

## VERSUCHE AUS DEM KÜCHENSCHRANK

## Eier kochen ohne Strom

Die Versuche sind explizit nicht als Experimente im fachdidaktischen bzw. wissenschaftstheoretischen Sinn konzipiert, sondern sollen vor allem durch Erzeugung einfacher naturwissenschaftlicher Phänomene eine positive Haltung gegenüber der Chemie wecken. In sprachlich reduzierter Form haben sie Eingang gefunden im Projekt „Der Kleine Schlaufuchs“ an der Pädagogischen Hochschule Schwäbisch Gmünd [4].

Anliegen der in loser Folge erscheinenden Versuche ist es, Impulse für chemische Versuche zu geben, die gefahrlos zu Hause mit haushaltsüblichen Gegenständen durchgeführt werden können. Sie können damit als Quelle für das gemeinsame Ausprobieren mit Kindern zuhause dienen, in Kindergärten oder an Schulen sowie zur Verwendung bei Tagen der offenen Tür. Ein Stückweit sind sie zu verstehen als Antwort auf den oft gehörten Satz: „Ach, Du bist Chemiker/in!? Dann mach doch mal eben ein Experiment.“

## Man nehme

- Rohes Eiklar von Hühnereiern
- Essigsäurelösung ( $w(\text{H}_3\text{CCOOH})=0,05$ )
- Kochsalzlösung (gesättigt)
- Natron gesättigt in Essigsäure (d. h. Carbonat-gepufferte  $\text{Na}^+$ -Lösung)
- Mineralwasser (mit hohem  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ -Gehalt)
- Ethanol (Brennspiritus;  $\varphi(\text{H}_3\text{CCH}_2\text{OH})=0,95$ )

Jeweils ca. 2,5 mL Eiklar werden mit jeweils 2,5 mL der vorbereiteten Lösungen über-, beziehungsweise im Fall der Kochsalzlösung unterschichtet ( $\rho_{\text{Eiklar}} \approx 1,035 \text{ g cm}^{-3}$  [1],  $\rho_{\text{NaCl}} \approx 1,3 \text{ g cm}^{-3}$ ). Man beobachtet die Veränderungen am Eiklar im Verlauf einer Stunde.

## Man beobachtet

Im Falle des Brennspiritus erfolgt sofort bei Zugabe die Denaturierung des Eiklars (Verwendung

von beispielsweise Wodka mit  $\varphi(\text{H}_3\text{CCH}_2\text{OH})=0,4$  verlangsamt dies deutlich). In allen anderen Lösungen schreitet dieser Prozess weniger, jedoch unterschiedlich schnell voran:  $\text{NaCl}_{(\text{aq})} > \text{H}_3\text{O}^+ > \text{Na}^+$ ; in der Mineralwasserlösung (528 mg  $\text{Ca}^{2+}/\text{L}$ , 124 mg  $\text{Mg}^{2+}/\text{L}$ ) ist die Denaturierung nur schwach zu beobachten (an der Grenzfläche und oben links im Reagenzglas – das ist KEIN Lichtreflex) (Abbildung 1).

## Erklärung

Proteine gehören zu den Wunderwerken der Evolution. Nicht nur, dass sehr lange Sequenzen von Aminosäuren verlässlich immer wieder in Ketten zusammengefügt werden (Primärstruktur); vielmehr organisieren sich diese langen Ketten aufgrund ihrer Seitengruppen in charakteristisch gefalteten (Sekundärstruktur) und in sich verknäulten Formen (Tertiärstruktur), die sich mit anderen Proteinen zu Komplexen zusam-

menfinden (Quartärstruktur) [3]. Das „Wunder“ ist dabei weniger, dass sich die Proteine verknäulen – das kann jeder längere Wollfaden. Vielmehr ist es ein „Wunder“, dass die spezifische Wirkweise der Proteine durch eben diese individuellen Faltungen und Verknäulungen bestimmt ist. Wird diese scheinbare Unordnung durcheinandergebracht, verliert das Protein seine Funktionalität [11] – häufig unwiederbringlich. Es verliert sein „Wesen“ beziehungsweise seine Natur, was sich im Begriff der Denaturierung bildgewaltig ausdrückt. Da Proteine häufig zentrale Funktionen im Organismus erfüllen, sei es als Katalysatoren (Enzyme) oder als Botenstoffe (Hormone), ist diese Sensibilität durchaus bemerkenswert.

Proteine liegen also in einem fragilen Zustand vor, der empfindlich gegenüber äußeren Störungen ist. Die alltäglichste Variante, Proteine zu denaturieren, liegt darin sie zu erwärmen. Die Zufuhr von Wärme resultiert in einer gesteigerten Eigenbewegung der Moleküle, sodass auch polare Seitengruppen, die ‘von Natur aus’ nicht miteinander in Kontakt kommen, plötzlich in elektrostatische Reichweite zueinander geraten. Es kommt zum Aufbrechen von alten Wasserstoffbrückenbindungen und zur Knüpfung von neuen [3]. Die Eiweißknäuel organisieren sich in diesem Prozess neu und erscheinen anschließend hinsichtlich der Ober-

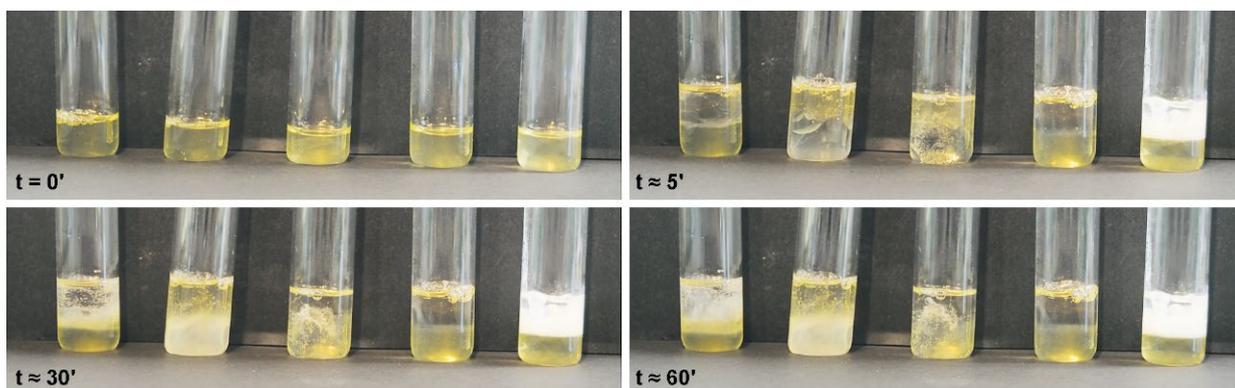


Abb. 1 Denaturierung von Eiklar über die Zeit; Zusätze (jeweils von links nach rechts): Essigsäure, Kochsalzlösung, Natron in Essigsäure, Mineralwasser, Ethanol

flächenladung verändert. Dabei greifen drei Prozesse ineinander: zum einen die Denaturierung, in der Sekundär- und Tertiärstruktur einzelner Proteinketten durchgeschüttelt werden, eine Aggregation mehrerer noch nicht denaturierter Proteine, sowie eine Koagulation von bereits denaturierten Proteinen [10]. Dies beeinflusst unter anderem die Solvationsfähigkeit in beispielsweise Wasser, das Eiweiß fällt als Niederschlag aus – es flockt beziehungsweise gerinnt. Schon vergleichsweise „geringe“ Temperaturen können zur Denaturierung führen [3] – aus diesem Grund kann der menschliche Körper seine Funktionalität bei Temperaturen  $> 42\text{ °C}$  nicht mehr aufrechterhalten beziehungsweise steigert selbst die Körpertemperatur zur Abwehr körperfremder Proteine (vulgo: Fieber [11]). Es gibt jedoch auch wärmetolerantere Proteine: das im Hühnereiklar vornehmlich vorliegende Ovalbumin bleibt bis fast  $80\text{ °C}$  „geschmeidig“ [3]; die um die schwarzen Raucher der Tiefsee siedelnden hyperthermophilen Archaeen und Bakterien wachsen überhaupt erst bei Temperaturen über  $80\text{ °C}$  (z. B. *Pyrodicticum abyssis*) [9; 12] und überleben auch Temperaturen von über  $300\text{ °C}$  (z. B. *Caminibacter profundus*, *Lebetimonas acidiphila*) [2].

Die Sekundär- und Tertiärstruktur der Proteinketten kann jedoch auch durch Einführung anderer elektrostatisch wirksamer Substanzen verändert werden, etwa durch Zusatz von Ionen. Dabei unterscheidet man chaotrope Wirkung, in der Wasserstoffbrückenbindungen destabilisiert werden, und kosmotrope Wirkung (Stabilisierung von Wasserstoffbrückenbindungen). In jedem Fall kommt es zur Neuorganisation der Ketten durch Bildung neuer elektrostatischer Bindungen oder Lösung bestehender Bindungen. Dabei lässt sich empirisch eine qualitative „Denaturierungs“-Reihenfolge der Ionen finden: die Hofmeister-Reihe [6]. Deren Aussage lautet vereinfachend: Weiche Lewis-Basen

(Anionen) wirken stärker chaotrop auf Proteine und senken die Löslichkeit in Wasser als harte; bei Kationen (Lewis-Säuren) ist der Trend umgekehrt. Hofmeister selbst hypothesierte als Ursache die unterschiedliche Mobilisation von Wasser aus dem Protein [6], welches mit der unterschiedlichen Hydratation von weichen und harten Ionen im Pearson-Konzept [8] erklärt werden kann – der Zusammenhang ist auch theoretisch gut modellierbar [7].

Eiklar ist eine 10%ige Lösung verschiedener Eiweiße (mit  $w(\text{Ovalbumin}) \approx 0,6$  [10]). Die vergleichsweise schnelle Denaturierung des Eiklars durch Säurezusatz im Versuch unterstreicht das Potenzial harter Säuren. Da die Stoffmengenkonzentrationen im Versuch nicht kontrolliert werden, muss offen bleiben, ob das gemeinsame Potenzial von  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$ -Ionen wirklich das der Säureprotonen übersteigt. Gleichermaßen ist der Unterschied zwischen Kochsalzlösung und Natron in Essigsäure ( $\text{pH} \approx 7$  wegen des Puffers) nur bedingt zu quantifizieren: Zwar wirkt Chlorid – laut Hofmeister-Reihe – stärker chaotrop als Acetat, doch sind die Stoffmengenkonzentrationen von  $\text{Na}^+$  nicht unbedingt vergleichbar, da schon die Löslichkeitsgrenze von Natriumacetat etwa 25% unter der von Natriumchlorid liegt. Ebenso dürfte eine intensivere Vermischung mit Eiklar durch das Unterschichten mit Natriumchloridlösung nicht zu vernachlässigen sein. Dass Calcium- und Magnesium-Ionen laut Hofmeister-Reihe stärker chaotrop wirken sollten als Natrium-Ionen, scheint im Versuch zunächst nicht bestätigt. Hier ist zu bemerken, dass die Verwendung von Mineralwasser weit geringere Stoffmengenkonzentrationen der beteiligten Ionen mit sich bringt (für  $\text{Ca}^{2+}$  ca.  $13\text{ mmol/L}$  – alle anderen Ionenarten liegen noch geringer konzentriert vor) als der Einsatz einer gesättigten Kochsalzlösung (für  $\text{NaCl}$  ca.  $6\text{ mol/L}$ ). Vor diesem Hintergrund ist es schon fast

erstaunlich, dass überhaupt eine Denaturierung mit Mineralwasser zu beobachten ist.

Die Denaturierungswirkung von Ethanol lässt sich auf dessen Tendenz zurückführen, bevorzugt die unpolaren Seitengruppen der Eiweiße zu solvatisieren und so mit dem Solvens Wasser zu konkurrenzieren [5]. Infolgedessen verändert es die oberflächliche Ladung und Adsorptionsfähigkeit des Proteins [13]. Damit dreht Ethanol das zuvor polar solvatisierte Protein praktisch „auf links“ und es kommt zur Ausfällung.

Fazit: Auch wenn alle Zusätze prinzipiell geeignet erscheinen, um ein Frühstücksei zuzubereiten, dürfte die tradierte Form der Denaturierung geschmacklich weiterhin mehr überzeugen.

### Literatur

- [1] M. R. Atılgan und S. Unluturk. Rheological Properties of Liquid Egg Products (LEPS), *International Journal of Food Properties* **2008**, *11*, 296–309, <https://doi.org/10.1080/10942910701329658>
- [2] B. J. Campbell, A. S. Engel, M. L. Porter und K. Takai. The versatile  $\epsilon$ -proteobacteria: Key players in sulphidic habitats, *Nature Reviews Microbiology* **2006**, *4*, 458–468, <https://doi.org/10.1038/nrmicro1414>
- [3] R. Ebermann und I. Elmadfa, *Lehrbuch Lebensmittelchemie und Ernährung*, Springer Vienna, Vienna, **2011**.
- [4] M. Emden und B. Risch. Entwickelnder Transfer fachdidaktischer Outreach-Projekte: Das Rad nicht neu erfinden, *Chemie in unserer Zeit* **2019**, *53*, 172–179.
- [5] H. Helmick, H. Turasan, M. Yildirim, A. Bhunia, A. Liceaga und J. L. Kokini. Cold Denaturation of Proteins: Where Bioinformatics Meets Thermodynamics to Offer a Mechanistic Understanding: Pea Protein As a Case Study, *Journal of agricultural and food chemistry* **2021**, *69*, 6339–6350, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c06558>
- [6] F. Hofmeister. Zur Lehre von der Wirkung der Salze, *Archiv für Experimentelle Pathologie und Pharmakologie* **1888**, *24*, 247–260, <https://doi.org/10.1007/BF01918191>
- [7] R. A. Miranda-Quintana und J. Smiatek. Theoretical Insights into Specific Ion Effects and Strong-Weak Acid-Base Rules for Ions in Solution: Deriving the Law of Matching Solvent Affinities from First Principles, *ChemPhysChem* **2020**, *21*, 2605–2617, <https://doi.org/10.1002/cphc.202000644>
- [8] R. G. Pearson. Hard and soft acids and bases, HSAB, part II: Underlying theories, *J. Chem. Educ.* **1968**, *45*, 643, <https://doi.org/10.1021/ed045p643>
- [9] D. Prieur, G. Erauso und C. Jeanthon. Hyperthermophilic life at deep-sea hydrothermal vents, *Planetary and Space Science* **1995**, *43*, 115–122, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(94\)00143-f](https://doi.org/10.1016/0032-0633(94)00143-f)
- [10] K. Roth. Allerlei vom Frühstücksei: Eine Oologisch-chemische Osterbetrachtung, *Chemie in unserer Zeit* **2009**, *43*, 100–114, <https://doi.org/10.1002/ciuz.200900485>
- [11] D. Sadava, D. M. Hillis, H. C. Heller und S. D. Hacker, *Purves Biologie*, Springer, Berlin u. a., **2019**.
- [12] K. O. Stetter. Hyperthermophilic prokaryotes, *FEMS Microbiology Reviews* **1996**, *18*, 149–158, <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1996.tb00233.x>
- [13] M. Vignes-Adler. Der prickelnde Schaum des Champagners, *Angew. Chem.* **2013**, *125*, 198–201, <https://doi.org/10.1002/ange.201207299>

Markus Emden, Pitt Hild, Livia Murer  
Pädagogische Hochschulen Zürich und Fribourg

DOI: 10.1002/ciuz.202100056