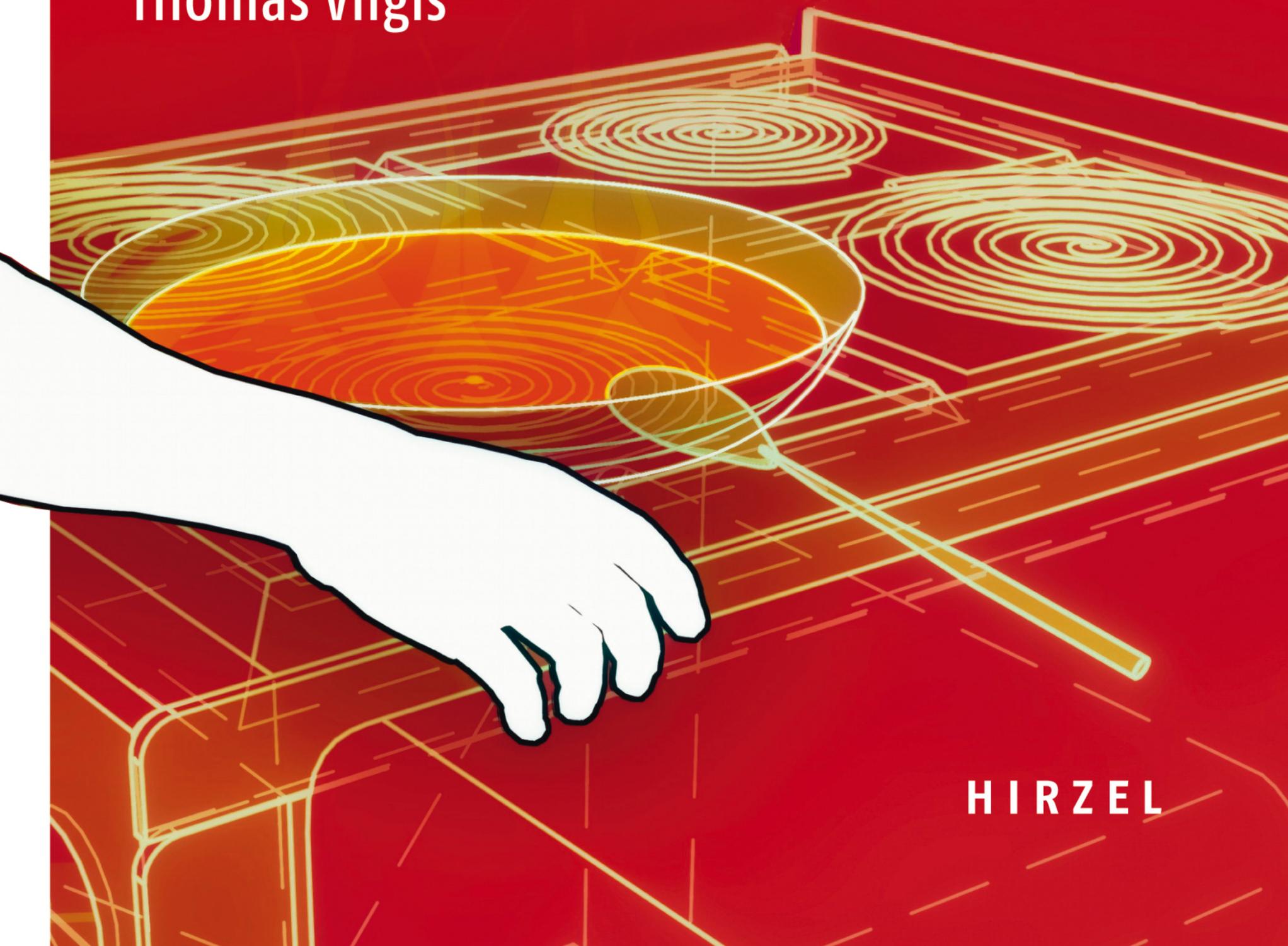




Die Molekül-Küche

Physik und Chemie des feinen Geschmacks

Thomas Vilgis



HIRZEL

Thomas Vilgis
Die Molekül-Küche

Thomas Vilgis

Die Molekül-Küche

Physik und Chemie des feinen Geschmacks

9., korrigierte Auflage



S. Hirzel Verlag Stuttgart

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 978-3-7776-2330-6

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.

- 9., korrigierte Auflage 2013
- 8., korrigierte Auflage 2010
- 7., aktualisierte Auflage 2008
- 6., korrigierte Auflage 2007
- 5. Auflage 2007
- 4. Auflage 2006
- 3. Auflage 2006
- 2., korrigierte Auflage 2006
- 1. Auflage 2005

© 2013 S. Hirzel Verlag
Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart
Printed in Germany
Einbandgestaltung: deblik, Berlin
Druck + Bindung: Kösel GmbH & Co. KG, Krugzell

www.hirzel.de

Danksagung

Dieses Buch wäre natürlich nie entstanden, hätten nicht die hier Genannten ihren Input, welcher Art auch immer, beige-steuert. Als da wären: Frau Dr. Angela Meder und der Hirzel Verlag, die das Projekt problemlos und äußerst angenehm durchführten.

Der ehemalige Chefredakteur Peter Ploog und der Magazinredakteur Eckhard Krüger von *essen&trinken*, die den Mut hatten, die populärwissenschaftliche Kolumne „Küchenuni“ in ihrer Genusszeitschrift einzurichten. Die darin niedergeschriebenen Ideen sind natürlich Grundlage dieses Buches.

Dr. Thomas Bührke und Dr. Roland Wengenmayr von *Physik in unserer Zeit*. Danke für ihre tatkräftige Unterstützung, die Physik schmackhafter weicher Materie unter die physikalische Gemeinde zu bringen.

Meine Ex-Redakteurin Carola Rönneburg von *Häuptling Eigener Herd*. Ihr habe ich letztlich zu verdanken, dass ich einigermaßen Ausdruck in Wort, Satz und Aufsatz lernte – für einen Naturwissenschaftler (vor allem Theoretiker), der meist nur in mathematischen Formeln zu denken gewohnt ist, vielleicht der größte intellektuelle Fortschritt.

Mein verehrter Vincent Klink, wunderbarer Kochkünstler und Seniorherausgeber des *Häuptling Eigener Herd*, dessen Rezeptideen und Kreationen an mehreren Stellen Pate standen. Leider mussten sie oft auf wissenschaftliches Niveau heruntergekocht werden. Er möge mir die kruden kulinarischen Vereinfachungen verzeihen.

Der Juniorherausgeber des *Häuptlings*, Wiglaf Droste. Seine Analysen, Kritikfähigkeit und Sprachkunst sind mir Vorbild, Leitbild und wahre Leitkultur gleichzeitig.

Herr Thomas Wagner. Er sorgte für brauchbare Fotos und für die problemlose Durchführung einiger wissenschaftlicher Experimente. Frau Irene Nanz danke ich für ihre Hilfe bei Grafik und Design.

Meine Kollegin und Mitarbeiterin Dr. Arti Dua. Ihr gebührt besonderer Dank für ihre nie endende Bereitschaft, jede Aus- und Abschweifung von der harten theoretischen Physik in die angewandte Kulinaristik, sowohl physikalisch-chemisch als auch kulturell, mitzugehen. Außerdem verdienen ihre hilfreiche Assistenz und kreative Mitarbeit bei verschiedenen Experimenten Anerkennung, schließlich lassen sich die erzielten Resultate schmecken.

Meiner Frau Barbara danke ich für unermüdliches und geduldiges Korrekturlesen aller Texte. Ohne sie wäre tatsächlich der Dativ dem Genitiv sein Tod und das Manuskript zu diesem Buch erst gar nicht vorgelegt worden.

Jede Küche ist ein wissenschaftliches Labor. Diese plakative Aussage ist schon zutreffend, auch wenn es auf den ersten Blick etwas überzogen zu sein scheint. Sind Sie, liebe Leser, bereit, diesen Satz zu akzeptieren, und beginnen Sie darüber nachzudenken, so fällt Ihnen sofort auf, dass es Ihnen nicht gelingt, dieses Labor nach Wissenschaftsdisziplinen zu klassifizieren. Chemie ist vermutlich das Erste, was Sie damit assoziieren. Aber sie ist in der Tat nur ein kleiner Teil des Kochens, Bratens und Backens. Ein Großteil davon ist Physik und auch immer wieder Biologie.

Zur Chemie gehören Prozesse, die mit der chemischen Umwandlung von Stoffen zu tun haben. Wenn Sie sich an Ihre Schulzeit erinnern, so stellt die simple Zerlegung von Wasser in zwei Teile Wasserstoff und einen Teil Sauerstoff ein gutes Beispiel für einen chemischen Vorgang dar. Auch das explosive Zusammenfügen der beiden Teile mit einem großen Knall – das berühmte Knallgasexperiment – ist sicher ein chemischer Prozess. Wenn Sie allerdings Wasser nur verdampfen, um später in dem heißen Gas einen Fisch oder ein paar Gemüse zu dämpfen, bleibt Wasser schlicht Wasser. Dampf ist natürlich nichts anderes als gasförmiges Wasser. Was Sie dabei bewerkstelligen, ist sicher keine Chemie, sondern knallharte Physik: Sie führen einen Phasenübergang durch. Das flüssige Wasser geht in seine gasförmige Phase, den Dampf, über. Dass dies gerade bei 100 °C passiert, wird uns im Folgenden und vor allem in der Küchenpraxis noch von Nutzen sein.

Aber selbst damit nicht genug. Ihre Hefezöpfchen für den Sonntagnachmittagskaffee, Ihr Brot und selbst Ihr Bier, das Sie zum Aperitif oder gegen den Durst trinken, beruhen auf winzigen Lebewesen: den Hefezellen. Schwören Sie auf Roggenbrot mit guter Sauerteiggrundlage? Lieben Sie Joghurt? Oder Sauerkraut? Dann haben Sie es mit Milchsäurebakterien zu tun, ebenfalls kleinen Lebewesen, die Ihnen Ihre schmackhaften Speisen vorbereiten und erzeugen. Und schon sind wir mitten in der Biologie und deren – fast selbstverständlichen – Anwendungen in der täglichen Küche.

Im Rahmen der Molekulargastronomie kommen wir also mit den verschiedensten Bereichen der Wissenschaft in Berührung. Neue Sichtweisen werden sich uns zeigen und neue, vielleicht sogar ungewohnte Zusammenhänge. Das wird bestimmt spannend. Erwarten Sie aber keine Vollständigkeit! Wir können hier im Rahmen dieses Buches nur wenige Aspekte anreißen. Der Themenkreis ist viel zu umfassend, um ihn auf diesen folgenden Seiten komplett abhandeln zu können. Erwarten Sie auch keinen Ratgeber, der Ihnen sagt, was und wie viel wovon Sie essen sollten. Diese Entscheidung liegt bei Ihnen, Ihrem Geschmack und Ihren natürlichen Essbremsen. Erwarten Sie keine Klärung der Fragen bis in die letzten Details. Physik versucht stets mit einfachen Modellen eine Denkweise bereitzustellen, mit der es gelingen sollte, weiterzugehen oder neue Fragen mit neuen Vorstellungen zu beantworten. Dies entspricht auch dem Gedanken dieses Buchs: Zusammenhänge herzustellen, die vielleicht ungewohnt sind, aber durchaus plötzlich Sinn ergeben.

Viele Fragen sind auch – entgegen so mancher Auffassung – schlicht offen und ungeklärt. Die aktuelle Erforschung bestimmter Gebiete der Physik, etwa der kondensierten (weichen) Materie, ermöglicht eine neue Sicht und erweiterte Denkweisen – und manchmal auch neue Ideen in der Küche. Allerdings, so scheint es hin und wieder, verschwimmt dabei immer öfter die Trennlinie zwischen Möglichkeit, Dekadenz und Kreativität. Deshalb wollen wir uns hier um eine sehr avancierte Laborküche wenig kümmern. Wir bleiben im Alltag und in unserer täglichen Küche. Deren Reichtum und Vielfalt ist ebenso groß wie jener der Physik und Chemie.

So lassen Sie sich im Rahmen dieses Büchleins in eine schmackhafte und völlig ungefährliche Nanowelt entführen. Denn all diese modernen und mediengerechten Begriffe, die derzeit als hep und hip gelten, gab es in der Küche schon lange. Wir essen sogar täglich davon. Insofern waren und sind Koch und Küche lange ihrer Zeit voraus.

Und noch etwas: Sie werden hin und wieder kleine Rezepte finden, die Ihnen die wissenschaftlichen Erkenntnisse näher bringen könnten. Dies sind a) keine Rezepte aus der Sterneküche, sondern einfache Dinge, die Sie leicht im Alltag zubereiten können. Suchen Sie b) nicht nach Mengenangaben und nach Formulierungen der Art „Man nehme...“, kreatives Kochen braucht keine Mengenangaben. Sie entwickeln dabei auch ein Gefühl dafür, was funktioniert und was nicht. Nur das ständige Probieren und Experimentieren gibt Ihnen die notwendi-

ge Erfahrung und einen doppelten Genuss. Es ist wie immer: Genaue Vorschriften sind Einschränkungen und somit der Untergang jeder eigenen Kreativität. Und selbst wenn es einmal daneben geht, ist es nicht schlimm. Wegwerfen müssen Sie nichts, höchstens auf eine andere Art und Weise einsetzen. So war es für mich eine der ersten Erfahrungen vor sehr langer Zeit, dass ein geplanter Hackbraten mangels ausreichender Bindung letztlich als Hachée verspeist wurde. Seit diesem Vorfall war mir klar: Kochen ist keine Wissenschaft für sich – sondern Physik, Chemie, Biologie und sogar Materialwissenschaft.

Viel Spaß und vor allem:
Guten Appetit!

Danksagung	5
-------------------	---

Vorwort	7
----------------	---

Zum Auftakt – ein kleiner Aperitif	15
---	----

Das Auge isst mit – von Licht, Elektronen und ErnährungsberaterInnen	19
---	----

Elektronen, Licht und Farbe –	
-------------------------------	--

eine ungewöhnliche Amuse bouche	20
---------------------------------	----

Warum ist die Karotte gelb?	21
-----------------------------	----

Tomatenrot	24
------------	----

Ölgrün: Steirer Star	26
----------------------	----

Kleine Menge – große Wirkung: aus der Fülle der Inhaltsstoffe	29
--	----

Frühlingskönig Spargel: Asparagin satt	30
--	----

Frühsummerliche Oxalsäure: Spinat- und Rhabarberchemie	31
--	----

Genetische Sommertränen	32
-------------------------	----

Schwindende Knoblauchdüfte	34
----------------------------	----

Zitronen- und Orangenchemie – von Säure und Öl	35
--	----

Wundermittel Senf	37
-------------------	----

Winterschärfe: Red Hot Chili Peppers	38
--------------------------------------	----

Klebende Eischalen	39
--------------------	----

Proteine: Eiweiß und Aminosäuren	39
----------------------------------	----

Pasta! Und damit basta	44
------------------------	----

Kalt und heiß: Was Temperatur bewirkt	46
--	----

Kalte Törtchen	47
----------------	----

Lebenselixier Fett	48
--------------------	----

Wenn Öl in Wallung kommt	52
--------------------------	----

Gut gebräunt	53
Heiße Zuckerkunst	57
Kristalle zu Tisch	62
Von Kristallen und Zellwänden	64

Garen – ein (sanfter) Temperaturschock	66
---	----

Zartes Fleisch will Weile haben –	
Enzyme in Kühlhaus und Küche	66
Ausgeruhte Tournedos	68
Hochtemperaturmethode: Grill	69
Niedrigtemperaturmethode: Sommerbraten	72
Pochieren	73
Garen mit Säure	74
Dämpfen: der sanfte Kontakt mit Wasser	75
Schmoren	76
Butterflocke, Sahne und Gratin	78
Frittieren	80
Räuchern: Garen, Abschmecken und Konservieren	82

Die hohe Kunst der Zubereitung	84
---------------------------------------	----

Tajine und Römertopf – Kochen in porösen Medien	84
Salzkrusten: Dorade im Zementmantel	88
Wok-Gemüse: der Vorteil der chinesischen Methode	90
Marseillaiser Bouillabaisse à la Lotte flotte	92
Kohlenhydrate	95
Kartoffelpüree – bloß kein Zauberstab	98

Von Brühen, Fonds und Saucen	101
-------------------------------------	-----

Vor der Sauce kommt der Fond	101
Heinz Winklers „Fundamentalismus“	104
Einige Gedanken zu Brühen	106
Warum kann Hühnerbrühe sauer werden?	107
Kreisrunde Fettaugen	108

Gepökelt und mariniert	110
-------------------------------	-----

Nasspökeln in Meersalzlake	111
Trockenpökeln: Kalbszunge	112
Delikatere Stockfisch	113
Etwas Physiksatiere am Rande: die Mär vom Himalayasalz	115

Salz und Feuchtigkeit	117
Sauer macht mürbe	117
Aromatransport beim Schmoren	119

Wie sich Gegensätze vereinen lassen	121
Vinaigrettes für den Salat	122
Mayonnaise, Aioli & Co.	125
Saucen: gehalt- und geschmackvoll	129
Kalte Butter und heiße Saucen	130

Kleine Helfer in Speis und Trank	132
Alkoholisches	132
Trinken während der Gärung – Federweißer	133
Sherry, Vin jaune & Co.	134
Chapeau – vielleicht noch ein Gläschen Champagner?	135
Marillen- und andere Schnäpse	136
Gären mit Bakterien: Sauerkraut & Co.	137
Was ist der pH-Wert?	139
Sauerteig: Gären mit Bazillen	140

Flüssiges wird fest	146
Jetzt geht's ans Eingemachte! Confiture und Konfitüre	147
Agar-Agar – Gel vom Meeresboden	150
Hartkochen von Hülsenfrüchten	151
Aufgeladene Gerichte	153
Mehl, Grieß und Klumpen	153
Polenta und die Rezeptanweisung	156
Nothelfer Mehlbutter	157

Schaumschlägereien	159
Süße Schäumchen, genannt Meringen	160
Schockschaum – angewandte Molekulargastronomie	162
Gelschaum, ein Hauch von Schwarzwaldschinken	163
Schaumverhinderer	163
Bierschaum und Schaumwein	164

Was man aus Milch so machen kann –	
Käse und andere Spezialitäten	166
Käse auf indische Art: Matter Paneer	169

Butterschmalz	170
Eine Prise Mehl – damit nichts gerinnt	171
Käse und Mehl: Käsecracker	172
Käsefondue	173
Mozzarella, selbst gemacht	175
<hr/>	
Von Teigen, Plätzchen und anderen Backwerken	178
Kleine Plätzchen, große Teigwissenschaft:	
Hefe-, Rühr- und Mürbeteig	178
Von versunkenen und schwimmenden Früchtchen	181
Blätterteig	182
Zimtstern – das Paradebeispiel für Backen ohne Mehl	184
Backhilfen: damit das Fleisch zusammenhält	186
<hr/>	
Kaffee & Co., die frühmorgendliche Perkolation	188
Kaffee – Espresso – poröse Materialien	192
<hr/>	
Schokoladenverführung	195
<hr/>	
Zum Weiterlesen	197
<hr/>	
Glossar	198
<hr/>	
Register	211

Zum Auftakt – ein kleiner Aperitif

Sicher, jedes anständige Menü sollte mit einem Aperitif beginnen. Dieser stimmt nicht nur das Gemüt für ein größeres Festmahl ein, sondern bereitet Magen und nachfolgende Organe, die wir zur Verdauung dringendst benötigen, auf eventuell schwerere Kost vor. James Bond schwört auf einen Martini. Ganz gleich ob gerührt oder geschüttelt, dieser Wermut enthält jede Menge Bitterstoffe, die unser Verdauungssystem auf Trab halten. Insofern hat der Superagent Recht. Was James aus unserer analytischen Sicht trinkt, ist allerdings nichts weiter als ein Gemisch aus Wasser und Alkohol. Der Rest sind Farb- und Geschmacksstoffe. Manche davon lösen sich in Wasser, andere in Alkohol. Diese anscheinend anklingende Belanglosigkeit hat aber in der Tat einen tieferen physikalischen Sinn, denn wie fein diese Balance der Löslichkeit sein mag, lässt sich allein daran erahnen, dass sich Wasser und Alkohol problemlos mischen. Bei den Geschmacksstoffen des Wermuts passiert wenig Drastisches.

Allerdings bevorzugt so mancher mediterran angehauchte Zeitgenosse einen Pastis, natürlich mit Wasser verdünnt und vielleicht noch einem Eiswürfel. Pastis trinkt niemand pur, also geben wir ganz provenzalisch fünf Teile Wasser auf einen Teil Pastis. Dabei wird der ursprünglich transparente Pastis schnell milchig und trübe.

Hätten wir das Wasser tröpfchenweise zugegeben, würden wir sehen, dass kleine Mengen bis zu einer merklichen Trübung zugegeben werden können. Es bilden sich zwar kurzzeitig kleine weiße Wölkchen, die sich aber schnell wieder auflösen. Offenbar hält der Pastis die Zugabe eines gewissen Wasseranteils aus, bevor er ab einer kritischen Konzentration trübe und undurchsichtig wird. Dieser Vorgang heißt in der physikalischen Chemie „Fällung“. Er zeigt uns hier, dass bestimmte Aromastoffe des Pastis, vor allem jene aus Sternanis, sich in Alkohol lösen, aber nicht in Wasser.



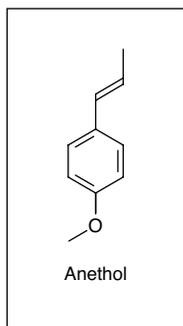
Gibt man dem Pastis Wasser zu, wird er trübe (rechts), Alkohol lässt ihn durchsichtig (links).

Die alkoholische Lösung ist klar, denn die Geschmacksstoffe gehören zu den ätherischen Ölen, und Öle lösen sich nicht in Wasser, denn Wasser und Öl sind völlig unmischbar. Dies liegt natürlich an ihrer molekularen Struktur, wie wir gleich sehen werden. Daraus folgt aber: Würden wir reinen Alkohol statt Wasser zugeben (kein vernünftiger Mensch würde dieses Gemisch allerdings trinken), bliebe die Lösung durchsichtig. Wird aber mehr Wasser zugegeben, fällt der Anteil ätherischer Öle aus, denn diese lagern sich zusammen und bilden Schwebstoffe. Der Pastis wird trübe.

Diese simple Beobachtung folgt einem physikalischen Prinzip, das uns noch häufiger begegnen wird. Es ist also nicht nur für Pastis spezifisch, sondern lässt sich auf eine ganze Vielzahl von Vorgängen anwenden. Wie funktioniert nun diese Trübung? Und wie können wir sie verstehen, ohne allzu viel chemischer und molekularer Details zu kennen? Ganz einfach: Es ist das Wechselspiel zwischen konkurrierenden Wechselwirkungen. Dazu entwickeln wir ein einfaches Gedankenexperiment, das ich hier etwas detaillierter beschreibe, denn es wird exemplarisch sein für viele weitere Überlegungen.

Pastis besteht in der Regel aus 45 % Alkohol, der Rest ist Wasser und eine ganze Reihe von Duftstoffen, darunter etwa 1000mg/l

der intensiv riechenden Substanz Anethol aus Sternanis, die dem Pastis seinen typischen Anisgeschmack gibt.

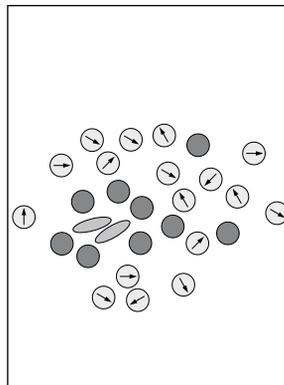
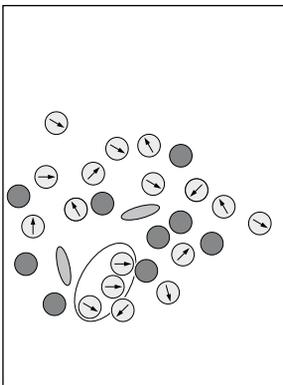
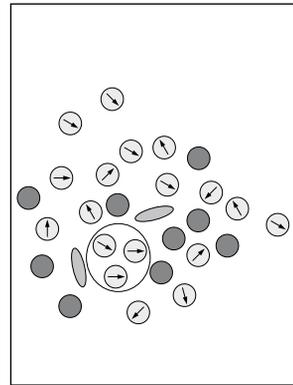
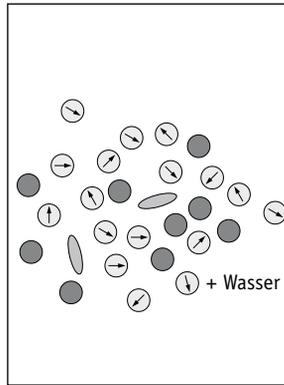
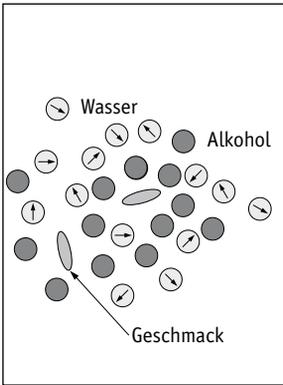


Belassen wir es bei diesen Komponenten, so erhalten wir ein sehr modellhaftes Bild des Pastis aus Alkohol, Wasser und Anetholmolekülen; sie sind im Pastis miteinander vermengt. Da der Sternanisgeschmacksstoff sich lieber mit Alkoholmolekülen umgibt, schart jedes Anetholmolekül eine Alkoholhülle um sich. Solange genug Alkohol vorhanden ist, funktioniert dies problemlos. Gibt man allerdings ausreichend Wasser dazu, dann verteilt sich der Alkohol im Wasser und mehrere Anetholmoleküle müssen sich die Alkoholhülle teilen. So gruppieren sich immer mehr der im Wasser unlöslichen

Moleküle zusammen und bilden dabei so genannte Cluster; diese werden immer größer und sind schnell als Trübung sichtbar. In den Abbildungen S. 18 ist dieser Prozess stark vereinfacht dargestellt. Bei Zugabe von Alkohol erfolgt diese Trübung nicht, denn den ätherischen Ölen stehen immer genug Alkoholmoleküle zur Verfügung, mit denen sie sich umgeben können.

Zu kompliziert? Nein, derartige Modelle lassen sich auch im Alltag finden. Schauen wir einfach mit einem blinzelnden Auge in unseren Bundestag. Dort verhält es sich auffallend ähnlich, es werden sich immer die wenigen eines Lagers unter vielen anderen des anderen Lagers zusammengruppieren. Sie fühlen sich so einfach wohler, haben ein Maximum der Gleichgesinntheit und lediglich die „Randfiguren“ des Grüppchens haben direkten Kontakt mit der politischen Konkurrenz. Alles in allem erhält man so das größte Maß an Zufriedenheit. In der Sprechweise der Physik entspricht dies der niedrigsten freien Energie unter den gegebenen Randbedingungen. Auch in der Thermodynamik ist dieses Prinzip üblich: Es wird immer möglichst wenig Energie eingesetzt.

Die physikalische Tatsache, dass sich Wasser und Öl nicht mischen und dass bestimmte Moleküle lieber Wasser als Öl mögen oder umgekehrt, ist eines der zentralen Themen in der physikalischen Chemie und der Physik der Küche und des Kochens. Viele der im Folgenden besprochenen und bekochten Phänomene werden darauf aufbauen – und dadurch besser verständlich. Umso angenehmer, dass sie uns schon so früh beim Aperitif begegnen. Das hilft auch bei der geistigen Verdauung.



Einfaches Modell zur Trübung des Pastis. Die Geschwacksmoleküle wie das Anethol, hier schematisch dargestellt, umgeben sich lieber mit Alkohol als mit Wasser. Werden immer mehr Wassermoleküle zugegeben, so müssen sich die öligen Geschwacksstoffe zusammenlagern, um sich die Alkoholmoleküle zu teilen. Haben sich genügend Öle zusammengefunden, streuen sie das Licht in alle Richtungen. Der Pastis wird trübe.

Doch zurück nach Marseille, der Hauptstadt des Pastis. Viele Marseillaiser verfärben ihren Pastis gern und häufig. Mit einem Spritzer Grenadinesirup, dann heißt er „tomate“, der blassroten Farbe wegen, oder mit einem Schuss Minzsirup; damit wird er blassgrün wie manch ein Papagei und heißt deshalb „perroquet“. Oder sie lassen ihn farbneutral und geben etwas Mandelsirup dazu. Das nennt sich „mauresque“. Sollten Sie derartige Aperitifs bestellen, gelten Sie übrigens als Kenner der Region. Mögen Sie den Pastis lieber ausschließlich mit Wasser, nennen Sie am besten das Kind beim Namen und bestellen direkt einen Cinquante-et-Un (51), Henri Bardouin oder einen Ricard. Je nach Vorliebe. „Pastis“ bestellen „nur“ Touristen. Alors, santé!

Das Auge isst mit – von Licht, Elektronen und ErnährungsberaterInnen

Zum Einstieg in die Farbenlehre möchte ich Ihnen ein leichtes Gericht mit orientalischen Aromen vorschlagen. Knackige, leuchtend gelbe Karotten eignen sich dafür am besten (Rezept unten). Also rücken wir Karotten farblich und vor allem geschmacklich in ein neues Licht und lassen sie mit arabischen Gewürzen neu erstrahlen.

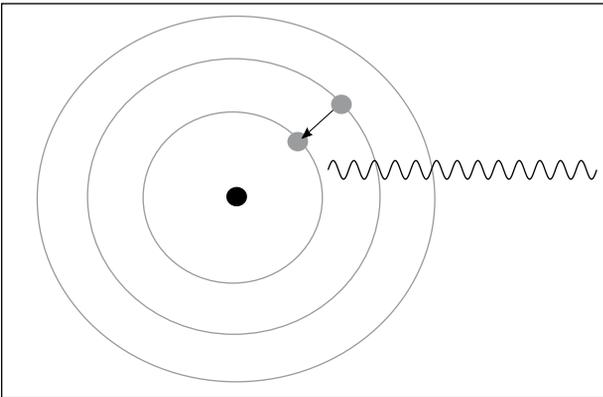
Orientalische Karotten

Dazu bürsten Sie die Karotten zuerst gründlich ab, um alle Wurzelreste und Erde zu entfernen, und schneiden sie, der Optik wegen, in schräge Scheiben. Zuvor hatten Sie schon reichlich Butter in einer Kasserolle sanft erwärmt, gaben etwas Raz-el-hanout und frisch gemörserten Cumin (Kreuzkümmel) aus dem kleinen arabischen Laden um die Ecke dazu. Lassen Sie die Gewürze kurz in der Butter ziehen und geben dann eine Schalotte und jungen Knoblauch, jeweils fein gewürfelt, in die heiße Butter. Dies wird kurz angedünstet, ohne dass Zwiebel und Knoblauch auch nur einen Hauch bräunen. Dann fügen Sie die Karottenscheiben hinzu. Jetzt müssen Sie nur noch leicht salzen und pfeffern. Das Gemüse wird dann bei schwacher Hitze weich gedünstet. Sehr simpel, aber das Resultat lässt sich sehen: Ein duftendes Karottengemüse, ideal als pfiffige Beilage oder schlicht als leichtes Mahl, genossen mit einem Glas fruchtigem Weißwein.

Dieses kleine Gericht besticht durch Geschmack und Farbe. Und durch seine Physik, denn das Karottenleuchten entführt uns zugleich in die Welt der Quanten. Also steigen Sie mit mir hinab in die kleine Welt der Moleküle, Atome und Elektronen.

Elektronen, Licht und Farbe – eine ungewöhnliche Amuse bouche

Wenn heutzutage Politiker und andere in der Öffentlichkeit lebende Stars meinen, etwas Großes vollbracht zu haben, verwenden sie gern und häufig zur Unterstreichung ihrer Tat den Begriff „Quantensprung“. Dabei wird stets außer Acht gelassen, dass Quantensprünge etwas sehr, sehr Winziges sind. Wie immer, wenn unter physikalischen Zusammenhängen der Begriff Quant auftaucht, befinden sich die dazugehörigen Längenskalen mindestens auf molekularem bzw. atomarem Niveau. Das bekannteste Beispiel, das die meisten aus der Schule kennen, ist das Wasserstoffatom. Im einfachsten Modell umkreist ein Elektron einen Wasserstoffkern, ganz ähnlich wie der Mond die Erde. Dabei kann das Elektron zwar verschiedene, aber festgelegte Bahnen einnehmen. Es kann auch von einer äußeren in eine innere Bahn springen; dann sendet es ein Lichtteilchen (Photon) einer bestimmten Frequenz – oder Farbe – aus.



Das einfachste Atommodell. Ein Elektron umkreist den Atomkern auf gewissen Bahnen. Springt es auf eine höhere Bahn, benötigt es ein Lichtquant als Energiekick. Es schluckt oder besser absorbiert das Quant, sofern dessen Wellenlänge stimmt, also seine Energie der Energiedifferenz der Bahnen entspricht. Springt das Elektron von einer höheren in eine tiefere Bahn, wird ein Lichtquant, symbolisiert durch die Wellenlinie, emittiert, also an die Umgebung abgegeben.

Springt es von einer inneren zu einer weiter außen liegenden Bahn, braucht es eine bestimmte Energie. Diese bekommt es von einem der vielen stets umherschwirrenden Lichtteilchen, Physiker nennen sie Photonen. Diese Teilchen sind mit einer ganzen Reihe von Eigenheiten ausgestattet. Dazu gehört, dass ihre Ruhemasse Null ist. Die Ruhemasse ist das Gewicht, das wir auf einer Körperwaage bestimmen könnten. Photonen gehören daher zu den schlanksten Teilchen überhaupt, und nur deshalb können sie auch mit Lichtgeschwindigkeit auf ihre Reisen gehen.

Die andere seltsame Eigenschaft ist, dass sie gleichzeitig Teilchen und Welle sind, also eine Lichtwelle. Trifft nun so ein Lichtteilchen, oder eine Lichtwelle, auf ein Atom, so kann es von einem Elektron völlig absorbiert werden. Das Elektron schluckt die Wellenlänge vollständig und springt damit auf einen höheren quantenmechanischen Zustand. Nun steht die betreffende Lichtwellenlänge der Umgebung nicht mehr zur Verfügung, kann also von unseren Augen nicht mehr wahrgenommen werden. Licht wird absorbiert und Farbe aus dem Spektrum genommen.

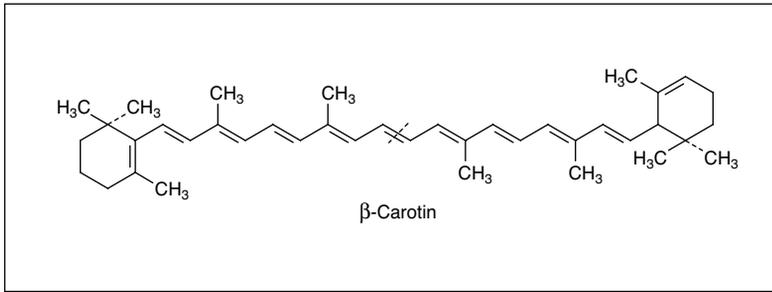
Weißes Licht ist schließlich nichts anders als ein Sammelsurium von verschiedenen Photonen mit allen möglichen Energien – oder von Wellen mit allen möglichen Wellenlängen und zugehörigen Frequenzen. Sobald ein Objekt mit vielen Elektronen diesem weißen Licht einen Teil wegnimmt, um seine Elektronen auf verschiedene Bahnen oder Zustände zu heben, fehlt dieses Licht unserem Auge – und wir nehmen eine Farbe wahr. Auf diese Weise verschluckt bzw. absorbiert das Chlorophyll eines grünen Spinatblatts mit der Anordnung seiner Elektronen einfach alle Farben des weißen Sonnenlichts mit Ausnahme von Grün. Schlicht deshalb erscheint uns Spinat grün.

Offenbar hat eine Vielzahl von Quantensprüngen sichtbare Auswirkungen: die leuchtenden Farben der Gemüsestände auf unseren Märkten. Zu Ihrem Genuss. Und ganz nebenbei zu Ihrer Gesundheit.

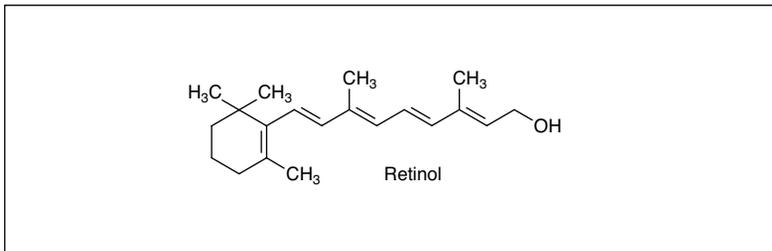
Warum ist die Karotte gelb?

Als Küchenphysiker fallen Ihnen beim Verzehren unseres orientalisch angehauchten Karottengerichts mehrere Dinge auf: Das Butterfett ist nach dem Zubereiten leuchtend gelb und schmeckt intensiv nach Karotten und Cumin. Das Fett agiert – hier bestens demonstriert – als Geschmacksträger Nummer eins, denn es nimmt mehrere fettlösliche Aromen der Karotten und des Cumins auf. Beim Cumin ist dies leicht verständlich, denn sein intensiver Duft kommt von den ätherischen Ölen, vorwiegend Cuminaldehyd, die sich im Fett bestens lösen. Mehr noch: Fette sind Lösungsmittel für β -Carotin (Provitamin A), das die Karotten reichlich enthalten. Dieses lineare, gestreckte Molekül ist wegen seiner Elektronenstruktur verantwortlich für die gelbe Farbe.

In der Abbildung S. 22 sehen wir, dass die Kohlenstoffatome in jeder zweiten Bindung durch einen Doppelstrich gekennzeichnet sind.



Jeder dieser Striche steht für ein Elektron eines Kohlenstoffatoms, das sich mit einem des benachbarten Atoms verbindet. Doppelstriche stehen also für zwei Elektronen. Bei solchen sich abwechselnden Einfach- und Doppelbindungen sind die Elektronen nicht so fest gebunden (Experten wissen, dass es sich um ein so genanntes delokalisiertes Pi-Elektronensystem handelt), sondern flitzen relativ frei über das ganze Molekül. Deshalb können sie das Licht auf eine bestimmte Weise absorbieren, sodass bei den Karotten nur die leuchtend gelbe Farbe übrig bleibt.



Das β-Carotin wird auch Provitamin A genannt, denn naiv gesehen kann es in der Mitte in zwei Teile gespalten werden. Dabei entstehen zwei Retinolmoleküle, besser bekannt unter ihrem gängigen Namen Vitamin A. Wenn dazu die Doppelbindung in der Mitte auseinander gebrochen wird, entsteht je ein freies, ungebundenes Elektron, das nun in der Lage ist, andere freie Elektronen zu binden. Diese frei umherschwirrenden Elektronen sind sehr aggressiv, ja sogar radikal in ihrem zerstörerischen Bindungswillen, und greifen nach allem, was sie erwischen können. Selbst vor gesunden Zellen machen sie nicht Halt. So ist es besser, diesen freien Radikalen jede Menge β-Carotin zur Verfügung zu stellen. Das können sie spalten und sich daran festbinden. Schon sind