

VOLKER KOESLING | RENÉ SPIERLING (HG.)

# Alles Zucker!

NAHRUNG | WERKSTOFF | ENERGIE



be.bra verlag

Stiftung  
Deutsches  
Technikmuseum  
Berlin

**ALLES ZUCKER!**

Neue Berliner Beiträge zur  
Technikgeschichte und Industriekultur

Schriftenreihe der Stiftung  
Deutsches Technikmuseum Berlin

Band 2

VOLKER KOESLING · RENÉ SPIERLING (HG.)

# Alles Zucker!

Nahrung - Werkstoff - Energie

be.bra verlag

Stiftung  
Deutsches  
Technikmuseum  
Berlin

Herausgeber: Volker Koesling und René Spierling für die Stiftung Deutsches Technikmuseum Berlin

Zweiter Band der Schriftenreihe der Stiftung Deutsches Technikmuseum Berlin

»Neue Berliner Beiträge zur Technikgeschichte und Industriekultur«

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.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.  
Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist  
ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere  
für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Verfilmungen und  
die Einspeicherung und Verarbeitung auf DVDs, CD-ROMs, CDs, Videos, in  
weiteren elektronischen Systemen sowie für Internet-Plattformen.

© Stiftung Deutsches Technikmuseum Berlin, Autoren und  
be.bra verlag GmbH  
Berlin-Brandenburg, 2017  
KulturBrauerei Haus 2  
Schönhauser Allee 37, 10435 Berlin  
[post@bebraverlag.de](mailto:post@bebraverlag.de)  
Lektorat: Marijke Topp, Berlin  
Umschlag: hawemannundmosch, Berlin  
Satz: typegerecht, Berlin  
Schrift: Iowan Old Style 9/13 pt  
Druck und Bindung: Westermann Druck, Zwickau  
ISBN 978-3-89809-142-8

[www.bebraverlag.de](http://www.bebraverlag.de)

[www.stdb.de](http://www.stdb.de)

# Inhaltsverzeichnis

7	<b>Vorwort</b>
9	<b>Alles Zucker!</b>
23	<b>Was sind Zucker und warum sind sie wichtig?</b>
35	<b>Pandoras Zuckerdose oder eine systemische Geschichte des Zuckers</b>
49	<b>Das Institut für Zuckerindustrie in Berlin</b>
65	<b>Die Zuckerfabrik in der Rübe</b> Entwicklung und Bedeutung ihrer züchterischen Bearbeitung
79	<b>Rübenzuckergewinnung und Industrialisierung</b>
93	<b>Zuckerhandel</b>
107	<b>Vom Zuckerhut zum Portionszucker</b> Die Geschichte des Würfelzuckers und der Streuzuckerportionen
121	<b>Lebensmittelkennzeichnung</b> Warum der Zucker nicht versteckt ist
131	<b>Kohlenhydrate und Zuckerstoffwechsel des Menschen</b>
141	<b>Zucker und Evolution</b>
153	<b>Synthetische Zucker und die Molekulare Medizin</b> Vom Syntheseautomaten zum Impfstoff
161	<b>Zuckermoleküle in der regenerativen Medizin</b>
171	<b>Von fossilen zu biogenen Rohstoffen</b> Zucker-basierte Rohstoffe als Alternative
179	<b>Zucker - Der Grundbaustein der drei häufigsten Biopolymere unseres Planeten Zellulose, Stärke und Chitin</b>
193	<b>Bioraffinerien</b> Produktion von Zucker und Mehr (Proteine, Öle, Lignin)

- 201 **Feste, flüssige und gasförmige Bioenergieträger**  
Auf Zucker (auf-)gebaut
- 215 **Mit Strom von Zucker zum Abfall und zurück**  
Biobrennstoffzellen bis Bioelektrosynthese
- 227 **Wie »bio« sind Biokunststoffe?**  
Die Nachhaltigkeit von zuckerbasierten und konventionellen  
Kunststoffen im Fokus

### **Anhang**

- 239 Anmerkungen
- 244 Quellenverzeichnis
- 254 Bildnachweis
- 255 Die Autoren

# Vorwort

Als am 1. November 1995 das Zucker-Museum offiziell dem Deutschen Technikmuseum zugeordnet wurde, machte sich wohl niemand eine Vorstellung davon, welchen Schatz man da bekommen hatte. Sicher, Zucker war im modernen Leben allgegenwärtig, Zucker kannte jeder, und auch die Diskussion über Nutzen und Gefahren des Zuckers war in aller Munde. Aber der etwas abgelegene Standort im Wedding und das sehr spezielle Thema hatten doch zur Folge, dass dieser Bereich der Stiftung immer ein Schattendasein führte und sogar von einigen Seiten nicht ganz ernst genommen wurde.

Die Aufgabe des Wedding Standort und die Einbettung des Zuckerthemas in das Technikmuseum bot dann die Chance, Ideen für eine völlig neue Schwerpunktsetzung zu verwirklichen. Dazu gehört der Verweis auf die Vorreiterrolle der Zuckerindustrie für die Industrialisierung in den deutschen Ländern. Ohne sie hätte es zum Beispiel nicht eine solch stürmische Entwicklung des Maschinenbaus gegeben, und auch Verknüpfungen mit anderen Abteilungen des Technikmuseums sind vielfältig möglich.

Das Deutsche Technikmuseum versucht, in seinen Ausstellungen nicht nur die Vergangenheit darzustellen, sondern immer auch Zukunftsperspektiven vorzustellen und zu entwickeln. Gerade im Bereich »Zucker« erleben wir zurzeit in diversen Bereichen unserer Gesellschaft einen Umbruch. Das wird besonders augenfällig, wenn man sich dabei nicht auf den allseits bekannten Haushaltszucker beschränkt, sondern den Blick auf alle Arten

von Biomasse ausweitet, die zum allergrößten Teil aus Zuckerverbindungen besteht. So lassen sich unter Verzicht auf fossile Rohstoffe sowohl altbekannte als auch innovative Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugen, und auch Energie lässt sich aus zuckerbasierter Biomasse gewinnen. Darüber hinaus eröffnen Zucker neue Perspektiven in Medizin und Pharmakologie.

Aber gerade diese zukunftsweisenden Themen können in einer solchen Ausstellung nur angerissen werden. Um hier vertiefende Informationen für eine weiterführende Diskussion zu liefern, haben wir einen Sammelband mit Beiträgen ausgewiesener Fachleute zusammengestellt. Hier findet man Argumente für die Erörterung von Fragen wie:

- Kann die Biomasse das Erdöl ersetzen?
- Sind Biokunststoffe immer nachhaltiger als aus fossilen Rohstoffen erzeugte Kunststoffe?
- Was leistet eine Bioraffinerie?
- Wie zukunftsorientiert sind Bioenergieträger?
- Ist unsere Vorliebe für »süß« evolutionär bedingt?
- Wie wichtig ist Zucker für unsere Ernährung?

Wir freuen uns, dass wir mit diesem Begleitband zu unserer Ausstellung »Alles Zucker! Nahrung – Werkstoff – Energie« einen Beitrag zur gegenwärtigen Diskussion zu den technischen Möglichkeiten nachhaltigen Wirtschaftens leisten können.

*Dirk Böndel*

Direktor des Deutschen Technikmuseums

# Kurz & Knapp

Zucker kennen alle! In fast jedem Café steht ein Spender mit den süßen Kristallen. Zucker ist jedoch weit mehr als ein Süßungsmittel. Seine Produktion ist eng mit Technik, Kultur, Wirtschaft und Politik verbunden.

Es gibt aber nicht nur diesen einen Zucker, die Saccharose, sondern auch noch andere Zucker: Glukose, Fruktose, Laktose und viele mehr. Überall in der belebten Natur sind Zuckermoleküle von entscheidender Bedeutung.

Der Mensch nutzt sie in seiner Ernährung und als nachwachsende Rohstoffe zur Herstellung von Werkstoffen und Energieträgern. Die Erforschung der biologischen Bedeutung von Zuckerverbindungen ermöglicht neue Ansätze bei Diagnose und Therapie von Krankheiten.

Entdecken Sie die spannende Welt der Zucker!

# Alles Zucker!

Zum Zucker hat praktisch jeder eine Meinung. Dem einen erscheint es unmöglich, den Kaffee ohne die gewohnten fünf Löffel Zucker herunterzubekommen, den anderen schaudert es allein beim Gedanken an ein Marmeladenbrötchen. Was dem einen himmlischer Wohlgenuss, ist dem anderen Gift und Teufelswerk. Hier könnte man nun leicht mit Paracelsus' Diktum von der Dosis versuchen, die unterschiedlichen Standpunkte zu versöhnen, wir wollen aber noch einen Schritt weitergehen. Anders als in der früheren Ausstellung des Zucker-Museums, die sich fast ausschließlich mit Geschichte, Herstellung und Verwendung von Haushaltszucker und dessen Neben-Aspekten befasste, geht es in der jetzigen Ausstellung im Deutschen Technikmuseum um sehr viel mehr. Das deutet bereits der Titel an: Alles Zucker! Nahrung – Werkstoff – Energie.

Wir wollen mit dieser Ausstellung nicht mehr und nicht weniger als zeigen, dass unsere Welt aus Zucker besteht; genauer gesagt, dass Zucker der Ursprung allen Seins ist und dass die Zukunft dieses Planeten ebenfalls aus Zucker gebaut werden kann. Der vorliegende Band bietet die Möglichkeit, Aspekte der Ausstellung zu vertiefen und einen umfassenderen Überblick zu geben.

## ZUCKER SIND ÜBERALL

Den Stoff, der im alltäglichen Sprachgebrauch als Zucker bezeichnet wird, nennt der Chemiker Saccharose. Er kennt daneben noch zahlreiche andere Verbindungen, die er als Zucker bezeichnet und deren wissenschaftliche Namen fast alle auf -ose enden. Auch der aufmerksame Verbraucher ist schon anderen Zuckern begegnet: Traubenzucker (Glukose), Fruchtzucker (Fruktose), Milchzucker (Laktose) oder Malzzucker (Maltose), um nur die bekanntesten zu nennen.

Die grünen Pflanzen sind in der Lage, mithilfe des Sonnenlichts aus Kohlenstoffdioxid und Wasser Trauben-

zucker (Glukose) herzustellen. Die einzelnen Zuckermoleküle verknüpfen sie sodann zu langen Ketten, die Zellulose genannt werden. Daraus bauen die Pflanzen ihre Zellwände auf. Werden die Glukoseeinheiten in anderer Weise verknüpft, so entsteht Stärke, die den Pflanzen als Energiespeicher dient. Die Saccharose (unser Haushaltszucker) dient in der Pflanze normalerweise als Transportform, wird von einigen Pflanzen aber auch als Speicherform genutzt. Die Glukose kann von den Pflanzen in jeden beliebigen anderen Zucker umgewandelt werden und sogar völlig andere Stoffe, wie zum Beispiel Öle, können sie daraus erzeugen.

Die harten Panzer der Insekten, Spinnen und Krebstiere bestehen aus Chitin. Auch das ist ein großes Molekül, das aus leicht veränderten Glukoseeinheiten aufgebaut ist. Es findet sich darüber hinaus auch in den Zellwänden von Pilzen.

Wegen dieser grundsätzlichen Bedeutung der Zucker findet der Besucher im zentralen Bereich der Ausstellung auch nicht die vielleicht erwarteten Zuckerhüte und Zuckerwürfelpyramiden, sondern trifft hier eine Baumscheibe nebst Blätterdach, eine Riesenkrabbe und eine Vitrine mit knapp 40 verschiedenen Zuckerproben. An einem Tisch mit Medienstationen kann er sich darüber hinaus intensiver mit den Grundlagen der Zuckerchemie beschäftigen. So wird er an etwa 80 Beispielen erkennen, dass die Zucker nicht nur Chemiker interessieren, sondern tatsächlich auch in unserem Alltag eine Rolle spielen.

An den umliegenden Wänden informieren Infografiken über den Prozess der Photosynthese, über die irdischen Energiekreisläufe und über Zuckerverbindungen im menschlichen Körper. Unterschiedliche Arten der wissenschaftlichen Darstellung von Zuckern, eine Einführung in die Grundlagen der Zuckerchemie und eine Würdigung von Emil Fischer, einem der Väter der modernen organischen Chemie, runden diesen Bereich ab.



Der Panzer der Riesenkrabbe besteht wie der von Insekten und Spinnen aus Chitin, einem Zuckerpolymer.

### VOM LUXUSGUT ZUR MASSENWARE

Die Darstellung der klassischen Zuckerthemen in der Ausstellung beginnt mit der Geschichte des Zuckers, was zunächst die Geschichte des Rohrzuckers ist. Von den Kreuzrittern aus dem arabischen Raum als Luxusgut nach Europa gebracht, wurde Zuckerrohr zunächst im Mittelmeerraum angebaut, bevor es über die Kanarischen und die atlantischen Inseln schließlich von Kolumbus auf seiner zweiten Amerikareise in die Karibik gebracht wurde. Hier fanden die Pflanzen hervorragende klimatische Bedingungen und der Zuckeranbau war fast von Beginn an eng mit Sklavenwirtschaft und traumhaften Profiten für die europäischen Plantagenbesitzer verbunden. Dieser Aspekt wird in der Ausstellung, anders als üblich, vom Ende her erzählt, nämlich vom Sklavenaufstand und der siegreichen Revolution in der französischen Kolonie Saint Domingue, dem heutigen Haiti. Eine hölzerne bolivianische Zuckerrohrmühle und eine Auswahl von Macheten und anderen Werkzeugen zur Zuckerrohrernte illustrieren die Arbeit in diesem Bereich.

Eine Medienstation vermittelt die Handelsbeziehungen auf dem Zuckermarkt seit dem 16. Jahrhundert. Vor allem der transatlantische Dreieckshandel wird in allen seinen Facetten genauer beleuchtet. Trotz der gestrafften Darstellung wird dabei der mehrfache Profit für die europäischen Händler deutlich. Das zweite Thema dieser Installation ist die Verteilung von Rohr- und Rübenzuckerproduktion in der heutigen Welt.

In unmittelbarer Nähe zu Rohrzucker und Revolution befindet sich ein begehrtes Kabinett, in dem in großen Vitrinen in der Art der Silberkammer eines englischen Herrenhauses ein Teil der Silbersammlung des ehemaligen Zucker-Museums ausgestellt ist. Hier soll, ohne tiefer auf kulturgeschichtliche Einordnungen der unterschiedlichen Gefäße und Geräte einzugehen, lediglich der Luxus solcher Präsentationsgefäße auf den ebenso kostbaren Inhalt verweisen. Bis weit ins 19. Jahrhundert hinein war Zucker ein Luxusgut, das sich nur wenige leisten konnten.



Südamerikanische Dreiwalzen-Zuckerrohrmühle in der Ausstellung, im Hintergrund die Vitrine mit Macheten und anderen Hackwerkzeugen.

## VOM ROHR ZUR RÜBE

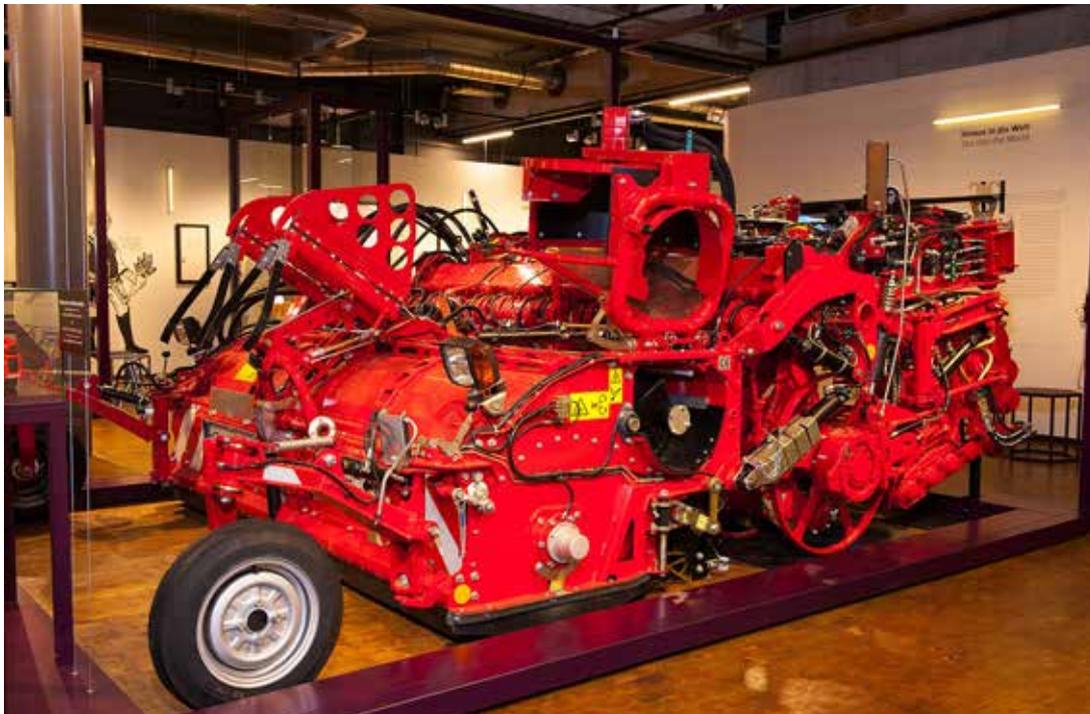
Der Grundstein für einen Wandel des Zuckers vom Luxusgut zur erschwinglichen Massenware wurde in Berlin gelegt. Andreas Sigismund Marggraf, der Leiter der physikalischen Klasse der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, hatte im Jahr 1747 entdeckt, dass einige heimische Wurzelgemüse Zucker enthalten, genau den gleichen Zucker, wie er auch im Zuckerrohr vorkommt. Obwohl die preußischen Könige zu jener Zeit aus Gründen der Staatsfinanzen für Surrogate der Kolonialwaren wie Kaffee, Tee, Kakao, Tabak und Zucker durchaus aufgeschlossen waren, lohnte die ökonomische Ausbeutung dieser neuen Erkenntnis noch nicht. Erst Marggrafs Schüler und Nachfolger auf dem Stuhl des Akademie-Leiters entwickelte die ursprünglichen Rüben durch Zuchtauswahl weiter und entwarf darüber hinaus das Instrumentarium zur Herstellung von Zucker aus diesen Feldfrüchten. Aus diesen frühen Anfängen entwickelte sich dann innerhalb weniger Jahrzehnte die wichtigste Exportindustrie des Deutschen Reiches.

Die Ausstellung räumt auch dem Aspekt des Rübenzuckers als Motor der Industrialisierung angemessenen Raum ein. Mithilfe der präsentierten Objekte wird der Wandel von der Handarbeit über erste Schritte der Mechanisierung bis hin zum Einsatz eines Rübenvollernters in der heutigen industriellen Landwirtschaft nachvollziehbar. Die notwendigen Arbeitsschritte in der Kultur dieser bedeutenden Feldfrucht werden in Schautafeln in allen Einzelheiten erläutert. Aber auch die Veränderungen an den Pflanzen selbst und des Saatgutes, ohne die eine Vollmechanisierung schwerlich möglich gewesen wäre, finden in den Objekten der Ausstellung ihren Niederschlag.

Der Zucker, wie er den Verbraucher erreicht, ist zwar letztlich ein Industrieprodukt, seine Erzeugung geschieht aber eigentlich auf dem Feld. Somit ist er zuerst ein Naturprodukt, das in der Fabrik lediglich aus dem Pflanzenmaterial isoliert wird. Die Extraktion des Zuckers aus der Rübe wird in Form von Schaubildern und mit Unterstützung durch tatsächliche Proben aus dem Produktionsprozess in allen Einzelheiten erläutert. Hier kann man sich



Ausschnitt aus der Silber-Vitrine in der Ausstellung.



Schlegler und Roder eines modernen Rübenvollernters.



Laborarbeitstisch aus dem Zuckerinstitut mit Analysegeräten, an der Wand dahinter das Fabrikpanorama.



Objekte aus der Zuckerfabrik, an der Wand dahinter Erläuterungen zum Rübenanbau.

davon überzeugen, dass durch die lange Entwicklungszeit von nunmehr 200 Jahren die Produktion von Zucker (Saccharose) ein in allen Einzelschritten ausgereifter Prozess ist, der keinerlei Abfälle hinterlässt.

Auf einem historischen Arbeitstisch aus einem Labor des Instituts für Zuckerindustrie werden Messinstrumente präsentiert, die für die unterschiedlichen Analysen der Prozesskontrolle in der Zuckerfabrik wichtig sind. In Schubladen darunter findet der interessierte Besucher Texte, die ihm die einzelnen Methoden und ihre Bedeutung erläutern.

Der Übergang von der importierten Kolonialware zur heimischen Feldfrucht und die Einführung industrieller Methoden im Anbau und in der Verarbeitung der Rüben haben schließlich dazu geführt, dass aus einem kostbaren Luxusgut ein alltägliches Genuss- und Nahrungsmittel geworden ist. Durch rationellere Herstellungsmethoden haben sich auch die Darreichungsformen gewandelt. In früheren Zeiten war die Handelsform der Zuckerhut, der im Haushalt mühsam zerbrochen und in mehreren Schritten bis zu der gewünschten Portionsgröße zerkleinert werden musste. Durch die Einführung der Zentrifuge kann streufähiger Kristallzucker produziert werden, der in jede gewünschte Form konfektioniert werden kann. Objekte aus der Zuckerherstellung und solche, mit denen Zuckerhüte in den Haushalten aufbereitet wurden, präsentiert die Ausstellung.

Dieser Ausstellungsteil spannt den Bogen vom Zucker als rarem Luxusgut, dessen Gebrauch zelebriert wurde und das schon allein durch die Form seiner Präsentation herausgehoben wurde, zu einem alltäglichen Gut, das – zum Beispiel in der »Coffee-to-go-Kultur« – oft nur eine unbedeutende Nebenrolle spielt. Dass dabei heute die soziale Abgrenzung vor allem durch die Art des verwendeten Zuckers geschieht, sei hier nur am Rande erwähnt.

#### WIE VIEL ZUCKER BRAUCHT DER MENSCH?

Die heute breit diskutierten Fragen zu gesundheitlichen Auswirkungen des Zuckerkonsums stellt ein mannshoher Monitorturm dar, der auf drei Seiten Fragen zu Ernährung und Gesundheit in Form von animierten Trickfilmsequenzen behandelt. Hier werden Zucker und Zuckeraustauschstoffe vorgestellt, es wird erklärt, wie Zucker in unserem Körper abgebaut und umgesetzt werden und es wird erläutert, in welcher Form diese Stoffe auf den Lebensmittelpackungen benannt werden. So können und

sollen sich die Besucher mit den nötigen Hintergrundinformationen versorgen, um sich für Diskussionen eine eigene, fundierte Meinung zu bilden.

#### ZUCKER STATT ERDÖL

Den Schwerpunkt im zweiten Hauptteil der Ausstellung bildet die mögliche Verwendung von Zuckern als Rohstoff zur energetischen Nutzung und Herstellung von Werkstoffen. Besonderes Gewicht liegt hier wieder auf den verbreitetsten Materialien, nämlich der Saccharose, der Stärke und der Zellulose.

Vor allem die Zellulose dient dem Menschen bereits seit Jahrzehntausenden als Werkstoff, zählt doch Holz neben Stein zu den am längsten genutzten Materialien, und auch die meisten Pflanzenfasern, die für Textilien und technische Anwendungen wie Netze und Seile verwendet wurden, bestehen hauptsächlich aus Zellulose. Deshalb enthält die Vitrine mit den auf Zellulose basierenden Werkstoffen auch den Korpus einer Violine und ein Hornissennest. Insekten wie Wespen und Hornissen nutzen Alt- und Totholz, um es in einen papierähnlichen Werkstoff umzuwandeln, aus dem sie ihre Nester bauen.

Die ersten Kunststoffe, die am Ende des 19. Jahrhunderts auf den Markt kamen (Zelluloid und andere Zelluloseester) sind chemisch veränderte Zellulose. Auch heute noch finden diese Werkstoffe, seit einiger Zeit sogar wieder verstärkt durch die gesellschaftliche Wahrnehmung und Wertschätzung für Fragen der Nachhaltigkeit, breite Verwendung. Vor allem für alltägliche Gegenstände wie Brillengestelle, Werkzeuggriffe oder Büroartikel werden sie benutzt. Aber auch andere chemische Modifikationen der Zellulose wie vor allem die Zelluloseether sind als Gelier- und Verdickungsmittel im technischen Bereich und der Lebensmittelindustrie oder als Klebstoffe und als Beschichtungen auf Papier und Textilien allgegenwärtig.

Die Stärke hat im Gegensatz zur Zellulose noch nicht diese Verbreitung im Bereich der Werkstoffe gefunden. Das liegt vor allem daran, dass sie in der Natur als Energiereserve der Pflanzen gedacht ist und deshalb bei Bedarf schnell zerlegt werden muss. Diese Eigenschaft widerspricht natürlich in gewisser Weise der Dauerhaftigkeit. Deshalb enthält die Vitrine mit den stärkebasierten Werkstoffen auch vor allem Verpackungschips. Diese sind, anders als die klassischen aus Styropor gefertigten, biologisch abbaubar und eben aus nachwachsenden Rohstoffen gefertigt. Stärke wird daneben noch im Lebens-



Der Monitorturm mit den Ernährungs- und Gesundheitsthemen, an der Wand dahinter der Bereich Information und neue Medizin.

mittelbereich und als Klebe- und Beschichtungsmittel in der Textil- und Papierindustrie verwendet. Auch als Feinstrahlmittel zur Reinigung und Bearbeitung sehr empfindlicher Oberflächen (zum Beispiel im Bereich der Papierrestaurierung) hat sie Anwendung gefunden.

Die Vitrine mit weiteren aus Zuckern aufgebauten Naturmaterialien, die als Werkstoffgrundlage für eine nachhaltige Welt dienen können, präsentiert neben Chitin auch Algenfasern. Aus Chitin bestehen zum Beispiel die Außenskelette der Insekten, Spinnen und Krebstiere. Wegen der immensen Mengen an Krabben- und Garnelenschalen, die bei den sich immer weiter ausbreitenden Aquakulturen anfallen, sucht man seit einiger Zeit nach Möglichkeiten, diese als Rohstoff zu nutzen. Trotz einiger Ansätze und vielfältiger Ankündigungen im Internet existieren aber kaum marktreife Produkte. Wir präsentieren hier als ein gelungenes Beispiel einen Lautsprecher, dessen Membran unter Verwendung von Chitin hergestellt wurde. Als Illustration für aus Algen hergestellte Textil-

fasern dient ein Häkeldeckchen, das scheinbar aus den Fäden der daneben liegenden Algen geklöppelt ist.

Die vierte Werkstoffvitrine in der Ausstellung enthält sogenannte Biokunststoffe. Alle hier ausgestellten Gegenstände sind aus nachwachsenden Rohstoffen, genauer gesagt aus Stärke oder Saccharose, erzeugt. Einige davon sind darüber hinaus auch biologisch abbaubar. Hier sind besonders die Kunststoffe Polymilchsäure (PLA) und Polyhydroxybuttersäure (PHB) zu nennen. Andere sind identisch mit klassischen, aus Erdöl produzierten Kunststoffen wie Polyethylen (PE) oder Polyethylenterephthalat (PET). Diese bringen die gleichen Probleme mit sich, wie ihre aus fossilen Grundstoffen erzeugten Geschwister. Dass zur Produktion aller dieser Kunststoffe bislang Stärke oder Saccharose benutzt werden, stellt ein weiteres Problem dar. Erst, wenn die Rohstoffgrundlage zu Biomasse wechselt, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion steht, ist tatsächlich ein Fortschritt erreicht. So zeigt diese Vitrine zwar schon die



Vitrinen mit verschiedenen zuckerbasierten Werkstoffen.

vielfältigen Ansätze auf dem Gebiet der »Biokunststoffe«, dass der Weg aber erst ein sehr kurzes Stück beschritten wurde, verdeutlichen unter anderem die zahlreichen Definitionen dieses viel verwendeten Begriffs.

Der Ursprung der chemischen Industrie lag seit Mitte des 19. Jahrhunderts in der Kohlechemie. Alle chemischen Produkte wie Farbstoffe (Anilinfarben), Arzneimittel (Aspirin) und auch die ersten vollsynthetischen Kunststoffe (Bakelit) wurden im Grunde aus Steinkohlenteer hergestellt. Das war eigentlich ein Abfallprodukt aus der Koksherstellung für die Stahlindustrie oder der Leuchtgaserzeugung, entwickelte sich aber schnell zur zentralen Rohstoffbasis für die aufblühende chemische und pharmazeutische Industrie. Nach dem Zweiten Weltkrieg kam es in diesem Bereich zu einem Paradigmenwechsel, Hauptrohstoff wurde nun das Erdöl. Zurzeit erleben wir einen erneuten Wandel hin zu nachwachsenden Rohstoffen. Das versucht die Ausstellung in diesem Bereich zu vermitteln.

## ENERGIE AUS ZUCKERN

Die Energiegewinnung jenseits fossiler Quellen ist das andere wichtige Feld, auf dem Zucker in Zukunft eine Rolle spielen können. Auch hier gibt es Erfahrungen, die bereits mehrere Jahrzehntausende zurückreichen. Seit der Mensch das Feuer entdeckt hat, verbrennt er Holz, um sich zu wärmen, seine Nahrung aufzubereiten und die Dunkelheit zu erleuchten. Auch der Dung der Herdentiere wird mindestens seit Beginn der Sesshaftigkeit für diesen Zweck genutzt. All dies sind nachwachsende Rohstoffe, die auf Biomasse, also Zucker zurückgehen. Seit einigen Jahren sind Begriffe wie Biogas, Biodiesel oder Bioethanol in aller Munde. In der Ausstellung werden all diese verschiedenen Verfahren erläutert und es wird ein Schlaglicht auf den momentanen Stand der Erzeugung und Verwendung dieser Energieformen im Vergleich zu aus fossilen Energieträgern erzeugten geworfen.

In einem vom übrigen Ausstellungsraum abgetrennten Kabinett werden zwei speziellere Arten der Energie-



Installation zur Veranschaulichung der Alkoholproduktion mit Meerwasser und Sonnenlicht.

gewinnung vorgestellt. Die eine Methode benutzt Cyanobakterien, die in Meerwasser Kohlenstoffdioxid mithilfe von Sonnenlicht in Zucker umsetzen. Der Zucker wird von den Mikroorganismen in einem zweiten Schritt anschließend zu Ethanol umgewandelt, dieses kann schließlich periodisch abdestilliert werden. Im Moment funktioniert das Ganze nur in von der Sonne verwöhnten Landstrichen, wie zum Beispiel Florida. Der Vorteil ist jedoch, dass weder Süßwasser noch Ackerland dafür benötigt werden.

Die zweite Methode nutzt Purpurbakterien, die den im Wasser vorhandenen Zucker mithilfe des Sonnenlichts in Wasserstoff umsetzen. Dieser kann abgeschöpft und energetisch verwendet werden. Auch hier ist das Entscheidende ein hoher Eintrag von Sonnenlicht, weshalb für diese Reaktoren große Flächen in Wüsten, zum Beispiel der Sahara, vorgesehen wären.

#### INFORMATION AUS ZUCKERN

Ein anderer Aspekt von Zuckern, der zwar nicht mit Ernährung, aber trotzdem mit Gesundheit zu tun hat, wird in der Ausstellung unter dem Stichwort »Information« vorgestellt. Grundlage des Ganzen ist die Tatsache, dass alle tierischen Zellen, also auch die menschlichen, und jene der Mikroorganismen von einem »Pelz« aus Zuckerketten umgeben sind. In diesen Ketten sind in der Abfolge der einzelnen Zuckerbausteine Informationen codiert. So unterscheiden sich die unterschiedlichen Blutgruppen beim Menschen in der Sequenz dieser Ketten. Mithilfe solcher Ketten können die Zellen auch miteinander kommunizieren. So findet zum Beispiel der Kontakt zwischen Ei und Samenzelle vor allem auf dieser Ebene der Zelloberfläche statt. Die in den Zuckerketten codierten Informationen bilden den Ausgangspunkt für neue Tendenzen in der Biologie und der medizinischen Forschung. Eines der spektakulärsten Exponate in der Ausstellung dürfte ein Oligosaccharidsynthesizer sein,



Historische Objekte aus dem Zucker-Museum und dem Zuckerinstitut.

eine Maschine, mit deren Hilfe sich gezielt Zuckerketten definierter Sequenz herstellen lassen. Dieses Gerät wurde von Prof. Peter Seeberger entwickelt, der heute am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam-Golm arbeitet. Das Ausstellungsexemplar ist eine frühe Forschungsversion, heute werden die Geräte in Serie produziert und in alle Welt exportiert. Die mit solchen Geräten synthetisierten Zuckerketten dienen der Grundlagenforschung und bilden zum Beispiel die Grundlage neuartiger Impfstoffe oder Medikamente. Selbst die Kosmetikindustrie hat solche Verbindungen inzwischen für sich entdeckt, wenn deren Oligosaccharidketten zurzeit auch meist noch aus Pflanzen isoliert werden.

Als zweites wichtiges Objekt in dem Bereich der medizinischen Anwendungen von Zuckern wird in der Ausstellung ein Bioreaktor präsentiert, in dessen hohlen Membranfasern spezielle Zellen pharmazeutisch genutzte Proteine produzieren. Die meisten für die Pharmazie interessanten Proteine müssen jedoch auf die richtige Art

und Weise verzuckert sein, um optimal zu funktionieren. So wie auch viele der Proteine in unserem Körper erst durch einen angehängten Zuckeranteil ihre Wirkung korrekt entfalten können. Man nennt solche Verbindungen Glykoproteine.

Ein weiteres aktuelles Thema, das polymere Zuckerketten im Gesundheitsbereich behandelt, betrifft die regenerative Medizin. In letzter Zeit wurde in der Presse häufiger von spektakulären Erfolgen in diesem Bereich berichtet. Es wird mitunter der Eindruck vermittelt, als stünde die Herstellung von Geweben oder gar ganzen Organen mithilfe von 3D-Druckern unmittelbar bevor. Das würde nicht nur einige Bereiche der Medizin revolutionieren, sondern kann auch entscheidenden Einfluss auf den Ersatz von Tierversuchen haben. Die eigentliche Grundlage all dieser Methoden sind zwar Stammzellen, aber diese benötigen eine Umgebung, in der sie sich entsprechend den Erwartungen entwickeln können. Da Kohlenhydrate eine wichtige Rolle in vielen Signal-



Das Nasspräparatekabinett in der Ausstellung.

übertragungswegen und Zell-Zell-Interaktionen spielen, wurden auch für diesen Bereich der Stammzellregulation verschiedene auf natürlichen Polysacchariden und Glykoproteinen basierende Gerüste entwickelt. Leider ist die Forschung auf diesem Gebiet noch nicht so weit fortgeschritten, dass sie sich in der Ausstellung präsentieren ließe, wir finden sie aber so wichtig, dass sie mit einem Beitrag in diesem Band vertreten sein muss.

### WEDDINGER WURZELN

Ein kleinerer Bereich der Ausstellung geht auf die Geschichte des Zuckerinstituts und auch des Zucker-Museums ein. Mit der Konsolidierung der Rübenzuckerindustrie ab Mitte der 1830er Jahre wurde dieser neue Produktionszweig auch für den Fiskus interessant, sodass ab 1840 die Zuckerproduktion besteuert wurde. Das führte zum Zusammenschluss der Zuckerproduzenten, deren Lobbyverein, der »Verein für die Rübenzuckerindustrie im Zollverein«, ab 1850 ihre Interessen

gegenüber dem Staat vertreten sollte. Der Wunsch nach einem Untersuchungs- und Forschungsinstitut und einer Institution, die die Ausbildung in dem sich zunehmend verwissenschaftlichenden Gewerbe übernehmen sollte, führte schließlich 1867 zur Gründung eines Vereinslaboratoriums für die Rübenzuckerindustrie. Nach Erweiterung und Umbenennung des Vereins in »Verein für die Rübenzuckerindustrie des Deutschen Reiches« 1873 wurde der Zusammenschluss schließlich 1894 noch auf die anderen Zuckersiedereien, die hauptsächlich importierten Rohrzucker verarbeiteten, ausgedehnt. Nun firmierte man als »Verein der deutschen Zuckerindustrie«. Gute Lobbyarbeit und das Interesse des Staates an der weiteren Steigerung der Einnahmen durch die Zuckersteuer, die inzwischen einen Großteil der Staatseinnahmen ausmachte, führte schließlich zur Errichtung eines eigenen Gebäudes in der Amrumer Straße 32 für den Verein auf Staatskosten. Hier residierte der Verein, der Hauptzweck war aber die Schaffung eines Forschungs-



Ein Teil der Schaukästen mit Nützlingen und Schädlingen der Zuckerrübe.

instituts für die Zuckerindustrie. Im Dachgeschoss wurden auch zwei Räume als Museum eingerichtet. Hier sollten historisch bedeutsame Objekte, die von der Zuckerindustrie gesammelt worden waren, archiviert und ausgestellt werden. Der Standort dieses neuen Instituts befand sich in unmittelbarer Nachbarschaft zu den bereits bestehenden Gebäuden der anderen Lebensmittelinstitute. Auf einige Punkte aus der Geschichte des Instituts wird speziell eingegangen, so zum Beispiel auf die Einführung einer Ausbildung für Frauen, mit der sie eine Berufstätigkeit im Labor einer Zuckerfabrik aufnehmen konnten. Abbildungen, Diashows und einige Objekte aus dem Institut illustrieren diesen Teil der Ausstellung.

In einem abgetrennten Kabinett können die Besucher Teile der Nasspräparatesammlung des Zucker-Museums bewundern. In loser Zusammenstellung, nur erläutert durch die originalen Beschriftungen, werden die Gefäße mit den konservierten Rohr- und Rübenproben präsentiert, die im Institut zur Ausbildung der zukünftigen Zu-

ckertechniker verwendet wurden. Daneben findet man eine Zusammenstellung von Schaukästen mit den wichtigsten Schädlingen und Nützlingen im Rübenbau.

### **DIE NEUE SICHT AUF DEN ZUCKER AUS VIELEN BLICKWINKELN**

Bei der Gestaltung der Ausstellung wurde bewusst auf Stellwände und Raumteiler verzichtet. Von jedem Punkt aus ist der gesamte Raum zu überblicken, ohne dass der Besucher jedoch von der Vielzahl der unterschiedlichen Eindrücke verwirrt werden würde. Wichtigstes Gestaltungselement ist die den gesamten Raum umschließende Panoramawand. Auf ihr sind die meisten Texte und Abbildungen sowie strukturierende Beleuchtungselemente versammelt. Die Aufteilung des Raums geschieht ausschließlich durch die Objekte und Vitrinen, sodass der Besucher seinen Weg durch die Ausstellung frei wählen kann. Im Raum hängende Leuchtschriften setzen Akzente und leiten hin zu den einzelnen Ausstellungsthe-

men. Medienstationen und Infografiken vermitteln darüber hinaus vertiefte Einblicke in die aufregende Welt der Zucker.

Damit die Besucher auch alle Medienangebote der Ausstellung nutzen können, ohne vorzeitig zu ermüden, wurde sie mit eigens dafür hergestellten Hockern reichlich bestückt. Diese greifen die Fünf- und Sechseckform vieler Zuckermoleküle auf.

#### ZEITREISE FÜR DIE OHREN

An 17 Hörstationen erläutern historische Persönlichkeiten und lebende Zeitgenossen ihren Bezug zum Zucker. Hier äußern sich der Entdecker des Zuckers in der Rübe, Andreas Sigismund Marggraf, und Franz Carl Achard, der »Vater der Zuckerrübe«, sowie Emil Fischer, einer der Begründer der Zuckerchemie neben einer Teilnehmerin eines »Damenkurses« für Fabrik-Chemikerinnen von 1917. Der spanische Besitzer einer Zuckerrohrplantage zu Beginn des 17. Jahrhunderts kommt ebenso zu Wort wie ein Führer des Sklavenaufstandes auf Haiti von 1791. Einige Werkstoffwissenschaftlerinnen vom Max-Planck-Institut in Potsdam-Golm erläutern, was ihre Forschungen zu Kiefernzapfen oder Spinnenhäuten mit Zucker zu tun haben und welchen Einfluss sie damit auf zukünftige Technologien nehmen können. Der technische Leiter der Biogasanlage der Berliner Stadtreinigung erklärt, wie

die Fahrzeuge seines Fuhrparks letztlich mit den Abfällen angetrieben werden, die sie transportieren. All diese einzelnen Facetten ergeben ein Gesamtbild von der Vielschichtigkeit der Zucker.

Die Ausstellung hat zum Ziel, den Blick der Besucher auf neue, interessante und für viele sicher überraschende Themen zu lenken, die mit dem alltäglichen Nahrungs- und Genussmittel Zucker verbunden sind. Sie möchte darüber hinaus das große Zukunftspotenzial der Gesamtheit der Zucker vermitteln – weit über die Kaffeetafel oder den Coffee to go hinaus.

Die Beiträge des vorliegenden Bandes vertiefen die in der Ausstellung angerissenen Themen, an vielen Punkten gehen sie auch weit über diese hinaus und stellen weitere Aspekte in den Fokus. Immer aber wird der Bogen geschlagen zum Alltagsbezug. Es geht nicht um die Darstellung von Wissenschaft um ihrer selbst willen, sondern darum, mit ihrer Hilfe die drängenden Probleme des Alltags zu verstehen und Ansätze aufzuzeigen, die Welt auch weiterhin zu verändern und vielleicht sogar ein bisschen besser zu machen. Genau wie in den Ausstellungen unseres Hauses versuchen wir mit diesem Buch, Einsichten zu vermitteln, die über das reine technische Wissen hinausgehen, denn diese Welt ist nicht die Summe der Dinge, sondern ergibt sich aus den Netzwerken der Zusammenhänge.

## Kurz & Knapp

Im Alltag beschreibt das Wort Zucker ein Süßungsmittel für Speisen und Getränke. Der Chemiker versteht unter Zuckern Verbindungen mit einer ganz bestimmten Struktur. Es gibt zahlreiche Moleküle dieses Typs, die Saccharide. Sie können einzeln, zu zweit, zu dritt oder in längeren Ketten – den Polysacchariden – auftreten.

Die handelsübliche Saccharose ist ein Zweifachzucker. Sie besteht aus Glukose (Traubenzucker) und Fruktose (Fruchtzucker). Darüber hinaus gibt es Milchzucker (Laktose), Malzzucker (Maltose) und viele mehr. Die Desoxyribose ist ein zentraler Baustein in der Erbsubstanz (DNS).

Die wissenschaftlichen Namen vieler Zucker enden auf -ose. Polysaccharide sind sehr große, kettenförmig aufgebaute Moleküle. Sie können auch verzweigt sein. Die Bausteine dieser Moleküle sind einzelne Zucker.

Die Polysaccharide sind in der Natur sehr verbreitet und bilden in Pflanzen oft Reservestoffe, wie Stärke, oder Gerüstmaterialien, wie Zellulose. Manche enthalten nur einen Zucker, andere bestehen aus unterschiedlichen Zuckern.

# Was sind Zucker und warum sind sie wichtig?

»Zucker« – ein Begriff in aller Munde und Gegenstand vieler Sprichwörter und Redewendungen. Aber was ist eigentlich gemeint mit »Zucker«?

Wie so oft im Leben kommt es darauf an, wen man fragt. Nicht nur zwischen Leuten vom Fach und Laien tun sich Bedeutungsunterschiede auf. Auch verschiedene Fachgebiete haben zum Teil recht unterschiedliche Auffassungen von Zucker. Und letztlich kann die Verwendung des Zucker-Begriffs auch von Person zu Person innerhalb eines Fachs abweichen. Da die Beiträge in diesem Band aus der Feder verschiedener Autoren stammen, ist es sinnvoll, die Begrifflichkeiten genauer zu erläutern.

Wer eine schnelle Information zum Zucker-Begriff auf einen Blick möchte, findet auf Seite 33 eine Kurzübersicht.

## ZUCKER IM PLURAL

Was vielleicht gleich zu Beginn für Irritation sorgt, ist die Verwendung von Zucker in der Mehrzahl, zumal sich im Deutschen ohne den Kontext der Plural nicht vom Singular unterscheiden lässt. Im Alltag wird Zucker üblicherweise im Singular benutzt und bezeichnet meist den Haushaltszucker, die Saccharose. Oft steht Zucker auch synonym für Süßungsmittel, solange es sich nicht um Süßstoffe oder Zuckeraustauschstoffe handelt. So werden (chemisch durchaus unterscheidbare) Zucker wie Trauben-, Frucht- oder Milchzucker dann als Zucker im Singular zusammengefasst.

In diesem Buch liegt aber ein besonderer Fokus auf der Unterschiedlichkeit der Zuckerverbindungen, weshalb wir Zucker häufig im Plural verwenden, denn es gibt viel mehr als nur den einen ...

## VIELE NAMEN

Erwähnt man, dass es nicht nur den einen Zucker, sondern viele verschiedene gibt, so wird man nicht selten als Reaktion eine Aufzählung in der Art von »Ach ja?

... Stimmt! Würfelzucker, Streuzucker, brauner Zucker, Kandis ...« bekommen. Diese Antwort ist natürlich nicht falsch, aber nicht das, was in diesem Buch primär als Vielfalt der Zucker vermittelt werden soll. Bei dem Aufgezählten handelt es sich lediglich um unterschiedliche Darreichungsformen der gleichen Zuckerverbindung, nämlich der Saccharose. Es gibt aber noch weitaus mehr »-osen« (häufige Namensendung von Zuckermolekülen).

Die Tabelle auf der folgenden Seite verdeutlicht die verwirrende Vielzahl der chemischen Ober- und Unterkategorien, die es für Zucker gibt. Zucker lässt sich in viele unterschiedliche Schubladen einsortieren, auch außerhalb der Chemie (Zuckerartenverordnung und Zuckermarktordnung sind entsprechende Stichworte aus anderen Artikeln dieses Bandes).

Für ein und denselben Zucker können durchaus mehrere Namen in Gebrauch sein. Für Traubenzucker wird nicht nur Glukose, sondern auch noch der veraltete Begriff Dextrose verwendet. Der Gebrauch der entsprechenden Bezeichnung für Fruchtzucker/Fruktose ist dagegen heutzutage sehr unüblich. Noch in den 1950er Jahren wurde Fruchtzucker in den Medien als Lävulose gehandelt.<sup>1</sup>

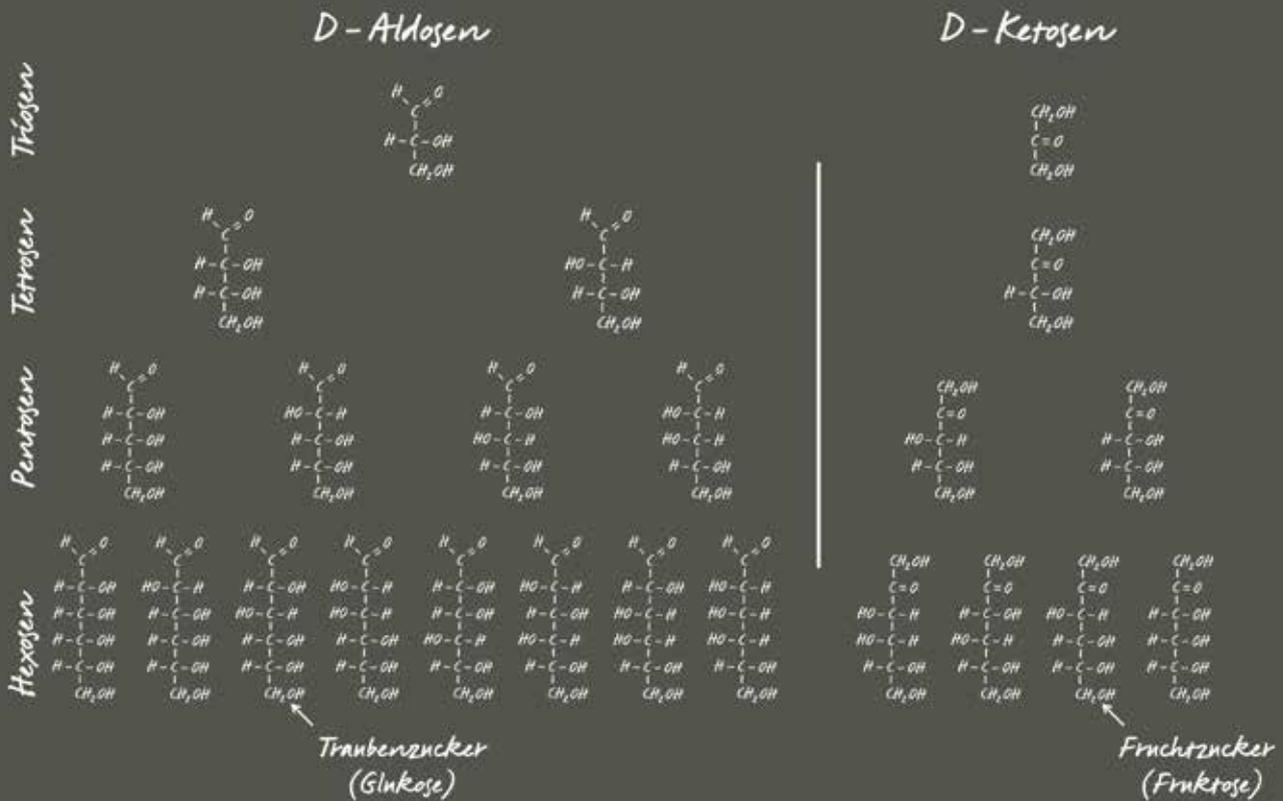
Für den in letzter Zeit als kalorienarmes<sup>2</sup> Süßungsmittel aufkommenden Zucker Psicose wird hierfür der deutlich konsumentenfreundlichere Name Allulose verwendet.<sup>3</sup> Es ist also Vorsicht geboten bei der Benennung von Zuckern. Meint jemand zum Beispiel mit »Fruchtzucker« konkret die Fruktose oder einfach Zucker aus Früchten? Das können dann neben Fruktose auch noch Glukose und Saccharose sein.

Noch kurz ein Wort zur Schreibweise: In diesem Buch werden die eingedeutschten Schreibweisen der Fachbegriffe »Glucose«, »Fructose«, »Lactose«, »Galactose« und »Cellulose«, also »Glukose«, »Fruktose«, »Laktose«, »Galaktose« und »Zellulose« verwendet.

# Beispiele für chemische Klassifizierungen von Zuckern

		Varianten	Unterscheidungsmerkmal
Saccharide / Kohlenhydrate	Zusammengesetzte Zucker / Glykane im weiteren Sinn	Gleich = Homoglykane	Art der Zuckerbausteine
		Unterschiedlich = Heteroglykane	
	Monosaccharide	»Viele« = Polysaccharide/Glykane im engeren Sinn	Anzahl der einzelnen Zuckerbausteine
		»Einige« (unterschiedlich definiert, teils inklusive 2 –4) = Oligosaccharide	
		4 = Tetrasaccharide	
	3 = Trisaccharide		
	2 = Disaccharide		
	1 = Monosaccharide		
	Monosaccharide	(2 = Biose – Achtung: Begriff teilweise auch für Disaccharide, s.o., verwendet ...)	Anzahl der Kohlenstoffatome in der Molekülkette
		3 = Triose	
4 = Tetrose			
5 = Pentose			
6 = Hexose (und mehr)			
	Als Aldehydgruppe (am Molekülanfang) = Aldose Als Ketogruppe (innerhalb des Moleküls) = Ketose	Position der Carbonylgruppe (das doppelt gebundene »O«)	
	Zahlreiche Möglichkeiten	Chemische Modifikation	
	D oder L (von einem Zucker kann es beide Varianten geben, in der Natur kommt zumeist nur die D-Form, also die Hydroxy-(»OH«)-Gruppe rechts, vor; wenn nicht explizit angegeben, geht man üblicherweise davon aus, dass der jeweilige D-Zucker gemeint ist)	Ausrichtung am untersten Stereozentrum (»C« mit vier verschiedenen Resten) in der Fischer-Projektion	
	5 = Furanose oder 6 = Pyranose (von einem Zucker kann es beide Varianten geben)	Anzahl der Glieder in der Ringform	
	$\alpha$ oder $\beta$ (von einem Zucker kann es beide Varianten geben)	Ausrichtung am anomeren Kohlenstoffatom (das durch Ringschluss neu entstehende »C« mit vier verschiedenen Resten)	

Wer möglichst viele dieser Begrifflichkeiten auf einmal im normalen Alltag verwenden will, kann an der nächsten Kaffeetafel ja einmal darum bitten, das » $\alpha$ -D-Glucopyranosyl- $\beta$ -D-fructofuranosid« (anstelle einfach die »Saccharose« oder gar nur den »Zucker«) gereicht zu bekommen.



Die »klassischen« Monosaccharide in Fischer-Schreibweise, sortiert nach der Anzahl der Kohlenstoffatome und der Position des doppelt gebundenen Sauerstoffatoms. Die beiden Einfachzuckerbausteine des üblichen Haushaltszucks Saccharose sind besonders hervorgehoben.

### ZUCKER IM KONTEXT

Wie deutlich wurde, muss man vor Augen haben, in welchem Zusammenhang von Zucker gesprochen wird. Besonders vertraut dürfte den meisten der Begriff in Bezug auf Lebensmittel sein. Hier steht Zucker zumeist für eine Unterkategorie (selten als Synonym) der Kohlenhydrate. Kohlenhydrate stellen neben Fetten/Ölen (Lipiden) und Eiweißen (Proteinen) eine der drei bekanntesten Nahrungsmittelgruppen und zählen wie diese zu den Makronährstoffen.<sup>4</sup>

Dringt man weiter in die Untiefen der Biochemie vor, kann man die Aufzählung Kohlenhydrate, Lipide und Proteine noch um die Nukleinsäuren ergänzen. Unsere Erbmasse, die DNS, gehört zu dieser Substanzgruppe. Mit Kohlenhydraten, Lipiden, Proteinen und Nukleinsäuren hat man nun die vier Biomolekül-Klassen aufgezählt, die von zentraler Bedeutung sind.

Zucker (beziehungsweise Kohlenhydrate) sind also ein wichtiger Bestandteil von Lebewesen und es verwun-

dert daher nicht, dass sie auch in der menschlichen Ernährung eine große Rolle spielen.

Da die Betrachtungsweisen für Zucker vielfältig sind, existieren verschiedene Möglichkeiten, um sie als Strukturformel oder symbolisch darzustellen. So können die für die jeweilige Betrachtung relevanten Eigenschaften jeweils besonders herausgestellt werden.

### KLEINSTER GEMEINSAMER NENNER

Was sind denn nun eigentlich Zucker und wieso überhaupt Kohlenhydrate? Fangen wir zunächst ganz klein an, nämlich bei den Atomen. Zuckermoleküle bestehen aus Atomen der chemischen Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O). An eine Kette aus Kohlenstoffatomen sind dabei die Wasserstoff- und Sauerstoffatome gebunden. Aber nur ein Teil der Wasserstoffatome sitzt direkt an den Kohlenstoffatomen. Oft steht noch ein Sauerstoffatom in Form einer OH-Gruppe dazwischen. Ein weiteres Motiv im Aufbau von Zucker-

molekülen ist, dass ein Sauerstoffatom doppelt an ein Kohlenstoffatom gebunden vorliegt. Wo genau das doppelt gebundene O sitzt, bestimmt darüber, ob eine Aldose oder eine Ketose vorliegt.

Zuckermoleküle weisen sich als solche also durch die spezifische Art und Weise aus, wie die Sauerstoffatome angebunden sind. Diese Grundstruktur bewirkt, dass man beim Auszählen der Atome stets auf eine Summenformel kommt, die einem Mehrfachen von  $\text{CH}_2\text{O}$  entspricht, zum Beispiel  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ . Die elementare Zusammensetzung ist sozusagen wie Kohle (C) mit Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ), also »hydratisierte Kohle«. Daher kommt der Begriff »Kohlenhydrat«.

### EIN RING, SIE ZU BINDEN

Weiterhin hat die Zucker-Grundstruktur zur Folge, dass sich die kettenförmigen Moleküle meist zu einer fünf- oder sechseckigen Ringstruktur umlagern.<sup>5</sup> Diese molekülinterne Ringschließung erfolgt durch Reaktion einer OH-Gruppe mit dem Kohlenstoffatom, das das doppelt gebundene O trägt. Das OH gibt dabei sein H an das doppelt gebundene O ab und wird zu dem O in der »Ecke« des Rings umgelagert. Es sind dabei insgesamt vier Varianten möglich. Es kann ein Fünfer- oder Sechsering (Furanose oder Pyranose) entstehen. Darüber hinaus kann in beiden Fällen die, aus dem doppelt gebundenen O neu entstandene, OH-Gruppe entweder nach unten oder nach oben zeigen (in der Schreibweise nach Haworth). Das entspricht dann der  $\alpha$ - beziehungsweise  $\beta$ -Form.

In wässriger Lösung (zum Beispiel in Getränken oder frischem Obst) kommt ein Zucker nicht nur in einer Form vor, sondern als ein Gemisch der verschiedenen Ringstrukturen und der offenkettigen Variante. Diese verschiedenen Formen wandeln sich ständig ineinander um. Dennoch bleiben die Mengenverhältnisse letztlich konstant, denn es bildet sich ein Gleichgewicht aus. Welche Form wie häufig vorkommt, hängt von den Umweltbedingungen ab. Derselbe Obstsalat schmeckt zum Beispiel gekühlt süßer als bei Zimmertemperatur, denn bei kühleren Bedingungen liegt mehr vom Fruchtzucker in seiner süßesten Form (nämlich als  $\beta$ -D-Fructopyranose) vor.<sup>6</sup>

### ZIEMLICH ZUCKRIGE ZUSAMMENSCHLÜSSE

Weil das alles noch nicht kompliziert genug ist, können sich die einzelnen Zucker (Einfachzucker oder Monosaccharide) auch noch zu größeren Zuckermolekülen (Di-

bis Polysaccharide) zusammenschließen.<sup>7</sup> Die Art der Verbindung ist dabei spezieller Natur. Es handelt sich um die glykosidische Bindung. Sie kann zwischen zwei Einfachzucker-Bausteinen an verschiedenen Stellen geknüpft werden. Dabei verbindet sich die oben beschriebene OH-Gruppe am C rechts neben der »O-Ecke« mit einer verfügbaren OH-Gruppe des anderen Zuckerbausteins. Auf diese Weise wird die Ausrichtung der ausschlaggebenden OH-Gruppe ( $\alpha$  oder  $\beta$ ) fixiert, denn der Ring kann sich an dieser Stelle nun nicht mehr öffnen und in anderer Ausrichtung wieder schließen. Man spricht von  $\alpha$ - beziehungsweise  $\beta$ -glykosidischer Bindung.

Die folgende Seite zeigt, welche Kombinationen allein aus zwei Traubenzuckersechseringen hervorgehen können. Führt man sich nun vor Augen, dass Zuckermoleküle auch aus unterschiedlichen Einzelbausteinen zusammengesetzt werden können, dass sie (dank mehrfacher Verknüpfungspunkte) sogar Verzweigungen ausbilden und bis auf Makromolekülgröße heranwachsen können, so hat man eine ungefähre Ahnung davon, wie umwerfend umfangreich die Welt der Zucker ist.

### WO ZIEHT MAN DIE GRENZE?

Dass die Einzelbausteine zusammengesetzter Zucker als »Zucker« bezeichnet werden können, wird kaum jemand mit chemischem Hintergrund in Zweifel ziehen. Aber ab welcher Molekülgröße man damit aufhört, ist im wahren Sinne des Wortes Geschmackssache. Denn grob kann man sagen: Je länger die Kette aus einzelnen Zuckern, desto weniger süß schmeckt das Molekül. Manche Zucker-Definitionen greifen tatsächlich sogar den Süßgeschmack als eine Bedingung auf.<sup>8</sup>

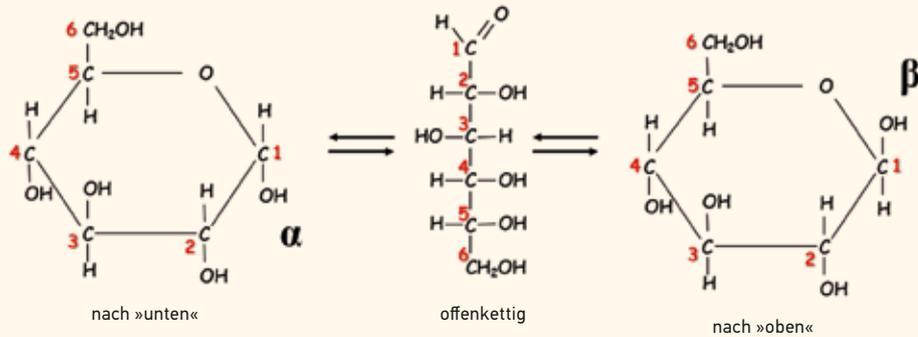
Die Zucker auf der Nährwerttabelle von Lebensmitteln beinhalten nur solche Moleküle, die aus einem oder zwei Einfachzuckerbausteinen bestehen. In anderen Disziplinen werden auch etwas längere Zuckermolekülketten (bis hin zum Oligosaccharid) einfach als Zucker angesprochen. Bei deutlich mehr Einfachzuckerbausteinen, also Polysacchariden, ist es dann allerdings eher unüblich, sie als Zucker zu bezeichnen. Da Polysaccharide aber aus Zuckern aufgebaut sind, gehören sie zur Welt der Zucker dazu und können bedenkenlos als Zuckermoleküle oder Zuckerverbindungen bezeichnet werden.

Kommen wir noch einmal auf die Einfachzuckerbausteine zurück. Auch bei diesen kann man durchaus unterschiedlicher Meinung sein, was noch als Zucker durch-

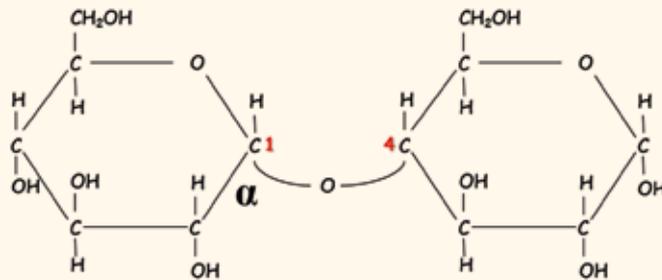
# Glykosidische Bindung am Beispiel von Zweifachzuckern aus Traubenzucker

Darstellung orientiert an Haworth-Schreibweise

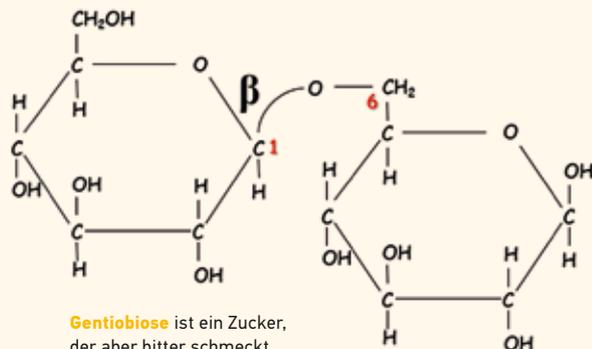
a)  $\alpha$ - und  $\beta$ -Varianten unterscheiden sich in der Stellung der »OH«-Gruppe am »C« rechts neben »O« im Ring. Hier, im Sechser-Ring des Traubenzuckers, das C1.



c) Beispiele:



**Malzzucker (Maltose)** entsteht durch Stärkespaltung z. B. beim Mälzen in der Bierherstellung. Ist verantwortlich für die entstehende Süße, wenn man lange auf Brot kaut.

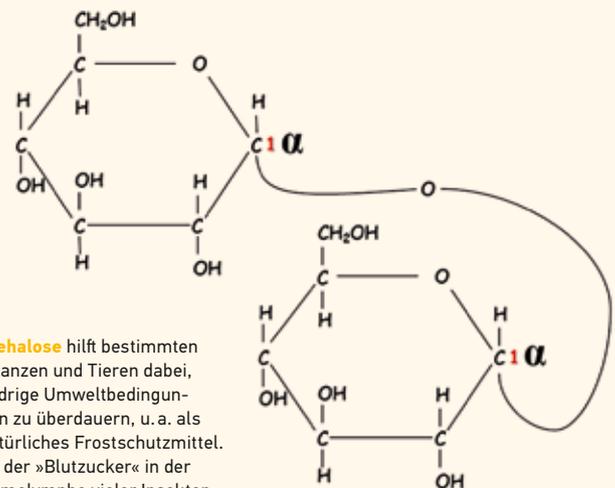


**Gentiobiose** ist ein Zucker, der aber bitter schmeckt.

b)

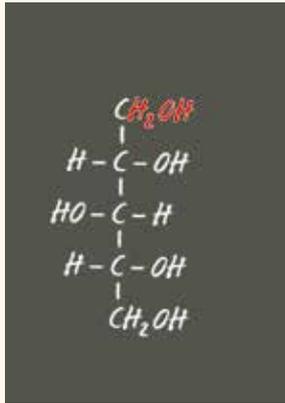
Verbindungen aus zwei Traubenzucker-Bausteinen (nach Georg Thieme Verlag KG)

	C1 (a)	C1 (b)
C1 (a)	<b>Trehalose</b>	Neotrehalose
C1 (b)	Neotrehalose	Isotrehalose
C2	Kojibiose	Sophorose
C3	Nigerose	Laminaribiose
C4	<b>Malzzucker (Maltose)</b>	Cellobiose
C5	kein »OH«	kein »OH«
C6	Isomaltose	<b>Gentiobiose</b>

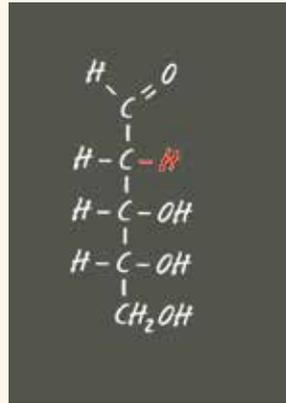


**Trehalose** hilft bestimmten Pflanzen und Tieren dabei, widrige Umweltbedingungen zu überdauern, u. a. als natürliches Frostschutzmittel. Ist der »Blutzucker« in der Hämolymphe vieler Insekten. Wird technisch bei der Restaurierung von Nassholz eingesetzt. Schmeckt süß.

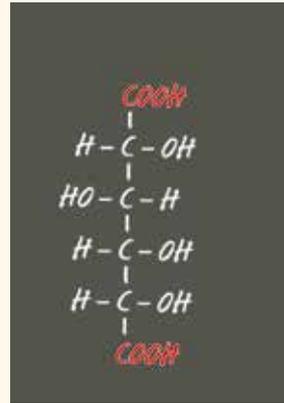
# Beispiele für chemisch veränderte Einfachzucker



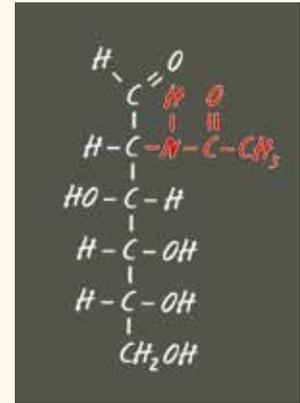
**Zuckeralkohole** tragen statt des doppelt gebundenen »O« eine weitere »OH«-Gruppe, wie z. B. Xylit (abgeleitet vom Zucker Xylose), das man vielleicht von Zahnpflegekaugummi her kennt.



**Desoxyzucker** haben mindestens eine »OH«-Gruppe durch ein »H« ersetzt, wie z. B. Desoxyribose (abgeleitet vom Zucker Ribose), die Bestandteil des Grundgerüsts der DNS ist.



**Zuckersäuren** sind Einfachzucker mit mindestens einer Carbonsäure-Gruppe (Carboxygruppe, »COOH«) zählt man zu den Zuckersäuren, wie z. B. Glucarsäure (abgeleitet vom Zucker Glukose), die gleich zwei »COOH«-Gruppen trägt und oft als DIE Zuckersäure im engeren Sinn gilt.



**Aminozucker** haben, in der einen oder anderen Form, eine stickstoff-(»N«-)haltige Aminogruppe angefügt, wie z. B. N-Acetylglucosamin (abgeleitet vom Zucker Glukose), das Grundbaustein des Chitins im Außenskelett von Krebsen, Spinnen, Insekten und Co. ist, aber auch im menschlichen Körper ein Baustein wichtiger zusammengesetzter Zuckermoleküle (z. B. Hyaluronsäure) in Haut, Knorpel, Gelenkflüssigkeit sowie dem Glaskörper des Auges ist.

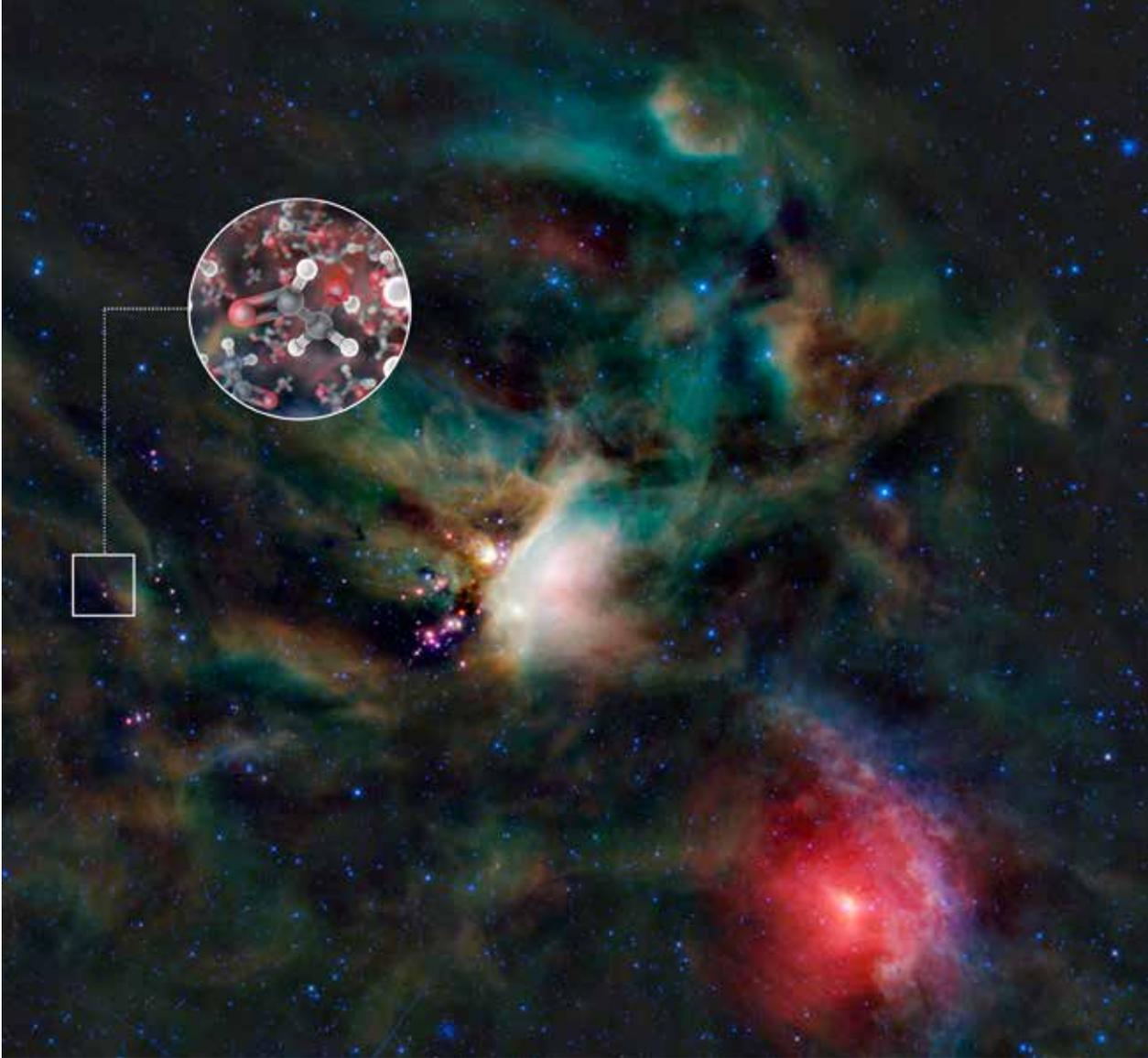
Ein Einfachzucker kann auch mehrere solcher Veränderungen aufweisen, wie es z. B. bei den Sialinsäuren der Fall ist. Diese stark abgewandelten Zucker tragen nicht nur eine »COOH-Gruppe«, sondern noch weitere Modifikationen. Sie sind ein wichtiger Baustein der Zuckermoleküle auf der Oberfläche unserer Zellen.

geht und was nicht. Hier ist wieder die Nährwertabelle von Lebensmitteln ein guter Ausgang. Unter dem Punkt »Kohlenhydrate« ist neben dem Punkt »davon Zucker« auch die Angabe »davon mehrwertige Alkohole« zu finden. Damit sind sogenannte Zuckeralkohole gemeint. Es handelt sich hierbei um Moleküle, die fast wie ein normaler Zucker aufgebaut sind, aber anstelle des doppelt gebundenen Sauerstoffatoms eine weitere OH-Gruppe (sowie ein weiteres H) tragen. Beispiele hierfür sind zum Beispiel Sorbit oder Xylit. Auf der Lebensmittelpackung zählen die Zuckeralkohole zwar als Kohlenhydrat, nicht aber als Zucker. Manchmal werden diese modifizierten

Zucker jedoch ebenfalls als Zucker aufgefasst. So nennt man denn auch Xylit manchmal Birkenzucker.

Abgesehen von den Zuckeralkoholen gibt es noch viele weitere Möglichkeiten, den Zuckergrundbauplan mehr oder weniger stark abzuwandeln. Hier ist die Vergabe des Prädikats Zucker ebenfalls eine Ermessenssache.

Neben chemisch modifizierten Einfachzuckern kommen auch noch solche vor, die zwar die formalen Anforderungen der Grundstruktur erfüllen, aber dennoch den Rahmen der Standardzucker sprengen. So wie die Arabino-3-Hexulose,<sup>9</sup> bei der das doppelt gebundene O an einer unüblichen Stelle sitzt, oder die Sedoheptulose<sup>10</sup>



Diese Infrarotlicht-Aufnahme des Satellitenteleskop WISE (Wide-field Infrared Explorer) zeigt den jungen Doppelstern IRAS 16293-2422 in der Sternentstehungsregion Rho Ophiuchi. Das rötliche Objekt in der Mitte des kleinen Quadrats ist jener Doppelstern, bei dem in umgebenden Gaswolken der »Weltraumzucker« Glykolaldehyd festgestellt wurde.

mit ihren mehr als sechs Kohlenstoffatomen in der Kette. Es geht aber auch kürzer, bis auf zwei Kohlenstoffatome runter.

Einige werden sich noch an Schlagzeilen wie »Zucker im Weltraum« erinnern.<sup>11</sup> Das Molekül, von dem hier die Rede war (nämlich Glykolaldehyd), wird nicht allgemein als Zucker aufgefasst. Seine Summenformel passt zwar zum Kohlenhydratgrundtyp ( $C_xH_{2x}O_x$ , mit  $x = 2$ ), aber besonders strenge Zuckerdefinitionen fordern, dass mehr als eine OH- (chemisch auch Hydroxy-)Gruppe vorhanden sein muss. So auch diejenige im geläufigsten unter den deutschsprachigen Chemielexika, dem althehrwüridi-

gen Römpp: »Fachsprachlich versteht man unter *Zuckern* (Plural) org. Verb. mit einer \*Halbacetal-bildenden – Carbonyl- u. mehreren Hydroxy-Gruppen im Mol., also *Polyhydroxyaldehyde* (\*Aldosen) beziehungsweise *-ketone* (\*Ketosen).«<sup>12</sup>

Aber selbst der Römpp zeigt sich hier etwas ambivalent, denn an anderer Stelle zählt er die Biosen (von denen Glykolaldehyd der einzige Vertreter ist) zu den Monosacchariden.<sup>13</sup> So verwundert es nicht, dass Glykolaldehyd nicht selten als Zucker durchgeht.

Im Zuge der Berichterstattung über den Glykolaldehyd-Fund im Weltall vereinfacht die Verwendung des

Zucker-Begriffs nicht nur, sondern kann auch gleichzeitig eine Kernimplikation des Ganzen vermitteln. Denn die Assoziation von aus dem Lebensmittelbereich bekannten Zucker zur Bedeutung dieses Funds für Theorien zur Entstehung von Leben im Universum ist keinesfalls abwegig. Je nach inhaltlichem Zusammenhang und Zielsetzung kann es also sinnvoll sein, von »Zuckern« zu sprechen.

### **WIE WIRD ZUCKER IN DIESEM BUCH VERSTANDEN?**

Da das Thema »Zucker« umfassend angegangen wird, legen wir den Begriff recht weit aus und verstehen Zucker zumeist im weiteren Sinne als Synonym zu Sacchariden oder Kohlenhydraten. Ganz durchgängig haben wir diese Benennung dann aber doch nicht durchziehen können. Geht es um Zucker aus Rohr und Rübe, meint Zucker die klassische Saccharose. Dies ist unter anderem der Tatsache geschuldet, dass es keinen wirklich guten Trivialnamen für die Saccharose gibt. Sie heißt auch Rohr- oder Rübenzucker, kommt aber nicht nur dort vor. Der Haushaltszucker wird nicht nur im Haushalt verwendet und den Streuzucker gibt es nicht nur zum Streuen, sondern auch als Hut, Würfelzucker etc. Auch bei Lebensmitteln sprechen wir hauptsächlich von Kohlenhydraten mit Zuckern als einer Teilmenge davon. Hätten wir statt den hier etablierten Kohlenhydraten von Zuckern oder auch nur Zuckermolekülen gesprochen, wären Missverständnisse vorprogrammiert. Ansonsten gilt aber der weitgefaste Zucker-Begriff.

### **WAS MACHT ZUCKER BESONDERS?**

Ein Prinzip vieler Biomoleküle ist bei den Zuckern besonders anschaulich. Eine kleine Änderung der Molekülstruktur hat große Auswirkungen auf die biologische Wirksamkeit. Insbesondere ist hier das komplexe Themenfeld der sogenannten Stereoisomere gemeint. Das sind Moleküle, bei denen zwar die gleichen Atome in gleicher Reihenfolge miteinander verknüpft sind, sich aber dennoch in ihrer räumlichen Struktur unterscheiden. An dieser Stelle soll es genügen festzustellen, dass, wann immer vier unterschiedliche Reste an einem C hängen, die Anordnung dieser Reste festgelegt ist. Darum sind in der symbolischen Darstellungsweise auf Seite 25 H-C-OH bzw. HO-C-H nicht frei drehbar. Ob ein einzelnes OH nach links oder rechts zeigt, macht hier bereits den Unterschied zwischen zwei verschiedenen Zuckern aus.

Dieses Prinzip des kleinen Unterschieds mit großer Wirkung setzt sich auch bei der Verbindung mehrerer Zuckerbausteine fort. Die gleichen zwei Traubenzuckermoleküle schmecken für uns als  $\alpha$ -1,4-verknüpfter Zweifachzucker süß, bei  $\beta$ -1,6-glykosidischer Bindung dagegen bitter.

Liegt eine glykosidische Bindung in einer Weise vor, die an beiden Partnerzuckern die für die Ringbildung und -öffnung notwendige Stelle in der Ringform fixiert, führt dies zu einem weniger reaktionsfreudigen Zucker. Man spricht chemisch dann von nicht-reduzierenden Zuckern, zu denen neben Trehalose auch die vertraute Saccharose zählt. Die weniger starke Reaktivität prädestiniert diese Zucker dazu, als Transportform für Zucker zu dienen. Sei es in der Körperflüssigkeit von Insekten oder in den Leitbündeln der Pflanzen.

Anschaulich wird die Folge eines kleinen Unterschieds in der Art der Bindung auch beim Vergleich der Polysaccharide Stärke und Zellulose. Beide sind aus Traubenzucker aufgebaut, der an den Positionen 1 und 4 miteinander verknüpft ist. Die Ausrichtung dieser Verknüpfung ist jedoch entgegengesetzt,  $\alpha$  bei der Stärke und  $\beta$  bei der Zellulose. Menschliche Enzyme können nur die Verbindung der Stärke spalten, nicht jedoch die anders ausgerichtete Verbindung der Traubenzuckerketten der Zellulose. Dies hat zur Folge, dass Stärke in unserer Nahrung ein leicht zugänglicher Energielieferant ist, während Zellulose einen unverdaulichen Ballaststoff darstellt.

Andere wichtige Biomoleküle (Proteine und Nukleinsäuren; Lipide weniger) bilden zwar ebenso sehr große Strukturen, bei den Zuckern kommen aber noch zwei Besonderheiten hinzu. Während alle bekannten Lebewesen die gleichen Bausteine für Proteine und Nukleinsäuren verwenden, variieren die Zuckerbausteine unterschiedlicher Organismengruppen teilweise erheblich.<sup>14</sup> Mögen auch die Zuckermoleküle des menschlichen Körpers »nur« aus einem Satz von etwa zehn verschiedenen Einfachzuckern zusammengesetzt sein, verfügen Bakterien über einen deutlich größeren »Zuckerbaukasten«.<sup>15</sup>

Noch entscheidender als die Anzahl der verbaubaren Einfachzucker ist allerdings die Tatsache, dass zusammengesetzte Zuckermoleküle Verzweigungen und Seitenketten ausbilden können. Proteine und DNS bilden dagegen als Primärstruktur nur langweilige, auf stets gleiche Weise verknüpfte Ketten aus. Darum kommen bei den Zuckern besonders komplex aufgebaute, vielfältige Mole-

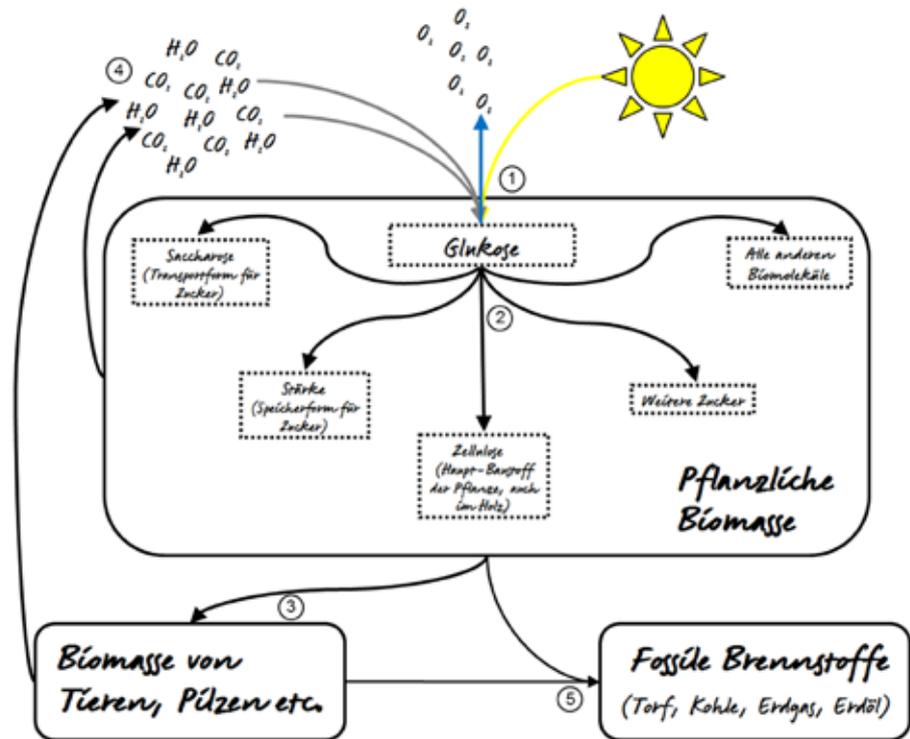
1. Mittels Photosynthese produzieren Pflanzen aus Lichtenergie, Kohlenstoffdioxid und Wasser den Zucker Glukose. Als Abfallprodukt entsteht dabei Sauerstoff.

2. Die Glukose ist dann der Grundbaustein für andere Zuckerverbindungen und über weitere Umwandlung letztlich auch die Basis für sämtliche anderen Biomoleküle.

3. Von der so produzierten pflanzlichen Biomasse ernähren sich andere Lebewesen und bauen so ihre eigene Biomasse auf.

4. Werden Biomoleküle zum Energiegewinn abgebaut, werden die Ausgangsstoffe der Photosynthese wieder frei.

5. Selbst fossile Energieträger sind letztlich nichts anderes als die uralten Reste der von Pflanzen aus Zucker gebauten Biomasse ...



küle zustande. Außerdem ist, im Gegensatz zu DNS und Proteinen, nirgendwo in der Zelle ein »Bauplan« als direkte Vorlage gespeichert. Je nach Verfügbarkeit der einzelnen Zuckerbausteine, dem Vorkommen der zuckerkettenknüpfenden Proteine, anderen Stoffwechselvorgängen in der Zelle, Zelltyp und vielen weiteren Faktoren können unterschiedliche Zuckerketten zustande kommen. Darum kann man viel über eine Zelle erfahren, indem man ihre Zuckerketten untersucht.

### OHNE ZUCKER KEIN LEBEN?

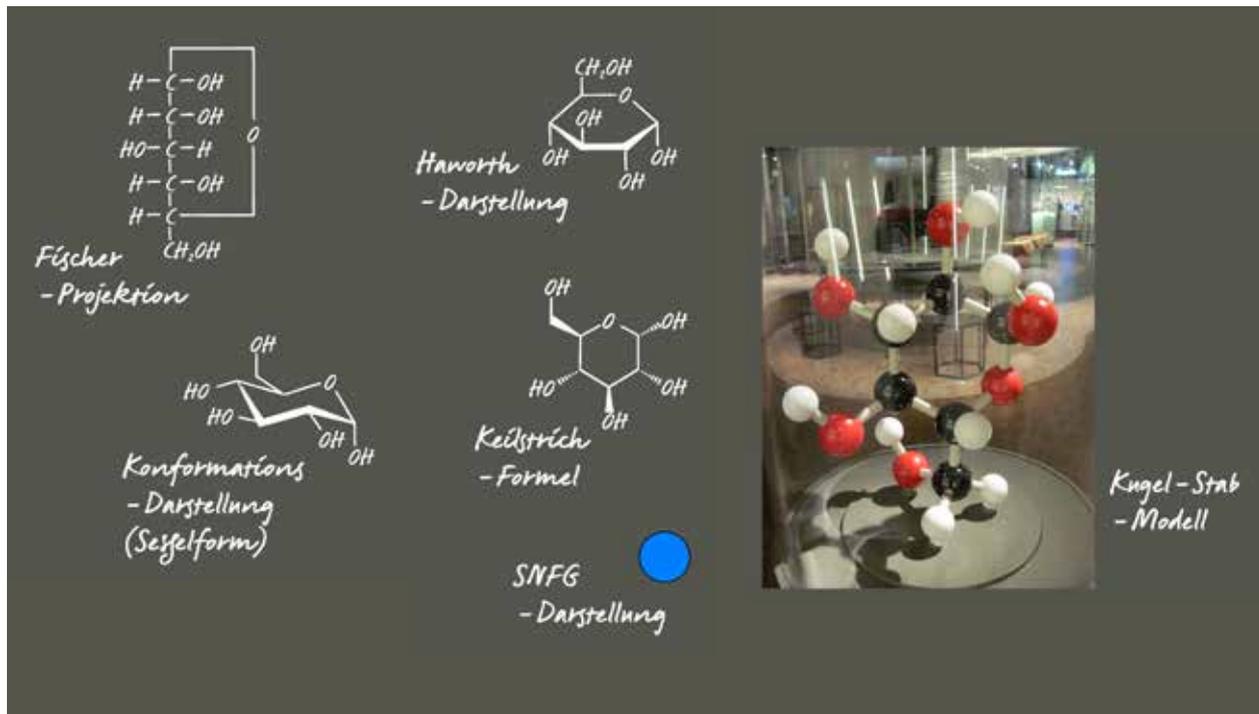
Dieser strukturellen Vielseitigkeit der Zucker ist es zu verdanken, dass sie in der Natur eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen einnehmen. Oft gehen sie auch Verbindungen mit anderen Biomolekülen ein und bilden auf diese Weise Glykoproteine, Glykolipide oder auch die vielen arzneilich relevanten Pflanzenglykoside. Die meisten der Proteine in unserem Körper sind mehr oder weniger stark durch (auf unterschiedliche Weise) angehängte Zuckerketten »verzuckert« und alle unsere Zellen tragen auf ihrer Außenhülle einen »Pelz« aus verschiedenen Zuckermolekülen. Die Nukleinsäuren haben sogar einen Zucker als festen Bestandteil, beispielsweise die Desoxyribose in der DNS (Desoxyribonukleinsäure).<sup>16</sup> Selbst in der bekannten Funktion als Nahrungsbestand-

teil nehmen Zucker eine zentrale Rolle ein, sowohl im Stoffwechsel der meisten Lebewesen als auch im ökologischen Nahrungsnetz. Durch die Photosynthese werden aus anorganischem  $\text{CO}_2$  Zuckermoleküle, aus denen dann letztlich alle anderen Biomoleküle entstehen. Ein großer Teil der Biomasse auf Erden besteht sogar direkt aus Zuckerverbindungen. Man denke an die Zellulose der Pflanzen und das Chitin von Insekten und ihren außenskeletttragenden Verwandten.

Man kann also feststellen, dass Leben (zumindest in der uns bekannten Form) nicht ohne Zuckermoleküle auskommt. Diese Aussage trifft allerdings auch auf Lipide, Proteine und Nukleinsäuren zu. Letztlich braucht es das Zusammenspiel all dieser, um Lebensvorgänge am Laufen zu halten.

Da in der Biologie das Fehlen von Ausnahmen die Ausnahme ist (was die Regel wiederum bestätigt), gibt es immer wieder Fälle, wo es auch ohne Zuckermoleküle funktioniert.

Beispielsweise erfolgt in der Natur die Erzeugung von Biomasse aus anorganischem  $\text{CO}_2$  zumeist über die Erzeugung von Zuckermolekülen, so auch in dem wichtigsten Beispiel der Photosynthese der Pflanzen, Algen und Cyanobakterien. Aber es existieren durchaus Stoffwechselwege (insbesondere in Mikroorganismen), die  $\text{CO}_2$



Die vielen Gesichter der Glukose: Das genau gleiche Zuckermolekül, die  $\alpha$ -D-Glucopyranose, ist hier in fünf unterschiedlichen Darstellungsvarianten zu sehen. Außerdem noch die extra simple Form der D-Glucopyranose aus der »Symbol Nomenclature for Glycans« nach Varki et al. (2015), mit der Glykobiologen komplex aufgebaute Glykane auf übersichtliche Weise darstellen können.

ohne den Schritt über Zucker in Biomasse umwandeln. Damit ist der Anspruch der Zucker als Startpunkt für alle Biomoleküle kein völlig absoluter.

### WOZU »ALLES ZUCKER!«?

Schon relativ bald nach dem Aufkommen der Zuckerchemie durch Emil Fischer und Edmund Oskar von Lippmann traten Gene und Proteine stärker in den Fokus der biochemischen Forschung und stahlen gewissermaßen den Zuckern das Rampenlicht.<sup>17</sup> Dies mag auch der Tatsache geschuldet sein, dass der komplizierte Aufbau zusammengesetzter Zucker und die Variabilität der Einfachzucker deren Erforschung nicht gerade vereinfacht. Durch die Weiterentwicklung von Technik und Expertise ist diese Hürde derzeit im Begriff niedriger zu werden.<sup>18</sup>

Gerade in der medizinischen Forschung setzt sich vermehrt die Erkenntnis durch, dass ohne die Betrachtung der Zuckervielfalt kein vollständiges Bild gefasst werden kann und zuckermolekülbasierte Ansätze für Diagnose und Therapie ein großes Potenzial bieten. Außerdem

führt in Zeiten, in denen immer dringender Alternativen zu Erdöl und Co. in Form nachwachsender Rohstoffe benötigt werden, derzeit noch kein Weg an Zuckern vorbei. Wer Biomasse sagt, muss auch Zucker sagen.

Viele zukunftsgerichtete Technologien ranken sich um Zucker. Anhand der Zucker lassen sich viele für unsere heutige Zeit hochrelevante Themen darstellen.

Derzeit in den Medien wohl das dominanteste Thema dürften Zucker in Lebensmitteln sein, oft mit negativer Konnotation und Bezug zu verschiedenen Zivilisationskrankheiten. Aber auch die »klassischen« Themen mit den kulturellen und technologischen Hintergründen von Saccharose-Produktion und Konsum verdienen eine weitere Betrachtung über die Traditionspflege hinaus. Was alles hinter diesem vermeintlich simplen, alltäglichen Verbrauchsgut steht, vermag durchaus zu verblüffen. Auch der heutige »Fabrikzucker« kommt aus einer Pflanze und wird durch Technik und menschliche Arbeit gewonnen. Die Erläuterung dieses Zusammenhangs verdeutlicht die enge Verflechtung von Natur, Mensch und Technik.

# »Zucker« in der Übersicht

## »Zucker« kann verschiedene Bedeutungen haben.

- ▶ Oft meint »Zucker« den speziellen Zucker Saccharose. Das ist der im Haushalt übliche Zucker, den man kiloweise im Supermarkt kaufen kann.
- ▶ Aber es gibt noch eine Menge andere Zucker, die zusammen eine ganze Klasse chemischer Verbindungen bilden. Oft werden auch von der üblichen Zuckerstruktur mehr oder weniger stark abweichende Moleküle dieser Klasse zugewiesen.
- ▶ In der Chemie finden verschiedene Definitionen für »Zucker« Anwendung. Im weiteren Sinne kann man »Zucker« als Synonym für »Kohlenhydrate«, »Saccharide« verwenden. Im engeren Sinne kann man »Zucker« als kleinere Kohlenhydratmoleküle ansehen, die zumeist einen süßen Geschmack hervorrufen.

## Einfachzucker können sich zu unterschiedlichen größeren (und teilweise komplex aufgebauten) Zuckermolekülen zusammenschließen, z. B.:

- ▶ Saccharose aus je einem Baustein Traubenzucker (Glukose) und Fruchtzucker (Fruktose).
- ▶ Milchzucker (Laktose) aus je einem Baustein Traubenzucker und Schleimzucker (Galaktose).
- ▶ Malzzucker (Maltose) aus zwei Traubenzucker-Bausteinen.
- ▶ Stärke und Zellulose aus vielen Traubenzucker-Bausteinen.
- ▶ Chitin aus vielen Bausteinen einer Aminozucker-Variation des Traubenzuckers (N-Acetylglucosamin)

## Die Vielfalt der Zucker kann auf mannigfaltige Weise geordnet, benannt und dargestellt werden.

- ▶ Darum gibt es viele Namen für Zucker. Oft, aber nicht immer, enden sie auf »-ose«.
- ▶ Viele Zuckermoleküle haben einen ganz ähnlichen chemischen Aufbau und unterscheiden sich dennoch massiv in ihrer biologischen Wirkung.
- ▶ Ein und dasselbe Zuckermolekül kann auf unterschiedliche Weise symbolisch dargestellt werden.

## Zucker sind, als Grundbausteine der Kohlenhydrate, neben Fetten/Ölen (Lipiden) und Eiweißen (Proteinen) wesentlicher Bestandteil unserer Nahrung.

- ▶ Zucker im engeren Sinne (wie z.B. Saccharose oder Glukose) sind aber keineswegs essenziell. Unser Körper kann die, als Blutzucker zirkulierende, Glukose ebenso durch Spaltung größerer Kohlenhydratmoleküle (wie Stärke) gewinnen. Notfalls kann die dringend benötigte Glukose sogar aus anderen Nahrungsbestandteilen bzw. Körpervorräten hergestellt werden.

## Zusammen mit Lipiden, Proteinen und Nukleinsäuren (als Träger der Erbinformation) gehören Zuckerverbindungen zu den wichtigsten, für alle Lebewesen unverzichtbaren, Biomolekülen.

- ▶ Zucker, insbesondere in Form von Glukose, sind von zentraler Bedeutung sowohl für den Stoffwechsel individueller Organismen als auch auf globaler Ebene für den Kohlenstoffkreislauf. Die Photosynthese wandelt in großem Maßstab CO<sub>2</sub> in Zucker um.

## Zucker können hochkomplexe Moleküle bilden und mit anderen Biomolekülen intensiv interagieren. Das macht sie biologisch (und damit auch medizinisch) mindestens genauso interessant wie Gene und Proteine.

# Anhang

## ANMERKUNGEN

### WAS SIND ZUCKER UND WARUM SIND SIE WICHTIG?

- 1 Saft gegen Suff (1953).
- 2 Psicose ist kalorienarm, da der menschliche Körper den Stoff kaum verwerten kann.
- 3 »Allulose 101« Fact Sheet (2017); der Name entsteht ausgehend von Allose, gedanklich als Ketose (durch die Endung »-ulose«).
- 4 Auch hier wird vereinfachend gerne der Singular, also »Kohlenhydrat«, »Fett«/»Öl« und »Eiweiß«, verwendet.
- 5 Dies ist oft bei der symbolischen Darstellung von Zuckermolekülen wiederzufinden (wenn nicht gleich der klassische Zuckerkwürfel genommen wird).
- 6 Belitz et al. 2009, S. 259f.
- 7 Bereits hier passt die  $C_xH_{2x}O_x$ -Summenformel nicht mehr genau, denn bei jedem Anknüpfen eines weiteren Zuckers wird jeweils ein Wassermolekül abgespalten. Der Chemiker spricht hier von einer Kondensationsreaktion. Zusammengesetzte Zucker gehören damit genau genommen zu den Polykondensaten.
- 8 Vgl. Spektrum Akademischer Verlag (2017).
- 9 Über diesen Zucker als Zwischenprodukt erschließen sich manche Mikroben aus Formaldehyd eine Nahrungsquelle (Kemp 1974).
- 10 Sie ist ein wichtiges Zwischenprodukt in Stoffwechselwegen zur Zuckerproduktion und Umwandlung.
- 11 Hollis et al. 2000 und Jørgensen et al. 2012.
- 12 Falbe & Regitz 1992, S. 5164.
- 13 Falbe & Regitz 1989, S. 428.
- 14 Bertozzi & Sasisekharan 2009.
- 15 Seeberger 2009.
- 16 Wenn man es auf die Spitze treiben wollte, könnte man sogar feststellen, dass viele Lipide standardmäßig einen Zuckerbestandteil haben. Denn der Zuckeralkohol Glycerol, besser bekannt als Glycerin, bildet oft die Basisstruktur, an die Fettsäuren und weitere Komponenten angehängt werden.
- 17 Hudak & Bertozzi 2014.
- 18 National Research Council (US) Committee on Assessing the Importance and Impact of Glycomics and Glycosciences 2012.

### PANDORAS ZUCKERDOSE ODER EINE SYSTEMISCHE GESCHICHTE DES ZUCKERS

- 1 Robischon 2006.
- 2 Mostert et al. 1980.
- 3 Gross 1958.
- 4 Heinrich 1992.
- 5 Small 2013, S. 656.
- 6 Tate 1973.
- 7 Olson & Bourne 1905, S. 51.
- 8 Chapman 1916.
- 9 Campbell 1999, S. 146.
- 10 Pedanios Dioskurides Materia medica lib. II, cap.104.
- 11 Crane 2013, S. 99f.
- 12 Hitakonanulaxk 1994, S. 97.
- 13 Müller 2000.
- 14 Ulrich 1930.
- 15 Becker 1818, S. 93–100.
- 16 Herodot, Buch 7, Kapitel 31, Satz 1.
- 17 Gentry 2004, S. 8.
- 18 Franke et al. 2012, S. 111.
- 19 Vasey 1992, S. 92.
- 20 Hamilton & Murphy 1988.
- 21 Redhead 1989, S. 7.
- 22 Kovoov 1983.
- 23 González et al. 2009.
- 24 Dransfield 2008.
- 25 Babu 1990, S. 31.
- 26 Burne 1914.
- 27 Feltoe 1991, S. 11.
- 28 Warner 1962.
- 29 Needham et al. 1996, S. 56.
- 30 Galloway 1989, S. 23.
- 31 Barnes 1974.
- 32 Goudswaard 2005, S. 108.
- 33 Von Lippmann 1929.
- 34 Galinier 1990.
- 35 Schaal 2016.
- 36 Lyback 1925, S. 199.

### DAS INSTITUT FÜR ZUCKERINDUSTRIE IN BERLIN

- 1 Herzfeld 1904, S. 3.
- 2 Schaal 2009, S. 142.
- 3 Bruhns 1997, S. 14f.
- 4 Olbrich 1989, S. 33.

- 5 Von Lippmann 1900, S. 1.
- 6 Lange 1856, S. 46–58.
- 7 Büter 1999, S. 14.
- 8 Wikipedia (2016).
- 9 Ebd.
- 10 Von Lippmann 1925, S. 116.
- 11 Stieda 1928, S. 6f.
- 12 Der Zucker 1925.
- 13 Grotkaß 1927, S. 33.
- 14 Vgl. Baxa & Bruhns 1967, S. 150.
- 15 Bécus 1874, S. 54ff.
- 16 Baxa 1973, S. 168f.
- 17 Büter 1999, S. 16.
- 18 Von Salviati 1860, S. 126ff.
- 19 Herzfeld 1904, S. 3.
- 20 Herzfeld 1917, S. 2.
- 21 Sewering 1933, S. 193.
- 22 Büter 1999, S. 68.
- 23 Wrede 1885, S. 53.
- 24 Ruske 1979, S. 245.
- 25 Büter 1999, S. 71.
- 26 Schreiben von Carl Scheibler, zitiert nach: Herzfeld 1917, S. 5.
- 27 Rede von Alexander Herzfeld bei der Institutseröffnung (1904), zitiert nach: Die Deutsche Zuckerindustrie, Wochenblatt für Landwirtschaft, Fabrikation und Handel GmbH, hrsg. v. Dr. Albert Bartens, Berlin, 13.5.1904, 19. Jg., H. 20, S. 888.
- 28 Mintz 1987, S. 219.
- 29 General-Versammlung des Vereins, Frage 4 (1897), S. 711.
- 30 Merki 1993, S. 55.
- 31 Siehe auch Olbrich 2013.
- 32 B. 1932, S. 46.
- 33 Schapitz 1986, S. 46ff.
- 34 Bruhns 2004, S. 5.
- 35 Büter 1999, S. 33.
- 36 Centralblatt für die Zuckerindustrie 1913/1914, S. 404f.
- 37 Schnier & Schulz-Greve 1990, S. 109.
- 38 Bruhns 2004, S. 16.
- 39 Ebd., S. 20.
- 40 Olbrich 2016, S. 10ff.
- 41 Rede von Lippmann bei der Einweihungsfeier des Instituts für Zuckerindustrie (Zeitschrift des Vereins der Deutschen Zucker-Industrie 1904 S. 122f.)
- 42 Herzfeld 1917, S. 25.

## QUELLENVERZEICHNIS

### WAS SIND ZUCKER UND WARUM SIND SIE WICHTIG?

Allgemeine einführende Texte sind fett hervorgehoben. Für einen umfassenden modernen Überblick der Zuckerchemie auf Deutsch sei besonders Kapitel 7 der deutschen Ausgabe des »Lehninger« (Nelson & Cox 2009) empfohlen.

Spektrum Akademischer Verlag (Hrsg.):

Lexikon der Ernährung. Zucker: <http://www.spektrum.de/lexikon/ernaehrung/zucker/9531> (Stand 24.2.2017).

»Allulose 101« Fact Sheet: <http://www.dolciaprima.com/sites/dolciaprima/files/media/Allulose101.pdf> (Stand 13.02.2017).

Belitz, H. D./Grosch, W./Schieberle, P. (2009): Food Chemistry. 4. erweiterte und neubearbeitete Auflage, Berlin/Heidelberg.

Bertozzi, C. R./Sasisekharan, R. (2009): Chapter 48 Glycomics, in: Varki, A./Cummings, R. D./Esco, J. D./Freeze, H. H./Stanley, P./Bertozzi, C. R./Hart, G. W./Etzler, M. E. (Hrsg.): Essentials of Glycobiology, 2. Auflage, Cold Spring Harbor, S. 679–689.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.) (2007): **Die Zukunft ist süß. Möglichkeiten der Glykobiotechnologie**, Bonn, Online verfügbar unter <http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/Hintergrund/themendossiers,did=67526.html> (Stand 03.01.2014).

Doherty, C. (Hrsg.) (2015): **A roadmap for Glycoscience in Europe**, Online verfügbar unter <http://www.egsf.org/2015/final-version-of-our-roadmap-for-glycoscience-in-europe-is-now-available> (Stand 09.02.2017).

Falbe, J./Regitz, M. (Hrsg.) (1989): A–Cl (= Römpf Chemie Lexikon, Bd. 1), 9. erweiterte und neubearbeitete Auflage, Stuttgart/New York.

Falbe, J./Regitz, M. (Hrsg.) (1992): T–Z (= Römpf Chemie Lexikon, Bd. 6), 9. erweiterte und neubearbeitete Auflage, Stuttgart/New York.

Georg Thieme Verlag KG (Hrsg.): RÖMPP: <https://roempp.thieme.de> (Stand 10.02.2017).

Hollis, J. M./Lovas, F. J./Jewell, P. R. (2000): Interstellar Glycolaldehyde: The First Sugar, in: The Astrophysical Journal, 540. Jg., H. 2, S. L107–L110.

Hudak, J. E./Bertozzi, C. R. (2014): Glycotherapy: New Advances Inspire a Reemergence of Glycans in Medicine, in: Chemistry & Biology, 21. Jg., H. 1, S. 16–37.

Jørgensen, J. K./Favre, C./Bisschop, S. E./Tyler, B. L./van Dishoeck, E. F./Schmalzl,

M. (2012): Detection of the Simplest Sugar, Glycolaldehyde, in a Solar-type Protostar with ALMA, in: The Astrophysical Journal Letters, 757. Jg., H. 1, S. L4.

Kemp, M. B. (1974): Hexose Phosphate Synthetase from *Methylococcus capsulatus* Makes D-arabino-3-Hexulose Phosphate, in: Biochemical Journal, 139. Jg., H. 1, S. 129–134.

National Research Council (US) Committee on Assessing the Importance and Impact of Glycomics and Glycosciences/National Research Council (US) Board on Chemical Sciences and Technology/National Research Council (US) Board on Life Sciences (2012): **Transforming Glycoscience: A Roadmap for the Future**. Washington D.C.

Nelson, D. L./Cox, M. M. (2009): **Lehninger Biochemie**, 4. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Übersetzung der 5. amerikanischen Auflage, korrigiert, Berlin/Heidelberg.

Saft gegen Suff (1953), in: Der Spiegel, 22, S. 31 ff.

Seeberger, P. H. (2009): Chemical glycobiology: why now? in: Nature Chemical Biology, 5. Jg., H. 6, S. 368–372.

Varki, A./Cummings, R. D./Aebi, M./Packer, N. H./Seeberger, P. H./Esco, J. D. et al. (2015): Symbol Nomenclature for Graphical Representations of Glycans, in: Glycobiology, 25. Jg., H. 12, S. 1323 f.

Varki, A./Cummings, R. D./Esco, J. D./Freeze, H. H./Stanley, P./Bertozzi, C. R./Hart, G. W./Etzler, M. E. (Hrsg.) (2009): **Essentials of Glycobiology**, 2. Auflage, Cold Spring Harbor.

### PANDORAS ZUCKERDOSE ODER EINE SYSTEMISCHE GESCHICHTE DES ZUCKERS

Babu, C. N. (1990): Sugarcane, New Delhi.

Barnes, A. C. (1974): The Sugar Cane. The World Crop Series, London.

Becker, J. H. (1818): Darstellung der Nahrungsmittel der Menschen nach alphabetischer Ordnung (= Versuch einer allgemeinen und besonderen Nahrungsmittelkunde, Bd. 2), 1. Auflage.

Burne, C. S. (1914): Handbook of Folklore, London.

Campbell, P. D. (1999): Survival Skills of Native California, Salt Lake City.

Chapman T. A. (1916): XI. What the larva of *Lycaena arion* L. does during its last instar, in: Transactions of the Royal Entomological Society of London, S. 291–297.

Crane, E. E. (2013): The World History of Beekeeping and Honey Hunting. New York.

Dransfield, J. (2008): Palm & Cycad Society of Australia: *Paschalococos dispersa*: <http://www.pacsoa.org.au/palms/Paschalococos/dispersa.html> (Stand: 08.03.2017).

Feltoe, R. (1991): Redpath: The History of a Sugar House, Toronto.

Foster, W. L./Tate, J. jr. (1966) The activities and coactions of animals at sapsucker trees, in: Living Bird, H. 5, S. 87–113.

Franke, E./Lieberei, R./Reisdorff, C. (2012). Nutzpflanzen, 8. Auflage, Stuttgart.

Galinier, J. (1990): La Mitad del mundo: Cuerpo y cosmos en los rituales otomíes., México.

Galloway, J. H. (1989): The Sugar Cane Industry: An Historical Geography from Its Origins to 1914, Cambridge/New York/New Rochelle/Melbourne/Sydney.

Gentry, H. S. (2004): Agaves of Continental North America, Tucson.

González, L. A./Navarro C., R. M./Bustamante Araya, R. O./Herrera M., M. A. /Toral Ibáñez, M. (2009): Ecology and Management of the Chilean Palm (*Jubaea chilensis*): History, Current Situation and Perspectives, in: Palms 53. Jg, H. 2, S. 68–74.

Goudswaard, N. E. (2005): The Begak (Ida'an) language of Sabah, Utrecht.

Gross, A. O. (1958): Life History of the Bananaquit of Tobago Island, in: The Wilson Bulletin 70. Jg., H. 3, S. 257–279.

Hamilton, L. S./Murphy D. H. (1988): Use and Management of Nipa Palm (*Nypa fruticans*, Arecaceae): A Review, in: Economic Botany, 42. Jg., H. 2, S. 206–213.

Heinrich, B. (1992): Maple sugaring by red squirrels, in: Journal of Mammalogy 73. Jg., H. 1, S. 51–54.

Herodot, Buch 7, Kapitel 31, Satz 1.

Hitakonanolaxk (1994): The Grandfathers Speak: Native American Folk Tales of the Lenapé People. International folk tales, New York.

Kovoor, A. (1983): The Palmyrah palm: potential and perspectives (= FAO Plant Production and Protection Paper No. 52), Rom.

Lyback, J. R. M. (1925): Indian Legends, Chicago.

Mostert, D. P./Siegfried, W. R./Louw, G. N. (1980) Protea nectar and satellite fauna in relation to the food requirements and pollinating role of the Cape sugarbird, in: South African Journal of Science, 76. Jg., H 9. S. 409–412.

Müller, H. H. (2000): Zuckerspendender Ahorn im Berliner Tiergarten, in: Berlinische Monat Needham, J./Daniels, C./Menzies, N. K. (1996): Agro-Industries and Forestry (= Science and Civilisation in China, Bd. 6: Biology and Biological Technology, Teil 3), Cambridge.

## BILDNACHWEIS

- ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/L. Calçada (ESO) & NASA/JPL-Caltech/WISE Team: 29
- Achard, Franz Carl (1809): Die europäische Zuckerfabrikation aus Runkelrüben, Leipzig, Tafel 10: 80
- Ausstellungsgrafik (Alles Zucker!): 98, 132/133, 165–168; angepasst durch René Spierling: 25, 28
- BMU/FI Biopos e. V., Deutscher Bioraffineriekongress 2007: 194–198; Fotos: Nature Works LLC: 199
- Bauer, Scott (USDA Agricultural Research Service, Bugwood.org): 144 r., 149 r., 144 l. (Bildbearbeitung von Jay Neitz)
- Berger, Joseph (Bugwood.org): 41 u.
- CELLINK AB (mit freundlicher Genehmigung): 162
- Ciesla, William M. (Forest Health Management International, Bugwood.org): 41 o.
- Cranshaw, Whitney (Colorado State University, Bugwood.org): 40 l.
- Dictionnaire Technologique, Arts Chimiques (1835), Brüssel: 82 o.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): 172 o. l., 208
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI): 172 u. r.
- FAO, IEA, U.S. Geological Survey, Global -Carbon Project: 172 o. r.
- Forschungsplattform-BiNa 2016: 229 u.
- Fraunhofer CBP, KIT: 175
- Fraunhofer IAP: 180, 181, 185–187; Budde, Till: 183; Okulla, Armin: 189
- Grouven, Hubert (1866): Salzmünde. Eine landwirtschaftliche Monographie, Berlin: 85
- Hirth & Unkelbach: 173 l., 176 u., 177
- Hesselein, Chazz (Alabama Cooperative Extension System, Bugwood.org): 38 m.
- IfBB 2016: 228 r., 229 o., 229 m., 235 u., 236
- Kaltschmitt, M./Hartmann, H./ Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg: 209, 211; angepasst durch Hülsmann, Neuling, Kaltschmitt: 203, 204, 206
- Kelley, Ronald S. (Vermont Department of Forests, Parks and Recreation, Bugwood.org): 38 r.
- KIT: 176 o.
- Koesling, Volker: 191
- KWS SAAT SE: 68, 75 l. o./u.; Archiv: 66, 67, 69, 71, 74, 75 r., 76
- Lehmann, Volkert, Vorwerg nach No & Meyers, 1997: 182
- Mielke, Manfred (USDA Forest Service, -Bugwood.org): 145
- Mudersbach et al.: 235 o., 237; nach Detzel & Krüger 2006: 233–234; nach Endres & Siebert-Raths 2009: 228 l.; nach Stichnothe 2014: 231
- Museum Haldensleben: Johann Gottlob Nathusius, Ölgemälde von Johann Friedrich Hesse, 1817, Leihgabe: Land Sachsen-Anhalt: 51
- NEUROtiker, Wikimedia Commons: 142
- OBrien, Joseph (USDA Forest Service, -Bugwood.org): 36
- Office of Biological and Environmental Research of the U.S. Department of Energy Office of Science. (science.energy.gov/ber/), übersetzt durch Herausgeber: 202
- ÖNB/Wien: 65 (Cod. Med. gr. 1, fol. 302r: Wiener Dioskorides; Byzanz, um 512: Rote Bete (Rote Rübe))
- Organovo: 163
- Österreichisch-ungarische Zeitschrift für Zuckerindustrie und Landwirtschaft (1888) 17. Jg., S. 129–145: 87 l.
- Parry, David / PA Wire: 164
- Quick, J.S. (Bugwood.org): 136
- Roadmap Bioraffinerien, BMEL: 173 r., 174
- Rohrlach, Sylke: 37
- Schweizer Zucker AG, Werk Aarberg: 117, 118
- SDTB: Kirchner, Clemens: 10–13, 15–20, 95, 107, 108, 154 r. Umschlagrückseite o. (3), Umschlagrückseite u.m.; Historisches Archiv, Bestand Zucker-Museum: 42, 44–46, 49–50, 53, 56–57, 59–61, 63, 72–73, 79, 81 o., 82 u., 91, 94, 96–97, 99–102, 109, 111, Umschlagrückseite l.
- Seeberger, Peter H.: 153, 155 l.
- Siampouli, Konstantina (Aristotle University of Thessaloniki): 35
- SiW & Wurzener Land e. V.: 81 u.
- Solomon, James (USDA Forest Service, -Bugwood.org): 38 l.
- Spierling, René: 27; mit veränderten Ausstellungsgrafiken (Alles Zucker!): 31, 32
- Stammer, Karl (1887): Lehrbuch der Zuckerfabrikation. 1. Teil, 2. Auflage, Braunschweig: 89
- Südzucker AG, Zentralarchiv Obrigheim: 113 (Foto Ft\_005\_005), 114 (Foto Of\_001\_020), 115 (Foto Ha\_165\_027)
- Technikmuseum Magdeburg: 54
- Technisches Museum Wien, Archiv: 110
- UFZ, Gezeichnet von Natalie Dombois im Auftrag: 215, 217–224
- USDA ARS Photo Unit (USDA Agricultural Research Service, Bugwood.org): 149 l.
- USDA Forest Service – Northeastern Area (USDA Forest Service, Bugwood.org): 43
- USDA Forest Service, Northern and Intermountain Region (USDA Forest Service, Bugwood.org): 39
- Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): 172 u. l.
- Walker, E. Bradford (Vermont Department of Forests, Parks and Recreation, Bugwood.org): 40 r.
- Walkhoff, Louis (1872): Der praktische Rübenzuckerfabrikant und Raffinadeur. 2. Teil., 4. Aufl., Braunschweig, S. 250: 86
- Karl Weinrich & Co. (1898): Zuckerfabrik -Syrowatka 1830–1898. Festschrift: 87 r.
- Wirtschaftliche Vereinigung Zucker e. V.: 121, 123, 127, 128, Umschlagrückseite u. r.
- Zuckerraffinerie Halle, Archiv: 83, 90
- Details zur Amylasegrafik auf Seite 148: Darstellung von ISMD (N. Ramasubbu, V. Paloth, Y. Luo, G.D. Brayer, M.J. Levine (1996) Structure of human salivary alpha-amylase at 1.6 Å resolution: implications for its role in the oral cavity. Acta Crystallogr., Sect. D 52: 435–446) erstellt mit NGL Viewer (A.S. Rose, A.R. Bradley, Y. Valasatava, J.M. Duarte, A. Prlić und P.W. Rose. Web-based molecular graphics for large complexes. ACM Proceedings of the 21st International Conference on Web3D Technology (Web3D '16): 185, 186, 2016. doi:10.1145/2945292.2945324; A.S. Rose und P.W. Hildebrand. NGL Viewer: a web application for molecular visualization. Nucl Acids Res (1. Juli 2015) 43 (W1): W576–W579 am 29. April 2015 erstmals online veröffentlicht. doi:10.1093/nar/gkv402).
- Sollten trotz sorgfältiger Nachforschungen nicht alle Rechteinhaber korrekt ermittelt worden sein, so bitten wir um Mitteilung an den Verlag.

## DIE AUTOREN

**Albrecht, Stefan**, Dr.-Ing., Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung für Ganzheitliche Bilanzierung, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart

**Behnsen, Hannah**, Wissenschaftliche Mitarbeiterin Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe, Hochschule Hannover, Hannover

**Biesalski, Hans Konrad**, Prof. Dr., Leitung Institut für Biologische Chemie und Ernährungswissenschaft, Universität Hohenheim, Stuttgart

**Büter, Tanja**, Historikerin, z. Z. tätig in der Flüchtlingshilfe, Kreisvolkshochschule Norden, Ostfriesland

**Endres, Hans-Josef**, Prof. Dr.-Ing., Leitung Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe, Hochschule Hannover, Hannover

**Harnisch, Falk**, PD Dr., Leitung Arbeitsgruppe Mikrobielle Bioelektrokatalyse und Bioelektrotechnologie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig

**Herrmann, Christoph**, Prof. Dr.-Ing., Leitung Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik – Nachhaltige Produktion & Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

**Hirth, Thomas**, Prof. Dr., Vizepräsident für Innovation und Internationales, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

**Hülsmann, Theresa**, M. Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Technische Universität Hamburg, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft, Hamburg

**Kaltschmitt, Martin**, Prof. Dr.-Ing., Institutsleitung, Technische Universität Hamburg, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft, Hamburg

**Kamm, Birgit**, Prof. Dr. habil., Honorarprofessorin bzw. Key Researcher, Brandenburgische Technische Universität bzw. Kompetenzzentrum Holz GmbH, Cottbus – Senftenberg bzw. Linz

**Knüpffer, Eva**, Wissenschaftliche Mitarbeiterin Abteilung für Ganzheitliche Bilanzierung, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart

**Koch, Christin**, Dr., Wissenschaftliche Mitarbeiterin Arbeitsgruppe Mikrobielle Bioelektrokatalyse und Bioelektrotechnologie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig

**Koesling, Volker**, Dr., Leitung Naturwissenschaft und Messtechnik, Stiftung Deutsches Technikmuseum Berlin, Berlin

**Krieg, Hannes**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung für Ganzheitliche Bilanzierung, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart

**Lehmann, André**, Dr., Leitung Abteilung Fasertechnologie, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam-Golm

**Meißner, Betina**, Journalistin und Historikerin, Jena

**Mudersbach, Marina**, Wissenschaftliche Mitarbeiterin – Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe, Hochschule Hannover, Hannover

**Neuling, Ulf**, M. Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Technische Universität Hamburg, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft, Hamburg

**Otto, Marcus**, Geschäftsführer, Verein der Zuckerindustrie e. V., Bonn

**Pfeiffer, Andreas**, Prof. Dr., Direktor Abteilung Endokrinologie, Diabetes und Ernährung bzw. Leitung Abteilung Klinische Ernährung, Charité Universitätsmedizin Berlin Campus Benjamin Franklin bzw. Deutsches Institut für Ernährungsforschung Potsdam-Rehbrücke, Berlin bzw. Nuthetal

**Poehls, Kerstin**, Prof. Dr., Juniorprofessorin am Institut für Volkskunde/Kulturanthropologie, Universität Hamburg, Hamburg

**Robischon, Marcel**, Prof. Dr., Leitung FG Fachdidaktik Agrar- und Gartenbauwissenschaften, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin

**Schaal, Dirk**, Prof. Dr., Honorarprofessor für Industriekultur und Wirtschaftsarchive (zuvor Archivleiter Zentralarchiv Obrigheim), HTWK Leipzig (zuvor Südzucker AG), Leipzig

**Schulze, Christine**, Wissenschaftliche Mitarbeiterin Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik – Nachhaltige Produktion & Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

**Seeberger, Peter H.**, Prof. Dr., Direktor Abteilung Biomolekulare Systeme, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam

**Spierling, René**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter Naturwissenschaft und Messtechnik, Stiftung Deutsches Technikmuseum Berlin, Berlin

**Spierling, Sebastian**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe, Hochschule Hannover, Hannover

**Unkelbach, Gerd**, Leitung, Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP, Leuna

**Volkert, Bert**, Dr., Leitung Abteilung Lignocellulose, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam-Golm

**Vorweg, Waltraud**, Dr., ehemalige Leitung Abteilung Stärkemodifikation / Molekulare Eigenschaften, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam-Golm, im Ruhestand

**Witte, Günter**, ehemaliger Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Zentralabteilung Forschung, Entwicklung und Services (ZAFES in Obrigheim / Pfalz), Südzucker AG, Berlin, im Ruhestand

**Die den einzelnen Artikeln vorangestellten »Kurz & Knapp«-Texte basieren auf den Texten der Ausstellung »Alles Zucker!« (Kuratorenteam: Christine Keruth, Dr. Volker Koesling, René Spierling).**