

Chemische und physiologische Aspekte von Nahrungskohlenhydraten

EVA ARRIGONI, RENATO AMADÒ

Kohlenhydrate sind nicht nur die in der Natur am weitesten verbreiteten organischen Verbindungen, sondern sie spielen auch für die menschliche Ernährung eine herausragende Rolle als quantitativ wichtigste Energiequelle. Von besonderer Bedeutung sind das pflanzliche Reservopolysaccharid Stärke und die vorwiegend in Früchten vorkommenden Mono- und Disaccharide Glukose, Fruktose und Saccharose. Aber auch in der Lebensmittelverarbeitung kommen Kohlenhydrate häufig zum Einsatz, sei es in grossen Mengen als Süssungsmittel oder als vielfältige Texturverbesserer. Ausserdem können sie aufgrund ihrer chemischen Reaktivität bei der Verarbeitung einen Beitrag zur Farb- und Geschmacksentwicklung leisten.

Die chemische Einteilung von Kohlenhydraten erfolgt aufgrund der Anzahl Monomere. Zudem können Mehrfachzucker lineare oder verzweigte Strukturen bilden, was ihre physikalisch-chemischen Charakteristika und insbesondere ihre Hydratationseigenschaften stark beeinflusst. Dies ist nicht nur von Bedeutung für die Wirkungen von Kohlenhydraten in Lebensmitteln, sondern auch für ihr Verhalten im menschlichen Körper. Die physiologische Unterteilung von Kohlenhydraten unterscheidet sich von der chemischen und erfolgt einerseits aufgrund ihrer Verdaulichkeit und andererseits aufgrund ihrer Fermentierbarkeit. Verdauliche Kohlenhydrate liefern je nach Abbaubarkeit durch die menschlichen Verdauungsenzyme unterschiedlich schnell Energie. Die unverdaulichen Nahrungsfasern leisten als bioaktive Substanzen einen Beitrag zu Gesundheit und Wohlergehen. Diese lange Zeit als nicht wichtig angesehene Fraktion der Kohlenhydrate zeigt vielfältige positive Wirkungen sowohl im Magen-Darm-Trakt als auch im Stoffwechsel, sodass eine Erhöhung der täglichen Zufuhr durchaus zu empfehlen ist.

Kohlenhydrate sind die in der Natur am weitesten verbreitete und auch quantitativ wichtigste Stoffklasse organischer Verbindungen. Sie nehmen bei Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen lebenswichtige Funktionen wahr als:

- strukturgebendes Material (z.B. Zellulose in Pflanzen, Chitin in Schalentieren)
- Energiequelle (z.B. Glukose, Saccharose, Laktose)
- Energiereserve (z.B. Stärke in Pflanzen, Glykogen in Tieren)
- Bausteine von Nukleinsäuren (Ribose und Deoxyribose)
- Bausteine von Glykosiden (z.B. Flavonoide), Glykoproteinen (z.B. Enzyme), Glykosaminoglykanen (Bindegewebe-Polysaccharide) und des Kohlenstoffskeletts von nicht essenziellen Aminosäuren.

In Lebensmitteln finden sich Kohlenhydrate einerseits als natürlicherweise vorliegende Inhaltsstoffe (Glukose, Fruktose, Saccharose, Laktose sowie Stärke und Nahrungsfasern) und andererseits als Ingredienzien, die im Lebensmittel verschiedene Aufgaben erfüllen. Mit Abstand am meisten werden Kohlenhydrate als Süssungsmittel verwendet, die unzähligen Lebensmitteln zugesetzt werden. Neben Haushaltszucker (Saccharose) kommen dafür Glukose- und zunehmend auch Fruktosesirupe zum Einsatz. Kohlenhydrate werden aber auch als Verdickungsmittel zur Erhöhung der Viskosität in Suppen, Cremes und Saucen sowie als Stabilisatoren (emulgierend in Saucen, suspendierend in trüben Fruchtsäften, Früchtejoghurts oder Schokoladegeträn-

ken oder die Kristallisation regulierend in Speiseeis und Tiefkühlprodukten) eingesetzt. Sie dienen auch als Bindemittel zur Verhinderung von Phasentrennungen in Früchtejoghurts, Fleisch- oder Tiefkühlprodukten sowie als Gelbildner in Konfitüren und Puddings. Weiter finden sie Verwendung als Überzüge von Torten und als Füllstoffe und kalorienarme Quellstoffe in Suppen sowie Biskuits. Erwähnenswert ist auch die breite Anwendung von Laktose in sehr vielen Fertigprodukten (z.B. Wurstwaren, Backwaren, Convenience-Food im Allgemeinen).

Für den Menschen gehören Kohlenhydrate zu den Grundnährstoffen; sie dienen als Hauptenergieträger, aber auch als nicht verdauliche Nahrungsfasern (Ballaststoffe). Wichtigste Energiequelle für

den Menschen ist das pflanzliche Reservopolysaccharid Stärke. Damit diese als Energielieferant genutzt werden kann, muss sie im Verdauungstrakt zu Glukose abgebaut werden, die durch die Dünndarmwand absorbiert wird. Kartoffeln und Getreideprodukte stellen die hauptsächlichsten Stärkequellen dar. Der physikalische Brennwert, das heisst die Energie, die beim Verbrennen von einem Gramm Kohlenhydrate frei wird, beträgt 17 kJ (4 kcal). Weil bei der Verstoffwechslung von Kohlenhydraten keine Energie aufgewendet werden muss, beträgt der physiologische Energiegehalt für die verdaulichen Kohlenhydrate ebenfalls 17 kJ (1). Weiter hat die schweizerische Gesetzgebung Energiewerte für Polydextrose (4 kJ), Inulin (4 kJ) und Fruktooligosaccharide (8 kJ) festgelegt, nicht aber für

nicht verdauliche Kohlenhydrate im Allgemeinen. Demgegenüber empfiehlt die FAO/WHO, Nahrungsfasern generell mit 8 kJ zu berechnen.

Chemische Aspekte

1. Einteilung

Die quantitativ wichtigsten Lebensmittelkohlenhydrate sowie ihre hauptsächlichsten Quellen und Verdaulichkeit sind in *Tabelle 1* aufgelistet.

Die Unterteilung in Mono-, Di-, Oligo- und Polysaccharide beruht auf der Anzahl Zuckerbausteine, die in den Molekülen vorliegen. In Di-, Oligo- und Polysacchariden sind die einzelnen Monomerbausteine mittels glykosidischer Bindungen miteinander verbunden. Gemäss einer Konvention der International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) enthalten

Polysaccharide 10 oder mehr Monomereinheiten. Dementsprechend bestehen Oligosaccharide aus 3 bis 9 Bausteinen.

Mono-, Di- und Oligosaccharide

Zur Gruppe der niedermolekularen Kohlenhydrate, auch Zucker genannt, gehören Mono-, Di- und Oligosaccharide. Glukose und Fruktose sind die wichtigsten Monosaccharide (Einfachzucker); sie liegen vor allem in Früchten, Beeren sowie gesüssten Getränken in erheblichen Mengen vor. Galaktose kommt in freier Form – ausser in fermentierten Milchprodukten – kaum vor. Bei den Disacchariden (Zweifachzucker) sind vor allem Saccharose und Laktose von Interesse. Saccharose ist in ansehnlichen Mengen in Zuckerrüben und -rohr vorhanden, während Laktose die relevante Kohlenstoffquelle der Milch darstellt. Maltose ist ein Stärkeabbauprodukt und wird als Gemisch mit anderen Stärkeabbauprodukten (Stärkesirup) in grossen Mengen in Fertigprodukten als Süssungsmittel eingesetzt. Bei den Oligosacchariden (Mehrfachzucker) sind ausser den Stärkeabbauprodukten (Dextrine, Maltodextrine) auch Frukto- (FOS), Xylo- (XOS) und Galaktooligosaccharide (GOS) aus ernährungsphysiologischer Sicht interessant. FOS, XOS und GOS werden als Präbiotika (Nahrung für Darmbakterien) verschiedenen Lebensmittelprodukten beigegeben. Die Oligosaccharide der Raffinosefamilie schliesslich, Raffinose (Tri-), Stachyose (Tetra-) und Verbaskose (Pentasaccharid), kommen in Leguminosen (Hülsenfrüchten) wie Soja, Erbsen und Bohnen vor. Sie zeichnen sich durch α -galaktosidisch verknüpfte Galaktosereste aus und sind unverdaulich.

Tabelle 1: Nahrungskohlenhydrate – Hauptquellen und Verdaulichkeit

Kohlenhydrat	Monomere Bausteine	Vorkommen	Verdaulichkeit
Monosaccharide			
Glukose (Traubenzucker)		Obst, Gemüse	+
Fruktose (Fruchtzucker)		Obst, Gemüse	+
Galaktose		fermentierte Milchprodukte	+
Disaccharide			
Saccharose	Glukose und Fruktose	Zuckerrohr und -rüben	+
Laktose (Milchzucker)	Galaktose und Glukose	Milch	(+)
Maltose	Glukose	Malz, Stärkesirup	+
Oligosaccharide (OS)			
Raffinose, Stachyose, Verbaskose (Raffinosefamilie)	Galaktose, Glukose, Fruktose	Leguminosen (Soja, Erbsen, Bohnen usw.)	–
Fruktooligomere (FOS)	Fruktose	enzymatisch hergestellt	–
Xylooligomere (XOS)	Xylose	enzymatisch hergestellt	–
Galaktooligomere (GOS)	Galaktose	enzymatisch hergestellt	–
Polysaccharide (PS)			
Stärke	Glukose	Getreide, Kartoffeln	+
– Amylose			
– Amylopektin			
Nahrungsfasern			
– Zellulose	Glukose	Pflanzenzellwände	–
– Hemizellulosen	Arabinose, Xylose, Glukose, Mannose	Pflanzenzellwände	–
– Pektine	Galakturonsäure, Rhamnose, Galaktose	Pflanzenzellwände	–
– Gummis	Arabinose, Xylose, Uronsäuren, Galaktose	Pflanzenexsudate	–
– Schleimstoffe	Arabinose, Rhamnose, Uronsäuren, Galaktose	Algen	–
– Resistente Stärke	Anhydro-Galaktose, Glukose	Kartoffeln, Getreideprodukte	–
– Fruktane (Inulin)		Zichorie	–
– Polydextrose	Fruktose, Glukose	synthetisch hergestellt	–

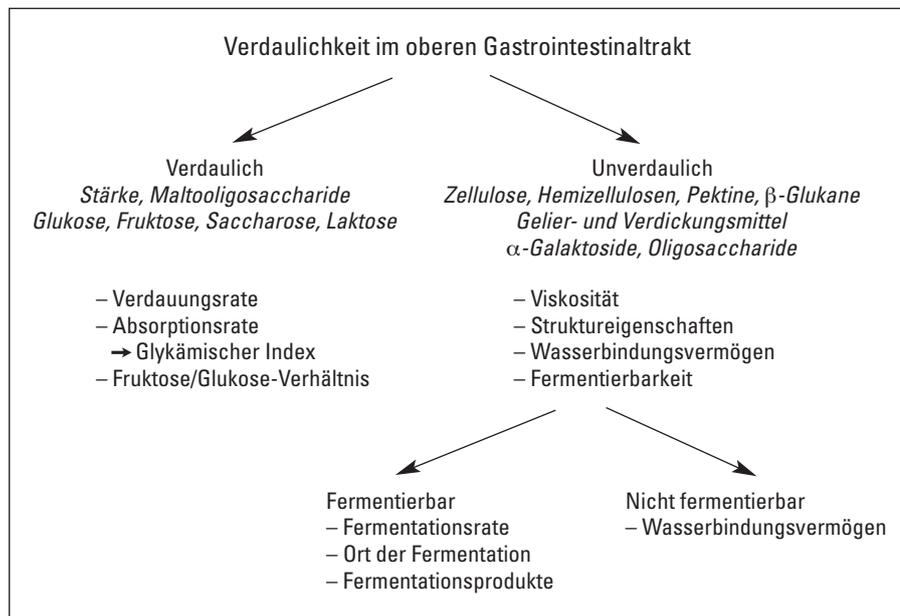


Abbildung 1: Übersicht über die physiologischen Eigenschaften von Kohlenhydraten (nach [5])

Polysaccharide

Die in Lebensmitteln natürlicherweise vorkommenden oder zur Erzielung bestimmter Funktionen zugegebenen Polysaccharide (Vielfachzucker) lassen sich aus ernährungsphysiologischer Sicht in zwei Gruppen einteilen. Bei der Stärke, dem pflanzlichen Reservopolysaccharid, handelt es sich um ein α-D-Glukan, bestehend aus einer linearen Fraktion, der Amylose, und einer verzweigten Fraktion, dem Amylopektin. Nativ liegt die Stärke in Form von Stärkekörnern in der Pflanze

vor. Das Amylose/Amylopektin-Verhältnis variiert zwischen den Pflanzenarten. Zum Teil ist Stärke erst nach Zerstörung des Korns durch die endogenen (pflanzen-eigenen) Amylasen angreifbar und verdaulich; es wird damit zur wichtigsten Energiequelle. Im Gegensatz dazu sind die Nahrungsfasern (Nicht-Stärke-Polysaccharide) per definitionem unverdaulich. Bei diesen handelt es sich hauptsächlich um die Polysaccharide der pflanzlichen Zellwand (Zellulose, ein lineares α-D-Glukan, Hemizellulosen und Pektin). Zu den Nahrungsfasern gehören aber auch pflanzliche und mikrobielle Polysaccharide, die als Zusatzstoffe zur Erzielung bestimmter physikalischer Eigenschaften oder zur Verbesserung der Textur im Einsatz sind. So spielen Pflanzengummis (z.B. Gummi arabicum), Polysaccharide aus Leguminosensamen (Guar, Carubin, Tara), Schleimstoffe aus Algen (z.B. Alginsäure, Carrageenane) und enzymresistente Stärken eine bedeutende Rolle als Nahrungsfaserquellen. Fruktane (z.B. das aus Zichorie gewonnene Inulin) gehören als unverdauliche Polysaccharide ebenfalls in die Gruppe der Nahrungsfasern und zeichnen sich zudem durch eine präbiotische Wirkung aus. Die synthetisch durch Polymerisation von D-Glukose hergestellte Polydextrose dient hauptsächlich als Füllmittel, ist

ebenfalls nicht verdaulich und zählt somit zu den Nahrungsfasern.

2. Physikalisch-chemische Eigenschaften

Chemisch gehören die Kohlenhydrate zur Gruppe der Polyhydroxycarbonylverbindungen. Sie tragen neben mehreren Hydroxylgruppen eine reduzierend wirkende Carbonylgruppe (entweder eine Aldehyd- oder eine Ketogruppe (Aldosen und Ketosen)). Zucker zeichnen sich deshalb durch eine hohe Wasseraufnahme aus, was bei zuckerhaltigen Pulvern und Granulaten durch Zusammenklumpen zu einer Verschlechterung der Löslichkeitseigenschaften führen kann. Auf der anderen Seite trägt die hohe Wasseraufnahme von konzentrierten Zuckerlösungen, etwa Stärke- oder Glukosesirup, zur Feuchthaltung von Lebensmitteln bei. Mono-, Di- und Oligosaccharide sind im Allgemeinen gut wasserlöslich, während bei Polysacchariden die beteiligten Monomerbausteine (Neutralzucker, Uronsäuren) und vor allem die Struktur (linear oder verzweigt) für die Wasserlöslichkeit entscheidend sind. Die Palette reicht von vollständig unlöslichen (z.B. Zellulose, Amylose) bis zu gut quellenden, in heissem (z.B. Stärke, Carubin) oder kaltem (z.B. Guar) Wasser löslichen Polymeren. Verzweigte Polysaccharide sind besser löslich als lineare, weil durch die verzweigte Struktur Interaktionen zwischen den einzelnen Makromolekülen kleiner sind. Polysaccharide, die Carboxylgruppen tragen (z.B. Pektin, Alginate), sind im neutralen und leicht alkalischen Milieu als Alkalisalze gut löslich. Bei pH-Werten unter 3 erfolgt entweder Gelbildung oder Ausfällung. Polysaccharide mit starken sauren Gruppen (Schwefelsäureester, Phosphorsäureester wie z.B. Carrageenan oder phosphatierte Stärken) sind auch im sauren Milieu gut wasserlöslich. Je nach Polysaccharid besitzen Lösungen zum Teil selbst bei hoher Konzentration nur niedrige Viskosität (z.B. Gummi arabicum), zum Teil bereits bei niedriger Konzentration sehr hohe Viskosität (z.B. Guar). Einige Polysaccharide bilden bereits in tiefen Konzentrationen beim Abkühlen Gele aus (Alginate, Pektine), die oft beim

Tabelle 2: Glykämischer Index (GI) verschiedener Lebensmittel, berechnet mit Weissbrot (GI_{WB}) bzw. Glukose (GI_G) als Standard (nach [7])

Lebensmittel	GI _{WB}	GI _G
Saccharose	92	61–67
Glukose	138	100
Fruktose	32	23
Laktose	63	46
Weissbrot	100	72
Cornflakes	107–139	78–100
Teigwaren	46–88	33–64
Reis, parboiled	58–78	42–56
Kartoffeln	66–120	48–87
Linsen, rot, getrocknet	25–45	18–33
Orangen	44–73	32–53
Bananen	43–99	31–72
Äpfel	40–57	29–41

Erhitzen wieder schmelzen. Die Fähigkeit, insbesondere der Polysaccharide, Wasser zu binden (Hydratationseigenschaften), ist für deren Anwendung in Lebensmitteln und auch für deren physiologische Wirkung, zum Beispiel als Nahrungsfasern, von ausserordentlicher Bedeutung.

3. Chemische Reaktivität

Monosaccharide sind in neutraler und leicht saurer Lösung bei Raumtemperatur stabil. Werden schwach saure Monosaccharidlösungen erhitzt oder mit konzentrierten Säuren behandelt, wird aus den Molekülen Wasser abgespalten, und es kommt zur Bildung von Furanen. Aus Pentosen (z.B. Arabinose) entsteht Furfural, aus Hexosen (z.B. Glukose) Hydroxymethylfurfural (HMF). Die Anwesenheit von HMF in Lebensmitteln ist ein Hinweis, dass ein kohlenhydrathaltiges Lebensmittel erhitzt worden ist. Für die sensorische Qualität von kohlenhydrathaltigen Lebensmitteln ist die Reaktion zwischen reduzierenden Zuckern (Monosaccharide sowie reduzierende Di- und Oligosaccharide) und Aminogruppen, zum Beispiel aus Aminosäuren, von grosser Bedeutung. In einer Reaktionsfolge, der sogenannten Maillard-Reaktion, entstehen beim Erhitzen braun gefärbte Produkte sowie charakteristische Aromastoffe (2, 3). Im Allgemeinen ist die Maillardreaktion erwünscht, sie kann aber wie bei der Entstehung von Acrylamid während der Erhitzung von kohlenhydrathaltigen Produkten auch zu toxischen Stoffen führen (4).

Physiologische Aspekte

1. Physiologische Einteilung

Die physiologische Unterteilung von Kohlenhydraten erfolgt aufgrund ihrer Verdaulichkeit und ihrer Fermentierbarkeit (Abbildung 1). In der Gruppe der verdaulichen Kohlenhydrate finden sich sowohl Mono- und Di- als auch Oligo- und Polysaccharide. Deren Verdauung wie auch deren Absorption verläuft unterschiedlich schnell. Dies ist insofern von grosser physiologischer Bedeutung, als dadurch der Verlauf des Blutzuckerspiegels stark beeinflusst wird. Als Mass für die Blutzuckererhöhende Wirkung von kohlenhydrathaltigen Lebensmitteln

wird der glykämische Index (GI) verwendet. Dieser wird im Vergleich eines Standards angegeben, dessen erhöhende Wirkung definitionsgemäss bei 100 Prozent liegt.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die GI-Werte verschiedener Lebensmittel, berechnet mit den beiden geläufigen Standards Glukoselösung und Weissbrot. Die Werte zeigen deutlich, dass die Absorptionsgeschwindigkeit der verschiedenen Zucker sehr unterschiedlich ist. Daneben beeinflussen verarbeitungsbedingte Veränderungen (z.B. Verkleisterung von Stärke, Aufschluss von Zellstrukturen) und die Partikelgrösse insbesondere die Verdauungsrate stark, während sich die Konsistenz der Nahrung sowie die Anwesenheit anderer Nährstoffe (z.B. Fett) oder von Stoffen, die Verdauungsenzyme hemmen (z.B. Amylasehemmer), eher auf die Absorptionsrate auswirken. Dies führt dazu, dass der GI auch innerhalb einzelner Produkte beträchtliche Schwankungsbreiten aufweisen kann (Tabelle 2). Für weiterführende Angaben und Daten sei auf die Literatur (6) und auf Kapitel 7 dieses Berichtes verwiesen. Obwohl sich dieses Konzept zur Klassifizierung in unterschiedliche GI-Gruppen eignet (hoher GI: ≥ 70 ; tiefer GI: ≤ 55), darf es nicht überbewertet werden, da auch individuelle Faktoren einen grossen Einfluss auf den Blutzuckerspiegel haben.

Die nicht verdaulichen Kohlenhydrate, zu denen Oligo- und Polysaccharide zu zählen sind (Abbildung 1; Tabelle 1), werden aus physiologischen Gründen als Nahrungsfasern bezeichnet. Gemäss Definition handelt es sich dabei um diejenigen Komponenten der Nahrung, die der Verdauung und der Absorption im menschlichen Dünndarm widerstehen und im Dickdarm ganz oder teilweise fermentiert werden (8). Quantitativ die grösste Bedeutung haben die Bestandteile pflanzlicher Zellwände (Tabelle 1), aber auch andere Kohlenhydrate wie resistente Stärke, nicht verdauliche Oligosaccharide sowie Gelier- und Verdickungsmittel leisten einen Beitrag zur Nahrungsfaseraufnahme.

Resistente Stärke kann aus verschiedenen Gründen für die menschlichen Verdauungsenzyme unzugänglich sein.

Dementsprechend wird sie in vier Typen unterteilt (9):

- Typ 1 umschreibt physikalisch unzugängliche Stärke, wie sie in teilweise vermahlene Getreidekörnern oder in Samen vorkommt.
- Typ 2 umfasst resistente Stärkekörner, wie sie in rohen Kartoffeln oder in grünen Bananen vorliegen (Getreidestärken sind im Gegensatz dazu in ihrer nativen Form verdaulich, wenn auch nur langsam).
- Typ 3 ist definiert als retrogradierte Stärke, wie sie bei Verarbeitungsprozessen entsteht, indem nach Verkleisterung beim Abkühlen semikristalline Strukturen gebildet werden. Dies ist zum Beispiel bei altbackenem Brot, Cornflakes oder erkalteten Kartoffelprodukten der Fall.
- Als Typ 4 werden diejenigen chemisch modifizierten Stärken bezeichnet, die durch Derivatisierung oder Vernetzungsreaktionen unverdaulich geworden sind und als Verdickungsmittel in verarbeiteten Lebensmitteln zur Anwendung gelangen.

Trotz ihrer Unverdaulichkeit beeinflussen Nahrungsfasern die Vorgänge im oberen Verdauungstrakt. Dies ist auf ihre speziellen physikalisch-chemischen Eigenschaften zurückzuführen. Schliesslich werden sie im Dickdarm in unterschiedlichem Ausmass fermentiert, was die Abläufe in diesem Organ ebenfalls in unterschiedlicher Weise beeinflusst. Eine Übersicht über die physiologischen Wirkungen von Nahrungsfasern gibt Tabelle 3.

2. Verhalten im oberen Verdauungstrakt

Die Verdauung der Kohlenhydrate beginnt bereits in der Mundhöhle mithilfe der von den Speicheldrüsen gebildeten α -Amylase, die durch die Spaltung von 1,4-glukosidischen Bindungen im Innern der Stärkemoleküle für eine erste Zerkleinerung sorgt (Abbildung 2). Nach dem Eintritt des Nahrungsbreis in den Magen wird durch Einwirkung der Magensäure die Speichelamylase inaktiviert. Erst im Dünndarm, wo der Nahrungsbrei wieder neutralisiert wird, werden Stärke beziehungsweise deren Abbauprodukte (Dex-

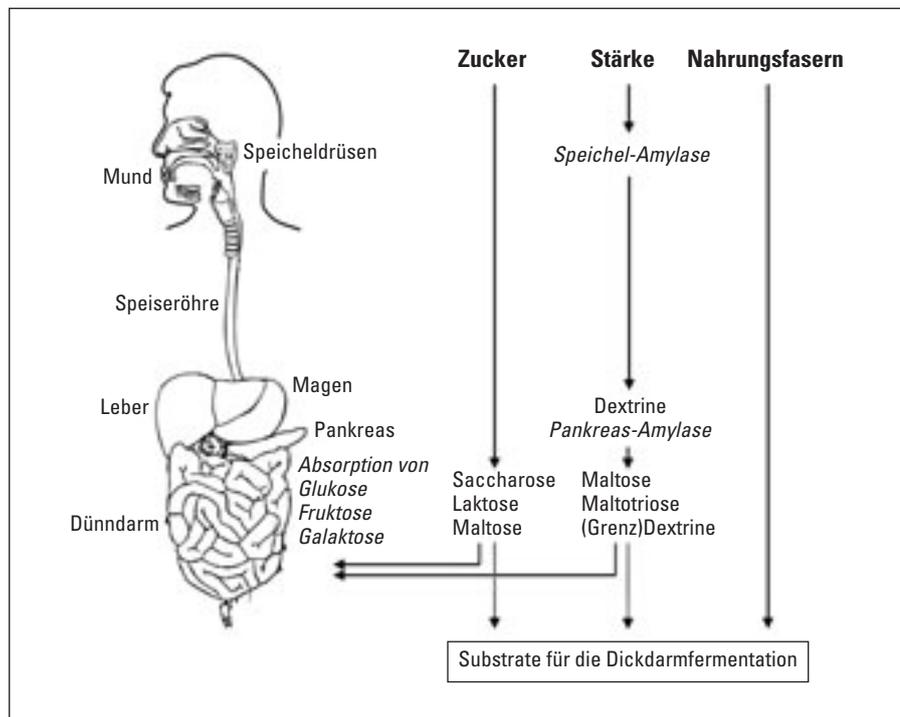


Abbildung 2: Übersicht über die Verdauung von Kohlenhydraten (nach [11])

trine) unter Einwirkung von α -Amylase aus der Bauchspeicheldrüse (die eine höhere Aktivität als die Speichelamylase aufweist) weiter zu Maltose, Maltotriose und sogenannten Grenzdextrinen abgebaut. Die endgültige Zerlegung in Glukose erfolgt vorwiegend in den Mukoszellen des Dünndarms mithilfe von Maltase und Isomaltase, wobei auch die 1,6-glukosidischen Bindungen von Grenzdextrinen, das heisst die aus Amylopektin entstehenden Verzweigungsstellen innerhalb der Stärkeabbauprodukte, gespalten werden. Auch der Abbau von Saccharose und Laktose in ihre Monosaccharide erfolgt membrangebunden an den Mukoszellen mithilfe der dafür spezifischen Enzyme Saccharase und Laktase. Die Absorption der einzelnen Monosaccharide verläuft über spezifische Mechanismen und mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Am schnellsten werden Glukose und Galaktose absorbiert, mit abnehmender Geschwindigkeit werden Fruktose, Mannose, Xylose und Arabinose aufgenommen (10).

Nahrungsfasern passieren den oberen Verdauungstrakt zwar unverändert, beeinflussen aber die Vorgänge im oberen Verdauungstrakt in vielfältiger Weise (12,

13). Die physiologische Wirkung beginnt bereits im Mund. Die in pflanzlichen Zellwänden vorwiegend unlöslich vorliegenden Nahrungsfasern führen zu einer Verlängerung der Kauzeit und verlängern damit die Nahrungsaufnahme. Im Magen führen sie zu einem länger anhaltenden Sättigungsgefühl, was auf die viskositäts-

erhöhende Wirkung sowie auf die hohe Wasseraufnahmefähigkeit vorwiegend löslicher Nahrungsfasern und die damit verbundene Volumenvergrößerung zurückzuführen ist. Diese Eigenschaften führen auch im Dünndarm zu einer Verlangsamung der Verdauungsvorgänge sowie zu einer Verzögerung der Nährstoffaufnahme, die zudem über einen längeren Abschnitt des Dünndarms erfolgt. Andererseits erhöhen unlösliche Nahrungsfasern die Transitgeschwindigkeit, sodass die Verweilzeit des Nahrungsbreis insbesondere im Ileum, dem letzten Abschnitt des Dünndarms, verkürzt und die Absorption von Nährstoffen tendenziell vermindert wird. Im Falle von Mineralstoffen ist dieser Effekt unterschiedlich zu bewerten. Während die Bindung toxischer Schwermetalle erwünscht ist, ist eine verminderte Bioverfügbarkeit essenzieller Mineralstoffe negativ zu beurteilen. Dies ist nicht nur auf Viskositätseffekte zurückzuführen, sondern auch auf die Tatsache, dass Pektine oder Phytinsäure als nahrungsfaserassoziierte Substanz Kationen zu binden vermögen. Ein weiterer Effekt im Dünndarm beruht auf der Bindung von Gallensäuren an Nahrungsfasern. Dadurch wird deren enterohepatische Rezirkulation vermindert, was zu einer Erhöhung der Neusynthese führt.

Tabelle 3: Physiologische Eigenschaften von Nahrungsfasern

Mund – Magen – Dünndarm

Erhöhte Kautätigkeit	→ Reduzierte Nahrungsaufnahme
Erhöhte Magenfüllung	→ Andauernde Sättigung
Verzögerte Magenentleerung	→ Langsame Freisetzung des Nahrungsbreis in den Dünndarm
Verzögerte Nährstoffaufnahme	→ Einfluss auf den Blutzuckerspiegel → Einfluss auf den Blutinsulinspiegel
Bindung von organischen Substanzen	→ Einfluss auf den Fettstoffwechsel (Cholesterin, Gallensäuren)
Bindung von Mineralstoffen	→ Einfluss auf die Mineralstoffabsorption

Dickdarm

Fermentation

Erhöhte Biomasse	→ Einfluss auf die Darmbeweglichkeit, Erhöhung des Stuhlgewichtes
Stimulierung des Wachstums	→ Präbiotische Eigenschaften
Bildung von kurzkettigen Fettsäuren	→ Energie für Darmflora, Regulation des Wachstums und der Differenzierung von Darmepithelzellen
Wasserbindung durch nicht fermentierbare unlösliche Nahrungsfasern	→ Weichheit und Geschmeidigkeit des Darminhalts, erhöhte Stuhlmasse

Dazu wird Cholesterin für die Synthese der Gallensäuren abgezweigt, sodass eine Senkung des Serumcholesterinspiegels möglich wird.

3. Verhalten im Dickdarm

Nahrungsfasern und in beschränkter Masse auch nicht vollständig verdaute beziehungsweise absorbierte verdauliche Kohlenhydrate gelangen in den Dickdarm, wo sie verschiedene Auswirkungen zeigen. Nicht fermentierbare sowie schlecht fermentierbare Anteile wie Zellulose oder bestimmte Hemizellulosen (v.a. aus Getreide) behalten ihr Wasserbindungsvermögen vollständig oder teilweise (Abbildung 1). Die so gequollenen Substanzen stimulieren die Darmmotilität und führen zu einer Verkürzung der Zeit des Transits durch den Dickdarm. Durch den hohen Anteil an gebundenem Wasser werden Stuhlmasse und -volumen erhöht. Alle diese Effekte tragen zur laxierenden (abführenden) Wirkung von Nahrungsfasern bei. Der grössere Anteil der Nahrungsfasern wird aber durch die im Dickdarm ansässigen Mikroorganismen mehr oder weniger vollständig fermentiert. Die menschliche Darmflora stellt ein äusserst komplexes und biochemisch sehr aktives Ökosystem dar (14), dessen Zusammensetzung zwar erst bruchstückhaft erforscht, dessen Bedeutung für die menschliche Gesundheit aber allgemein anerkannt ist. Unverdauliche Kohlenhydrate sind für die fast ausschliesslich anaeroben Mikroorganismen die wichtigsten Substrate, aus denen sie auf verschiedensten Stoffwechselwegen Fermentationsprodukte bilden. Die Fermentation verläuft dynamisch entlang des gesamten Dickdarms (Abbildung 3).

Im proximalen Dickdarm ist aufgrund der hohen Substratverfügbarkeit die Aktivität hoch, und gut fermentierbare Nahrungsfasern werden sehr effizient verstoffwechselt. Dies trifft vorwiegend auf niedermolekulare sowie auf lösliche Nahrungsfasern zu. Substrate, die sich durch Unlöslichkeit, schlechte Oberflächenzugänglichkeit und/oder einen komplexen chemischen Aufbau auszeichnen, können bis in den distalen Dickdarm gelangen, wo sie oft nur noch unvollständig

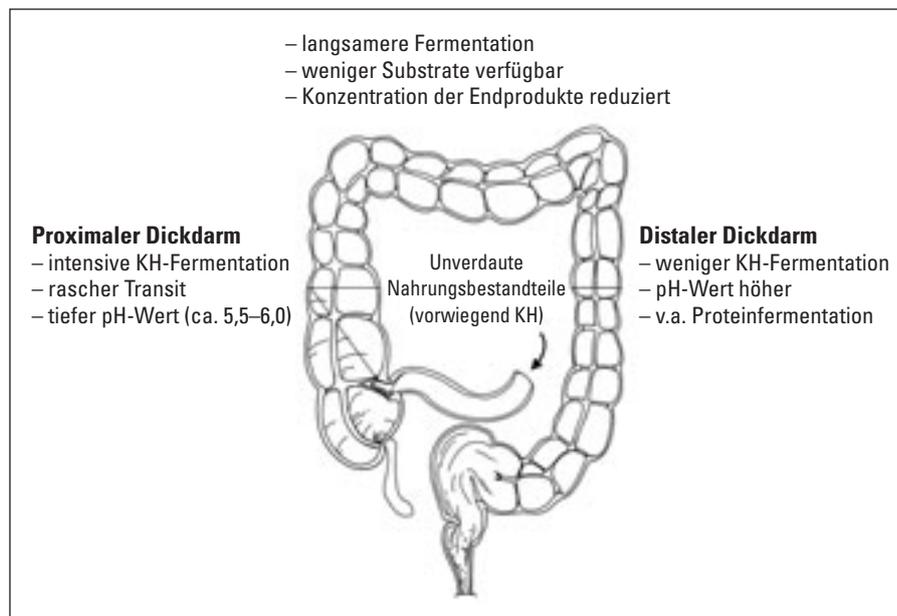


Abbildung 3: Übersicht über die Fermentationsvorgänge im Dickdarm (nach [15])

verstoffwechselt werden. In diesem Darmabschnitt werden durch die Fermentation von Proteinen und Aminosäuren potenziell toxische Fermentationsprodukte wie Amine, Phenole und Ammoniak gebildet, die für das Auftreten verschiedener Darmkrankungen verantwortlich gemacht werden. Deshalb ist die Verstoffwechslung von Kohlenhydraten in diesem Darmabschnitt durchaus erwünscht. Aber auch die Erhöhung der Transitzeit durch unlösliche Nahrungsfasern zeigt hier einen günstigen Effekt, da sie zu einer Verkürzung der Kontaktzeit mit unerwünschten Stoffen führt.

Die wichtigsten Fermentationsprodukte, die aus Nahrungsfasern gebildet werden, sind Gase (Wasserstoff, Kohlendioxid und z.T. Methan) sowie kurzkettige Fettsäuren. Fermentationsgase sorgen dafür, dass die Stuhlmasse im Darm weitertransportiert wird, können aber bei der Aufnahme von grossen Mengen leicht fermentierbarer Nahrungsfasern (z.B. Oligosacchariden) beziehungsweise bei empfindlichen Personen zu Flatulenz führen. Allerdings ist zu vermerken, dass sich die Darmflora bei regelmässigem Konsum solcher Produkte gut an die veränderten Verhältnisse adaptieren kann. So verschwinden die unerwünschten Begleiterscheinungen nach einer Gewöhnungsphase meist, und sowohl Stuhlkon-

sistenz als auch -frequenz werden positiv beeinflusst. Die wichtigsten Vertreter der kurzkettigen Fettsäuren sind Essig-, Propion- und Buttersäure. Je nach Struktur der Nahrungsfasern werden unterschiedliche Mengen der einzelnen kurzkettigen Fettsäuren produziert. Pektine zeichnen sich zum Beispiel dadurch aus, dass hohe Mengen an Essigsäure gebildet werden (16), die Fermentation von Galaktomannanen (Guar, Carubin, Tara) liefert hohe Gehalte an Propionsäure (17), und resistente Stärken zeichnen sich durch hohe Buttersäurewerte aus (18). Physiologisch gesehen spielen kurzkettige Fettsäuren einerseits für den Stoffwechsel des Dickdarms eine wichtige Rolle. Sie sind an der Regelung des intestinalen pH-Wertes beteiligt und hemmen das Wachstum pathogener Keime. Zudem fördern sie sowohl die Wasser- wie auch die Elektrolytabsorption. Da sie weitgehend absorbiert werden, leisten sie auch einen Beitrag für den Energiehaushalt. Andererseits werden ihnen auch gesundheitsfördernde Wirkungen zugeschrieben. Buttersäure dient vor allem als Energiequelle für die Darmwandzellen. Dabei soll sie auch antikarzinogene Eigenschaften zeigen, indem sie die Proliferation normaler Dickdarmzellen, aber auch den programmierten Zelltod (Apoptose) von Krebszellen im Dickdarm fördert. Propionsäure wird

eine hemmende Wirkung auf die Cholesterinsynthese in der Leber nachgesagt, obwohl nicht mit Sicherheit nachgewiesen ist, dass die normalerweise im menschlichen Dickdarm gebildeten Mengen für diesen Effekt ausreichen.

Einen Spezialfall stellen die sogenannten Präbiotika dar, die ebenfalls Teil der Nahrungsfaserfraktion sind. Neben den schon diskutierten physiologischen Eigenschaften (unter denen die ausgeprägte Gasbildung besonders zu erwähnen ist) zeichnen sich diese Kohlenhydrate dadurch aus, dass sie das Wachstum und/oder die Aktivität einer bestimmten oder einer begrenzten Anzahl von Bakterien im Dickdarm fördern, die sich positiv auf die Gesundheit des Menschen auswirken sollen (19). Dabei wird vor allem das Wachstum von Bifidobakterien und Laktobazillen, also sogenannt probiotischer Keime, gefördert. Am besten belegt ist der bifidogene Effekt. Nicht nur in In-vitro-Versuchen, sondern auch in Humanstudien konnte gezeigt werden, dass verschiedene Oligosaccharide wie FOS, GOS und XOS (vgl. *Tabelle 1*) sowie das Po-

lysaccharid Inulin in der Lage sind, den Anteil an Bifidobakterien in der menschlichen Darmflora zu steigern (20). Allerdings ist zu vermerken, dass dieser Effekt nur in einem begrenzten Bereich dosisabhängig ist und von der Bifidobakterienzahl vor der Intervention abhängt. Zudem zeigte sich, dass für die Aufrechterhaltung dieses bifidogenen Effektes Präbiotika regelmäßig zugeführt werden müssen.

Referenzen:

1. Verordnung des EDI über die Kennzeichnung und Anpreisung von Lebensmitteln (LKV) vom 23. November 2005 (Stand am 12. Dezember 2006), Anhang 4.
2. Belitz H-D, Grosch W, Schieberle P. Lehrbuch der Lebensmittelchemie. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2001.
3. Baltes W. Lebensmittelchemie. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2006.
4. Amrein TM, Andres L, Escher F et al. Occurrence of acrylamide in selected foods and mitigation options. *Food Additives and Contaminants* 2007; 24, Supplement 1: 13–25.
5. Asp N-G. Dietary carbohydrates: classification by chemistry and physiology. *Food Chem* 1996; 57: 9–14.
6. Foster-Powell K, Holt SHA, Brand-Miller JC. International table of glycemic index and glycemic load values: 2002. *Am J Clin Nutr* 2002; 76: 5–56.
7. Raben A, Hermansen K. Health aspects of mono- and disaccharides. In: Eliasson A-C (Ed). *Carbohydrates in food*. Boca Raton FL: Taylor & Francis, 2006.
8. Prosky L. What is dietary fiber? *JAOAC Int* 2000; 83: 985–987.
9. Topping DL, Fukushima M, Bird AR. Resistant starch as a prebiotic and symbiotic: state of the art. *Proc Nutr Soc* 2003; 62: 171–176.
10. Elmadfa I, Leitzmann C. Ernährung des Menschen. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., 1998.
11. Anderson, JJB. Nutrition and health: an introduction. Durham, NC: Carolina Academic Press, 2005.
12. Amadò R. Nahrungsfasern in der menschlichen Ernährung. Schriftenreihe der Schweizerischen Vereinigung für Ernährung 1996; 75: 27–41.
13. Khanna S, Parrett A, Edwards CA. Non-digestible carbohydrates: nutritional aspects. In: Eliasson A-C (Ed.). *Carbohydrates in food*. Boca Raton FL: Taylor & Francis, 2006.
14. Mitsuoka T. Intestinal flora and human health. *Asia Pacific J Clin Nutr* 1996; 5: 2–9.
15. Gibson GR, Collins MD. Concept of balanced colonic microbiota, prebiotics, and symbiotics. In: Hanson LÅ, Yolken RH (Eds). *Nestlé Nutrition Workshop Series* 1999; 42: 139–156.
16. Gulfi M, Arrigoni E, Amadò R. Influence of structure on in vitro fermentability of commercial pectin preparations. *Carboh Polymers* 2005; 59: 247–255.
17. Arrigoni E, Amadò R. Hydrokolloide als Ballaststoffe. *Ernährung/Nutrition* 2003; 27: 365–371.
18. Fässler C, Arrigoni E, Venema K, et al. In vitro fermentability of differently digested resistant starch preparations. *Mol Nutr Food Res* 2006; 50: 1220–1228.
19. Gibson GR, Roberfroid M. Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotics. *J Nutr* 1995; 125: 1401–1412.
20. Frey I, Arrigoni E, Amadò R. Kritische Betrachtung von Pro- und Präbiotika anhand von Humanstudien. *Ernährung/Nutrition* 2001; 25: 485–501.