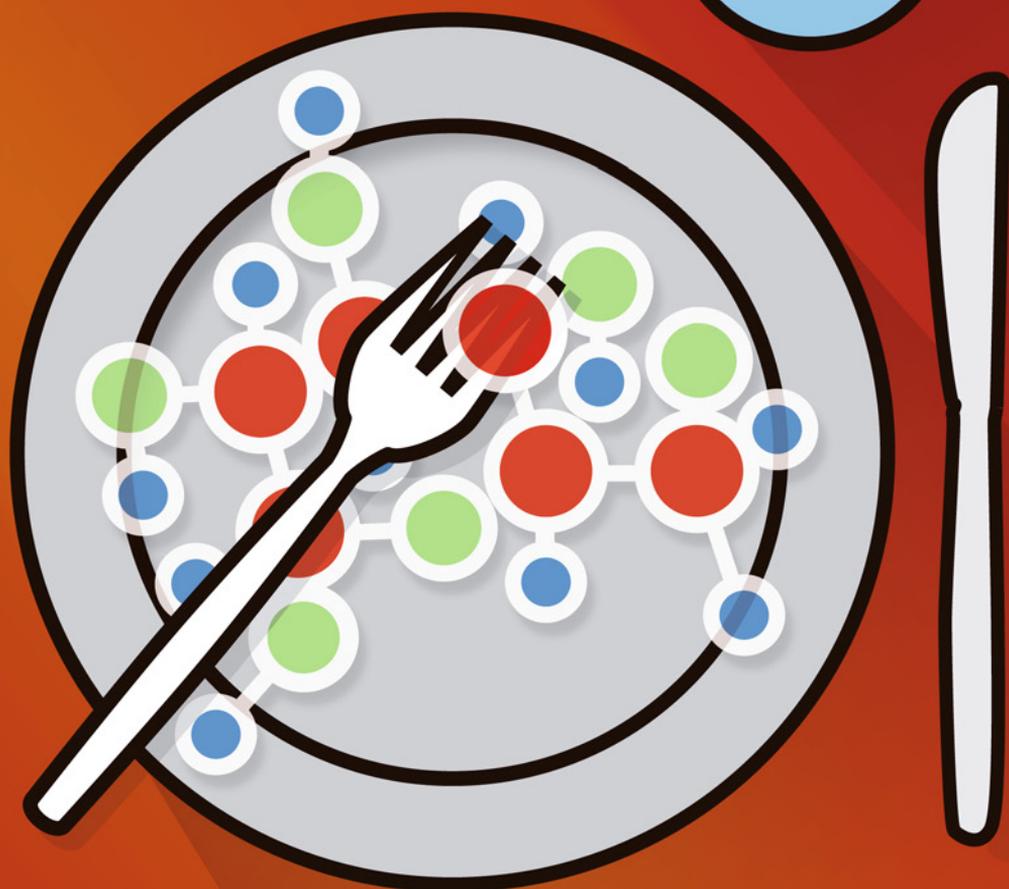


Das

Thomas Vilgis

Molekül-Menü

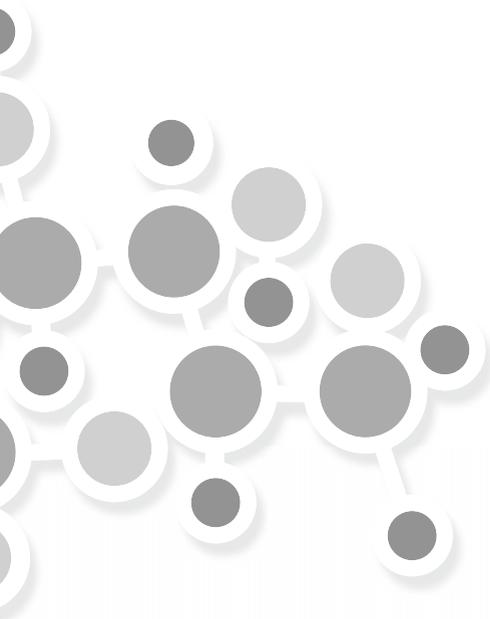
Molekulares Wissen
für kreative Köche

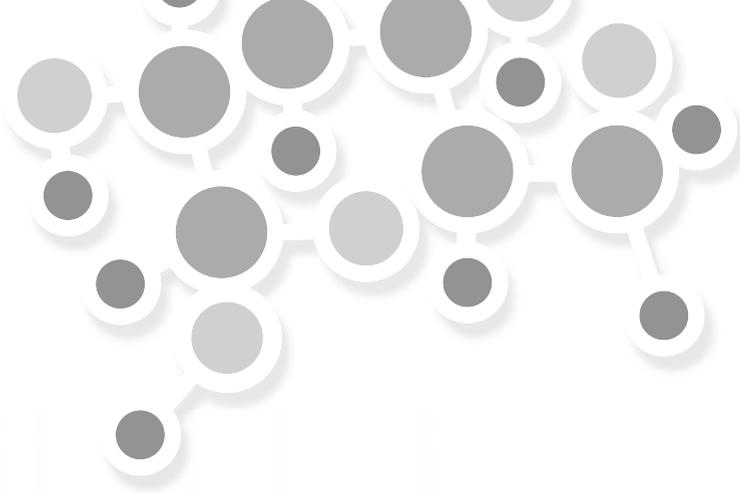


HIRZEL



Thomas Vilgis
Das Molekül-Menü

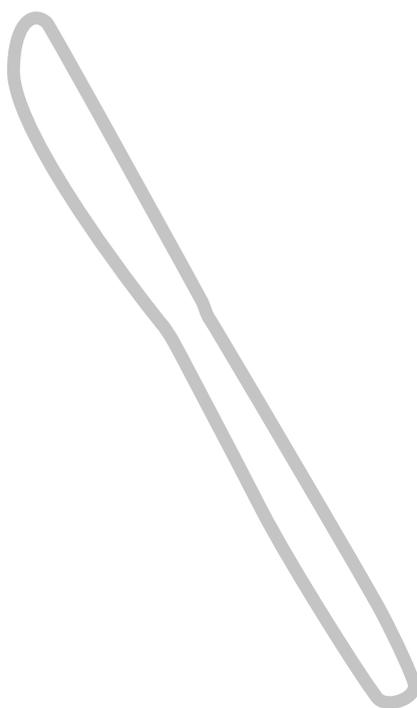




Thomas Vilgis

Das Molekül-Menü

Molekulares Wissen für kreative Köche



S. Hirzel Verlag

Ganz herzlich danke ich

den Mitarbeitern der „soft matter food science“ am Max-Planck-Institut in Mainz: Herrn Felix Bröcker, Herrn Dipl. Chem. Johannes Fickert, Herrn Dr. David Nordqvist, Frau Natalie Russ, Frau Dr. Birgitta Schiedt, Dipl. Chem. Gustav Waschatko für viele Diskussionen, Hilfestellung und Experimente zu den verschiedensten Themen, den vielen Mitarbeitern der „soft matter theory“ am Max-Planck-Institut für wertvolle Anregungen, dem Mitherausgeber des Journal Culinaire, Herrn Martin Wurzer-Berger, Münster, für viele kulturkulinarische Gespräche, die meist weit in die Kulinaristik hinein führten,

dem Sternekoch Herrn Joachim Wissler und seiner Brigade für tiefe Einblicke in Küche und Kochkunst, meiner Frau Barbara, die alle (auch die „misslungenen“) Experimente in der heimischen Küche mit aufisst, die Manuskripte korrekturliest und auch in misslichen Lagen immer einen praktikablen Rat auf Lager hat.

Ganz besonderer Dank gebührt meinem Vater, der mich von Beginn an lehrte, die kleinen Dinge des Lebens zu achten, zu schätzen, zu lieben und zu bewahren. Ihm ist dieses Buch gewidmet. Es hätte ihn gefreut, es noch in den Hände halten zu dürfen.

Ein Markenzeichen kann warenrechtlich geschützt sein, auch wenn ein Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlt.

Bibliografische Information
der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-7776-2108-1

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzungen, Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

© 2011 S. Hirzel Verlag
Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart
Printed in Germany
Einbandgestaltung: deblik, Berlin
Layout, Satz und Illustrationen: schreiberVIS, Seeheim
in Zusammenarbeit mit E. Göpfert und Th. Wadewitz
Druck & Bindung: Kösel GmbH & Co. KG, Krugzell

www.hirzel.de

Inhalt

Ein paar Gedanken vorab	7
-------------------------	---

Basisstoffe

Wasser und seine Geheimnisse	13
--	----

Wein Aromenwunder, Lösungsmittel, Küchenhelfer	23
--	----

Fett kulinarische Physik und Chemie par excellence	33
--	----

Zucker Materialforschung für Schleckermäulchen	59
--	----

Kohlenhydrate Stärke für Saucen und andere Speisen	75
--	----

Hydrokolloide molekulare Küchenhelfer	91
---	----

Mit Lebensmitteln umgehen

Das Ei

Modellsystem für komplexe Nahrungsmittel 117

Verbindung der Gegensätze

Emulsionen und Schäume 133

Gemüse

Farben für alle Sinne 141

Rund um die Kartoffel

Kochen, Braten und Frittieren 149

Fleisch

vom Schlachten zur Reifung 173

Fleisch zubereiten

und genießen 199

Sous-vide-Garen

Theorie, Methodik, Geschmack 225

Ein paar lose Gedanken danach

243

Anhang

249

Zum Weiterlesen

281

Bild- und Quellennachweis

287

Register

289

Ein paar Gedanken vorab

Essen und Genießen – ein weites Feld

Wenn heute die Sprache allgemein auf Essen und Trinken kommt, fällt vielen zuallererst der Begriff Ernährung ein. Oft verbinden sie damit die Fragen: Was ist schädlich? Was ist überhaupt genießbar? Kein Wunder, wenn man ständig allerlei über gesättigte Fette, Emulgatoren, Stärkeabbauprodukte, Glutaminsäure oder Zuckeraustauschstoffe lesen muss. Dabei ist das Entscheidende keinesfalls, sich über einzelne Inhaltsstoffe den Kopf zu zerbrechen, viel wichtiger ist ein tieferes Verständnis für Essen, Kochen und die Zubereitung von Speisen zu entwickeln. Viele Diskussionen lassen sich überhaupt nur dann vernünftig führen. Vernünftig heißt vor allem objektiv und frei von Vorurteilen, vor allem frei von Ideologie.

Gerade das scheint ein immer größeres Problem zu werden. Eine kleine Provokation gefällig? Wer von Ihnen, verehrte Leser, assoziiert z.B. mit den Begriffen „Mono- und Diglyceride aus Speisefetten“ (E 471) Abscheu? Vermutlich wissen Sie dann nicht, was diese Ausdrücke wirklich bedeuten, obwohl diese Emulgatoren in vielen Supermarktprodukten stecken und obwohl alle, die Convenienceprodukte im Kühlschrank haben, sie auch oft genug verspeisen. Die Verunsicherung ist groß, das Vertrauen in Lebensmittel zerstört. Mit Freude und Gesundheitsbewusstsein verzehrt man vielleicht – guten Gewissens – gerade noch eine saftig reife Birne, denn das ist doch Natur pur. Allerdings ohne

dabei zu ahnen, dass mit jedem Bissen hohe Konzentrationen von Emulgatoren, Zuckeraustauschstoffen und unverdaulichen Hydrokolloiden und Cellulosen aufgenommen werden.

Damit ist ein Ziel dieses Buchs bereits festgelegt: Fakten über Essen, Kochen und Zubereitung zu vermitteln, und zwar auf der grundlegendsten Ebene – der Physik, Chemie und Biologie von Lebensmitteln. Die Naturwissenschaften haben einen großen Vorteil: Fakten lassen sich überprüfen und abschreckend klingende Begriffe lassen sich mit Leben und Verständnis füllen. Damit wir wissen, wovon wir und andere reden.

Was will dieses Buch?

Dieses Buch soll ein paar der wichtigsten Grundlagen schaffen, mit Lebensmitteln umzugehen. Diese liegen in der Chemie, in der Physik und vor allem in der Biologie der Lebensmittel verborgen. Wirklich Chemie? Genau, denn ein Essen ohne Chemie gibt es nicht, genauso wenig, wie es eine Biologie ohne Gene gibt. Jedes Lebens- und Genussmittel ist aus Molekülen aufgebaut und diese werden nun einmal mit chemischen Formeln beschrieben. Weil die Natur, also die Gene der Pflanze oder des Tieres, diesen Molekülen eine Funktion mit auf den Weg gab, ist es wichtig, diese zu erkennen, denn dabei erfährt man nicht nur etwas über Biochemie und Physik, sondern auch über das Lebensmittel selbst. Vor allem aber bestimmen die Moleküle den Umgang mit Lebensmit-

teln in der Küche und die Zubereitungs- und Kochtechnik.

Leben ohne Wasser ist nicht möglich – dieser Lehrsatz der Biologie bleibt aber ohne Inhalt, wenn es nicht gelingt, den Begriff „Wasser“ mit physikalischen Inhalten zu füllen. Was in dem kühlen Nass H_2O wirklich steckt, steht bisher nicht in aller Vollständigkeit in Lehrbüchern. Grund genug, Wasser (in der Küche) gleich zu Beginn des Buchs ausreichend zu würdigen, begleitet von einem Einblick in die vielen offenen Fragen, an deren Beantwortung Physiker und Chemiker Hand in Hand arbeiten.

Da es in diesem naturwissenschaftlichen Buch aber auch um hohen Genuss geht, wird „Wein“ subito nachgeschoben. Wein offenbart bereits viele Prinzipien der Kulinarik auf molekularer Ebene: Trotz der unterschiedlichen (molekularen) Eigenschaften von Wasser und Alkohol potenzieren beide Lösungsmittel für verschiedene Aromen den Genuss, indem sie sich mischen. Alkohol löst viele Aromen und Zucker. Im Wein vereinen sich daher schon Gegensätze.

Fett und Zucker wiederum sind grundlegende Substanzen in der Biologie – sei es als Triebfeder oder Energiespeicher des Lebens, sei es als Feinde Nummer eins und zwei der ErnährungsberaterInnen. Um viele Thesen und Aussagen überhaupt zu verstehen, ist es notwendig, sich mit Fett und Zucker auseinanderzusetzen. Schnell stellen wir fest: Fett ist weit mehr als vermeintlich ungesund und Zucker weit mehr als nur süß. Ist die Funktion dieser Moleküle erst einmal verstanden, verliert sich die Angst davor – und als Nebenprodukt offenbaren sich ganz neue Küchen- und Geschmackswelten.

Ebenso steht es mit Stärke und anderen Kohlenhydraten. Wissen wir tatsächlich, was sich hinter diesem Begriff versteckt, oder denken wir nur noch an Diät, ohne zu begreifen, was uns täglich um die Ohren gehauen wird? In welcher Weise Begriffe wie „Glykämischer Index“ tatsächlich mit molekularen Strukturen, Spaghetti al dente und den thermischen Eigenschaften von Stärke zusammenhängen, er-

klärt kaum jemand. Stattdessen werden wir mit Schlagworten und vermeintlichem Wissen im wahrsten Sinne des Wortes abgeseigt.

Das Wort „Hydrokolloide“ leidet darunter, dass es nach Labor und Reagenzglas klingt. Dahinter verbergen sich allerdings nichts weiter als Binde- und Geliermittel, etwa Fermentationsprodukte wie Xanthan, aber auch der Pflanzenzellstoff Pektin. Die physikalische Wirkung dieser unverdaulichen Polysaccharide wird in einem weiteren Kapitel genauer untersucht, zumal sie in vielen Lebensmitteln zu finden sind.

Nach diesen Grundlagen geht es zum Ei, schließlich ist das schlichte Hühnerei etwas ganz Besonderes. Es dient zum einen als Modellsystem für das Garen proteinreicher Lebensmittel, zum anderen erzählt es aber auch viel über die Physik lebender Systeme. Wer denkt beim Eigelb nicht zwangsläufig an Cholesterin und böses LDL und gutes HDL? Aber wer weiß schon, was sich hinter diesen Begriffen wirklich verbirgt? Auch das Eiklar hat es in sich. Abgesehen davon, dass sich damit die tollsten Gerichte und traumhafte Schäume zaubern lassen, steht Eiweiß immer im Verdacht, Allergien auszulösen. Manche Eiweiße mehr, manche weniger. Aber warum, und wie lässt sich dies verstehen? Und überhaupt, warum reagiert man auf rohe Äpfel allergisch und auf gekochte nicht? Liegt das etwa an der Eiweiß- oder Proteindenaturierung?

Alle reden von Obst und Gemüse. Es sei gesund, es versorge den Körper mit wichtigen Inhaltsstoffen. Derartige Sätze bleiben leer, wenn sie nicht mit Zusatzinformation gefüllt werden. Warum sind viele Pflanzenfarbstoffe Antioxidantien? Und wo sitzen sie in den Gemüsen? Gibt es einen Unterschied von Wurzel- und Blattgemüse? Geben uns die Farben auch Hinweise auf Kochtechniken? Oder müssen wir das Gemüse ausschließlich roh verzehren, damit alle Inhaltsstoffe „sicher und unverändert in unsrem Blutkreislauf landen“? Antwort auf diese Fragen finden wir weniger in Diätbüchern als in einer nüchternen Betrachtung der Farbstoffchemie.

Schließlich landet noch Fleisch auf dem Teller. Aber wie bereiten wir es zu? Was ist Fleisch? War Fleisch nicht einmal zu Lebzeiten ein Muskel? Was lernen wir daraus? Denaturieren beim Garen von Fleisch wirklich Proteine? Natürlich, keine Frage, aber welche von den vielen? Und bei welchen Temperaturen?

Fragen über Fragen, die logischer und wenn möglich widerspruchsfreier Antworten bedürfen, die zuallererst nur die Naturwissenschaften geben können. Begeben wir uns also auf eine längere Reise in die molekulare Welt der Lebensmittel und des Kochens. Langweilig wird es nicht, denn vieles, was uns alltäglich erscheint, lässt tiefer blicken, als wir zunächst erahnen. Und so eröffnen sich ganz neue, tiefere Zusammenhänge, die uns immer weiter führen. Tiefer hinein ins Kochen, und plötzlich verlieren wir alle Angst vor Schlagwörtern oder komplizierten Tellern, die in hochwertigen Gastronomiefachmagazinen abgebildet sind. Es ist letztlich viel einfacher als man denkt.

Die Marschrichtung des Buchs ist damit klar: Wir müssen betrachten, was auf den Tisch kommt: Wasser, Wein, Fett, Zucker, Stärke, Proteine, Gemüse, Fleisch. Eine ganze Menge, aber dies ist nur eine kleine Auswahl. Dennoch wird sie uns auf den nächsten 270 Seiten ausführlich beschäftigen. Vorwiegend naturwissenschaftlich.

Übrigens: Während Sie diese Einleitung lesen, waren (und sind) Ihre fettspaltenden Enzyme, die Lipasen, extrem fleißig. Die mit der letzten Mahlzeit zugeführten „Speisefette“, oder appetitlicher ausgedrückt: Olivenöl, Kernöl, Rohmilchbutter usw., wurden und werden ungebroschen verändert. Dabei entstehen natürlich jede Menge Mono- und Diglyceride und im gleichen Maße freie Fettsäuren. Sie bilden Mizellen, emulgieren Verdauungsprodukte, und landen in Ihren Zellmembranen. In Ihrem eigenen Körper. Und das ist auch gut so.

Basisstoffe



Wasser
und seine Geheimnisse



Wein
Aromenwunder, Lösungsmittel,
Küchenhelfer



Fett
kulinarische Physik und Chemie
par excellence



Zucker
Materialforschung
für Schleckermäulchen



Kohlenhydrate
Stärke für Saucen
und andere Speisen



Hydrokolloide
molekulare Küchenhelfer

Wasser

und seine Geheimnisse



Warum ist Wasser wichtig?

Alle Köche kochen mit Wasser. Diese nun wirklich abgedroschene Phrase mag einem überflüssig vorkommen, wenngleich dieser Satz eine ganze Reihe physikalisch-chemischer und vor allem biologischer Weisheiten beinhaltet. Ohne Wasser wäre eine gute Küche gar nicht vorstellbar. Schließlich ist Wasser nicht nur Durstlöscher, sondern in erster Linie die Basis vieler Gerichte, selbst wenn wir an Milch, Wein oder Saucen denken, deren Hauptkomponente Wasser ist. Grund genug, Wasser als Küchenzutat Nummer eins genauer zu ergründen.

Selbst in der Physik und Chemie sind viele Fragen um das Wasser noch offen. Nur eines ist Wasser ganz bestimmt nicht: Zaubermittel und Geheimnisträger, wie es immer wieder gern

von Esoterikern behauptet wird. Sind diese Spinnereien überhaupt der Rede wert? Eigentlich nicht, aber sie führen uns direkt zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers, die wir wirklich benötigen, um damit in der Küche vernünftig zu arbeiten.

Was steckt nun aber wirklich hinter Wasser? Was sind seine physikalischen und chemischen Eigenschaften und weshalb spielt es in der Molekularbiologie eine derart zentrale Rolle? Für ein tieferes Verständnis ist ein Ausflug in die molekulare Welt des Wassers unerlässlich. Das „Element“ Wasser, bestehend aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom, weist eine ganze Reihe außergewöhnlicher Eigenschaften auf, die für alle Naturwissenschaften, also Biologie, Chemie und Physik gleichermaßen, von grundlegender Bedeutung sind. Somit

Mythos Wasser?

Begibt man sich mit dem Stichwort „Wasser“ ins Internet, stößt der neugierige Surfer schnell auf allerhand Unterhaltsames: „Ich nutze selbst seit einigen Jahren Osmosewasser, das ich aus einer Umkehr-Osmose-Anlage beziehe, und bin so zufrieden damit, dass ich es gerne weiterempfehle.“ Oder: „Ein Blick in den Wasserkocher genügt, um zu wissen, dass unser Leitungswasser vielleicht gereinigt, aber nicht optimal ist. Der Kalk, der sich in Haushaltsgeräten absetzt, lagert sich natürlich auch in unserem Körper und dort bevorzugt in den Gefäßen ab. Unser Bügeleisen füllen wir mit destilliertem Wasser, um seine Funktionszeit zu verlängern. Und was ist mit unserem Körper? Wenn Sie Ihren Körper vor Verkalkung schützen wollen, sollten Sie lebendiges mineralarmes Wasser trinken.“

Oder auch „dass Wasser Information speichern kann und dass diese auf unseren Körper wirkt, wenn wir es berühren oder zu uns nehmen, belegen seit Jahren etliche Messungen mit energetisiertem Wasser bzw. Blütenessenzen. In unserer neuen Untersuchung wird jedoch erstmals nachgewiesen, dass die niederenergetische Bioinformation, die ein bestimmtes Wasser enthält, mit unserem Körper auch durch eine Wand hindurch und über eine Dis-

tanz von einigen Metern wechselwirkt, und zwar so, dass Körperfunktionen unmittelbar messbar verändert werden.“ Schwer zu glauben, doch der Erfolg, mit dem bestimmte Anbieter ihre Wasserenergetisierer, Verwirbler oder andere nutzlose, aber teure Spielereien verkaufen können, scheint ihnen Recht zu geben. Wasser wird nicht mehr nur zur täglichen körperlichen Grundversorgung genutzt, sondern birgt offenbar auch viel Mystisches und Übersinnliches. Das liegt vermutlich daran, dass es als Symbol der Reinheit in allen Kulturen stets einen besonderen Stellenwert genoss und auch in den meisten Religionen, etwa bei Taufen und anderen Riten, eine exponierte Rolle spielt.

Damit nicht genug, denn viele dieser aus entsprechenden Internetseiten zitierten Aussagen werden gern von „Predigern“ der ganz besonderen Art verbreitet, die sich eigens einen unberechtigten wissenschaftlichen Anstrich verpassen, um einerseits glaubwürdiger zu wirken und andererseits mehr Leichtgläubige um sich zu scharen. Tatsächlich zeugen all diese nun wirklich dummen Sätze von wenig naturwissenschaftlichem Verstand, geschweige denn von Kenntnis der elementaren physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers.

auch für das Kochen und Hantieren in Küchen. Mystische oder gar esoterische Eigenschaften können dem Wasser allerdings nicht zugeschrieben werden (siehe Kasten).

Die molekulare Struktur des Wassers

In allen Wissenschaftszweigen übt Wasser seit je eine besondere Faszination auf jene aus, die sich damit beschäftigen – ist es doch die notwendigste aller Verbindungen für Lebensformen unter den auf der Erde herrschenden Bedingungen. Im Jahr 1741 benutzte der schwedische Physiker Anders Celsius die Spanne zwischen Gefrier- und Siedepunkt des Wassers als Maßstab für seine Temperaturskala. Den Gefrierpunkt definierte er als 0°C und den Siedepunkt (unter Normaldruck) als 100°C .

Damit ist Wasser die einzige Flüssigkeit, die in unserer Klimazone mit ihren komfortablen Temperaturen in all ihren drei Aggregatzuständen – fest, flüssig, gasförmig – vorkommt.

Bei ihren gezielten Forschungen gelangten Wissenschaftler aller Disziplinen schnell zu der Erkenntnis, dass Wasser tatsächlich eine Flüssigkeit mit besonderen Eigenschaften ist. Nach und nach fanden diese Besonderheiten unter dem Begriff „Anomalien des Wassers“ Eingang in die Schulbücher. Warum ist beispielsweise Eis, die feste, kristalline Form des Wassers, leichter als die Flüssigkeit, aus der es besteht? Warum stößt man bei der Vielfalt der Gestalt von Schneeflocken immer auf eine sechseckige Symmetrie? Warum weist Wasser, wenn es unter komplizierten, sorgfältig reproduzierbaren Laborbedingungen unter 0°C so unterkühlt wird, dass es flüssig bleibt, zwei verschiedene Phasen auf, in denen ein beliebig herausgegriffenes Wassermolekül in der einen Phase von vier und in der anderen von fünf Wassermolekülen umgeben ist? Warum bildet Wasser unter veränderten physikalischen Randbedingungen wie Druck und Temperatur derart viele physikalisch unterscheidbare Strukturen und Kristallformen? In der Tat: Die physikalischen Eigenschaften von

Wasser sind extrem vielfältig und führten schon allein aus diesem Grund zu wilden Spekulationen (siehe Anhang, Seite 250).

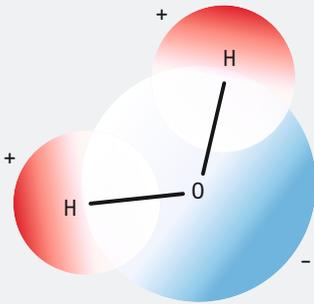
Wasser, H_2O , verbindet zwei Wasserstoffatome mit einem Sauerstoffatom. Mitunter sogar schlagartig, wie manchem aus dem Chemieunterricht vom Experiment mit Knallgas noch erinnerlich sein dürfte. Sobald die richtigen Konzentrationen von Wasserstoffgas und Sauerstoff (2 : 1) zusammengefügt und dieses Gemisch mit einer Flamme entzündet wird, reagieren beide Gase unter einem lauten Knall – ein Zeichen dafür, dass bei dieser Reaktion eine gewaltige Menge Energie frei wird. Sauerstoff und Wasserstoff reagieren zu Wasser, dessen Molekülstruktur für viele seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften verantwortlich ist. So ist das Wassermolekül nicht linear, sondern gewinkelt; Wasser- und Sauerstoffatome sind nicht in einer geraden Linie angeordnet. Dieser Winkel ist durch die quantenmechanischen Gegebenheiten genau festgelegt. Atome bestehen immer aus einem Atomkern und ihn umgebenden Elektronenhüllen, allerdings sind diese Hüllen nicht einfach strukturlose Elektronenwolken, sondern folgen genauen Gesetzmäßigkeiten, und es gibt bestimmte Bereiche, in denen sich Elektronen mit höherer Wahrscheinlichkeit aufhalten als in anderen. Diese Bereiche heißen Orbitale. Ihre Gestalt ist aber beim Sauerstoff anders als beim Wasserstoff, was vor allem an der jeweiligen Anzahl bindungsfähiger Elektronen (Valenzelektronen) in den Atomen liegt: beim Wasserstoff nur eines, beim Sauerstoff sechs.

Reagieren die Atome chemisch miteinander, müssen sich im entstehenden Molekül ihre Elektronen in neuen Orbitalen verteilen, und zwar unter Einhaltung vieler Regeln und Prinzipien. Beispielsweise darf es in einem Orbital keine zwei Elektronen mit exakt dem gleichen Energiezustand geben (Pauli-Prinzip). Im Wassermolekül müssen sich die Elektronen in den Orbitalen so zurechtschütteln, bis alle quantenphysikalischen Kriterien erfüllt sind und die optimale Gestalt des Moleküls erreicht ist. Da-

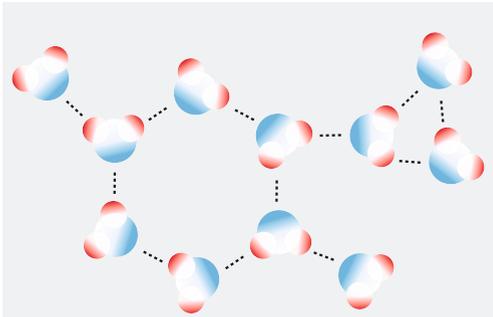
bei wird zwischen H–O–H ein Winkel von ca. $104,5^\circ$ gebildet.

Diese Winkelbildung hat eine wesentliche Konsequenz: Die Elektronen um das Wassermolekül sind nicht mehr gleichmäßig verteilt, sondern sammeln sich mit höherer Wahrscheinlichkeit um den Sauerstoff. Wenn aber die Elektronen aus quantenmechanischen Gründen viel lieber um den Sauerstoff verteilt sind, müssen sich im Wasserstoffwinkel zwangsläufig weniger befinden, also hat man eine leicht negativ und eine leicht positiv geladene Seite. Deshalb ist dieses Molekül „polar“.

Die negative Ladung findet sich um den Sauerstoff herum und ein leichter Elektronenmangel, also ein Hauch positiver Ladung, auf der Wasserstoffseite. Da dies bei jedem Wassermolekül gleich ist und sich verschiedene Ladungen anziehen, wird bei Wassermolekülen, die sich nahe kommen, eine „Dipolwechselwirkung“ spürbar – zumindest für sehr kurze Zeitspannen und bei nicht allzu schneller Bewegung der



▲ **Wasser ist dipolar:** Seine „Wasserstoffseite“ ist schwach positiv „geladen“, seine „Sauerstoffseite“ leicht negativ. Das Dipolmoment, also der auf einen gewissen Abstand verteilte Ladungsunterschied, ist relativ hoch. Dadurch richten sich die Wassermoleküle in elektromagnetischen Feldern auf bestimmte Weise aus. Diese fundamentale Eigenschaft der Wassermoleküle ist keine theoretische Spielerei: Die Mikrowelle macht reichlich Gebrauch davon. Wassermoleküle lassen sich in wechselnden elektromagnetischen Feldern schnell ausrichten.



▲ Aufgrund der **dipolaren Wechselwirkung** kommt es zur Bildung von Verbänden einzelner Wassermoleküle, den Clustern, die regelmäßige und irreguläre Elemente besitzen können. Da sich die Wassermoleküle extrem schnell bewegen, ist die Form des Clusters extrem kurzlebig. Hier ist also lediglich eine „Schnappschussaufnahme“ gezeigt, die für die Dauer von 0,000 000 000 001 Sekunden Bestand hat.

Moleküle. Die beiden elektrisch unterschiedlich geladenen Seiten des Wassers bilden also eine bestimmte Art molekularer Wechselwirkung, die Wasserstoffbrückenbindung genannt wird. Diese Brücken können selbstverständlich viele Wassermoleküle umfassen und große Verbände, sogenannte Cluster bilden. Doch auch kleinere Verbände von nur wenigen Molekülen gruppieren sich zu fast regelmäßigen Strukturen. Demzufolge existieren auch im flüssigen Wasser immer wieder bestimmte Strukturen – was allerdings nicht zu Trugschlüssen führen sollte, doch dazu später mehr.

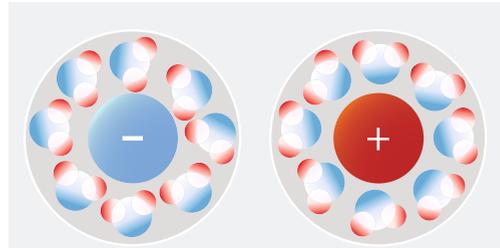
Natürlich ist diese Dipolwechselwirkung, die für das gegenseitige Zurechtschütteln und Orientieren der Wassermoleküle verantwortlich ist, stark temperaturabhängig. Die Tetraederstrukturen – oft fälschlicherweise als „Wassergitter“ bezeichnet – bilden sich eher bei tieferen Temperaturen, bei denen die Molekülbewegung entsprechend langsam ist, vorwiegend sogar bei Unterkühlung des Wassers unter den Gefrierpunkt. Über 0°C zerstört sich die lokale Ordnung mit steigender Temperatur schnell. Der Grund dafür ist einfach: Die Bewegungsenergie

der Wassermoleküle ist schon so hoch, dass diese von der schwachen Wasserstoffbrückenenergie nicht mehr festgehalten werden können. Denn bei höherer Temperatur bewegen sich die Moleküle schneller, bei niedriger dagegen etwas weniger rasch, was zur Folge hat, dass sie sich dichter packen können. Allerdings erreicht das Wasser bei 4°C seine höchste Dichte (spezifisches Gewicht), weil hier ein Gleichgewicht von Bewegungsenergie und Dipolwechselwirkung ausgebildet wird. Deshalb schwimmt Eis immer auf dem Wasser, da es stets eine geringere Dichte besitzt.

Auf ganz ähnliche Weise zeigen sich weitere Anomalien des Wassers, etwa die Druckanomalie, die jeder Eisläufer beim Schlittschuhlaufen erfährt: Durch den hohen Druck seiner Kufen bringt er das Eis zum Schmelzen, gleitet also mit geringer Reibung auf einem Wasserfilm zwischen Schlittschuh und Eis dahin. Bei vielen anderen (nicht-wässrigen – und somit unpolaren) Flüssigkeiten wäre es genau umgekehrt: Sie werden unter Druck fest und bilden Kristalle. Aber auch in der Küche spielen die Dipoleigenschaften eine weit grundlegendere Rolle, als es von dieser quantenchemischen Gegebenheit zunächst erwartet wird, etwa beim Salzen von Suppen oder Brühen.

Salz und Wasser

Die Dipoleigenschaft des Wassers hat eine ganze Reihe weiterer Konsequenzen, die für die Anwendung in der Küche und für den Genuss wichtig sind. Zum einen können nur solche Stoffe in Wasser gelöst werden, die für derartige elektrische Ladungen empfänglich sind, also selbst polar, ionisch oder geladen sind – Salz oder Zucker etwa. Lösen wir Speisesalz (NaCl) in Wasser auf, so zerfällt der feste Salzkristall schnell in seine Ionen Na^+ und Cl^- . Dazu docken die Wasserdipole an der Oberfläche der Salzkristalle an und lösen mit ihrer Dipolwechselwirkung die einzelnen Ionen heraus, bis letztlich der gesamte Kristall aufgelöst ist. Dass dies so leicht funktioniert, ist weder ein Wun-



▲ Im Wasser **gelöste Salze** zerfallen in ihre positiven und negativen Ionen. Je nach Ladung orientieren sich die Wassermoleküle aufgrund ihrer Dipolausrichtung unterschiedlich um die Ionen und hüllen sie ein. So entstehen Hydrathüllen, auch Hydratschalen genannt.

der noch Esoterik, sondern schlichte Physik: Die Salzionen können sich nach dem Lösen frei bewegen, sind also nicht im Kristallgitter eingesperrt – ein weit angenehmerer Zustand, weil damit Freiheit und mit dieser Entropie gewonnen wird. Die Salzionen verteilen sich gleichmäßig im Wasser, damit der Entropiegewinn maximal wird. Der Begriff Entropie definiert den „Grad der Unordnung“. Liegen beispielsweise alle Ionen auf wohldefinierten Punkten in regelmäßig geordneten Salzkristallen fest, so ist die Unordnung – und damit die Entropie – gering. Lösen sich die Kristalle dagegen im Wasser auf, können die Ionen in der Lösung uneingeschränkt umherschweben. Diese Bewegungen sind vollkommen unregelmäßig, die genauen Aufenthaltsorte der Ionen sind praktisch zufällig, daher ist jetzt die Unordnung – und damit die Entropie – hoch.

Allerdings ist dieser Prozess nicht ganz so simpel, denn die positiv geladenen Natrium- und die negativ geladenen Chlorionen scharen Wassermoleküle in der entsprechenden Orientierung um sich und hüllen sich mit ihnen ein. Dadurch bildet sich eine sogenannte Hydrathülle. Viele Wassermoleküle sind folglich aus rein physikalischen Gründen an die Salzionen als deren Hydrathülle gebunden. Zwar nicht im Sinne einer festen starren Bindung, doch so-

bald ein Wassermolekül die Hülle verlässt, wird es umgehend durch ein anderes ersetzt.

Die Hydrathülle hat weitreichende Folgen – sowohl physikalische als auch körperlich spürbare. Zunächst zu den physikalischen Konsequenzen. Jeder kennt die Regel: Gleiche Ladungen stoßen sich ab, entgegengesetzte ziehen sich an. Natürlich hängt dies davon ab, wie weit die beiden Ladungen voneinander entfernt sind. Ist der Abstand größer, so sind die Anziehungs- bzw. Abstoßungskräfte kleiner; sind sie näher beieinander, so sind die Kräfte größer. Dieser physikalische Sachverhalt wird in der Physik mit dem sogenannten Coulombgesetz beschrieben (siehe Anhang, Seite 250).

Was aber passiert, wenn sich zwei Ionen, also geladene Teilchen, in Wasser aufeinander zubewegen? Wir müssen berücksichtigen, dass Wasser dipolaren Charakter hat. Sind die Ionen weiter voneinander entfernt, spielen die Dipoleigenschaften eine untergeordnete Rolle. Wenn sich die Ionen allerdings sehr nahe kommen, wirkt sich die Orientierung des Wassers in den Hydrathüllen deutlich aus. Dann kommt es sehr darauf an, ob die Ionen eine gleiche oder gegensätzliche Ladung tragen. Betrachtet man den Abschnitt zwischen zwei Ionen detaillierter, so ergeben sich, je nach Ladungen, unterschiedliche Aspekte.

Die Wasserdipole können mit zwei Ionen, etwa dem positiven Natriumion oder dem negativen Chloridion interagieren, oder mit je zwei der gleich geladenen Ionen. Solche Ionen stoßen sich gemäß ihrer Ladung ab (gleiche Ladung) oder ziehen sich an (entgegengesetzte Ladung). Wie gerade betont, scharen aber die Ionen Wassermoleküle um sich, und zwar gemäß ihren eigenen Ladungen. So orientieren positiv geladene Ionen Wassermoleküle so, dass ihnen die negative Seite der Wasserdipole näher steht. Bei negativen Ladungen ist es genau umgekehrt. Wenn sich aber diese Ionen näher kommen, so muss sich die Abstoßung bzw. Anziehung gemäß der Wasserhülle modifizieren, und zwar umso stärker, je näher sich die Ionen sind. Die herkömmlichen Vorstellungen von

Ladungsabstoßung bzw. -anziehung werden also bei Ionen im Wasser modifiziert. Diese Fragen lassen sich mit detaillierten Computersimulationen erforschen.

Das alles mag nun wirklich spitzfindig und detailverliebt erscheinen, allerdings sind diese Vorgänge von größter Bedeutung. Später werden uns große Moleküle, etwa Makromoleküle, Polymere oder Hydrokolloide mit vielen Ladungen begegnen, die solche geringen Effekte auf vielfache Weise potenzieren und verstärken. Diese „Makroionen“ können dann eine große Anzahl von Wassermolekülen binden und ausrichten. So werden diese elementaren Überlegungen besonders bei der Wasserbindung von Verdickungs- und Geliermitteln (siehe Seite 94) besonders wichtig. Erst dann wird die Tragweite dieses Sachverhalts aus der Grundlagenforschung deutlich.

Wasser und Kalk

Die Hydrathülle hat, wie bereits angemerkt, auch ernährungsphysiologische Konsequenzen, wie jeder nach dem Genuss eines salzreichen Gerichts, etwa aus Stockfisch, feststellen kann. Am Tag danach scheint das Körpergewicht sprunghaft um 0,5 bis 1 kg anzusteigen – was sich allerdings schnell auf den erhöhten Flüssigkeitsbedarf des Körpers zurückführen lässt. Solange die Natrium- und Chloridionen nicht ausgeschieden sind, binden sie stets eine gewisse Anzahl von Wassermolekülen, die auf der Waage dann eine Gewichtszunahme vortäuschen. Dies funktioniert natürlich nicht nur bei Salz so, auch bei proteinreicher Kost wird durch die polaren und geladenen Aminosäuren viel Wasser gebunden. Die physikalische Grundlage zum Verständnis beider Prozesse ist also dieselbe.

Nun aber zum Calcium, das oben im Zusammenhang mit dem für den Körper angeblich so schädlichen Kalk im Wasser bereits angesprochen wurde. Calcium ist ein zweiwertiges Ion, d. h. es ist im Gegensatz zum Natriumion im Speisesalz zweifach geladen. Das hat zur Folge, dass die Hydrathülle um die Calciumionen

etwas stärker gebunden ist, wenn auch nicht um das Doppelte, wie leichtfertig geschlossen werden könnte; denn sobald die erste Hülle aus Wassermolekülen angesammelt ist, wird dadurch die Ladung des Ions bereits abgeschirmt.

Warum nun der Kalk im Wasser als gesundheitsschädlich verkauft wird, weil sich dessen Calciumionen beim Kochen, also beim Verdampfen, auf dem Boden des Wasserkochers niederschlagen, bleibt nicht nur aus physikalischen Gründen schleierhaft und unverständlich. Es handelt sich dabei jedenfalls um dieselbe Sorte Ionen, die in Milch und Käse in viel größeren Mengen vorkommen und dort als gesundheitsförderlich gepriesen werden. Sie haben für den Aufbau der Knochensubstanz eine immense Bedeutung. Selbst Mineralwasserfabrikanten werben mit einem hohen Calciumgehalt ihrer Produkte. An diesem Beispiel zeigt sich recht deutlich, wie widersprüchlich und wissenschaftlich falsch Pseudoargumente wie das oben zitierte „... wenn Sie Ihren Körper vor Verkalkung schützen wollen ...“ sind, insbesondere wenn dabei, wie öfter zu beobachten, größere Zusammenhänge nicht berücksichtigt werden. Wäre Kalk, also Calcium für die Verkalkung verantwortlich, wären Milch, Joghurt, Käse usw. tabu.

Wasser und Öl

Der Dipolcharakter der Wassermoleküle verhindert auch, dass sich Öle, Fette und andere organische Substanzen in Wasser lösen. Sie sind hydrophob, „wasserfeindlich“, was eine weitere Konsequenz der dipolaren Eigenschaften des Wassers ist. Alle Moleküle, die keinen Dipol besitzen oder in ihrer Molekülstruktur keine elektrische Ladung aufweisen, lösen sich in Wasser kaum. Werden Öl und Wasser zusammengebracht, bilden sich stets große Grenzflächen. Dabei zeigt sich, dass sich zwischen Wasser- und Fettmolekülen stets eine stark ausgeprägte Grenzschicht bildet. Die Moleküle nähern sich einander nur bis auf eine bestimmte Distanz an und berühren sich nicht. Die Abstoßung der

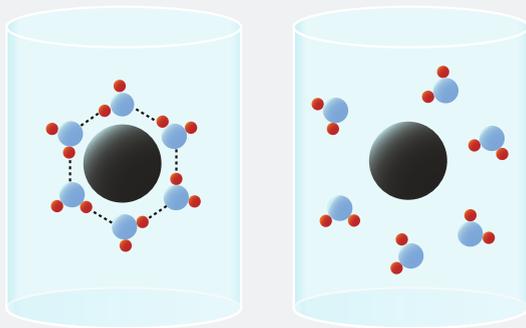
beiden Arten von Molekülen ist mithin extrem stark. Aus diesem Grund müssen die molekularen Erzfeinde Wasser und Öl in der Küche, z. B. bei Mayonnaisen oder Cremes, an ihren Grenzflächen mit Emulgatoren zusammengehalten werden. Auf diese Punkte wird in späteren Kapiteln noch genauer eingegangen.

Einzelne wasserfeindliche Atome wie Edelgase können von Wassermolekülen mit ihren Dipolen in Käfige eingeschlossen werden. Derartige Einschlüsse werden auch „Verunreinigungen“ genannt. Diese Bezeichnung ist allerdings nicht immer negativ gemeint, sondern drückt lediglich aus, dass etwas vorhanden ist, was dort nicht sein soll.

Wasser und Verunreinigungen

Selbstverständlich kann es auch echte Verunreinigungen und Rückstände im Wasser geben. Die Vorstellung, Wasser könne sich an derartige Verunreinigungen oder andere Moleküle, die einmal darin gelöst wurden, „erinnern“ und deren Wirkung an den Wassertrinker weitergeben, basiert auf der Vorstellung eines „Wassergedächtnisses“. Die Ausführungen im vorigen Abschnitt können auch dies sofort als Unsinn widerlegen.

Nehmen wir an, Wasser trüge eine Verunreinigung – das können Salzionen oder polare Moleküle sein, aber auch andere organische, eher hydrophobe Moleküle, die in extrem geringer Konzentration im Wasser „gelöst“ sind. Diese Moleküle werden, sofern sie nicht zu groß sind, von Wassermolekülen umgeben und in einem „Käfig“ eingeschlossen. Die Wassermoleküle schmiegen sich so um molekulare hydrophobe Verunreinigungen, dass sie eine gewisse Anzahl an Wasserstoffbrücken ausbilden können, etwa wie Mädchen im Kindergarten, die sich an den Händen fassen und um einen „ungeliebten“ Jungen herumtanzen. Erst durch diesen „Einschluss“ wird eine an und für sich sehr geringe Konzentration an wasserunlöslichen Stoffen oder hydrophoben Verunreinigungen im Wasser dennoch quasi „gelöst“.



◀ Einzelne **wasserunlösliche Moleküle** können ebenfalls durch eine Hydrathülle gehalten werden. Die Dipolmomente können bei niedrigen Temperaturen die hydrophoben Moleküle umhüllen und sie so im Wasser halten. Bei Temperaturerhöhung brechen die Wasserstoffbrücken auf und geben den „gelösten“ Stoff wieder frei (rechts).

Da es sich dabei jeweils um einzelne kleine Moleküle handelt, ist es sehr schwer, derartige Verunreinigungen vollständig aus dem Wasser zu entfernen. Bei größeren Molekülen ist diese Käfigbildung nicht mehr möglich, denn der Energiegewinn einer Wasserstoffbrückenbindung ist nicht so hoch, dass große Käfige aufrechterhalten werden können. Große hydrophobe Moleküle werden sich daher nicht mehr in Wasser „lösen“, sondern sich an die Luft-Wasser-Grenzfläche setzen, um den Kontakt mit Wasser zu minimieren. Die hydrophoben Verbindungen sind somit „flüchtig“. Ein bekanntes Beispiel ist Buttersäure. Diese kurzkettige Fettsäure (siehe Seite 35) löst sich in Wasser vollständig in allen Konzentrationen. Bei länger-kettigen Fettsäuren ist dieser Käfigschluss nicht mehr möglich, die Fettsäuren lösen sich nicht mehr.

Der Einschluss in „Wasserkäfigen“ ist allerdings sehr fragil. Bei höherer Temperatur werden auch die Käfige um die Buttersäure aufgebrochen und sie wird leichter flüchtig. Die Bewegungsenergie der Moleküle ist dann höher als die Bindungsenergie der Käfigdipole.

Die Verunreinigung würde dem Wasser also nur sehr lokal ein bestimmtes Strukturmuster aufprägen. Die Wassermoleküle richten sich so aus, dass sie die Verunreinigung umschließen und damit die maximale Anzahl von Wasserstoffbrücken bilden. Natürlich bestimmt damit auch die Ausrichtung der Hydrathülle die Ori-

entierung der nächsten Schicht von Wassermolekülen und somit die Form und Orientierung von deren Cluster. Allerdings nur bei nicht zu hoher Temperatur, denn sonst steigt die kinetische Energie der Moleküle. Sie werden dann schneller und der durch Wasserstoffbrücken erhaltene Käfig wird immer mehr aufgebrochen.

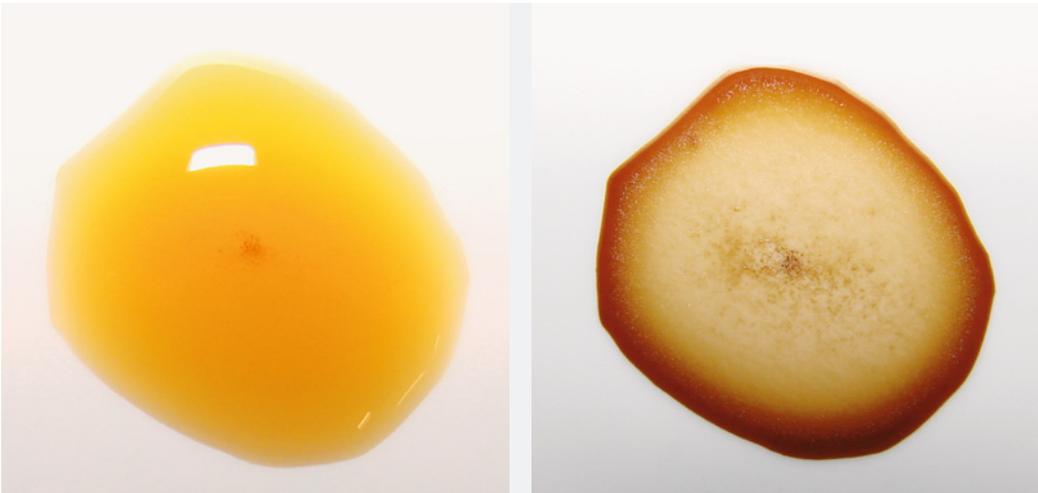
Mineralwasserqualität und Tropfenverdunstung

Die bisherigen Ausführungen zeigen, wie simple physikalische Vorstellungen und Modelle verschiedene Phänomene sehr leicht und anschaulich erklären, sobald elementare physikalische Prinzipien berücksichtigt werden. Mineralien oder geringe Mengen hydrophober Moleküle können also in das Wasser eingebracht werden, indem sie lokal die Struktur des Wassers verändern. Diese elementare Erkenntnis erlaubt aber auch die Bewertung vieler immer wieder als seriös diskutierter Verfahren zur Beurteilung der Wasserqualität, insbesondere bei Mineralwassern. Dazu werden Tropfen auf ein Substrat, etwa ein Glasplättchen, gebracht. Nach einiger Zeit ist das Wasser verdunstet und die gelösten Stoffe bleiben auf dem Substrat zurück. Dieses Phänomen wird oft als „Kaffee-fleck“ bezeichnet. Tropft Kaffee auf den Tisch, so bleiben nach seinem Verdunsten ganz charakteristische Fleckenmuster zurück: Der Rand

ist dunkler als die Mitte. Der Grund ist einfach: Die im Kaffee gelösten Stoffe werden zum Rand transportiert, da an diesen Stellen die Verdunstungsrate höher ist – schließlich ist am Rand der Kaffeetropfen dünner. Also wird dort zu Beginn mehr Material abgelegt. Dies zeigt, dass in dem verdunstenden Tropfen viel Bewegung und Dynamik vorhanden ist. Die gelösten Stoffe unterwerfen sich komplizierten Gesetzen der Strömungsmechanik und Konvektion. Aber damit nicht genug, selbst die Verdunstung des Wassers hängt von den gelösten Inhaltsstoffen, der Temperatur und sogar von den detaillierten Eigenschaften der Glasplättchen ab. Selbstredend spielen etwaige Verunreinigungen oder Oberflächenrauigkeiten auf dem Plättchen eine besonders große Rolle. Also Parameter, die sich nur schwer kontrollieren lassen.

Bei (Mineral-)Wasser mit gelösten ionischen oder polaren Bestandteilen bilden diese Rückstände nach dem Verdunsten dünnsschichtige Kristallstrukturen, die unter einem Mikroskop sichtbar sind. Deren vielfältige Formen werden gern zur Beurteilung der Wasserqualität her-

angezogen. Wie aber die obigen Bemerkungen schon andeuten, sind diese Verfahren höchst zweifelhaft, wenn sie nicht unter Ausschluss vieler Unwägbarkeiten reproduzierbar sind. Es kommen aber noch weitere, molekulare Einflüsse hinzu, die das Kristallwachstum und somit auch die Kristallformen bestimmen. So werden die genauen Kristallformen von minimalen Unterschieden in der Mineralienkonzentration stark beeinflusst. Dies zeigen die unterschiedlichen Kristallstrukturen von Natriumchlorid (NaCl) und z. B. Calciumchlorid (CaCl_2), deren Unterschiede nicht nur durch die unterschiedlichen Größen der Ionen, sondern auch durch deren Valenz (Anzahl der Ladungen) bestimmt wird. Natriumionen sind einwertig und jedes bindet genau ein Chloridion, während Calciumionen zweiwertig sind und daher zwei Chloridionen binden. Verdunstet das Wasser, in dem beide Salze gelöst sind, bildet sich daher eine ganze Reihe von Mischkristallen, deren Form und Wachstum sehr stark von der genauen Anzahl der Ionen abhängt. Im Wasser, besonders im Mineralwas-



- ▲ **Getrocknete Kaffee- oder Weinflecken** haben stets einen dunklen Rand. Dies hat physikalische Gründe. Die Muster, die bei der Tropfenverdunstung entstehen, sind kein Maß für den „Energiereichtum des Wassers“, sondern lediglich das Resultat detaillierter Wechselwirkungen der Flüssigkeit mit dem Substrat, etwa der Glasplatte, auf der die Tropfen landen.

Komisches – kosmisches Wasser?

Der Wassersuchende stolpert in Teilen der angesprochenen Seiten im Internet immer wieder über folgendes, vielfach variiertes Sätzchen: „Die chemische Formel H_2O reicht bei Weitem nicht aus, um Wesen und Wirken des Wassers auch nur annähernd zu beschreiben.“ Sehr richtig. Richtig allerdings nicht in dem Sinne, wie es selbst ernannte Biophysiker und andere Pseudowissenschaftler gern hätten. Denn in den meisten ihrer Äußerungen ist Wasser keine kosmische, sondern vielmehr eine sehr komische Sache.

Allerdings sind viele physikalische Eigenschaften des Wassers bislang tatsächlich noch nicht ausreichend erforscht, was aufgrund der Unzulänglichkeiten von physikalischen Messtechniken auch kaum möglich war. Ein Umstand, der sofort einleuchtet, wenn man sich die extreme Kürze der angesprochenen Zeitskalen vor Augen führt. Doch die Entwick-

lung neuer spektroskopischer Verfahren wird dies künftig besser ermöglichen. Vor allem Computersimulationen auf Grundlage der Molekulardynamik bieten neue detaillierte theoretische Verfahren, um Laborexperimente zu ergänzen und viele der Messgenauigkeit bisher kaum zugängliche Fragen zu klären. Gegenwart und nahe Zukunft der fundierten Wasserforschung werden also mit Sicherheit zum Großteil von Computern und den neuen Simulationstechniken vorangetrieben werden.

Eine weitere Frage wird – trotz der vermeintlichen Selbstverständlichkeit – nach wie vor heiß und seriös diskutiert: Woher kommt eigentlich das viele Wasser auf der Erde? Wenn man die Entstehungsgeschichte des Weltalls und der Erde vom Urknall bis zur Gegenwart vor Augen hat, ist dies tatsächlich eine kosmische Frage.

ser, ist noch eine Vielzahl weiterer Ionen gelöst, also ist ein eindeutiger Schluss von den Kristallmustern im Verdunstungsbild auf die Mineralwasserqualität gar nicht möglich. Selbst wenn die Versuchsbedingungen stets identisch

sind, was auch nur in hochreinen Labors mit konstanter Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit möglich wäre. Ein technischer und experimenteller Luxus, den sich nur Forschungseinrichtungen leisten.

Wein

Aromenwunder, Lösungsmittel, Küchenhelfer



Wasser ist zwar ein wunderbares, erfrischendes Getränk, was aber wäre ein Menü ohne anständige Weinbegleitung? Für einen wahren Gourmet absolut inakzeptabel. Abgesehen von der Faszination des Weins dient uns ein Glas davon auch für eine ganze Reihe von Überlegungen, die Gelegenheit geben, die etwas sehr theoretische Wassertheorie zu vertiefen. Zur Erinnerung: Wassermoleküle sind polar, und somit dient Wasser als Lösungsmittel für alle ionischen und polaren Substanzen. Also auch für Säure. Ein Punkt wurde bislang noch gar nicht direkt angesprochen, erscheint aber selbstverständlich: Wasser schmeckt neutral und ist somit der ideale Standard für Geschmacksversuche mit darin gelösten Stoffen und chemischen Verbindungen. Etwa beim Wein, der vor allem aus Wasser und ein bisschen Alkohol besteht. Aber der Rest hat's in sich. Vor allem physikalisch-chemisch; und daher auch geschmacks- und kochechnisch.

Ein paar nüchterne Gedanken vorweg

Was ist Wein eigentlich? Nach kurzem Reflektieren über diese zugegeben eigentümlich anmutende Frage kommt auch der stille Genießer ins Grübeln. Diese Flüssigkeit beschert uns nicht nur kulinarische Sensationen, Freuden und Genuss, sondern lässt uns auch tiefer in fundamentale physikalisch-chemische Sachverhalte blicken, die unser Genussverständnis erweitern. Beginnen wollen wir mit einer naturwissenschaftlichen Sicht auf die Aromen und deren Wahrnehmung. Allein die Antwort auf die Frage, wie die Aromenwahrnehmung mit Zusammensetzung und Alkoholgehalt des Weins zusammenhängt, erlaubt es, ein besseres Verständnis für den Genuss zu entwickeln.

Aromen sind stets mehr oder weniger flüchtige organische Verbindungen, deren Lösungseigenschaften in Wasser und Ethanol („Alkohol“) die geliebten Duftsensationen und somit den Wein „geschmack“ entscheidend bestimmen. Von den Grundgeschmacksrichtungen (süß, sauer, salzig, bitter, umami und fett) dominiert, zumindest beim trockenen Wein, vor

allem die Komponente „sauer“. Dies klingt zunächst schlimmer als es ist, aber die Säure im Wein wirkt als wesentlicher „Geschmacksverstärker“, dessen Wirkung wir nicht missen möchten. Säure und Alkohol selbst lassen sich wiederum in der Küche, beim Kochen mit Wein, wundersam einsetzen. Im Folgenden wollen wir versuchen, einige dieser Zusammenhänge zu erklären, und dabei zeigen, welche fundamentalen Prinzipien sich aus dem Weingenuss ergeben können.

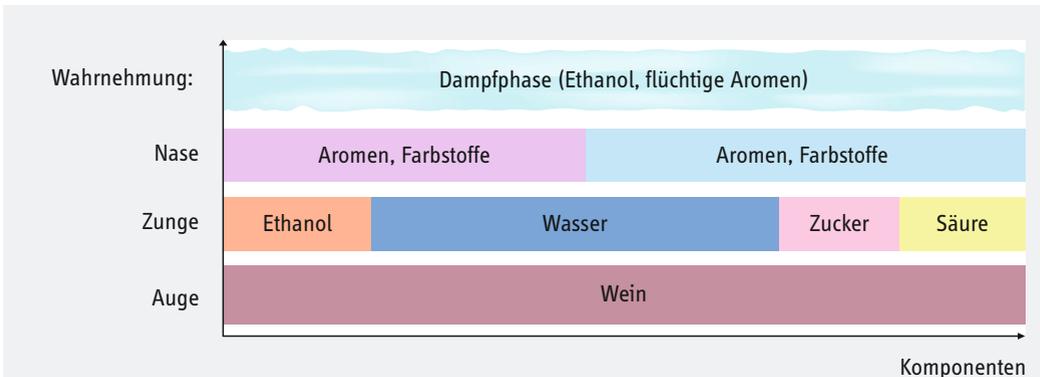
Natürlich ist das Thema Wein viel zu komplex, um es in ein paar Sätzen abzuhandeln. Daher beschränken wir uns hier auf ein paar wenige Sachverhalte, die Physik, Chemie und Genuss miteinander verbinden.

Physikers Modellwein

Wein ist im Grunde genommen etwas sehr Einfaches: Man nehme zwei genießbare, gut miteinander verträgliche und vollständig mischbare Lösungsmittel, z. B. Ethanol und Wasser, versetze diese mit etwas Säure und gebe eine ganze Reihe Aromen dazu sowie Farbstoffe, Phenole, Polyphenole und weitere sekundäre Pflanzenstoffe, alles in entsprechender Zusammensetzung – fertig ist der Wein. Natürlich wird diese provokante Aussage jeden Winzer in Rage versetzen, da eine derartige technische Beschreibung seiner hochgeschätzten Arbeit überhaupt nicht gerecht wird. Dennoch müssen wir diese banale Sichtweise zulassen, um uns dem komplexen Thema „Wein“ naturwissenschaftlich zu nähern. Als Fahrplan für dieses Kapitel wollen wir uns mit einem einfachen Schema begnügen, auch wenn dabei leider der Genuss manchmal zu kurz kommt. Aber Wissenschaft ist ja auch Genuss.

Wasser, die Hauptkomponente im Wein

Wein besteht, je nach Zuckergehalt, Kelterung, Traubensorte usw. zu ca. 85 – 90 % aus Wasser. Dies bedingt eine ganze Reihe komplexer Sach-



- ▲ Die **Zusammensetzung des Weins** und dessen Wahrnehmung aus einer stark vereinfachten Sicht der physikalischen Chemie. Die Hauptkomponenten sind Wasser und Alkohol. Wasser ist vor allem Lösungsmittel der Hauptgeschmackskomponenten „süß“ (Restzucker) und „sauer“ (Säure). Sie werden bereits beim ersten Schluck auf der Zunge sofort bemerkt. Wasser ist aber auch Lösungsmittel für wasserlösliche Farbstoffe und Aromen. Ethanol bindet hydrophobe Aromen (Volatile) und fettlösliche Farbstoffe. Die Aromen werden mit dem Geruchssinn (nasal und retronasal) während des Verkostens wahrgenommen. Flüchtige Aromen hingegen und den „stechenden“ Geruch des Alkohols „erschnüffelt“ man in der alkoholreichen Dampfphase über dem Glas. Der Alkoholgehalt und das Verhältnis zwischen Restzucker und Säure schwanken bei verschiedenen Weinen stark. Ein Segen für Weinliebhaber. Kleine Differenzen in der Zusammensetzung bedeuten große Unterschiede im Genuss.

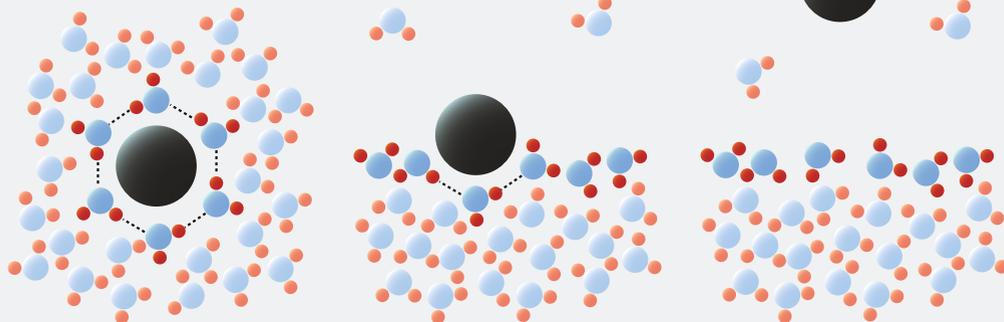
verhalte. Der Grund dafür ist wiederum die Polarität, denn diese Eigenschaft ermöglicht erst viele Eigenschaften des Weins und sorgt mit für dessen Komplexität.

Die Polarität ist Grundlage für die Löslichkeit von Stoffen im Wasser (siehe Seite 16). Alkohol und Wasser mischen sich sehr gut, denn Alkohol (hier betrachten wir ausschließlich das Ethanol) besitzt eine schwach polare Gruppe und nur einen sehr kurzen nichtlöslichen Teil. Darauf werden wir später noch im Detail eingehen, wenn der Themenkomplex Wein und Küche genauer betrachtet wird.

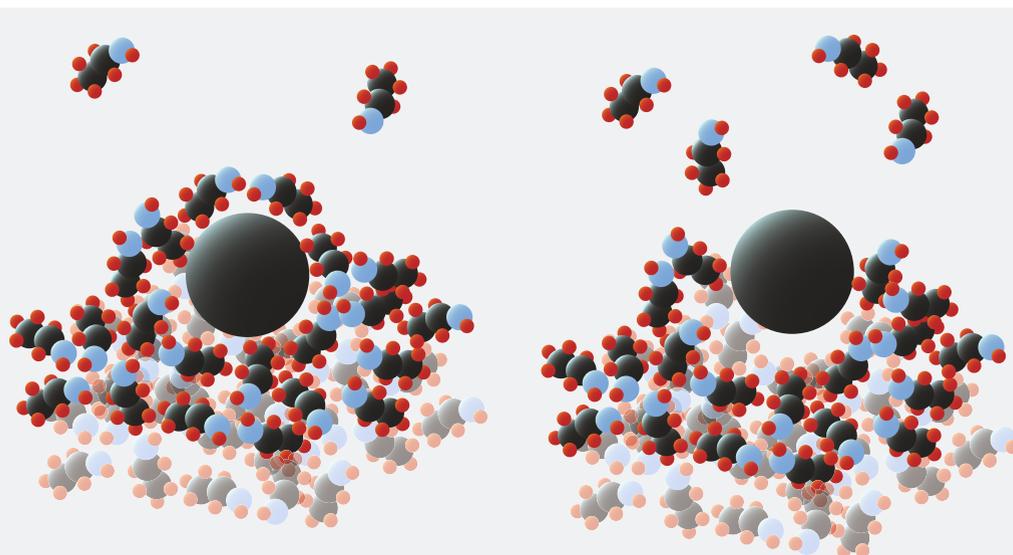
Widmen wir uns zunächst der Frage, wie sich die unterschiedlichen molekularen Eigenschaften von Wasser und Ethanol auf die Aromen im Wein auswirken. Diese sind meist ätherische Öle und organische Moleküle, die sich zwar in Wasser nicht lösen, aber dennoch davon aufgenommen werden können, wenn auch in sehr geringen Konzentrationen. Dass von den hydrophoben Molekülen, zu denen auch Aromen

und Duftstoffe gehören, dennoch ein paar wenige tatsächlich in Wasser gelöst werden können, liegt an den Wassermolekül-Käfigen, in denen sie gefangen gehalten werden. Natürlich ist dafür die Dipolwechselwirkung verantwortlich, die für den Einschluss in dem Käfig sorgt (siehe Abbildung Seite 20). Diese Tatsache lässt uns aber schnell den Begriff „Flüchtigkeit“ verstehen, der natürlich für die „Nase“ eines Weins entscheidend ist. Befinden sich die Aromen in der Nähe der Wasseroberfläche, so werden sie sofort an die Luft freigegeben, denn Luft ist für die Moleküle weit besser als Wasser. Sie flüchten schnell und werden daher mit dem Begriff „flüchtige“ Aromen physikalisch treffend beschrieben.

In Ethanol hingegen lösen sich diese Aromen sehr gut. Sie werden dort von den Molekülen regelrecht aufgenommen und „gern“ umschlossen. Dabei hat das Wort „gern“ tatsächlich eine quantitative physikalische Bedeutung und lässt sich im Sinne von Lösungs-



- ▲ Hydrophobe Moleküle, hier als schattierte Kugeln dargestellt (z. B. Aromen, ätherische Öle usw.), „lösen“ sich mitunter in geringen Konzentrationen in Wasser. Die Wassermoleküle bilden dabei „**Wasserkäfige**“ um die Moleküle (links). Die dipolaren Wechselwirkungen sind als gestrichelte Linien eingezeichnet. Dies geschieht dynamisch als flinkes Molekülchen-wechsle-dich-Spiel. An der Oberfläche fehlt sozusagen ein Teil des Käfigs, daher dampfen die hydrophoben Moleküle sehr leicht aus dem ungeliebten Wasser ab (rechts). Sie sind daher leicht flüchtig und verlassen das Wasser über dessen Gasphase an der Wasser-Luft-Grenzfläche.



- ▲ **Hydrophobe Aromen** lösen sich in Ethanol. Die Ethanolmoleküle umgeben ein Aromamolekül (vereinfacht als Kugel dargestellt) und hüllen es ein. Daher bleiben ethanollösliche Aromen auch an der Oberfläche der Flüssigkeit „ummantelt“ (links). Sie können erst abdampfen, wenn diese Hülle reißt (rechts), sind damit also weniger flüchtig.

energien und anderen thermodynamischen Parametern klar definieren. Die hydrophoben Moleküle lösen sich und haben weit weniger physikalische Veranlassung, das „gute Lösungsmittel“ Ethanol zu verlassen und abzudampfen als beim „schlechten Lösungsmittel“ Wasser (siehe Abbildung).

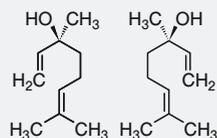
Lässt sich aus diesen eher theoretisch anmutenden Sachverhalten etwas über Aromen, deren Wahrnehmung und unseren Genuss ableiten? Dazu müssen wir wissen, wann wir etwas schmecken. Unsere Sensoren benötigen stets eine gewisse Mindestkonzentration, also eine Wahrnehmungsschwelle, um ein Molekül als Duft wahrzunehmen.

Aromen und Wahrnehmungsschwellen

In einer Ethanol-Wasser-Mischung, beim Wein etwa 10–14 % Volumenanteil Ethanol, umgeben sich viele Aromen vorwiegend mit einer Hülle aus Ethanolmolekülen, um sich vom ungeliebten Wasser abzuschirmen und gelöst zu bleiben. Dabei halten höhere Konzentrationen von Ethanol, also alkoholreiche Weine, die Aromen besser gelöst. So weit die physikalische Theorie. Lässt sich diese These nachprüfen? In der Tat, denn wie wir gleich zeigen werden, hängt unsere Wahrnehmungsschwelle für organische Moleküle vom Alkoholgehalt ab. Interessant ist es, sich die Geruchsschwellen verschiedener weintypischer Aromen genauer zu betrachten. Nehmen wir als Beispiel das Linalool, das für einen blumigen, maiglöckchenartigen Duft verantwortlich ist und vorwiegend in der Muskatellertraube vorkommt. Es löst sich nur schlecht in Wasser, in Ethanol hingegen gut.

Die Geruchs- und Wahrnehmungsschwellen für Linalool wurden in Wasser und in weintypischen Ethanol-Wasser-Mischungen (also 10 % Ethanol bzw. 12 % Ethanol) bestimmt:

Wasser	0,006 mg / L
10 % Ethanol	0,015 mg / L
12 % Ethanol	0,025 mg / L



▲ **Linalool** in seinen beiden Formen. Das Molekül ist – trotz seiner OH-Gruppe – nur schwer wasserlöslich, da a) die organischen Teile (Kohlenwasserstoffe) relativ groß sind und b) sich die OH-Gruppe (vereinfacht ausgedrückt) in der Mitte des Moleküls befindet. Linalool ist folglich nur in Ethanol gut löslich.

Dabei fällt auf, dass die Wahrnehmungsschwelle mit zunehmender Alkoholkonzentration steigt, d. h. es ist eine höhere Konzentration des Linalools nötig, um dieselbe Geruchssensation zu bekommen. Dafür ist die Löslichkeit des Moleküls entscheidend. Linalool ist zwar ein Alkohol, weist aber einen sehr großen organischen Rest auf, der darüber hinaus auch zwei Doppelbindungen enthält (siehe Abbildung oben), und ist somit Bestandteil vieler ätherischer Öle.

Linalool löst sich also nur schlecht in Wasser; es ist sehr flüchtig und entweicht leicht. In Ethanol hingegen löst es sich sehr gut, also wird es deutlich besser „festgehalten“. Es entweicht weniger willig und in geringeren Konzentrationen in die Dampfphase und erreicht daher erst bei höheren Lösungskonzentrationen im Glas seine Wirkung. So erklärt sich relativ einfach, warum die Geruchsschwelle von vielen flüchtigen Aromen sich zunächst über deren chemische Struktur und deren Lösungsverhalten und Löslichkeitsparameter definiert.

Diese hier nur exemplarisch für das Linalool angestellte Betrachtung lässt sich natürlich auf viele andere Aromastoffe übertragen. Alkoholreiche Weine erfordern daher auch immer eine höhere Konzentration an Aromen, um entsprechende Geruchsempfindungen auszulösen. Natürlich spielt dabei auch der Genießer zu Tisch eine Rolle. Ob und wie stark verschiedene Weinliebhaber einen Geruch wahrneh-

men, hängt von ihren Riehzellen und deren Verschaltung vor und im Gehirn ab. Und natürlich auch von dem „Riechgedächtnis“ des Genießers. Physik und Chemie mit ihren thermodynamischen Prozessen legen allerdings die Grundlagen dafür.

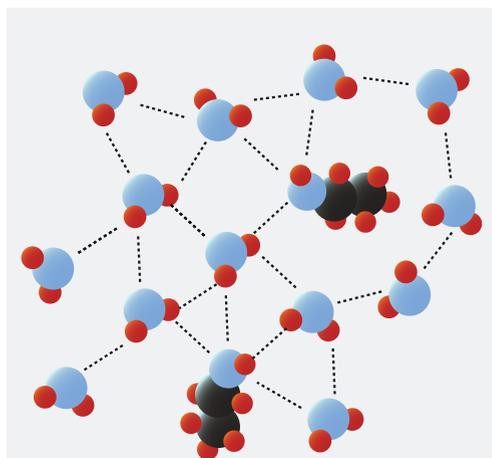
Nun aber zum Wein in der Küchenpraxis. Mit Wein lässt sich wunderbar kochen, denn er gibt Gerichten und Saucen unglaubliche Tiefen, sofern man ihn nicht gedankenlos in die Töpfe schüttet, sondern ein paar physikalisch-chemische Sachverhalte berücksichtigt.

Wein in der Küche

Neben dem Genuss im Glas bei Tisch nimmt Wein auch ganz bestimmte Aufgaben in der Küche wahr, die durch seine Haupteigenschaften bestimmt werden: dezente Säure und Alkohol. Diese profanen Inhaltsstoffe spielen zwar schon bei der Aromenempfindung auf der Zunge und in der Nase eine herausragende Rolle, sind aber auch für eine Vielzahl von physikalisch-chemischen Prozessen beim Kochen von erheblichem Nutzen. Dabei nehmen die Hauptbestandteile des Weins unterschiedliche Funktionen wahr. Der Alkohol wirkt dabei kurzfristig als Emulgator, und die Säure hilft den Geschmack zu verstärken – in mehrfacher Hinsicht, wie an zwei Beispielen gezeigt wird.

Kochen mit Wein: Was bleibt übrig?

Beim Kochen mit Wein (oder generell mit Alkohol) ergibt sich stets eine zentrale Frage: Wie viel Alkohol verbleibt im Gericht? Alkohol verdampft bei etwa 78 °C, sodass der Schluss, er verdampfe beim Kochen ohnehin, naheliegt. So einfach ist es aber nicht. Die allgemein angegebene Verdampfungstemperatur bezieht sich lediglich auf reinen Alkohol und wird durch dessen molekulare Eigenschaften definiert. Mit anderen Worten, sie gilt unter der Voraussetzung, dass Ethanolmoleküle von Ethanolmolekülen umgeben sind. Allgemein lässt sich sagen, dass der Siedepunkt einer Substanz im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängt: a) der molekularen Masse der Moleküle; je größer diese ist, desto mehr



▲ Schematische Darstellung des **Wasser-Alkohol-Netzwerks**. Ethanolmoleküle können systematisch in das Wassernetzwerk eingebunden werden, zum einen über die polaren OH-Gruppen unter Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen, zum anderen über den Einschluss in Käfige, ähnlich wie bei den hydrophoben Molekülen aus der Abbildung auf Seite 20. Da sowohl Wasserstoffbrücken als auch hydrophobe Einschlüsse sich gegenseitig potenzieren, sind Wasser und Ethanol im gesamten Konzentrationsbereich mischbar.



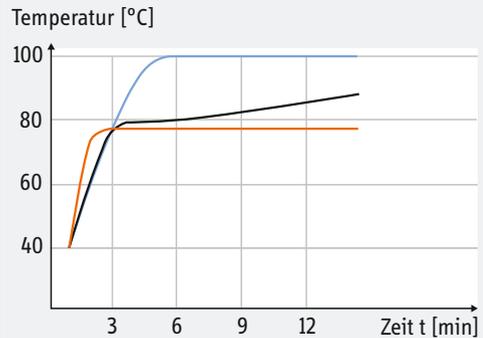
Energie ist notwendig, um sie aus der flüssigen in die gasförmige Phase überzuführen, also steigt der Siedepunkt mit dem Molekulargewicht; b) dem Zusammenhalt der Moleküle, oder besser den Bindungskräften, die zwischen ihnen herrschen. Je mehr sich die Moleküle untereinander anziehen, desto schwerer sind sie zu trennen. Daher steigt der Siedepunkt mit der Stärke der attraktiven Wechselwirkung der Moleküle untereinander (siehe Anhang, Seite 253).

Die Basis: Alkohol und Wasser

Wie schon bemerkt, sind Wassermoleküle dipolar und bilden ein dynamisches Netzwerk. Diese dipolare Wechselwirkung ist sehr stark, und um sie zu trennen, benötigt man viel Energie, also eine hohe Temperatur.

Bei Ethanol liegen ähnliche Verhältnisse vor, allerdings ist die Wechselwirkung der Moleküle untereinander schwächer. Auch Alkohole besitzen eine schwache polare Gruppe, die OH-Gruppe, die eine Löslichkeit in Wasser ermöglicht. Sie haben aber auch einen organischen Rest; bei dem in Küche und Keller vorwiegend verwendeten Ethanol, C_2H_5OH , ist das die C_2H_5 -Gruppe. Dieser Teil ist vollkommen unpolar und steht der Wasserlöslichkeit entgegen. Da dieser organische Rest beim Ethanol aber sehr kurz ist, kann es mit Wasser beliebig gemischt werden. Ethanol bildet daher im Vergleich zu Wasser ein schwächeres Netzwerk aus, und die Wechselwirkung der Moleküle untereinander ist daher schwächer. Dies drückt sich natürlich auch in der Verdampfungstemperatur aus: So siedet Ethanol bereits bei $78,2^\circ C$.

Eine Vorhersage der Siedepunkttemperatur des Gemisches (bei Destillationsvorgängen z. B. eine zentrale Frage) ist gar nicht so einfach, und die Vorstellung, bei einem Alkohol-Wasser-Gemisch verdampfe bei $78^\circ C$ zuerst der Alkohol vollständig, dann das Wasser bei seiner Siedetemperatur, erweist sich als zu einfach. Nur bei hinreichend hoher Alkoholkonzentration bleibt die Temperatur bei $78^\circ C$. Vielmehr spielen die lokalen Wechselwirkungen und die



▲ Schematische Darstellung eines typischen **Temperaturverlaufs** als Funktion der Zeit beim Erwärmen eines Ethanol-Wasser-Gemisches. Die Temperaturen der reinen Komponenten Wasser (blau) und Ethanol (rot) steigen zunächst gemäß ihrer Wärmekapazität an. Ist die Siedetemperatur $100^\circ C$ (Wasser) bzw. $78,2^\circ C$ (Ethanol) erreicht, steigen die Kurven nicht mehr an (latente Verdampfungswärme), da die zugeführte Wärmeenergie zum Verdampfen der Moleküle benötigt wird. Beim Gemisch steigt die Kurve allerdings langsam weiter, je nachdem, wie viel Ethanol jeweils in dem Gemisch verbleibt.

Stärke der molekularen Netzwerke eine große Rolle. Außerdem befinden sich im Dampf des Siedeguts nicht nur Alkohol, sondern auch etwa 5% Wasser, denn bereits bei $78^\circ C$ verdampft viel Wasser, da der Dampfdruck relativ groß ist. Sonst ließen sich in der Küche auch bei verhaltenen Temperaturen, also weit unter $100^\circ C$, Lebensmittel nicht trocknen, etwa um daraus Pulver, Trockenkräuter oder andere Kulinarier mit besonderen Strukturen und Texturen herzustellen.

Mit dieser einfachen Überlegung lässt sich daher eine weitere Schlussfolgerung ziehen: Durch Kochen verflüchtigt Alkohol auch in relativ wässrigen Lösungen nicht allzu schnell, denn je weniger Ethanolmoleküle in das molekulare Netzwerk aus Wassermolekülen eingebunden sind, desto schwieriger wird es, sie allein durch Temperaturerhöhung herauszulösen, um sie zu verdampfen. Befindet sich in einer

Alkohol als Emulgator?

Vielleicht klingt das zunächst seltsam, aber Ethanolmoleküle wirken schwach grenzflächenaktiv. Deutlich wird dies im Pastisexperiment, das sich sehr einfach durchführen lässt. Dazu wird eine kleine Menge Öl (etwa ein bis zwei Tropfen) in Ethanol unter Schütteln gelöst. Gießt man diese Lösung in Wasser, so trübt sich dieses durch die emulgierten Öltröpfchen.

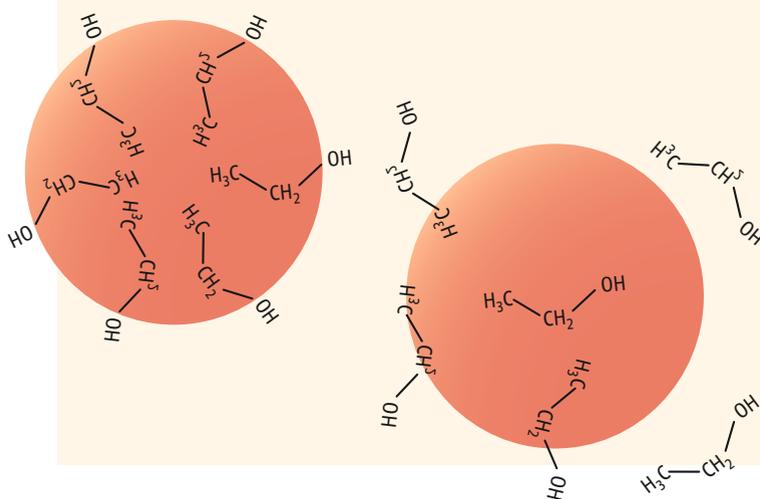
Dieses eindrucksvolle Experiment zeigt eine ganze Reihe Prinzipien. Alkohol löst sich in Fetten und Ölen, zumindest in bestimmten Konzentrationsbereichen, die durch die Art der Fettsäuren bestimmt sind. Dabei sammelt sich das Ethanol um die Grenzflächen der Öltröpfchen und stabilisiert diese zunächst im Wasser. Allerdings ist der hydrophobe Teil des Ethanols mit seinen zwei Kohlenstoffatomen viel zu kurz, um permanent an der Grenzfläche zu verbleiben. Der Energiegewinn ist wegen des kurzen hydrophoben Schwänzchens viel zu gering, als dass er mit der Möglichkeit, sich frei zu bewegen, eingetauscht werden könnte. Es ist für die Ethanolmoleküle thermodynamisch günstiger, in der Lösung zu diffundieren. Daher gewinnt die Entropie, die Ethanolmoleküle befinden sich sowohl in der Wasser- als auch in der Ölphase.

Auch ist die Abstoßung der polaren OH-Gruppen sehr schwach. Daher wird die Stabilität der Fetttropfchen vor allem durch deren Größe bestimmt. Je kleiner sie sind, desto stabiler sind sie. Allerdings wachsen die Tropfchen über Materialdiffusion und

durch ständige Kollisionen miteinander. Diese Prozesse werden unter dem Begriff „Ostwaldreifung“ zusammengefasst. Der Tröpfchenradius wächst zunächst etwa mit der Wurzel der Zeit, kommt aber dann zum Stillstand. Und zwar umso schneller, je höher die Alkoholkonzentration ist (weshalb sich Pastis nicht wieder spontan von selbst „enttrübt“).

Wird der getrübe Aperitif allerdings erwärmt (nicht zum Trinken!), wird die Lösung wieder klar. Durch die hohe kinetische Energie der Moleküle wird die Löslichkeit der Aromaverbindung Anethol (das zum Anisduft des Pastis beiträgt) wieder erhöht. Bei Experimenten mit einer Öl-Alkohol-Lösung hängt diese Enttrübung von einer Vielzahl von Faktoren ab, etwa der Art des Öls und dessen Hydrophobizität.

Warum aber ist dieser „theoretische Ausflug“ für unsere Betrachtungen wichtig? Ganz einfach daher, da wir diese Emulsionen nicht nur als Pastis, Ouzo oder Raki trinken, sondern auch, weil sie ein einfaches Modell für Saucen mit Alkoholverfeinerung sind, unabhängig davon, ob wir Wein oder Spirituosen in Saucen geben, Sabayons oder bestimmte Variationen der Hollandaise zubereiten. Sie bestehen immer aus den Grundkomponenten Fett (Butter, Öl), Wasser und Ethanol. Die Frage, wo sich die Ethanolmoleküle tatsächlich befinden, ist daher für vieles entscheidend. Im Kapitel über Emulsionen werden wir noch genauer darauf zu sprechen kommen (siehe Seite 134).



◀ Ethanol wirkt nur sehr bedingt als **Emulgator**. Zwar könnten sich die Ethanolmoleküle wie in dem linken Teil der Abbildung um die Fetttropfchen orientieren, dazu sind aber die hydrophoben Teile zu klein und verbleiben daher nur kurze Zeit an der Grenzfläche. Daher diffundieren die Moleküle umher und orientieren sich eher beliebig (rechts).