurde in deuteriertem Wasser durchgeführt, um im Zuge der Reaktion spezifisch ein D statt ein H in das Molekül einzuführen. So werden G und M (als G-D) verschieden massenspektrometrisch unterscheidbar. Dieses Konzept stößt jedoch an Grenzen: Das Enzym braucht nämlich Calcium und ab ca. 70-80 % G fällt das Alginat dann aus.

Polyacrylat haben wir als synthetisches Pendant zu den Alginaten ausgewählt. Es ist als wasserbindender Polyelektrolyt weit verbreitet, in Windeln, in Haargelen, aber auch als Wasserspeicher für Pflanzen bei der Aufzucht von Jungpflanzen sowie zur Pflanzenpflege durch Herabsetzung der Bewässerungshäufigkeit.

Im Gegensatz zum linearen Alginat können hier bei der Synthese Vernetzer eingesetzt werden, die Brücken zwischen den Ketten bilden. Gegenstand der Forschung ist z.B., wie man den Vernetzungsgrad einstellt, damit eine Babywindel Flüssigkeit schnell aufnimmt (Quellungskinetik), aber auch erreicht, dass das gequollene Material druckstabil ist, die Flüssigkeit also nicht unter dem Druck des auf der Windel liegenden Babys wieder abgibt.

Polyacrylsäure ist ein durch radikalische Polymerisation hergestelltes, hochmolekulares Polymer der Acrylsäure (Abb. 5). Die Säure wird üblicherweise vor oder nach der Polymerisation mit Natronlauge (teil-) neutralisiert [8]. Polyacrylsäure und ihr Natriumsalz gehören wie Alginat zu den Polyelektrolyten (Abb. 6), sie bilden unter Wasseraufnahme Gele.

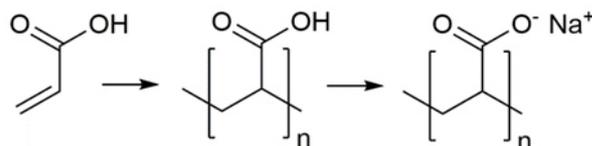


Abb. 5: Polymerisation von Acrylsäure zur Polyacrylsäure und Neutralisation zum Alginat

Unvernetztes Polyacrylat bildet je nach Trocknungsbedingungen mehr oder weniger starke Wasserstoffbrücken aus und ist in Abhängigkeit davon schlecht bis sehr gut wasserlöslich. Die Moleküle ballen sich eng zusammen und nehmen dabei einen relativ kompakten Zustand ein. In Wasser dissoziieren Polyacrylsäure bzw. -acrylate. Das Polymer besitzt nun - je nach pH - eine große Anzahl an Carboxylatgruppen auf engem

Raum. Die negativ geladenen funktionellen Gruppen stoßen sich ab. Das Polymer streckt sich bzw. das Netzwerk weitet sich auf und nimmt in dieser gestreckten bzw. aufgeweiteten Form einen größeren Raum ein. Durch die Natriumionen im Polymer kommt es aufgrund des osmotischen Drucks zur weiteren Flüssigkeitsabsorption. Das eindringende Wasser lässt das vernetzte Acrylat zu einem Gel aufquellen und wird in Form von Hydrathüllen gebunden. Die Quellfähigkeit hängt vom Salzgehalt der äußeren Lösung ab.

Bei den sogenannten Superabsorbentien werden die Polyacrylatketten mit bifunktionellen Monomeren zu dreidimensionalen Strukturen verbunden. Durch diese Vernetzung geht das Material vom löslichen in einen nur noch quellbaren Zustand über. Unter der Bezeichnung Superabsorber fasst man Substanzen zusammen, die ein Vielfaches (durchaus mehr als das 500-fache) ihres eigenen Gewichts an Wasser aufnehmen und speichern können.

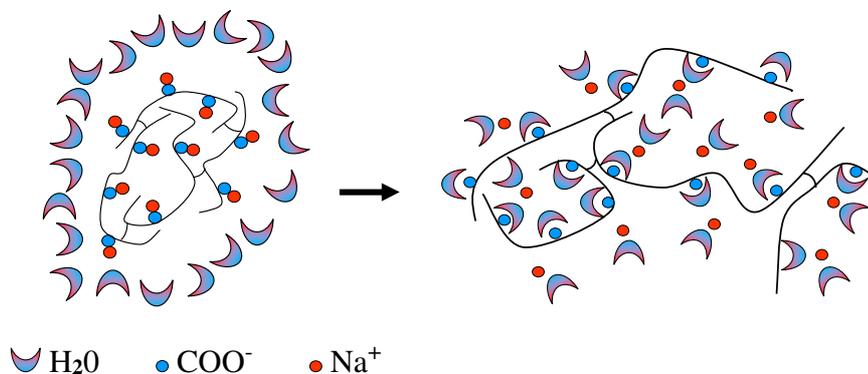


Abb. 6: Schematische Darstellung der Quellung des Polyacrylatnetzwerks in Wasser

Aufgrund der elektrostatischen Wechselwirkungen sind die Gelstrukturen jedoch wie schon erwähnt gegenüber pH-Änderungen und Salzen empfindlich, weil die Abstoßung der Molekülketten beeinflusst wird. Je höher die Salzkonzentration ist, desto effizienter sind die negativen Ladungen der Carboxylatgruppen abgeschirmt, wodurch ihre wechselseitige elektrostatische Abstoßung und Hydratisierung geschwächt wird. Außerdem bindet das Salz in der äußeren Phase selbst Wasser, der osmotische Druck in Richtung Polyacrylat wird niedriger. Daraus folgt, dass Salz in der aufzunehmenden Flüssigkeit die Aufnahmefähigkeit des Netzwerks verringert. Bei pH-Absenkung wird die Dissoziation der Carboxylgruppen zurückgedrängt und der Polyelektrolytcharakter verschwindet. Dies kann zur Verflüssigung bzw. Koagulation des Gels führen.

Welche Lerngelegenheiten bieten sich für Schule und Schülerlabor?

Die vorgestellten Experimente sollen das Verständnis für die Struktur der Makromoleküle anhand ihrer makroskopisch beobachtbaren Eigenschaften wecken. Der Zusammenhang zwischen der räumlichen Struktur des Polymers und sich daraus ergebenden Eigenschaften kann gut durch geeignete Modelle veranschaulicht werden. In den Versuchsreihen wird die makroskopische Eigenschaft der Gelbildung untersucht und anhand des molekularen Aufbaus erklärt. Die Versuche richten sich an Schülerinnen der Sekundarstufe I, können aber für Grundschulen und Sek. II angepasst werden. Als Beispiel für natürliche Makromoleküle wird Alginat, als Vertreter der synthetischen Polymere Polyacrylat behandelt. An diesen beiden ausgewählten Polyelektrolyten können die

SchülerInnen das Gelierungsverhalten sowie eine Reihe von Einflussgrößen systematisch untersuchen.

Bei den Alginaten sind diese die Abhängigkeit von der Art des Salzes, von der Konzentration der Alginat- und der Salzlösung. Mit einfachen Modellen lässt sich der Gelbildungsmechanismus nachstellen. Ein Papierstreifenmodell mit Klebezonen kann zudem deutlich machen, dass man für ein stabiles dreidimensionales Netzwerk mindestens zwei stabile Kontakte pro Kette zu zwei verschiedenen Ketten benötigt und dass diese nur dann ausreichend stabil sind, wenn der Kontakt nicht nur punktuell ist (Kooperativität, Verwendung von Modellen).

Außerdem wirkt sich das Setting der Gelbildung auf die Geleigenschaften aus. So kann man Calcium in eine Alginatlösung eindiffundieren lassen. Dann ergibt sich eine feste Außenschicht und ein weiches Inneres. Einen homogenen Gelkörper erhält man, wenn Calcium gleichmäßig mit dem Alginat vermischt und zeitverzögert in Lösung freigesetzt wird, sogenanntes Internal Setting mit schwerlöslichen Ca-Quellen, aus denen dieses durch pH-Absenkung freigesetzt wird [9].

Ein schon etwas anspruchsvolleres Forschungsprojekt, das in einer AG im Schülerlabor durchgeführt werden kann, könnte den Ca-Gehalt eines Gradientengels in Abhängigkeit vom Ort untersuchen. Dazu wird der Ca-Gehalt z.B. nach Veraschen von verschiedenen Bereichen eines durch Eindiffundieren von Calcium in einen Dialyseschlauch mit Alginatlösung erhaltenen Gels komplexometrisch bestimmt.

Neben Experimenten zur Gelbildung werden verschiedene anwendungsorientierte Experimente beschrieben. Nicht zuletzt können Alginatgelkörper als Reaktionscontainer verwendet werden, wie es Ducci [10] sehr eindrucksvoll beschrieben hat. Hier ergibt sich ein weites Experimentierfeld für kreative und neugierige junge Forscher/innen.

Im Mittelpunkt der Versuchsreihe mit Polyacrylaten steht ihre Fähigkeit, unter Gelbildung große Wassermengen zu binden. Diese und der Einfluss von Salzen auf das Wasserbindevermögen weisen auf die polyelektrolytische Struktur hin. Aus dem Alltagsleben sind Polyacrylate nicht mehr wegzudenken. Als Superabsorber kommen sie in Hygieneprodukten wie Babywindeln und Inkontinenzmaterial zum Einsatz, aber auch in Verbandsmaterial für nässende Wunden. Superabsorber liegen i.d.R. als grobkörniges Pulver vor. Im wasserhaltigen Zustand bildet sich ein weiches Hydrogel. Ihr Wasserbindevermögen ist u.a. davon abhängig, wie viel Salz in dem Wasser gelöst ist. Diese Eigenschaft hat einen großen Einfluss auf ihre praktische Anwendung [11].

Ein besonderer Vorteil dieser Versuchsreihe ist, dass sie sogar im Klassenraum durchgeführt werden kann, da keine spezielle Laborausrüstung erforderlich ist. Die genannten Geräte können auch durch haushaltsübliche Utensilien ersetzt werden, die Materialien sind allgemein zugänglich.

Didaktische Umsetzung

Einleitend soll zunächst der Ablauf der Gelbildung von Alginat untersucht werden. Ziel ist es, zu erkennen, dass eine Koordinationszahl 2 sowie eine Mindestgröße des vernetzenden Ions erforderlich sind, um die Polymerketten physikalisch miteinander zu verbinden (*Versuch: Alginat-Spaghetti – Welches Salz kann man verwenden?*). Nur dann können dreidimensionale Strukturen ausgebildet werden, in die Wasser eingelagert wird. In weiterführenden Versuchen werden Konzentrationseffekte auf Gelstärke und -bildungsgeschwindigkeit beobachtet.

Die SchülerInnen lernen außerdem die Funktionsweise von semipermeablen Membranen kennen (*Versuch: Alginat-Maccaroni – Diffusionsgesteuerte Gelierung*). Alginat als Polymer kann die kleinen Poren einer Dialysemembran nicht passieren, die Calciumionen dagegen schon. Sie dringen in Umkehrung einer klassischen Dialyse durch die Membran in die Alginatmasse ein und verfestigen diese von außen nach innen. Es entstehen so röhrenförmige Gele, die an Maccaroni erinnern. Ältere SchülerInnen können den Versuch auch quantitativ auswerten, indem sie die Wandstärke des Gelzylinders gegen die Dialysezeit auftragen. Der Prozess der Dialyse lässt sich mit einer Dialyse von Stärkekleister in verdünnter Iodlösung gut visualisieren.

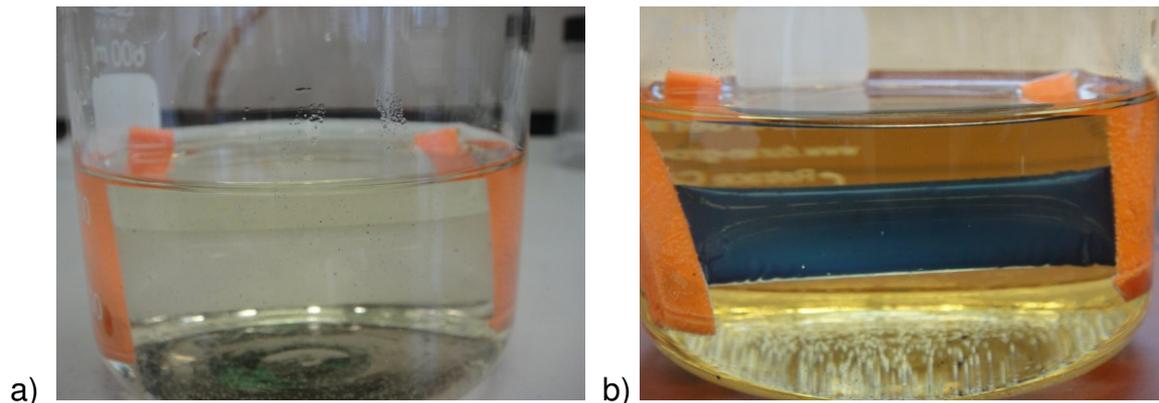


Abb. 7: Dialyse von Stärkekleister in einer Iodlösung a) zu Beginn und b) nach 30 min

Die verdünnte wässrige Iodlösung ist gelb gefärbt, der innerhalb des Dialyseschlauchs befindliche Stärkekleister zunächst farblos. Er färbt sich im Versuchsverlauf langsam blau, weil die kleinen Iodmoleküle genau wie Calciumionen die Membran passieren können, Stärke als Polymer wie auch Alginat jedoch nicht. Zusätzlich erhalten die SchülerInnen auch eine Vorstellung von der Prozessgeschwindigkeit. Die gerichtete Diffusion wird sichtbar.

Alginat finden in der Lebensmittelindustrie wie in der Pharma- und Kosmetikindustrie vielfältige Verwendung. Mit derartigen Beispielen kann den SchülerInnen ein thematischer Bezug zu ihrem Lebensumfeld aufgezeigt werden. So gelieren Alginatformmassen, wie sie auch in der Kieferorthopädie verwendet werden, nach dem Anrühren mit Wasser gleichmäßig aus (*Versuch: Alginatgelierung mittels Internal Setting*). Hierbei handelt es sich um Mischungen aus Alginat, einem schwerlöslichen Calciumsalz und einem Säuredepot wie Glucono- δ -lacton. Infolge der allmählichen Hydrolyse des Lactons wird Calcium freigesetzt. Die Gelierung verläuft zeitgleich in der gesamten Masse. Bei weiterführenden Untersuchungen können Synäreseffekte in Abhängigkeit von der Calciumkonzentration untersucht werden.

Einführend in die Versuchsreihe mit Polyacrylaten wird zunächst das Wasserbindevermögen verschiedener Substanzen verglichen, welches auf den unterschiedlichen Eigenschaften der Stoffe beruht. Die Fähigkeit einer Substanz, Wasser aufzunehmen, hängt nicht nur von ihrem chemischen Aufbau, sondern auch von der Morphologie und der räumlichen Anordnung („Architektur“) ab. Dabei lernen die SchülerInnen die Fähigkeit der Polyacrylate kennen, unter Gelbildung große Wassermengen zu binden. Daran anschließend wird untersucht, inwieweit Salz das Wasserbindevermögen quantitativ verändert (*Versuch: Wasserbindevermögen eines Superabsorbers*).

Wie Salze die praktische Anwendung von Superabsorbent beeinflusst, wird im *Versuch: Flüssigkeitsaufnahme einer Windel* mit isotonischer Kochsalzlösung und destilliertem Wasser deutlich. Die mit destilliertem Wasser versetzte Windel kann deutlich mehr aufnehmen als die mit Kochsalzlösung versetzte. Da es sich bei Urin um eine salzhaltige Flüssigkeit handelt, können also Superabsorber z.B. in Babywindeln nicht ihre volle Saugkraft entfalten. Dass das Flüssigkeitshaltevermögen ebenfalls von der Salzbelastung abhängt, zeigt die Druckprüfung der vollgesogenen Windeln. Die Flüssigkeit ist umso fester im Hydrogel gebunden, je weniger Salz enthalten ist.

Dieses Phänomen kann in einem weiteren Versuch beobachtet werden (*Versuch: Polyacrylat in Haargel*). Wird ein gut wasserlösliches Salz auf das Hydrogel gegeben, löst es sich zunächst im Gel. Die elektrostatische Abstoßung im Polymernetz wird aufgehoben, die zuvor raumausfüllende Struktur bricht zusammen [12]. Das gespeicherte Wasser wird freigesetzt. Daraus ergibt sich die Frage: *Was passiert mit einer vollgesogenen Windel, wenn man darauf Kochsalz streut?* Anhand der in diesem Versuch gewonnenen Erkenntnisse lässt sich die Frage beantworten und mit der Windel aus dem Vorversuch als Abschluss demonstrieren.

Wir danken dem Fonds der Chemischen Industrie für die Förderung des Projekts "Von Groß zu Klein" – *Makromoleküle als Brücke zum molekularen Verständnis – Ein Projekt für außerschulische Lernorte*.

Literatur

- [1] <https://www.tu-braunschweig.de/agnes-pockels-labor/downloads/makromolekuele>
- [2] Marburger, A. (2003), Alginate und Carrageenane – Eigenschaften, Gewinnung und Anwendungen in Schule und Hochschule, Dissertation, Marburg
- [3] Donati, I., Holtan, S., Mørch, Y.A. (2005) New Hypothesis on the Role of Alternating Sequences in Calcium-Alginate Gels, *Biomacromolecules* 6, 1031-1040
- [4] Mørch, Y. A., Donati, I., Strand, B. L., Skjåk-Bræk, G. (2006), Effect of Ca^{2+} , Ba^{2+} , and Sr^{2+} on Alginate Microbeads, *Biomacromolecules* 7, 1471-1480.
- [5] N. O. Dhoot, M. A. Wheatley (2003), Microencapsulated Liposomes in Controlled Drug Delivery: Strategies to Modulate Drug Release and Eliminate the Burst Effect, *J. Pharm. Sci.* 92 679-689.
- [6] Aarstad, O. A., Tøndervik, A., Sletta, H., Skjåk-Bræk, G. (2012) Alginate Sequencing: An Analysis of Block Sequences in Alginates Using Specific Alginate Degrading Enzymes, *Biomacromolecules* 13, 106-116
- [7] <https://www.ntnu.edu/employees/gudmund.skjak-brak>
- [8] Wack, H. (2006), Zum Quellungsdruck von Hydrogelen, Dissertation, Essen
- [9] Nobile, M. R.; Pirozzi, V.; Somma, E.; Gomez d'Ayala, G.; Laurenzio, P. (2008) Development and Rheological Investigation of Novel Alginate/N-Succinylchitosan Hydrogels, *J. Polym. Sci., Part B: Polymer Physics* 46, 1167-1182