

## 1.1. Bedeutung der Kohlenhydrate in der Wiederkäuerernährung

### 1.1.1. Klassifizierung der Kohlenhydrate

Die organische Pflanzensubstanz besteht zu 60-80 % der Trockenmasse (TM) aus Kohlenhydraten. Sie stellen den Hauptanteil der tierischen und menschlichen Nahrung dar und liefern somit den größten Teil an Nahrungsenergie. Kohlenhydrate bestehen aus Zucker und werden je nach Anzahl der Zuckermoleküle in Mono-, Di-, Oligo- oder Polysaccharide unterteilt. Bei zusammengesetzten Kohlenhydraten sind die einzelnen Monosaccharide durch Glycosidbindungen miteinander verbunden, für die es zwei stereochemische Möglichkeiten, die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Konfiguration, gibt. Die Bindungsform ist entscheidend für die Nutzbarkeit des jeweiligen Polysaccharides durch die Tiere, da die  $\beta$ -glycosidische im Gegensatz zur  $\alpha$ -glycosidischen Bindung von höheren Tieren nicht hydrolytisch spaltbar ist, weil diese nicht über die entsprechenden Verdauungsenzyme verfügen (WEISSBACH, 1993).

Als reiner Pflanzenfresser hat der Wiederkäuer durch die Ausbildung eines Vormagensystems eine besondere Strategie entwickelt, um Futter mit hohen Anteilen an  $\beta$ -glycosidisch gebundenen Kohlenhydraten effektiv nutzen zu können. Durch die Besiedlung der Vormägen mit Mikroorganismen (MO) und die dadurch gebildeten mikrobiellen Enzyme (Cellulasen bzw.  $\beta$ -Hydrolasen) ist es dem Wiederkäuer möglich, diese Verknüpfungen im Cellulosemolekül spalten zu können. Die Nutzung der Pflanzenfaser durch den Wiederkäuer ist somit von der Mikroorganismenpopulation im Pansen abhängig (KASKE, 2005).

Nach ihrer Lokalisierung und Funktion in der Pflanzenzelle wird zwischen Strukturkohlenhydraten (SC) und Nicht-Strukturkohlenhydraten (NSC) unterschieden. Bei den SC in Futtermitteln handelt es sich um Cellulosen, Hemicellulosen und Pektinstoffe in unterschiedlichen Anteilen. Zusammen mit dem Nicht-Kohlenhydrat Lignin und weiteren Verbindungen, die in nur geringen Anteilen vorkommen (z.B. zellwandgebundenes Rohprotein), bilden diese die pflanzliche Zellwand. Zu den NSC in Futtermitteln zählen freie Mono- und Disaccharide (Glucose, Fructose, Maltose und Saccharose) sowie das Reservekohlenhydrat Stärke. Sie sind Bestandteile des Zellinhalts und vollständig von den Tieren verdaubar (VAN SOEST, 1994; NULTSCH, 1996). Die einzelnen Kohlenhydrate haben in der Wiederkäuerernährung wesentlichen Einfluss auf:

- die Strukturwirksamkeit einer Ration (Speichelfluss, Säurebildung bzw. pH-Wert im Pansen,
- das Wachstum der Pansenmikroben und somit auf die gebildete Menge an Mikrobenprotein,

- die Bildung von Milchzucker und Milchfett,
- die Höhe der Futteraufnahme,
- die hormonelle Steuerung des Stoffwechsels der Kuh .

Infolgedessen ist bei der Planung für Milchkuhrationen eine gezielte Kohlenhydratversorgung zu beachten (DLG; 2001).

## **1.1.2. Bedeutung der Kohlenhydrate im Grund- und Kraftfutter**

### **1.1.2.1. Das Grundfutter**

Das Grünfutter stellt die natürlichste Futtergrundlage der Wiederkäuer und anderer Pflanzenfresser dar. Für die Nutztiere, wie Rinder und Schafe, ist dieses ein vollwertiges Futter. Das Grünfutter, wie z.B. Weide- und Frischfutter, sowie deren Konservate (Silagen, Heu und Trockengrünfutter) zählen zu den Grobfutter- bzw. Grundfuttermitteln. Als Grundfutter (GF) bezeichnen PIATKOWSKI *et al.* (1990) faserreiche Futtermittel mit einer Energiekonzentration unter 6,3 MJ NEL pro kg TM und einem Rohfasergehalt über 200g pro kg TM. Die wichtigsten energieliefernden Nährstoffe sind bei den Grundfuttermitteln die Kohlenhydrate. Der Gehalt an Lipiden ist dagegen sehr gering und das Rohprotein stellt nur eine sekundäre Energiequelle dar. Da es sich beim GF um den oberirdischen, vegetativen Pflanzenkörper, insbesondere den Stängel, Halm oder die Blätter handelt, befindet sich der größte Teil der organischen Substanz bei diesen Pflanzen in der Zellwand, welche aus SC und Lignin aufgebaut ist. Für den Futterwert ist die Zusammensetzung bzw. das Verhältnis von SC : NSC von entscheidender Bedeutung. Mit zunehmendem Vegetationsstadium nimmt der Gehalt an Strukturkohlenhydraten sowie der Lignifizierungsgrad deutlich zu, was sich auf die Aufnahme, Verdaulichkeit und Verwertung des Futters entscheidend auswirkt (WEISSBACH, 1993).

Neben der Rolle als Energielieferant kommt den SC im GF noch eine ganz wesentliche Aufgabe zur Stabilisierung des Pansenmilieus zu, was häufig auch unter dem Begriff „Strukturwirksamkeit“ zusammengefasst wird. Nach HOFFMANN (1990) ergibt sich die Strukturwirksamkeit einer Ration aus der Futtermittelstruktur und ihren Einzelkomponenten. Die Futtermittelstruktur ist demnach die Summe von Eigenschaften eines Futtermittels, die durch die physikalische Form und den Gehalt an Strukturstoffen des betreffenden Futtermittels bestimmt wird.

Strukturstoffe sind Nährstoffe mit physikalischer und chemischer Wirkung im Verdauungstrakt. Für die Beurteilung der Futtermittelstruktur werden am häufigsten die Gerüstsubstanzen

(Cellulose, Hemicellulose, Lignin) in Form der Rohfaser oder der sauren (ADF) und neutralen Detergentienfaser (NDF) bestimmt. Weitere Faktoren der physikalischen Form, wie die Härte und die geometrische Form, werden außerdem berücksichtigt. Sie haben aber - wie die Schüttdichte ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ) eines Futtermittels - keinen Eingang in allgemeine Bewertungssysteme gefunden (HOFFMANN, 2003).

Seit etwa 1960 waren Wissenschaftler bemüht, Parameter zu finden, um die Strukturwirksamkeit praktisch beurteilen zu können. Vor allem pansenphysiologische Untersuchungen und Messungen des Verzehrs- und Wiederkauverhaltens waren Grundlagen für verschiedene Parameter zur Beurteilung der Strukturwirksamkeit. In Tabelle 1 soll ein Überblick über ausgewählte Arbeiten zu dieser Thematik geben werden.

Tabelle 1: Wissenschaftliche Arbeiten zur Bewertung der Strukturwirksamkeit von Futtermitteln für Wiederkäuer (Quelle: HOFFMANN, 2003).

Speichelsekretion	ORTH & KAUFMANN (1964) KAUFMANN & ORTH (1966)
Strukturwirksame Rohfaser	HOFFMANN (1990)
Chewing Index Value	KRISTENSEN & NØRGAARD (1987) NØRGAARD (1990)
Pansenpufferkapazität	ERDMANN (1988)
Neutrale Detergentienfaser (NDF)	NRC (1989), NRC (2001)
NDF aus Gesamtration,	
NDF aus Grundfutter	
Strukturwert (SW)	DE BOEVER <i>et al.</i> (1993a,b) DE BRABANDER (1999)
physikalisch effektive Faser (peNDF)	MERTENS (1997)

Eine genaue Ermittlung des Mindestbedarfes an strukturierter Faser ist jedoch bis heute noch nicht eindeutig gelungen. In Kenntnis dieser Situation informiert die GFE (2001) über verschiedene Vorschläge zur Berücksichtigung der Strukturwirksamkeit von Futtermitteln bei der Rationsgestaltung von Milchkühen. Hierbei wird speziell auf Arbeiten von HOFFMANN (1990) und PIATKOWSKI *et al.* (1990) zur „strukturwirksamen Rohfaser“ sowie DE BRABANDER *et al.* (1999) zum „Strukturwert“ von Futtermitteln eingegangen.

Da die Grundfuttermittel in den meisten Rationen die alleinige Quelle für strukturwirksame Rohfaser sind, ist zudem der Zerkleinerungsgrad des Ausgangsmaterials, insbesondere die Partikellänge (PL) von großer Bedeutung. In einer Untersuchung von FAHEY und BERGER (1988) konnte beobachtet werden, dass bei Rationen mit ausreichendem NDF-Gehalt, jedoch geringem Anteil an langen Futterpartikeln, dieselben Gesundheitsstörungen bei Milchkühen beobachtet werden konnten, wie bei Rationen mit unzureichendem Faseranteil. Dieser Tatsache zur Folge wurde das Konzept der physikalisch effektiven Faser (peNDF) von MERTENS

(1997) entwickelt. Neben der in den Futtermitteln enthaltenen NDF berücksichtigt das Konzept zusätzlich auch die unterschiedliche Fähigkeit von Futtermitteln, die Kauaktivität der Kühe zu beeinflussen. Die peNDF wird als NDF des Anteils eines Futtermittels definiert, der bei Durchführung eines definierten Trockensiebverfahrens auf einem 1,18 mm Sieb zurückbleibt (peNDF>1,18) (MERTENS, 2000), während LAMMERS *et al.* (1996) die peNDF anhand einer Siebung im Penn State Particel Separator (PSPS) ermitteln. Hierbei wird der zurückgehaltene TM-Anteil in einem 19 und 8 mm Sieb erfasst. Als Vorteil des PSPS erweist sich dessen Einsatzmöglichkeit vor Ort. KONONOFF & HEINRICHS (2003a, b) bestimmten in ihren Untersuchungen den Anteil an peNDF durch ein zusätzliches Sieb (1,18mm) im PSPS. Somit erfassten die Autoren den Partikel-Rückstand in einem 19, 8, 1,18 mm Sieb.

Die Empfehlung zur Strukturversorgung liegt bei mindestens 25 % NDF in der TM-Aufnahme, wobei mindestens 75 % der NDF aus dem GF stammen sollten (NRC, 2001). Zur Erhaltung eines pH-Wertes im Pansen von mindestens 6 wird ein peNDF-Gehalt von 22 % in der TM festgelegt. Während für einen Milchfettgehalt von 3,4 % bei Kühen der Rasse „Holstein“ in der frühen und mittleren Laktationsphase ein peNDF-Anteil von mindestens 20 % in der TM der Gesamtration empfohlen wird (FACHOWSKY *et al.*, 2004a).

Es ist noch nicht eindeutig geklärt, welche Messmethode für die peNDF die exakteste Beurteilung von Rationen hinsichtlich ihrer Effektivität für die Kauaktivität und Pansenfermentation liefert. Ausgehend davon wurden in den letzten Jahren einige Untersuchungen an Milchkühen durchgeführt. Dabei zeigte sich jedoch, dass die verschiedenen Messmethoden auch zu unterschiedlichen Ergebnissen führten (YANG *et al.*, 2001; KRAUSE *et al.*, 2002b; BEAUCHEMIN *et al.*, 2003; KONONOFF *et al.*, 2003b; BEAUCHEMIN & YANG, 2005; YANG & BEAUCHEMIN, 2006a).

Es ist allgemein akzeptiert, dass mit abnehmender PL des GF die Strukturwirksamkeit von Rationen reduziert werden kann und zusammen mit weiteren Faktoren, besonders dem Kraftfutteranteil, die Wiederkäuergerechtigkeit von Rationen beeinträchtigt wird (STEINWIDDER & ZEILER, 2003; BEAUCHEMIN & YANG, 2005).

Sowohl die aktuellen DLG-Informationen (2001) als auch das NRC (2001) geben in diesem Zusammenhang jedoch nur unzureichend Auskunft über eine optimale PL des Futters, da bislang noch kein ausgereiftes System für die Bewertung vorliegt. Die Anwendung des Konzeptes der peNDF wird vom NRC (2001) sogar eher kritisch beurteilt, wobei das Konzept als nicht ausreichend bestätigt angesehen wird, weil für zu wenige Futtermittel Werte vorliegen und Empfehlungen zur Versorgung nicht abgeleitet werden können (FLACHOWSKY *et al.*, 2004a).

### 1.1.2. Das Kraftfutter

Da mittlerweile eine beachtliche Anzahl von Betrieben mittlere Herdenleistungen von 8000-9000 kg Milch pro Kuh und Jahr aufweisen, ist neben einer Versorgung der Tiere mit qualitativ hochwertigem Grundfutter der Einsatz von konzentrierten Kraftfuttermitteln notwendig, um dem hohen Energiebedarf der Tiere gerecht zu werden (SCHWARZ, 2000, KIRCHGEßNER, 2004).

Handelsübliche Milchleistungsfutter bzw. Kraftfutter (KF)-Komponenten werden üblicherweise nach ihrem Energiegehalt beurteilt und dementsprechend in Rationen für Milchkühe bis zum Erreichen der gewünschten Energiezufuhr eingesetzt. Hauptbestandteil der KF-Komponenten sind - wie auch beim GF - die Kohlenhydrate (> 60 % der OS) (DE VISSER *et al.*, 1990). Dennoch sind zwischen den einzelnen Kraftfuttermitteln große Variationen in der Kohlenhydratzusammensetzung (SC oder NSC) gegeben, welche sich auf das Ausmaß und den Ort der Kohlenhydratverdauung entscheidend auswirken können. Die Futteraufnahme und letztlich auch die Energieversorgung von Milchkühen kann dadurch stark beeinflusst werden. So ist z.B. die ruminale Abbaurate der Stärke von Weizen deutlich höher als die der Maisstärke (HERRERA-SALDANA, 1990; OKE, 1991). In Tabelle 2 sind häufig eingesetzte Konzentratfuttermittel zusammengefasst, die sich hinsichtlich ihres ruminalen Abbauverhaltens unterscheiden.

Tabelle 2: Abbauverhalten von Kohlenhydraten ausgewählter Konzentratfuttermitteln im Vormagen, Angaben je kg TM (DLG, 2001).

	TM %	Kohlenhydrate <sup>1</sup>			Geschwindigkeit des Abbaus <sup>2</sup>
		Gehalt g/kg	Ausmaß des Abbaus %	abbaubare Menge g/kg	
Gerste	88	822	80	658	++++
Weizen	88	823	80	658	++++
Melasseschnitzel, zuckerreich	91	782	70	547	++++
Erbsen	88	700	80	560	++++
Citrustrester	90	700	80	560	++++
Maiskleberfutter	89	641	70	449	+++
Sojaextraktionsschrot, 44 % XP	88	408	80	326	+++
Sojabohnenschalen	90	795	70	557	++
Rapsextraktionsschrot, 00- Typ	89	497	70	348	++
Palmkernexpeller, 4-8 % Fett	91	674	60	404	++
Mais	88	832	50	416	+

++++ = sehr schnell, >15 % /h, +++ = schnell, 15-10 % /h, ++ = mittel, <10-5 % /h, + = langsam, < 5 % /h

<sup>1</sup> TM-(XA+XP+XL)

<sup>2</sup> Abbaugeschwindigkeit, % /h

Ein ruminaler By-pass der Stärke ist besonders bei hohen Milchleistungen von Interesse, da mit zunehmender Milchleistung entsprechend höhere Mengen an Protein, Fett, Lactose und weiteren Nährstoffen über die Milchdrüse abgegeben werden müssen. Dies erfordert eine sehr hohe Syntheseleistung vor allem von der Leber und der Milchdrüse. Der Glucosebedarf einer Kuh beträgt das 1,5 fache der Laktosemenge, die mit der Milch abgegeben wird (ABEL, 1995). Da der größte Teil der Glucosequellen im Pansen zu flüchtigen Fettsäuren fermentiert wird, werden somit - insbesondere bei hohen Milchleistungen - zunehmende Ansprüche an die Gluconeogenese gestellt. Aus diesem Grund sollte ein größerer Anteil der Stärke enzymatisch im Dünndarm abgebaut werden, um ein Energiedefizit, sowie eine Mobilisierung der Körperreserven in Verbindung mit der Gefahr einer Ketose umgehen zu können (FLACHOWSKY *et al.*, 2004b). MATTÉ *et al.* (2001) konnten aber nachweisen, dass die Nutzung der am Dünndarm angefluteten Stärke auf etwa 2 kg begrenzt ist.

Eine Verabreichung hoher Mengen an schnell fermentierbaren, hochverdaulichen Kohlenhydraten, wie Zucker und Stärke, ist jedoch im Hinblick auf eine wiederkäuergerechte Ernährung nicht möglich. Um dennoch den Energieansprüchen hochleistender Milchkühe gerecht zu werden, ohne dabei die Gefahr einer Pansenacidose einzugehen, werden teilweise KF-Komponenten mit höheren Rohfasergehalten eingesetzt. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Nebenprodukte aus der Getreide- und Zuckerrübenverarbeitung. In der englischen Literatur werden diese Futtermittel als „Non-Forage Fiber Sources“ (NFFS) bezeichnet und teilweise sogar als Alternative zum GF diskutiert (ALLEN & GRANT, 2000). Der NDF-Gehalt liegt bei den NFFS, ähnlich wie bei den Grundfuttermitteln, zwischen 40 bis 60 % in der TM. Jedoch ist die PL ihrer Faserbestandteile deutlich kürzer als jene des GF, weshalb die NFFS nicht zu einer stabilen Faserschicht im Pansen beitragen können. Dennoch ist die Verdaulichkeit ihrer Faserbestandteile höher im Vergleich zu den meisten Grundfuttermitteln und ihr größter Vorteil liegt wohl in ihrer deutlich höheren Energiekonzentration (ALLEN & VOELKER, 2003). Auf Basis von Wiederkaumessungen sowie Untersuchungen zur Pansenfermentation und Leistungsparametern wurden hierzu einige Untersuchungen bereits durchgeführt (FIRKINS, 1997; HARMINSON *et al.*, 1997; CLARK & ARMENTANO, 1997; ALLEN & GRANT, 2000; VOELKER & ALLEN, 2003a, b, c; BECKMAN & WEISS, 2005), auf die in den folgenden Kapiteln näher eingegangen werden soll.