

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 *Cellulose* (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.

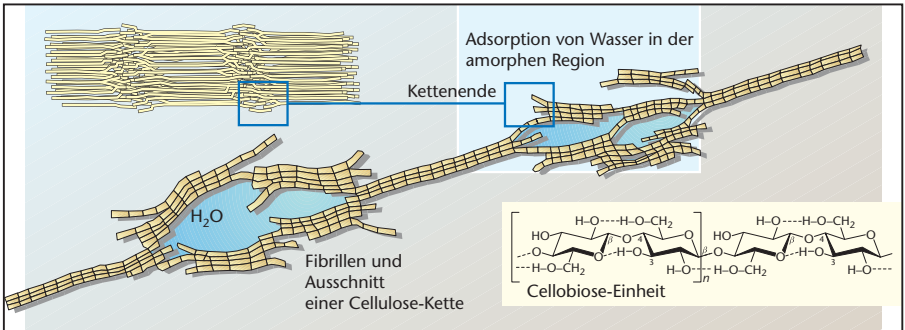
B. Polyosen (früher: Hemicellulosen) Verzweigte (amorphe), heterogene Polysaccharide, die vergesellschaftet mit Cellulose in Zellwänden von Gräsern, Getreiden und höheren Pflanzen vorkommen. In unterschiedlichen Anteilen finden sich als Monomere Hexosen (Galactose, Glucose, Mannose), Pentosen (Arabinose,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

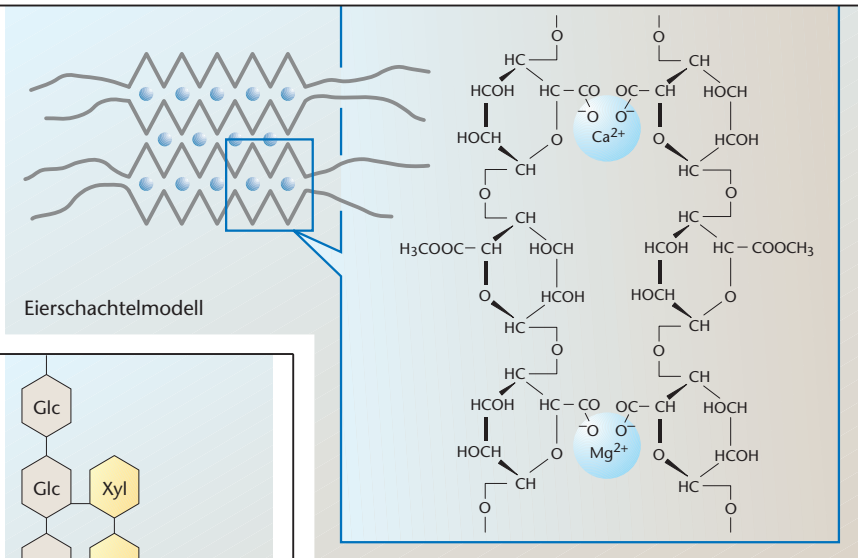
C. Pektine Sie bestehen im Wesentlichen aus Ketten von 1,4- α -glykosidisch verbundenen Galacturonsäureeinheiten, unterbrochen von L-Rhamnoseeinheiten, die in 1,2-Position miteinander verknüpft sind. Als weitere Nebenbestandteile finden sich in den schwach sauren Makromolekülen vor allem D-Galactose-, 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 Phenylpropane, 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.

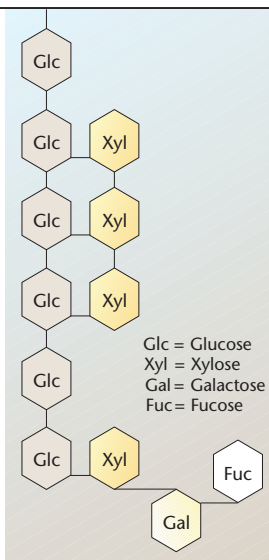
Das Glykoprotein **Extensin**, das – über Tyrosinbrücken vernetzt – unlöslich ist, kumuliert während der Reifungsphase von Früchten und trägt so zur Verfestigung der Zellwand bei.



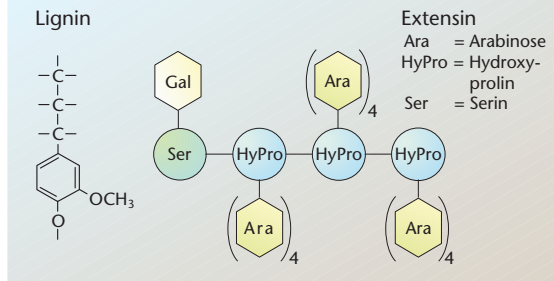
A. Cellulose



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.

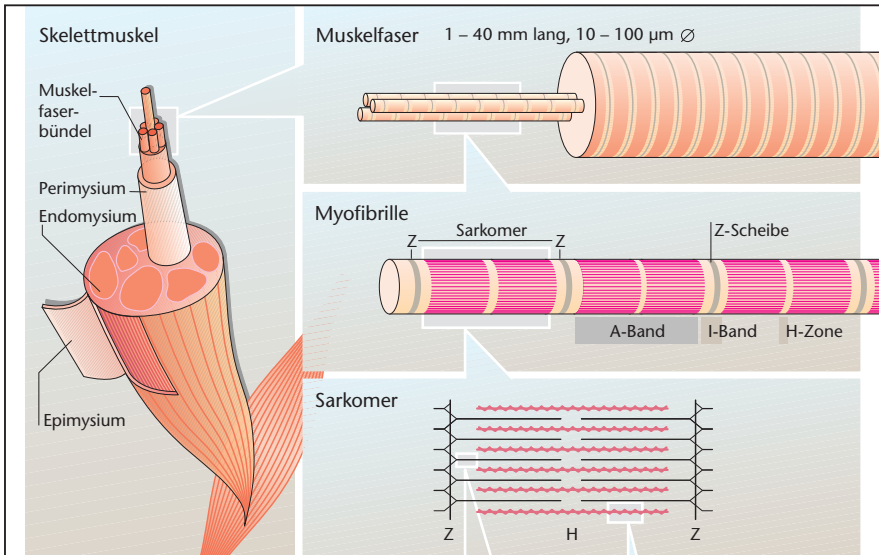
E. Organisation der Skelettmuskulatur Der Muskel besteht aus parallel angeordneten **Bündeln von Muskelfasern**, die von einer Bindegewebsschicht, dem *Perimysium*, ummantelt sind. Jede **Muskelfaser** stellt eine große mehrkernige, vom *Endomysium* umhüllte Muskelzelle dar, die in voller Länge von **Myofibrillen** 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

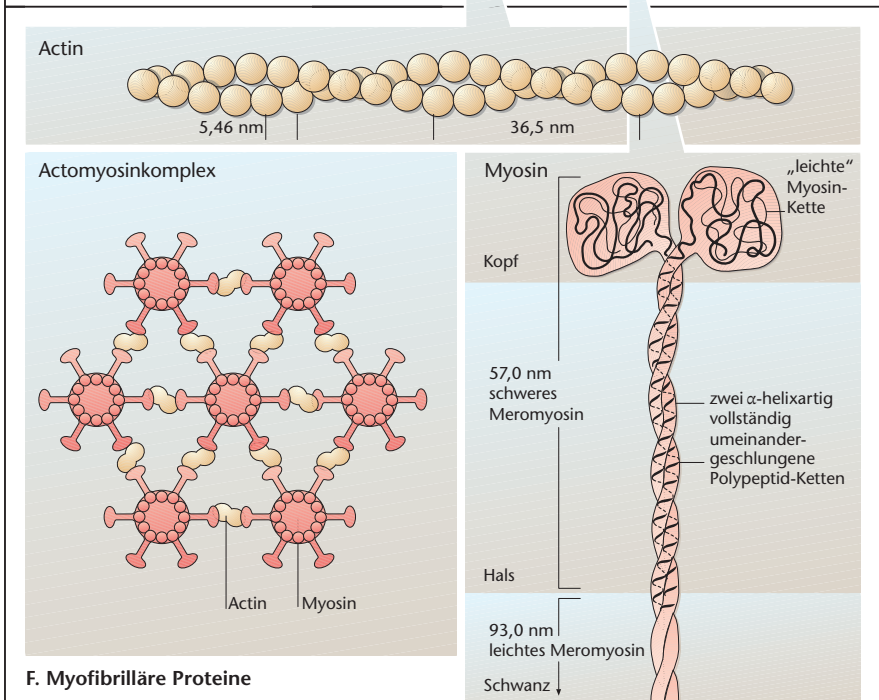
dünnen stäbchenförmigen Teils befinden sich zwei flexible, globuläre Köpfe. In diesen Köpfen liegt die Bindestelle für das Actin, mit dem das Myosin während der Muskelkontraktion zu dem temporären *Actomyosinkomplex* zusammentreten kann. Die funktionellen Eigenschaften des Myosins sind durch den hohen 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_r 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.

