

**VHS 42 02661**  
**34 min**

## **Biomoleküle**

### **Kohlenhydrate: Monosaccharide**

#### **Arbeitsvideo/4 Kurzfilme**

Traubenzucker besitzt als Primärprodukt der Photosynthese eine zentrale Stellung im Stoffwechsel aller Lebewesen. Von diesem Molekül leiten sich die Reservestoffe Stärke und Glykogen sowie das mengenmäßig auf Erden wohl häufigste Kohlenhydrat Cellulose ab. Moderne Animationen erläutern den Bau und die räumliche Struktur wichtiger Monosaccharide und zeigen, wie Traubenzucker als Baustein für Polysaccharide dient. Realszenen binden die Lerninhalte in einen biologischen Zusammenhang ein. Die Kurzfilme 1 und 2 sind in der Sekundarstufe I, die Kurzfilme 3 und 4 in der Sekundarstufe II einsetzbar.

1 Traubenzucker – Bau	9:50 min
2 Traubenzucker als Baustein - Stärke, Glykogen, Cellulose	2:39 min
3 Glucose – Bau, Chiralität, Anomerie	11:42 min
4 Monosaccharide	8:32 min

#### **Lernziele**

Kenntnis der Molekülstrukturen von Monosacchariden; Verständnis für den reversiblen Vorgang der Cyclisierung durch Halbacetal bzw. Halbketalbildung; Überblick über wichtige Monosaccharide und Polysaccharide.

#### **Zum Inhalt**

##### **Zu den Filmen:**

##### **1 Traubenzucker – Bau**

Am Anfang der Nahrungskette steht die assimilierende Pflanze. Ihre Bau- und Inhaltsstoffe dienen den Primärkonsumenten und letztendlich auch den Sekundärkonsumenten als Nahrung. Wichtigste Lebensgrundlage aller Organismen ist dabei der Traubenzucker (Glucose), den die Pflanze aus Kohlenstoffdioxid und Wasser beim Vorgang der Fotosynthese aufbaut. Dadurch wird die absorbierte Lichtenergie in den chemischen Bindungen des Glucosemolekül gespeichert. Die Atome der Elemente Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff werden dabei zu einer sechsgliedrigen Molekülkette verknüpft. Im Gegensatz zu den anderen fünf Kohlenstoff-Atomen, die Wasserstoff-Atome und Hydroxy-Gruppen tragen, bilden die drei Elementatome am ersten C-Atom eine reaktionsfreudige Aldehyd-Gruppe. Da vier bindende Elektronenpaare tetraedrisch um ein Kohlenstoff-Atom angeordnet sind, ist die Kohlenstoffkette gewinkelt aufgebaut. Benachbarte Kohlenstoff-Atome, die über eine Einfachbindung miteinander verknüpft sind, können gegeneinander um ihre Bindungsachse gedreht werden. Durch diese freie Drehbarkeit der C,C – Einfachbindungen lässt sich eine halbkreisförmige Molekülkette darstellen, bei der die Hydroxy-Gruppe am Kohlenstoffatom Nr. 5 in die direkte Nachbarschaft der reaktiven Aldehyd-Gruppe zu liegen kommt.

Jetzt kann die Hydroxy-Gruppe die Doppelbindung der Aldehyd-Gruppe angreifen, wobei ein 6-gliedriges Ringmolekül entsteht. Durch die Übertragung des Hydroxyl-Wasserstoffs auf das

Sauerstoff-Atom der Aldehyd-Gruppe bildet sich am C1-Atom eine neue OH-Gruppe. Aditionsreaktionen an die Aldehyd-Gruppe sind umkehrbar, d. h. eine Ringöffnung ist wieder möglich. Findet vor einem erneuten Ringschluss eine Drehung der Aldehyd-Gruppe statt, dann entsteht ein Ringmolekül mit abweichender räumlicher Anordnung der Hydroxy-Gruppe am C1-Atom. Diese beiden möglichen Sechsringe werden als  $\alpha$ - und  $\beta$ -Glucose bezeichnet und können als Reinstoffe mit deutlich unterschiedlichen Eigenschaften isoliert werden. Löst man eine der beiden Glucoseformen in Wasser, dann wird über die Ausbildung der offenkettigen Form sofort auch die andere Ringform gebildet. Da die  $\beta$ -Glucose in wässriger Lösung etwas stabiler und damit auch energieärmer ist als die  $\alpha$ -Glucose, überwiegt ihr Anteil im gelösten Traubenzucker. Der Gehalt an der offenkettigen Molekülform ist dagegen verschwindend gering.

## 2 Traubenzucker als Baustein – Stärke, Glykogen, Cellulose

Der wichtigste Speicherstoff von Traubenzucker-Molekülen in Pflanzen ist die Stärke, die in bestimmten Zellen oder Speichergeweben in großer Menge angereichert wird. Zur Darstellung der Stärke-Moleküle wird das Traubenzucker-Molekül als einfaches Sechseck symbolisiert. Jedes dieser Sechsecke repräsentiert ein  $\alpha$ -Anomer. Diese  $\alpha$ -Glucose-Moleküle können zu Hunderten bis Tausenden in einer lang gestreckten Spirale (Amylose) verknüpft sein oder noch größere, verzweigte Kettenmoleküle (Amylopektin) bilden. Letztere ähneln stark dem wichtigsten Glucose-Speicherstoff der tierischen Zellen, dem Glykogen-Molekül. Diese „tierische Stärke“ übertrifft die Stärke-Moleküle der Pflanze wesentlich an Größe und weist einen stärkeren Verzweigungsgrad auf. Das buschartig aufgebaute Riesennmolekül des Glykogens (bis 100.000 Glucoseeinheiten) wird in tierischen Zellen als rasch mobilisierbarer Glucosespeicher genutzt. Sie wird hauptsächlich in der Leber und in den Skelettmuskeln gelagert, also in Geweben des Körpers, die sehr viel und manchmal auch sehr schnell Energie brauchen. Da die auf- und abbauenden Enzyme an vielen Verzweigungsenden des Glykogens gleichzeitig Glucose anlagern bzw. abspalten, kann der Glucosegehalt der Zelle rasch in großen Dimensionen verändert werden.

Eine völlig andere Funktion erfüllt ein weiteres Traubenzucker-Kettenmolekül, die Cellulose. Sie ist der typische Baustoff der Zellwand in allen Pflanzenzellen. In diesem Fall bilden die  $\beta$ -Anomere der Glucose lang gestreckte, unverzweigte Fadenmoleküle, die z. B. im Holz eines Baumstamms als Gerüstsubstanz dienen. Lange Cellulose-Moleküle lagern sich zu reissfesten Fasern zusammen, die die Basis aller stabilen pflanzlichen Konstruktionen bilden.

## 3 Glucose – Bau, Chiralität, Anomerie

Entscheidend für seine Eigenschaft als Energieträger und Baustoff sind Konstitution und Konfiguration des Traubenzucker-Moleküls. Traubenzucker ist ein C6-Zucker und wird daher als Hexose bezeichnet. Die Endung „ose“ ist kennzeichnend für Zucker. Sie findet sich auch im wissenschaftlichen Namen für Traubenzucker, in Glucose. Im Glucose-Molekül sind verschiedene funktionelle Gruppen kombiniert. Der Besitz einer Aldehyd-Gruppe macht sie zur Aldose. Die restlichen C-Atome tragen je eine Hydroxy-Gruppe und Wasserstoff-Atome. Sind mit einem Kohlenstoff-Atom vier verschiedene Liganden verknüpft, liegt ein Chiralitätszentrum vor („asymmetrisches C-Atom“).

Traubenzucker besitzt somit vier Chiralitätszentren (C2-C5). In der Fischer-Projektionsformel der Glucose kommen die Hydroxy-Gruppen und Wasserstoff-Atome in einer bestimmten Reihenfolge neben der Kohlenstoffkette zu liegen. Nach der räumlichen Ausrichtung der Hydroxy-Gruppe am C5-Atom, dem Chiralitätszentrum, das am weitesten von der Aldehyd-

Gruppe entfernt ist, wird der Traubenzucker als D-Glucose (von lat. dexter, rechts) bezeichnet. Wie zu jedem chiralen Molekül gibt es auch zur D-Glucose das spiegelbildlich gebaute Isomer (Enantiomer). Bei diesem Stereoisomer, der L-Glucose (von lat. laevus, links), zeigt die Hydroxy-Gruppe am Kohlenstoff-Atom Nr. 5 nach links. In der Natur kommt ausschließlich D-Glucose vor. Unter Berücksichtigung des gewinkelten Baus der Kohlenstoffkette faltet sich das Molekül ringförmig ein. Durch Drehung des Kohlenstoff-Atoms Nr. 5 um die Achse der Einfachbindung zu C4 gelangt seine „alkoholische Hydroxy-Gruppe“ in die Nähe der Carbonyl-Gruppe der Aldehyd-Funktion und reagiert mit ihr unter Ausbildung eines cyclischen Halbacetals. Da bei diesem Ringschluss C1 zum neuen Chiralitätszentrum wird, sind bezüglich der Anordnung der neuen Hydroxy-Gruppe an C1 zwei Stereoisomere möglich, die als  $\alpha$ - und  $\beta$ -Anomere bezeichnet werden. Sie unterscheiden sich nicht nur in ihrem Verhalten gegenüber linear polarisiertem Licht ( $\alpha_{sp}$  von  $\alpha$ -Glucose: +112 und  $\alpha_{sp}$  von  $\beta$ -Glucose: +19) sondern auch in anderen physikalischen und chemischen Eigenschaften. Beim Lösen eines Anomers in Wasser bildet sich über die Ringöffnung ein Gleichgewicht, in dem die beiden cyclischen Formen und die offenkettige Form (< 0,1 %) nebeneinander vorliegen. Das  $\beta$ -Anomer ist stabiler und überwiegt in wässriger Lösung (64%) gegenüber dem  $\alpha$ -Anomer (36 %).

#### 4 Monosaccharide

Die Projektionsformel des Fructozuckers (D-Fructose) ist – bis auf die Lage der Carbonyl-Gruppe – baugleich mit der der D-Glucose. Aufgrund der Keto-Funktion am zweiten C-Atom spricht man von einer Ketose. Dadurch ergeben sich nur noch drei Chiralitätszentren. Das Kohlenstoff-Atom Nr. 5 ist das Asymmetriezentrum, das am weitesten von der Keto-Gruppe entfernt ist. Da beim natürlich vorkommenden Fructozucker die Hydroxy-Gruppe am C5-Atom nach rechts zeigt, liegt hier eine D-Fructose vor. In Annäherung an die tatsächlichen Bindungswinkel zwischen den Kohlenstoff-Atomen und ihren Liganden lässt sich die Fischer-Projektionsformel der Fructose halbkreisförmig einfallen.

Beim Ringschluss reagiert die OH-Gruppe des C5-Atoms mit der Carbonyl-Gruppe zu einem cyclischen Halbacetal. In diesem 5-gliedrigen Ringmolekül gibt es zwei mögliche Anordnungen für die neu gebildete OH-Gruppe am anomeren C2-Atom. In wässriger Lösung stellt sich über die offenkettige Keto-Form der Fructose ein Gleichgewicht zwischen den  $\alpha$ - und  $\beta$ -Anomeren ein. Wie die Glucose trägt die Fructose mehrere OH-Gruppen. Die beiden Polyhydroxy-Verbindungen unterscheiden sich jedoch in der Lage der Carbonyl-Gruppe: Glucose ist aufgrund der endständigen Carbonyl-Gruppe ein Polyhydroxy-Aldehyd, Fructose ein Polyhydroxy-Keton. Neben den Hexosen erfüllen auch andere Einfachzucker (Monosaccharide) mit kürzeren oder auch längeren Kohlenstoffketten wichtige Funktionen in der Zelle. Unter den Zuckern mit 5 C-Atomen (Pentosen) sind vor allem die Desoxyribose und die Ribose von Bedeutung. Ribose ist Bestandteil des Erbguts vieler Prokaryonten, z.B. des HI-Virus. Die Desoxyribose enthält statt der Hydroxy-Gruppe an Kohlenstoff-Atom Nr. 2 ein Wasserstoff-Atom. Sie ist Bestandteil der DNS.

#### Zusätzliche Informationen

Die räumliche Darstellung der ringförmigen Monosaccharid-Moleküle im Film kommt der tatsächlichen Raumstruktur der Glucose sehr nahe. In Anlehnung an die perspektivischen Haworth-Projektionen wurde im Film eine ebene Darstellung der Ringe gewählt. Das Überwiegen des  $\beta$ -Anomers (64 %) der D-Glucose in wässriger Lösung wird meist nur mit der sterisch günstigeren äquatorialen Anordnung der Hydroxy-Gruppen begründet. Wesentlichen Einfluss auf die Häufigkeit der jeweiligen Anomere hat jedoch auch die Polarität des

verwendeten Lösungsmittels, das im Falle des stark polaren Wassers die  $\beta$ -Form besonders gut gegen destabilisierende, innermolekulare Dipolabstoßungen („anomerer Effekt“) schützt. Im  $\alpha$ -Anomer tritt diese elektronische Destabilisierung nicht so stark auf, so dass mit der Abnahme der Lösungsmittelpolarität der Anteil des  $\alpha$ -Anomers zunimmt. Durch Kristallisation von Lucoose aus heißen, gesättigten Lösungen (Lösungsmittel: Wasser oder Pyridin) erhält man feste  $\beta$ -Glucose, in der Kälte bilden sich die Kristalle des  $\alpha$ -Anomers.

Als kristalliner Feststoff konnte bisher nur die  $\beta$ -D-Fructopyranose (6-Ring) isoliert werden, wogegen die im Schulunterricht bevorzugt behandelte Fructofuranose (5-Ring) nur als Baustein in Glykosiden und in Lösung auftritt. Im Gegensatz zur nahezu geschmacklosen  $\beta$ -D-Fructofuranose, ist die  $\beta$ -D-Fructopyranose etwa doppelt so süß wie Saccharose. In wässriger Fructoselösung liegen die Pyranoseform (57%  $\beta$ - und 3%  $\alpha$ -Anomer), die Furanoseform (31 %  $\beta$ - und 9 %  $\alpha$ -Anomer) und die offenkettige Ketoform (weniger als 1 %) im Gleichgewicht vor. In vielen pflanzlichen und tierischen Zellen werden Kohlenhydrate als Energiereserve in großer Menge gelagert. Da hohe Konzentrationen gelöster Teilchen in der Vakuolenflüssigkeit oder im Cytoplasma zu erheblicher osmotischer Saugkraft der Zelle führen, können diese großen Kohlenhydratmengen nicht in Form von Monosacchariden gelagert werden. Durch Verknüpfung von mehreren tausend Monosaccharidteilchen zu weitgehend wasserunlöslichen Riesen-Speichermolekülen wird dieses Problem gelöst. In der bei der Iod-Stärke-Reaktion gebildeten blauen Einschlussverbindung sind die Iodatome linear im Abstand von 0,31 nm in der Amylospirale aufgereiht.

Im Iodmolekül beträgt der Bindungsabstand 0,27 nm, bei mehr als 0,34 nm tritt Dissoziation ein. Diese Lockerung des Elektronensystems der Iodmoleküle hat die Farbigkeit der Einschlussverbindung zur Folge. Die Leber enthält bis zu 5 %, der Skelettmuskel bis zu 1 % seines Nassgewichtes an Glykogen. Bei einem 70 kg schweren Mann ist somit 350 g Glykogen in der Leber und 90 g in den Skelettmuskeln gespeichert. Von den 180 g Glucose, die dieser Mann durchschnittlich pro Tag verbraucht, stammen 50 % aus dem Leberglykogen. Das Muskelglykogen bildet keine direkte Quelle für den Blutzucker: die Glucose, die aus dem Abbau des Muskelglykogens gebildet wird, liefert über die Milchsäuregärung und die anschließende Gluconeogenese 10 – 20 % des Blutzuckers. Glykogen-Moleküle bilden in der Zelle bei kohlenhydratreicher Ernährung Granula, an die Proteine angelagert werden. Dabei handelt es sich um Enzyme, die den Glykogenaufbau und -abbau katalysieren und regeln. Zum Teil sind sie kovalent (1 % der Granulamasse) gebunden, andere sind wiederum nur leicht assoziiert. Ein genaues, konstantes Massenverhältnis für diese Glykogen-Protein-Komplexe lässt sich daher nicht formulieren.

### Zur Verwendung

Der Film besteht aus 4 deutlich getrennten Kurzfilmen, in denen sich Realaufnahmen und Trickszenen abwechseln. Diese Filme bieten die Möglichkeit – ausgehend von einfachen Kettenmolekülen (Fischer-Projektion) der Monosaccharide – die Entwicklung der komplexen räumlichen Molekülgestalt (Konfiguration) der Kohlenhydrate in übersichtlichen und prägnanten Animationen leicht verständlich nachzuvollziehen. Die Stoffgruppe der Kohlenhydrate nimmt bei der Behandlung der Photosynthese, des Energiestoffwechsels und der nachwachsenden Rohstoffe eine Schlüsselstellung ein. Trotz ihrer hervorragenden Bedeutung werden sie meist nur in Form ihrer Summenformeln oder als C-Körper-Schemata präsentiert. Das wird ihrer Bedeutung im Alltag und in der Wissenschaft nicht gerecht und ist auch didaktisch wenig sinnvoll. Der Grund für diese stark vereinfachte Darstellung der Kohlenhydrate liegt in ihrer zu komplexen Struktur und Konfiguration. Für eine verständliche Entwicklung der üblichen Haworth-Projektionsformeln der Kohlenhydrate aus der offenkettigen Projek-

tionsformel ist – außer in Grund- und Leistungskursen der Chemie am Gymnasium – zu wenig Zeit vorhanden. Die Schwierigkeit, die Entwicklung der räumlichen Gestalt der Monosaccharid-Ringe im Tafel- oder Folienunterricht verständlich darzustellen, liegt darin, dass dabei mehrere, unterschiedliche Verständnisprozesse z. T. parallel ablaufen müssen:

- aus der linearen Kettenformel muss – unter Berücksichtigung der Bindungswinkel an den C-Atomen – zuerst die tatsächliche Konfiguration und daraus die vereinfachte Haworth-Projektion entwickelt werden, ein Vorgang, der großes räumliches Vorstellungsvermögen erfordert.
- Die Drehung an der C4-C5-Bindungsachse, wodurch die OH-Gruppe in die geeignete Stellung für den Ringschluss positioniert wird, erfordert eingehende Kenntnisse der Projektionsdarstellung von Konfigurationsformeln.
- Die genaue räumliche Vorstellung vom Ringschluss setzt die Kenntnis des Reaktionsmechanismus der Halbacetalbildung voraus.

Diese Schwierigkeiten entfallen bei der Darstellung der Prozesse durch Animationen. Die Kenntnisse der Atombindung und des Elektronenpaar-Abstoßungs-Modell (von Gillespie und Nyholm) reichen aus, um dem Animationsverlauf folgen zu können. So können dem Betrachter bereits auf einer sehr niedrigen Vorkenntnisebene die Entwicklungsschritte zur Konfigurationsformel begreiflich gemacht werden. Die grundlegende Barriere, die einer sinnvollen Vermittlung der Kohlenhydrat-Konfiguration entgegensteht, entfällt damit. Ausgehend von einem Grundverständnis der Monosaccharid-Konfiguration kann nun problemlos der Aufbau der Disaccharide und Polysaccharide im Unterricht behandelt werden. Der Kurzfilm 3, der genauer auf die Phänomene der Chiralität und Anomerie der Glucose eingeht, erübrigt sich bei einer reinen Grundwissensvermittlung.

Neben dieser einfachen, vorwiegend phänomenologischen Betrachtung des Kohlenhydrat-Aufbaus empfiehlt sich der Einsatz der Filme natürlich ganz besonders bei der gründlichen Behandlung des Themas unter Einbezug der Reaktionsmechanismen und chemischen Eigenschaften der Zucker. Die nucleophile Addition an die Carbonyl-Gruppe der Saccharide, das Phänomen der Mutarotation und vor allem die Methode der Projektion können durch den Einsatz der Filme unter wesentlich günstigeren Bedingungen besprochen werden, als es mit reinem Tafel- und Folienunterricht möglich ist. In den Kurzfilmen fehlt die Darstellung von Experimenten. Dies muss Aufgabe des Experimentalunterrichts bleiben. Die Kurzfilme können zur Erarbeitung, aber auch zur Sicherung bereits erworbener Kenntnisse verwendet werden. Von den Filmen 1 und 2 werden wohl die Schüler der Sekundarstufe I am meisten profitieren. Die Filme 3 und 4 eignen sich für die Besprechung des Themas in der Sekundarstufe II.

**Produktion**

FWU Institut für Film und Bild, 2001

**Buch und Regie**

Dr. Christine Fischer

**Begleitkarte und Fachberatung**

Bernhard Jablonski

**Pädagogische Referentin im FWU**

Dr. Christine Fischer

**Verleih** durch Landes-, Kreis- und Stadtbildstellen/Medienzentren

**Verkauf** durch FWU Institut für Film und Bild, Grünwald

Nur Bildstellen/Medienzentren:

öV zulässig

© 2001

FWU Institut für Film und Bild

in Wissenschaft und Unterricht

gemeinnützige GmbH

Geiseltasteig

Bavariafilmplatz 3

D-82031 Grünwald

Telefon (089) 6497-1

Telefax (089) 6497-300

E-Mail [info@fwu.de](mailto:info@fwu.de)

[vertrieb@fwu.de](mailto:vertrieb@fwu.de)

Internet <http://www.fwu.de>