

Die Magie der Wissenschaften beim Kochen erklärt  
– mit 16 Rezepten

# Wissen schmeckt

Argang Ghadiri  
Thomas Vilgis  
Thomas Bosbach  
*Hrsg.*

 Springer

---

Wissen schmeckt

---

Argang Ghadiri · Thomas Vilgis · Thomas Bosbach  
(Hrsg.)

# Wissen schmeckt

Die Magie der Wissenschaften beim  
Kochen erklärt – mit 16 Rezepten

*Herausgeber*  
Argang Ghadiri  
Wissen schmeckt  
Dormagen, Deutschland

Thomas Bosbach  
Herne, Deutschland

Thomas Vilgis  
Max-Planck-Institut für Polymerforschung  
Mainz, Deutschland

ISBN 978-3-658-21389-3      ISBN 978-3-658-21390-9 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21390-9>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Umschlagfoto: © 2018 Andreas Müller (Designfaktum)

Bildnachweis Fotos mit Block und Löffel: © t\_kimura / Getty Images / iStock

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

als im Januar 2016 die erste Folge von Wissen schmeckt auf YouTube hochgeladen wurde, hätte niemand zu denken gewagt, dass gerade mal zwei Jahre später das gleichnamige Buch zur Sendung bei Springer erscheint. Es begann mit nichts anderem als der Vision, Wissenschaft für alle schmackhaft zu machen. Eine Küche wurde dafür kurzerhand zu einem „Filmstudio“ umgebaut, und mit Smartphones und rudimentären Kenntnissen in Videobearbeitung entstanden die ersten Folgen von „Wissen schmeckt“ – einer Wissens- und Kochsendung, in der wissenschaftliche Themen in der Küche bekömmlich und schmackhaft serviert werden.

Im Vordergrund steht die Vermittlung von Wissenschaft bei einem lockeren Plausch in der Küche, beim Brutzeln und dem ein oder anderen Schluck Wein. Ungezwungen, fernab von Hörsaal oder Fachkonferenz. Lernen mit allen Sinnen sozusagen.

Viele Köche verderben den Brei? Mitnichten! Ein ganz großer Dank gilt den zahlreichen Unterstützern, die von der ersten Sekunde an das Konzept geglaubt haben und auf verschiedene Art und Weise dazu beigetragen haben, dass es Wissen schmeckt überhaupt gibt. Dazu gehören zunächst unsere Gäste und Beitragsautoren, die sich überhaupt auf Wissen schmeckt eingelassen haben. Und auch alle anderen, die nicht zum Vorschein kommen, aber uns enorm unterstützt haben, ob es nun die Ausstattung der Küche, der Umgang mit Social Media oder die Produktion der Sendungen ist. Und natürlich auch der Springer-Verlag, weshalb Sie letztendlich dieses Buch in den Händen halten.

Doch was erwartet Sie in diesem Buch? Es handelt sich um eine kleine kulinarische Reise durch viele wissenschaftliche Themen, die nicht nur Disziplinen wie die Physik, Chemie oder Medizin, sondern auch BWL, Musik und Soziologie beinhalten – um nur einige Beispiele der Themenfelder zu nennen. Dazu servieren wir „Wissenshappen“ vom Leckerwisser, der mit Fakten oder Anekdoten einen Blick über den Tellerrand gewährt. Und natürlich ein Rezept zum Nachkochen – passend zum Thema. Ein guter Wein darf natürlich nicht fehlen, freuen Sie sich daher auf die Weinempfehlungen von dem aus dem Fernsehen bekannten Master-Sommelier Hendrik Thoma.

Jeder Beitragsautor im vorliegenden Buch war natürlich auch bei Wissen schmeckt zu Gast und vor der Kamera. Wir haben für Sie QR-Codes abge-

druckt, mit denen Sie direkt zur entsprechenden Sendung gelangen. So können Sie nicht nur die Lektüre der Themen genießen, sondern auch die Sendung im Anschluss anschauen (oder auch im Vorfeld – wie Sie mögen).

Wie auch immer, wir wünschen Ihnen viel Freude bei der Lektüre und Inspiration für Geist und Gaumen!

Mit kulinarischen Grüßen

*Argang Ghadiri*

*Thomas A. Vilgis*

*Thomas Bosbach*

P.S.: Besuchen Sie uns doch auf [wissenschmeckt.de](http://wissenschmeckt.de)! Und abonnieren Sie uns auf YouTube, Facebook oder Instagram, damit Sie in Zukunft nichts von Wissen schmeckt verpassen. Über ein Like oder einen Kommentar freuen wir uns natürlich auch.



wissenschmeckt

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Rezeptverzeichnis .....	IX
Die Herausgeber.....	XI
Pasta – weiche Materie zwischen Gummi und Glas.....	1
<i>Thomas A. Vilgis</i>	
Das Ohr isst mit!.....	33
<i>Jan Reinhardt</i>	
Kritik in der (Sterne-)Küche .....	49
<i>Michael Hartmann</i>	
Evidenzbasiertes Prototyping – wie Start-ups und Köche ihre Ideen entwickeln .....	69
<i>Christoph Hienerth</i>	
Vorsicht – Schlaganfall! Gesunde Ernährung zur Prävention von Herz-Kreislauf-Erkrankungen.....	91
<i>Raul Lande</i>	
Digitale Transformation des Betrieblichen Gesundheitswesens – ein Gruß aus der Küche.....	107
<i>David Matusiewicz</i>	
Grundlagen der Duft- und Geschmackswahrnehmung .....	131
<i>Martin Wurzer-Berger</i>	
Die Digitale Transformation in der Küche.....	147
<i>Tobias Kollmann</i>	
Proteine – essenzieller Bestandteil unserer Ernährung .....	169
<i>Josef K. Felixberger</i>	
Betriebliches Gesundheitsmanagement – muss man zwischen Schokolade und Broccoli wählen? .....	197
<i>Theo Peters</i>	

Die optimierte Nutzung von sozialen Medien im B2B-Geschäftsentwicklungs- und kreativ-kulinarischen Bereich.....	213
<i>Werner Krings</i>	
Labskaus – Dosenfutter und Meer.....	233
<i>Sylvia Feil</i>	
Rote Beete kommt in die Stadt zurück.....	255
<i>Darya Hirsch</i>	
Wie man Männerschnupfen diagnostiziert, analysiert und mit Suppe kuriert.....	273
<i>Peter Buchenau</i>	
Geschäftsprozessmanagement und Kochen – eine schmackhafte Kombination.....	299
<i>Andreas Gadatsch</i>	
Teamfähigkeit und andere Kompetenzen in agilen Organisationen – warum nicht immer viele Köche den Brei verderben.....	319
<i>Gottfried Richenhagen</i>	
Impressionen aus den Sendungen.....	335
Das Team von Wissen schmeckt.....	349
Stimmen zu Wissen schmeckt.....	353

# Rezeptverzeichnis

Spaghetti alla puttanesca .....	27
Sushi-Symphonie .....	43
Ochsenbäckchen mit Erbsencreme .....	64
Big Kahuna Burger und Philly Cheesesteak Sandwich.....	85
Dreierlei vom Lachs mit Fenchelsalat .....	101
Steak vom Beefer .....	125
Zweierlei sous-vide-gegarter Pulpo mit Couscous und schwarzem Olivenöl .....	141
Rindergulasch mit Semmelknödeln .....	161
Garnelen im Kokosmantel mit Kürbis .....	191
Schokoladenmousse .....	207
Ramensuppe mit Hähnchenbrust.....	227
Labskaus .....	248
Borschtsch .....	267
Anti-Männerschnupfen-Suppe (auch „Hühnersuppe“) .....	294
Kürbis-Ingwer-Suppe .....	313
Rinderrouladen .....	330

## Die Herausgeber

**Argang Ghadiri** studierte Betriebswirtschaftslehre in Sankt Augustin, Duisburg, St. Gallen und Helsinki und arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg am Fachbereich Wirtschaftswissenschaften. Seine beiden Leidenschaften für die Wissenschaft und das Kochen bringt er mit „Wissen schmeckt“ zusammen, indem er sich mit Gästen aus der Wissenschaft unterhält und mit ihnen kocht.

**Prof. Dr. Thomas A. Vilgis** ist Professor für Theoretische Physik an der Universität Mainz. Am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz leitet Thomas Vilgis eine Arbeitsgruppe zur statistischen Physik weicher Materie sowie eine experimentelle Gruppe zur „soft matter food science“. Er ist Herausgeber der Zeitschrift „Journal Culinaire – Kultur und Wissenschaft des Essens“ sowie Autor zahlreicher Bücher sowohl zur Naturwissenschaft des Kochens als auch zur Physik und Chemie der Lebensmittel.

**Thomas Bosbach** ist aktives Mitglied im Club kochender Männer Castrop und im Slow Food Convivium Bochum. Im Alter von neun Jahren kaufte er sein erstes Kochbuch, worauf bisher 300 Bücher folgten. Das seitdem angesammelte Wissen zu Themen aus der kulinarischen Welt bringt er als „Leckerwischer“ bei „Wissen schmeckt“ ein und präsentiert wissenschaftliche Studien und Anekdoten.





# Pasta - weiche Materie zwischen Gummi und Glas

Thomas A. Vilgis

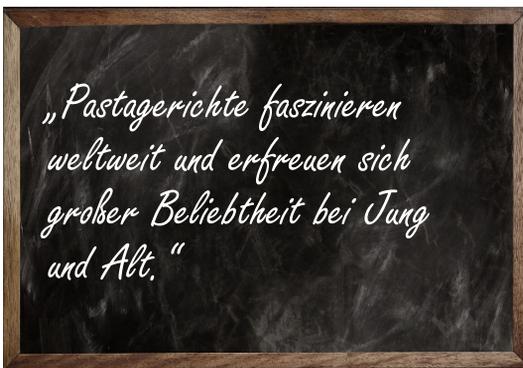


*Beim Genuss von Pasta lässt sich, ganz abgesehen vom Geschmack der Sauce, eine ganze Reihe fundamentaler Prinzipien der Physik weich kondensierter Materie erforschen, etwa die Elastizität gekochter Pasta oder die Sprödigkeit getrockneter Nudeln. Entscheidend für diese Phänomene ist letztlich die Beweglichkeit der Moleküle. Selbst der Pastateig ist eine Wissenschaft für sich: Aus Mehl und Wasser entsteht ein elastischer Teig, der sich mit hohen Kräften und ohne Schaden zu nehmen durch Düsen drücken lässt, damit daraus Spaghetti werden. Die Pasta wird zu einem spröden „Glas“ getrocknet, um nach dem Kochen wiederum zu elastischen, weichen, genussreichen Nudeln zu werden. Den molekularen Ursachen dieser Materialtransformationen wird im Folgenden systematisch auf den Grund gegangen.*

## Einleitung

Keine Frage, Pastagerichte faszinieren weltweit und erfreuen sich großer Beliebtheit bei Jung und Alt. Unabhängig von der kulturellen Entwicklung der Volksgruppen der jeweiligen Erdteile erhielten Teigwaren ihren hohen Stellenwert in der Ernährung. Sei es die Vielfalt der Pasta in Italien und anderen mediterranen Landstrichen (Peter 2006), seien es die Eierteigwaren in den nördlichen Teilen Europas, seien es gefüllte Teigwaren wie Pelmeni in den östlichen Gefilden (Hirschfelder 2013) oder Ramen und Co. in Asien (Wormer 2017). Stärke und mehr oder weniger eiweißhaltige Getreide werden zu Nudeln verarbeitet, die in Suppen landen, als Beilagen oder oft mit Saucen gereicht werden. Dabei müssen die Saucen nicht kompliziert oder komplex im Geschmack sein. Schon die Zugabe von nur wenig Butter oder etwas Olivenöl hebt die Sensorik und kann eine vollständige „*primo piatto*“, dem Antipasti folgend, in einem italienischen Menü sein, denkt man etwa an „*spaghetti aglio e olio*“ (Peter 2006).

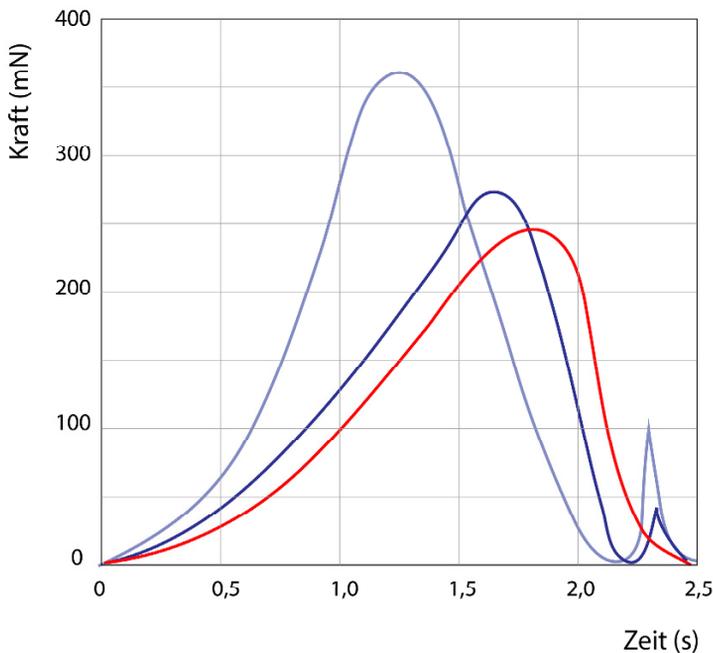
Pasta lässt sich auf verschiedene Weisen herstellen. Die hausgemachte Pasta – sie besteht meist aus Mehl (Weichweizenmehl), Eiern und Wasser – wird gewöhnlich frisch verwendet (Gasser 2014). Der Teig ist elastisch, selbst mit den Fingern hoch deformierbar und verhält sich fast ein wenig wie ein sehr weicher Gummi, der Wassergehalt des Teigs ist sehr hoch, etwa bei 25 bis



30 Prozent (und mehr) der Einwaage. Die Kochzeiten sind sehr kurz, frische Pasta muss lediglich für zwei bis drei Minuten im heißen Wasser garziehen. Gekaufte Pasta hingegen besteht nur aus Mehl (Hartweizengrieß), ist getrocknet und wirkt spröde und brüchig (Banasik 1981). Erst durch das längere Kochen, je nach Typ acht bis 14 Minuten, bekommt sie ihre geschätzte Elastizität und Textureigen-

schaften. Offenbar unterscheiden sich frische Nudeln von getrockneten, ungekochten, erheblich in ihren physikalischen Eigenschaften. Bei industrieller Pastaproduktion wird Hartweizengrieß mit lediglich 16 Prozent Wasser in Hochleistungsmischern zu einem formbaren Teig verknetet und in entsprechende Formen, zum Beispiel Spaghetti, maschinell extrudiert. Anschließend wird die „gummiartige“ Pasta bei Temperaturen um 65 °C auf fünf bis acht Prozent Restfeuchte getrocknet, so bleibt sie ewig haltbar.

Gekochte Pasta überzeugt mit einem weichen, samtigen Mundgefühl. Ihre Oberfläche ist glatt, erzeugt auf der Zunge wenig Reibung und zeigt bei guter Garung eine weiche Textur mit „bissigem“ Kern sowie einem fast süßlichen Getreidegeschmack, der sich mit der leichten Salzigkeit des Kochwassers potenziert. Während in Asien Ramen eher weicher gekocht werden, schwören Europäer, insbesondere Italiener, auf eine „*Al-dente*“-Garung“. Die Unterschiede sind neben aller Subjektivität messbar und damit physikalisch klar definierbar. Dazu werden zum Beispiel Spaghetti in einer „Texturanalyse“ mit einem Werkzeug, das etwa die Funktion eines Schneidezahns erfüllt, mit gleichmäßiger Geschwindigkeit durchschnitten, und die Kraft wird gemessen (siehe zum Beispiel Martinez et al. 2007). Dabei zeigen sich typische Kraft-Zeit-Kurven, deren Verlauf ganz entscheidend von der Kochzeit abhängen, wie in den charakteristischen Verläufen in Abbildung 1 gezeigt ist.



**Abbildung 1** Die „Bisskraft“ durch unterschiedlich lang gekochte Spaghetti. Hellblau: eine Minute unter der angegebenen Kochzeit, dunkelblau: angegebene Kochzeit, rot: eine Minute über der angegebenen Kochzeit.

Die Kurven sehen auf den ersten Blick kompliziert aus, sind aber einfach zu verstehen. Die Spaghetti der hellblauen Kurve zeigen die höchste Kraft. Kein Wunder, denn diese Nudeln wurden nicht vollständig gekocht. Sie

sind nach wie vor noch etwas hart, daher steigt die Kraft stark an. Bei den Spaghetti der dunkelblauen Kurve wurde die Kochzeit eingehalten. Sie sind quasi perfekt, die notwendige Bisskraft ist signifikant kleiner. Bei der roten



Hier geht's zum Video!



wissenschmeckt.de/vilgis

Kurve sind die Spaghetti übergart. Ihre Bisskraft ist noch geringer. Die Form des Anstiegs ist in allen Fällen sehr ähnlich. Der zu Beginn nahezu parabelförmige Verlauf ist typisch für eine hohe Elastizität. Der entscheidende Unterschied zeigt sich aber ganz am Ende der Kurven, kurz vor dem finalen „Durchbeißen“. Dort zeigt die blaue Kurve einen spitzen, hohen Anstieg! Die Bisskraft schnellert nochmals in die Höhe. Wie auch bei der dunkelblauen Kurve, wenn die Kochzeit eingehalten wurde. Die übergarten Spaghetti zeigen keine Spitze mehr. Offenbar ist die Spitze ein Anzeichen des Phänomens „*al dente*“ (Pereboom 1995).

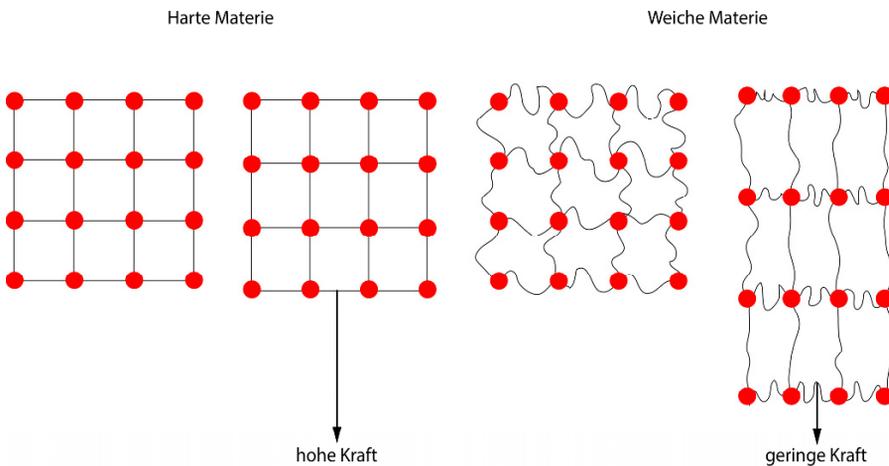
Mit diesen makroskopischen Beobachtungen könnte man sich bereits zufrieden geben, rein technologisch haben wir das Nudelkochen weitgehend im Griff. Physiker schauen aber gern tiefer hinein, denn diese Geschichten müssen letztlich molekulare Ursachen haben, von denen bisher gar nicht die Rede war (Vilgis 2015a). Genau diesen wird im Folgenden auf den Grund gegangen. Dabei wollen wir uns zunächst auf „gekaufte“, also industriell erzeugte, getrocknete Pasta beschränken, denn diese sind aus physikalischer Sicht ein hinreichendes Modellsystem, bestehend aus lediglich zwei Komponenten: Hartweizengrieß und Wasser, aber das ist bereits kompliziert genug.

## Weiche versus harte Materie

Harte Materie ist aus dem Gebiet der Physik der festen Körper bekannt (Chaikin und Lubensky 2005). Dazu gehören zum Beispiel Metalle oder, wie in der Küche weit verbreitet, Salz- oder Zuckerkristalle. Kandiszucker oder Salzsteine zeigen regelmäßige kristalline Strukturen, die „klare Kanten“ zeigen. Mit weicher Materie verbinden wir eher Begriffe wie Einmachgummis, natürlich die Gummibärchen, Wackelpudding oder eben auch gekochte Pasta. Damit ist bereits ein wesentliches Kriterium zur (sehr groben) Unterscheidung zwischen harter und weicher Materie erkannt: Weiche Materie können wir mit den Händen bearbeiten. Metallbänder können wir mit den Händen kaum sichtbar deformieren, Gummibänder (man denke an Therabänder oder Expander) hingegen schon. Die „mechanischen Eigen-

schaften“ unterscheiden sich daher stark. Diese beiden Grenzfälle zeigen bereits einen Einblick in das Verhalten der Materie auf molekularer Skala: In den Kristallen sitzen die Atome fest auf ihren Plätzen und werden über chemische Bindungen stark festgezurr. Sie aus diesen Plätzen mit Deformationskräften herauszubewegen, kostet viel Energie, denn Kristalle sind höchst stabile Formen in einem sehr tiefen Energieminimum. Daher können die Atome auf den Gitterplätzen nur in kleinsten Auslenkungen um ihre Gleichgewichtslage hin und her schwingen.

In weichen Festkörpern, wie zum Beispiel Gummi, besteht die Verbindung zwischen den Gitterpunkten nicht aus fixen chemischen Bindungen, sondern sie sind über flexible, lockere, lange Moleküle verknüpft, die diffundieren können, soweit es die Verknüpfungspunkte zulassen. Daher sind weiche Festkörper mit relativ geringen Kräften deformierbar (siehe zum Beispiel Vilgis et al. 2009; Zielbauer et al. 2016).



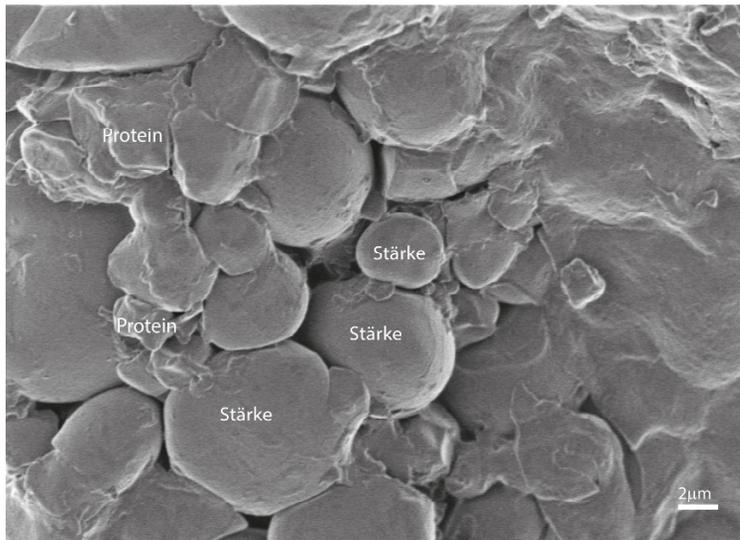
**Abbildung 2** Ein Unterschied zwischen harter und weicher Materie drückt sich in den Deformationskräften aus. Links: Kristalline Festkörper können nur mit sehr hohen Kräften leicht deformiert werden. Rechts: Bei weichen Festkörpern reichen relativ geringe Kräfte für hohe Deformationen.

Lebensmittel gehören meist zur weichen Materie und lassen sich mit Zähnen, Zunge und Gaumen bearbeiten. Ausnahmen bestätigen wie immer die Regel: Wir können so manche harte, kristalline Materialien genussvoll schmelzen, zum Beispiel Schokolade, oder sehr harte Kristalle, wie Kandiszucker oder Salzkristalle, die sich mithilfe unseres Speichels auflösen. Allgemeingültig ist dies allerdings nicht, wie sich an den zum Scheitern verurteilten Versuchen von Olympiasiegern, ihre Medaillen zu zerbeißen, zeigt.

Jeder Pastateig aus Mehl und Wasser fällt damit in die Klasse der weichen Materie. Teig lässt sich „wie Kaugummi“ ziehen, bis hin zu großen Deformationen, bevor er reißt. Wir können den Pastateig daher auch im Mund mit den Zähnen bearbeiten und zwischen Zunge und Gaumen „oral prozessieren“. Frischer Teig gehört definitiv zur weichen Materie (Vilgis 2015b).

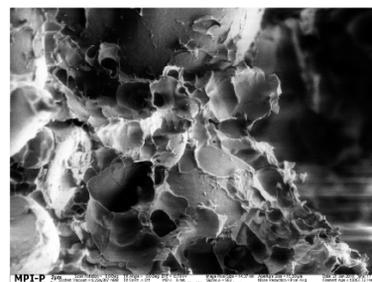
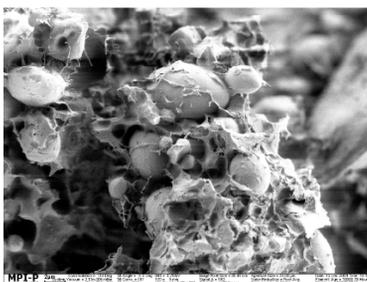
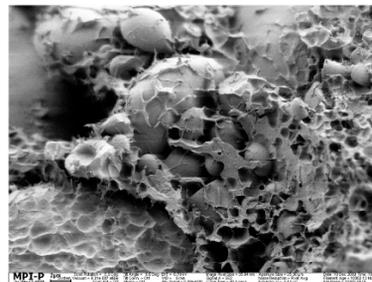
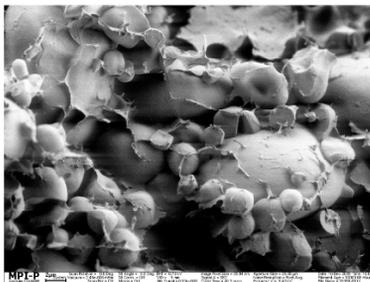
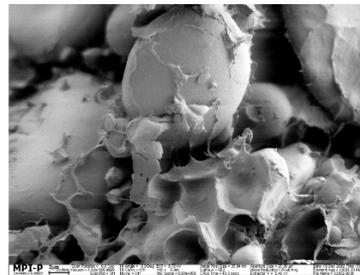
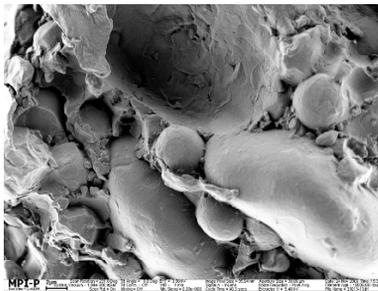
## Mehl - ein faszinierendes Naturprodukt

Für einen Pastateig werden Mehl und eine bestimmte Menge Wasser unter Kneten vermischt (Schiedt und Vilgis 2013), bis aus dem pulverförmigen Mehl ein elastisch hoch dehnbares, gummiartiges „Material“ wird. Wie kann dies geschehen? Die Antwort liegt in den Bestandteilen des Mehls. Trockenes Mehl ist ein Pulver aus gemahlenden (und geschälten) Weizenkörnern, die im Wesentlichen aus einem Gemisch aus Speicherproteinen, dem Klebereiweiß Gluten, und Stärke bestehen. Mittels Elektronenmikroskopie lassen sich diese sichtbar machen (siehe Abbildung 3). Die Stärke liegt in Körnern unterschiedlicher Größe vor, die Proteine in kompakten, irregulär geformten „Proteinkörpern“.



**Abbildung 3** Elektronenmikroskopische Aufnahme von Mehl. Die Stärke liegt in Körnern vor, das Protein in „Klumpen“, den sogenannten Proteinkörpern. Die Proteinkörper haben auf dieser Aufnahme typische Abmessungen von -zwei bis zehn Mikrometern, die Stärkekörner zwischen sechs und 20 Mikrometern. (Quelle: MPI für Polymerforschung)

Aufschluss über die Teigbildung ergibt sich aus systematischen Messungen der Fließeigenschaften der Teige (Schiedt et al. 2013). Visueller und zugänglicher sind direktere Methoden, wie die in Abbildung 3 angesprochene Elektronenmikroskopie. In Abbildung 4 sind daher verschiedene Stadien der Teigbildung als Funktion der Zeit angedeutet.



**Abbildung 4** Teigentwicklung unter dem Elektronenmikroskop. Unter Zugabe von Wasser „entfaltet“ sich das Protein, während sich die Stärkekörner weder in Form noch Größe verändern. (Quelle: MPI für Polymerforschung)

Links oben ist das ursprüngliche Mehl ohne Wasser gezeigt. Klar ersichtlich sind die unregelmäßig geformten Proteinkörper und die „eiförmigen“ Stärkekörner mit ihren mehr oder weniger glatten Oberflächen. Bereits nach zwei Minuten (mittleres Bild links) zeigt sich die Veränderung an den Proteinkörpern. Offenbar quellen sie unter Kneten mit Wasser, Proteine treten da-



bei aus und beginnen, die Stärkekörner einzuhüllen. Zwischen vier und zehn Minuten ist dieser Prozess noch weiter fortgeschritten. Nach zwölf Minuten sind die Stärkekörner praktisch vollständig von einem dünnen „Proteinnetzwerk“ umgeben, während nach weiterer Knetzeit, 20 Minuten, das Proteinnetzwerk wieder größere Lücken zeigt. Die Stärkekörner indes verändern sich nicht, sie bleiben

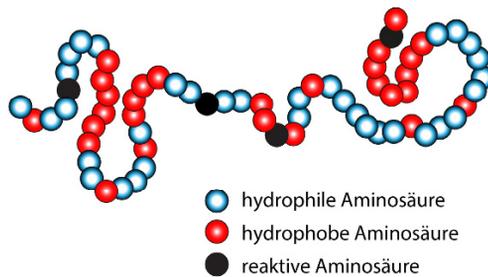
in Größe und Form bestehen. Die Entwicklung des Teigs ist daher den damit verbundenen Proteinveränderungen zuzuschreiben. Makroskopisch wird damit aus dem Mehlpulver ein dehnbarer Teig. Die molekulare Ursache der Teigelastizität ist somit dem Klebereiweiß geschuldet. Die Stärkekörner dienen bei diesem Stadium lediglich als Füllmaterial. Damit wir diese Beobachtungen genauer verstehen, stürzen wir uns zunächst auf die Proteine und deren Eigenschaften.

## Gluten und Elastizität

Proteine sind lange, kettenartige Moleküle, die aus Aminosäuren bestehen. Dazu stellt die Natur 20 protogene Aminosäuren zur Verfügung, aus denen alle Proteine in biologischen Systemen aufgebaut sind. Die Aminosäuren haben allesamt unterschiedliche Strukturen und biologische Funktionen, auf die wir an dieser Stelle gar nicht näher eingehen können. Für die Teigphysik sind aber die grundsätzlichen Eigenschaften der Aminosäuren wichtig, vor allem deren Löslichkeit in Wasser. Manche lösen sich gar nicht im Wasser, sie sind hydrophob. Andere wiederum sind polar, sie lösen sich damit mehr oder weniger gut in Wasser, während fünf Aminosäuren stark wasserlöslich sind, da sie elektrische Ladungen aufweisen. Werden diese unterschiedlichen Aminosäuren in einer bestimmten Abfolge in eine Molekülkette gezwängt, bilden sich starke konkurrierende Wechselwirkungen aus, sodass die Proteinkette entsprechend den Regeln der Physik – der Anziehung und Abstoßung – reagieren muss. Kein Wunder also, wenn Proteine sich durch

die unterschiedlichsten Formen und Funktionen damit generieren lassen (Shirley 1995; Murphy 2001).

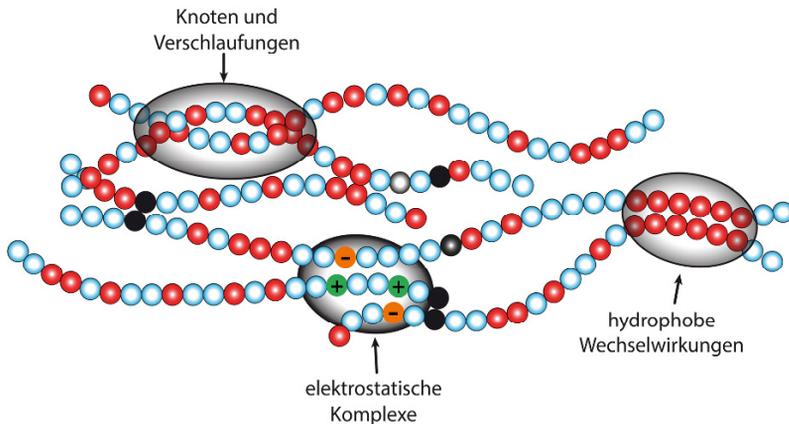
Für das grundsätzliche Verständnis des Teigs sind die Verhältnisse einfacher, denn die Speicherproteine sind weitgehend strukturlos (Vilgis 2010). Für unsere Zwecke reicht es daher aus, Proteine als mehr oder wenige lange Perlenkettenmoleküle zu betrachten, deren Aminosäuren wasserscheu oder wasserliebend sind, wie schematisch in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5** Schematisches Modell einer Proteinkette. Die Aminosäuren sind als Kreise dargestellt. Die Perlen stellen die Aminosäuren dar, je nach ihrer Löslichkeit in Wasser in unterschiedlichen Farben. Auch Aminosäuren, die chemisch reagieren können (schwarze Kreise), werden in Weizenproteine eingebaut.

Im Gluten gibt es eine ganze Reihe unterschiedlicher Proteine, wovon für die Nudelteigphysik nur zwei Typen wirklich wichtig sind. Zum einen sind es relativ kurze Moleküle, die Gliadine. Die andere Gruppe besteht aus sehr langen Proteinen, den Gluteninen (Belton 1999). Welche präzise Form ein Protein annimmt – ob lang gestreckt, eng zusammengeknäult oder zu regelmäßigen Strukturen wie zum Beispiel Helices gefaltet – hängt von der Art und Abfolge der Aminosäuren ab, aus denen es aufgebaut ist. Aber auch von der Umgebung, in der sich das Protein befindet. Im Wasser wäre es thermodynamisch ungünstig, wenn sich eine große Anzahl von nebeneinanderliegenden hydrophoben Aminosäuren ausstrecken würde, denn diese mögen das Wasser nicht. Sie wählen daher einen Ausweg: Sie klumpen sich nach dem Prinzip „gleich und gleich gesellt sich gern“ möglichst eng zusammen, um sich so vor dem „verhassten“ Wasser zu schützen. Die wasserliebenden Bereiche des Proteins hingegen umgeben sich gern mit Wasser und strecken sich eher darin aus. Die Proteine müssen sich daher unter Wasserzugabe und Kneten auf eine physikalisch vorgegebene Weise arrangieren (Vilgis 2010). Proteinphysik ist daher stets von einer hohen Zahl von Kompromissen geprägt (Bucci 2016).

Des Weiteren sind manche Aminosäuren (Arginin, Lysin und Histidin) elektrisch positiv geladen, andere (Asparaginsäure und Glutaminsäure) elektrisch negativ. Da sich unterschiedliche Ladungen anziehen, gleiche Ladungen abstoßen, beide Gruppen aber stark wasserlöslich sind, kommt es im Teig zu weiteren Konkurrenzsituationen, die während des Knetens nach und nach gemäß den physikalischen Gesetzen „gelöst“ werden müssen. Kein Wunder also, wenn sich ein hochdehnbarer, elastischer Teig erst nach und nach bildet, wie dies in Abbildung 6 angedeutet ist.



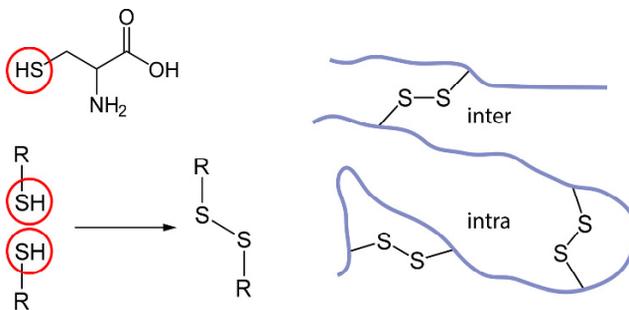
**Abbildung 6** Verschiedene Strukturelemente beim Gluten, die sich nach Wasserzugabe und Kneten bilden: Verschlaufungen und Verknötungen, elektrostatische Komplexe und hydrophobe Zusammenlagerungen.

Unproblematische, schwach wechselwirkende Teile der Proteinketten werden sich verknöten und verschlaufen (Singh und MacRitchie 2001), wie das in vielen Polymerlösungen und Schmelzen der Fall ist, was das zähe, viskose, wie gleichzeitig elastische Verhalten von Polymeren weitgehend erklärt (de Gennes 1979; Doi und Edwards 1986). Unterschiedliche elektrische Ladungen lagern sich aufgrund der starken Anziehung zusammen, während die hydrophoben Abschnitte im Protein vor Wasser schützen, und zum Beispiel sogenannte  $\beta$ -Faltblätter bilden (Kokawa et al. 2013). Diese Modellvorstellung erklärt in der Tat bereits die hohe Dehnbarkeit des Teigs: Ziehen wir sehr langsam daran, lösen sich zunächst die hydrophoben Klumpen auf, sie haben den geringsten Zusammenhalt, danach lösen sich die elektrostatischen Komplexe, die bereits höhere Kräfte zu deren Trennungen benötigen, nach und nach lösen wir bei noch höheren Deformationen die Schlaufen und Knoten. Wenn wir hingegen schnell an dem Teig ziehen, reißen wir ihn auseinander. Zwar lassen sich hydrophobe Wechselwirkungen und

elektrostatische Komplexe lösen, aber die Verschlaufungen und Knoten haben beim raschen Ziehen nicht die Zeit, sich zu lösen. Stattdessen reißt der Teig. Teig gehört somit zur Klasse der „viskoelastischen Materialien“, wie wir es von Silikonspielzeug oder Silly Putty, dem hüpfenden Kitt her kennen (Cross 2012). In allen Fällen – ob Polymermaterialien oder Pastateig – sind somit lange Moleküle mit langsamer, aber großer Beweglichkeit verantwortlich. Universelle Physik eben.

## Erhitzen von Gluten

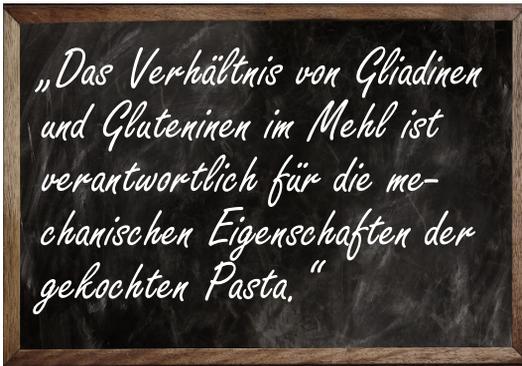
Beim Erhitzen des Glutens, wie beim Nudelkochen (oder beim Backen von Brot), wird diese beim Kneten erzeugte Glutenstruktur „fixiert“. Dazu kommt die schwefelhaltige Aminosäure Cystein ins Spiel, denn sie kann chemisch reagieren und ist in Abbildung 5 und Abbildung 6 als schwarzer Kreis dargestellt. Cystein zeichnet sich durch eine Seitengruppe aus Schwefel und Wasserstoff aus, die „oxidieren“ kann. Dann wird der Wasserstoff abgegeben, und Schwefel wird reaktiv. Treffen also zwei Cysteine aufeinander, können sie bei Temperaturen ab etwa 65 bis 70 °C zu einer Schwefelbrücke, einer sogenannten Disulfidbrücke, reagieren und somit eine permanente chemische Verbindung eingehen, die sehr stabil ist. Cystein kann also Proteine mit sich selbst oder mit anderen Proteinketten vernetzen, wie in Abbildung 7 schematisch dargestellt.



**Abbildung 7** Die Bildung von Disulfidbrücken: Die Schwefelwasserstoffgruppe - (S-H) - reagiert zu Schwefelbrücken - (S-S) - und kann somit Cystein innerhalb eines Proteins (intra), aber auch zwei benachbarte Proteine (inter) miteinander verbinden.

Die Disulfidbrücken bilden sich vermehrt erst beim Erhitzen, also Kochen des Pastateigs. Dabei bei Temperaturen zwischen 65 und 75 °C auf einer Zeitskala unter fünf Minuten (Visschers und de Jongh 2005).

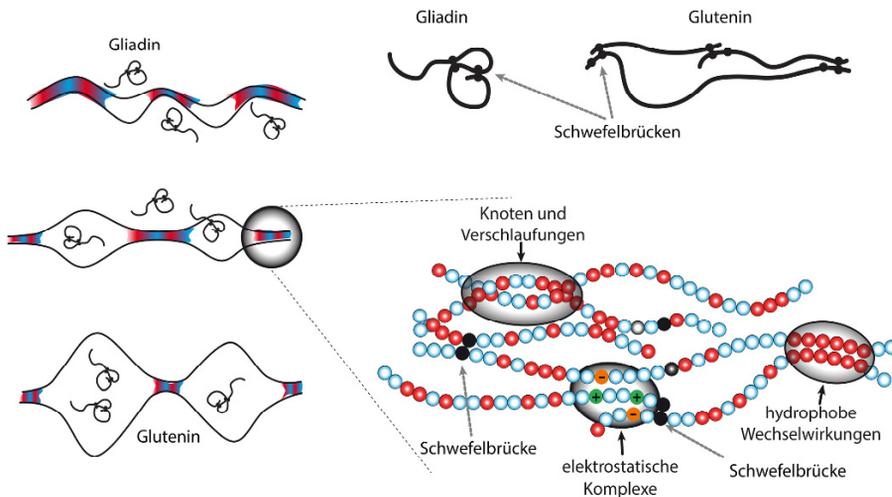
Dabei kommt der Unterschied zwischen den verschiedenen Weizenproteinen zum Tragen. In den kurzen, nur aus etwa 300 Aminosäuren bestehenden Gliadinen befindet sich das reaktive Cystein vorwiegend in der Mitte der Proteinketten. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich cysteinhaltige Gliadine selbst vernetzen, ist daher hoch. Ganz anders bei den längeren, hochmolekularen, bis 800 Aminosäuren langen Gluteninen. Bei denen befinden sich die reaktiven Gruppen an ihren Enden und sind daher prädestiniert für die



Netzwerkbildung im Teig. Dabei ist das Verhältnis von Gliadinen und Gluteninen im Mehl maßgeblich für die mechanischen Eigenschaften der gekochten Pasta verantwortlich. Während die Glutenine mit ihren Vernetzungen für Elastizität sorgen, wirken die kleinen, mit sich selbst vernetzten Gliadine eher wie ein „weiches Schmiermittel“ und führen somit zu einer hohen Dehnbarkeit.

Elastizität der gekochten Nudel, wie auch die Weichheit und Dehnbarkeit der gebackenen Brotkrume gehen damit auf das Konto des Zusammenspiels von Gliadin und Glutenin (Vilgis 2015b; Zielbauer et al. 2016). Aber auch die in der ungekochten Nudel vorhandenen Verschlaufungen, elektrostatischen Komplexe und hydrophoben „Klumpen“ tragen zum Mundgefühl und der Schlotzigkeit der gekochten Pasta bei, denn sie können sich nach dem Vernetzen gar nicht mehr ohne Weiteres auflösen. Die Beiträge zur Elastizität sind in Abbildung 8 zusammengefasst.

Das sich zwischen den Gluteninmaschen befindende Gliadin, die fixierenden Schwefelbrücken, die Verschlaufungen sowie die zwischen den Maschen eingefangenen elektrostatischen Komplexe und hydrophoben Zusammenlagerungen tragen in unterschiedlicher Weise zum Mundgefühl der gekochten Pasta bei. Bei geringen Deformationen zwischen Gaumen und Zunge lösen sich zunächst hydrophobe und elektrostatische Komplexe, bei stärkerem Drücken werden die Maschen stark gedehnt und das Gliadin herausgequetscht, bis schließlich die Nudel zerbissen werden muss, um einen Teil der permanenten Vernetzungen über Cystein auseinanderzureißen. Erst die Summe all dieser einzelnen Beiträge verursacht das perfekte Pasta-Mundgefühl.



**Abbildung 8** Physikerbild der Eiweiße Gliadin und Glutenin in der gekochten Nudel. Links: Gliadin wirkt als Schmiermittel zwischen den großen Maschen des vernetzten Glutenins. Bei wachsender Deformation der Nudel zwischen den Zähnen im Mund (links von unten nach oben) wird Gliadin aus den Maschen gedrängt. Rechts sind die einfachen Modelle des Gliadins und Glutenins gezeigt, rechts unten die über Schwefelbrücken durch die Temperaturerhöhung (Kochen) fixierte Form aus Abbildung 6.

An dieser Stelle ist es Zeit, auf Abbildung 1 zurückzukommen, denn die elastischen Beiträge des Glutens zeigen sich im Anstieg der Schneidekraft. Bei kleinen Deformationen beziehungsweise kurzen Zeiten des Vorschubs tragen alle in Abbildung 8 gezeigten Phänomene zur Kraft bei. Erst wenn die Steigung der Kraftkurve abnimmt, reißen zuerst die hydrophoben Klumpen, dann werden die elektrostatischen Komplexe getrennt. Bei höheren Kräften und Deformationen (respektive Zeiten) sind aber die Gluteninmaschen so stark gestreckt, dass sie der Deformation nicht mehr standhalten können. Die Proteine und die Disulfidbrücken reißen.

Allerdings ist dies bisher nur die halbe Wahrheit, denn die Stärke wurde bislang vollkommen außer Acht gelassen. Im nächsten Abschnitt werden wir erkennen, dass diese ganz andere physikalische Aufgaben übernimmt als das Klebereiweiß.

## Stärkekörner und Elastizität

Wie aus Abbildung 4 ersichtlich ist, sind während des Knetens keine Veränderungen der Stärkekörner erkennbar. Sie quellen nicht, nehmen daher kein Wasser auf, sondern werden trotz ihres hohen Mengenanteils im Mehl in die Proteinmatrix eingebettet. Dennoch trägt die Stärke als „hartes Füllmaterial“ zu den Fließeigenschaften des Nudelteigs bei. Da die Anzahl der

### Wissenshappen vom Leckerwisser

Beim Kochen von Nudeln sinken manche Sorten zu Boden, und andere schwimmen direkt. Dies liegt an der spezifischen Dichte bzw. dem Lufteinschluss im Nudelteig. Bei handwerklich hergestellten oder frischen Nudelsorten ist die Teigstruktur lockerer und beinhaltet mehr Lufteinschlüsse. Industriell gepresste Nudeln sind komprimiert, ihnen fehlt dann der Auftrieb. Den Physiker erinnert das vielleicht an „temporäre cartesische Taucher“, wenn die Bläschen an der Nudeloberfläche nukleieren und wachsen.

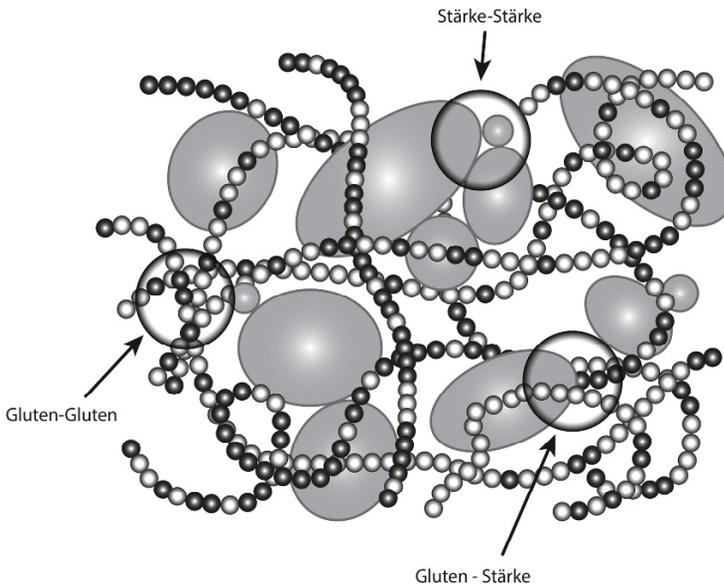
Wissen schmeckt für zu Hause: Buchstabennudeln in Sprudelwasser geben: Die Nudeln werden von den Kohlensäurebläschen zur Wasseroberfläche transportiert. Oben sinken sie aufgrund der spezifischen Dichte wieder zum Grund des Wasserglases. Der Effekt: Tanzende Nudeln.



Stärkekörner aber sehr hoch ist, gibt es sehr viele Kontaktflächen zwischen der Oberfläche der Körner und dem sie umhüllenden Protein. Dabei ist es für die Bearbeitbarkeit bei den hohen Deformationen beim Kneten wichtig, wie gut die Haftung des Glutens auf den Stärkekörnern ist, denn sie entscheidet, ob die Stärkekörner in den Teig eingebunden werden. Daher sind zum

Beispiel die natürlich vorkommenden Emulgatoren (Lipide) wichtig, die diese Haftung verbessern. Tatsächlich ist die Protein-Stärke-Wechselwirkung bis heute nicht im Detail verstanden, denn sie hängt nicht nur von den Oberflächeneigenschaften der Körner ab, sondern auch davon, mit welchen Aminosäuretypen – hydrophil oder hydrophob – das Protein beim Kneten auf die Körner trifft. Schlussendlich gibt es natürlich viele Kontaktstellen zwischen den harten Stärkekörnern selbst – auch hier ist es wieder entscheidend, wie stark sie untereinander haften. So wirken die harten, in dem Proteinnetzwerk eingebetteten Stärkekörner in mehrfacher Hinsicht als Elastizitätsverstärker (Schiedt et al. 2013; Schiedt und Vilgis 2013).

Im Wesentlichen sind es also die netzartige Struktur des Glutens zusammen mit den Wechselwirkungen des Glutens mit der Oberfläche der Stärkekörner und diejenige der Stärkekörner untereinander, die die mechanischen Eigenschaften des Teigs so gestalten, dass der Teig mit hohen Kräften in Maschinen zu Pasta geformt werden kann, ohne zu zerreißen.

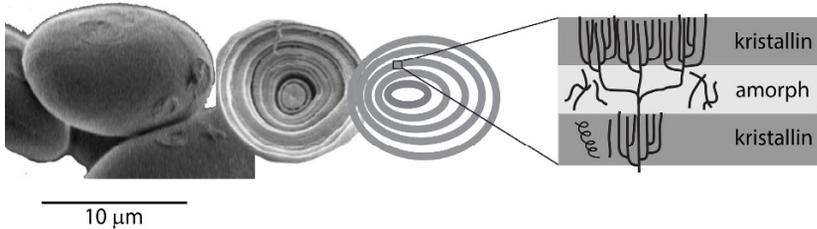


**Abbildung 9** Ein physikalisches Modell des Pastateigs bestehend aus Protein und Stärkekörnern. Dessen elastische Eigenschaften werden zwar hauptsächlich durch die Gluten-Gluten-Wechselwirkungen bestimmt, aber auch die Stärke der „Haftung“ der Eiweiße auf den Stärkekörnern und direkte Stärke-Stärke-Kontakte tragen zu den Fließeigenschaften des Pastateigs bei.

## Aufbau der Stärke und das Verhalten unter Temperatur

Die nächste spannende Frage, die es jetzt zu beantworten gilt, ist die nach dem molekularen Aufbau der Stärke, denn die wird uns auch dessen Funktion beim Kochen der Pasta näherbringen. Schnell stellt man fest, wie hierarchisch die Stärkekörner aufgebaut sind. Stärke ist „polymerisierte Glucose“, also Polyzucker, der in zwei verschiedenen Formen in der Stärke vorkommt. Zum einen die Amylose, eine lange lineare Kette aus über 1.000 Glucosen. Nahezu jedes Molekül wickelt sich im Korn zu einer Helix, sodass ein extrem steifes Gebilde entsteht. Davon sind im Stärkekorn 20 bis 30 Prozent vorhanden, der Rest besteht aus hochverzweigtem Amylopektin, dessen Äste sich so eng zusammenpacken, bis daraus harte, widerstandsfähige Kristalle aus Amylopektin entstehen. Damit diese riesigen Moleküle in ein Stärkekorn passen, müssen sie sich möglichst kompakt anordnen, wie es in Abbildung 10 schematisch gezeigt ist. Stärkekörner sind daher ringfö-

mig aufgebaut, um die hochkristallinen und ungeordneten amorphen Schichten auf dichtestem Raum in die geometrische Form der Körner zu bringen (vgl. Vilgis 2015c).

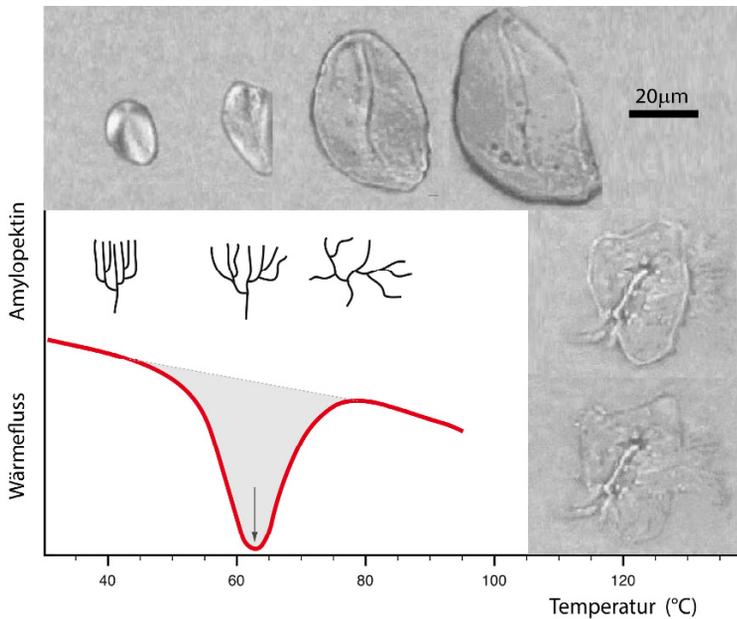


**Abbildung 10** Die Hierarchie in Stärkekörnern. Links sind elektronenmikroskopische Aufnahmen zu sehen. Stärkekörner zeigen Ringe, die sich kristalline und amorphe Schichten teilen. Amylose (linear) und Amylopektin (verzweigt) verteilen sich entsprechend der Darstellung rechts.

Damit wird deutlich, warum sich die Stärke beim Teigkneten gar nicht verändern kann. Die Knetenergie und die dabei auftretenden Kräfte reichen nicht für die Deformation oder mechanische Schädigung der Stärke aus. Dazu sind die Kräfte zu schwach. Auch ist die kinetische Energie der Wassermoleküle bei den Knettemperaturen viel zu niedrig. Wasser kann nicht in die dicht gepackten Stärkekörner oder gar in die kristallinen Teile eindringen. Dies gelingt erst, wenn kristalline Stärke zu schmelzen beginnt. Erst dann vergrößern sich die Abstände zwischen den Amylopektinästen, Wasser dringt ein und „quillt“ die Stärke auf. Diese physikalischen Prozesse lassen sich mittels Messungen untermauern. Schmelzen kostet Energie, als „latente Wärme“ bekannt, die in speziellen „Kalorimetern“ gemessen werden kann. Gleichzeitig lässt sich das Schmelzen und Quellen der Stärkekörner direkt unter einem Polarisationsmikroskop beobachten. Beides zusammen ergibt wieder ein schlüssiges physikalisches Modell für das thermische Verhalten der Stärke, wie es in Abbildung 11 zum Ausdruck gebracht wird (Vilgis 2015b).

In den mikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 11 ist klar zu erkennen, wie das Volumen des Stärkekorns nach dem Schmelzen bis etwa 90 bis 100 °C über die Wasseraufnahme stark wächst (Aguilera et al. 2001). Danach und mit zunehmender Zeit verliert es seine Kornstruktur, und lineare, strukturlose Amylose und geschmolzenes, mit Wasser gequollenes Amylopektin treten aus (Vermeylen et al. 2006). Danach ist nur noch ein „Geisterpartikel“ des ursprünglichen Stärkekorns zu erkennen. Tatsächlich wer-

den diese Kornreste in der Fachliteratur „ghost particles“ genannt (Zhang et al. 2014).



**Abbildung 11** Schmelzen und Quellen von Stärkekörnern. Die rote Kurve zeigt den Schmelzprozess. Die graue Fläche entspricht der Schmelzwärme (Enthalpie). Die Bilder zeigen das Schmelzen und Quellen eines Stärkekorns unter dem Mikroskop als Funktion der Temperatur. Das sichtbare „Kreuz“ in dem Stärkekorn bei 40 °C ist eine Folge des kristallinen Zustands der nativen Stärke. Das Schmelzverhalten ist symbolisch an einem Amylopektinmodell gezeigt. Der Pfeil deutet auf die Schmelztemperatur. (Quelle Mikroskopie aus Aguilera et al. 2001)

Die Schmelzenthalpie, gemessen als die grau schraffierte Fläche unter der Kurve des Schmelzpeaks, beträgt um die 10 J/g. Die Stärke des Pastateigs kann daher erst beim Schmelzen, zwischen ca. 60 °C und 70 °C, Wasser aufnehmen – ein Punkt, der später, beim *Al-dente*-Kochen, nochmals wichtig wird.

Für das Nudelkochen ergibt sich ein wichtiger, oft unterschätzter Aspekt: Das Temperaturintervall des Schmelzens des Amylopektins fällt in den gleichen Temperaturbereich der Bildung der Disulfidbrücken. Die Fixierung des Proteinnetzwerks und das Schmelzen der Stärke finden daher praktisch gleichzeitig statt. Aber Stärke trägt zur Elastizität der Pasta kaum etwas bei, dafür aber zur Plastizität, zur Wasserbindung und damit zum

feinen brüchig-feuchten Mundgefühl. Der Grund dafür ist mit unserer bisherigen Theorie einfach zu verstehen. Für die Elastizität war die Ausbildung der Netzpunkte, also vorwiegend die Disulfidbrücken, verantwortlich. Genau das leistet Stärke nicht. Die lineare Amylose kann zwar zu Knoten, Verhakungen und Verschlaufungen à la Glutenin beitragen, zum permanenten Vernetzen taugt der Polyzucker aber nicht. Die hochverzweigten Amylopektinmoleküle schaffen nicht einmal die Verschlaufungen. Sie stehen sich wie Zahnräder in einem Getriebe gegenüber, können sich wegen des hohen Verzweigungsgrads aber nicht durchdringen. Dennoch füllen sie den ihnen zur Verfügung stehenden Raum bestmöglich aus, binden das Wasser und bilden eine „Stärkepaste“, sie „verkleistern“ oder aus dem Englischen eingedeutscht „gelatinisieren“ (wobei dieser Begriff wegen seiner sprachlichen Nähe zu „Gelierung“ eher irreführend wirkt).

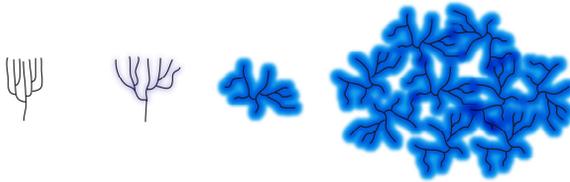
Stärke bildet daher beim Erhitzen einen zähen, pastösen „Kleister“ und kein elastisches „Gel“, bindet aber dabei sehr viel Wasser in Hydrathüllen, wie durch die blaue Schattierung in Abbildung 12 angedeutet ist (Russ et al.



2016). Die Wasseraufnahme nach dem Schmelzen der Stärke zeigt deren vollkommen unterschiedliche Rolle beim Kochen der Pasta im Vergleich zum Klebereiweiß: Durch die völlig unterschiedliche Molekülgeometrie trägt Stärke zum elastischen Teil des Mundgefühls der Pasta nur wenig bei, dafür aber zur Plastizität. Vor allem bei durchgekochter oder frisch hergestellter Pasta. Wird die

Nudel im Mund zerdrückt, dehnt sich das Proteinnetzwerk, bis es reißt, dann wird die „Stärkepaste“ plastisch deformiert. Gerade Letzteres nimmt bei weichgekochter Pasta überhand und wird hin und wieder mit „matschig gekochter Pasta“ beschrieben, wie es beim Kraftverlauf der übergarten Nudel und dem dadurch fehlenden letzten Bisspeak in Abbildung 1 bereits angedeutet wurde. Dabei wird auch der Verlauf der Kurven aus Abbildung 1 bei höheren Deformationen (sprich Zeiten) verständlich. Ist das Proteinnetzwerk beim Maximum der Kraft gerissen, muss lediglich die verkleisterte Stärke dem Vorschub des Schneidewerkzeugs ausweichen. Da Stärke aber nicht vernetzt ist, muss kaum Kraft dafür aufgewandt werden. Mit jedem weiteren Vorschub wird die Kraft daher immer geringer. Kein Wunder also, wenn die Bisskraft bei höheren Deformationen immer schwächer wird: Dies ist der Plastizität der Stärke geschuldet. Ist die Nudel mat-

schig gekocht, nimmt die Kraft immer weiter ab. Die Textur wirkt sensorisch unangenehm, es sei denn, die Sauce kann mit entsprechendem Geschmack oder verschiedenen Texturelementen punkten. Pastakenner raten daher zum *Al-dente*-Kochen. Jede Nudel hat dabei einen harten Kern, der aber ganz besondere physikalische Eigenschaften aufweist. Er ist das Überbleibsel eines physikalischen Glases, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

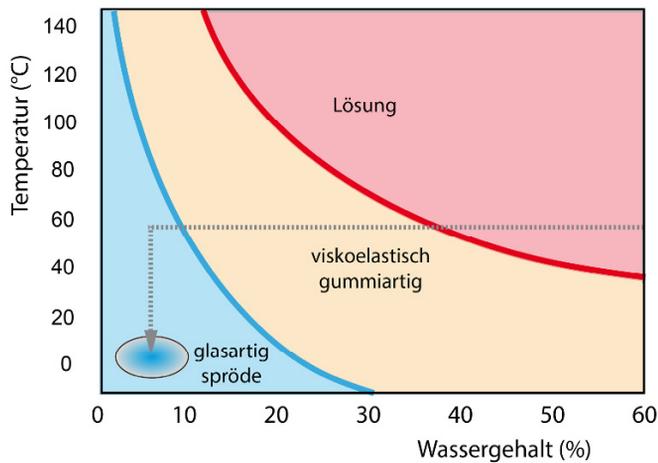


**Abbildung 12** Die Verkleisterung des Amylopektins. Vor dem Schmelzen der Kristalle (links) kann kein Wasser aufgenommen werden. Beim Schmelzen beginnt die Wasseraufnahme. Das vollständig geschmolzene Amylopektin bindet in hohem Maße Wasser. Gequollenes Amylopektin kann sich wegen der hohen Verzweigung nicht durchdringen oder gar vernetzen. Die Moleküle halten sich gegenseitig wegen ihrer langen Äste auf Abstand, sie bilden einen „Stärkekleister“ (rechts).

## Al dente - aus molekularer Sicht

Industriell gefertigte Pasta wird unter verhaltenen Temperaturen unter 60 °C getrocknet, sodass Stärke (bei diesen niedrigen Wassergehalten von 16 Prozent) kaum schmelzen kann. Allerdings wird dem „gummiartigen“ Zustand des Gluteninnetzwerks der „Weichmacher“ Wasser entzogen. Die Bewegungsfreiheit der Gluteninmoleküle wird dabei immer mehr eingeschränkt. An Diffusionsbewegungen zwischen den Schlaufen und Knoten ist dabei gar nicht mehr zu denken. Das transiente Proteinnetzwerk wird während des Trocknens gezwungen, sich auf engstem Raum „festzufrieren“. Eine diffusionsartige Bewegung der Proteine auf großen Skalen wird immer mehr eingeschränkt. Aus der „weichen“ wird beim Trocknen „harte“ Materie. Allerdings kein regelmäßiger Kristall, denn den Proteinen bleibt nichts anderes übrig, als eine ungeordnete Anordnung unter den gegebenen Randbedingungen zu akzeptieren. Aus dem elastischen Proteinnetzwerk wird ein sprödes Glas. Jeder Deformation von außen können die „festgefrorenen“ Moleküle nur noch bedingt folgen, die trockene Nudel bricht daher sehr leicht.

Der Glasübergang ist ein generelles Phänomen in der Physik (Debenedetti und Stillinger 2001). Jedes Material, bei dem es gelingt, eine Kristallbildung zu verhindern, lässt sich in einen Glaszustand, den amorphen Festkörper, überführen. Bei Lebensmitteln ist dieser Glasübergang unter Trocknung besonders wichtig, etwa für die Lagerung, nicht nur, da Mikroorganismen keine Lebensgrundlage für deren Vermehrung haben, sondern auch wegen der stark herabgesetzten Molekülbeweglichkeit, die eine rasche Alterung verhindert (Roos 2017). Wie eben in der getrockneten Pasta, die auch nach Jahren noch ohne Einschränkungen gekocht werden kann. In einem Phasendiagramm, wie in Abbildung 13 dargestellt, ist das allgemeine Prinzip gezeigt.



**Abbildung 13** Ein typisches Phasendiagramm zu den Zuständen eines Lebensmittels. Werden Lebensmittel getrocknet (grauer Pfeil), erreicht man zunächst einen gummiartigen, ledrigen Zustand, bevor man ein sprödes (manchmal knuspriges) Glas erzeugt.

Bei hohen Wassergehalten (und hohen Temperaturen) ist das Lebensmittel flüssig (Lösung), wie im oberen Bereich dargestellt; im Falle des Pastateigs entspräche dies einem pfannkuchenartigen Teig, dessen Wassergehalt im Verhältnis zum Mehl so hoch ist, dass er fließt und mit einem Schöpflöffel in die heiße Pfanne gegeben werden kann. Wird hingegen weniger Wasser zugegeben, ist der Teig viskoelastisch und gummiartig. Bei noch geringeren Wassergehalten wird der Teig spröde. Trocknet man die Wasser-Mehl-Präparation beginnend bei hohen Wassergehalten bei Temperaturen um 60 °C (wie durch die graue Linie in Abbildung 13 angedeutet), verdampft immer mehr Wasser. Der Teig durchläuft die Gummiphase, bis er unter der