

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.

VERSUCHE AUS DEM KÜCHENSCHRANK

Wieso braucht die Brezel Lauge?

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

Heute backen wir Brezeln: 500 g Mehl, 250 mL Milch, 50 g Butter, ½ TL Salz und 1 Würfel Hefe werden zu einem geschmeidigen Hefeteig verarbeitet. In kleinere Teigportionen aufgeteilt (hier je ca. 80 g) werden Brezeln daraus geformt. Eine der Brezeln wird für ca. 30 Sekunden in Brezellauge (3%ige Natronlauge) und eine weitere für 30 Sekunden in heiße, Backnatronlösung (etwa 3,5 %ige Natriumhydrogencarbonat-Lösung) getaucht. Letztere stellt man her durch Aufkochen von 1 L Wasser, in das 35 g Backnatron gegeben werden. Eine Brezel bleibt zum Vergleich unbehandelt.

Die Brezeln werden bei 160 °C (Umluft) gebacken und der Backfortschritt über 25 Minuten verfolgt.

Man beobachtet

Die in Brezellauge getauchte Brezel zeigt schon nach 10 Minuten eine deutliche Bräunung und ist am Ende der Backzeit schön braunglänzend gebacken (Abbildung 1). Die Brezel aus der Backnatronlösung beginnt erst nach ca. 15 Minuten sich merklich zu bräunen und weist am Ende der Backzeit eine geringere Bräunung als eine mit Lauge behandelte Brezel auf. Die unbehandelte Brezel versagt sich jeglicher Bräunung.

Was geschieht

Die Bräunung von Back- und Bratgut wird in der Regel durch eine komplexe Reaktionskaskade hervorgerufen, die als Maillard-Reaktion bekannt ist und deren Bezeichnung suggeriert, dass es sich dabei um eine uniforme Reaktion handelt. Dies täuscht. In der Tat ist das Reaktionsgeschehen derart komplex, dass es noch immer nicht in allen Einzelheiten aufgeklärt ist [1]. Das Produktgemisch, das sich bei einzelnen Maillard-Reaktionen einstellt, ist dermaßen undefiniert, dass sich bestenfalls Klassen von Leitsubstanzen (wie Furane, Pyrrole, Melanoidine [1]) identifizieren lassen, die genaue Konstitution aber unmöglich zu bestimmen ist. Im Prinzip findet sich in diesem stofflichen Chaos auch die Erklärung, wieso man ein Steak nicht mehr un-braten kann.

Hinter dem Begriff Maillard-Reaktion verbirgt sich ein Reaktionsge-

flecht, das die Reaktionen von reduzierenden Zuckern mit Proteinen, Peptiden oder Aminosäuren beschreibt [1]. Das komplexe Ineinandergreifen von Amadori- und Heyns-Umlagerungen, Strecker-Abbaun und Melanoidin-Bildungen [1, 2] birgt zugleich das Potenzial, Studierende der Chemie in Prüfungsangst zu stürzen, als auch Afficionados organischer Reaktionsmechanismen ein Glänzen in die Augen zu zaubern. Es beschäftigt die forschende Chemie seit über 100 Jahren [2, 3], sodass dieser kurze Beitrag nur einen Aspekt der Reaktion anreißen kann.

Reduzierende Zucker isomerisieren unter basischen Bedingungen vermehrt in ihre offenkettige Form – in Umkehrung der säurekatalysierten Bildung von Halbacetalen [4] –, sodass die Carbonylfunktion der Aldosen verfügbar wird beziehungsweise sich diese in der basenvermittelten Einstellung des tautomeren Gleichgewichts aus Ketosen bildet [4]. Die Aldehydfunktion kann durch die Aminofunktion eines Peptids nucleophil zu einem N-Glykosid substituiert werden (Schiffsche Base; Abbildung 2). N-Glykoside sind in der Regel unbeständig gegenüber Säuren und lagern in ein säurestabiles Isomer um (Amadori-Umlagerung) [5]. In Folgeaktionen bilden sich unter anderem niedermolekulare, oft heterocyclische Aromastoffe und hochmolekulare Farbstoffe (Melanoidine) [1, 2, 5]. Am Ende kommt ein nicht mehr ganz überschaubarer Hexenkessel an Melanoidinen heraus [6], der die Speisen ansehnlich gebräunt erscheinen lässt und in der Regel eine knusprige Textur mit sich bringt. Im Gegensatz etwa zum enzymatischen Braunwerden von Äpfeln [7] kommt die Maillard-Reaktion ohne Hilfe von Biokatalysatoren aus, daher wird sie abgrenzend auch als nicht-enzymatische Bräunungsreaktion bezeichnet. Zu unterscheiden ist sie weiterhin von der Karamellisierung, die auf dem alleinigen Vorliegen von Zuckern basiert [1, 8].

Hinsichtlich der entstehenden Aromen sind mindestens 28 individuelle Substanzen identifizierbar, von denen keinesfalls die höchstkonzen-

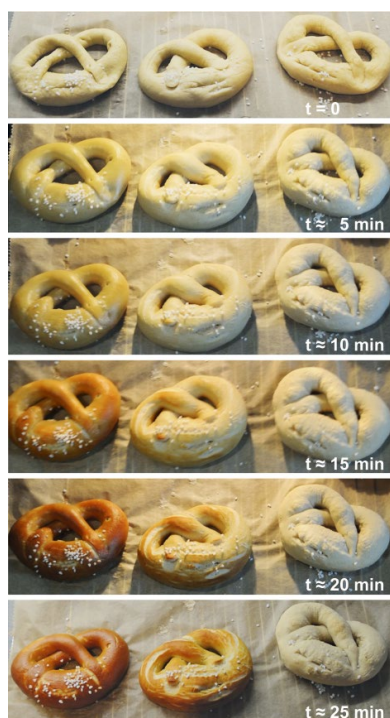


Abb. 1 Bräunungsfortschritt von drei Brezeln (links: mit Brezellauge, NaOH(aq); Mitte: mit Backnatronlösung, NaHCO₃(aq); rechts: unbehandelt).

trierten flüchtigen Verbindungen (Essigsäure mit 40.400 µg/kg in der Kruste, 3-Hydroxy-2-butanon mit 17.400 µg/kg – Strukturen in Abbildung 3) die Charakteristik des Brezelgenusses ausmachen [10]. Vielmehr sind hierfür besonders entscheidend das 2-Acetyl-1-pyrrolin, das trotz nur 3,5 µg/kg in der Kruste 480-fach über seiner Wahrnehmungsgrenze konzentriert vorliegt (Essigsäure: 1,3-fach) und 4-Hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanon (2.440 µg/kg, 190-fach über der Wahrnehmungsgrenze) [10].

Da, wie gezeigt, im ersten Reaktionsschritt reduzierende Zucker durch Basen zu den offenkettigen reaktiven Aldehyden isomerisieren [8], können Maillard-Reaktionen durch Steigern des pH-Wertes begünstigt werden, sodass ein Maximum an Edukt zur Verfügung gestellt wird. Im dokumentierten Backversuch ist dies deutlich an den Bräunungsfortschritten (oder eben auch deren Ausbleiben) der Brezel zu beobachten. Die 3%ige Natronlauge (Brezellauge) verschiebt, bei einem rechnerischen pH-Wert von etwa 12,5 für ein extrem alkalisches Milieu, das Gleichgewicht zwischen Halbacetal und offenkettigem Zucker deutlich auf Seiten des letzteren.

Um den pH-Wert der Backnatronlösung abzuschätzen, reicht es jedoch nicht aus, die Konzentration des theoretisch verfügbaren Hydrongenocarbonats zu kennen (dies führte zu einem pH-Wert von etwa 10). Denn da das Backnatron in siedendem Wasser gelöst wird, kommt es zur Bildung von gelöster Kristallsoda (Natriumcarbonat) unter CO₂-Entwicklung [11], die den pH-Wert schlagartig auf knapp unter 12 steigen lässt. Somit liegen für das Backen mit Brezellauge und Backnatronlösung in etwa vergleichbare Reaktionsbedingungen vor. Einschränkung gilt zu beachten, dass angesichts eines sichtbaren Backnatrondepots im Kochwasser die Umsetzung nicht quantitativ abläuft und die erzielten pH-Werte durch heiße Backnatronlösung wohl unter 12 liegen dürften. Gegebenenfalls zeigt sich im Versuch auch ein Störeinfluss des ver-

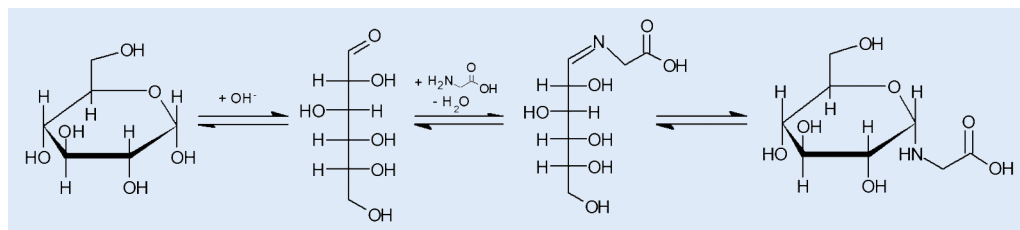


Abb. 2 Reaktionsschema zur Bildung eines N-Glykosids aus D-Glucose und Glycin, in Anlehnung an die erste Maillard-Reaktion [9].

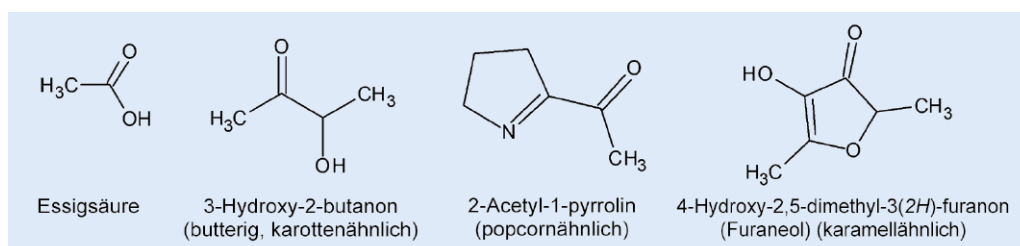


Abb. 3 Strukturen exemplarischer Aromastoffe in Brezeln [10].

wendeten, sehr harten Leitungswassers mit 20,7 °dH, aus dem Carbonat gefällt würde – auch in diesem Fall sank der pH-Wert unter den angegebenen Rechenwert. Die merklich geringere beziehungsweise zeitversetzt einsetzende Bräunung der in Backnatronlösung getauchten Brezel deutet jedenfalls darauf hin, dass die Maillard-Reaktion erst später zu 'mehr' Melanoidinen führt.

Doch wer ist einst überhaupt auf die Idee gekommen, rohen Teig in Lauge zu tunken? Dies scheint – wie so häufig – eine Zufallsentdeckung zu sein, die dem bayerischen Bäcker Anton Nepomuk Pfannenbrenner zugeschrieben wird. Er habe im Jahr 1839 irrtümlich seine Brezel mit der Reinigungslauge für die Backbleche anstelle der gedachten Zuckerlösung eingepinselt [8]. Wieso er nach Bemerken des Fehlers auch noch in das Backgut hineingebissen hat, ist nicht überliefert.

Andere Wege, um die Maillard-Reaktion in der Küche begünstigend auszunutzen – jenseits einer Erhöhung der Reaktionstemperatur etwa durch einen Backofen (mit einem Optimum zwischen 110–170 °C) – sind ersichtlich im Bestreichen von Backgut mit Eigelb (Steigerung der lokalen Proteinkonzentration) oder Milch (Steigerung der Konzentration eines reduzierenden Zuckers: Lactose) [8].

Literatur

- [1] M. Angrick und D. Rewicki, *Chemie in unserer Zeit* **1980**, 14, 149–157, <https://doi.org/10.1002/ciuz.19800140503>
- [2] M. Hellwig und T. Henle, *Angewandte Chemie* **2014**, 126, 10482–10496, <https://doi.org/10.1002/ange.201308808>
- [3] P.-A. Finot, *Annals of the New York Academy of Sciences* **2005**, 1043, 1–8, <https://doi.org/10.1196/annals.1333.001>
- [4] A. Wollrab, *Organische Chemie*, 4. Aufl., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, **2014**.
- [5] *Lebensmittelchemie* (Hrsg.: R. Matissek und W. Baltes), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, **2016**.
- [6] S. I. Martins, W. M. Jongen und M. A. van Boekel, *Trends in Food Science & Technology* **2000**, 11, 364–373, [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00022-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00022-X)
- [7] M. Emden, P. Hild, K. Kallinna und L. Murer, *Chemie in unserer Zeit* **2020**, 54, 408–409, <https://doi.org/10.1002/ciuz.202000052>
- [8] M. Lersch, in: *The Kitchen as Laboratory* (Hrsg.: C. Vega, J. Ubbink und E. van der Linden), Columbia University Press, New York Chichester, West Sussex, **2012**.
- [9] L.-C. Maillard, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de L'académie des Sciences* **1912**, 154, 66–68.
- [10] S. Schoenauer und P. Schieberle, *Journal of agricultural and food chemistry* **2019**, 67, 7110–7119, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b02601>
- [11] A. F. Holleman, E. Wiberg und N. Wiberg, *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, 102. Aufl., de Gruyter, Berlin, **2007**.

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

DOI: 10.1002/
ciuz.202100073