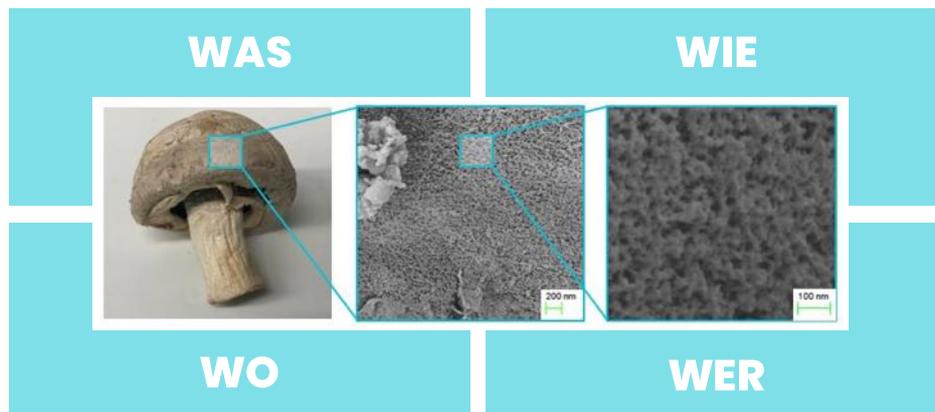


WWW. KNIF**F**ELIX .DE

BEGLEITMATERIAL ZUR EXPERIMENTIERWEBSITE WWW.KNIFFELIX.DE ZUM THEMA

# AEROGELE

Forschung für unseren Alltag



FÖRDERER



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

KOOPERIERENDES FORSCHUNGSINSTITUT



[www.tuhh.de/v8/](http://www.tuhh.de/v8/)

ZIELGRUPPE

Alter ab 14-99+

Einzelinteressierte

Schulklassen

StudentInnen

Kooperierende

**TUHH**  
Technische  
Universität  
Hamburg



## Aufbau der Unterlagen:

**Grundwissen**

**Experimente**

**Exkurse**

**Berufsorientierung**

www.kniffelix.de ist die kostenlose Mitmach-Experimentierwebsite, erstellt von der Nachwuchsinitiative KinderForscher an der TUHH. Ziel der Initiative ist Wissenschaft, Technik und Forschung allgemeinverständlich für jeden zugänglich zu machen: Vom Alltag, über das Experimentieren zur Forschung und Berufsorientierung.

Kniffelix.de ist ausgezeichnet mit dem Seitenstark Gütesiegel für empfehlenswerte digitale Kindermedien.

Dieses Material von KinderForscher an der TUHH steht unter der internationalen CC-Lizenz Namensnennung – nicht kommerziell – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0, siehe: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

### **Autoren:**

Lara Gibowsky<sup>2</sup>, Julia Husung<sup>1</sup>, Gesine Liese<sup>1</sup>, Dr. Baldur Schroeter<sup>2</sup>, Anna Katharina Zörner<sup>1</sup>  
Hamburg 2023

### **KinderForscher an der TUHH**

Am Irrgarten 3–9, Gebäude Q, 21073 Hamburg  
Tel. (040) 428784082  
[gesine.liese@kinderforscher.de](mailto:gesine.liese@kinderforscher.de)  
[julia.husung@kinderforscher.de](mailto:julia.husung@kinderforscher.de)  
[www.kinderforscher.de](http://www.kinderforscher.de)

### **Eine Arbeitsgruppe von**

#### **Prof. Dr. Andreas Liese**

#### **<sup>1</sup>Institut für Technische Biokatalyse**

Denickestr. 15, Gebäude K, 21073 Hamburg  
Tel. (040) 428783218  
[liese@tuhh.de](mailto:liese@tuhh.de)  
[www.technical-biocatalysis.com](http://www.technical-biocatalysis.com)

### **Kooperationspartner**

#### **Prof. Dr.-Ing. Irina Smirnova**

#### **<sup>2</sup>Institut für Thermische Verfahrenstechnik**

Eißendorferstr. 38, Gebäude O, 21073 Hamburg  
Tel.: (040) 428783040

## Grundwissen 1: Aerogele und Gele

### Was sind Aerogele?

Aerogele sind **die leichtesten Feststoffe der Welt**, da sie im Wesentlichen aus Luft bestehen (bis zu 99,98%!!!). Du kannst sie dir ein bisschen vorstellen wie Schaum, der festgeworden ist, aber mit noch viel mehr Luft und so feinen Poren, dass manche Aerogele fast durchsichtig sind. Sie werden daher auch als „gefrorener Rauch“ bezeichnet (siehe Bild 1). Der Luftanteil in Aerogelen ist so hoch, dass es nicht nur einzelne Löcher gibt wie im Schweizer Käse, sondern **die Poren bilden ein Höhlensystem** (Bild 2). Durch die viele eingeschlossene Luft sind Aerogele **extrem wärme- und schallisierend!** Legt man Wachsmalstifte, Schokolade oder Eiswürfel auf eine Aerogel-Platte über einer Flamme, so schmelzen sie nicht (Bild 3). Wenn man mal so ein Aerogel sehen und spüren durfte, ist man schon fasziniert!

Aber bisher hatten nur wenige Personen die Gelegenheit, Aerogele zu sehen oder zu spüren, denn es sind High-Tech-Materialien, die in einem aufwändigen Prozess hergestellt werden. Dazu ist erst einmal viel Forschung nötig und die Materialien sind teuer. Es braucht gute Ideen, wie man die Materialien günstiger herstellen und marktfähige Produkte daraus entwickeln kann. Auf diesen spannenden Prozess möchten wir dich mitnehmen!

### Wie wurden Aerogele erfunden?

Alles begann mit einer Wette des Chemikers Samuel Kistler im Jahr 1931. Ihn faszinierte die schwabbelige Konsistenz von Gelen wie z.B. Wackelpudding, und er wettete mit einem Kollegen, dass er die Flüssigkeit daraus entfernen kann, ohne dass dieser seine Form verliert, was ihm auch gelang. Wie, das geht, werdet ihr noch erfahren. Nun klären wir erst einmal, was Gele (genauer gesagt Hydrogele) sind, denn die benötigt man als Ausgangsmaterialien für Aerogele.

### Was sind Gele bzw. Hydrogele?

Gele sind Stoffe, die in der Medizin und Kosmetik, bei Lebensmitteln, aber auch in der Natur häufig vorkommen, siehe Bild 4. Ihr kennt z.B. Haargel, Himbeergelee, Wackelpudding, vielleicht auch einen Gel-Sattel am Fahrrad oder weiche Kontaktlinsen. Gel-Beispiele aus der Natur sind Schleim, Fette, Quallen und der Glaskörper im Auge.

In sehr starker Vergrößerung (ein Lichtmikroskop reicht da nicht aus) erkennt man, dass es sich um Feststoffe mit Poren handelt, die meist mit Flüssigkeit gefüllt sind, ähnlich wie bei einem Schwamm. Die Flüssigkeit sitzt dabei so fest in den Poren, dass sie nicht einfach herausläuft, und die Poren sind miteinander verbunden, sodass sich Feststoff und Flüssigkeit gegenseitig durchdringen. Da sich Feststoff und Flüssigkeit nicht ineinander lösen, bezeichnet man ein Gel auch als heterogenes Gemisch.



Bild 1: Aerogel (Quelle: Courtesy NASA/JPL-Caltech – NASA Stardust Website, Lizenz: CC0 1.0)

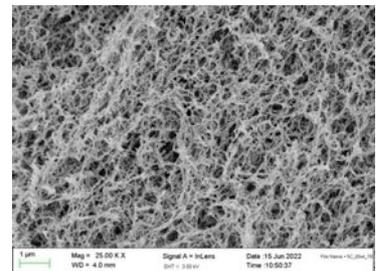


Bild 2: So kann die netzartige Struktur eines Aerogels in starker Vergrößerung aussehen. (Quelle: Institut für Thermische Verfahrenstechnik)



Bild 3: Die Aerogel-Platte isoliert so stark, dass die Wachsmalstifte über der Flamme nicht schmelzen. (Quelle: Courtesy NASA/JPL-Caltech – NASA Stardust Website, Lizenz: CC0 1.0)



Bild 4: Beispiele für Gele

Oft verbindet man mit dem Begriff „Gel“ eine schwabbelige Konsistenz und ein durchsichtiges Aussehen wie beim Wackelpudding oder der Qualle.

In einer **recht weiten**, aber für die hier beschriebenen Aerogele passenden **Definition** kann man auch Früchte und Gemüse, ja alle Pflanzen, als natürliche Gele betrachten, denn auch sie bestehen hauptsächlich aus **netzwerkartigen Feststoffen, in denen Flüssigkeiten gebunden sind**. Sie sind nur komplexer aufgebaut, denn sie enthalten Zellen, die man schon unter dem Lichtmikroskop sehen kann, während die Struktur von Gelen im engeren Sinne - wie bereits erwähnt – nicht im Lichtmikroskop sichtbar ist, sonst könnten sie nicht durchsichtig sein. Diese Gele im engeren Sinne bestehen aus vernetzten Makromolekülen, z.B. aus Kohlenstoff-, Silicium- oder Metall-basierten Polymeren, Stärke, Eiweiß oder Fetten.

In der Fachsprache wird ein Gel als **Hydrogel** (von altgriechisch hydōr „Wasser“) bezeichnet, wenn die in den Poren enthaltene Flüssigkeit Wasser ist, siehe Bild 5. In einem **Alkogel** befindet sich in den Poren Alkohol. Sind die Poren hingegen mit Luft gefüllt, heißt es „**Aerogel**“, denn Aero leitet sich aus dem altgriechischen Wort aéros ab und bedeutet „Luft“. Das Wort **Aerogel** bedeutet also direkt übersetzt nichts anderes als „Luftgel“.



Bild 5: Hydrogele in Perlenform  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SilicaGel.jpg>

Durch diese Erklärungen kannst du schon ahnen, dass **Aerogele** durch eine besondere Trocknung von **Hydrogelen** entstehen, denn bei den meisten Trocknungsverfahren schrumpfen die Gele oder gehen völlig kaputt. Diese getrockneten geschrumpften Gele nennt man **Xerogele**.

Noch eine Bemerkung: Bei Aerogelen handelt es sich nicht um eine Stoffklasse wie bei Metallen oder Kunststoffen. Aerogele kann man aus vielen verschiedenen Materialien herstellen, aus Verdickungsmitteln, die in der Küche eingesetzt werden wie Stärke und Gelatine, aber auch aus Silicium-Verbindungen (diese sind am verbreitetsten), aus Kunststoffen und Metallen. Im Institut für Thermische Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Hamburg (TUHH) werden insbesondere Aerogele aus nachwachsenden Rohstoffen, sogenannten **Biopolymeren**, hergestellt.

In den folgenden Dokumenten kannst du noch mehr über Aerogele erfahren. Sie gliedern sich in **Grundwissen** und **Exkurse** und können unabhängig voneinander gelesen werden. In „Grundwissen 2“ geht es um die Herstellung von Aerogelen und in „Grundwissen 3“ um die Struktur, Eigenschaften und Anwendungen von Aerogelen.

Die Exkurse sind Zusatzmaterialien, die noch tiefer ins Thema führen. Exkurs 1 erklärt, warum Gele bei einem normalen Trocknungsprozess schrumpfen. Die Exkurse 2-5 erklären Einzelheiten, die beim Herstellungsprozess erwähnt werden. Exkurs 6 erklärt, warum die Porenstruktur für ein Aerogel so wichtig ist, und Exkurs 7 stellt schließlich verschiedene Studiengänge und Tätigkeiten vor, in denen man sich mit Aerogelen beschäftigen kann.

- Grundwissen 1: Aerogele und Gele
  - Exkurs 1: Können wir Aerogele durch Lufttrocknung herstellen?
- Grundwissen 2: Herstellung von Aerogelen
  - Exkurs 2: Rohstoffe für Aerogele - Beispiel Biopolymere
  - Exkurs 3: Die Hydrogelbildung – Beispiel Gelierung von Alginat (Eierschachtelmechanismus)
  - Exkurs 4: Lösungsmittelaustausch
  - Exkurs 5: Die überkritische Trocknung am Phasendiagramm erklärt
- Grundwissen 3: Struktur, Eigenschaften und Anwendungen von Aerogelen
  - Exkurs 6: Wissenswertes über Poren
  - Exkurs 7: Studienorientierung im Bereich Aerogele

## Versuch 1: Hydrogele herstellen

In der Küche gibt es verschiedene Geliermittel, aus denen **Hydrogele** hergestellt werden können, zum Beispiel Geliermittel tierischen Ursprungs wie Gelatine und Götterspeise sowie Geliermittel pflanzlichen Ursprungs wie Stärke, Agar Agar und Natriumalginat. Am einfachsten lassen sich Hydrogele mit Götterspeise und heißem Wasser herstellen, weil schon heißes Wasser aus dem Wasserkocher reicht, um die Gelierung herbeizuführen. Wenn du auch eine Kochplatte zur Verfügung hast, kannst du Stärke- und Agar Agar-Gele herstellen. Für Natriumalginat-Gele brauchst du Natriumalginat und Calciumchlorid, die man im Versandhandel bestellen kann. Diese Herstellung benötigt keine Hitze, dafür aber ein elektrisches Rührgerät oder eine Küchenmaschine.

### Diese Zutaten und Geräte benötigst du:

- **Zutaten für ein Götterspeise-Gel:**

- 1 Päckchen Götterspeise
- 1 EL Zucker (nur falls du später probieren möchtest, für die **Aerogel**-Herstellung besser weglassen)
- 1 Esslöffel zum Abmessen
- 1 Löffel o.a. zum Umrühren
- 125 ml Wasser
- Wasserkocher
- Messbecher (um 50 ml und 75 ml Wasser abzumessen)
- 1 Schüssel für die Götterspeise

- **Zutaten für ein Stärke-Gel:**

- 25 g Stärke (Mais- oder Kartoffelstärke - oder beide, um sie zu vergleichen)
- Kochplatte/Herd mit kleinem Topf und Schneebesen
- Messbecher (für 100 ml Wasser) oder Waage
- 1 Eiswürfelform zum Erkalten lassen oder eine Schüssel und ein Messer

- **Zutaten für ein Agar-Agar-Gel:**

- 1 Päckchen Agar Agar
- 1 EL Zucker (nur falls du später probieren möchtest, für die **Aerogel**-Herstellung besser weglassen)
- Kochplatte/Herd mit kleinem Topf und Schneebesen
- 1 Eiswürfelform zum Erkalten lassen oder eine Schüssel und ein Messer

- **Zutaten für ein Alginat-Gel:**

- 15 g Natriumalginat und 1/2 Liter Wasser
- 25 g Calciumchlorid und 1,5 Liter Wasser
- Ein elektrisches Rührgerät oder eine Küchenmaschine
- 2 große Gefäße für mindestens 0,5 bzw. 1,5 Liter Flüssigkeit
- 1 Einwegspritze (ohne Kanüle) oder eine Tortenguss-Spritze

Wenn die Gele, die mit Hitze gelieren, schnell fest werden sollen, kann man sie nach dem Erhitzen auf Raumtemperatur abkühlen lassen und dann in den Kühlschrank stellen.

### Götterspeise-Gel zubereiten:

Gib 1 Päckchen Gelatine (und wenn du es essen möchtest 1 EL Zucker) in eine Schüssel und rühre diese mit 50 ml heißem Wasser an, bis alles gelöst ist. Gib dann 75 ml kaltes Wasser hinzu. Fülle die Flüssigkeit in eine Eiwürfelform und lasse sie abkühlen und fest werden (im Kühlschrank geht es schneller). Du kannst sie auch in der Schüssel fest werden lassen und dann in gleichmäßige Würfel schneiden.

### Stärke-Gel zubereiten:

25 g Kartoffel- oder Maisstärke mit 1 EL kaltem Wasser anrühren, 100 ml Wasser in einem Topf auf dem Herd aufkochen, dann die Kochstufe zurück- oder ausschalten. Die angerührte Stärkemischung in das heiße Wasser geben und unter dauerndem Rühren eine halbe Minute kochen lassen. Anschließend in Würfelform füllen und abkühlen lassen (bei Raumtemperatur oder schneller im Kühlschrank).

### Agar Agar-Gel zubereiten:

250 ml Wasser in einen Topf geben und 3 g bzw. circa 1,5 TL Agar-Agar sowie Zucker (2 EL?) in die noch kalte Flüssigkeit einrühren. Das Gemisch aufkochen und für circa zwei Minuten auf mittlerer Stufe köcheln lassen. Anschließend in die Eiwürfelform füllen und abkühlen lassen (bei Raumtemperatur oder schneller im Kühlschrank). Hinweis: Im Gegensatz zum klassischen Tortenguss wird Agar-Agar erst beim Erkalten fest.

### Alginat-Gel zubereiten:

Für das Experiment musst du zwei Lösungen ansetzen: eine Alginat- und eine Calciumchlorid-Lösung. Durch das Tropfen der Alginat-Lösung in die Calciumchlorid-Lösung bilden sich anschließend feste Gel-Perlen.

#### Sicherheitshinweise für den Umgang mit Calciumchlorid:



Verursacht schwere Augenreizung.

Bei Kontakt mit den Augen: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser ausspülen.

Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter ausspülen.

#### a) Herstellung Alginat-Lösung

Gib 15 g Alginat-Pulver zu einem halben Liter Wasser dazu. Alginat löst sich nicht so leicht auf, deswegen solltest du einen Mixer / eine Küchenmaschine oder ähnliches benutzen. Kräftiges Umrühren mit einem Schneebesen funktioniert bestimmt auch, wird aber sicher länger dauern und es können sich Klumpen bilden! Beim Auflösen des Alginats wird die Lösung allmählich zähflüssiger: Wenn sie klar und zähflüssig ist, bist du fertig. Manchmal bilden sich einige Alginat-Klumpen, die besonders schwer aufzulösen sind. Diese kannst du notfalls mit einem Esslöffel aus der Lösung herausfischen.

#### b) Herstellung Calciumchlorid-Lösung

Gib 25 g Calciumchlorid-Pulver zu 1,5 Litern Wasser dazu und rühre mit dem Schneebesen/Löffel eine kurze Zeit um, bis das Calciumchlorid komplett aufgelöst ist. Das geschieht normalerweise in wenigen Minuten, denn Calciumchlorid ist gut in Wasser löslich.

Nun kannst du die Alginat-Lösung gelieren: Die einfachste Möglichkeit ist es, die Alginat-Lösung allmählich in die Calciumchlorid-Lösung hineinzutropfen, z.B. mit einer Spritze aus der Apotheke oder einer Tortenguss-Spritze. Je nachdem wie du die Alginat-Lösung zutropfst, kannst du unterschiedliche Gelformen erzeugen. Versuche einmal, perfekt runde Partikel wie in dem Bild in Mission 2e herzustellen. Wenn du dir unsicher bist, kannst du dir das Video zur Alginat-Herstellung dort in der Mission anschauen (z.B. mit Hilfe des nebenstehenden QR-Codes)!



Video Gelierung

Hiermit hast du den ersten Schritt einer Alginat-Aerogel-Herstellung abgeschlossen und ein Alginat-Hydrogel erhalten. Im Anschluss kannst du die Partikel einfach aus der Lösung fischen oder absieben.

## Versuch 2: Hydrogele trocknen

### Versuchsdurchführung:

Nimm die Gele aus Versuch 1 und probiere, sie zu trocknen, ohne dass sie dabei schrumpfen. Das kann entweder an der Luft geschehen (dauert mehrere Tage) oder im Backofen. Vielleicht fallen dir auch noch andere Möglichkeiten ein. Wir haben Gele und Obst im Backofen 4 Stunden bei 70 °C Umluft bzw. 9 Stunden bei 50 °C Umluft auf einem Blech, das mit Backpapier ausgelegt war, getrocknet.

**Wichtig:** Überlege dir erst, wie du den Versuch auswerten willst (siehe Abschnitt „Auswertung“ unten). Du solltest deine Hydrogele vor dem Trocknen und hinterher messen und am besten auch fotografieren.

### Anmerkung:

Neben den „glibberigen“ Gelen kannst du auch Obst nehmen, das ja ebenfalls viel Feuchtigkeit gebunden hat. Zum Beispiel so:

Schäle einen **Apfel** oder ein Stück **Gurke** und schneide ein ca. 2x2x2 cm großes würfelförmiges Stück heraus. Wenn du **Weintrauben** oder **Blaubeeren** verwenden möchtest, kannst du sie im Ganzen benutzen. **Bananen** solltest du schälen und in gleichmäßige ca. 2 cm dicke Scheiben schneiden.

### Auswertung:

1. Beschreibe: Wie verhalten sich deine Gele beim Trocknen?
2. Miss, wie sich Länge, Breite, Höhe und Gewicht mit der Zeit verändern. Aus Länge, Breite und Höhe kannst du auch das Volumen ausrechnen und sehen, wie es sich verändert.
3. Stelle deine Ergebnisse in einem Protokoll dar. Du kannst dir dafür unser Muster-Protokoll herunterladen.
4. Schau dir die Ergebnisse an. Ist es dir gelungen, das Schrumpfen zu vermeiden?





## Exkurs 1:

# Können wir Aerogele durch Lufttrocknung herstellen?

Wenn man Gele an der Luft trocknet, verdunstet die Flüssigkeit darin, und das Gel schrumpft (siehe Bild 1). Dieses Phänomen kennen wir auch von Obst. Der Grund dafür ist, dass beim Verdunsten Kapillarkräfte die Gele so stark zusammenziehen, dass die Struktur kaputtgeht. Daher lassen sich Aerogele nicht durch Lufttrocknung, aber auch nicht durch Trocknung im Backofen herstellen, denn da passiert dasselbe.



Bild 1: Hydrogel vor und nach einer "normalen" Trocknung

## Was sind denn Kapillarkräfte?

Kapillaren sind feine, lange Hohlräume, also enge Röhren oder Spalten. Wenn Flüssigkeiten eine Kapillare berühren, sind die Anziehungskräfte zwischen der Flüssigkeit und der Kapillarwand oft größer als die Anziehungskräfte innerhalb der Flüssigkeit, nämlich wenn die Flüssigkeit das Material benetzt. Es wirken dann Kapillarkräfte an der Grenze zwischen Flüssigkeit, Wand und Luft, die die Flüssigkeit in der Kapillare gegen die Schwerkraft nach oben steigen lassen. Bei breiten Gefäßen spielen diese Kräfte am Rand keine große Rolle, aber bei engen Kapillaren schon. Kapillarkräfte bewirken zum Beispiel, dass flüssiges Wachs im Docht zur Flamme aufsteigt und dass sich poröse Materialien wie Ziegel, Textilien und Papier mit Wasser vollsaugen. Ebenso zieht sich bei einer Blutabnahme aus dem Finger das Blut in einer dünnen Glaskapillare hoch.

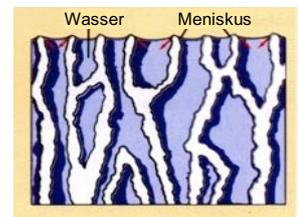


Bild 2: Poren in einem Hydrogel

Auch beim Verdunsten von Flüssigkeiten in engen Hohlräumen treten Kapillarkräfte auf, nämlich wenn das Wasser am Ausgang der Pore schon verdunstet ist, aber die Pore die Flüssigkeit aufgrund der Kapillarkräfte „festhält“. Es bildet sich ein sogenannter „Meniskus“, eine gewölbte Oberfläche aus, siehe Bild 3.

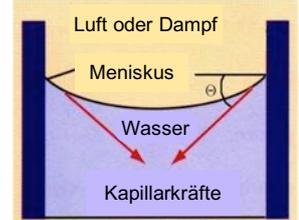


Bild 3: Kapillarkräfte in einer Pore

Dabei gilt: Je enger eine Röhre oder Pore ist, umso stärker ist die Wölbung und umso größer ist die Kapillarkraft! Da die **Poren** in Gelen **extrem** klein sind, treten beim Verdampfen von Flüssigkeiten in diesen Poren **sehr starke** Kapillarkräfte auf. Da diese aber in das **Innere** der Poren wirken, ziehen sie die Wände der Pore zusammen und die Pore wird zerstört, da die Wände einstürzen (siehe Bild 4).

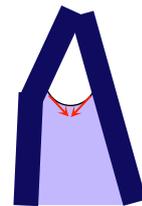


Bild 4: Durch die Kapillarkräfte wird die Kapillare zusammengezogen und geht kaputt.



Bild 5: Weintrauben und Rosinen: ein Beispiel dafür, dass Obst beim Trocknen schrumpft.

Diesen Effekt können wir beobachten, wenn wir ein Hydrogel an der Luft langsam (oder schneller im Backofen) trocknen, aber auch wenn Obst und Gemüse trocknet. Dann schrumpelt und schrumpft es, da die Poren darin durch die Kapillarkräfte zerstört werden.

Klingt kompliziert? Auf der Rückseite steht eine einfache Kurzzusammenfassung 😊

### Bildquellen:

<sup>1</sup>Pakowski, Z. Drying of Nanoporous and Nanostructured Materials. In Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS2004), Sao Paulo, Brazil, Vol. A; 2004; pp 69–88.

<sup>2</sup>Smirnova, I. Synthesis of Silica Aerogels and Their Application as a Drug Delivery System. PhD thesis, Berlin, 2002.

**Zusammenfassende Antwort zur Frage:****Können wir Aerogele durch Lufttrocknung herstellen?**

- Aerogele lassen sich nicht durch Lufttrocknung herstellen, denn wenn das Wasser in den Poren verdunstet, kommt es an der Grenze zwischen Gas- und Flüssigphase zu starken Kräften, die in das Innere der Pore wirken und sie zusammenziehen → „**Kapillarkräfte**“
- Die Kapillarkräfte sind höher, je kleiner die Pore ist.
- Bei der Aerogel-Herstellung muss das Auftreten von Kapillarkräften daher unbedingt verhindert werden! Dazu wird die „**überkritische Trocknung**“ eingesetzt, die im Exkurs 5 erläutert wird.
- Bei der **überkritischen Trocknung** werden die Kapillarkräfte umgangen, da das gleichzeitige Auftreten von Flüssig- und Gasphase vermieden wird. Im überkritischen Zustand verschmelzen nämlich Gas- und Flüssigphase zu einer einzigen überkritischen Phase. Dadurch gibt es bei der überkritischen Trocknung nur einen Wechsel ohne Phasenübergang zwischen Flüssigphase und überkritischem Zustand und später zwischen überkritischem Zustand und Gasphase.

## Exkurs 1:

# Können wir Aerogele durch Lufttrocknung herstellen?

Wenn man Gele an der Luft trocknet, verdunstet die Flüssigkeit darin, und das Gel schrumpft (siehe Bild 1). Dieses Phänomen kennen wir auch von Obst. Der Grund dafür ist, dass beim Verdunsten Kapillarkräfte die Gele so stark zusammenziehen, dass die Struktur kaputtgeht. Daher lassen sich Aerogele nicht durch Lufttrocknung, aber auch nicht durch Trocknung im Backofen herstellen, denn da passiert dasselbe.



Bild 1: Hydrogel vor und nach einer "normalen" Trocknung

## Was sind denn Kapillarkräfte?

Kapillaren sind feine, lange Hohlräume, also enge Röhren oder Spalten. Wenn Flüssigkeiten eine Kapillare berühren, sind die Anziehungskräfte zwischen der Flüssigkeit und der Kapillarwand oft größer als die Anziehungskräfte innerhalb der Flüssigkeit, nämlich wenn die Flüssigkeit das Material benetzt. Es wirken dann Kapillarkräfte an der Grenze zwischen Flüssigkeit, Wand und Luft, die die Flüssigkeit in der Kapillare gegen die Schwerkraft nach oben steigen lassen. Bei breiten Gefäßen spielen diese Kräfte am Rand keine große Rolle, aber bei engen Kapillaren schon. Kapillarkräfte bewirken zum Beispiel, dass flüssiges Wachs im Docht zur Flamme aufsteigt und dass sich poröse Materialien wie Ziegel, Textilien und Papier mit Wasser vollsaugen. Ebenso zieht sich bei einer Blutabnahme aus dem Finger das Blut in einer dünnen Glaskapillare hoch.

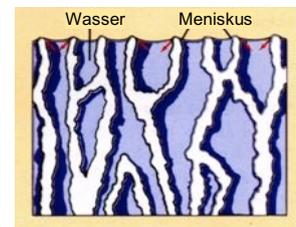


Bild 2: Poren in einem Hydrogel

Auch beim Verdunsten von Flüssigkeiten in engen Hohlräumen treten Kapillarkräfte auf, nämlich wenn das Wasser am Ausgang der Pore schon verdunstet ist, aber die Pore die Flüssigkeit aufgrund der Kapillarkräfte „festhält“. Es bildet sich ein sogenannter „Meniskus“, eine gewölbte Oberfläche aus, siehe Bild 3.

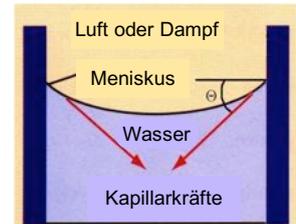


Bild 3: Kapillarkräfte in einer Pore

Dabei gilt: Je enger eine Röhre oder Pore ist, umso stärker ist die Wölbung und umso größer ist die Kapillarkraft! Da die **Poren** in Gelen **extrem** klein sind, treten beim Verdampfen von Flüssigkeiten in diesen Poren **sehr starke** Kapillarkräfte auf. Da diese aber in das **Innere** der Poren wirken, ziehen sie die Wände der Pore zusammen und die Pore wird zerstört, da die Wände einstürzen (siehe Bild 4).

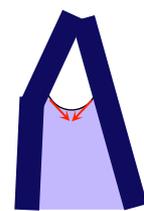


Bild 4: Durch die Kapillarkräfte wird die Kapillare zusammengezogen und geht kaputt.

Diesen Effekt können wir beobachten, wenn wir ein Hydrogel an der Luft langsam (oder schneller im Backofen) trocknen, aber auch wenn Obst und Gemüse trocknet. Dann schrumpelt und schrumpft es, da die Poren darin durch die Kapillarkräfte zerstört werden.



Bild 5: Weintrauben und Rosinen: ein Beispiel dafür, dass Obst beim Trocknen schrumpft.

Klingt kompliziert? Auf der Rückseite steht eine einfache Kurzzusammenfassung 😊

**Zusammenfassende Antwort zur Frage:****Können wir Aerogele durch Lufttrocknung herstellen?**

- Aerogele lassen sich nicht durch Lufttrocknung herstellen, denn wenn das Wasser in den Poren verdunstet, kommt es an der Grenze zwischen Gas- und Flüssigphase zu starken Kräften, die in das Innere der Pore wirken und sie zusammenziehen → „**Kapillarkräfte**“
- Die Kapillarkräfte sind höher, je kleiner die Pore ist.
- Bei der Aerogel-Herstellung muss das Auftreten von Kapillarkräften daher unbedingt verhindert werden! Dazu wird die „**überkritische Trocknung**“ eingesetzt, die im Exkurs 5 erläutert wird.
- Bei der **überkritischen Trocknung** werden die Kapillarkräfte umgangen, da das gleichzeitige Auftreten von Flüssig- und Gasphase vermieden wird. Im überkritischen Zustand verschmelzen nämlich Gas- und Flüssigphase zu einer einzigen überkritischen Phase. Dadurch gibt es bei der überkritischen Trocknung nur einen Wechsel ohne Phasenübergang zwischen Flüssigphase und überkritischem Zustand und später zwischen überkritischem Zustand und Gasphase.

## Grundwissen 2: Herstellung von Aerogelen

### Rohstoffe für Aerogele

Aerogele können aus vielen festen Materialien (sogar Metallen!) hergestellt werden. Im Institut für Thermische Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Hamburg (TUHH) werden insbesondere Aerogele aus nachwachsenden Rohstoffen, sogenannten **Biopolymeren**, hergestellt.

### Wie wird ein Aerogel hergestellt?

Zur Aerogelherstellung sind mehrere Verfahrensschritte nötig, die vom **Hydrogel** über das **Alkogel** zum Endprodukt **Aerogel** führen:

- 1) **Gelierung:** Eine Flüssigkeit, in der ein Feststoff gelöst ist, geliert. Das Produkt ist ein **Hydrogel**
- 2) **Lösungsmittelaustausch:** Wasser in den Poren wird durch Alkohol ersetzt. Das Produkt ist ein **Alkogel**
- 3) **Überkritische Trocknung:** Alkohol in den Poren wird durch Luft ersetzt. Das Produkt ist ein **Aerogel**

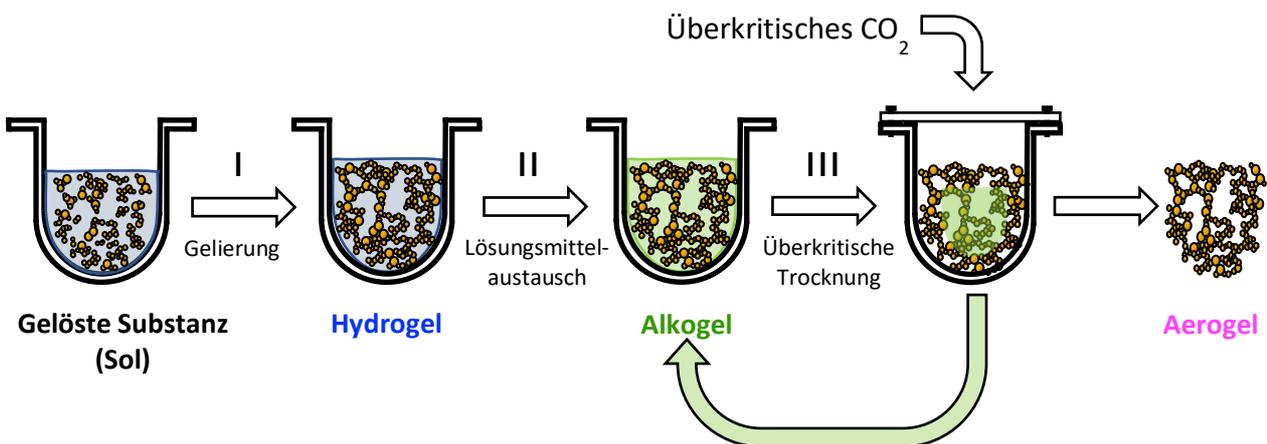


Bild 1: Aerogel-Herstellung, Quelle: TUHH, Institut für Thermische Verfahrenstechnik

Da jeder Zwischenschritt für die **Aerogel**-Herstellung wichtig ist, beschreiben wir euch im Folgenden jeden einzeln und im Detail.

#### I. Gelierung

Im ersten Schritt wird ein **Hydrogel** hergestellt (siehe Abbildung oben). Bei der Gelierung vernetzen sich kleinere Bausteine zu längeren Ketten, wie man auch in Bild 2 sieht. Die Hohlräume zwischen diesen Ketten sind die gebildeten Poren, die mit Wasser gefüllt sind. Je mehr vernetzte Ketten sich in der Flüssigkeit bilden, umso dickflüssiger wird sie, bis man schließlich ein festes Gel erhält. Dies kann man z.B. beobachten, wenn man Wackelpuddingpulver mit Wasser erhitzt und wieder abkühlt. Das gleiche passiert beim Kochen von Marmelade oder Gelee. Ähnlich verhält sich die Gelierung im Herstellungsprozess von **Aerogelen**. Diese Gelierung wird entweder durch Erhitzen, durch Änderung des pH-Werts oder durch Zugabe von Metall-Ionen (z.B. Calcium-Ionen) hervorgerufen. Den Wackelpudding kann man in einer großen Schüssel oder kleinen

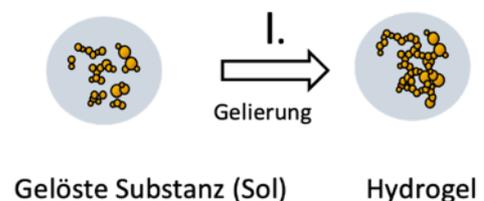


Bild 2: Gelierung

Quelle: TUHH, Institut für Thermische Verfahrenstechnik

Förmchen festwerden lassen, und auch die **Hydrogele** kann man in unterschiedliche Formen bringen. Für gleichbleibende Eigenschaften und kurze Trocknungszeiten hat es sich jedoch bewährt, möglichst nur kleine



Bild 3: **Hydrogele** in Perlenform

Quelle: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SilicaGel.jpg>

Lizenz: [CC BY-SA 2.5](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/)

Partikel, wie in Bild 3 dargestellt, herzustellen. Diese entstehen zum Beispiel, indem man das Sol (die gelöste Substanz) in eine Lösung, die ein Vernetzungsmittel enthält, hineintropft. Dies wird auch im Video in der Kniffelix-Aerogel-Mission 2e dargestellt, das du mit diesem QR-Code aufrufen kannst. Dieser erste Schritt ist eine chemische Reaktion, daher ist er insbesondere für Chemiker interessant. Die folgenden Schritte fallen eher in die Zuständigkeit von Chemie- und Verfahreningenieuren.



Video Gelierung

## II. Lösungsmittelaustausch

Der zweite Schritt ist ein Vorbereitungsschritt für die nachfolgende Trocknung: das **Hydrogel** wird in ein **Alkogel** umgewandelt, indem das Wasser in den Poren durch Alkohol (chemische Bezeichnung: Ethanol) ersetzt wird. Dazu werden die Gele in Ethanol eingelegt. Das Wasser wandert (diffundiert) nun allmählich aus den Poren des Gels heraus, während das Ethanol in die Poren eindringt. Dabei mischen sich Ethanol und Wasser. Daher muss diese Flüssigkeit mehrfach abgegossen und durch frisches Ethanol ersetzt werden, bis das Gel einen Ethanolgehalt von 97 % oder höher hat. Dies ist wichtig für die anschließende **Trocknung**. Meistens werden die **Hydrogele** auf ihrem Weg zum **Alkogel** fester und weniger schwabbelig, manchmal schrumpfen sie auch ein wenig.

### Aber wozu braucht man den Lösungsmittelaustausch?



Lösungsmittel  
-austausch

Ganz einfach gesagt: Weil Alkohol eine niedrigere Siedetemperatur als Wasser hat und daher im Folgeschritt leichter und unter sanfteren Bedingungen aus den Poren zu bekommen ist, als Wasser. – Wobei es ganz so einfach dann doch nicht ist. Hierzu müssen wir ein wenig mehr über Aggregatzustände, Phasendiagramme und Mischbarkeit von Stoffen erklären. Diese Erklärungen findet ihr in den Exkursen

„Lösungsmittelaustausch“ und „überkritische Trocknung“, zu denen ihr über die QR-Codes kommt.



Überkritische  
Trocknung

## III. Überkritische Trocknung



Bild 4: **Hydrogel** (links) und geschrumpftes **Hydrogel** nach Trocknung an der Luft (rechts)

Quelle: Pakowski, Z. *Drying of Nanoporous and Nanostructured Materials*. In *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS2004), Sao Paulo, Brazil, Vol. A; 2004; pp 69–88.*

Um aus dem **Alkogel** ein **Aerogel** zu machen, muss die enthaltene Flüssigkeit entfernt werden, das heißt, das Gel muss getrocknet werden. Es muss jedoch ein besonderer Trocknungsprozess sein, denn würde man das **Alkogel** oder **Hydrogel** an der Luft stehenlassen oder im Backofen trocknen, würde die Flüssigkeit darin verdunsten bzw. verdampfen, und das Gel würde **schrumpfen**, siehe Bild 4. Dies liegt an den Kapillarkräften, die beim Rückzug der Flüssigkeit aus den Poren an der Grenze zwischen Flüssigkeit, Porenwand und Gasphase wirken. Mit diesen Kräften klammert sich die Flüssigkeit an den Poren fest, siehe Exkurs „Kapillarkräfte“ mit nebenstehendem QR-Code. **Um die Schrumpfung durch die Kapillarkräfte zu vermeiden, darf das Gel also nicht „merken“, dass die Flüssigkeit durch Gas ersetzt wird.**



Kapillarkräfte

Daher darf bei der Trocknung kein Zustand auftreten, bei dem eine Gas- und eine Flüssigphase gleichzeitig vorhanden sind. Dies wird vermieden, indem die Trocknung mit überkritischem Kohlendioxid bei 31°C und

74 bar in einem Hochdruck-Behälter (einem sogenannten Autoklaven) stattfindet. Kohlendioxid kennt ihr gasförmig als Bestandteil der Luft. Doch mit Druck kann man es verflüssigen und als Lösungsmittel einsetzen. Wenn man es außerdem über 31°C erwärmt, kommt es in den überkritischen Zustand, wo es keinen Unterschied zwischen Gas- und Flüssigphase gibt. Über diesen Weg erfolgt die überkritische Trocknung, wie durch den roten Pfeil in Bild 5 dargestellt wird.

Dazu wird das **Alkogel** in den Autoklaven gegeben. Dann wird der Behälter unter Druck gesetzt und erhitzt, bis der überkritische Zustand von Kohlendioxid erreicht ist und der Inhalt stundenlang mit überkritischem Kohlendioxid gespült, bis dieses das Ethanol praktisch vollständig herausgespült hat. Anschließend wird der Druck abgesenkt, sodass aus überkritischem Kohlendioxid wieder gasförmiges Kohlendioxid wird. Dadurch erhält man ein **Aerogel**, dessen Poren an Stelle von Lösungsmitteln zunächst gasförmiges Kohlendioxid enthalten, das nach Entnahme aus dem Autoklaven nach und nach durch Luft ersetzt wird.

Da beim überkritischen Trocknen die Poren und die Form des Gels erhalten bleiben, schrumpft das Gel nicht, das Volumen bleibt also gleich, siehe Bild 6. Gleichzeitig verringert sich jedoch das Gewicht, da Luft viel leichter ist als die Flüssigkeit, die vorher in den Poren war. Daher sind getrocknete **Aerogele** extrem leicht und weisen eine sehr geringe **Dichte** auf.

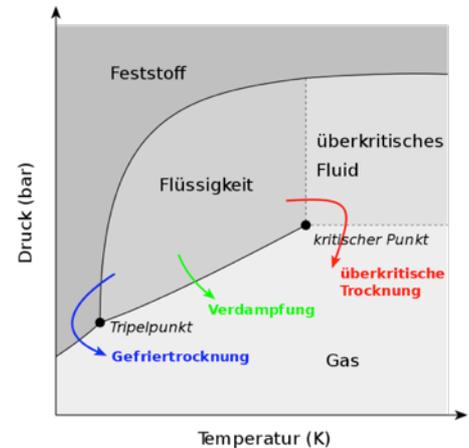
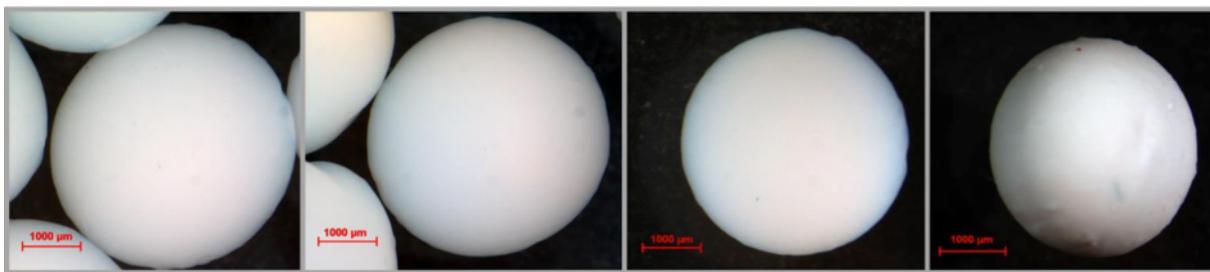


Bild 5: überkritische Trocknung im Phasendiagramm  
 Quelle: [Saperaud, Wikipedia](#)  
 Lizenz: [CC BY-SA 4.0](#)



Frische Kugeln in Natronlauge

Hydrogel

Alkogel

Aerogel

Bild 6: Partikel auf dem Weg zum **Aerogel**, nach den jeweiligen Herstellungsschritten. Das Volumen ändert sich kaum.  
 Quelle: TUHH, Institut für Thermische Verfahrenstechnik

## Exkurs 2:

# Rohstoffe für Aerogele - Beispiel Biopolymere

Aerogele lassen sich aus gelierenden Stoffen wie Pudding, Götterspeise und vielen pflanzlichen und tierischen Rohstoffen herstellen, sogenannten Biopolymeren (Erklärung: siehe Rückseite). In der Tabelle werden einige dieser Rohstoffe vorgestellt.

Name	Bild	Herkunft und Verwendung
Cellulose	 <p><i>Bild 1: Baumwolle - Sie besteht aus fast reiner Cellulose.</i></p>	<b>Cellulose</b> ist der Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände und damit das am häufigsten vorkommende Biomolekül. Cellulose dient als Grundstoff in der Papierindustrie.
Alginat und Agar Agar	 <p><i>Bild 2: Braunalge - Hieraus wird Alginat gewonnen.</i></p>	Das Biopolymer <b>Alginat</b> – auch als Alginsäure bekannt – wird hauptsächlich aus Braunalgen gewonnen, die entweder bei Ebbe gesammelt oder von Tauchern mit Spezialbooten geerntet werden. Alginat wird unter anderem als veganes Geliermittel in der Küche verwendet. Verbreiteter ist <b>Agar Agar</b> , das ebenfalls aus Algen gewonnen wird, aber ein wenig anders geliert.
Stärke	 <p><i>Bild 3: Speisestärke</i></p>	<b>Stärke</b> ist ein natürliches Biopolymer, das in Form von Stärkekörnern als Energiespeicherstoff in die Zellen von Pflanzen eingelagert wird. In der Küche wird Mais-, Kartoffel- oder Weizenstärke verwendet zum Abbinden von Soßen, als Tortenguss, für Pudding und Backwaren, ansonsten z.B. auch als Kleber (Tapetenkleister).
Chitosan	 <p><i>Bild 4: Krabbe – Aus dem Panzer wird Chitosan gewonnen.</i></p>	<b>Chitosan</b> stammt aus dem Griechischen und bedeutet Hülle oder Panzer. Es wird aus Chitin gewonnen; Hauptquelle sind die Schalen von Garnelen und Krabben. Chitosan wird unter anderem als Filtermaterial zur Wassergewinnung oder in Kläranlagen verwendet.
Pektin	 <p><i>Bild 5: Pektin ist z.B. in Äpfeln enthalten</i></p>	<b>Pektine</b> kommen in den festeren Bestandteilen der meisten Pflanzen vor, also in Stängeln, Blüten, Blättern, Früchten usw. Pektin ist eine gute vegane Alternative zu Gelatine, da es rein pflanzlich ist. Es wird vor allem beim Marmeladekochen verwendet.

### Bildquellen:

Bild 1: von Philmarin, <https://de.wikipedia.org/wiki/Cellulose#/media/Datei:Alg-frut-6.jpg> Lizenz: [CC BY-SA 3.0](#)

Bild 2: von Stemonitis, [https://de.wikipedia.org/wiki/Braunalgen#/media/Datei:Fucus\\_serratus2.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Braunalgen#/media/Datei:Fucus_serratus2.jpg) Lizenz [CC BY-SA 2.5](#)

Bild 3: von Picasa Autor Kalaya, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9939132> Lizenz [CC BY-SA 3.0](#)

Bild 4 und 5: eigenes Werk

## Erklärung: Biopolymere

Um zu verstehen was **Biopolymere** sind, muss man erst einmal wissen, was **Polymere** sind. Polymere sind chemische Verbindungen, die aus Ketten- oder verzweigten Molekülen (sogenannten Makromolekülen) bestehen. Ein Chemiker denkt dabei wahrscheinlich zuerst an Kunststoffe, aber auch die Natur hat viele Polymere zu bieten. Biopolymere sind eine Teilgruppe der Polymere. Meist sind sie natürlichen Ursprungs, aber auch industriell hergestellte Polymere können als Biopolymere bezeichnet werden, wenn sie biologisch abbaubar sind, also wieder in den biologischen Kreislauf zurückkehren.

Biopolymere sind durch ihre Herstellung auf Basis nachwachsender Rohstoffe und/oder durch ihre biologische Abbaubarkeit nachhaltig und umweltschonend. Außerdem kommen einige von ihnen in großen Mengen als Reststoffe vor, die bei der Verarbeitung von Lebensmitteln, Hölzern, Tieren usw. anfallen, die sonst als Abfälle entsorgt werden müssen. Daher ist es sinnvoll, für diese Reststoffe Ideen zu entwickeln, wie sich aus diesen noch wertvolle Produkte gewinnen lassen. Dieser Gedanke der Kreislaufwirtschaft macht Biopolymere auch für die Aerogel-Herstellung besonders interessant!

## Exkurs 3: Die Hydrogelbildung – Beispiel Gelierung von Alginat (Eierschachtelmechanismus)

**Aerogele** lassen sich zum Beispiel aus Natriumalginat herstellen, einem pflanzlichen Geliermittel aus Braunalgen. Man benötigt dafür Natriumalginat und Calciumchlorid. Daraus kann man mit einfachen Haushaltsgeräten ein **Hydrogel** herstellen. Die Versuchsanleitung ist mit dem nebenstehenden QR-Code abrufbar. Die Gelierung des Alginats ist auch im Video auf [www.kniffelix.de](http://www.kniffelix.de) zu sehen (→ QR-Code rechts).

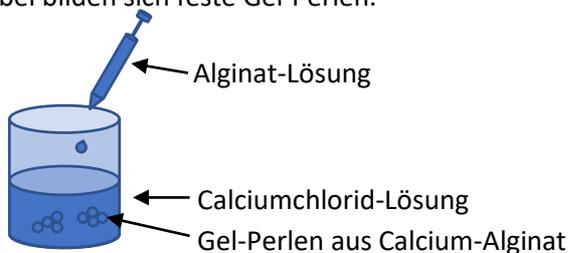


Versuchsanleitung



Video Gelierung

Zunächst werden das Alginat und das Calciumchlorid in getrennten Gefäßen in Wasser aufgelöst. Anschließend wird die Alginat-Lösung mit einer Spritze oder Pipette in die Calciumchlorid-Lösung getropft. Dabei bilden sich feste Gel-Perlen.



Was dabei passiert, wird mit dem Begriff „Eierschachtelmechanismus“ bezeichnet.



### Was ist der „Eierschachtelmechanismus“?

Vom „Eierschachtelmechanismus“ spricht man, wenn Alginatketten auf Calciumionen treffen. Die Alginatketten ordnen sich dabei so an, dass sie das Calcium einschließen wie ein Ei in einem Eierkarton – daher der Name „Eierschachtelmechanismus“.

Dieses Umschließen geschieht, da sich chemische Gruppen mit unterschiedlichen Ladungen gegenseitig anziehen und verknüpfen. Aus dem Alltag kennt ihr das wahrscheinlich von Magneten, wo sich die unterschiedlichen Pole Nordpol und Südpol anziehen. Genauso geht es den Calciumionen mit den Alginatketten, genauer gesagt mit den Sauerstoffatomen in den Alginatketten: Manche Sauerstoffatome tragen nämlich eine negative elektrische Ladung, während die Calciumionen positiv geladen sind. Deswegen ziehen sie sich an und verbinden sich.

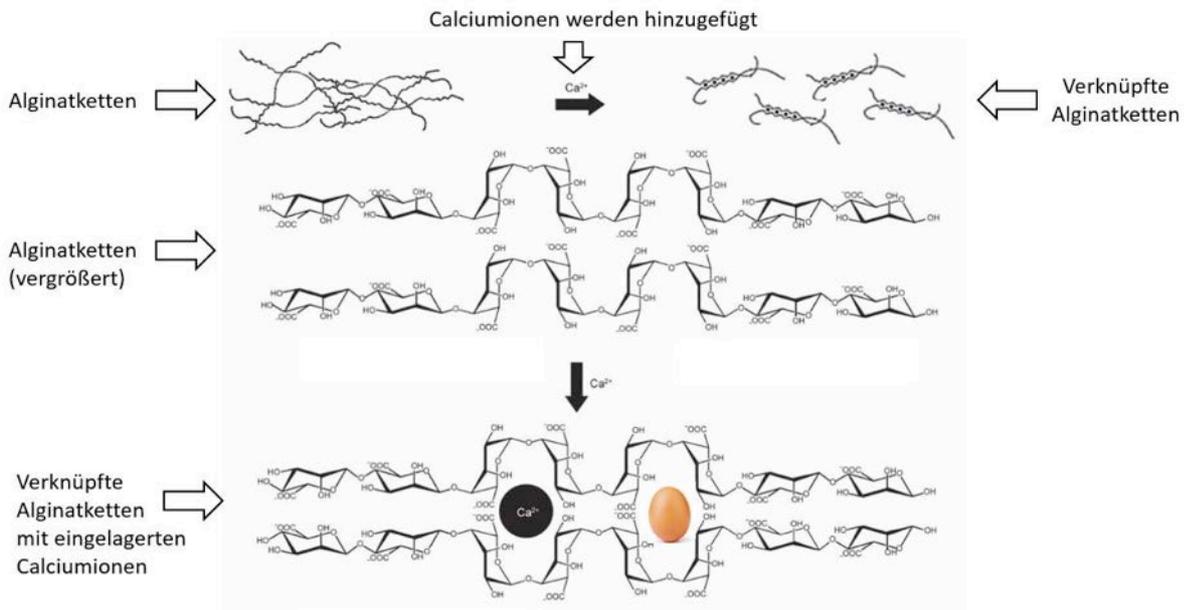
Wenn man das in chemischer Formelsprache aufschreibt, sieht es so aus:

$\text{Ca}^{2+}$  = zweifach positiv geladene Calciumionen

$\text{COO}^-$  = negativ geladene sauerstoffhaltige Gruppen and Alginatketten

Jedes Calciumion kann zwei Alginatketten miteinander verknüpfen, da es sich mit zwei einfach negativ geladenen  $\text{COO}^-$ -Gruppen verbindet.

In dem Schema seht ihr, wie es in chemischer Formelsprache aussieht, wenn sich Alginatketten und Calciumionen verknüpfen.



Bildquelle: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.26>

Bei der Gelbildung muss man sich vorstellen, dass diese Reaktion in jeder Alginatkette sehr häufig vorkommt. So entsteht ein verknüpftes Alginatkettennetzwerk mit Poren, das "Alginathydrogel".



Bild 1: Alginat-Hydrogele

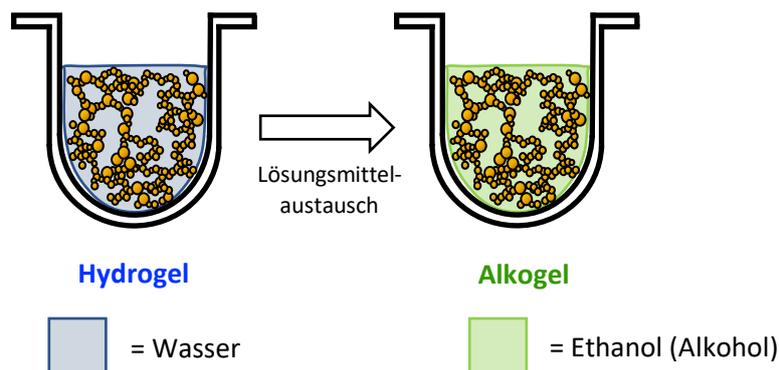
Quelle: TUHH, Institut für Thermische Verfahrenstechnik

Mit Alginat, orangem Farbstoff und Wachs kann man auch ein künstliches Ei herstellen. Schau dir dieses Spaß-Video an: <https://www.youtube.com/watch?v=e8KibU9Ykvc>

## Exkurs 4: Lösungsmittelaustausch

Was ist eigentlich ein Lösungsmittel? Als Lösungsmittel (umgangssprachlich auch: Lösemittel) werden chemische Verbindungen bezeichnet, welche andere Stoffe (auf)-lösen, ohne dass es zu einer chemischen Reaktion zwischen den beiden kommt. Meistens sind Lösungsmittel Flüssigkeiten, wie z.B. Wasser oder Alkohol. Zum Beispiel ist Wasser ein gutes Lösungsmittel für Kochsalz.

Bei einem **Lösungsmittelaustausch** wird logischerweise ein Lösungsmittel durch ein anderes ausgetauscht.



Bei der Herstellung von **Aerogelen** tauschen wir das Wasser in den Poren des **Hydrogels** durch den Alkohol Ethanol aus. Es entsteht ein **Alkogel**. Anschließend wird das Ethanol durch ein weiteres Lösungsmittel ersetzt, das sogenannte „überkritische Kohlendioxid“, denn nur mit diesem lässt sich die Struktur beim Trocknen erhalten.

### Aber warum wird der Lösungsmittelaustausch überhaupt benötigt und das Wasser in den Poren durch Ethanol ausgetauscht?

Das hat folgenden Grund: Die Flüssigkeit muss entfernt werden, ohne dass dabei ein Phasenwechsel zwischen Flüssigkeit und Gas stattfindet. Daher nutzt man den überkritischen Zustand, in dem Flüssig- und Gasphase eins sind, siehe Exkurs 5. Dieser in der Schule selten erwähnte Aggregatzustand tritt bei hohen Temperaturen und Drücken auf, deren Werte sich jedoch wie die Siedetemperatur von Stoff zu Stoff unterscheiden.

**Tabelle 1: Temperaturen und Drücke, die für den überkritischen Zustand überschritten werden müssen**

Stoff	Temperatur	Druck
Wasser	374,12 °C	220,9 bar
Ethanol	240,75 °C	61,5 bar
Kohlendioxid	30,98 °C	73,8 bar

In der Tabelle sind die Werte für Wasser, Ethanol und Kohlendioxid zusammengestellt. Es ist zu erkennen, dass bei Wasser extrem hohe Drücke und Temperaturen benötigt werden, um den überkritischen Zustand zu erreichen. Dies könnte einerseits die Struktur schädigen und hätte andererseits hohe Herstellkosten zur Folge. Mit Ethanol sind diese Bedingungen besser, noch besser jedoch bei Kohlendioxid, weshalb dieses bei der überkritischen Trocknung verwendet wird. Ein Wechsel direkt von Wasser zu Kohlendioxid wäre jedoch auch problematisch, da sich Wasser und Kohlendioxid nicht gut mischen. Ethanol ist da ein guter Zwischenschritt.

## Exkurs 5: Die überkritische Trocknung am Phasendiagramm erklärt

Wie du wahrscheinlich weißt, gibt es drei verschiedene Aggregatzustände: fest, flüssig und gasförmig. Zum Beispiel wird Wasser je nach Aggregatzustand als Eis, Wasser oder Wasserdampf bezeichnet. Was in der Schule häufig nicht erwähnt wird, ist dass es auch einen **überkritischen Zustand** gibt. Aber wie können wir uns den überhaupt vorstellen?

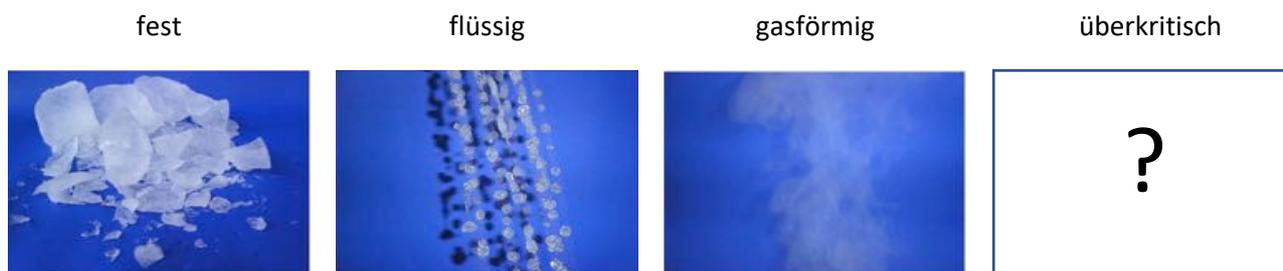


Bild 1: Aggregatzustände

Quelle: <https://de.serlo.org/chemie/25371/aggregatzustand>, Lizenz [CC-BY-SA4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Dazu wollen wir erst einmal ein bisschen ausholen: Welchen Aggregatzustand ein Stoff hat, hängt von der **Temperatur** und vom **Druck** ab, daher können Stoffe bei Temperatur- oder Druckänderung ihren Aggregatzustand wechseln. Einfache Beispiele sind das Gefrieren von Wasser im Gefrierfach oder das Verdampfen im Kochtopf: Hierbei wird jeweils die Temperatur verändert, um den Wechsel des Aggregatzustandes herbeizuführen. Doch auch der Druck hat einen Einfluss: vielleicht weißt du, dass die Tatsache, dass Wasser bei 100° C siedet, nur bei Normaldruck gilt. In einem Schnellkochtopf kann man den Druck erhöhen, damit das Wasser erst bei höherer Temperatur z.B. 120°C zu kochen beginnt. Durch die höhere Temperatur brauchen die Speisen nicht so lang, um weich zu werden, was Zeit und Energie spart. Wenn man stattdessen auf einem hohen Berg, wo der Luftdruck geringer ist, kochen will, siedet das Wasser schon bei niedrigeren Temperaturen. Deshalb benötigen Speisen länger zum Garen.

### Das Phasendiagramm

Da der Aggregatzustand von der Temperatur und dem Druck abhängt, ist auch der Übergang zwischen zwei Aggregatzuständen temperatur- und druckabhängig. Es gibt also nicht nur eine Siedetemperatur oder einen **Siedepunkt**, sondern eine **Siedelinie**, die die Siedetemperatur in Abhängigkeit vom Druck zeigt. In einem **Phasendiagramm** (siehe Abbildung rechts) kann man die Aggregatzustände in Abhängigkeit von Druck und Temperatur darstellen mit Linien, die jeweils die Übergänge zwischen den Phasen darstellen.

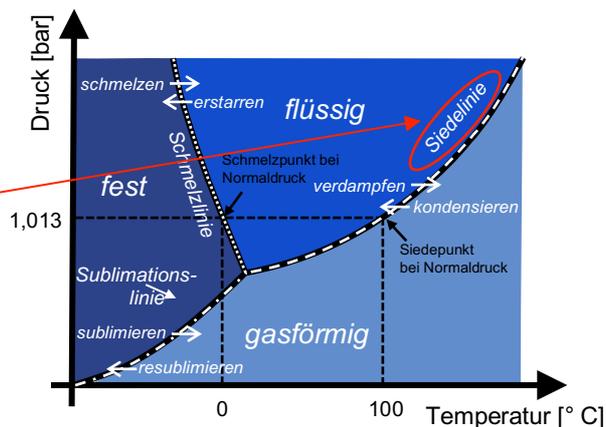


Bild 2: Phasendiagramm von Wasser

## Der Einfluss von Temperatur und Druck erklärt im Teilchenmodell

Die Aggregatzustände kann man sich im **Teilchenmodell** veranschaulichen: Im **festen Zustand** sind die Teilchen dicht beieinander und können sich kaum bewegen. Meist werden sie als einfarbige Kugeln dargestellt, aber da auch Anziehungskräfte zwischen den Teilchen eine Rolle spielen, sind sie hier wie Magnete in rot-grün dargestellt (unterschiedliche Farben ziehen sich an, gleiche stoßen sich ab). Wenn man einen Feststoff erhitzt, bewegen sich die Teilchen etwas mehr, daher dehnt sich der Feststoff aus. Gleichzeitig werden die Anziehungskräfte durch den größeren Abstand schwächer. (Ausnahme: Wasser zwischen 0 und 4°C dehnt sich beim Abkühlen aus → Dichteanomalie des Wassers)

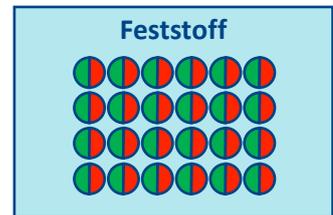


Bild 3: Feststoff im Teilchenmodell

Wenn man beim Erhitzen den Schmelzpunkt erreicht, lösen sich immer mehr Teilchen aus der engen Feststoffanordnung und gehen in den **flüssigen Zustand** über. Dort sitzen sie nicht mehr an einer festen Stelle sondern können sich gegenseitig verschieben. Dadurch haben Flüssigkeiten keine feste Form, aber noch ein abgegrenztes Volumen. Wenn man die Flüssigkeit dann weiter erhitzt, gilt wie in der Feststoffphase: den Teilchen wird mehr Energie zugefügt, sodass sie sich mehr bewegen. Dabei wird der Abstand größer, die Anziehungskräfte werden geringer und die Flüssigkeit dehnt sich aus.

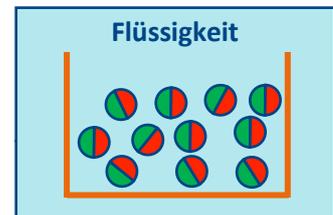


Bild 4: Flüssigkeit im Teilchenmodell

Durch weiteres Erhitzen wird auch hier irgendwann ein Schwellenwert erreicht: der Siedepunkt. An diesem Punkt lösen sich immer mehr Teilchen aus den Anziehungskräften, die noch in der Flüssigphase wirken, und bewegen sich als einzelne Teilchen frei im Raum. Damit sind sie im **gasförmigen Zustand**, wo sie am meisten Abstand haben und sich sehr schnell bewegen. (Ein zufälliger Zusammenstoß von solchen Teilchen führt aufgrund der hohen Geschwindigkeit eher zum Abprallen als dass hier wieder die Anziehungskräfte zum Tragen kämen.)

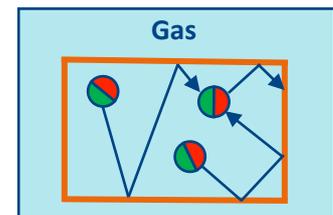


Bild 5: Gas im Teilchenmodell

**Bis hier wurde der Einfluss der Temperatur auf den Aggregatzustand beschrieben.**

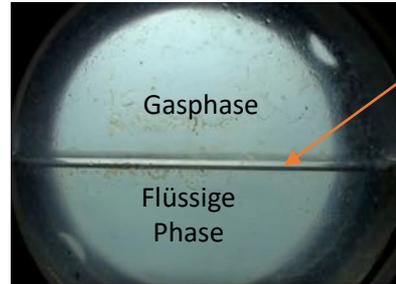
**Welchen Einfluss hat aber der Druck?** Wenn man den Druck erhöht, sperrt man dieselbe Menge Teilchen in ein kleineres Volumen. Sie kommen sich dann wieder näher. Besonders leicht geht das, wenn die Teilchen in der Gasphase sind. Sie lassen sich dann leicht zusammendrücken. In der Flüssig- und insbesondere der Feststoffphase müssen hohe Drücke aufgewendet werden, um die Teilchen noch dichter zusammenzupressen.

Wenn man sich veranschaulicht, dass sich die Teilchen in einer Flüssigkeit umso mehr bewegen, je heißer sie ist und gleichzeitig, dass ein Gas umso mehr Teilchen enthält, je höher der Druck ist, so kann man sich vielleicht vorstellen, dass bei gleichzeitigem Vorliegen von hohen Temperaturen und hohen Drücken der Unterschied zwischen Gas- und Flüssigphase verschwindet. An diesem Punkt ist der **überkritische Zustand** erreicht.

**WICHTIG:** Im überkritischen Zustand gibt es keinen Unterschied zwischen Gas- und Flüssigphase. Er wird bei hohen Temperaturen und Drücken erreicht. Wie hoch diese genau sind, ist stoffabhängig.

## Kann man den überkritischen Zustand sehen?

Ein ergänzendes Bild für die erste Seite dieser Erklärung können wir nicht liefern, aber Forscher können in Experimenten beobachten, wann der kritische Punkt erreicht ist: Dazu nutzen sie eine Sichtzelle, einen druckfesten beheizbaren Behälter mit Fenster und füllen dort z.B. Wasser ein und bringen es zum Sieden. Am Siedepunkt sehen sie eine flüssige und eine gasförmige Phase, die durch eine Phasengrenze getrennt werden.



Phasengrenze

Bild 6: Sichtzelle mit zwei Phasen und deutlich sichtbarer Phasengrenze

Wenn man nun den Druck und die Temperatur gleichzeitig jeweils so erhöht, dass man auf der Siedelinie bleibt, dann kommt man irgendwann an den kritischen Punkt, ab dem der Unterschied zwischen Gas- und Flüssigphase verschwindet. Dort sieht man dann keine Phasengrenzfläche mehr. **Das Verschwinden dieser Linie ist also das Einzige, was man sehen kann.**

Vergleichen wir den überkritischen Zustand von Wasser, Ethanol und Kohlendioxid im Phasendiagramm:

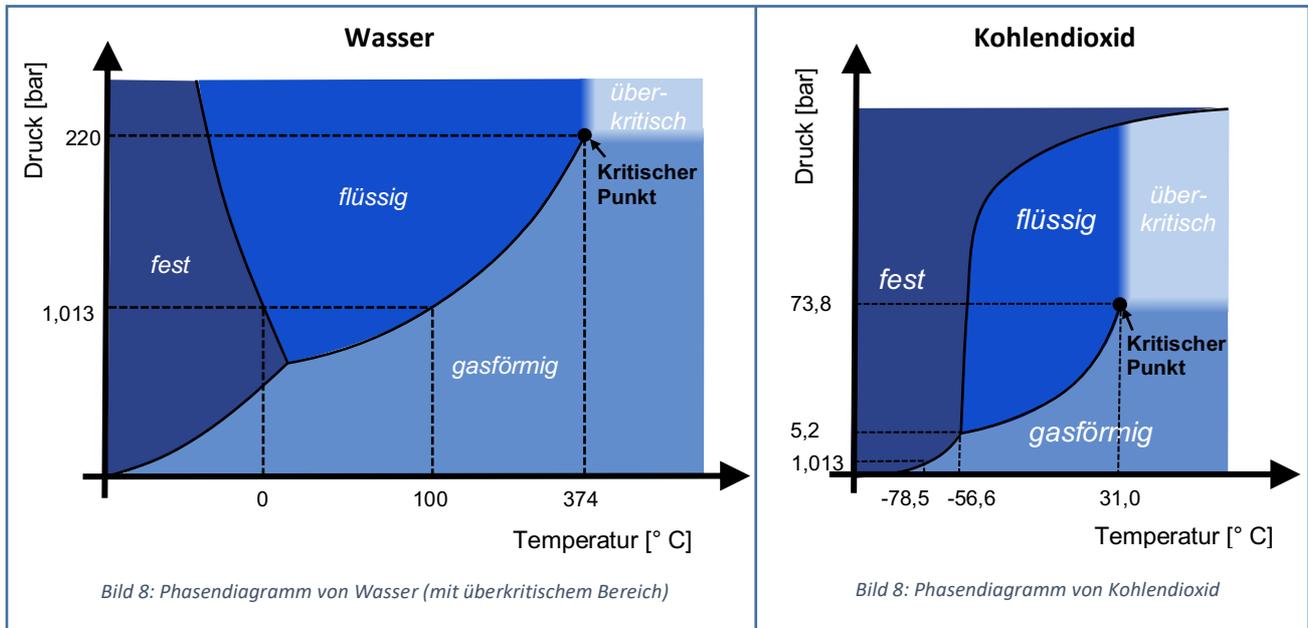


Bild 8: Phasendiagramm von Wasser (mit überkritischem Bereich)

Bild 8: Phasendiagramm von Kohlendioxid

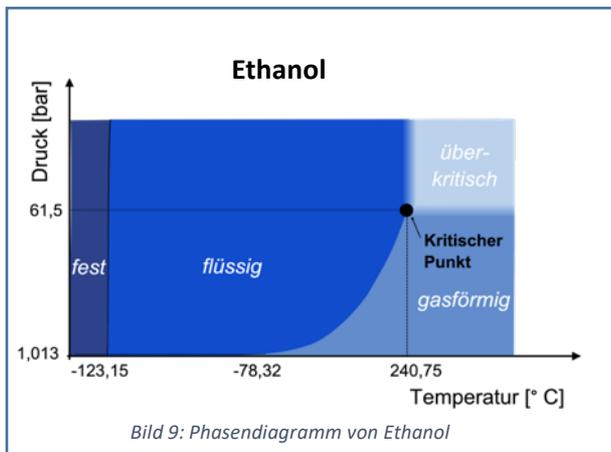


Bild 9: Phasendiagramm von Ethanol

Im Phasendiagramm ist der kritische Punkt das obere Ende der Siedelinie. Darüber beginnt der überkritische Zustand.

Um den überkritischen Zustand von Wasser zu erreichen, braucht man einen sehr hohen Druck von 220 bar und eine hohe Temperatur: 374 °C. Bei vielen anderen Stoffen sind die Werte geringer, z.B. benötigt man bei Ethanol nur 61,5 bar und 240 °C und bei Kohlendioxid nur 73,8 bar und sogar nur 31 °C.

## Grundwissen 3: Struktur, Eigenschaften und Anwendungen von Aerogelen

Das Besondere an allen Aerogelen ist ihre Struktur: Wie Schwämme enthalten sie sehr viele Poren, aber die Poren sind wesentlich kleiner, sodass sie mit bloßem Auge nicht sichtbar sind. Daher kann man sie nur mit hochauflösenden Mikroskopen (z.B. Rasterelektronenmikroskopen) betrachten. Eine typische Porenstruktur eines Aerogels aus dem **Biopolymer** Alginat ist in Bild 1 dargestellt.

Da Aerogele so viele Poren haben, haben sie nicht nur eine äußere Oberfläche, sondern vor allem eine riesige innere Oberfläche. Könnte man wenige Gramm eines Aerogels auffalten und die Oberfläche aller Poren ausbreiten, wäre diese ungefähr so groß wie ein Fußballfeld!

Zwar sind die Poren in Aerogelen sehr klein, dennoch sind sie größer als die Poren, die beispielsweise Aktivkohle hat. Deswegen können Stoffe gut in die Poren hineingelangen (und auch aus diesen heraus), was für viele Anwendungen nützlich ist. Das macht Aerogele z.B. als Katalysatorträger oder als Trägerstoff für Medikamente und Aromastoffe interessant. Noch mehr über Poren erfahrt ihr im Exkurs 6: Wissenswertes über Poren.

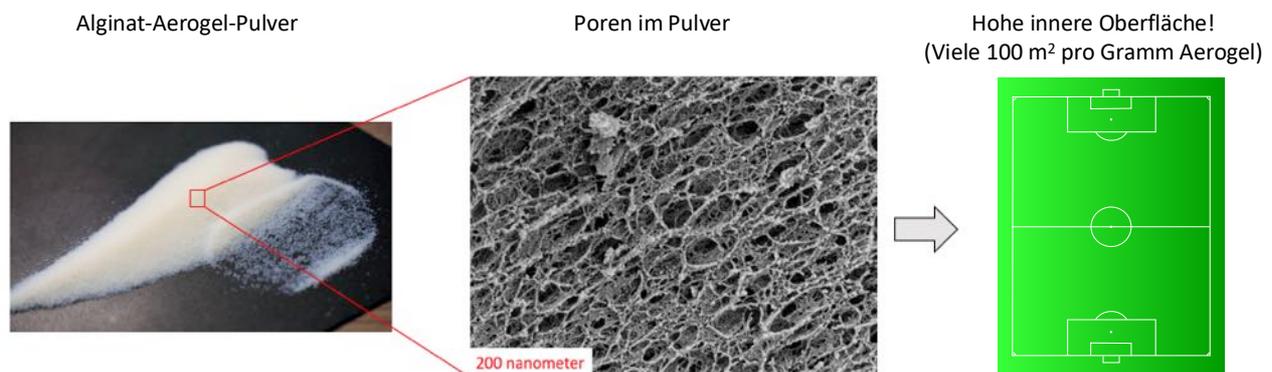
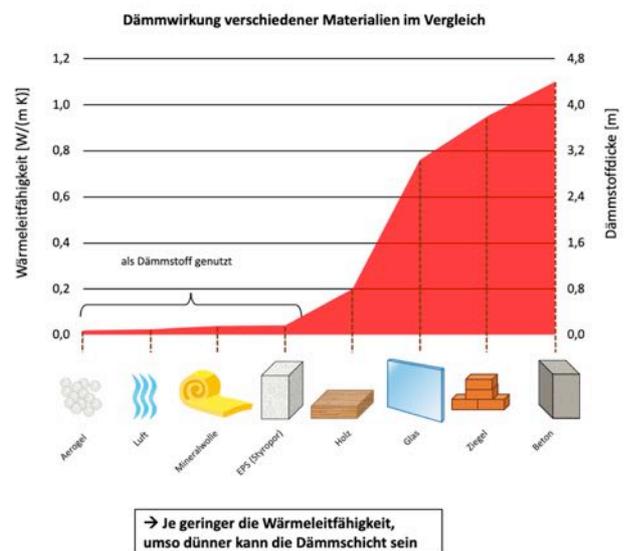


Bild 1: Kennzeichnend für Aerogele ist eine hohe innere Oberfläche.

Zusammengefasst sind die besonderen Eigenschaften von Aerogelen:

- Hohes Porenvolumen (bestehen bis zu 99% aus Luft)
- „Ultraleicht“ (**Dichte** von 0,01 g/cm<sup>3</sup> erreichbar, zum Vergleich: Wasser 1 g/cm<sup>3</sup>, Luft 0,001 g/cm<sup>3</sup>, Styropor 0,02 – 0,06 g/cm<sup>3</sup>)
- Extrem hohe innere Oberfläche aufgrund der kleinen Poren
- hohe Wärmedämmung und Schallisolation: Da sich Wärme und Schall in den Poren „verfangen“, können sie Aerogele nur schwer durchdringen.

Aus diesen Eigenschaften leiten sich viele Anwendungsmöglichkeiten für Aerogele ab, die aber auch damit zusammenhängen, aus welchem Ausgangsmaterial die Aerogele gemacht sind. Auf der Rückseite sind Anwendungen zusammengetragen.



## Was haben Biopolymer-Aerogele für besondere Eigenschaften? Wofür werden sie verwendet?

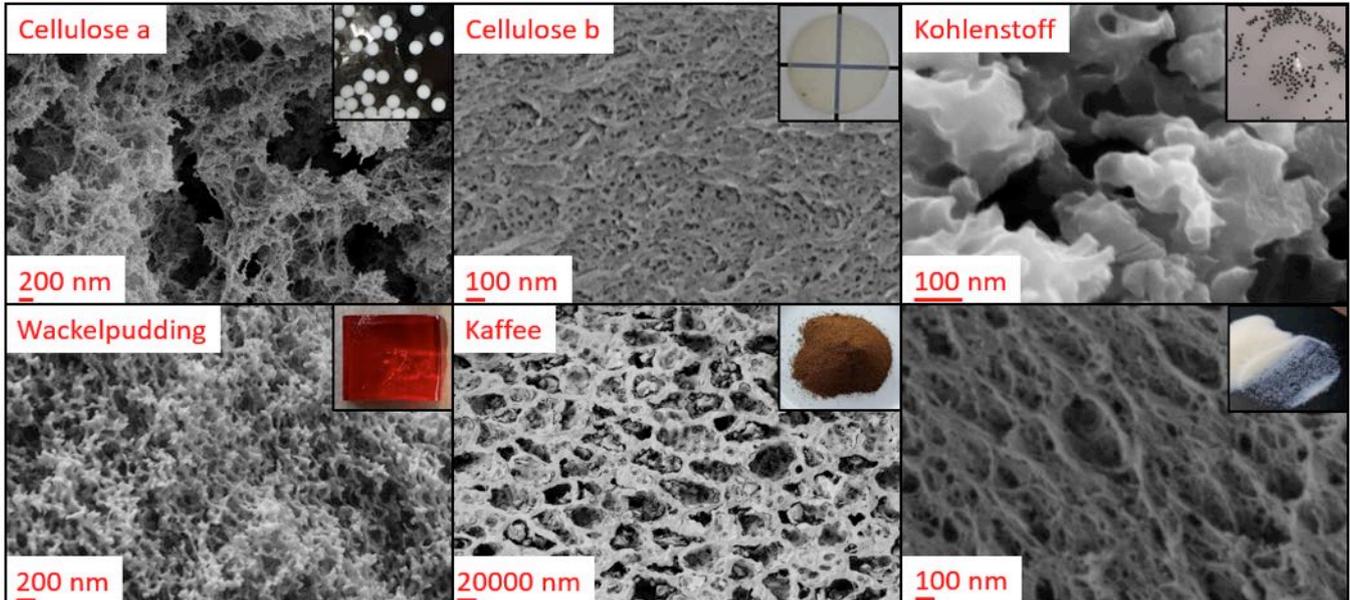
Biopolymer-Aerogele haben wie alle Aerogele eine **extrem geringe Wärmeleitfähigkeit**. So können sie als Super-Isolationsmaterialien beispielsweise in der Automobilindustrie sowie in Dämmsystemen für Gebäude eingesetzt werden. Außerdem eignen sie sich für die **Stofftrennung**, z. B. bei der Öl-Wasser-Trennung. Dabei bindet das Aerogel je nach Art z.B. nur das Öl und nicht das Wasser oder umgekehrt.

Auch wenn Biopolymer-Aerogele noch kaum verbreitet sind, existiert doch ein großes Potential für neue Anwendungen. Denn lange Zeit konnte man sie nur in kleinen Mengen im Labor herstellen, aber mit dem EU-Forschungsprojekt NanoHybrids, gelang es, das Herstellungsverfahren so weiterzuentwickeln, dass erstmals größere Mengen davon produziert werden konnten. Dieses Forschungsprojekt wurde 2015 bis 2019 von zwölf Forschungsinstituten und Industriepartnern aus sieben Ländern unter Leitung von Frau Prof. Smirnova vom Institut für Thermische Verfahrenstechnik der Technischen Universität Hamburg durchgeführt.

Wenn nun mehr Biopolymer-Aerogele verfügbar sind und die Herstellkosten sinken, ist deren Einsatz in verschiedenen Bereichen denkbar. Neben den wärmedämmenden und stofftrennenden Eigenschaften spielt vor allem **die hohe innere Oberfläche** eine Rolle, **an die Stoffe gebunden oder von dort freigesetzt werden können**. Mit Eiweißen und Stärke als Ausgangsstoffen lassen sich essbare Aerogele herstellen, die in der Medizin und im Nahrungsmittelbereich genutzt werden könnten: so könnten z.B. Medikamente in Aerogele eingebracht werden, die im Körper nach und nach freigesetzt werden. Ebenso könnten Aerogele als Träger von Aromastoffen und Vitaminen für Nahrungsergänzungsmittel oder von Wirkstoffen in Kosmetika genutzt werden. In der Landwirtschaft könnten sie Schädlingsbekämpfungsmittel kontrolliert freisetzen und so zu einem sparsameren Gebrauch dieser Mittel führen.



## Exkurs 6: Wissenswertes über Poren



Aerogele können sehr verschiedene Eigenschaften haben: Manche Aerogele sind zum Beispiel sehr gute Wärmeisolatoren, andere sind besonders gut als Adsorber geeignet (also, um Stoffe an ihre Oberfläche zu binden).

Welche Eigenschaften ein Aerogel hat, hängt vor allem von der Größe der Poren im Aerogel ab: So können Cellulose-Aerogele abhängig von der Porengröße entweder durchsichtig oder undurchsichtig sein. Aerogel-Forscher versuchen daher ständig, die für die Anwendung geeignetsten Poren zu erhalten. Geeignet sind normalerweise sogenannte „Mesoporen“: Diese sind so winzig, dass wir sie mit bloßem Auge nicht erkennen können!

Ihr Durchmesser reicht von 5 – 50 Nanometern: Das ist besonders klein, denn in einen Millimeter passen eine Million Nanometer. Deswegen braucht man auch besondere Rasterelektronenmikroskope, um die Poren überhaupt zu sehen.

Bezeichnung	Symbol	Umrechnung
Millimeter	mm	
Mikrometer	$\mu\text{m}$	$1 \mu\text{m} = \frac{1}{1.000} \text{ mm}$
Nanometer	nm	$1 \text{ nm} = \frac{1}{1000} \mu\text{m} = \frac{1}{1.000.000} \text{ mm}$

### Aufgabe:

Oben seht ihr Mikroskopie-Bilder von verschiedenen Aerogel-Poren. In jedem Bild findet ihr folgende Infos: 1) das Material 2) wie das Aerogel aussieht 3) eine Skala in Nanometern (nm).

Wie ihr seht, sind die Poren unterschiedlich groß und haben verschiedene Formen. Versucht einmal, die Bilder in einer Reihenfolge anzuordnen: Welches ist wohl das „beste“ Aerogel? Denkt daran: Aerogel-Forscher wollen möglichst nur Mesoporen in ihrem Aerogel haben und keine größeren Poren und Lücken. Je mehr feine Poren vorhanden sind, umso besser.

## Exkurs 7: Studienorientierung im Bereich Aerogele

### Welche Aufgaben gibt es in der (Aerogel-)Forschung, welche Studiengänge sind hierfür interessant?

#### Chemie:

Wie ihr bereits gemerkt habt, wird für die Herstellung eines Aerogels das Wissen aus unterschiedlichen Bereichen benötigt. Dazu zählt neben der Chemie nicht nur die Mathematik, sondern eben auch Physik und Biologie. So wird Herstellung der Hydrogele im ersten Schritt durch die Wechselwirkungen der Polymere untereinander und mit dem Gelierungsmittel bestimmt. Durch Variation dieser beiden Komponenten und ihrer Eigenschaften wird die Zähflüssigkeit des Gels und damit auch der Aufbau des Aerogels nach dem Trocknen beeinflusst. Seid ihr besonders interessiert an diesem Schritt, könnte ein **Chemiestudium** etwas für euch sein.

#### Chemieingenieurwesen / Maschinenbau:

Seid ihr eher an dem Zusammenspiel der Technik mit den chemischen und physikalischen Prozessen interessiert, könnte ein Studium in Richtung Chemieingenieurwesen das Richtige für euch sein. Dieses Studium beschäftigt sich beispielsweise damit, welche Einflüsse der Autoklav auf das fertige Aerogel hat (z.B. durch Druck oder Temperatur) oder wie die Herstellung möglichst optimal abläuft (geringer Energie- und Materialverbrauch). Die Entwicklung und Konstruktion der geeigneten Anlagen (z.B. des Autoklavens) sowie die Funktionsweise sind Teil eines **Chemieingenieurwesen-** oder auch **Maschinenbau-Studiums**.

#### Modellierung:

Ein Thema, das in der heutigen Zeit immer interessanter wird, sind die virtuellen Modelle. Mit Hilfe eines solchen Modells können im Idealfall die benötigten Prozessbedingungen (z.B. Druck und Temperatur) und Eigenschaften der fertigen Aerogele vorhergesagt werden, ohne Experimente im Labor durchführen zu müssen. Das erspart den Forschern viel Arbeit, Kosten und Zeit. Auch die Modellierung ist ein Themenfeld mit dem man sich im Bereich **Chemieingenieurwesen** beschäftigen kann. Hierbei wird meistens am Computer gearbeitet und es werden Modellierungsprogramme genutzt oder sogar Modelle in unterschiedlichen Programmiersprachen selbst geschrieben. Programmierkenntnisse sind hier also von Vorteil.

Bereits als Student kann man als studentische Hilfskraft in der Forschung mitarbeiten, z. B. Experimente durchführen und auswerten. An das Bachelorstudium kann man ein Masterstudium anschließen und anschließend eine Promotion. In dieser Zeit ist man als wissenschaftlicher Mitarbeiter beschäftigt und bearbeitet Forschungsprojekte oder Teile davon weitgehend selbstständig. Gleichzeitig arbeitet man oft auch in der Lehre mit. Eine weitere Stufe auf der Karriereleiter an der Universität ist die Habilitation, die Bedingung für eine Professur ist. In Interviews auf der Seite [www.kniffelix.de](http://www.kniffelix.de) lernst du in der Aerogel-Mission im Exkurs: „Interviews mit Aerogel-Forschern“ Forscher auf verschiedenen Leveln kennen, siehe <https://kniffelix.rz.tu-hamburg.de/begib-dich-auf-spurensuche/projektuebersicht/aerogel-mission/exkurs-interviews-mit-aerogel-forschern/>.