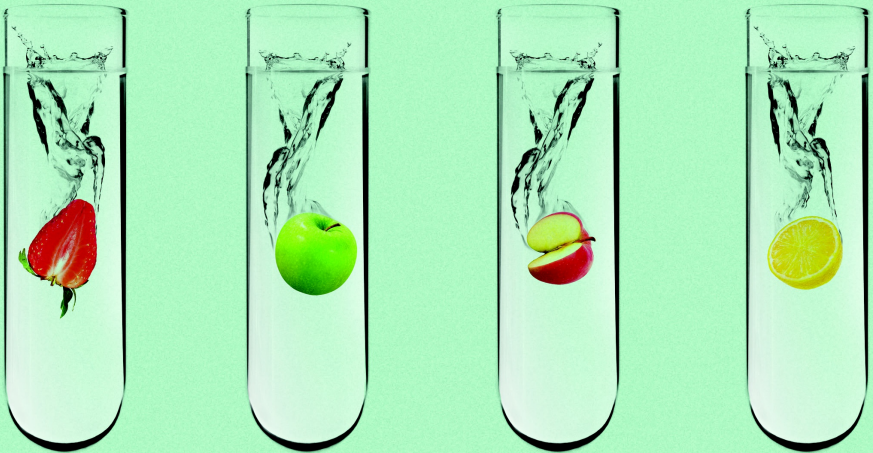


Georg Schwedt und Klaus Günther

Taschenatlas der Lebensmittelchemie

Dritte, aktualisierte und erweiterte Auflage



Taschenatlas der Lebensmittelchemie

Taschenatlas der Lebensmittelchemie

Georg Schwedt und Klaus Günther

Dritte, aktualisierte und erweiterte Auflage

WILEY  **VCH**

Autor

Prof. Dr. Georg Schwedt

Lärchenstr. 21
53117 Bonn
Deutschland

Prof. Dr. Klaus Günther

Institut für Bio- und Geowissenschaften und
Institut für Ernährungs- und
Lebensmittelwissenschaften
Forschungszentrum Jülich
und Universität Bonn
www.prof-dr-guenther.de

Titelbild

Unter Verwendung einer Abbildung von © Nixx
Photography/Shutterstock

3. Auflage 2024

Alle Bücher von WILEY-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

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.

© 2024 WILEY-VCH GmbH, Boschstr. 12, 69469
Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Umschlaggestaltung Wiley

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Print ISBN 978-3-527-34906-7

ePDF ISBN 978-3-527-83248-4

ePub ISBN 978-3-527-83249-1

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|------------------------|------|
| Vorwort zur 3. Auflage | VII |
| Vorwort zur 2. Auflage | VIII |
| Vorwort zur 1. Auflage | IX |

Einleitung 1

| | |
|----------|---|
| 1 | Lebensmittel und ihre Inhaltsstoffe 2 |
| 1.1 | Lebensmitteltexturen und deren zelluläre Grundlagen 2 |
| 1.1.1 | Strukturelemente der pflanzlichen Zellwand 2 |
| 1.1.2 | Strukturelemente des Fleisches 4 |
| 1.1.3 | Strukturen im Mehl 8 |
| 1.1.4 | Disperse Systeme 10 |
| 1.1.5 | Lebensmittelchemische Beispiele für disperse Systeme 12 |
| 1.2 | Lebensmittelchemische Grundprozesse 16 |
| 1.2.1 | Natürliche Prozesse 16 |
| 1.2.2 | Verarbeitung von Lebensmitteln 20 |
| 1.2.3 | Verarbeitung zur Haltbarmachung 30 |
| 1.3 | Einteilung von Lebensmitteln 32 |
| 1.4 | Lebensmittelrecht in der BRD und der EU 38 |
| 1.4.1 | Rechtlicher Rahmen 38 |
| 1.4.2 | Lebensmittelkennzeichnung 40 |
| 1.5 | Lebensmittelsicherheit 44 |
| 2 | Natürliche Lebensmittelinhaltsstoffe 48 |
| 2.1 | Kohlenhydrate 48 |
| 2.1.1 | Monosaccharide 48 |
| 2.1.2 | Oligosaccharide 52 |
| 2.1.3 | Polysaccharide 54 |
| 2.2 | Eiweißstoffe 56 |
| 2.2.1 | Aminosäuren 56 |
| 2.2.2 | Proteine 60 |
| 2.3 | Lipide 64 |
| 2.4 | Wasser 70 |
| 2.5 | Mineralstoffe und Spurenelemente 72 |
| 2.5.1 | Essenzielle Mengenelemente 74 |
| 2.5.2 | Essenzielle Spurenelemente 74 |
| 2.5.3 | Weitere essenzielle Spurenelemente 76 |
| 2.6 | Vitamine 78 |
| 2.6.1 | Niacin, Pantothensäure, Thiamin 82 |
| 2.7 | Enzyme 84 |
| 2.8 | Natürliche Farbstoffe 88 |
| 2.9 | Aromastoffe 92 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3 | Lebensmittelzusatzstoffe | 98 |
| 3.1 | Farbstoffe | 98 |
| 3.2 | Konservierungsstoffe | 100 |
| 3.3 | Antioxidationsmittel | 104 |
| 3.4 | Verdickungs- und Geliermittel | 108 |
| 3.5 | Emulgatoren | 116 |
| 3.6 | Säuerungsmittel und Säureregulatoren | 120 |
| 3.7 | Süßstoffe und Geschmacksverstärker | 122 |
| 3.8 | Spezielle Zusatzstoffe | 126 |
| 4 | Schadstoffe | 130 |
| 4.1 | Grundlagen der Lebensmitteltoxikologie | 130 |
| 4.2 | Natürliche Inhaltsstoffe als Schadstoffe | 134 |
| 4.3 | Schadstoffe in verdorbenen Lebensmitteln | 140 |
| 4.4 | Bei der Zubereitung gebildete Schadstoffe | 144 |
| 4.5 | Rückstände aus der landwirtschaftlichen Produktion | 146 |
| 4.6 | Rückstände aus der Tiermast | 150 |
| 4.7 | Umweltkontaminanten | 154 |
| 4.7.1 | Endokrine Disruptoren | 158 |
| 5 | Lebensmittelproduktgruppen: Chemie und Technologie | 160 |
| 5.1 | Lebensmittelkonsum | 160 |
| 5.2 | Fleisch und Wurstwaren | 162 |
| 5.3 | Fisch | 170 |
| 5.4 | Eier, Milch und andere Milchprodukte | 174 |
| 5.5 | Getreideprodukte | 184 |
| 5.6 | Speisefette und -öle | 196 |
| 5.7 | Gemüse, Hülsenfrüchte, Obst und Pilze | 198 |
| 5.8 | Gewürze | 212 |
| 5.9 | Zucker und Süßwaren | 214 |
| 5.10 | Nicht alkoholische und alkoholische Getränke | 220 |
| 5.11 | Nahrungsergänzungsmittel | 230 |
| 6 | Neuartige Lebensmittel und Technologien | 234 |
| 6.1 | Neuartige Lebensmittel (Novel Foods) | 234 |
| 6.2 | Neue Technologien | 242 |
| 7 | Risiken der Lebensmittelproduktion | 250 |
| 7.1 | Lebensmittelproduktion und Klima | 250 |
| 7.2 | Gesundheitsrisiken | 254 |
| | Weiterführende Literatur | 257 |
| | Abbildungsnachweis | 273 |
| | Sachverzeichnis | 275 |

Vorwort zur 3. Auflage

Der Taschenatlas erscheint nun in der dritten, aktualisierten und erweiterten Auflage. Das erfolgreiche Konzept mit einer Kombination von Text und anschaulichen Tafeln wurde durchgängig beibehalten und durch neue Themen wie Nahrungsergänzungsmittel, Nanotechnologie, Klimaeffekte bei Lebensmittelproduktion und Fleischersatz ergänzt. Lebensmittelchemie muss heute, mehr noch als in der Vergangenheit des Faches, im Zusammenhang mit umweltrelevanten Aspekten gesehen werden, was die seit nunmehr 150 Jahren bestehende eigenständige Disziplin in der Zukunft noch mehr prägen wird.

Nach den grundlegenden Arbeiten durch Justus von Liebig (1803–1873) in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts ist die Lebensmittelchemie als eigenständiges Fach in Münster durch Joseph König (1843–1930) begründet worden. Er publizierte seit 1878 ein mehrbändiges Werk über die „Chemie der menschlichen Nahrungs- und Genussmittel“ und wurde später Professor an der Universität Münster. Im Jahre 1928 erhielt Joseph König die Würde eines Doktors der Landwirtschaft ehrenhalber von der damaligen Landwirtschaftlichen Hochschule Bonn-Poppelsdorf, die 1934 als Landwirtschaftliche Fakultät in die Universität Bonn eingegliedert wurde.

Seit diesen historischen Anfängen hat sich das Fach enorm entwickelt. Neben zahlreichen europäischen und weltweiten akademischen Ausbildungsprogrammen in Food Chemistry existiert in Deutschland an 16 Universitäten ein eigenständiger Studiengang „Lebensmittelchemie“. Auch an einigen Fachhochschulen ist eine Schwerpunktbildung im Bereich der Lebensmittelchemie möglich. Als Beispiel sei hier nur der Studiengang „Angewandte Chemie“ der FH Aachen genannt. In Österreich und der Schweiz sind Studiengänge mit lebensmittelchemischer Ausrichtung an Universitäten in Graz, Wien und der ETH Zürich vertreten. Innerhalb der Gesellschaft Deutscher Chemiker ist die Lebensmittelchemische Gesellschaft die mitgliederstärkste Fachgruppe, was weiterhin das große Interesse an der Thematik widerspiegelt.

Lebensmittelchemische Themen spielen auch in der industriellen und außeruniversitären Forschung eine immer größere Rolle, da die Rohstoff- und Ernährungswende immer mehr in den Fokus von Gesellschaft und Politik rückt. So werden z. B. innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft am Forschungszentrum Jülich im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Bioökonomie auch zentrale Fragestellungen der Lebensmittelchemie bearbeitet, die u. a. die Produktion von hochwertigen pflanzlichen Lebensmitteln unter veränderten Umweltbedingungen betreffen.

GEDACHT ist dieser Taschenatlas als kompakte Informationsquelle zu der Thematik Lebensmittelchemie. Er eignet sich sowohl für Studierende der Lebensmittelchemie als Einstieg, wie auch für Studierende der Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaft, Lebensmitteltechnologie, Agrarwissenschaft, Chemie, Biochemie, Biologie, Biotechnologie, Pharmazie und Medizin, die einen fundierten Überblick über das Fachgebiet wünschen. Den Praktikern und Berufstätigen verschafft der Taschenatlas eine schnelle Übersicht und erleichtert damit auch den Einstieg in spezielle Fragestellungen der gesamten Lebensmittelwissenschaft.

Bonn, im November 2022

Georg Schwedt und Klaus Günther

Vorwort zur 2. Auflage

Die Entwicklungen in der Lebensmittelüberwachung, z. B. die Gründung des Bundesamtes für Verbraucherschutz (Informationen im Internet) werden in dieser überarbeiteten und erweiterten Auflage ebenso berücksichtigt wie neue Bereiche zu den Stichworten Novel oder Functional Food, Qualitätskennzeichnungen (anstelle der häufig veränderten Organisationsstrukturen der Lebensmittelüberwachung) sowie die spezielle Problematik der BSE-Analytik. Dafür wurden auch neue Farbtafeln erstellt.

Sachliche Fehler, die mir dankenswerterweise von Kollegen mitgeteilt wurden, konnten daraufhin korrigiert werden.

Die statistischen Angaben – zum Warenkorb – konnten in den Farbtafeln nicht in allen Fällen aktualisiert werden, da das Konzept und damit die Informationen im „Statistischen Jahrbuch“ sich ab 1999 wesentlich geändert haben. Als Kompromiss wurden die bisherigen Angaben von 1996/1997 beibehalten und soweit wie möglich durch die verfügbaren Daten von 2001/2002 ergänzt.

Als zum Thema Lebensmittelchemie geeignete Experimentierbücher – sowohl für Lebensmittelchemiker als auch für Ernährungswissenschaftler und Ernährungsberater – sind inzwischen ebenfalls im Verlag Wiley-VCH von mir folgende Bücher veröffentlicht worden:

- Experimente mit Supermarktprodukten. Eine chemische Warenkunde, 2. Aufl. 2003
- Noch mehr Experimente mit Supermarktprodukten. Das Periodensystem als Wegweiser, 2003
- Experimente rund ums Kochen, Braten, Backen, 2004

Clausthal, im Sommer 2004

Georg Schwedt

Vorwort zur 1. Auflage

Das Konzept zu diesem Taschenatlas entstand bereits während meiner Tätigkeit als Hochschullehrer und Leiter des Instituts für Lebensmittelchemie und Analytische Chemie an der Universität Stuttgart von 1983 bis 1987, wo ich auch die Hauptprüfung im Staatsexamen für Lebensmittelchemiker durchführte. Nach meinem Wechsel an die TU Clausthal auf die Professur für Anorganische und Analytische Chemie habe ich Diplomanden und Doktoranden lebensmittelanalytische Themen mit lebensmittelchemischen Fragestellungen bearbeiten lassen und mit ihnen darüber publiziert. Zur Ausführung kam dieser Taschenatlas jedoch erst, als der Taschenatlas der Analytik bereits in der 2. Auflage und in Übersetzungen in das Englische, Französische und Japanische sowie das Lehrbuch Analytische Chemie erschienen waren.

1983 erschienen die ersten modernen Lehrbücher der Lebensmittelchemie, die heute zu etablierten Standardwerken ihres Faches gehören: Das „Lehrbuch der Lebensmittelchemie“ von *H.-D. Belitz* und *W. Grosch*, das in kurzen Abständen mehrere Auflagen erlebte und sich zu einem Handbuch entwickelte, und das ebenfalls seit 1983 in mehreren Auflagen erschienene kurze Lehrbuch „Lebensmittelchemie“ von *W. Baltes*, das ich vor allem den Chemikern als Einstieg in die Lebensmittelchemie empfehle. Sie haben neben dem Werk von *C. Franzke* „Lehrbuch der Lebensmittelchemie“ (Band 1 und 2, 1981/2. Neuauflage 1990) auch das Material für meine Vorlesungen in Stuttgart und für diesen Taschenatlas geliefert.

Der *Taschenatlas der Lebensmittelchemie* ist jedoch kein Lehrbuch. Er verfolgt das Ziel, Naturwissenschaftlern aller Fachrichtungen die Grundlagen der Lebensmittelchemie von den charakteristischen Strukturen (Texturen) – *Kap. 1* – über die natürlichen Lebensmittelinhaltsstoffe – *Kap. 2*, die Zusatzstoffe – *Kap. 3*, Schadstoffe und Kontaminationen – *Kap. 4* – bis zu den Lebensmitteln selbst – *Kap. 5* – anschaulich in Bild und kurzen erläuternden Texten zu vermitteln.

Die *Systematik* folgt im Wesentlichen dem Aufbau der genannten Lehrbücher und auch der Hauptvorlesungen im Studiengang der Lebensmittelchemiker.

Im *Kap. 4* werden nach einer kurzen Einführung in die Lebensmitteltoxikologie *Schadstoffe in Lebensmitteln*, sowohl natürlicher Herkunft als durch den Menschen verursachte, vorgestellt. Hier habe ich mich auf fünf Hauptgruppen beschränkt.

Das *Kap. 5* über *Lebensmittelgruppen* ist so aufgebaut, dass jeder Abschnitt in der Regel von statistischen Daten ausgeht (Warenkorb, Pro-Kopf-Verbrauch), den charakteristischen (morphologischen) Aufbau und die durchschnittliche Zusammensetzung spezieller Lebensmittel vermittelt, charakteristische Inhaltsstoffe (soweit sie nicht schon vorher behandelt wurden) vorstellt und auch die Grundlagen der Lebensmitteltechnologie berücksichtigt. Für die „Naturwissenschaftlichen Grundlagen der Lebensmittelzubereitung“ konnte ich auch zahlreiche Anregungen dem Buch von *W. Terres* entnehmen. Für das *Kap. 5* war mir der *Lebensmittelführer* von *G. Vollmer*, *G. Joss*, *D. Schenker*, *W. Sturm*, *N. Vreden* von großem Nutzen.

Wie auch bei den beiden vorhergehenden Taschenatlanten der Analytik sowie Umweltchemie möchte ich dem Grafiker *Joachim Schreiber* für die hervorragende Zusammenarbeit danken. Ihm ist es gelungen, auch grobe Handzeichnungen von mir in informative farbige Bildtafeln umzusetzen. Für die umfangreiche Lektoratsarbeit danke ich ganz besonders Frau Dr. *Barbara Frunder* und Frau *Sandra Martick* vom G. Thieme Verlag, die viele Details kritisch überprüft und korrigiert haben, sowie stets für fachliche Diskussionen bei komplexen Sachverhalten zur Verfügung standen. Fachleute aus den verschiedensten Bereichen der Lebensmittelchemie – von der Lebensmittelüberwachung über die Lebensmittelindustrie bis zur Lebensmitteltechnologie und Lehre der Lebensmittelchemie werden sicher manche Details aus ihrer Sicht vermissen. Vorschläge für fachlich begründete Änderungen sowie Hinweise auf sachliche Fehler nimmt der Autor gern entgegen.

Einleitung

Die *Lebensmittelchemie* hat sich als selbstständiger Zweig der *angewandten Chemie* schon am Ende des 19. Jahrhunderts etabliert. 1894 wurde in Deutschland an den wissenschaftlichen Hochschulen eine Nahrungsmittelchemiker-Hauptprüfung, 1927 die offizielle Bezeichnung *Lebensmittelchemiker*, eingeführt. Erste wissenschaftliche Grundlagen für dieses Fachgebiet hatte bereits Justus Liebig in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts geschaffen. Die Lebensmittelchemie hat sich insgesamt die Aufgabe gestellt, die *Chemie und Technologie der Lebensmittel* zu erforschen, wobei vor allem auch die Erkenntnisse der *Ernährungswissenschaften* Berücksichtigung finden.

Wollte man die Lebensmittelchemie schwerpunktmäßig allein durch eine Wissenschaftsdisziplin charakterisieren, so könnte man sie als eine *angewandte Biochemie* bezeichnen. Diese Benennung hat heute umso mehr ihre Berechtigung, als neue Entwicklungen in der Lebensmitteltechnologie von der neuzeitlichen *Biotechnologie*, die eine *Gentechnologie* darstellt, ausgehen. Zu den frühesten Biotechnologien gehören das Bierbrauen, die Weinbereitung, das Brotbacken und auch die Essiggärung.

Die Grundlagen der Lebensmittelchemie, d. h. der Erkenntnisse über die stoffliche Zusammensetzung und die Veränderungen in den Lebensmitteln pflanzlicher und tierischer Herkunft, kommen insbesondere von der *organischen Chemie*, der schon genannten *Biochemie* und auch der *physikalischen Chemie*. Einen hohen Stellenwert besitzt die *analytische Chemie*, deren Fortschritte nicht nur zur Analyse immer geringerer Stoffmengenkonzentrationen, sondern auch zur Aufklärung bisher unbekannter Zusammensetzungen und Zusammenhänge beigetragen haben. Diese Feststellung gilt nicht nur für die physikalisch-chemische, d. h. instrumentelle Analytik, sondern zunehmend für biochemische Analysenmethoden bzw. für die spezielle *Bioanalytik* bis zu Untersuchungen von Genmustern im Hinblick auf gentechnisch veränderte Lebensmittelprodukte.

Die Lebensmittelchemie orientiert sich vor allem auch in der Lehre sowohl an den Stoffgruppen – Eiweißstoffe, Kohlenhydrate, Fette als Hauptinhaltsstoffgruppen und weiteren

speziellen Lebensmittelinhaltsstoffgruppen – als auch an den Lebensmittelproduktgruppen entsprechend ihrer Herkunft. In der Lebensmitteluntersuchung spielt neben der Chemie auch die *Botanik* (für Lebensmittel pflanzlicher Herkunft) mit ihren speziellen (wie mikroskopischen) Untersuchungsmethoden eine wichtige Rolle. Hier bestehen Berührungsfelder zur Pharmazie. Weiterhin sind für bakterielle Untersuchungen die *Mikrobiologie* und für den Bereich der Lebensmittel tierischer Herkunft die *Veterinärmedizin* in gleicher Weise zu nennen.

Ein weiterer Aufgabenbereich erwächst der Lebensmittelchemie aus dem gewachsenen *Lebensmittelrecht*, das außer den Lebensmitteln, also den Produkten, die zum Verzehr für den Menschen bestimmt sind, auch die sogenannten *Bedarfsgegenstände* umfasst. Dieser Produktbereich reicht von den Lebensmittelverpackungen über Körperpflegemittel bis zu Spielwaren. Alle Anforderungen an die erforderlichen Kenntnisse und Untersuchungen haben den *Schutz der Gesundheit* zum obersten Gebot.

Wichtig für die Fortentwicklung der Lebensmittelchemie bis heute und auch in Zukunft sind somit die genannten *Querverbindungen* zur *Lebensmitteltechnologie*, zur damit verbundenen Entwicklung und zum Einsatz von *Zusatzstoffen*, deren technologische Notwendigkeit bei einer Neueinführung heute in der Regel wissenschaftlich begründet sein muss, zur *Toxikologie* sowohl natürlicher Inhaltsstoffe als auch von Zusatzstoffen bzw. Schadstoffen anthropogener Herkunft und Kontaminanten und zum deutschen sowie internationalen *Lebensmittelrecht* und der Überwachung zur Einhaltung der Gesetze und Verordnungen. Im Hinblick auf die Entwicklung immer neuer, häufig vom Zeitgeschmack abhängiger Lebensmittelzubereitungen (mit dem Stichwort *food design*) ist die Untersuchung von Rohstoffen und Zusatzstoffen von besonderer Bedeutung. Auch im sensorischen Bereich der Bewertung von Lebensmitteln hat sich eine objektive Methodik, die *Sensorik*, entwickelt, die ebenfalls zur Gesamtbeurteilung der *Lebensmittelqualität* neben den genannten anderen Wissenschaftsdisziplinen herangezogen wird.

1 Lebensmittel und ihre Inhaltsstoffe

1.1 Lebensmitteltexturen und deren zelluläre Grundlagen

Die strukturelle Beschaffenheit von Lebensmitteln bestimmt gemeinsam mit Farbe, Geschmack, Geruch und Konsistenz deren *sensorischen Wert*. Dieser ist neben dem Gesundheits- und Marktwert einer der drei Faktoren der Lebensmittelqualität.

Die *Struktur von Lebensmitteln* ist abhängig von ihrer pflanzlichen oder tierischen Herkunft, von den biosynthetisch hergestellten strukturgebenden Lebensmittelinhaltsstoffen und von der Verarbeitung des Rohproduktes.

1.1.1 Strukturelemente der pflanzlichen Zellwand

Konsistenz und Struktur von Obst und Gemüse werden durch die Gerüstsubstanzen der pflanzlichen Zellen festgelegt. Zu den wichtigsten zählen Cellulose, Pektine, Polyosen, Lignine und Glykoproteine.

Die **Mittellamelle** einer Zellwand besteht aus Pektinen, die teilweise durch Magnesium- und Calciumionen verbrückt sind. Die Grundstruktur der anschließenden **Primärwand** enthält neben Pektinen und Polyosen regellos verstreute Cellulose.

A. Cellulose Bedeutendes Biopolymer und wasserunlösliches Polysaccharid, ein isotaktisches β -(1,4)-Polyacetal der *Cellobiose* (diese wiederum besteht aus zwei Molekülen Glucose). Ca. 500–5000 Glucoseeinheiten sind kettenförmig unverzweigt miteinander verknüpft. Die lineare Versteifung des Makromoleküls ist auf intramolekulare Wasserstoffbrücken zwischen den 3-Hydroxygruppen und den Ringsauerstoffatomen benachbarter Glucoseringe zurückzuführen. Die dadurch entstehenden parallelen Ketten lagern sich zu Mikrofibrillen zusammen. In verzweigten amorphen Regionen – Interzellularräume – können u. a. Pektine und Wasser eingelagert werden.

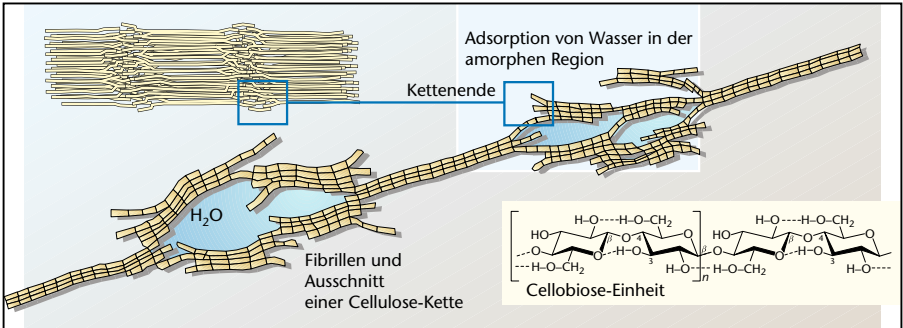
B. Polyosen (früher: Hemicellulosen) Verzweigte (amorphe), heterogene Polysaccharide, die vergesellschaftet mit Cellulose in Zellwänden von Gräsern, Getreiden und höheren Pflanzen vorkommen. In unterschiedlichen Anteilen finden sich als Monomere Hexosen (Galactose, Glucose, Mannose), Pentosen (Arabinose, Xylose)

sowie Uronsäuren (Galacturonsäure, Glucuronsäure). Die für die Zellwandstruktur wichtigsten Polyosen sind Xylane, Arabane, Mannane und Galactane. Xyloglucane sind in der Lage, sowohl Bindungen zur Oberfläche der Cellulosemikrofibrillen, als auch zu einem neutralen Pektinmolekül auszubilden. Quervernetzungen finden beispielsweise auch durch die Ferulasäure statt, die z. B. mit den Glucuronoarabinoxylanen Esterbindungen eingeht.

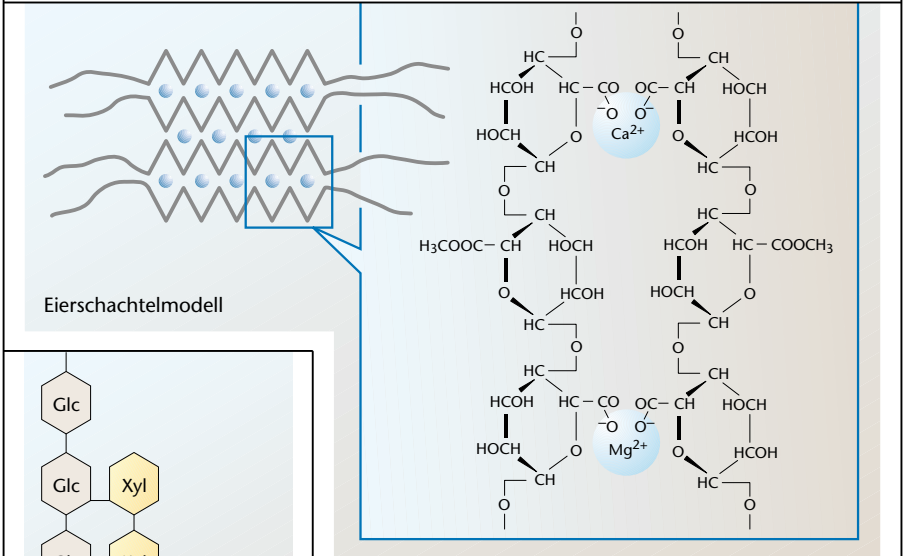
C. Pektine Sie bestehen im Wesentlichen aus Ketten von 1,4- α -glykosidisch verbundenen Galacturonsäureeinheiten, unterbrochen von L-Rhamnoseeinheiten, die in 1,2-Position miteinander verknüpft sind. Als weitere Nebenbestandteile finden sich in den schwach sauren Makromolekülen vor allem D-Galactose-, D-Xylose- und L-Arabinoseeinheiten. Die Carboxylgruppen können in unterschiedlichem Maße mit Methanol verestert sein. Das Enzym Pektinmethylesterase greift diese Gruppen an und baut so die Makromoleküle zu niedermolekularen löslichen Pektinen ab. Beim sogenannten *Blanchierprozess* (Erhitzen von Gemüse auf 60 °C) wird das Enzym aktiviert. Die so freigesetzten Säuregruppen bilden mit Calcium und Magnesium leicht Salze und führen zu einer Verknüpfung der Makromoleküle. Die dadurch auftretende Verfestigung der faltblattartigen Strukturen, kann anhand des **Eierschachtelmodells** verdeutlicht werden. Dieses erklärt auch, dass Tomaten umso fester sind, je höher deren Gesamtpektin sowie ihr Calcium-/Magnesiumgehalt und je niedriger der Veresterungsgrad sind.

D. Lignin und Extensin Bei **Ligninen** handelt es sich um hochmolekulare, aromatische Abkömmlinge des Phenylpropan, die die Räume zwischen den Zellmembranen verholzender Pflanzen ausfüllen. Es bildet sich ein Mischkörper aus Lignin, Cellulose und Polyosen. Die Versteifung des Lignins sowie die Verdickung der Celluloseschicht führen zur Verholzung.

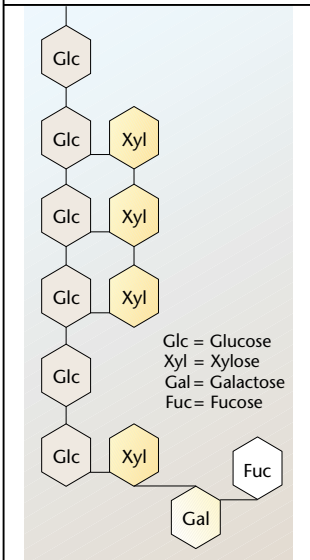
Das Glykoprotein **Extensin**, das – über Tyrosinbrücken vernetzt – unlöslich ist, kumuliert während der Reifungsphase von Früchten und trägt so zur Verfestigung der Zellwand bei.



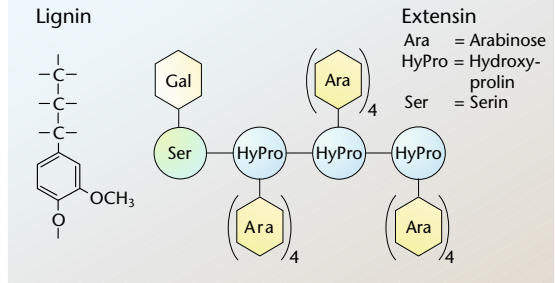
A. Cellulose



C. Pektine



B. Polyosen



D. Lignin und Extensin

1.1.2 Strukturelemente des Fleisches

Die Skelettmuskulatur von Tieren wird im engeren Sinn als Fleisch bezeichnet. Nach den Leitsätzen des Deutschen Lebensmittelbuches werden jedoch alle zum Verzehr durch Menschen geeigneten Teile von Tieren, also auch Innereien, Blut und Haut, als Fleisch definiert.

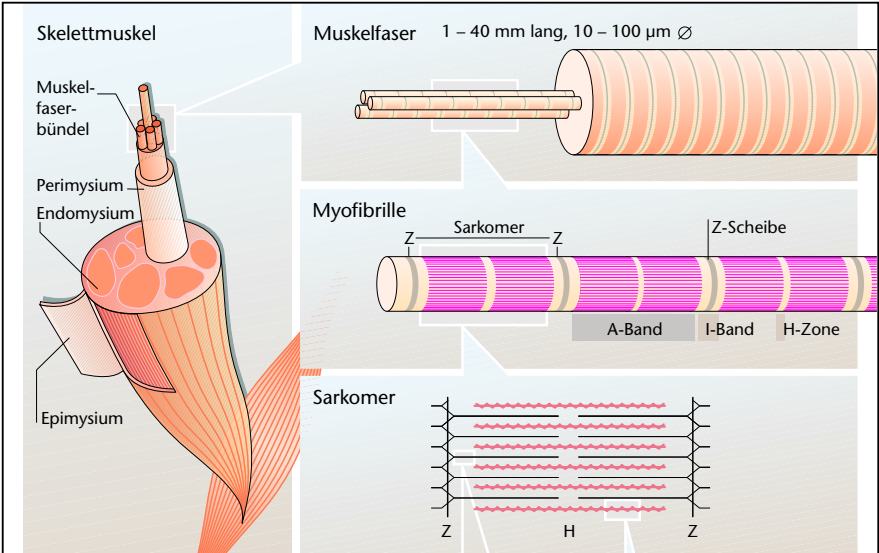
E. Organisation der Skelettmuskulatur Der Muskel besteht aus parallel angeordneten **Bündeln von Muskelfasern**, die von einer Bindegewebsschicht, dem *Perimysium*, ummantelt sind. Jede **Muskelfaser** stellt eine große mehrkernige, vom *Endomysium* umhüllte Muskelzelle dar, die in voller Länge von **Myofibrillen** durchzogen ist. Der gesamte Muskel wird wiederum von einer Bindegewebsschicht, dem *Epimysium* und der Sehne umschlossen. Die in das *Sarkoplasma* (Zellflüssigkeit der Muskelzellen) eingebetteten Myofibrillen bestehen aus einer Vielzahl von Myofilamenten: *dicken Myosin-* und *dünnen Actinfilamenten*. Die für die Skelettmuskulatur charakteristische Querstreifung ist auf die abwechselnde Anordnung heller (I, isotroper) und dunkler (A, anisotroper) Banden innerhalb der als Sarkomer bezeichneten Einheiten zurückzuführen. Diese 2–2,5 µm langen *Sarkomere* werden durch eine dunklere *Z-Linie* getrennt, die so auch die I-Banden unterteilt. Diese *Z-Linien* werden von den Verankerungen der dünnen Actinfilamente verursacht. Als *H-Linie* bezeichnet man den aus dicken Myosinfilamenten bestehenden mittleren Teil der *A-Bande*, in dem sich dünne Actinfilamente finden. Diese *A-Banden* werden durch die besonders dichte *M-Linie* unterteilt, in der dicke und dünne Filamente übereinander gelagert sind.

F. Myofibrilläre Proteine Hauptbausteine für die genannten Filamente sind die myofibrillären Proteine, denen damit eine wichtige strukturgebende Funktion im Muskel zukommt. Die wichtigsten Vertreter dieser Proteingruppe werden auch als kontraktile Proteine bezeichnet. Dicke Myosinfilamente werden aus 200–250 gestaffelt angeordneten Myosinmolekülen gebildet. **Myosin** ist ein Hexamer, das aus zwei gleich schweren α -helixartig umeinander gewundenen Peptidketten (M_r 200 000 Da) und aus zwei Paaren leichteren Polypeptiden (mit je M_r 16–20 kDa) besteht. Am Ende des 150 nm langen und 2 nm

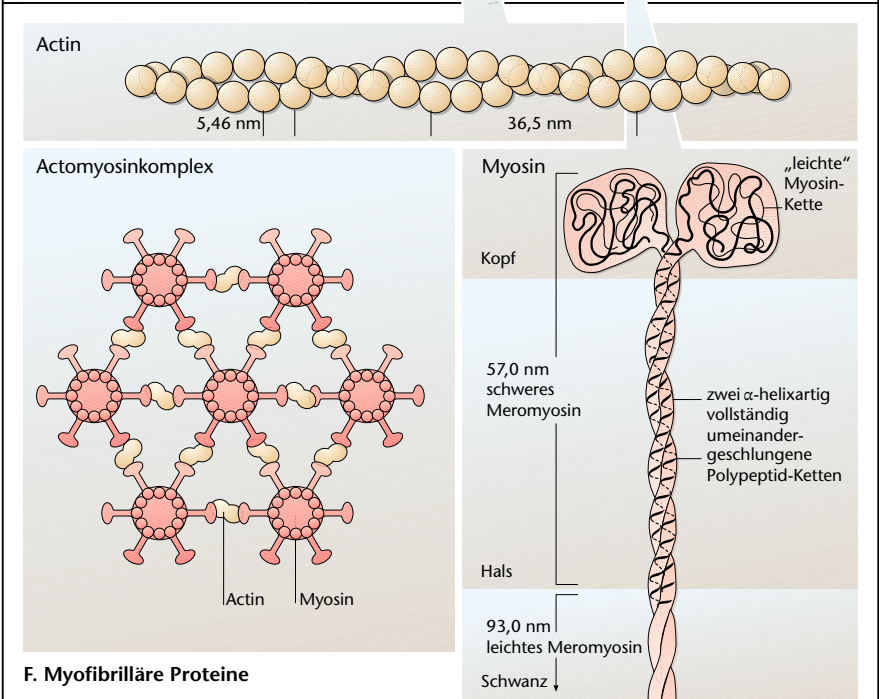
dicken stäbchenförmigen Teils befinden sich zwei flexible, globuläre Köpfe. In diesen Köpfen liegt die Bindestelle für das Actin, mit dem das Myosin während der Muskelkontraktion zu dem temporären *Actomyosinkomplex* zusammentreten kann. Die funktionellen Eigenschaften des Myosins sind durch den hohen Gehalt an SH-Gruppen bestimmt. An den definierten Stellen können die Enzyme Papain und Trypsin das Molekül spalten, was bei der Anwendung von Zartmachern von Bedeutung ist. Aufgrund seiner Aktivität als ATPase kommt dem Myosin eine wichtige physiologische Bedeutung zu: Es katalysiert die Hydrolyse von ATP zu ADP, bei der Energie für die Muskelkontraktion frei wird.

Actin – wichtigste Komponente der dünnen Filamente – besteht aus dem birnenförmigen Monomer **G-Actin** (globuläres Actin) und dem fadenförmigen Polymer **F-Actin**. Die Actinfilamente liegen in doppelhelixartiger Struktur vor. Unter physiologischen Bedingungen und unter Anwesenheit von ATP polymerisiert G-Actin reversibel zu F-Actin. In den dünnen Filamenten liegen neben dem Actin auch die regulatorischen Proteine **Tropomyosin** und **Troponin** vor. Troponin enthält drei Untereinheiten (C, I und T, mit M_r 17 800 bzw. 20 900 und 30 500 Da). Charakteristisch für Troponin C sind die vier Calciumionen je Molekül und die hohe Konzentration an sauren Aminosäuren. Tropomyosin setzt sich aus α -helixartig umeinander gewundenen Ketten von α - und β -Tropomyosin zusammen, die sich in Längsrichtung an das F-Actin anlagern und so etwa sieben Actin-Einheiten stabilisierend miteinander verbinden. Am Ende dieser Ketten ist das Troponin gebunden. Die Erregung und Erschlaffung des Muskels wird calciumionenabhängig von Troponin und Tropomyosin gesteuert. Über die erwähnten Beispiele myofibrillärer Proteine hinaus gehören auch α -Actinin, β -Actinin, Myomesin, Kreatin-Kinase, Titin, Desmin, Filamin und Nebulin zu dieser Gruppe.

Sarkoplasmaproteine: Im Sarkoplasma (Zytoplasma der Muskelzelle) finden sich wasserlösliche **Albumine**, wasserunlösliche **Globuline** ebenso wie **Hämoglobin** und der damit verwandte rote Muskelfarbstoff **Myoglobin**.



E. Organisation der Skelettmuskulatur



F. Myofibrilläre Proteine

G. Bindegewebsnetzwerk Das Bindegewebe ist eine im gesamten Tierreich vorkommende Gewebeart mit spezifischen Funktionen, zu denen vor allem die Übertragung mechanischer Kräfte und die Gewährleistung von strukturellem Halt zu zählen sind.

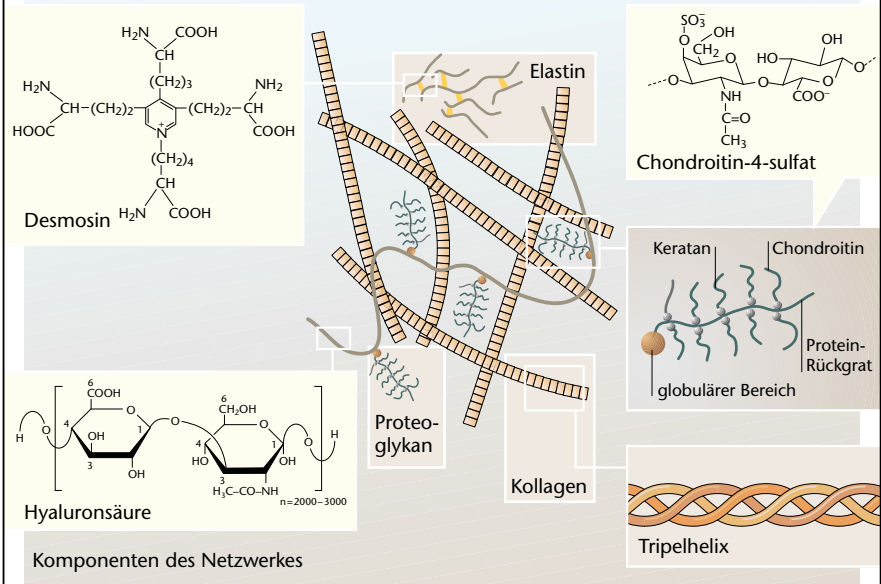
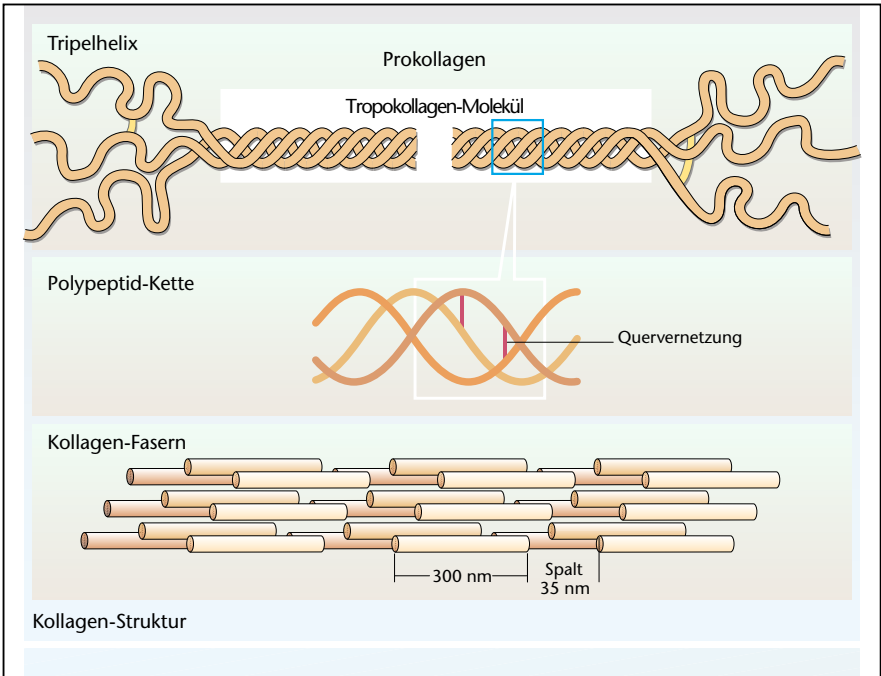
Beim Bindegewebe unterscheidet man im Wesentlichen zwischen *lockerem* (faserarmen) und *festem* (faserreichen) *Bindegewebe*. Lockeres Bindegewebe besteht zumeist aus einer farblosen, amorphen und quellbaren Masse aus Eiweißen, Mucopolysacchariden und eingelagerten Kollagenfasern. Straffes Bindegewebe zeichnet sich durch eine geflechtartige oder parallele Anordnung von Kollagenfasern aus. Der mengenmäßig wichtigste Bestandteil des Bindegewebes ist das *Kollagen*, in dessen Tripelhelix *Hyaluronsäure*, *Proteoglykane* und geringe Mengen von *Elastin* eingelagert sind.

Das **Kollagen**, bei dem man zwischen fünf verschiedenen Typen (I–V) unterscheidet, bildet in verschiedenen Organen oder Bindegewebsschichten des Muskels spezifische Strukturen und Aminosäurezusammensetzungen aus. Charakteristisch für das Kollagen sind die Wiederholung des Glycins (Gehalt: 23–29 %) an jeder dritten Position, der hohe Gehalt an Prolin (15–16 %) sowie an 4-Hydroxyprolin (11–14 %). Ebenfalls bemerkenswert ist das fast vollständige Fehlen von L-Tryptophan, L-Tyrosin und L-Cystin. Durch Abspaltung einiger Aminosäuren an den Peptidkettenenden entsteht aus Prokollagen- α -Ketten **Tropokollagen**. Dieses besteht aus drei Polypeptidketten, die sich in Form einer linksgängigen α -Tripelhelix zusammenlagern. Ihre Starrheit erhalten die Helices durch ausgebildete Wasserstoffbrückenbindungen am sterisch begünstigten Glycin. Eine Polypeptidkette besteht aus jeweils 1000 Aminosäuren mit einer Gesamtmasse von 100 000 Da. Erst durch **Quervernetzungen** innerhalb und zwischen den Fasern des Tropokollagens entsteht das eigentliche Kollagen. Wasserlösliche Gelatine entsteht aus Kollagen durch thermisches Denaturieren und unter hydrolytischen Bedingungen durch Aufbrechen der Quervernetzungen.

Die *Textureigenschaften des Gewebes* werden wesentlich vom Kollagen bestimmt, wobei die intermolekularen Querverbindungen, die mit

dem Alter zunehmen, die Zähigkeit des Fleisches verursachen. Bei der Fleischreifung wird ein Teil der Quervernetzungen der Myofibrillen gelöst, das Fleisch wird zarter; der permanente Teil der Zähigkeit wird aber vom Bindegewebe bestimmt. Im **Bindegewebsnetzwerk** sind zwischen den Kollagenfibrillen Hyaluronsäure und Proteoglykane eingelagert. Grundbaustein der **Hyaluronsäure**, das zur Gruppe der hochviskosen Mucopolysaccharide bzw. der Glykosaminoglykane gehört, ist ein Aminodisaccharid aus β -(1,3)-glykosidisch gebundener D-Glucuronsäure und N-Acetyl-D-glucosamin. Die **Proteoglykane** bestehen aus einem Proteingerüst und Polysaccharidketten aus (1,4)-verknüpften Disaccharideinheiten, die denen der Hyaluronsäure ähneln.

Über eine Uronsäure sind sie in einer β -(1,3)-Bindung mit Glykosaminoglykanen wie *Chondroitinsulfat* und *Keratan(sulfat)* verknüpft. Chondroitinsulfat weist einen globulären Kopf und einen Proteinstrang mit hohem α -Helixanteil auf. Keratan(sulfate) (M, 4–19 kDa) bilden in Knorpel und Knochen zusammen mit den Kollagenen die Proteoglykane aus sich wiederholenden Disaccharideinheiten von D-Galactose, die an 6-O-sulfoniertes N-Acetyl-D-Glucosamin β -(1,4)-glykosidisch gebunden sind. Proteoglykane bilden zusammen mit der Hyaluronsäure hochmolekulare Aggregate, bei denen die Polysaccharidketten zum Kollagen ausgerichtet und die globulären Köpfe an die Hyaluronsäure assoziiert sind. Zusammen bilden Kollagen, Hyaluronsäure und Proteoglykane ein verschlauftes Netzwerk, in dem die Bündeldichte des Kollagens durch die Ladung der Sulfatgruppen der Proteoglykane bestimmt wird. Im Bindegewebenetz findet sich vergesellschaftet mit Kollagen neben den drei genannten Komponenten auch das elastische, mit Wasser nicht quellbare Skleroprotein **Elastin** (etwa 1 % des Muskeleiweißes). Wesensbestimmend für das Elastin sind die Aminosäuren Desmosin, die vier Lysinketten enthält, und Isodesmosin, die für die Quervernetzung zwischen den Polypeptidketten sorgen. Seine Elastizität und Zugfestigkeit verdankt das Elastin eben diesen Vernetzungen.



Komponenten des Netzwerkes

G. Bindegewebsnetzwerk

1.1.3 Strukturen im Mehl

H. Wechselwirkungen zwischen Mehlinhaltsstoffen

Das Hauptkohlenhydrat des Getreides ist die Stärke, die zu 70–80 % aus Amylopektin und zu 20–30 % aus Amylose besteht (s. 2.1 G). Etwa 80 % der Weizenproteine gehören zu den Glutelinen (*Glutenin*) und den Prolaminen (*Gliadin*), die man zusammen als Gluten oder auch Kleber bezeichnet, da sie im Teig das Klebergerüst aufbauen. Die für die Teigkonsistenz wichtigsten Getreidelipide sind die Glykolipide, deren Hauptkomponente die Digalactosyldiglyceride sind.

Setzt man dem Mehl Flüssigkeit zu, entsteht ein Teig, unter dem man im Allgemeinen die halbflüssige bis halbfeste Masse aus Getreidemahlprodukten, Wasser und eventuell zugesetzten Backmitteln (s. 5.5 O) versteht, die durch die Einwirkung mechanischer Energie (Kneten, Schlagen, Rühren) gebildet wird.

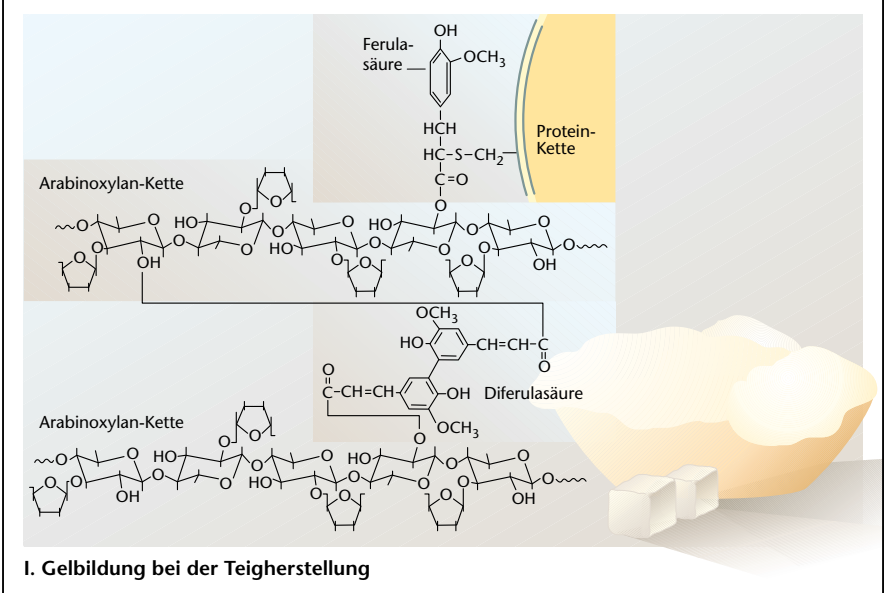
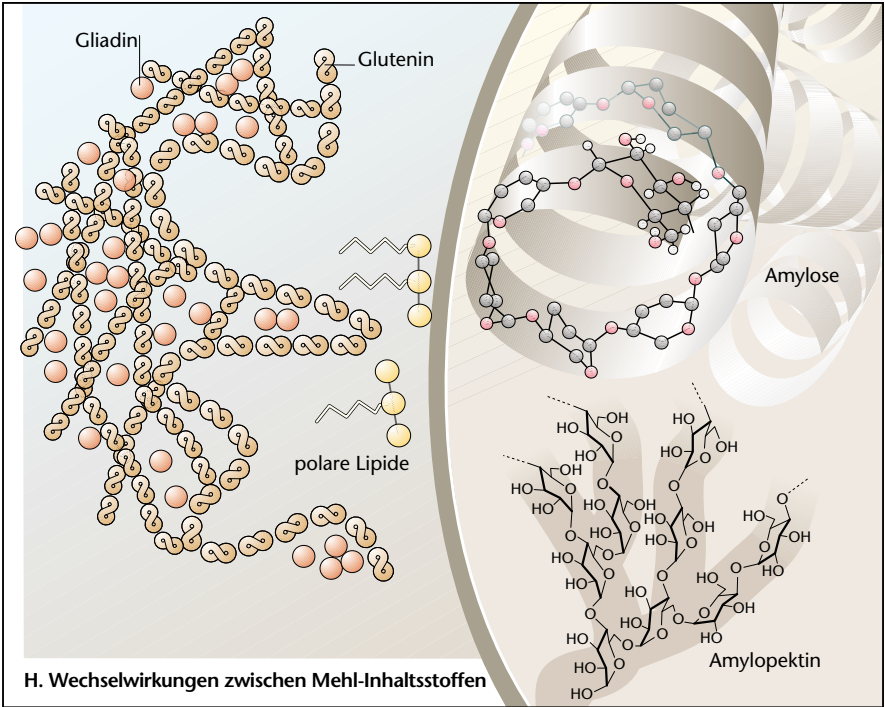
Das Entstehen eines viskoelastischen Teiges ist auf die Ausbildung eines Klebergerüsts zurückzuführen, das durch das Anteigen von Weizenmehl mit Wasser unter Auswaschung der Stärke und anderer wasserlöslicher Anteile entsteht. Diese kohäsive Masse setzt sich zu 90 % aus Gliadin und Glutenin, zu 8 % aus Lipiden und zu 2 % aus Kohlenhydraten zusammen. Proteine und Lipide bilden die oberflächenaktiven Substanzen des Teiges, während dessen rheologischen Eigenschaften und die Stabilität der Poren vor allem durch polare Lipide wie das oben genannte Galactosylglycerid beeinflusst werden. Die Elastizität eines Teiges wird vorwiegend von den hochmolekularen fibrillären Glutelinen und die Viskosität durch das Gliadin bestimmt.

Durch die Wasserzugabe zum Mehl kommt es zu Wechselwirkungen zwischen den (polaren und unpolaren) **Lipiden** und dem Kleber, wobei Glykolipide an **Gliadin** und Phospholipide bevorzugt an **Glutenin**komponenten gebunden werden. Zwischen den polaren Teilen der Mono- und Diglyceride und denen des Glutenins bestehen elektrostatische Wechselwirkungen, während sich die unpolaren Kohlenwasserstoffketten der Glyceride zu den lipophilen Teilen des Glutenins orientieren. Mehleigene Lipide haben somit die Wirkung eines Stabilisators in einem Schaum (s. K). Nach allgemeinen Modellvorstellungen sind die polaren

Lipide mit dem Gliadin in einer flüssig kristallinen Struktur assoziiert und umhüllen die Stärkekörner und die sich bei der Teiglockerung bildenden Gasblasen. Um das Brotvolumen zu erhöhen, sollten daher mehr polare Lipide (wie das Galactosylglycerid) als unpolare Lipide im Mehl vorhanden sein. Die Verbesserung der Teig- und Backeigenschaften durch das Galactosylglycerid wird wie folgt erklärt (nach Nierle und Eibaya, 1987): Die Wechselwirkungen des Glycerids mit den Kleberproteinen erfolgt über den hydrophoben Teil, gleichzeitig werden über die OH-Gruppen des Disaccharids Wasserstoffbrücken mit der Amylose gebildet. Setzt man Lecithin (Phospholipide, Phosphatidylcholine) in nur geringer Menge dem Weizenmehl zu, nimmt dessen Backqualität ab. Dieses hängt damit zusammen, dass Lecithine einen Teil des in der Kleberstruktur eingebauten Galactosyldiglycerids verdrängen. Erst mit höheren Lecithinmengen werden die Backeigenschaften wieder verbessert: Die Lecithine bilden auf der Oberfläche der Stärkekörner aus Amylopektin und Amylose einen Film und verursachen so eine Volumenzunahme des Gebäcks.

I. Gelbildung bei der Teigherstellung Aus Pentosen (Arabinose, Xylose) aufgebaute Polysaccharide (Pentosane), sind bis 3 % im Weizen- und bis zu 8 % im Roggenmehl enthalten. Im Weizenmehl finden sich vorwiegend unlösliche lineare Arabinoxylane (mit Protein-Teil). Die Pentosanketten werden durch eine phenolische Oxidation über Ferulasäure und Diferulasäure mit Proteinketten vernetzt, wodurch die Gelierbarkeit und die Viskosität gesteigert werden. Die unlöslichen Arabinoxylane können das 7–10-Fache ihres Gewichts an Wasser anlagern. Sie beeinflussen dadurch günstig die Saftigkeit des Gebäcks.

Im Bild ist die Vernetzung von Pentosan- und Proteinketten durch die **Ferulasäure** über eine primäre Alkoholgruppe der Arabinose und eine Thiolgruppe des Cysteins gezeigt. Ebenfalls dargestellt ist die Vernetzung über die **Diferulasäure**. Pentosane können auch mit Kleberproteinen reagieren; entstehen aber in Gegenwart oxidierender Substanzen wie Peroxide kovalente Bindungen der Ferulasäure mit Cystein, so wird die Ausbildung eines Klebernetzwerkes verhindert.



1.1.4 Disperse Systeme

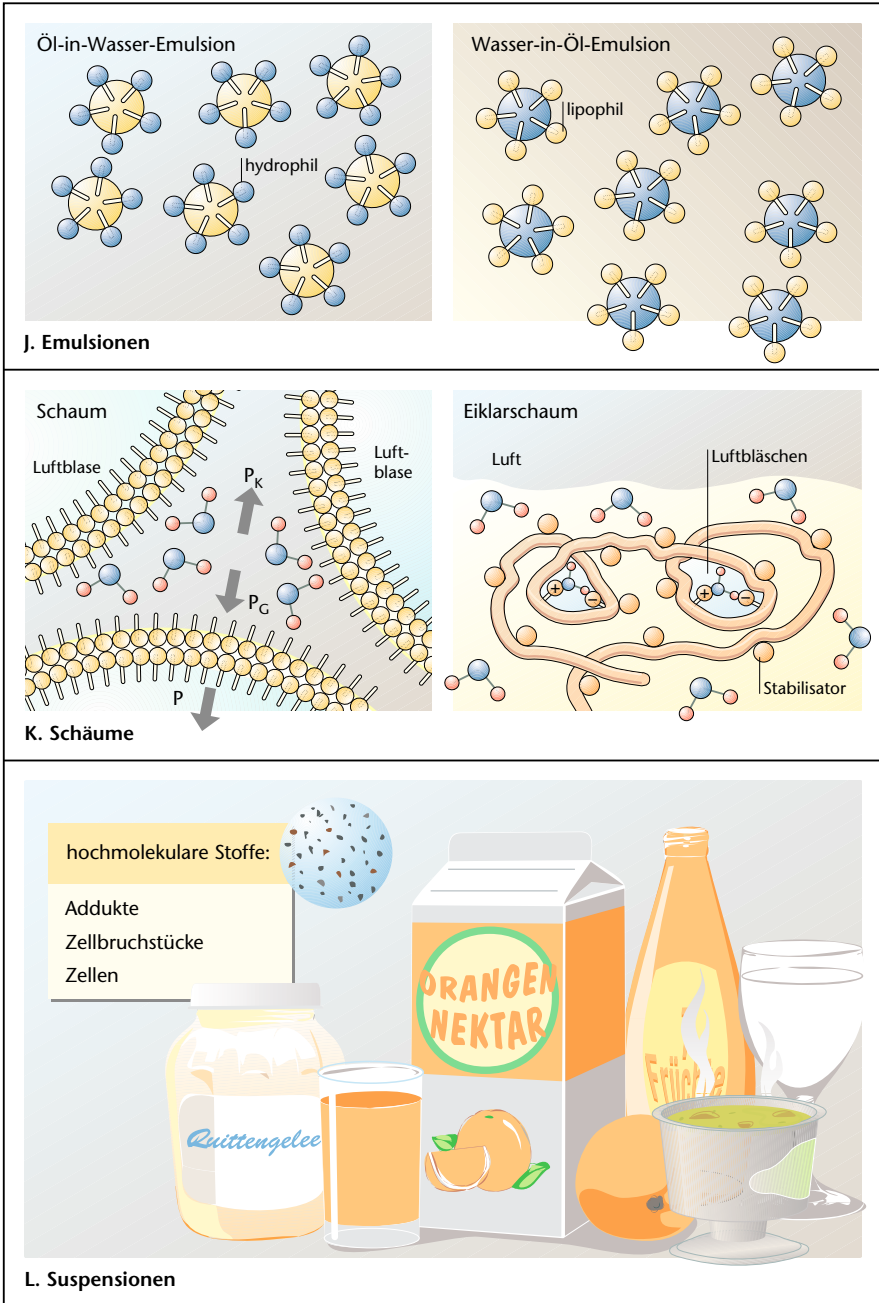
Bei Dispersionen (lat. dispersio, Zerteilung) handelt es sich um die Feinstverteilung eines Stoffes in einer anderen Phase. Eine äußere, kontinuierliche Phase (Dispersionsmittel) und mindestens eine darin feinst verteilte Phase (dispergierte Phase, Dispersgens) bilden ein **disperses System**. Beispiele hierfür sind Emulsionen, Schäume und Suspensionen.

J. Emulsionen Sind sowohl äußere als auch innere Phase eine Flüssigkeit, so handelt es sich um eine Emulsion (Beispiel: aufgeschlagene Soßen wie Sauce hollandaise, Mayonnaise, Salatdressing, Speiseeis, Eigelb). Ist das Dispersionsmittel bei Raumtemperatur ein Feststoff, so liegt eine *feste Emulsion* vor, wie z.B. bei Butter oder Schokolade. Das Erscheinungsbild von Emulsionen wird durch den Tröpfchendurchmesser des Dispersgens bestimmt; liegt dieser unter $5\ \mu\text{m}$ bzw. unter der Wellenlänge des Lichtes, erscheinen die Emulsionen transparent (Soßen bekommen ein samtartiges Aussehen, wenn ihr Teilchendurchmesser mit Hilfe einer Kolloidmühle verringert wurde). Die meisten Emulsionen bestehen aus Wasser und Öl oder Fett als nicht mischbare Phasen. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung und Verteilung der Phasen wird der *Emulsionstyp* als **Öl-in-Wasser-Emulsion** (O/W, international L-H, lipos in hydros) mit Öl als disperser Phase und Wasser als äußerer Phase bzw. als **Wasser-in-Öl-Emulsion** (W/O bzw. H-L) angegeben; im letzteren Fall sind Wassertröpfchen in Öl emulgiert. O/W-Emulsionen mit geringem Ölteil weisen nur leichte Viskositätsänderungen gegenüber Wasser auf. Zu einer Erhöhung der Viskosität infolge der Ausbildung flüssig-kristalliner Gelstrukturen kommt es hingegen bei W/O-Emulsionen. Wie das Beispiel einer Mayonnaise (s. N) mit 80 % Fettanteil – einer O/W-Emulsion – zeigt, ist der Emulsionstyp nicht primär abhängig vom Anteil der jeweiligen Phase am System. Entscheidender sind hier die hydrophilen oder lipophilen Eigenschaften des vorliegenden *Emulgators* (s. 3.5) Das Dispersionsmittel wird durch die Phase gebildet, in der der Emulgator am besten löslich ist. Eine Stabilisierung der Emulsion ist auf die Umhüllung des Dispersgens durch den Emulgator zurück-

zuführen. Wasserlösliche Emulgatoren können in die Wasserphase eindringen und die Öltröpfchen mit einer hydrophilen Hülle umschließen. Lipophile Emulgatoren (s. 3.5) lösen sich im Öl nur mit ihrem lipophilen Teil. Sie breiten sich an der Phasengrenze aus, es bildet sich ein Emulgatorfilm, der Wasser einschließt.

K. Schäume Ein disperses System aus einem flüssigen oder festen Dispersiermittel, in dem ein Gas als Dispersgens vorliegt, wird als Schaum bezeichnet. Man unterscheidet zwischen *niedrigviskosen Schäumen* (Schlagsahne, Biskuit) und *hochviskosen (Fett-) Schäumen* (Teig, Parfaits). Die äußere wässrige Phase enthält z. B. gelöste Proteine und Zucker. Die Stabilität der Schäume hängt von der Wasserbindung der innerlamellaren Phase und der Festigkeit der Schaumlamellen ab. Eine Erhöhung der innerlamellaren Wasserbindung kann durch Zusatz von Hydrokolloiden (wasserbindende Quellstoffe wie z. B. Sahnesteif und Gelatine) und Auffaltung der Globuline erreicht werden. Eine Verfestigung der Schaumlamellen kann als Folge einer (thermischen/mechanischen) Denaturierung der Proteine beobachtet werden. Eine solche Verfestigung tritt bei der Herstellung von **Eiklarschaum** auf. Durch den Aufschlagprozess denaturiert und koaguliert ein Teil der Eiklarproteine. Die globulären Proteine entfalten sich und orientieren die zuvor nach innen gerichteten hydrophoben Teile zur Grenzfläche Eiklar/Luft. Die dadurch gestreckten Proteinketten werden durch intermolekulare Kräfte vernetzt (Kapillarkraft P_K , Fließkraft P_G , Grenzflächenspannung P_σ). Durch die Denaturierung wird der Eiklarschaum stabilisiert, wobei die grobe Textur durch das Ovalbumin gebildet wird.

L. Suspensionen Disperse Systeme, in denen unlösliche Feststoffteilchen in Flüssigkeiten, plastischen Massen (oder erstarrten Schmelzen) vorliegen, bezeichnet man als Suspensionen. Beispiele für Suspensionen sind Suppen, Fruchtnektare oder Marmeladen. Die Stabilität der Suspensionen wird durch die Benetzung suspendierter Partikel oder durch Viskositäts-erhöhung (Eindicken von Marmelade, Gelee) erreicht.



1.1.5 Lebensmittelchemische Beispiele für disperse Systeme

M. Modelle von Caseinmizellen Die wichtigsten Milchproteine sind die Casein- und die Molkenproteine. Eine funktionelle Bedeutung kommt vor allem den α - und κ -Caseinen sowie den Molkeproteinen α -Lactalbumin und β -Lactoglobulin zu. Durch Ausfällen der Caseine an ihrem isoelektrischen Punkt (pH 4,6) können die beiden Proteingruppen getrennt werden.

Zur Gruppe der **Caseine** gehören α_{s1} -, α_{s2} -, β - und κ -Casein, die sich in ihrem Aufbau und der daraus resultierenden elektrophoretischen Beweglichkeit unterscheiden. Gemeinsam ist ihnen eine geringe Löslichkeit und ein bemerkenswert hoher Gehalt der Aminosäure Prolin (etwa 12%; s. 2.2) sowie an Phosphor (0,85%), der als Phosphatgruppe mit der Hydroxygruppe der Aminosäure Serin verestert ist. Über die Phosphoserreste können z. B. mit Calcium stabile intra- und intermolekulare Bindungen bei den α - und β -Caseinen aufgebaut werden. Calciumphosphatverbrückungen können durch Aggregatbildung zur Ausfällung dieser Caseine führen.

Die Aminosäurenketten der Caseine liegt offen und damit variabel vor, da der hohe Prolinanteil die Ausbildung einer globulären Struktur verhindert. Caseine, die sehr hitzestabil sind, bilden in der Milch Mizellen als Aggregationen von Submizellen. Im Gegensatz zu anderen Proteinen fallen die der Milch beim Aufkochen nicht aus. Das κ -Casein, mit nur einem Phosphoserinrest, verfügt über einen emulgatorartigen Aufbau (s. 2.2) und ist so in der Lage, die Funktion eines Schutzkolloids zu übernehmen und die Caseinmizelle zu stabilisieren: Es ist an der Oberfläche der Caseinmizelle lokalisiert und befindet sich zwischen den hydrophoberen α - und β -Caseinen und dem Wasser der Milch. Wird das κ -Casein durch das Enzym Lab gespalten und verliert seine Schutzkolloidfunktion, wird aus dem Sol ein Gel. Verschiedene Modelle sind zur Erklärung der Fähigkeit des κ -Caseins, die 10-fache Menge an α_{s2} - und β -Casein bei Anwesenheit von Calciumionen in Lösung zu halten, entwickelt worden.

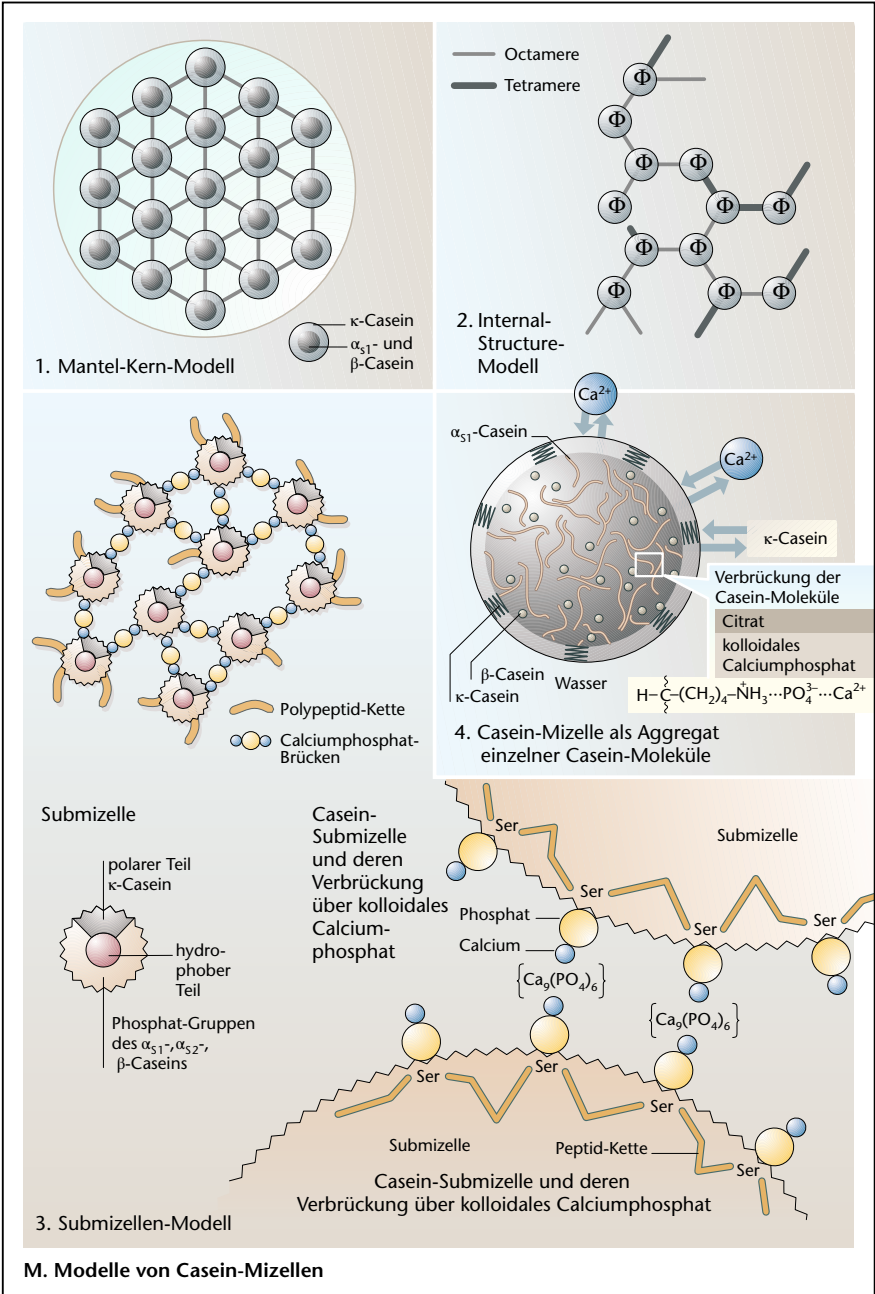
1. Mantel-Kern-Modell: Rosettenartig angeordnete α_s - und β -Caseine bilden die Kerne, die durch Calciumionen und kolloidales Calcium-

phosphat verbrückt werden. Das κ -Casein umhüllt diese Untereinheiten wie ein Mantel.

2. Internal-Structure-Modell: Hier wird eine Caseinmizelle als fädiges Netzwerk dargestellt, wobei κ -Casein Knoten bildet, die miteinander verbrückt sind. In die Knoten sind α_s - und β -Caseine in Gruppen zu vier (Tetramere) oder acht Molekülen (Octamere) eingelagert.

3. Submizellenmodell: Nach diesem Modell bestehen Caseinmizellen der Kuhmilch aus 20 000–150 000 Caseinmonomeren. Sie beinhalten sowohl den größten Teil der gesamten Milchproteine als auch des Calcium- und Phosphatgehalts der Milch. Die Caseinmizellen bestehen aus kleineren Aggregaten, die als Submizellen bezeichnet werden. Das Verhältnis der Caseine zueinander beträgt $\alpha_{s1} : \beta : \kappa : \alpha_{s2} = 8 : 8 : 3 : 2$. κ -Casein kommt nur in Oligomeren vor, so dass man von zwei verschiedenen Typen von Submizellen ausgeht, von denen nur eine über κ -Casein verfügt. Die Mizellenoberfläche ist von κ -caseinhaltigen Submizellen besetzt, die hier als Schutzkolloid wirken. Ist die gesamte Oberfläche einer Mizelle von κ -Caseinmizellen besetzt, so ist auch deren Wachstum beendet. In der schematischen Darstellung einer Caseinmizelle ist der hydrophobe Kern aus α_s - und β -Caseinen mit deren Phosphatgruppen und der hydrophile Teil des κ -Caseins zu erkennen. Man geht davon aus, dass dieser hydrophile Teil mit seinen Saccharidresten wie ein flexibles Haar, mehr oder weniger wahllos aufgewickelt, in die Umgebung hineinragt. Die Verbrückung erfolgt durch kolloidales Calciumphosphat zwischen den Serinresten der Peptidketten. Organisches Phosphat ist vorwiegend mit den Serinresten der Caseine verestert. Ungefähr die Hälfte des Calcium-Gehalts findet sich als strukturbildendes Calcium in diesen Phosphatester-Gruppen. Das anorganische, kolloidale Octacalciumphosphat $\text{Ca}_9(\text{PO}_4)_6$ verbindet die Submizellen über die veresterten Phosphatgruppen durch Cluster.

4. Caseinmizelle als Aggregat einzelner Caseinmoleküle: Ein neueres Modell (Visser 1992, in Terres 1995) sieht statt der Submizellen einzelne α_{s1} - und β -Caseinmoleküle als Mizellenuntereinheiten. Diese Caseinmoleküle sind dabei zufällig über die Mizelle verteilt, wobei das κ -Casein vorwiegend auf der Oberfläche lokalisiert ist.



N. Lamellenschicht um Öltröpfchen bei Mayonnaise Die O/W-Emulsion *Mayonnaise* wird aus pflanzlichem Speiseöl, Hühnereigelb und Zusätzen aus Salz, Zucker, Gewürzen und Essig hergestellt. Durch die Zugabe von Kochsalz wird die Granula (Eidotterpartikel aus Lipovitellinen und Lipoproteinen hoher Dichte: HDL und Phosvitin) gespalten. Es werden so mehr oberflächenaktive Stoffe (Mono- und Diglyceride sowie Phospholipide und Lipoproteine) an der Grenzfläche adsorbiert und die Lamelle wird dicker. Es tritt unter Ausbildung eines Netzwerkes eine Verkettung der Inhaltsstoffe in der Lamelle ein. Das leichtere Eindringen von Proteinen in das Lamellensystem ist auf eine Erniedrigung der Energiebarriere infolge des Salzzusatzes zurückzuführen. Durch die Salzionen werden die Oberflächenladungen der Proteine abgesättigt und so die Abstoßung der Proteinketten durch das Öl verringert.

O. Eigelb

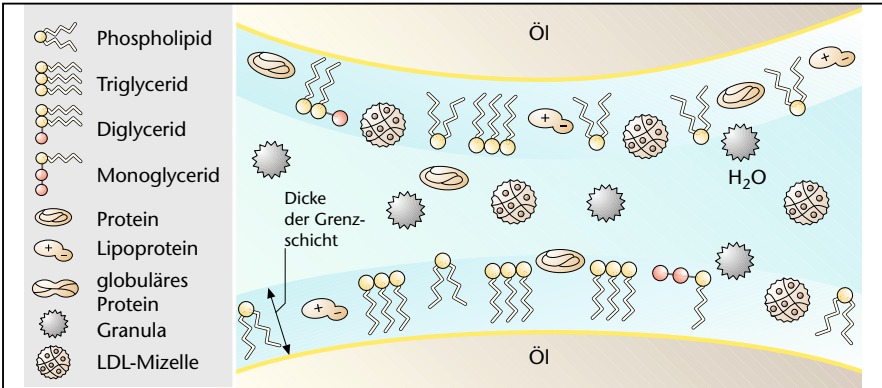
1. Native Lipoproteine: Eigelb besteht aus 48,7 % Wasser, 16,6 % Eiweiß und 32,6 % Fett, das überwiegend an Proteine gebunden ist. Natives Lipoprotein enthält Triglyceride und Phospholipide, die beim Erhitzen und Denaturieren freigesetzt werden. 75 % dieser Phospholipide sind Lecithine. Das Eigelb setzt sich aus polyedrischen Körnern zusammen, in die die Mizellen eingeschlossen sind.

2. Membran einer Eigelbmizelle: Die Dottertröpfchen des Eigelbs (O/W-Emulsion) ähneln einer Mizelle, deren Kern aus Lipiden von einer Membran aus *Low-Density-Lipoproteinen* (LDL, $M_r 3 \cdot 10^6$) umhüllt ist. Auf sechs Teile Triacylglycerid kommen zwei Teile Phospholipide und ein Teil Proteine. Der Ausschnitt zeigt die Verbindung von Proteinen mit Phospholipiden und Triacylglyceriden.

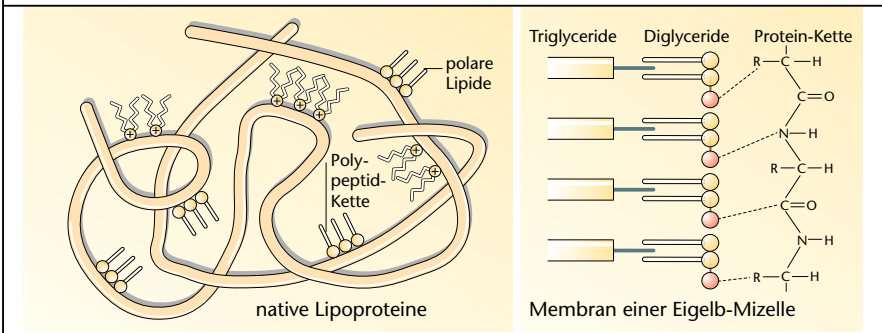
P. Schlagsahnepolyederschaum Schlagsahne (Schlagrahm) muss mindestens 30 % Fett enthalten, um die erforderliche Standfestigkeit zu erreichen. Bei der Herstellung wird Rohmilch in einem Separator bei 60 °C in Magermilch und Rahm schonend, d. h. ohne Schädigung der Fettkügelchenhüllen, getrennt. Proteine und oberflächenaktive Stoffe der Milch erleichtern das Einschlagen von Luft. An großen Luftblasen werden Molkenproteine und Caseine adsorbiert,

an die sich Fettpartikel anlagern, wodurch ein System von Lamellen entsteht. Beim Schlagen wird die Membran der Fettkügelchen teilweise zerstört und das Lamellensystem verfestigt sich durch Ausbildung von Fettaggregaten, die zwischen den Luftblasen Brücken bilden. Eingelagerte Proteine stabilisieren die Schaumlamellen durch Hydratation und gleichzeitige Erniedrigung der Grenzflächenspannung.

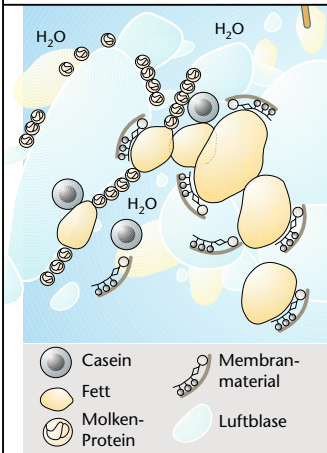
Q. Speiseeis Speiseeis ist ein disperses Mischphasensystem. Die wässrige Phase besteht aus einer wässrigen Zucker-/Salzlösung. In der zweiten Phase sind zugesetzte Hydrokolloide und Milchproteine kolloidal gelöst. Die Suspension enthält flüssige Fetttropfchen mit kristallinem Anteil sowie Eiskristalle und Kryohydrate (α -Lactose in glasähnlichem Zustand), gleichzeitig sind Luftblasen inkorporiert und Fetttropfchen emulgiert. Eiskristalle bilden die vierte Phase. Die Hälfte des Volumens besteht aus feinverteilter Luft. Die Charakteristika der Textur werden durch die Herstellung bestimmt: Beim Erhitzen und Homogenisieren der Zutaten lagern sich Caseine und Molkenproteine an die Fettkügelchen an. In der nun folgenden Reifungsphase bilden grenzflächenaktive Stoffe einen Film um die Fettkügelchen und verdrängen die Caseinmizellen. Gleichzeitig findet eine Kristallisation des Milchfetts und die Hydratisierung der Milchproteine und Hydrokolloide statt. Ohne Eigelb- oder Emulgatorzusatz bildet sich beim Aufschäumen und Frieren des Mixes im sogenannten Freezer um die Luftblasen nur eine dünne Grenzschicht. Beim Frieren bilden sich Fettaggregate, die sich in dieser Grenzschicht sammeln und die eingeschlagenen Luftblasen z. T. durch ihre kristallinen Anteile stabilisieren. Flüssiges Milchfett dient als Kittsubstanz für die kristallinen Aggregate. In der abschließenden Härtungsphase treten bevorzugt in der wässrigen Phase Kristallisationen auf.



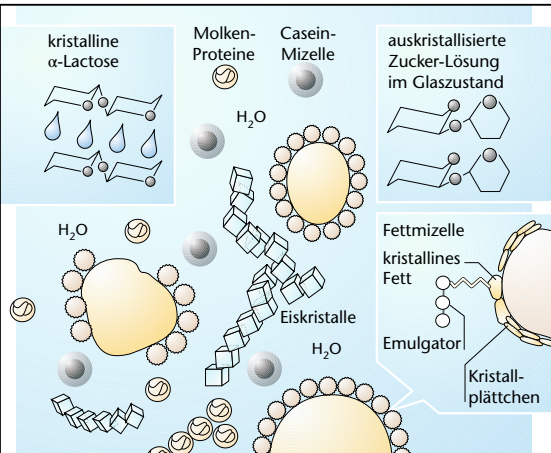
N. Lamellenschicht um ein Öltröpfchen bei Mayonnaise



O. Eigelb



P. Schlagsahne-Polyederschäum



Q. Speiseeis

1.2 Lebensmittelchemische Grundprozesse

1.2.1 Natürliche Prozesse

Das Reifen von frischen Lebensmitteln ist mit komplexen Veränderungen ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften verbunden.

A. Obstreifung Zu beobachtende Phänomene bei der Obstreifung sind vor allem die Bildung des typischen Fruchtflavours, Farbänderungen und das Weichwerden der Frucht. Die an der Flavourbildung beteiligten Verbindungen lassen sich in *Geschmacks- und Aromastoffe* unterteilen. Die Aromabildung kann im Rahmen der **Aromastoffbiosynthese** oder auf enzymatischem Weg erfolgen: In einer *anabolischen Phase* der Biosynthese wird das Monomer Glucose zu Stärke und Cellulose verknüpft bzw. Aminosäuren zu Peptiden und Proteinen. Diese Syntheseprodukte werden in der anschließenden *katabolischen Phase* zu Aromastoffvorstufen wie Alkoholen, Säuren, Estern, bzw. methylverzweigten Alkoholen, Säuren und Carbonylverbindungen abgebaut. Bei der Zerkleinerung von Obst können bereits gebildete Aromastoffe durch enzymatisch gesteuerte Oxidationen und Hydrolysen verändert werden. Für das Obstaroma sind im allgemeinen Ester, Aldehyde, Lactone, Jononderivate und Terpene verantwortlich.

Neben den gebildeten Aromastoffen tragen auch **Geschmacksstoffveränderungen** wie z. B. Säureabnahmen bzw. Zuckerzunahmen zur typischen *Flavourbildung* bei. Während z. B. bei Äpfeln eine Säureabnahme stattfindet, steigt bei Zitronen der Säuregehalt in der Reifungsphase an. Für die Zuckerbildung macht man den Abbau von Polysacchariden wie z. B. Stärke, Polyosen und Cellulose verantwortlich. Beobachtungen, wie man sie u. a. bei Äpfeln machen kann, scheinen dieses zu bestätigen: Während der Entwicklung am Baum steigt der Stärkegehalt, nimmt aber dann bis zur Ernte bis auf geringe Restmengen ab. Nach der Ernte verschwindet auch diese Restmenge, wohingegen der Zuckergehalt zunimmt.

Farbänderungen während der Reifung sind durch den Zerfall des blaugrünen bzw. gelbgrünen Blattfarbstoffes Chlorophyll, vor allem durch die Abspaltung des Magnesiums aus dem Komplex zu erklären. Es bilden sich zunächst olivgrüne bis braune Phäophytine. Durch

Abspaltung des Phytols aus dem Chlorophyllmolekül (durch Chlorophyllasen) werden die sonst verdeckten gelben Carotinoide (Polyen-kohlenwasserstoffe) sichtbar. Bei Citrusfrüchten kommt es auch zu einer Neusynthese von Farbstoffen, wie z. B. den Carotinoiden.

Texturänderungen: Das **Weichwerden** von Obst während der Reifung beruht auf einer Umwandlung des unlöslichen und eng mit Cellulose u. a. Gerüstsubstanzen vergesellschafteten Protopektins (Ca-Pektat) in lösliches Pektin.

Der Abbau von Pektin (nach Gierschner, 1985) wird während der Reifungsphase durch eine Aktivitätszunahme der pektinspaltenden Enzyme *Pektin-Methylesterase* und *-Polygalacturonase* bewirkt. Eine Depolymerisation durch die Polygalacturonase zu niedermolekularen Pektinen erfolgt durch die Aufspaltung der glykosidischen Bindungen zwischen den Galacturonsäuremolekülen. Pektin-Methylesterasen (werden beim Blanchierprozess bei 50 °C aktiviert; s. 1.1 C) spalten die Methyl- und die Carboxylgruppen voneinander. An die freigesetzten Carboxylgruppen können Calciumionen gebunden werden, die nach dem Eierschachtelmodell (s. 1.1 C) die Pektine verfestigen. Die so entstehenden Salze der Pektinsäure werden *Pektate* genannt; im Unterschied zu den Calciumsalzen aus nativem Pektin, die als *Pektinate* bezeichnet werden. Hochveresterte Pektine werden durch das Enzym in niederveresterte Pektine verwandelt; bei der Reifung von z. B. Birnen oder Avocados nimmt der Veresterungsgrad von 85 auf 40 % ab. Die demethylierten und depolymerisierten Pektine treten aus der Primärwand in das Zellinnere aus und rufen so ein Erweichen der Zellwandstruktur hervor.

Die demethylierende Wirkung der Pektin-Methylesterase wird bei der Herstellung von Obstsaften zur Erhöhung der Ausbeute gezielt eingesetzt. Isolierte Pektine verfügen über Gellieigenschaften: Die niedrigveresterten Pektine benötigen zur Gelbildung wieder Calciumionen, welche mit den Carboxyl- und der Hydroxygruppen der Galacturonsäurebausteine, die durch Axial-axial-Bindungen verknüpft sind, Kettenassoziate bilden können.

B. Fleischreifung Einige Stunden nach der Schlachtung eines Tieres tritt die Totenstarre, der *Rigor Mortis*, ein. Mit der Unterbrechung des Blutkreislaufes endet auch die Sauerstoffversorgung des Muskels. Unter diesen Bedingungen ist die einzige Möglichkeit der ATP-Gewinnung der Abbau des *Glykogens* (ein aus D-Glucoseeinheiten aufgebautes Reservepolysaccharid) zu Milchsäure, die im Muskel verbleibt. Der pH-Wert sinkt dadurch bei dieser anaeroben Glykolyse von etwa 7 auf Werte um 5,5 – hier dargestellt am Beispiel von Schweinefleisch. Die Fleischsäuerung ist ein abakterieller enzymatischer Vorgang, dessen Geschwindigkeit und Ausmaß vom Glykogenvorrat, dem pH-Wert und der Temperatur abhängt. Ist der Glykogenvorrat verbraucht, kann kein weiteres ATP gebildet werden. Da aber energieverbrauchende enzymatische Prozesse weiterlaufen, kommt es zur Gehaltsabnahme an energiereichen Phosphatverbindungen (ATP, ADP, Kreatinphosphat). Ohne ATP kann der Actomyosin-komplex (s. 1.1 F) nicht mehr gelöst werden, worauf die Starrheit des Muskels zurückzuführen ist.

Außerdem kommt es zu einer Erhöhung der Calciumionenkonzentration im Sarkoplasma. Die ATP-abhängigen „Calciumpumpen“, die Calciumionen in das endoplasmatische Retikulum fördern, stellen ihre Funktion ein. Die Kontraktion der Actin- und Myosinfilamente soll auch auf diesen Effekt mit zurückzuführen sein.

Das Ausmaß der Verkürzung der Sarkomeren, d. h. des Abstandes zwischen den Z-Linien bestimmt die Zähigkeit und auch den Tropfsaftverlust des Fleisches. Brechen die Myofibrillen in der Umgebung der Z-Linien auf, so gewinnt das Fleisch an Zartheit (Folge des *Abhängens*); gleichzeitig erfolgt ein starker Saftaustritt.

In der eigentlichen *Reifungsphase*, in der sich eine zarte Konsistenz und vor allem Aromastoffe entwickeln, finden proteolytische (eipweißabbauende) Vorgänge statt. In deren Folge tritt eine Reihe von morphologischen Veränderungen auf. Durch die Umbildung bzw. Zerstörung der Proteinstruktur der Z-Linien wird die Verankerung der Actinfilamente (s. 1.1 F) gelockert. Ebenso kommt es durch Proteinabbau zu einer Lockerung der Vernetzung von benachbarten Myofibrillen. Die während der Totenstarre ver-

kürzten Sarkomere verlängern sich wieder, die starre Ordnung löst sich auf und das Fleisch wird zarter. Für diese proteolytischen Vorgänge sind sowohl endogene als auch lysosomale Enzyme verantwortlich. An der Zerstörung des Z-Linien-Materials ist vor allem ein als CASF (calcium-activated sarcoplasmic factor) bezeichnetes Protein beteiligt. Es wird durch die post mortem eintretende Freisetzung von Calciumionen aus dem endoplasmatischen Retikulum aktiviert. Lysosomale Enzyme wie die fleisch-eigenen Kathepsine (Proteasen), die durch die Absenkung des pH-Wertes aktiviert werden, greifen u. a. Myosin und Actin an. Der bei der Fleischreifung ebenfalls erfolgende Abbau von Nucleotiden und Fettsäuren beeinflusst das beim Erhitzen entstehende Fleischaroma. Es entstehen die sogenannten *Precursoren* (Vorstufen) für die Fleischaromabildung bei der Zubereitung. Nach einer bakteriellen Infektion kann ein weiterer unerwünschter Proteinabbau mit pH-Erhöhung durch bakterielle Enzyme erfolgen.

Die Lockerung der Actinfilamente infolge des Abbaus von Querverbindungen im Actomyosin-komplex ist die Hauptursache für die Zartheit des Fleisches. Bei der pH-Absenkung während der Reifung wird das sarkoplasmatische Eiweiß ausgefällt und kann (im Unterschied zum Kollagen und Actomyosin) durch Proteinasen teilweise abgebaut werden. Da die Kaliumionen des Sarkoplasmas von den kontraktilen Proteinen absorbiert und durch Calciumionen ausgetauscht werden können, erhöht sich die Netto-ladung der Proteine: Die Fähigkeit der Wasserbindung steigt wieder an, die Saftigkeit nimmt zu.

Fleischfehler (s. auch 5.2 D) treten durch einen zu schnellen ATP- und pH-Abfall auf: PSE-Fleisch (PSE, pale, soft, exudative) ist wässrig, von blasser Farbe und geringem Wasserbindungsvermögen. Der niedrige pH-Wert (bei hoher Gewebetemperatur) führt zu einer Abscheidung denaturierter Sarkoplasmaproteine auf den Myofibrillen und verändert damit das Quellungsverhalten. DFD-Fleisch (dark, firm, dry) ist im Gegensatz dazu dunkel und klebrig. Es entsteht, wenn innerhalb von 45 min post mortem noch hohe pH-Werte und niedrige Lactatkonzentrationen vorliegen.