

Haute Cuisine à la Physik

Molekulargastronomie – eine physikalische Entdeckungsreise durch die Welt der Küche

Thomas Vilgis

An kaum einem anderen Ort des täglichen Lebens findet sich die gesamte Bandbreite der interdisziplinären „Wissenschaft der weichen Materie“ so wieder wie in der Küche. Mit einfachen Experimenten, deren Resultate mit Genuss verzehrt werden können, lassen sich unzählige Verbindungen zu aktuellen Forschungsthemen erkennen, die Physiker und Chemiker im Labor und auf Computern bearbeiten.

Zugegeben, Physik in der Küche, oder gar „Küchenphysik“ klingt schon ein wenig abfällig. Passiert überhaupt etwas Spannendes in der Küche, außer dass nach einem stressreichen Arbeitstag eine Fertigpizza in den Ofen geschoben oder vielleicht ein Würstchen gebraten wird? Als kulinarischer Farbtupfer kommt dann noch ein Klecks Ketchup hinzu, der, schüttel, schüttel, nicht in angemessener Menge aus der Flasche fließen will. Und wieder einmal bewahrt sich der scherzhafte Spruch „Shake, shake the ketchup bottle / First none will come, and then a lot“¹. Er basiert nicht nur auf leidvoller Erfahrung, sondern auf knallharter Physik, genauer auf bestimmten physikalischen Eigenschaften weicher Materie. Das enervierende Fließverhalten des Ketchups ist nämlich erwünscht. Auf dem Hamburger, der Wurst oder auf den Pommes darf nichts fließen, solange es in Ruhe gelassen oder auch nur ein wenig bewegt wird. Während des hastigen Sprints von der Burgerbude zum Institutsgebäude darf Ketchup nicht kleckern, selbst wenn Burger oder Pommes frisch aus dem heißen Öl kommen. Sobald wir aber hinein beißen, wird das Ketchup fast widerstandslos cremig. Daher müssen die geringen Scherkräfte zwischen Zunge und Gaumen bereits ausreichen, um es „zu verflüssigen“ und uns dabei jenes typische Mundgefühl samt Geschmack bereiten, nach dem viele von uns geradezu süchtig sind.

Ketchup ist also eine komplexe Flüssigkeit, die nur unter Scherung signifikant fließt, in Ruhe gelassen aber kaum. Ebenso zeigt Ketchup einen signifikanten „Weißberg-Effekt“²: Füllt man ein zylinderförmiges Gefäß mit Tomatenketchup und führt einen schnell rotierenden Stab in die rote zähe Flüssigkeit, so steigt das Ketchup den rotierenden Stab hoch. Wasser mit seiner niedrigen Viskosität, und damit sehr kurzen Relaxationszeiten τ , verhält sich hingegen „klassisch“ und bildet erwartungsgemäß eine Kuhle um den Stab. Dabei spiegeln die Relaxationszeiten die Dynamik der



Weiche Materie, harte Physik – Kochen und Backen haben nicht nur etwas für den Gaumen, sondern auch in physikalischer Hinsicht einiges zu bieten.

Flüssigkeiten und die Bewegungsprozesse der Moleküle, etwa Diffusionsbewegungen, wider. Derartig ungewöhnliche Fließigenschaften sind rheologische Besonderheiten und nur Flüssigkeiten zueigen, deren Fließverhalten sich danach richtet, wie schnell oder wie langsam an ihnen manipuliert wird [1]. Zähflüssiger Honig zeigt das Hochklettern ebenso wie viele Polymerlösungen und kolloidale Flüssigkeiten. Aber auch Kuchen-, Pfannkuchen- oder Brotteige, die, je nach ihrem Wasser-Mehl-Verhältnis, unaufhaltsam den Knethaken des Rührgeräts emporsteigen und

KOMPAKT

- Beim Kochen und Backen spielt insbesondere die „Physik der weichen Materie“ eine große Rolle.
- Der wissenschaftliche Blick auf Kochen und Backen wird unter dem Begriff „Molekulargastronomie“ zusammengefasst.
- Viele Zutaten sind physikalisch gesehen komplexe Flüssigkeiten und zeigen Besonderheiten bei ihrem Fließverhalten, abhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit an ihnen manipuliert wird.
- Aktuelle Erkenntnisse der Polyelektrolytphysik erweisen sich als nützlich, wenn es um die Festigkeit bestimmter Gerichte geht, während die Polymerphysik dabei hilft, Vorgänge beim Garen besser zu verstehen.

Prof. Dr. Thomas A. Vilgis, Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Postfach 3148, 55021 Mainz

dabei schon manchen Hobbybäcker zur Verzweiflung getrieben haben. Anders als Ketchup werden Teige beim schnelleren Ziehen, also höheren Scherraten, fester und reißen. Scherraten dy/dt (γ ist der Scherwinkel) sind über die zeitlichen Änderungen der von außen angeregten Deformation definiert, etwa über die Kreisfrequenz des Rührhakens. Somit lässt sich der Weissenberg-Effekt auch über die dimensionslose Weissenberg-Zahl, das Produkt von Scherrate und Relaxationszeit, erfassen: $w = \tau dy/dt$. Um einen signifikanten Weissenberg-Effekt zu erzielen, muss w größer als eins werden. Bei Teigen, Ketchup und anderen Polymerlösungen und Schmelzen wird dies schnell erreicht, da die typischen Relaxationszeiten sehr groß sind; diese liegen bei Hefeteigen, je nach Wassergehalt im Bereich von Sekunden bis hin zu Minuten. Komplexe (nicht-newtonsche) Fluide können sich als Funktion der Scherrate höchst unterschiedlich verhalten (Abb. 1).

Offenbar haben wir es in der Küche vorwiegend mit Systemen zu tun, die Gegenstand der Physik der „weichen Materie“ sind [2–6]. Wären sie nicht weich, könnten wir sie auch nicht essen. Somit kommen solch unkulinarische Begriffe, wie Emulsionen, polymere Lösungen, Gele, Netzwerke ins Spiel [7]. Für ketchupartiges Fließverhalten zum Beispiel sind Makromoleküle, Polymere, Polyelektrolyte und kolloidale Teilchen verantwortlich, denn mit diesen Molekülen lassen sich physikalische Strukturparameter gezielt einstellen. Und schon bestimmen physikalische Eigenschaften und deren Messgrößen, ob es uns schmeckt oder nicht. Die Verflüssigung bei hohen Scherraten gehört in diesem Maße natürlich nicht zu den üblichen Eigenschaften von Tomatensaucen oder deren natürlichen Bestandteile. Deswegen ist es auch schwieriger, gutes Tomatenketchup selbst herzustellen. Oft arbeitet man gern mit Zusatzstoffen, wie den Biopolymeren

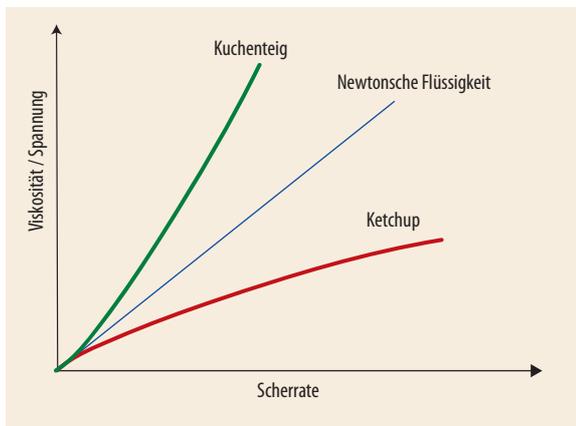


Abb. 1 Teig und Honig verfestigen sich eher bei hohen Scherraten (shear thickening), Ketchup wird flüssiger (shear thinning). Die Scherrate ist dabei ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der die Probe manipuliert wird. Oft wird mit einer oszillatorischen Verformung gearbeitet. Je schneller deformiert wird, desto höher ist die Scherrate. Sie ist also als die zeitliche Änderung der (relativen) Deformation definiert.

Xanthan oder verschiedenen Carageenen, die für diese speziellen rheologischen Eigenschaften sorgen. So hat sich gezeigt, dass Ketchup nur mit sehr genau eingestelltem Viskositätsverhalten und Weissenberg-Effekt als „gutes Ketchup“ empfunden wird. Ist es zu flüssig, wird es nicht so gern über die Pommes gekippt. Unser ausgetüftelter Messapparat mit seiner diffizilen Sensorik zwischen Zunge und Gaumen vermag solche feinen Strukturunterschiede sehr genau zu messen.

Harte Schale – weicher Kern

Der gastronomische Reiz ist – abgesehen von dem Spiel mit den Aromen – stets ein mechanischer bzw. fluidmechanischer „Response“, der unsere Sensoren in dem extrem empfindlichen Messapparat „Mund“ zu kleinen Sensationen reizt. So beruht zum Beispiel der kulinarische Effekt des Kaviars nicht zuletzt auf seiner natürlichen Struktur. Die kleinen Fischeier sind kugelförmig und zerplatzen beim Zerdrücken im Mund, wobei sie ihren intensiven Geschmack freigeben und Gourmets zu Vokabeln wie „Geschmacksexplosion“ veranlassen. Dumm ist nur, dass Kaviar stets den Geschmack des Störs mit sich trägt. Sein Einsatz ist also auf ein paar wenige Gerichte beschränkt.

Allerdings bietet die Physik fast uneingeschränkte Möglichkeiten, Kaviar aus fast allen wässrigen Lösungen nachzubauen, etwa aus Fruchtsäften oder klaren Brühen [8]. Doch dazu ist zunächst ein kurzer Ausflug in die Physik der Polyelektrolyte nötig. Dies sind – vereinfacht gesprochen – kettenförmige Polymermoleküle, die an diversen Stellen entlang ihrer Kette gleiche, nehmen wir an negative, Ladungen tragen. Polyelektrolyte sind damit nichts weiter als „Makroionen“. Somit lösen sich Polyelektrolyte in Wasser, wobei sie sich mehr oder weniger strecken, da sich die Ladungen entlang der Kette abstoßen. Wie stark sich die Molekülketten strecken, hängt wiederum von einer ganzen Reihe physikalischer Gegebenheiten ab: Das Streben nach großer Entropie des Polyelektrolyts sorgt dafür, dass sich das Kettenmolekül möglichst verknäult, damit sich viele (statistisch gleichwertige) Zustände seiner Gestalt realisieren lassen. Dabei kommen sich die Ladungen sehr nahe und stoßen sich gemäß dem Coulomb-Gesetz stark ab, sodass sich doch eher eine gestreckte Form des Moleküls ergibt. Diese beiden konkurrierenden Aspekte lassen sich allerdings durch Zugabe von Salzen, etwa Natriumchlorid, steuern. Die einfach positiven Natriumionen (Na^+) schirmen die negativen Ladungen entlang der Ketten ab, indem sie diese quasi neutralisieren. Nach der Debye-Hückel-Theorie wird dann aus dem Coulomb-Potential ein Yukawa-Potential. So ist die Polyelektrolytkette in einer wässrigen Lösung mit wenig Salz deutlich mehr gestreckt, als nach einer Salzzugabe. Würden wir sogar soviel Salz zugeben, dass alle Ladungen entlang der

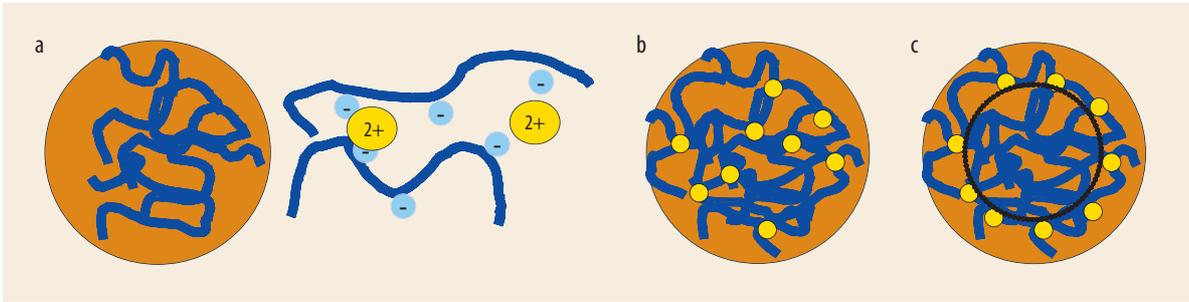


Abb. 2 Mit zweiwertigen Calciumionen (gelb) lassen sich Polyelektrolyte wirkungsvoll vernetzen (a). Für die kulinarische Anwendung ist das richtige Maß an Calciumionen entscheidend. Gibt

man zuviel hinzu, werden die sich bildenden Kügelchen zu hart (b), statt wie gewünscht außen hart und innen weich (c). Die Vernetzung ist hier vereinfacht dargestellt. Berücksichtigt man die che-

mischen Details, werden mehrere Calciumionen pro Vernetzung eingebaut („Eierschachtelmodell“). Für das physikalische Verständnis ist dies aber hier nicht notwendig.

Polyelektrolytkette abgeschirmt wären, würde sich deren räumliche Ausdehnung von einer entsprechend ungeladenen Kette nur unwesentlich unterscheiden.

Was aber passiert, wenn zweiwertige Ionen, beispielsweise Ca^{2+} , zugegeben werden? Diese besetzen schnell die negativen Ladungen des Polyelektrolyten. An diesen Stellen ist dann die resultierende Ladung positiv, sodass die eine andere negative Ladung der Kette angezogen und fest miteinander verbunden wird. Das Resultat ist eine mit sich selbst „vernetzte“ Polymerkette mit einer sehr festen Struktur. So kann man sich auch leicht vorstellen, dass mit vielen Ketten regelrecht feste molekulare Netze entstehen können. Und schon ergibt sich daraus die physikalische Rezeptur für jeden gewünschten Kaviar. Dazu brauchen wir lediglich essbare Polyelektrolyte und Calciumionen. Essbare Polyelektrolyte gibt es eine ganze Reihe. Sie werden schon lange als Verdickungsmittel in industriell produzierter Nahrung eingesetzt. Willige Vertreter sind Alginensäuren, als Modellsystem wählen wir daher die Natriumalginensäure. Diese Moleküle bestehen aus einer Vielzahl von Guluronsäuren (G) und Mannuronsäuren (M), die allerdings nicht in völlig beliebiger Abfolge aneinander gereiht sind, sondern in einer „Blockstruktur“, etwa GGGGGGG, MMMMMM und GMGMGMGM, d. h. verschiedene Grundbausteine kommen entlang des Molekülfadens immer in bestimmten Gruppen oder Blöcken vor. Dies hat zur Folge, dass die Wasserlös-

lichkeit vor allem durch die Fähigkeit bestimmt wird, wie viele Blöcke sich nach Wasserkontakt elektrisch negativ aufladen, indem sie ein positives Ion in das Wasser abgeben, etwa bei Natriumalginensäuren ein Natriumion Na^+ . Damit lösen sich die langen Moleküle in wasserhaltigen Flüssigkeiten relativ gut, aber nicht nur das, denn die negativ geladenen Stellen können extrem stabil mit zweifach positiven Ladungen verbunden werden. Daher taucht man diese Lösungen in Calciumsalzlösungen. Die zweifach positiven Calciumionen Ca^{2+} verbinden jeweils zwei Ketten an den einfach negativ geladenen Stellen.

Schon bilden sich stabile Netze. Diese sind über einen weiten Temperatur- und sogar pH-Bereich stabil (Abb. 2).

Also warum nicht einmal Kaviar aus Campari herstellen? Dieser passt – farblich wie geschmacklich – zu verschiedenen Gerichten, vor allem zu Lachs, der lediglich bei 58 bis 60 Grad gegart wird. Diesen möchten wir, sobald wir etwas

mehr über Proteine wissen, nämlich servieren. Für den Kaviar lösen wir das Alginatpulver in dem Campari auf. Alginat, besser Alginensäure, ist ein wasserlösliches, geschmackloses Geliermittel aus Algen, das sich durch Dissoziation an vielen Stellen negativ auflädt. Dann ziehen wir dies in eine Spritze (ohne Kanüle) und tropfen die Lösung in ein Bad aus Calciumchlorid. Und schon bilden sich – nach einigen Probeversuchen – kleine gleichmäßige, rote Kügelchen voller Camparigeschmack (Abb. 3): Beim Eintropfen vernetzen sich



Abb. 3 Wenn man in Campari gelöstes Alginatpulver behutsam mit einer Spritze in ein Calciumchloridbad gibt, formieren sich Kügelchen, die ähnliche Eigenschaften wie Kaviar haben.

die negativ geladenen Stellen der Alginatketten über die zweifach geladenen Ionen. So bildet sich ein Gel, dessen Festigkeit von der Verweildauer in der Lösung bestimmt ist (**Infokasten**). Je länger die Kügelchen in der Lösung sind, desto härter werden sie.



Innerhalb kurzer Zeit vernetzt sich nur eine äußere Schale, während der Kern noch sehr flüssig bleibt. Nach dem Abfischen müssen die Campariperlen nur noch kurz mit Wasser abgespült werden. Dass sich überhaupt Kügelchen bilden, liegt natürlich an der Oberflächenspannung. Die Tropfen bilden Minimalflächen, also Kügelchen, sofern die Ketten nicht zu schnell vernetzen. Abgesehen von der spannenden Physik bietet diese „Verkapselungsmethode“ einen neuen kulinarischen Reiz: Beim Zerdrücken der Kügelchen mit der Zunge platzen sie und geben ihren Geschmack frei – ungefähr so wie beim Kaviar.

Proteine: hochwertige Nahrung – starke Physik

Proteine sind, selbst für Physiker, faszinierende Moleküle. Sie zeichnen sich durch eine Komplexität aus, die weit davon entfernt ist, verstanden zu sein. Zunächst sind sie – naiv betrachtet – Polymere, also Molekül-

ketten. Allerdings sind diese nicht aus einem Baustein zusammengesetzt, wie viele gebräuchliche Polymere in der Alltagswelt, sondern aus 20 Bausteinen, den Aminosäuren, die unterschiedliche Eigenschaften haben. Also ist die Anordnung dieser Aminosäuren entlang der Kette entscheidend. Sie bestimmt letztendlich die Gestalt des Proteins. Eine genauere Betrachtung dieser Proteinfaltungsmechanismen würde hier zu weit führen, daher begnügen wir uns mit einem sehr vereinfachten Modell. Die Aminosäuren lassen sich sehr grob in zwei Grundtypen einteilen: solche, die das Wasser mögen, also hydrophil und polar sind (P), und solche, die das Wasser hassen (und daher lieber Fetten, d. h. Lipiden zugewandt sind), also hydrophobe Bausteine darstellen (H). Molekülketten lassen sich so bilden, dass bei ihnen die P und die H Bausteine unterschiedlich angeordnet sind. Befinden sich derartige Moleküle in wässriger Umgebung, wie meist in der Biologie und damit auch in der Küche, können sich diese sequenzierten Polymere nur sinnvoll falten und somit „funktionieren“, wenn die Anordnung entlang der Kette „stimmig“ ist.

In Wasser müssen zunächst alle hydrophoben Aminosäuren in das Innere des Globuls verpackt werden, damit deren direkter Wasserkontakt minimiert ist (**Abb. 4**). Diese Verpackung, oder Faltung, kann aber nur

GELE, QUELLUNG, ELASTIZITÄT

Netzwerke und **Gele** sind sehr weiche Festkörper, die in der Küche in Form von Pudding, Desserts usw. eine große Rolle spielen. Zu Tisch sind es vor allem Hydrogele. Darunter versteht man Gele, die in der Lage sind, sehr viel Wasser aufzunehmen. Wie übrigens auch der Füllstoff von Babywindeln und anderen Hygieneartikeln. Trotz dieser vollkommen verschiedenen Anwendungen ist deren physikalische Wirkungsweise sehr ähnlich. Polymeren Netzwerke ist gemein, dass lange Polymerketten an wenigen Stellen miteinander vernetzt sind und zufällige, dreidimensional verbundene Netze bilden. Diese Netzstellen müssen dazu oberhalb einer „kritischen“ Zahl liegen, damit eine „Perkolation“ stattfinden kann.

Die **Perkolationsschwelle** drückt dabei aus, wie viele Netzpunkte bei gegebener Anzahl der Molekülketten notwendig sind, um viele Ketten so zu verbinden, damit eine durchgängige Verbindung durch das gesamte Probenvolumen möglich ist. Die **Perkolation** ist damit ein Phasenübergang in der Konnektivität. Nur oberhalb dieses Übergangs ist die Probe ein (weicher) Festkörper mit einem endlichen Schermodul. Unterhalb der Schwelle bleibt die Probe (sehr zäh) flüssig. Der Gleichgewichtsmodul ist daher Null.

Gern bleibt man in der Küche auch knapp unterhalb dieser Perkolationsschwelle, etwa bei Konfitüren. Sie blei-

ben gerade unterhalb der Grenze zum Festkörper. In manchen Konfitüren befinden sich schon dicke (bis zu Zentimeter großen) Gelbrocken, aber diese sind noch streichbar und weit von der Elastizität eines schnittfesten Puddings, also einem formstabilen Festkörper, entfernt.

Der Modul ist bei idealen Netzwerken, sofern sie nicht mit Lösungsmittel gequollen sind, vor allem durch die Anzahl der Netzpunkte und damit durch die Anzahl der Maschen bestimmt. Jede Masche trägt etwa die thermische Energie $k_B T$ bei, und der Modul G lässt sich durch $G = N k_B T$ abschätzen, wobei N die Anzahl der Maschen pro Volumen ist. Daher gilt auch $G = (\rho/n) k_B T$, wobei n die mittlere (dimensionslose) Maschenlänge ist. Polymernetze haben einen **entropieelastischen** Charakter. Dieser drückt sich durch die ungewöhnliche Proportionalität des Schermoduls zu der Temperatur aus. Der physikalische Grund ist einfach zu verstehen. Bereits gestreckten, deformierten Maschen stehen ohnehin weniger Zustände zur Verfügung. Steigt zusätzlich die Temperatur, haben diese aber das Bestreben nach mehr Zuständen im Phasenraum – und damit weniger Streckung, was aber



bei der fest aufgeprägten Deformation nicht möglich ist. Das verhinderte Streben nach mehr Zuständen kann also nur durch eine Zunahme der Kraft ausgeglichen werden – ganz anders als bei

herkömmlichen Festkörpern. Bei einem Kristall müssen die Atome an den Gitterplätzen aus ihren Gleichgewichtslagen ausgelenkt werden. Das kostet Energie, also $\Delta U/k_B T$ bezogen auf die thermische Energie. Ist die Temperatur höher, so wird dieser Beitrag kleiner, also wird der Festkörper weicher. In diesem Fall spricht man von **energieelastischen** Körpern.

Kommt bei weichen, entropieelastischen Festkörpern noch das Lösungsmittel dazu, quillt das Netzwerk, sein Volumen vergrößert sich erheblich. Dabei werden die Maschen weiter gestreckt, also bleibt nicht mehr soviel Reserve für die mechanische Verstreckung, da die Entropie der Maschen abgenommen hat. Das Gel wird etwas härter und bricht schon bei geringer Beanspruchung. Schon ist das perfekte, physikalisch messbare Puddinggefühl, das vor allem von der Bruchmechanik weicher, gequollener Festkörper lebt, erreicht [10].

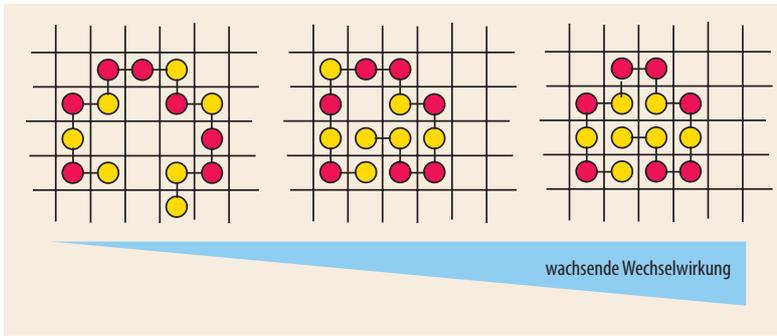


Abb. 4 Die hydrophoben Bausteine (gelb) werden bestmöglich ins Innere des Globuls verpackt, damit sich das Protein überhaupt in Wasser lösen kann. Dazu muss die Sequenzfolge stimmig sein. Trotz seiner Einfachheit bietet das HP-Modell eine ganze Reihe interessanter physikalischer Möglichkeiten.

frustrationsfrei vonstattengehen, wenn die Sequenz dies erlaubt. Enthält die Sequenz „Fehlstellen“ oder Defekte, d. h. sitzt an einem entscheidenden Platz eine hydrophile statt einer hydrophoben Aminosäure, so kann das Protein nicht mehr in seine vorgesehene Gestalt falten und so seine ihm zugeordnete biologische Aufgabe nicht mehr wahrnehmen. Es ist dann sehr leicht einzusehen, dass die Gestalt der Kette im Wasser sehr stark von der „Sequenzierung“ abhängt. Für das HP-Modell lässt sich dies sehr einfach nachrechnen [9].

Auf dem Weg zur Geschmacksentfaltung

Neben den Eigenschaften der Aminosäuren und deren Sequenz ist auch die Rolle der polaren Wassermoleküle entscheidend. Denn sie lassen sich innerhalb von 10 Angström stark von den polaren und geladenen Aminosäuren orientieren. Sie bilden damit eine äußerst effektive und relativ stark gebundene Hydrathülle, die einen wesentlichen Beitrag an der Proteinfaltung und der Proteinfunktion hat. Vereinfacht gesprochen schmiegen sich Wassermoleküle wie ein Schlauch um die hydrophoben Sequenzen der Proteine und hüllen sie ein. Lokal bestimmt daher die Hydrathülle die interne Wechselwirkung des Proteins und dessen Oberfläche. Stören kleine Ionen oder geladene Teilchen zu stark die Wasserhülle, ist der Zusammenhalt der Proteinglobule oder Fibrillen nicht mehr gewährleistet. Die Hülle entfaltet sich und ändert dabei ihre Eigenschaften. In der Küche ist dies leicht zu beobachten, da diese Effekte tagtäglich ausgenutzt werden. Sie beträufeln Ihr Lachsfilet mit etwas Zitronensaft, um es ein wenig zu marinieren, schon verfärben sich diese Stellen nach wenigen Minuten von rot nach weiß. Diese Marinierungseffekte gehen auf zwei Effekte zurück: Die Protonen der Säuren, also Wasserstoffkerne H^+ (und damit kleine geladene Ionen), sind zum einen geladen und verändern die lokalen elektrostatischen Verhältnisse, zum anderen aber stören sie die Hydrathülle der Proteine deutlich, dringen an manchen Stellen durch und kommen damit den Proteinen sehr nahe. Wasserstoffbrückenbindungen brechen auf und die Proteine denaturieren. Dieser Effekt ist an vielen Beispielen im „Labor Küche“ deutlich zu sehen. Entfaltete Proteine streuen und reflektieren das Licht in alle Richtungen, die Oberfläche des Lachses wird nach Beträufeln mit Zitronensaft weiß, ebenso wie das Eiklar, in das Sie ein paar Tropfen Essig (oder zu Demonstrationszwecken

Salzsäure) geben. Darauf basiert das Marinieren des Sauerbratens mit Essig, denn dabei wird das Bindegewebe vordenaturiert und der Braten mürbe.

Sind die Proteine einmal entfaltet, haben sie natürlich ihre biologischen Aufgaben verloren. Allerdings können sie neue übernehmen, vor allem wieder bei unserem täglichen Hantieren in der Küche. Der Eischnee ist dafür ein typisches Beispiel (Abb. 5). Die Ursache für seine hohe Standhaftigkeit bei Temperaturen von -200 °C bis 150 °C lässt sich wiederum auf die im Eiklar enthaltenen Proteine zurückführen. Beim Schlagen von Eiklar wird mit dem Schneebesen oder dem Handmixer ordentlich Luft darunter geschlagen. Damit bilden sich Luftblasen in dem Eiklar, die aber nach kurzer Schlagzeit noch relativ groß und instabil sind. Erst nach längerer Schlagarbeit schrumpfen die Bläschen, und der Eischnee erhält seine Festigkeit.

Viele andere Schäume, etwa Seifenschaum, würden nach einiger Zeit wieder zusammenfallen. Zum einen gleichen sich Unterschiede der Bläschengröße aus, zum anderen beginnen die flüssigen Wände zwischen den Bläschen zu trocknen, oder das sich darin befindende Wasser fließt aufgrund der Gravitation nach unten. Bei Eischnee (oder auch bei gut aufgeschlagenen Milchsäumen) passiert dies nicht so schnell. Eischnee kann sogar im Backofen zu feinem Baiser getrocknet werden, ohne dass seine Stabilität darunter leidet. Dafür sind jene Proteine im Eiklar verantwort-

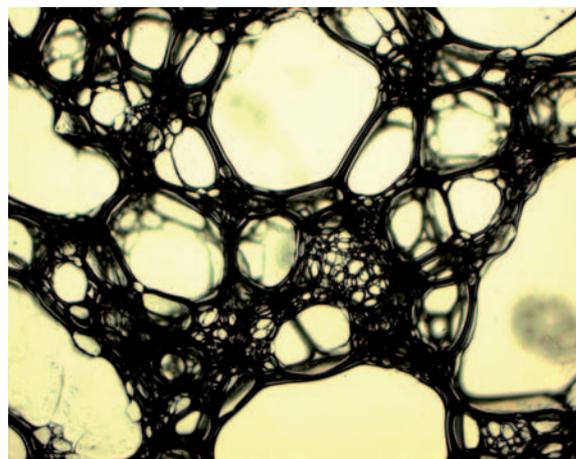


Abb. 5 Eischnee (hier eine Mikroskopaufnahme) wird erst dann zu einem stabilen Schaum, wenn er länger geschlagen wird, sodass die Bläschen kleiner werden. Mit Lecithin^{+) stabilisierte Schäume weisen dagegen größere Bläschen auf. Sie sind weniger stabil, da sie lediglich mit kleinen grenzflächenaktiven Molekülen versetzt sind.}

+) Lecithin besteht aus einem hydrophilen Kopf und zwei hydrophoben Fettsäureresten. Diese relativ kleinen Moleküle sind weniger „fest“ an der Grenzfläche lokalisiert als die vergleichsweise großen Proteine.

lich, die sich während des Schlagens, also unter mechanischer Manipulation, mit dem Handmixer entfalten. Dies ist zunächst tragisch, denn wie immer bestehen auch diese Eiweiße aus hydrophilen und hydrophoben Aminosäuren. Normalerweise sind die hydrophoben entsprechend im Inneren eingeschlossen, jetzt aber nach der Entfaltung sind sie unmittelbar dem Wasser ausgesetzt, energetisch eine inakzeptable Situation. Fett ist keines vorhanden, dem sich die hydrophoben Aminosäuren zuwenden könnten. Also bleibt ihnen lediglich die Luft der Bläschen als Fettersatz. Die physikalisch günstigste Situation des Proteins ist daher, sich an der Grenzfläche zu lokalisieren, dabei seine hydrophilen Kettenabschnitte in die Wasserwände zwischen den Bläschen zu tauchen und die hydrophoben Teile in die Luft zu recken. Natürlich müssen die Ketten dabei etwas gestreckt werden, dies geht zu Lasten der Entropie. Dieser Entropieverlust wird allerdings durch die günstigeren energetischen Verhältnisse, wieder ausgeglichen, sodass sich viele hydrophile Proteinabschnitte im Wasser befinden, die hydrophoben dagegen in der Luft. Daher schlängeln sich die Molekülketten immer durch die Grenzflächen (etwa wie das schlangenförmige Ungeheuer von Loch Ness), senken dabei die Oberflächenspannung und halten den Schaum stabil (Abb. 6). Gibt man dem Eischnee für die Baisers noch Zucker dazu, bindet auch dieser etwas Wasser, sodass sich der Schaum zu köstlich süßen Leichtigkeit trocken lässt, ohne dass seine Struktur allzu sehr darunter leidet. Mit Hilfe von flüssigem Stickstoff kann Eischnee auch zu kalten Baisers gefrieren. Auch hier hat das Wasser der feinen Zwischenwände keine Chance, große Kristalle zu bilden, deren Größenabmessungen die Bläschen sprengen könnten. Unter dem Begriff „Nitroespumas“ werden derartige Köstlichkeiten in diversen Restaurants angeboten.

Wie gut sich Eiweiße (Proteine) zum Emulgieren von Wasser und Öl eignen, können Sie selbst ausprobieren: Bereiten Sie Ihre Mayonnaise nicht – wie es in jedem Kochbuch steht – mit Eigelb, sondern mit Eiklar zu. Es funktioniert problemlos. Oder schlagen

Sie ein Eiklar zu Schaum und geben nach und nach unter Weiterrühren mit dem Handmixer 60 bis 80 ml Olivenöl dazu. Der dichte, intensiv nach Olivenöl schmeckende Schaum bleibt für lange Zeit stabil.

Garen oder „Tempern“?

Abgesehen von der hochkomplexen Physik verlangen Proteine, vor allem in Fleisch und Fisch, eine sorgsame Behandlung. Das Problem ist offensichtlich: Jedes zu lange in der Pfanne gelassene Schnitzel oder zu lange bei hohen Temperaturen gegrilltes Stück Fleisch wird schnell zäh und ungenießbar. Der Grund hierfür ist einfach. Zum einen verdampft bei hohen Temperaturen das Wasser, das nicht nur physikalisch als Hydrathülle, sondern auch für unser sensorisches „mouthfeeling“ als Weichmacher, dient. Damit rücken die Fleischproteine wieder enger zusammen und können ein viel engmaschigeres (anisotropes) Molekülnetz bilden. Dessen Schermodul lässt sich grob abschätzen und ist proportional zur Anzahl der Verbindungen verschiedener Proteinfäden (und damit umgekehrt proportional zu der Länge der freien Kettenstücke zwischen zwei Netzstellen. Engmaschigere Netze ohne Weichmacher sind damit schwerer zu beißen (Infokasten).

Ein zwischen 55 und 60 °C gegarter Lachs, entweder in einem Temperofen im Labor oder in Convektomaten, wie es sie in Profiküchen gibt, ist weit davon entfernt, ein geschmackloses, trockenes Gebilde zu werden. Viele Proteine sind gerade erst denaturiert und können das eingelagerte Wasser noch als Hydrathüllen binden. Darüber hinaus bilden die Proteinfäden ein sehr lockeres, mit den Fischsäften gequollenes Gel mit einem extrem niedrigen Schermodul, der als „zart, saftig und perfekt gegart“ beschrieben werden kann.

Natürlich beschränken sich diese Ideen zur gezielten Proteinfaltung nicht nur auf Schäume oder auf Garen bei niedrigen Temperaturen. Beide physikalischen Techniken lassen sich mit dem sog. Thermomix ausnützen, bei dem sich während des Mixens die Tempera-

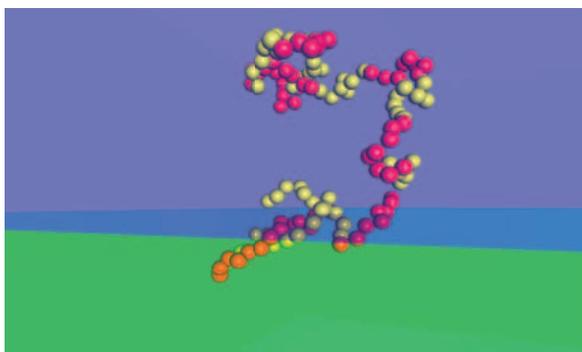
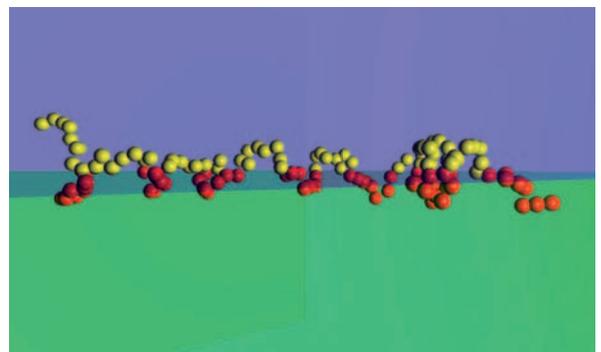
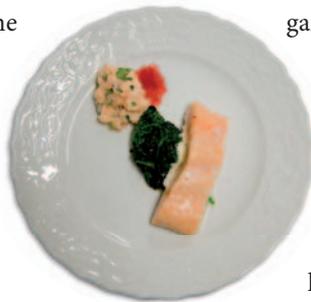


Abb. 6 Copolymere aus verbundenen hydrophilen (rot) und hydrophoben Teilstücken (gelb) lokalisieren an entsprechenden Grenzflächen. Dieses Beispiel aus einer Computersimulation [11] zeigt auf der linken Seite ein Polymer, das nur schwach an der Grenzfläche lokalisiert ist. Hydrophile Monomere befinden sich auf der hydrophoben Seite (oben). Folglich ist dies nicht der optimale Zustand, wird aber toleriert, denn das Polymer kann diese energetisch ungünstige Situation



durch seine große Entropie ausgleichen. Rechts wurde die Wechselwirkung verstärkt. Sie überwiegt und zwingt das Polymer in eine sehr gestreckte Form, sodass alle Abschnitte auf der energetisch korrekten Seite liegen: hydrophob in hydrophob, hydrophil in hydrophil (unten). Als Folge schrumpft die Kettenausdehnung senkrecht zur Oberfläche deutlich. Diese Resultate lassen sich durch analytische Rechnungen untermauern.

tur genau einstellen lässt, z. B. um eine feine Leberpraline herzustellen: Wir versetzen dafür die Leber mit Butter sowie den Gewürzen, Salz, Pfeffer und etwas Lavendel, und geben noch Portwein dazu – physikalisch sehr problematische Komponenten, die sich zwar auf der Zunge, aber eben nicht molekular vertragen – wie das Fett der Butter, das Wasser der Leber und der süße Port. Folglich müssen Fett und Wasser emulgiert werden und zwar so fein, dass die Pralinen formbeständig bleiben. Statt der herkömmlichen Methode – also kalt mixen, Eigelb hinzugeben (des Emulgators Lecithin wegen) und dann ab ins Wasserbad –, bietet sich das vorsichtige Zerkleinern bei einer möglichst genau eingehaltenen Temperatur an. 50 °C reichen vollkommen aus, um bestimmte Eiweiße der Leber zu manipulieren. Dabei gerinnen nur bestimmte Proteine, die dann das Emulgieren von Fett und Wasser sicherstellen. Damit erhält die Emulsion ausreichende Stabilität, ohne dass extra Emulgatoren, sei es Eigelb oder Sojalecithin, zugegeben werden müssen. Nach einem kurzen Garen z. B. im Wasserbad entstehen Gebilde, welche nicht nur wegen ihrer Form Assoziationen mit „Praline“ freisetzen. Die Leberpraline erinnert an eine „Ganache“, jener cremigen Füllung, die sich in vielen Schokopralinen findet.



Der Traum des perfekten Garens wird also mehr und mehr Realität, je präziser Temperaturen im Bereich 50 bis 80 °C gesteuert werden können – und je besser wir die natürliche Zusammensetzung unserer Lebensmittel kennen.

Der Vormarsch der Küchenphysik

Sowohl ausgefeilte Labortechnik als auch die Physik und Chemie der weichen Materie werden unaufhaltsam in die Küchen drängen. Das zeigen z. B. auch Teige. Die bieten nämlich viel mehr als den zu Anfang des Artikels angesprochenen Weißenberg-Effekt. Tatsächlich haben sie viel mit konzentrierten Polymerlösungen, die auch noch kleine Füllstoffteilchen enthalten, gemein. Teige verhalten sich fast wie verstärkte Kautschukschmelzen, die bei der Gummierstellung eine große Rolle spielen [12]. Das Mehl besteht dabei aus gemahlenem und gesiebttem Weizen, der mit Wasser zu einem Teig geknetet wird. Dabei werden dessen globuläre Proteine, die Klebereiweiße, herausgelöst und zu Kettenmolekülen entfaltet. Diese Eiweißketten sind sehr lang, sie bestehen etwa aus 10 000 bis 30 000 Aminosäuren und sind extrem gut wasserlöslich. Sie bilden damit das Polymergerüst. Die Stärke hingegen löst sich bei Zimmertemperatur nicht, sie liegt daher in Körnern vor, deren Größe vom Mahlgrad abhängt. Die Stärkekörner bestehen aus hochgradig verzweigten kristallisierten Vielfachzucker-molekülen (Polysaccharide) und weisen daher stark hydrophile Oberflächen aus, die nicht nur Wassermoleküle binden können, sondern auch die Eiweißketten. Somit ist die faszinierende Teig rheologie durch eine

ganze Reihe molekularer Parameter gegeben. Abgesehen von der Bewegung der Eiweißketten im Lösungsmittel Wasser und der Kinetik der Wasserstoffbrückenbindungen spielen also die Kontaktenergien und das Adsorptions- und Desorptionsverhalten der Proteinketten an diesen „Füllstoffen“ aus Stärke eine herausragende Rolle.

Spannende Küchenphysik ist oft mehr als Spielerei. Viele ihrer Fragen sind auch für die Nahrungsmittelindustrie relevant. Sei es die Entwicklung besonders effektiver und natürlicher Emulgatoren aus Proteinen, die Polymerphysik des Teigs bei der industriellen Teigwarenproduktion oder die Entwicklung neuer Garverfahren, die auf molekulare Eigenschaften besonders eingehen. „Molekulargastronomie“ ist ohnehin nur ein Teil der Physik oder besser Wissenschaft weicher Materie, denn in kaum einem anderen Gebiet müssen die Grenzen zwischen Physik, Chemie, Biologie und Materialforschung so oft übersprungen werden.

*

Der Autor dankt Dr. I. Lieberwirth und Gunnar Glaßer für wertvolle Unterstützung.

Literatur

- [1] J. D. Ferry, *Viscoelastic Properties of Polymers*, 3. Aufl., John Wiley & Sons, New York (1980)
- [2] H. McGee, *On Food and Cooking*, Scribner, New York (2004)
- [3] H. This, *Rätsel und Geheimnisse der Kochkunst*, Piper, München (2003)
- [4] P. Barham, *Die letzten Rätsel der Kochkunst*, Springer, Heidelberg (2003)
- [5] T. Vilgis, *Die Molekül-Küche*, S. Hirzel Verlag, Stuttgart (2005)
- [6] T. Vilgis, *Wissenschaft al-dente*, Herder Verlag, Freiburg (2007)
- [7] P. G. de Gennes, *Simple Views on Condensed Matter*, World Scientific, Singapore (2003)
- [8] J. L. Barat und J. F. Joanny, in: *I. Prigogine und S. A. Rice (Hrsg.), Adv. Chem. Phys.* **94**, 1 (1996)
- [9] N. Lee und T. A. Vilgis, *Eur. Phys. J. B* **28**, 415 (2002)
- [10] J. Wilder und T. A. Vilgis, *Phys. Rev. E* **57**, 6865, (1998)
- [11] A. Corsi, A. Milchev, V. G. Rostishvili und T. A. Vilgis, *Food Hydrocolloids* **21**, 870, (2007)
- [12] T. Vilgis und G. Heinrich, *Physikal. Blätter*, Juni 2001, S. 67

Bildnachweise:
Eric Lichtenscheid (5),
Iser&schmidt (2)

#) vgl. Physik Journal,
März 2007, S. 74

DER AUTOR

Thomas Vilgis beschäftigt sich schon seit langem mit der statistischen Physik von Polymeren und anderer weicher Materie, aber auch mit Gläsern und amorphen Materialien. Er studierte in Ulm, war Postdoc am Cavendish Laboratory in Cambridge und am Imperial College in London und arbeitete 1999 und 2000 in Strasbourg am Laboratoire Européen Associé. Vilgis widmet sich ebenfalls anwendungsorientierten Fragen wie Superabsorbentern oder Elastomeren. Der Sprung von der Physik der Autoreifen bis zum ungenießbar zähen Schnitzel ist physikalisch (wenn auch nicht gastronomisch) ohnehin klein. So ist es für ihn nahe liegend, die Theorie weicher Materie mit einschlägigen Experimenten in der Küche (z. B. kürzlich im Physikzentrum Bad Honnef[¶]) und in den Labors des MPI für Polymerforschung zu verbinden.

