

Die Fütterung der Milchkuh besteht in erster Linie in der Nährstoffversorgung der Mikroorganismen des Pansens

Optimale Vormagenfunktion – Voraussetzung für hohe StoffwechsellLeistungen

Von Prof. Dr. N. Rossow

Allgemeines

Kühe haben zwei verschiedene Systeme, in denen die Umsetzung der mit dem Futter aufgenommenen Nährstoffe erfolgt:

- Das mikrobielle System des Pansens
- Den postruminalen Verdauungstrakt für Nährstoffe, die dem mikrobiellen Abbau in den Vormägen entgehen.

Die Verdauungsvorgänge beim Wiederkäuer zeichnen sich durch umfangreiche bakterielle Umsetzungen der aufgenommenen Nährstoffe in den Vormägen aus. Hauptprodukte der bakteriellen Fermentationsprozesse der **Kohlenhydrate** sind **flüchtige Fettsäuren (Acetat, Propionat, Butyrat) und Pansengase (Kohlendioxid, Methan u.a.)**. Außerdem liefern Kohlenhydrate die erforderliche Energie für das Wachstum der Vormagenbakterien. Ein Teil der Stärke (beständige Stärke) erreicht unverdaut den Dünndarm und wird hier in Monosaccharide zerlegt.

Die **Futterproteine** werden zu Peptiden, Aminosäuren und zu einem großen Teil bis zu Ammoniak abgebaut und für die Synthese von **Mikrobenprotein** herangezogen. Ein Teil des Futterproteins (nichtabbaubares Protein, UDP) entgeht dem Abbau in den Vormägen und gelangt in den Labmagen bzw. Dünndarm. Mikrobenprotein und nichtabbaubares Protein bilden das darmverdauliche Protein nXP, das im Dünndarm in Aminosäuren zerlegt wird.

Fette sind im Rinderfutter nur in sehr geringer Menge vorhanden. Sie werden im Pansen bakteriell gespalten und entweder zu gesättigten Fettsäuren hydrogeniert oder als Phospholipide für den Aufbau der Zellmembran der Pansenbakterien verwendet. Im Dünndarm werden die gesättigten Fettsäuren in sogenannte **Micellen** eingebaut, die sich bei Kontakt mit dem Bürstensaum der Darmzelle auflösen und ihren Inhalt in diese ergießen. In der Dünndarmzelle werden sie weiter umgewandelt und zu Triglyzeriden resynthetisiert, mit einer Proteinhülle umgeben und als **Chylomikronen** auf dem Lymphweg aus der Zelle entlassen.

Wiederkäuer leben in enger Symbiose mit Mikroorganismen, die ihre Vormägen besiedeln. Das Wirtstier liefert den Mikroben Nährstoffe und bietet ihnen ein optimales Milieu für die Vermehrung. Die Mikroorganismen liefern dem Wirtstier ihre Stoffwechselprodukte und sich selbst (BLUM, 2001). 99,5 % der Mikroorganismen sind obligate Anaerobier. Pro Milliliter Panseninhalt sind 10^{10} bis 10^{12} Bakterien anzutreffen. Sie finden im Vormagenmilieu bei einem pH-Bereich von 6,0 bis 7,0, einer Temperatur von 39° C und einem osmotischen Druck von 260 bis 280 mOsm optimale Bedingungen.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Vormagenverdauung übt die **physikalische Struktur** aus.

Längere Futterpartikel verweilen länger im Pansen und reduzieren die Geschwindigkeit des Ingestaflusses in den Pansen. Kleine Partikel besitzen dagegen eine höhere Passagerate und ein höheres spezifisches Gewicht. Es besteht eine positive Beziehung zwischen Strukturangebot, Kau- und Wiederkauaktivität sowie Speichelsekretion. Speichel hat einen alkalischen pH-Wert von 8,4 und enthält viel Puffersubstanzen (Bikarbonatpuffer, Phosphatpuffer), um die fermentierten flüchtigen Fettsäuren zu neutralisieren. Die täglich sezernierte Speichelmenge liegt bei bis zu 200 Litern. Ist sie vermindert, sinkt der pH-Wert im Panseninhalt unter 6, was Auswirkungen auf die mikrobiellen Fermentationsprozesse, die Pansenmotilität und die Höhe der Futteraufnahme hat. Ein erniedrigter pH-Wert ist mit einem reduzierten Acetat-Propionat-Verhältnis verbunden, was sich in einem Abfall des Milchfettgehaltes äußert. Die Milchfettsenkung ist das Hauptsymptom eines Mangels an strukturierter Rohfaser in der Ration. Strukturierte Rohfaser ist bedeutsam für die Ausbildung des schwammartigen Netzgeflechtes im Pansen. Dieses sorgt dafür, dass größere Partikel länger im Pansen verbleiben und für den bakteriellen Abbau verfügbar sind. Das Netzgeflecht sorgt dafür, dass der Pansen nach dem Prinzip eines Extraktionsapparates arbeiten kann. Ein Mangel an strukturierter Rohfaser ist auch die entscheidende Ursache von Pansenacidose, Futterverweigerung und Durchfall.

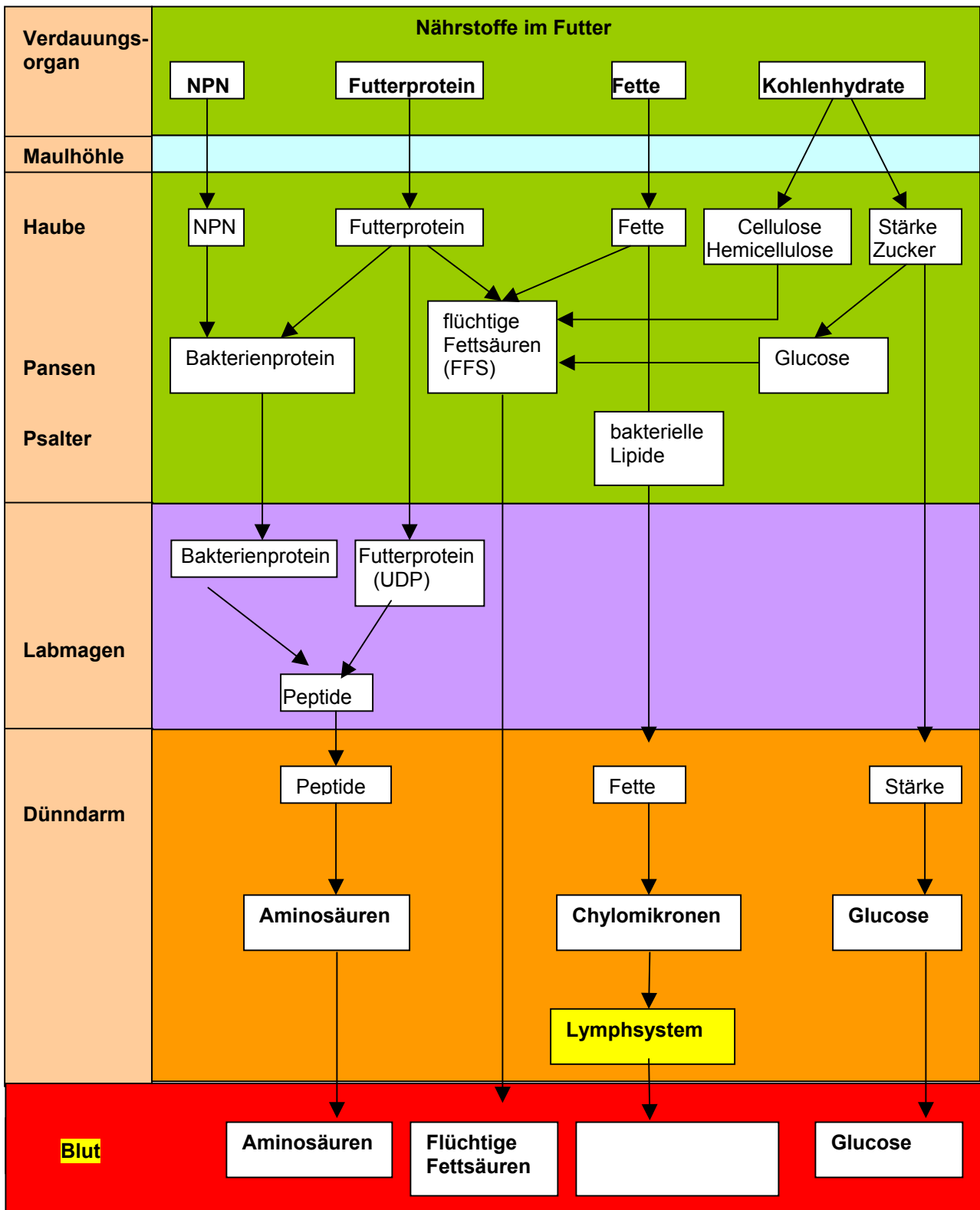


Abb. 1: Verdauung und Resorption der Nährstoffe im Verdauungstrakt des Wiederkäuers. Der Labmagen sezerniert im Gegensatz zu den Vormägen Verdauungssekrete und stellt somit den eigentlichen Magen oder Drüsenmagen dar.

Voraussetzungen für optimale Verdauungsabläufe:

- Temperatur von $39 \pm 2^\circ \text{C}$
- intensive Fermentation und großflächige Absorption von flüchtigen Fettsäuren
- ungestörter Ausstoß (Eruktion) von Fermentationsgasen
- pH-neutrales Milieu (6 – 7). Bei $\text{pH} < 5,7$ sinkt die mikrobielle Proteinsynthese um die Hälfte, sinkt die Rate der mikrobiellen Fermentation von flüchtigen Fettsäuren und wird mehr Laktat aber weniger Acetat fermentiert.
- ausreichende Speichelproduktion (ca. 200 Liter/Tag) und Pufferzufuhr
- Wiederkauzeiten von 10 bis 12 Stunden am Tag zwecks Reduktion der Partikelgröße, Vergrößerung der Angriffsfläche für die Bakterien und ausreichende Speichelzufuhr
- Ausbildung eines schwammartigen Netzgeflechtes, das auf einer Flüssigkeitsschicht schwimmt. Letzteres bremst die Passagegeschwindigkeit der Ingesta durch die Vormägen und gewährleistet, dass die mikrobiellen Abbauprozesse ausreichend lange ablaufen können.

Faktoren, die das mikrobielle Wachstum maximieren:

- hohe T-Aufnahme
- Bilanzierung der Kohlenhydrat- und Proteinfractionen in der Ration (Pansensynchronisation)
- leicht verdauliche Kohlenhydrate liefern die notwendige Energie für ein maximales Bakterienwachstum
- pansenverfügbares Protein beeinflusst entscheidend das gesamte Fermentationsgeschehen und das mikrobielle Wachstum
- Anpassungszeit von 3 bis 4 Wochen bei Rationswechsel
- Sicherung eines möglichst neutralen pH-Wertes in der Pansenflüssigkeit
- Gewährleistung einer Futteraufnahme rund um die Uhr

Faktoren, die das mikrobielle Wachstum hemmen:

- plötzlicher Futterwechsel
- nährstoffarme Rationen
- schlechte Pansensynchronisation
- Fütterung zu großer Mengen ungesättigter Fette (hemmen Rohfaserabbau und Mikrobewachstum)
- Fütterung zu großer Mengen nicht strukturierter Kohlenhydrate
- unzureichendes Angebot an pansenverfügbarem Protein
- Ungleichgewicht zwischen Laktatproduzenten und Laktatverwertern.

Untrügliche Anzeichen einer gestörten Vormagenfunktion sind:

- reduzierte Futteraufnahme
- reduzierte Vormagenmotorik, unterdrücktes oder fehlendes Wiederkauen
- viel ungenügend verdaute Getreidepartikel, dünnbreiiger Kot
- Abfall des Milchfettgehaltes
- Abfall des Milcheiweißgehaltes
- gehäuftes Auftreten von Klauenproblemen

Aufbau und Funktion der Vormägen

Der Magen des Rindes besteht aus den drei Vormägen Haube (Reticulum), Pansen (Rumen) und Psalter (Omasum) sowie aus dem Labmagen (Abomasum), dem eigentlichen Drüsenmagen.

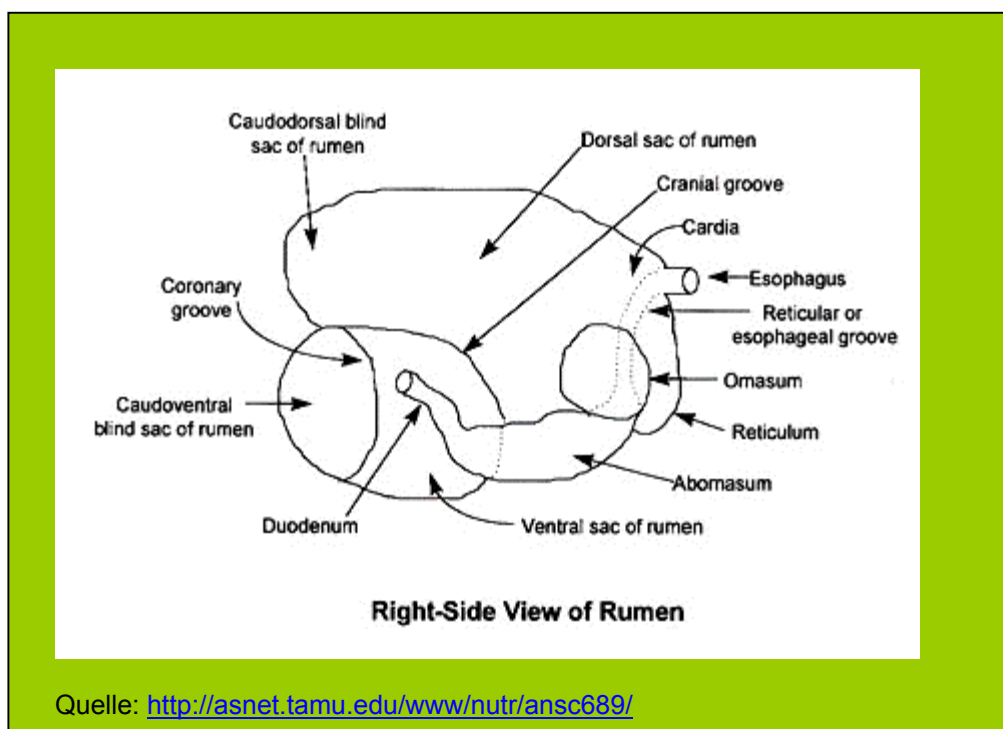


Abb. 2: Vormagen-Labmagen-Komplex rechte Seite

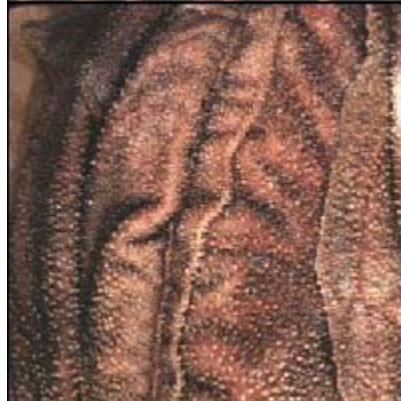
Abb. 3a: Die Pansenschleimhaut besteht aus zahlreichen Papillen, die in Gestalt und Größe variieren, man findet kurze und warzenartige sowie lange, blattartige.



Abb. 3b.: Das Epithel der Haube besteht aus polygonal angeordneten Falten von bienenwabenartiger Struktur. Zahlreiche kleine Papillen kleiden die Wände dieser Waben aus.



Abb. 3c.: Das Innere des Psalters besteht aus breiten Längsfalten oder Blättern, ähnlich den Seiten eines Buches. Sie besitzen eine raue, sandpapierähnliche Auskleidung.



Quelle Abb. 3a – 3c:

http://arbl.cvmbs.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/herbivores/rumen_anat.html

Netzmagen (Haube, Reticulum)

Hauptfunktionen

- Wabenartige Struktur des Epithels sammelt unverdauliche Fremdkörper
- Sortiert Futterpartikel nach Größe und transportiert sie in den Psalter
- Formt Wiederkaubissen
- Leitet Wiederkauakt ein

Die **Haube** ist der tiefste Punkt des Komplexes. Metallische oder größere unverdauliche Fremdkörper, die mit dem Futter aufgenommen wurden, sammeln sich hier. Dabei wirkt die wabenartige Struktur (Abb. 3b) wie ein Sieb und verhindert, dass die Fremdkörper weiter transportiert werden. Futter, das in die Haube gelangt, wird später regurgitiert und wiedergekaut. Die Haube hat ein Fassungsvermögen von bis zu 9,5 Litern unverdauter und in Verdauung befindlicher Ingesta. **Sie sortiert die Ingesta nach der Partikelgröße.** Partikel, die < 1 – 2 mm lang sind und eine Dichte von > 1,2 g/ml haben, werden über die **Hauben-Psalter-Öffnung** dem Psalter zugeführt. Die Haube leitet mit einer starken Kontraktion die Kontraktionswelle ein, die sich auf den gesamten Pansen ausbreitet und der Durchmischung der Ingesta dient. Die Haubenkontraktion ist gleichzeitig verbunden mit der Rejektion des Bissens in die Maulhöhle.

Erkrankungen durch Fremdkörper in der Haube lassen sich durch sogenannte **Fremdkörperschmerzproben** diagnostizieren. Sie dienen dazu, eine im Haubenbereich vorhandene erhöhte Schmerzhaftigkeit des Bauchfells zu ermitteln. Im positiven Fall äußern die Tiere einen stimmhaften ächzenden kurzen stöhnenden Klagelaut. Zu den häufigsten Schmerzproben zählen Rückengriff, Stabprobe, das Bergauf- und Bergabführen und die Schmerzperkussion der Haubengegend.

Spitze Fremdkörper verursachen im einfachsten Fall eine Netzmagenentzündung, häufig ist aber auch das Bauchfell mit einbezogen. Gelegentlich wandern die Fremdkörper in die Brusthöhle ein, und es kommt zu einer Entzündung und Vereiterung des Herzbeutels.

Pansen (Rumen)

Hauptfunktionen

- Riesiger Gärbehälter von 170 bis 200 Liter Fassungsvermögen. Beherbergt anaerobe Mikroben
- Das Fermentationsprodukt sind flüchtige Fettsäuren (Acetat, Propionat, Butyrat u.a.)
- Epithel trägt Pansenzotten, dienen der Oberflächenvergrößerung der Resorptionsfläche
- Panseninhalt besitzt Schichtstruktur: Gas, schwammartiges Netzgeflecht, Flüssigkeit

Der **Pansen** ist ein großes muskulöses Hohlorgan. Er entwickelt sich zu seiner späteren anatomischen Größe und Funktion, wenn das Kalb feste Futterstoffe aufnimmt. Er ist ein Fermentationsorgan von hoher mikrobieller Aktivität mit einem Fassungsinhalt von 170 bis 200 Litern. Die drüsenlose Schleimhaut ist mit 1,2 cm langen Zotten besetzt, die im ventralen Bereich am dichtesten sind. Sie vergrößern die Oberfläche der Pansenschleimhaut und damit die Absorptionsfläche (Abb. 3a).

Die kräftige Muskulatur des Pansens mischt den Inhalt, gewährleistet den Weitertransport der Ingesta, sortiert die größeren Partikel für das Wiederkauen, zerkleinert die Futterpartikel und erleichtert ihre mikrobielle Verdauung.

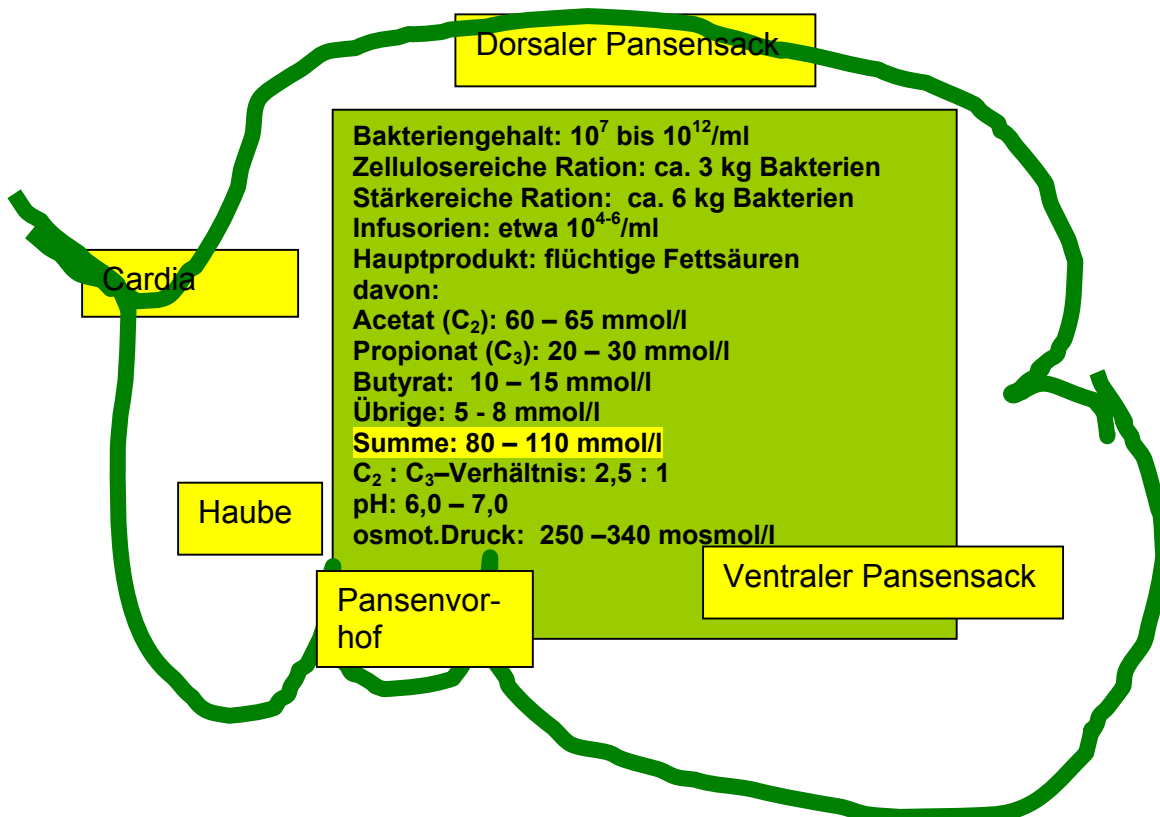


Abb. 4: Mikrobielle Aktivität der Vormagenflora. Pansenbakterien haben folgende Nährstoffzusammensetzung:

Gesamt-N: 5-12,4 (10) %, davon wahres Protein: 38-55 (47,5) %, Polysaccharide: 6-23 (11,5) %, Lipide: 4-25 (7) %, verdauliche N-Verbindungen: 44-86 (71) %.

Blättermagen (Psalter, Omasus)

Hauptfunktionen

- Saug- und Druckpumpe des Vormagensystems
- Zerkleinerung der Faserpartikel
- Resorption von Wasser und Elektrolyten
- Resorption von flüchtigen Fettsäuren

Der Psalter fungiert als **Saug- und Druckpumpe** des Vormagensystems und ist ein Resorptionsorgan für flüchtige Fettsäuren, Wasser und darin gelöste Mineralstoffe. Er hat ein Fassungsvermögen von bis zu 15 Litern. Im Psalter werden die Partikel des Vormageninhaltes zwischen den Psalterblättern (Abb. 3c) zerrieben und auf den Weitertransport in den Labmagen vorbereitet.

Mit der Erschlaffung des Psalters bei gleichzeitiger Freigabe der Hauben-Psalteröffnung wird Haubeninhalt in den Psalterkanal und zwischen die Psalterblätter gesaugt. Während sich die Öffnung wieder schließt, kontrahiert sich die Psalterbrücke, wobei der Inhalt zwischen die Blätter gepresst wird. Anschließend befördert die Kontraktion des Psalters die flüssigkeitsärmere Ingesta in den Labmagen weiter.

Vormagenmotorik

Alle 2 bis 3 Minuten läuft ein Kontraktionszyklus am Pansen ab, der mit der in der linken Hungergrube fest aufgedrückten flachen Hand deutlich spürbar ist. Die höhere Frequenz besteht während der Fütterung, die niedrigere in den Fresspausen. Die **Hauptfunktion der Vormagenmotorik** ist die

- Trennung des zu fermentierbaren Panseninhaltes von den Fermentationsprodukten und dem nicht fermentierbaren, d.h. zu eliminierenden Rest.
- Mischung und das Auspressen des Panseninhaltes, um die Resorption der Endprodukte zu fördern.
- Mischung des Panseninhaltes, um die mikrobiellen Fermentationsabläufe auf hohem Niveau zu halten.
- Trennung des Panseninhaltes nach Partikelgröße durch Dekantieren und Abtransport der in der Flüssigkeit suspendierten Partikel in die postruminalen Abschnitte.

Die motorische Funktion der Haube umfasst:

- Transport von flüssigem Haubeninhalt in den Pansenvorhof
- Transport von flüssigem Haubeninhalt in den Psalter
- Transport spezifisch leichter (grober) Futterpartikel in den dorsalen Pansensack
- Unterstützung des Wiederkauaktes

Man kann zwischen Primär- und Sekundärkontraktionen unterscheiden.

Primäre Kontraktionen (A-Wellen) beginnen mit einer biphasischen Kontraktion der Haube. In der ersten Kontraktionsphase wird flüssiger Haubeninhalt in den Pansenvorhof gepresst. In der zweiten strömt flüssiger Haubeninhalt in den Psalter ein. Zeitgleich mit der 2. Kontraktionsphase der Haube kontrahiert sich auch der kraniale Pansenpfeiler. Dadurch verbleibt ein großer Teil des aus der Haube ausgepressten Inhalts im Pansenvorhof. Gleichzeitig mit der nun einsetzenden vollständigen Erschlaffung der Haube kontrahiert sich der Pansenvorhof, und ein Teil des flüssigen Inhaltes strömt in die Haube zurück. Grobe Futterpartikel, die auf der flüssigen Schicht des Pansenvorhofes schwimmen, und ein Teil der Flüssigkeit werden nach dorsal und kaudal gepresst.

Nunmehr erfasst die Kontraktionswelle den dorsalen Pansensack und den kaudalen Pansenpfeiler. Beide kontrahieren sich und der Inhalt des dorsalen Pansensackes wird durch eine enge Öffnung in den erschlafften ventralen Pansensack gepresst. Anschließend kontrahiert sich der ventrale Pansensack. Überwiegend flüssiger Inhalt strömt in den dorsalen Pansensack ein und durchmischt die größeren Futterpartikel.

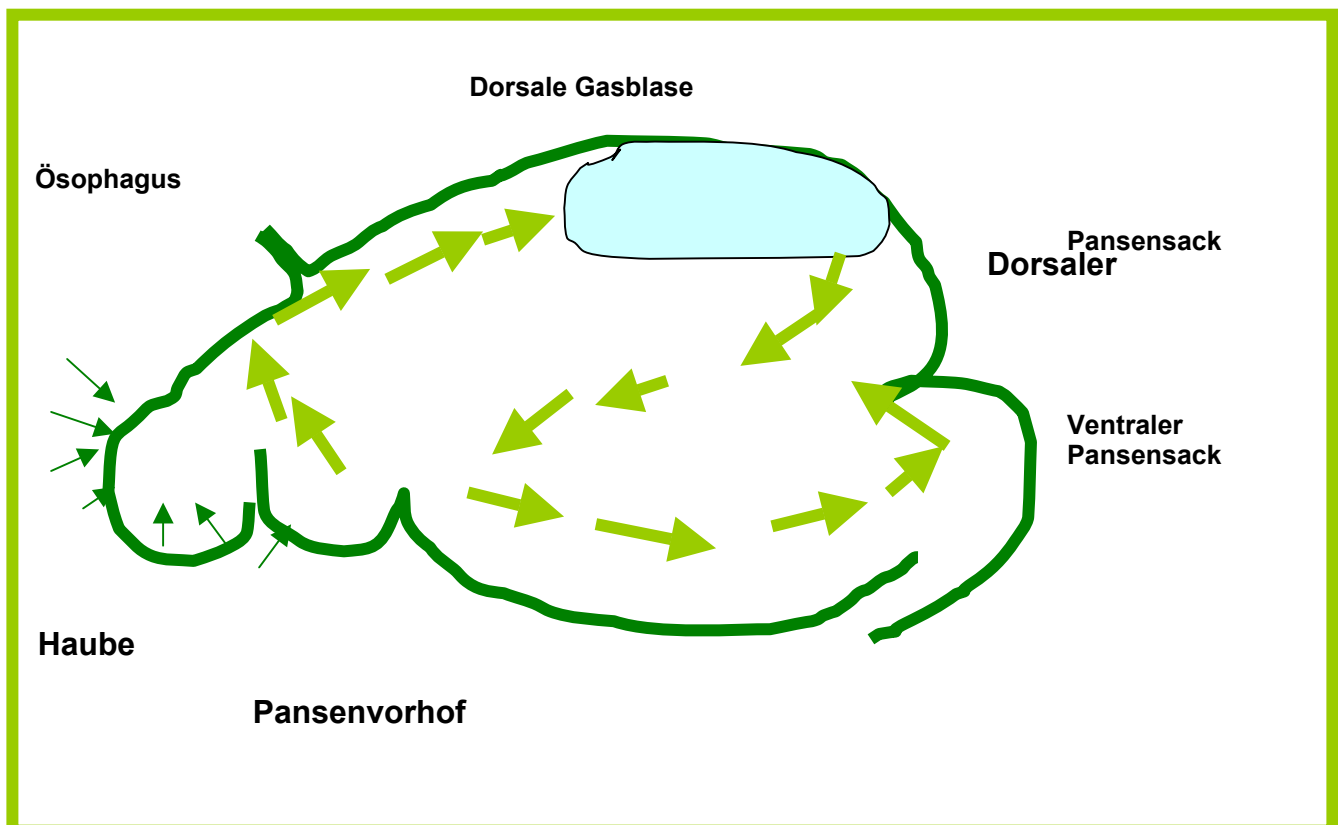


Abb. 5: Primärkontraktion der Haube und des Pansens (A-Welle). Sie beginnt mit der Haubenkontraktion und dient der Durchmischung des flüssigen und der Umwälzung des festen Inhaltes (nach HASCHKE und DIENER).

Sekundäre Kontraktionen (B-Wellen) dienen vor allem der Entfernung der Pansengase. Diese sammeln sich im kaudalen Teil des dorsalen Pansensackes an, wobei die Dehnung der Pansenwand die sekundäre Kontraktionswelle auslöst. Zunächst kommt es zur Kontraktion des kaudalen Bereiches des ventralen Pansensackes. Von dort aus schreitet die Kontraktionswelle nach dorsal und erfasst den kaudalen Teil des dorsalen Sackes, in dem sich die Gasblase befindet. Beim Weiterlaufen nach kranial schiebt sie die Gasblase zur Einmündung der Speiseröhre. Das Gas entweicht. Nach der Kontraktion des kranialen Pansenfeilers und der kranialen Bereiche des ventralen Sackes startet der Zyklus erneut.

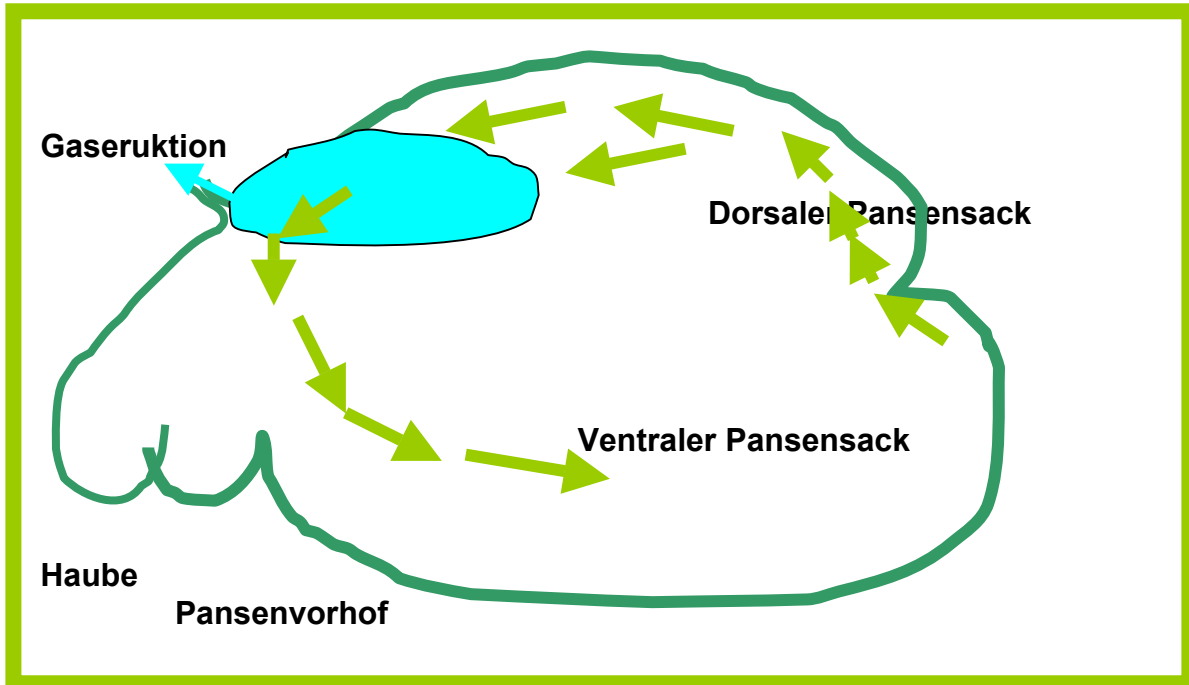


Abb. 6: B-Welle der Pansenmotorik. Sie dient der Entfernung der Pansengase und betrifft nur den Pansen, nicht die Haube (nach HASCHKE und DIENER).

Das zentralnervale **Steuerungszentrum der Vormagenmotorik** befindet sich in der Medulla oblongata. Es wird von hemmenden und fördernden Impulsen beeinflusst, die von verschiedenen Rezeptoren ausgehen. Bei Mangel an strukturierter Rohfaser wird der tonische Erregungseffekt herabgesetzt, an das verlängerte Rückenmark, in dem sich das nervale Vormagenzentrum befindet, werden nur schwache Impulse abgegeben. Die Vormagenmotorik wird vermindert.

Die Rezeptoren in der Vormagenschleimhaut sind außer für mechanische auch für chemische Reize empfänglich. Von besonderer Bedeutung sind Konzentration und Dissoziationsgrad der flüchtigen Fettsäuren (FFS). **Hohe Konzentrationen hemmen die Pansenbewegungen, niedrige stimulieren sie.** Die Gesamtkonzentration der FFS liegt bei reiner Heufütterung bei etwa 50 bis 60 mmol/l. Bei konzentratreichen Rationen kann sie sich dagegen verdoppeln. Da die FFS vorwiegend in ihrer nicht-dissoziierten Form resorbiert werden, bedeutet eine FFS-Konzentration von 50 bis 60 mmol/l mit einem pH-Wert von 6,4 bis 7,0, dass höchstens 1 bis 3 mmol FFS/l Panseninhalt in nichtdissoziierter Form vorliegen. Die Resorption geht verhältnismäßig langsam vor sich. Steigt die Konzentration an FFS hingegen über 100 mmol/l an, erniedrigt sich der pH-Wert auf < 6,4 und der Anteil der nichtdissoziierten FFS-Fraktion erhöht sich auf über 8 mmol/l. Neben einer reflektorischen Hemmung der Pansenbewegungen erhöht sich die Resorptionsrate der FFS, was zu Belastungen des Säuren-Basen-Haushaltes führen kann.

Netzgeflecht (fibrous mat)

Struktur und Zusammensetzung des Panseninhaltes wird von der Beschaffenheit des Futters und verschiedenen physikalischen Faktoren bestimmt. Es sind dies: Teilchenlänge, Starrheit der Partikel, Dichte (spezifisches Gewicht) und Mahlwiderrstand. Normalerweise existiert eine **deutliche Schichtung**. Bei Rationen mit ausreichendem Gehalt an strukturierter Rohfaser schwimmt ein mächtiges **Netzgeflecht** (fibrous mat) vollgesogen mit Flüssigkeit auf einer flüssigen Schicht. Dieses Geflecht enthält das frisch aufgenommene Futter, das z.T. noch wiedergekaut werden muss, aber auch das Futter vom Vortag. Es ist der Hauptsitz der mikrobiellen Aktivität. Ohne seine Existenz ist ein stabiler Fermentationsprozess nicht möglich. Mit Hilfe dieses Geflechtes arbeitet der Pansen nach dem **Prinzip eines Extraktionsapparates**. Durch die Kontraktionen presst er die mit flüchtigen Fettsäuren beladene Flüssigkeit aus dem Geflecht heraus und spült sie an die Schleimhautoberfläche bzw. die Pansenzotten. In den Kontraktionspausen saugt sich das schwammartige Geflecht wieder voll. Entnimmt man eine Pansensaftprobe und füllt sie in ein Reagenzglas, kann man beobachten, wie größere mit Gasbläschen behaftete Partikel nach oben schwimmen und kleinere sedimentieren bzw. suspendieren. Kippt man das Glas, so verbleibt die Schwimmschicht im Glas, während sich die Flüssigkeit entleert. Dieser Vorgang (**Dekantierung**) vollzieht sich auch ständig im Pansen. Damit wird eine Trennung des Panseninhaltes nach Partikelgröße erreicht.

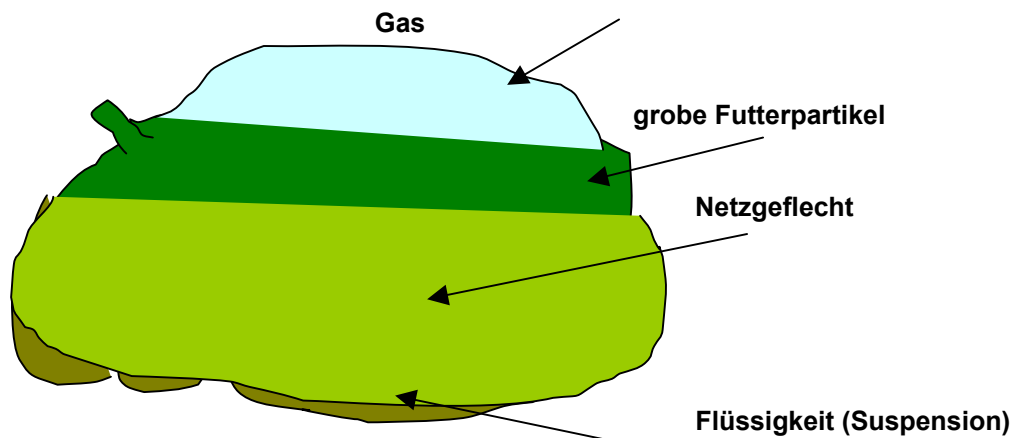


Abb. 7: Schichtung des Panseninhalts

- Oben: Gas
- Mitte: gefressenes Grundfutter vom heutigen Tag
- Darunter: Getreide und Grundfutter vom Tag zuvor (es bildet ein mächtiges Netzgeflecht)
- Ganz unten: Suspension aus feinen Partikeln und Flüssigkeit.

Die Passagegeschwindigkeit der festen Futterstoffe ist dank des bestehenden Netzgeflechtes verhältnismäßig langsam. Das sichert die erforderliche Zeitspanne für die Fermentationsabläufe. Wasser durchströmt den Pansen hingegen relativ schnell. Wird aber in großem Umfang rückresorbiert und mit dem Speichel wieder dem Pansen zugeführt. Mit zunehmender Dichte wandern die kleineren Partikel des Geflechtes, dicht beladen mit Pansenmikroben, langsam nach unten und vermischen sich mit der flüssigen Schicht, die ständig vom Netzgeflecht wieder aufgesogen und durch die Pansenkontraktionen nach oben befördert und über den Hauben-Psalterkanal in den Psalter geleitet wird. Bei strukturarmen Rationen mit hohem Getreideanteil unterbleibt die Ausbildung der Netzgeflechtes. Der Panseninhalt verflüssigt sich und besitzt eine visköse Konsistenz. Der Ablauf der mikrobiellen Prozesse erfolgt mit überhöhter Geschwindigkeit, was die Gefahr der Ausbildung einer Pansenacidose verstärkt.

Eine 630 kg schwere Milchkuh mit einer TS-Aufnahme von 20 kg/d hat eine Verweildauer der Ingesta im Pansen von 19,4 Stunden bei Getreide und von 30,3 Stunden bei Heu. Die Gesamtverweildauer im Verdauungstrakt liegt für Getreide bei 39,2 Stunden und für Heu bei 50,7 Stunden.

Gasbildung und Gaseruktion

Pro Stunde muss eine Kuh 30 bis 50 Liter Gas aus dem Pansen entfernen. Die bei der mikrobiellen Fermentation entstehenden **Pansengase** haben folgende Zusammensetzung:

- Wasserstoff 0,2 Vol. %
- Sauerstoff 0,5 Vol %
- Stickstoff 7,0 Vol %
- Methan 26,5 Vol %
- Kohlendioxyd 65,5 Vol %.

Die Zusammensetzung variiert in Abhängigkeit von der mikrobiellen Besiedlung. Täglich werden 500 bis 1000 Liter Gas durch die mikrobiellen Fermentationsprozesse im Pansen freigesetzt und abgerülpst. Störungen der Gaseruktion führen zur **Pansentympanie** und sind stets lebensgefährlich (s. Pansentympanie).

Die Gaseruktion wird ermöglicht durch eine sekundäre Kontraktionswelle des Pansens, bei der die dorsale Gasblase an die Einmündung der Speiseröhre gepresst wird. Das in die Speiseröhre einströmende Gas wird zum großen Teil eingeatmet und gelangt mit der Ausatemluft ins Freie.

Kauen, Wiederkauen und Speichelproduktion

Eine optimal gefütterte Kuh nimmt täglich etwa 9 Mahlzeiten zu sich und benötigt dazu eine durchschnittliche **Fresszeit** von insgesamt 25 min/kg T. Die **Wiederkauzeit** liegt bei durchschnittlich 41 min/kg T und verteilt sich auf 15 Wiederkauperioden. Die kritische Wiederkauzeit ist abhängig vom Grobfutteranteil der Ration und liegt bei 24 bis 27 min/kg T. Bei diesem Wert ist eine physiologische Vormagenfunktion nicht mehr gegeben.

Tab. 1: Mittleres Fress- und Wiederkauverhalten von Milchkühen bei unterschiedlichem Rationstyp (BRABANDER et al., 1999)

Rationstyp	Frischgras	Grassilage/Heu	Maissilage
Rohfasergehalt g/kg T	230	261	202
Grundfuttermittelverzehr kg T/d	11,0	11,8	14,1
Kauzeit min/kg T	71 ± 8	74 ± 10	59 ± 6
davon Fressen	34 ± 4	26 ± 5	20 ± 2
Wiederkauen	37 ± 4	47 ± 6	39 ± 4

Der als **Rumination** bezeichnete Vorgang des Wiederkauens wird eingeleitet durch eine Haubenkontraktion. Gleichzeitig erschlafft der Verschlussmechanismus der Speiseröhre und der Bissen (Bolus) gelangt in die Speiseröhre, deren Muskulatur ihn mit antiperistaltischen Bewegungen in den Rachenraum befördert. Mit der Zunge wird die Flüssigkeit aus dem Bolus herausgepresst und abgeschluckt. Der Bolus selbst wird intensiv wiedergekauet, dabei eingespeichelt und dann seinerseits abgeschluckt.

Vor der **Regurgitation** (Herausbeförderung) des Bissens ist eine tiefere Einatmung bei geschlossener Glottis bemerkbar, die durch einen leichten Flankenschlag unterbrochen wird. Man erkennt deutlich das Aufwandern des Bissens in der Speiseröhre. Nach Abschlucken des wiedergekaueten Bissens setzt eine Pause ein, bis sich der Vorgang wiederholt. Die Teilschritte laufen synchron mit der beschriebenen A-Welle ab.

Pro Tag werden in Abhängigkeit vom Gehalt an strukturierter Rohfaser 10 bis 20 Wiederkauperioden zu 15 bis 40 min beobachtet, d.h. ein Drittel des Tages kann auf das Wiederkauen entfallen. Strukturarme Rationen zeichnen sich dagegen durch eine beträchtliche Senkung der Wiederkauaktivität aus.

Durch das Wiederkauen wird die Ingesta weiter zerkleinert und für den mikrobiellen Abbau aufgeschlossen. Die Speichelsekretion in den Verdauungstrakt steht in direktem Zusammenhang mit der Kau- und Wiederkauzeit, und diese wiederum wird bestimmt vom Gehalt der Ration an strukturwirksamer Rohfaser. Bei einer täglichen Kauzeit von 6 bis 8 Stunden sezerniert eine Kuh etwa 170 bis 200 Liter Speichel.

Speichel ist reich an Natriumbikarbonat und Phosphat, die als Puffer im Vormagensystem fungieren. Er neutralisiert die mikrobiell entstandenen flüchtigen Fettsäuren und schafft dadurch ein optimales Milieu für das Bakterienwachstum.

Langheu stimuliert Rumination und Speichelsekretion am meisten. Reduziert werden Kauarbeit und Speichelabgabe bei Verfütterung von großen Konzentratmengen und gemahlenem oder feinhäckseltem Grundfutter.

Die Partikelgröße der verabreichten Ration bestimmt gleichzeitig die Strukturwirksamkeit der Rohfaser und hat erheblichen Einfluss auf die Pansenfunktion und Milchezusammensetzung (Tabelle. 2).

Tab. 2: Auswirkungen unterschiedlicher Partikelgrößen auf verschiedene Pansenfunktionen und Stoffwechsellleistungen (GRANT et al., 1990: Milk fat depression in dairy cows. Role of silage particle size. J. Dairy Sci. 73: 183442)

	Partikelgröße		
	fein	mittel	grob
Fresszeit min/24 h	195,3	204,4	204,7
Wiederkauzeit min/24 h	374,4	466,3	530,7
Gesamtkauzeit min/24 h	569,7	670,7	735,4
pH-Wert	5,3	5,9	6,0
FFS mol%			
Acetat	58,33	61,24	61,32
Propionat	22,34	20,16	19,46
Milchleistung kg/d	31	32	31
FCM kg/d	27	30	29
Milchfett %	3,0	3,6	3,8
Milcheiweiß %	3,0	3,0	3,1

Regulation von pH-Wert und osmotischem Druck im Pansen

Eine **Absenkung des pH-Wertes** erfolgt durch zeitweilig überhöhte Produktion von flüchtigen Fettsäuren und gleichzeitig verminderte Zufuhr von Pufferbasen mit dem Speichel oder eine übermäßige Bildung von Milchsäure. Der Speichel besitzt einen pH-Wert von 8,2 bis 8,4 und verfügt über einen hohen Gehalt an Puffern (Bikarbonatpuffer, Phosphatpuffer). Um diese ausreichend bereitzustellen, sind ca. 12 l Speichel/kg TS zu sezernieren. Sinkt die Speichelsekretion unter 10 l/kg TS ab, weil die Ration zu rohfasernarm ist, muss mit einer Beeinträchtigung der Pufferkapazität gerechnet werden. Es kommt zu einem pH-Abfall und einer latenten acidotischen Belastung.

Ein **Anstieg des pH-Wertes** im Pansen ist das Ergebnis einer verminderten Fermentation von flüchtigen Fettsäuren sowie einer erhöhten Basenbildung oder Basenzufuhr mit dem Futter. Ursache ist zumeist ein Rohproteinüberangebot, ein Mangel an leicht fermentierbaren Kohlenhydraten und ein zu geringer Futterverzehr. Durch die stark eingeschränkte Synthese von Mikrobenprotein steigt der Ammoniakgehalt im Pansen an und mit ihm der pH-Wert. Es kommt zur Ausbildung einer Pansenalkalose, die stets ein Zeichen geringer Fettsäureproduktion ist.

Der erhöhte Ammoniakgehalt veranlasst die Leber, unter erheblichem Energieaufwand Ammoniak zu Harnstoff zu entgiften. Dieser Vorgang wirkt sich äußerst nachteilig auf das Fruchtbarkeitsgeschehen und die Infektionsabwehr aus, wenn die Entgiftungskapazität der Leber überfordert ist. Freies Ammoniak senkt nämlich die Sekretion von Fruchtbarkeitshormonen (LH, Progesteron), besitzt einen toxischen Effekt auf Gameten und Embryo und senkt die Zahl von Abwehrzellen (Lymphozyten).

Nach schnellem Verzehr einer größeren Futtermenge steigt die Konzentration an flüchtigen Fettsäuren im Pansen zeitweilig stark an. Zusammen mit der Freisetzung von Ammoniak und Elektrolyten aus Futter und Speichel kommt es zu einem **Anstieg des osmotischen Druckes** im Pansen um 20 bis 30 %. Der Druckausgleich erfolgt normalerweise innerhalb von 3 bis 4 Stunden durch Flüssigkeitseinstrom (Speichel, Tränkwasser), durch Resorption von flüchtigen Fettsäuren und Elektrolyten sowie Abstrom des Vormageninhaltes in den Labmagen und Dünndarm. Bei kraftfutterreichen Rationen, die nur zweimal am Tag angeboten werden, ist der osmotische Druck im Pansen erheblich höher. Dadurch wird die Futteraufnahme zeitweilig abgesenkt (Off-feed-Effekt).

Um Verzehrsdepressionen dieser Art zu vermeiden, ist die Tagesration an Konzentratfutter auf mehrere Mahlzeiten zu verteilen. Der ausreichenden Aufnahme von Tränkwasser kommt in diesem Zusammenhang ebenfalls Bedeutung zu. Abb. 8. demonstriert das Verhalten des pH-Wertes im Pansen und die T-Aufnahme bei TMR-Fütterung (grün), zweimaliger Verabreichung von NaHCO₃ (rot), viermaliger Aufteilung der Tageskonzentratmenge (blau) und zweimaliger Aufteilung der Tageskonzentratmenge (braun). Am besten schneidet die TMR ab.

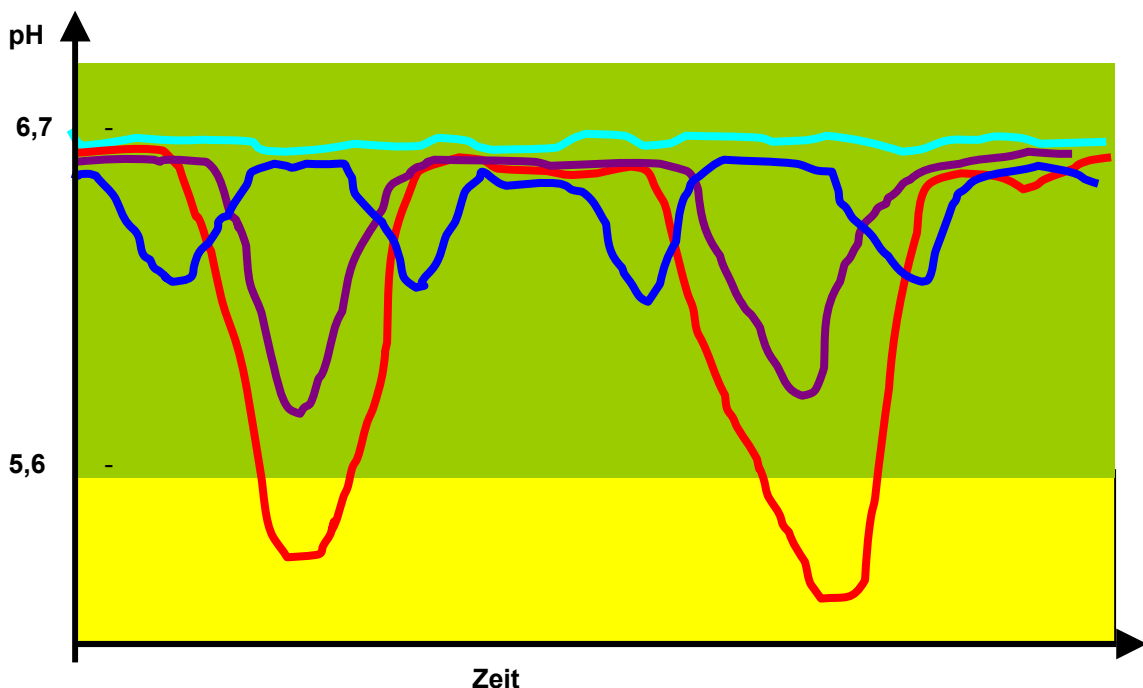


Abb. 8: Verhalten des Pansen-pH und der Futteraufnahme bei unterschiedlicher Fütterungspraxis

Türkis: TMR, T-Aufnahme: 3,7 % der KM; keine Zufütterung von Pansenpuffern

Rot: 2-malige Fütterung ohne Pansenpuffer. T-Aufnahme: 3,2 % der KM

Violett: 2-malige Fütterung mit Supplementation von Na-Bikarbonat. T-Aufnahme: 3,4 % der KM

Blau: 4-malige Fütterung mit Supplementation von Na-Bikarbonat. T-Aufnahme: 3,6 % der KM

Die tiefste Absenkung des pH-Wertes wird bei zweimaliger Konzentratgabe ohne Zugabe von Pansenpuffern gesehen. **Am günstigsten schneidet die TMR ab, bei ihr kann auf die nicht unproblematische Gabe von Na-Bikarbonat verzichtet werden.**

Quelle: BLOCK, E. <http://animsci.agrenv.mcgill.ca/courses/450/extr/alecol1t/sld017.htm>

Die Risiken einer intensiven Fütterung auf hohe Milchleistung verdeutlicht Tab. 3.

Tab. 3: Charakteristika des Pansenstoffwechsels bei unterschiedlicher Fütterung (nach MARTENS)			
	Extensive Fütterung geringe Milchleistung	Intensive Fütterung hohe Milchleistung	Pathologischer Zustand akute Pansenacidose
Futter	rohfasereich, proteinarm geringe Energiedichte	rohfasearm, proteinreich hohe Energiedichte	rohfasearm, proteinreich sehr hohe Energiedichte
N-Recycling	Umwandlung von NPN in Protein	Proteinüberschuss wird zu „Abfall“ und ausge- schieden	ohne Bedeutung
Wiederkauen	ausreichend	noch ausreichend	sistiert
Pufferung	ausreichend	noch ausreichend	unzureichend
Pansen-pH	6,0 – 7,0	5,5 – 6,5	< 6,0
FFS mmol/l	80 – 110	100 – 170	> 120
Fettsäurenmuster	Ac>>Prop.>But.	Ac>Prop.>But.>Lakt.	Lakt. > übrige
Osmot.Druck mosmol/l	250 – 340	300 – 400	> 400
Resorption von FFS	> 70 %	60 – 70 %	Lakt. wird kaum resorb.
Resorption von Wasser	ja	nein, Sekretion	nein, Sekretion
Bewertung	problemlos	machbar aber Risiko	pathologisch

Mikrobielle Nährstoffumsetzungen im Pansen

Der Pansen ist von 3 bis 6 kg Bakterienmasse besiedelt, die postluminal verdaut wird und die Kuh mit Aminosäuren und Energie versorgt. Eine Überfütterung mit nicht abbaubarem Protein und schwer verdaulichen Kohlenhydraten würde zu einer Verarmung bzw. zum Absterben der Mikrobenpopulation im Pansen führen. Um ein Maximum an Milch zu produzieren, ist deshalb ein ausgewogenes Verhältnis von im Pansen mikrobiell abbaubaren und nichtabbaubaren Proteinen und leichtverdaulichen Kohlenhydraten (insbesondere Stärke) erforderlich.

Die Abbaubarkeit der Kohlenhydrate durch die Mikroorganismen des Pansens ist abhängig von folgenden Faktoren:

- Vom Grad der Zerkleinerung des Futters. Zerkleinertes Futter hat eine größere Angriffsfläche für die Mikroben
- Von der Verfügbarkeit von pansenlöslichem Futterprotein. Seine Höhe bestimmt maßgeblich die Mikrobendichte im Pansen
- Von der Passagerate des aufgenommenen Futters durch den Pansen. Je schneller die Ingestapassage, desto geringer die mikrobielle Abbaubarkeit. Hochleistungskühe zeichnen sich generell durch eine hohe Passagerate der aufgenommenen Futterstoffe aus. Deshalb müssen bei ihnen die Rationen sorgfältig bezüglich Passagerate und Abbaurate ausbalanciert werden.
- Vom Ligningehalt des Grundfutters. Je höher der Ligningehalt, desto schwerer verdaulich ist das Futter.
- Vom Anteil der Leguminosen und Gras im Grundfutter. Leguminosen werden mikrobiell schneller abgebaut als Gras und ermöglichen wegen der höheren Passagerate eine größere T-Aufnahme.
- Vom Verhältnis zwischen schnell und langsam abbaubaren Kohlenhydraten. Ein Überangebot an schnell abbaubaren Kohlenhydraten bei gleichzeitigem Mangel an strukturierter Rohfaser führt zur Pansenacidose.

Entscheidend für eine hohe Milchleistung ist ein Pansenmilieu, das ein maximales mikrobielles Wachstum gewährleistet.

Die Mikrobenpopulation des Pansens besteht aus Bakterien, Protozoen und Pilzen.

Bakterien bilden die größte Mikrobenmasse und sind in einer Konzentration von 10^7 bis 10^{12} /ml Panseninhalt vertreten.

Je nach der Art des fermentierten Substrates kann man unterscheiden:

1. zellulosespaltende Bakterien
2. pectinspaltende Bakterien
3. harnstoffspaltende Bakterien
4. zuckerspaltende Bakterien
5. eiweißspaltende Bakterien
6. fettspaltende Bakterien
7. Hemizellulosen spaltende Bakterien

8. Stärkespaltende Bakterien
9. Methan produzierende Bakterien
10. Säure verwertende Bakterien
11. Ammoniak produzierende Bakterien

Die meisten dieser Bakterien sind in der Lage, mehr als ein Substrat zu fermentieren.

Die wichtigsten **Fermentationsprodukte** der Pansenbakterien sind:

- **Acetat** (wichtiger Energielieferant und Ausgangssubstrat für die Fettsynthese)
- **Propionat** (wichtigstes Substrat für die Glukoneogenese in der Leber und Ausgangssubstrat für die Synthese ungerader Fettsäuren)
- **Butyrat** (Ausgangssubstrat für die Fettsynthese und die Ketogenese in der Pansenwand; fördert Wachstum der Pansenzotten)
- **Pansengase** (Methan, CO₂, Wasserstoff, Stickstoff)

Die Bedeutung der Pansenbakterien für die **Lipidverdauung** liegt

- in der Spaltung von mit dem Futter aufgenommenen Triglyzeriden und Phospholipiden zu langkettigen Fettsäuren, die im Dünndarm resorbiert werden. Das dabei freigesetzte Glycerol wird vorwiegend zu Propionat abgebaut
- in der Hydrierung ungesättigter Fettsäuren und der Bildung von Isomeren
- in der Produktion mikrobieller Fette und Transfettsäuren

Die Bedeutung der Pansenbakterien für den **Abbau und die Neusynthese von Proteinen und NPN-Verbindungen besteht**

- im Abbau des Futterproteins zu Peptiden, Aminosäuren, Ammoniak, Ketosäuren und flüchtigen Fettsäuren. Desaminierte Aminosäuren (Ketosäuren) werden mikrobiell als C-Skelette verwertet.
- in der Neusynthese von Aminosäuren und Peptiden und Wiederaufbau mikrobieller Proteine. Im Labmagen und Dünndarm wird das Mikobenprotein wieder zu kurzkettigen Peptiden und Aminosäuren abgebaut und resorbiert.
- Ammoniak wird in der Leber zu Harnstoff entgiftet, über Niere und Euter ausgeschieden oder über die Speicheldrüsen wieder in den Pansen rezykliert, wo es als N-Quelle für die bakterielle Proteinsynthese fungiert.

Bedeutung für den **Vitaminhaushalt**:

- Metabolisierung von Vitamin D
- Synthese von B-Vitaminen und Vitamin K

Protozoen sind 20 bis 200 µm große Einzeller und in einer Größenordnung von 10⁴ bis 10⁶ Zellen/ml Panseninhalt vertreten. Obwohl auf eine Protozoe 10⁵ Bakterien kommen, machen die Protozoen die Hälfte der Mikrobenmasse des Pansens aus. Ihre Anzahl steigt bei Verfütterung von Rationen mit hohem Grad an Verdaulichkeit.

Protozoen üben folgende Funktionen aus:

- Sie bestreiten etwa 10 bis 30 % der mikrobiellen Verdauungskapazität.
- Durch Verzehr von Bakterien reduzieren sie die Bakterienmasse.
- Reichliche Protozoenbesiedlung erhöht den NH₃-Gehalt, mindert die Effizienz der mikrobiellen Proteinsynthese, verlängert die Verweildauer der Bakterien im Pansen und mindert dadurch die Bereitstellung von nXP im Dünndarm. Diese Nachteile werden dadurch ausgeglichen, dass Protozoenprotein hochwertiger ist als bakterielles (höherer Gehalt an Lysin, Methionin und Zystin).
- Speicherung von anfallender Stärke und dadurch Minderung der Gefahr einer überhöhten Laktatproduktion bzw. Pansenacidose.
- Unterstützen den Abbau von Rohfaser.
- Fördern die Hydrierung von Fetten.
- Besorgen den Abbau toxischer Futterinhaltsstoffe wie Nitrit und Mykotoxine.

Ihre **Reduzierung oder ihr Fehlen** senkt die Verdauungsleistung, ändert die Zusammensetzung der Bakterienarten, erhöht den Anteil an mikrobiellem Protein, da sich die Bakterienmasse erhöht und der Abbau von bakteriellem Protein geringer wird. Mit der Abnahme des NH₃-Gehaltes erhöht sich die N-Ausscheidung mit dem Kot. Ein Defizit an Protozoen senkt den Abbau von Stärke und Zellulose und von toxischen Bestandteilen im Futter.

Protozoen sind äußerst empfindlich gegenüber pH-Wert-Änderungen und Hyperosmolalität. Bei pH 6 ist ihr Wachstum stark eingeschränkt und bei pH 5 sterben sie ab. Eine Vermehrung erfolgt danach äußerst langsam.

Die **anaeroben Hefen** sind bei Verfütterung einer grundfutterreichen Ration bis zu 8 % in der Mikrobenmasse vertreten. Offensichtlich spielen sie eine wichtige Rolle bei der Rohfaserverdauung.

Die Mikroorganismen des Pansens halten sich in drei unterschiedlichen Umgebungen auf:

- Zu etwa 25 % in der Pansenflüssigkeit, in der freilebende Bakterien gelöste Kohlenhydrate und Eiweiße verdauen.
- Zu 70 % im schwammartigen Netzgeflecht, wo sie sich an Nahrungspartikel anlagern und unlösliche Polysaccharide, wie Stärke und Rohfaser, sowie weniger lösliche Nahrungsproteine spalten.
- Zu 5 % angeheftet an den Pansenepithelzellen oder den Infusorien.

Um die Anzahl der Bakterien im Pansen aufrechtzuerhalten, muss ihre Reproduktionszeit kürzer sein als die Passagegeschwindigkeit der Ingesta. Da die Passagerate der festen Partikel wesentlich niedriger ist als die der Pansenflüssigkeit, können sich die langsam wachsenden Spezies an den Partikeln anheften und so der Auswaschung entgehen.

Die verfütterte Ration beeinflusst stark Anzahl und Proportionalität der einzelnen Speziesarten im Pansen. Ein Futterwechsel geht daher stets mit einer Änderung der Reproduktionsrate der Pansenmikroben einher. Er muss deshalb langsam erfolgen, um eine Anpassung an das geänderte Nährstoffangebot zu ermöglichen. Diese Anpassung benötigt 3 bis 4 Wochen. Ein häufiges Vorkommnis ist der plötzliche Wechsel auf eine Ration mit hohem Gehalt an leicht fermentierbaren Kohlenhydraten.

Mit jeder Rationsänderung ändern sich auch die Milieubedingungen für die **mikrobiellen Abläufe** in den Vormägen. Die Mikroorganismen können sich diesen Veränderungen dank ihrer Wachstumskapazität sowie synergistischer und antagonistischer Beziehungen untereinander bis zu einem gewissen Grad anpassen. Werden zellulosereiche Rationen verfüttert, dominieren die Zellulosespalter. Die enzymatische Hydrolyse verläuft bei Überwiegen einer zellulolytischen Flora verhältnismäßig stabil und langsam. Das Ergebnis der Fermentationsprozesse ist überwiegend Acetat.

Bei Verfütterung von Rationen mit hohem Gehalt an leichtfermentierbaren Kohlenhydraten wird die zellulolytische Flora rasch durch stärke- und zuckerspaltende Pansenbakterien verdrängt. Über Laktatbildende Keime entsteht verstärkt Milchsäure, die durch eine Laktatverwertende Flora bevorzugt zu Propionat abgebaut wird. Konkurrenten dieser Flora sind die Methanbildner und die Protozoen. Sie werden aber durch Absenkung des pH-Wertes rasch dezimiert. Die fehlende Konkurrenz veranlasst nun die gegen einen pH-Abfall weniger empfindlichen Laktatverwerter, sich zu vermehren. Wird allerdings durch massiven Laktatanfall der pH-Wert unter 6 verschoben, kommt es zu einer Milchsäureakkumulation, durch die drastische Veränderungen in der Mikrobenpopulation ausgelöst werden. Die Situation endet in einer akuten Pansenacidose.

Die Absenkung des pH-Wertes beeinflusst das Wachstum der Pansenbakterien und die Bildung der flüchtigen Fettsäuren. Die zellulosespaltenden Bakterien bevorzugen einen pH-Bereich von 6,2 bis 6,8. Unterhalb eines pH-Wertes von 6,0 werden die zellulolytischen und methanogenen Bakterien stark reduziert. Die Stärke abbauenden Bakterien bevorzugen einen pH-Bereich von 5,2 bis 6,0. Protozoen sterben ab, wenn der pH-Wert unter 5,5 sinkt. Optimale pH-Werte liegen im Bereich zwischen 5,8 und 6,4.

Die **Pansenschleimhaut** besteht aus Pansenzotten, den mit Epithelzellen beschichteten Organen der Resorption. Die flüchtigen Fettsäuren liegen in nicht dissoziierter (HAc) oder dissoziierter Form (H^+ , Ac^-), d.h. als Säureanionen vor (Acetat, Propionat, Butyrat) vor. In ihrer nicht dissoziierten Form (HAc) werden sie von den Epithelzellen per Diffusion aufgenommen. Bei niedrigem pH-Wert erhöht sich die nicht dissoziierte Fraktion und die Resorptionsgeschwindigkeit steigt. Das ist z.B. bei der latenten acidotischen Belastung der Fall. Die H^+ -Ionen für die dissoziierte Fraktion der FFS werden vor allem aus Kohlensäure bereitgestellt ($H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$) oder von den Epithelzellen im Austausch gegen Na^+ -Ionen sezerniert. Schließlich können die Fettsäureanionen (Ac^-) auch im Austausch gegen Bicarbonationen (HCO_3^-) in die Epithelzelle eingeschleust werden. Ein Teil der Fettsäuren wird von der Epithelzelle zur Energiegewinnung genutzt, der andere Teil gelangt ins Blut und wird von hier aus weitertransportiert. Die Resorptionsgeschwindigkeit ist abhängig von der Kettenlänge der FFS. Butyrat wird demnach rascher resorbiert als Propionat und Acetat. Die gleiche Reihenfolge gilt auch für die Geschwindigkeit der Metabolisierung der FFS in der Pansenschleimhaut.

Tab. 4: Metabolisierung in der Pansenschleimhaut		Abgabe in die Blutbahn
Acetat	25 % zu Acetacetat und Aceton	75 %
Propionat	50 % zu Lactat	50 %
Butyrat	75 % zu β -Hydroxybutyrat	25 %

Zottenverteilung, Größe und Anzahl sind abhängig von der Beschaffenheit der Diät, insbesondere vom Grundfutter-Konzentrat-Verhältnis. Bei Wechsel von einer grundfutterreichen auf eine getreidereiche Ration oder einer Trockensteherration auf eine Ration für laktierende Kühe benötigt die Pansenschleimhaut eine gewisse Adaptationszeit von 2 bis 3 Wochen. Die Entwicklung der Pansenzotten steht nämlich in Beziehung zur Menge der fermentierten flüchtigen Fettsäuren. Ein Anstieg von Propion- und Buttersäure wird bei getreidereichen Rationen gesehen und geht mit einer vermehrten Durchblutung des Pansenepithels einher. Diese stimuliert die Gefäßsprossung und Epithelzellproliferation. Die Zottenzahl wächst und ebenso ihre Größe. Beim Übergang von der Trockenstehperiode in die Früh-laktation muss die Kuh Gelegenheit erhalten, ihren Zottenbesatz zu verstärken, um die Absorptionsfläche zu vergrößern. Dies erfolgt während der sogenannten Vorbereitungs-fütterung oder Transitperiode (s. dort).

Menge und Zusammensetzung der Mikrobenpopulation im Pansen bestimmt die Stoffwechselleistung des Wirtstieres

Eine unzureichende Versorgung mit Stärke und Zucker verringert die mikrobielle Proteinsynthese, senkt die Propionatfermentation und damit die Gluconeogenese in der Leber, bewirkt eine verstärkte gluconeogenetische Nutzung von Aminosäuren und einen erhöhten Abbau von Körperenergieserven. Ein Überangebot an Stärke und Zucker erhöht die Acidosegefahr.

Im Pansen nicht abgebaute Stärke (Durchflusstärke) kann das Acidoserisiko mindern und die Gluconeogenese entlasten. Futtermittel mit hohem Anteil an Durchflusstärke sind:

Maiskörner geschrotet, Getreide (außer Mais) gequetscht, Sodagrain (NaOH-behandeltes unzerkleinertes Getreide), teigreife Maissilage.

Der Einsatz von Durchflusstärke ist allerdings begrenzt. Mit zunehmendem Angebot sinkt die Verdaulichkeit. Beachtliche Mengen der aus der Stärke stammenden Glucose werden von den Darmzellen verbraucht. Die Kapazität der Stärkehydrolyse im Dünndarm liegt bei maximal 1,2 kg/d.

Pansenbakterien und Protozoen decken etwa 75 % des Aminosäurebedarfs der Hochleistungskuh. Erste Priorität besitzt deshalb die Versorgung mit löslichem und im Pansen abbaubarem Futterprotein. Der Rest des Aminosäurebedarfes muss aus im Pansen nicht abbaubarem Futterprotein (Durchflussprotein, Bypassprotein, UDP) bereitgestellt werden. Abbaubares Protein und NPN liefern den Stickstoff für die Vermehrung der Pansenbakterien. Um eine hohe Vermehrungsrate zu gewährleisten, muss Stickstoff kontinuierlich über den ganzen Tag hinweg verfügbar sein. Eine zu rasche Freisetzung von Stickstoff im Pansen überfordert die mikrobielle N-Verwertung. Überschüssiger Stickstoff wird in Form von Ammoniak im Pansen resorbiert, der Leber zugeführt und dort zu Harnstoff entgiftet. Die Harnstoffkonzentration im Blut und in der Milch steigt an.

Die Abbaubarkeit der Futterproteine im Pansen ist von zwei Faktoren abhängig:

- Von der Verweildauer der Ingesta im Pansen. Eine zu rasche Passage durch den Pansen senkt die Verfügbarkeit von abbaubarem Protein und erhöht die nicht ruminal abgebaute Proteinfraction (UDP). Dadurch sinkt die Vermehrungsrate der Pansenbakterien. Bei Hochleistungskühen, die eine hohe Passagerate aufweisen, kann der ruminale N-Bedarf durch Supplementation von Harnstoff verbessert werden, da Harnstoff vollständig löslich ist. Harnstoff ist allerdings nicht sehr schmackhaft und sollte deshalb möglichst in die TMR eingemischt werden.
- Von der Bereitstellung ausreichender Mengen leicht fermentierbarer Kohlenhydrate. Sie liefern die notwendige Energie für die mikrobielle Proteinsynthese. Ihr Fehlen hat zur Folge, dass ein Überschuss an Stickstoff entsteht, der nicht mikrobiell verwertet und der Leber zugeführt wird. Auch in diesem Falle steigen die Harnstoffkonzentrationen in Blut und Milch an.

Die Intensität der mikrobiellen Proteinsynthese bestimmt zu 70 bis 85 % die Menge des nutzbaren Proteins im Dünndarm (nXP). Allerdings ist die Verfügbarkeit von nXP limitiert. Der Wert von 4,5 kg/d wird selten überschritten.

Die in der Früh lactation bestehende negative Energiebilanz wegen zu geringer Energieeinnahme hat auch Auswirkungen auf die Bereitstellung von mikrobiellem Protein. Mit zunehmender Leistung steigt der Bedarf an nichtabbaubarem Protein (UDP) an, da die energiebezogene mikrobielle Proteinsynthese relativ zum nXP abfällt. Das Proteindefizit muss daher über pansenstabiles UDP ausgeglichen werden. Futtermittel mit hohem UDP-Anteil sind: Biertreber, Grünmehl, Pressschnitzel, Maissilage, Maiskleber, Kokoschrot. Ein zu hohes Angebot an UDP hat aber auch negative Effekte: Es senkt die mikrobielle Proteinsynthese und die Verdaulichkeit der Aminosäuren im Dünndarm. Im Mittel geht man von einer mikrobiellen Syntheseleistung von 10,1 (7,0 – 14,0) g Protein pro MJ ME aus. Dabei ist entscheidend, dass synchron zum ruminalen Proteinabbau eine ausreichende Versorgung mit Zucker und abbaubarer Stärke erfolgt.

Es muss nachdrücklich hervorgehoben werden, dass die Proteinversorgung der Milchkuh nicht allein vom Proteinangebot abhängt. Sie wird in erster Linie von der Energieversorgung und von der Futteraufnahme bestimmt.

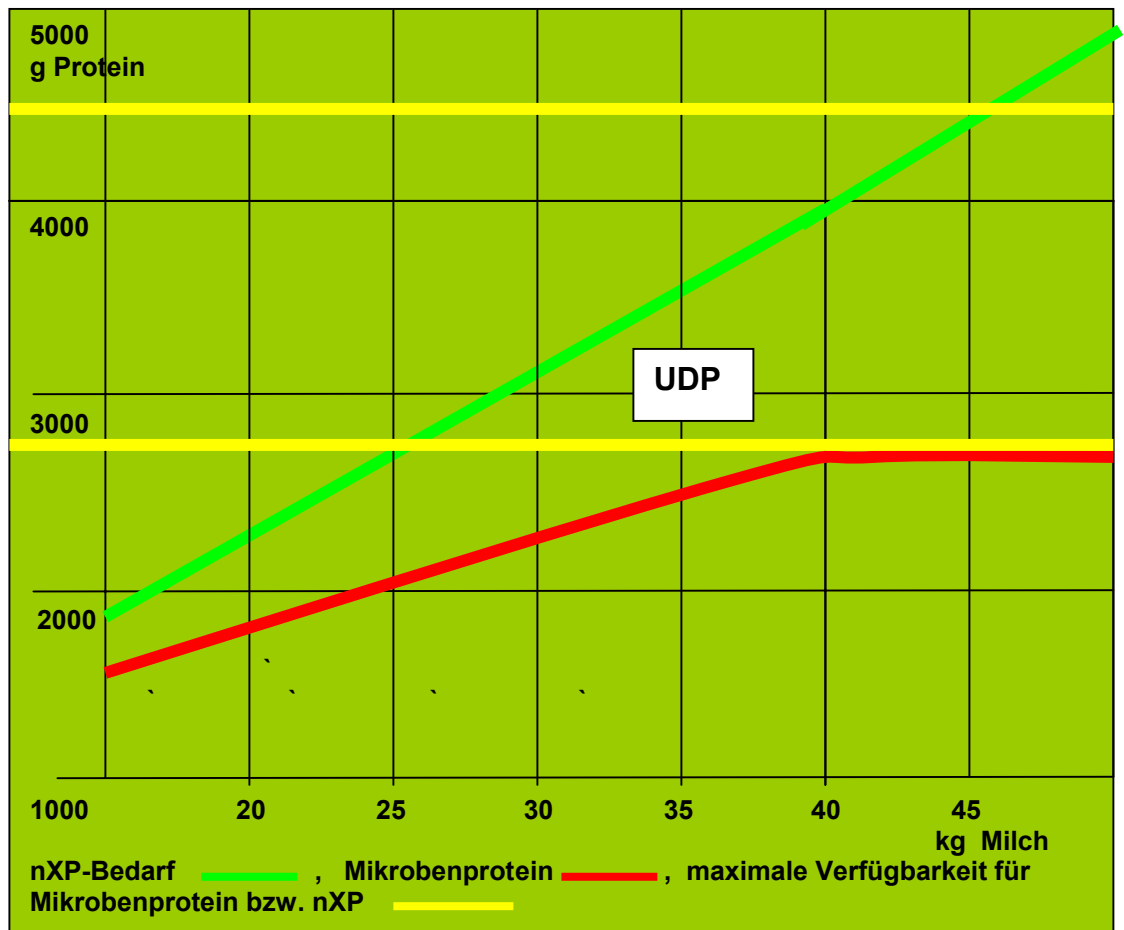


Abb. 9: Einfluss der steigenden Milchleistung auf die Proteinfraktion der Ration (MÜLLER, 2001).

Mit wachsender Leistung steigt der Bedarf an nXP. Er kann aber nicht durch mikrobielles Protein allein gedeckt werden, sondern bedarf eines wachsenden Anteils an UDP. Pro MJ ME beträgt die Synthesekapazität für Mikrobenprotein 10,1 g. Bei 2,8 kg ist die maximale Syntheserate erreicht. Auch die Verfügbarkeit von UDP ist bei sehr hohen Leistungen begrenzt. Es kommt zur Mobilisierung körpereigener Proteinreserven (negative Proteinbilanz).

Pansensynchronisation

Pansenbakterien benötigen, um sich optimal vermehren zu können, genügend **Energie und Rohprotein zur gleichen Zeit**. Unter Pansensynchronisation versteht man, dem Pansen ständig und gleichmäßig die benötigten Nährstoffe zuzuführen. Das bedeutet, dass der mikrobielle Abbau von Futterprotein (ständig ausreichendes Angebot an Ammoniak) und die Bereitstellung von Energie (ATP) und Kohlenstoffskeletten zeitlich gut aufeinander abgestimmt werden müssen. Nur dadurch wird eine optimale mikrobielle Proteinsynthese gewährleistet. Bei einem zu hohen Gehalt an abbaubarem Protein und Mangel an Energie steigt die RNB stark an. Gleichzeitig kommt es zum Anstieg der Harnstoffkonzentrationen im Blut und in der Milch.

Futtermittel weisen eine unterschiedliche Abbaubarkeit für Energie und Proteine auf (Abb. 10). Am besten lässt sich das Problem der Pansensynchronisation durch Einsatz einer TMR lösen, da hier die Durchmischung von Grundfutter mit energie- oder proteinreichem Ausgleichsfutter am besten möglich ist.

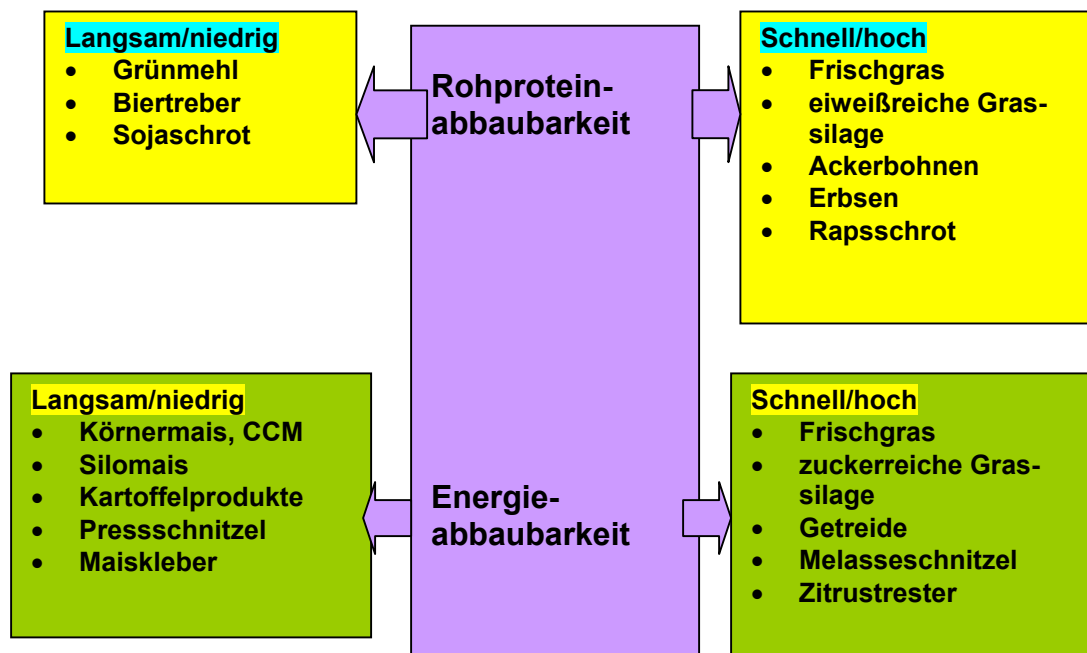


Abb. 10: Futtermittel mit unterschiedlicher Abbaubarkeit für Protein und Energie (nach HOGENKAMP und EITING, 2001)

Bedeutung der postruminalen Abschnitte

Labmagen

Hauptfunktion:

- Drüsenmagen, enthält Flüssigkeit und Gas
- Sekretion von Schleim, Salzsäure, Proteasen und Lysozym
- niedriger pH-Wert (2,5)
- tötet Bakterien ab
- löst Mineralstoffe auf

Vom **Labmagen** werden sezerniert:

- Schleim, der das Epithel vor Säurezugriff und anderen chemischen Insulten schützt.
- Salzsäure, die Pepsinogen aktiviert und die anflutenden Bakterien abtötet.
- Proteasen (Pepsin), welche die Verdauung der Proteine einleiten. Bei Kälbern wird außerdem Chymosin sezerniert, das Milchproteine koaguliert.
- Gastrin (Gewebshormon), das für die Säureproduktion und die Motilität des Labmagens von Bedeutung ist.
- Lysozym, mit dessen Hilfe die Zellwandung der Bakterien aufgebrochen und der Inhalt der Verdauung zugänglich gemacht werden kann. Lysozyme sind am aktivsten bei niedrigem pH-Wert und ungewöhnlich resistent gegenüber einer Proteolyse durch Pepsin.

Das Fassungsvermögen des Labmagens liegt bei 12 bis zu 16 Litern. Verglichen mit dem Pansen ist die Transportrate durch den Labmagen relativ kurz. Die Anwesenheit von Digesta stimuliert die Sekretion von Salzsäure. Diese ermöglicht die Umwandlung von Pepsinogen in Pepsin und damit den Eiweißabbau zu Peptiden und Aminosäuren, die im Dünndarm weiter verdaut und resorbiert werden. Der Labmagen hat einen pH-Wert von 2 bis 4. In ihm beginnt auch die Verdauung von Fetten. Die Digesta, die aus dem Labmagen in das Duodenum fließt, ist von flüssiger Konsistenz und besteht aus kleinen Partikeln.

Labmagenkontraktionen dienen der Vermischung des Inhaltes mit den Sekreten, der Beförderung des im Labmagen gebildeten Gases in die Haube und dem Weitertransport des Inhaltes in den Dünndarm. Eine Hemmung der Labmagenmotorik wird wie beim Pansen durch eine hohe Konzentration nicht dissoziierter FFS und eine übermäßige Labmagenerweiterung (Dilatation) ausgelöst. Jedwede Hemmung der Labmagenmotorik begünstigt die Ansammlung von Gas. Das aus dem Labmagen in die Haube zurückströmende Gasvolumen liegt bei Heufütterung bei 600 bis 700 ml/Stunde. Bei konzentratreicher Fütterung sind es 1000 bis 2000 ml/Stunde. Während der Zufluss von Panseninhalt in den Labmagen bei Verabreichung von Heu nur etwa 1 Liter/Stunde beträgt, kann er bei konzentratreichen Rationen auf 9 Liter pro Stunde ansteigen. Ist der Zustrom von Vormageninhalt in den Labmagen zu hoch und die Geschwindigkeit seiner Entleerung wegen der herabgesetzten Labmagenmotorik zu gering, sammeln sich Flüssigkeit und Gas im Labmagen an. Er dilatiert und verändert seine normale Lage. Die Dehnungsrezeptoren des Labmagens tragen ihrerseits zur Abschwächung der Labmagenmotorik bei. Damit sind wichtige Voraussetzungen für die **Verlagerung des Labmagens** nach links oder rechts gegeben.

Die **Ursachen** der Labmagenverlagerung sind noch nicht vollständig geklärt. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand kommt der **Senkung der Futteraufnahme während der Transitperiode und den sich daraus ergebenden Folgen die Hauptbedeutung zu.**

Exokrines Pankreas

Beim Einstrom der Ingesta aus dem Labmagen in das Duodenum müssen zwei Aufgaben bewältigt werden: Die Spaltung der makromolekularen Nährstoffe in kleinere Bruchstücke und die Neutralisation der im Labmagen sezernierten Salzsäure. Dafür sorgt das exokrine Pankreas. Daneben hat das Pankreas auch eine endokrine Funktion: Es synthetisiert und sezerniert Insulin und Glucagon, die Schlüsselhormone des Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsels.

Die wichtigsten vom Pankreas bereitgestellten **Verdauungsenzyme** sind:

- **Proteasen** (Chymosyn, Chymotrypsin). Sie spalten Proteine in Peptide, bauen sie aber nicht bis zur Stufe der Aminosäuren ab.
- **Lipase**. Pankreaslipase spaltet ein Triglyzeridmolekül in 2 Monoglyzeride und 2 freie Fettsäuren.
- **Amylase**. Spaltet Stärke in Maltose (Glucose-Disaccharid).

Von den Epithelzellen der Ausführungsgänge des Pankreas werden beträchtliche Mengen an Wasser und Bikarbonat sezerniert, um die Säuren im Dünndarm zu neutralisieren.

Die **hormonelle Regelung des exokrinen Pankreas** erfolgt durch Cholecystokinin (stimuliert Sekretion von Verdauungsenzymen), Secretin (stimuliert Wasser- und Bikarbonatsekretion) und Gastrin (aktiviert Verdauungsenzyme).

Dünndarm

Im **Dünndarm** wird die im Labmagen eingeleitete Verdauung mit Hilfe der Sekrete von Pankreas, Darmdrüsen und Leber fortgesetzt. Dabei erfolgt zunächst ein Ausgleich des osmotischen Druckes im Darmlumen durch passiven oder aktiven Einstrom von Wasser, nachdem zuvor durch die Sekretion von Bikarbonat (Pankreas) eine Neutralisation des Darminhaltes herbeigeführt wurde. Bei dieser Neutralisation erhöht sich der pH-Wert, und die Enzyme des Pankreas und der Darmschleimhaut können ihre Arbeit in einem pH-Optimum von 7,0 bis 7,5 entfalten. Gallensalze, die in der Leber aus Cholesterol synthetisiert werden, tragen dazu bei, dass dieser pH-Bereich im Dünndarm aufrechterhalten bleibt. Sie leiten außerdem die Verdauung von Nahrungsfetten ein, soweit diese nicht schon im Pansen mikrobiell verwertet wurden, und vergrößern die Angriffsfläche für die fettspaltenden Enzyme (Lipasen).

Die **Absorptionsleistung des Dünndarmes** ist abhängig von einem elektrochemischen Natrium-Gradienten. Durch die Anwesenheit von Na^+ -Ionen entsteht in den Spalträumen zwischen den Darmzellen ein erhöhter osmotischer Druck. Der Wasserzustrom aus dem Darmlumen folgt diesem Druckgradienten, das in die Spalträume gelangte Wasser diffundiert zusammen mit den Na^+ -Ionen in das Kapillarblut der Darmzotten und gelangt somit in den Blutkreislauf. Diesem Na-Transport folgen auch Monosaccharide (Hexosen) und Aminosäuren. Sie wurden zuvor durch Enzyme in der zum Lumen hin gerichteten Zellmembran der Enterozyten (Disaccharidasen, Tri- und Dipeptidasen) aus Disacchariden bzw. Peptiden freigesetzt. Beim adulten Wiederkäuer werden allerdings alle löslichen Zucker sowie die meiste Stärke bereits durch die Vormagenflora fermentiert. Tiere, denen eine getreidereiche Ration verfüttert wird, sind in der Lage, einen bestimmten Teil der Stärke (insbesondere Maisstärke) erst postruminal im Dünndarm abzubauen, sodass der frischlaktierenden Milchkuh zusätzlich dringend benötigte Glucose verfügbar wird.

Lipide, die den Dünndarm erreichen, sind vorwiegend Fettsäurenester und Phospholipide. Triglyceride, die dem mikrobiellen Abbau im Pansen entgangen sind sowie Fettsäurenester mikrobieller Herkunft, werden endgültig zu freien Fettsäuren durch die Pankreaslipase hydrolysiert. Die Absorption der Monoglyceride und Fettsäuren ist an die Bildung von Mizellen mit Hilfe von Gallensalzen gebunden. Diese Mizellen entleeren ihren Inhalt in die Darmzelle, in der eine Neusynthese von Triglyzeriden und ihr Einbau in sogenannte Chylomikronen erfolgt. Die Chylomikronen werden aus der Darmzelle in die Lymphe sezerniert und über den Ductus thoracicus dem Blutkreislauf zugeführt.

Dickdarm

Im **Dickdarm** dominieren bakteriell-enzymatische Abbauprozesse, und es entstehen dabei ähnlich wie im Pansen flüchtige Fettsäuren und Ammoniak. Außerdem ist der Dickdarm ein wichtiges Organ der Resorption von Wasser, Na^+ - und Cl^- -Ionen. Sezerniert werden von ihm Bikarbonationen (im Austausch mit Chloridionen) und Schleim. Die Bewegungsabläufe im Dickdarm bestehen aus segmentalen Kontraktionen, antiperistaltischen Wellen und Massenbewegungen, durch die die Fäzes in das Rektum gedrückt werden. Die Erweiterung des Rektums löst reflektorisch die Defäkation aus.

Anschluss der Verdauungsprodukte an den Intermediärstoffwechsel

Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel

Stärke stellt die primäre Glucosequelle für den Wiederkäuer dar. In Abhängigkeit von Art und Menge der aufgenommenen Stärke werden 42 bis 94 % im Pansen zu flüchtigen Fettsäuren (bevorzugt Propionat) und Lactat abgebaut und über die Pfortader der Leber zugeführt. Hier werden Propionat und Lactat durch die Gluconeogenese zu Glucose synthetisiert. 43 bis 67 % der Glucose entstammen dem Propionat, 12 % dem Lactat.

Stärke, die dem fermentativen Abbau im Pansen entgeht, wird im Dünndarm durch Amylase gespalten und zu Glucose umgewandelt. Obgleich die Stärke im Dünndarm fast vollständig verdaut wird, ist die im Portalvenenblut gemessene Glucosekonzentration verhältnismäßig gering. Dies ist darauf zurückzuführen, dass 45 bis 88 % der im Dünndarm erscheinenden Glucose in den Dünndarmzellen energetisch genutzt wird. Nur eine geringe Menge der postruminal anfallenden Glucose gelangt in die Leber. Bei einem niedrigen Stärkeangebot wird Glucose aus dem Blut genutzt, um den Energiebedarf der Darmzellen zu

decken. Offenbar ist der direkte Einstrom von Glucose in die Enterozyten Ausdruck eines Sparmechanismus für die Blutglucose, die unabhängig vom Bedarf der Enterozyten in andere Gewebe, vor allem das Euter transportiert werden kann.

Für 1 kg Milch benötigt die Kuh etwa 72 g Glucose, für 40 kg 2880 g!!

Die Milchsynthese sistiert, wenn die arterielle Blutglucosekonzentration unter 1,65 mol/l sinkt.

Das nachfolgende Übersichtsschema verdeutlicht zusammenfassend die Verdauung und Verstoffwechslung der Kohlenhydrate bei der Milchkuh. Es wird erkennbar, dass Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel beim Rind eng miteinander verbunden sind.

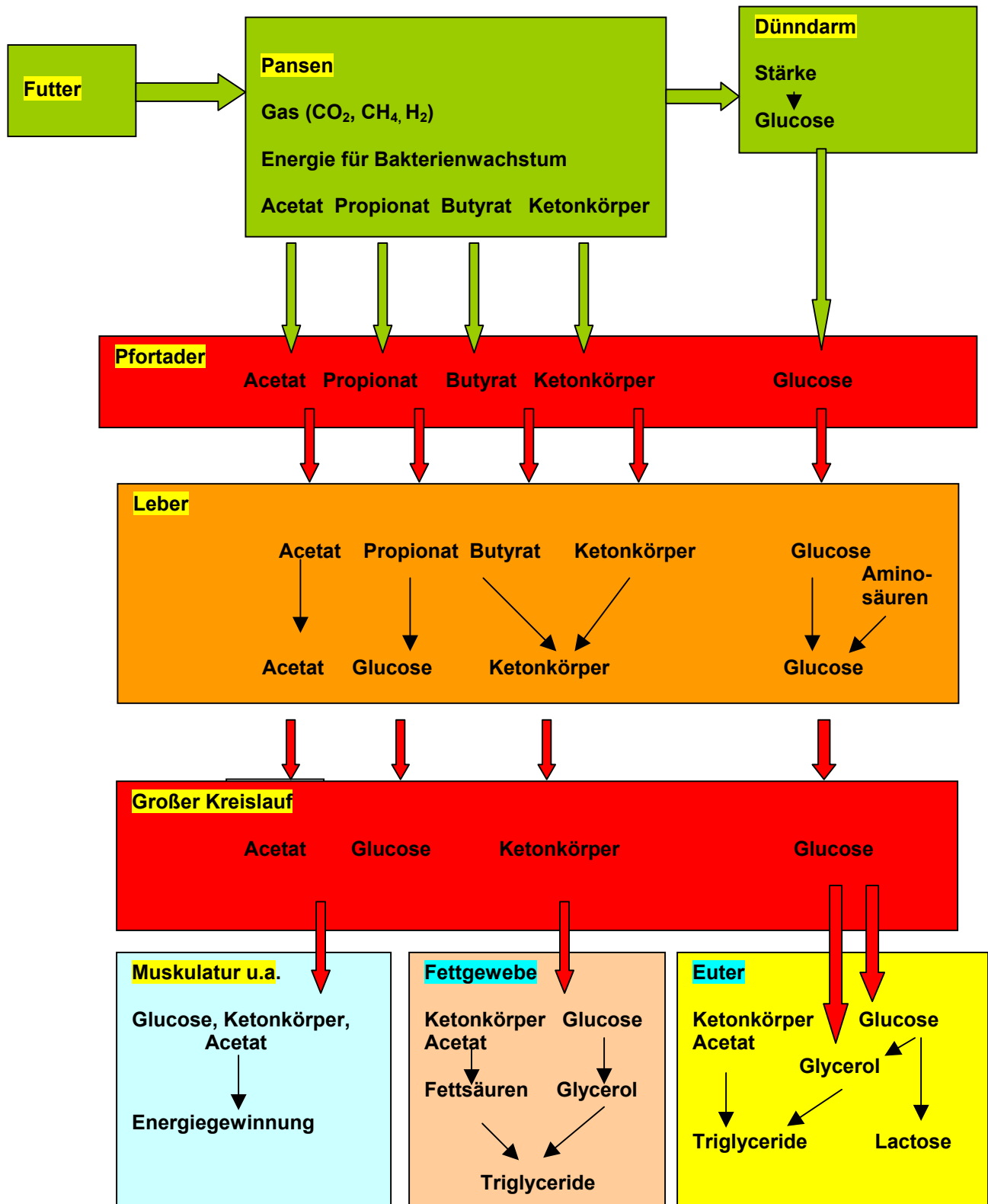


Abb. 11: Verdauung der Kohlenhydrate beim Rind (Übersicht)

Die ungesättigten Fettsäuren des Futterfettes werden im Pansen hydriert, so dass im Dünndarm überwiegend nur gesättigte langkettige Fettsäuren resorbiert werden. Die Resorption erfolgt über in der Dünndarmwand gebildete Micellen bzw. Chylomikronen. Sie stellen die Transportform der Nahrungslipide dar und gelangen über den Lymphweg in den Blutkreislauf. Von hier aus werden sie zur Energiegewinnung genutzt, im Fettgewebe gespeichert oder im Euter zur Milchfettsynthese herangezogen.

Das aus der Pansenfermentation stammende Acetat und Betahydroxybutyrat dient der Neusynthese von langkettigen Fettsäuren bzw. Triglyceriden im Fettgewebe und im Euter.

Eine 2. Transportform der Triglyceride sind die in der Leber gebildeten und in das Blut abgegebenen Lipoproteine sehr geringer Dichte (VLDL). Die Körperzellen können nicht komplette Triglyceride verstoffwechseln. Diese müssen zuvor in Fettsäuren und Glycerol gespalten werden. Dies erfolgt mit Hilfe von Lipoproteinlipasen, die sich in den Zellen der Blutkapillaren des Fettgewebes und des Euterparenchyms befinden.

Die wichtigsten Organe für den Fettstoffwechsel sind das Fettgewebe, die Leber und während der Laktation die Milchdrüse.

Lipogenese

Unter Lipogenese versteht man den Vorgang der Fettsäuresynthese. Diese erfolgt beim Rind zu 90 % im Fettgewebe bzw. im Euter (Milchfettsynthese), bei verschiedenen Monogastriden außerdem auch in der Leber.

Die Triacylglyceride des Körperfettgewebes werden aus Fettsäuren synthetisiert, die aus folgenden Quellen stammen:

- Aus Triglyceriden von Chylomikronen, die auf dem Lymphweg in den Blutkreislauf gelangen und aus dem Darmkanal stammen.
- Aus Lipoproteinen (VLDL), die von der Leber in den Blutkreislauf sezerniert werden.
- Aus Acetat und Butyrat, das von der Vormagenflora gebildet wird.
- C₂-Verbindungen zur Kettenverlängerung (diese sind beim Wiederkäuer Acetat, beim Monogaster Glucose).
- ATP als Energiequelle
- Reduktionsäquivalente in Form des NADPH.

Lipolyse

Der katabole Abbau von Speicherlipiden in Energiemangelsituationen vollzieht sich in drei Hauptprozessen:

- Lipolyse der Triglyceride des Körperfettgewebes
- Transport der nichtesterifizierten freien Fettsäuren (NEFA) zu anderen Geweben
- Aufnahme und Oxidation dieser Fettsäuren durch diese Gewebe.

Bei der Fettsäurenmobilisierung werden kurzzeitige und langzeitige Reaktionen unterschieden. Für die Kurzzeitreaktion ist vor allem eine Ausschüttung von Catecholaminen (Adrenalin, Noradrenalin) verantwortlich zu machen. Langzeitreaktionen werden durch eine negative Energiebilanz ausgelöst und hormonell durch STH unterstützt.

Rolle der Leber im Lipidstoffwechsel

Die Leber entnimmt die durch die Lipolyse freigesetzten nichtesterifizierten Fettsäuren (NEFA) aus der Blutbahn entsprechend dem Angebot. Eine hohe NEFA-Konzentration im Blut bedeutet, dass auch eine erhöhte Menge an NEFA in die Leber gelangt. Dort wird das Überangebot in Form von Triglyceriden in der Leberzelle gespeichert. Die Ausschleusung aus der Leber erfolgt über drei Wege:

- vollständige Oxidation zu CO₂
- Bildung von Ketonkörpern
- Einbau in Lipoproteine (VLDL oder Transportlipide) und Abgabe der VLDL in die Blutbahn

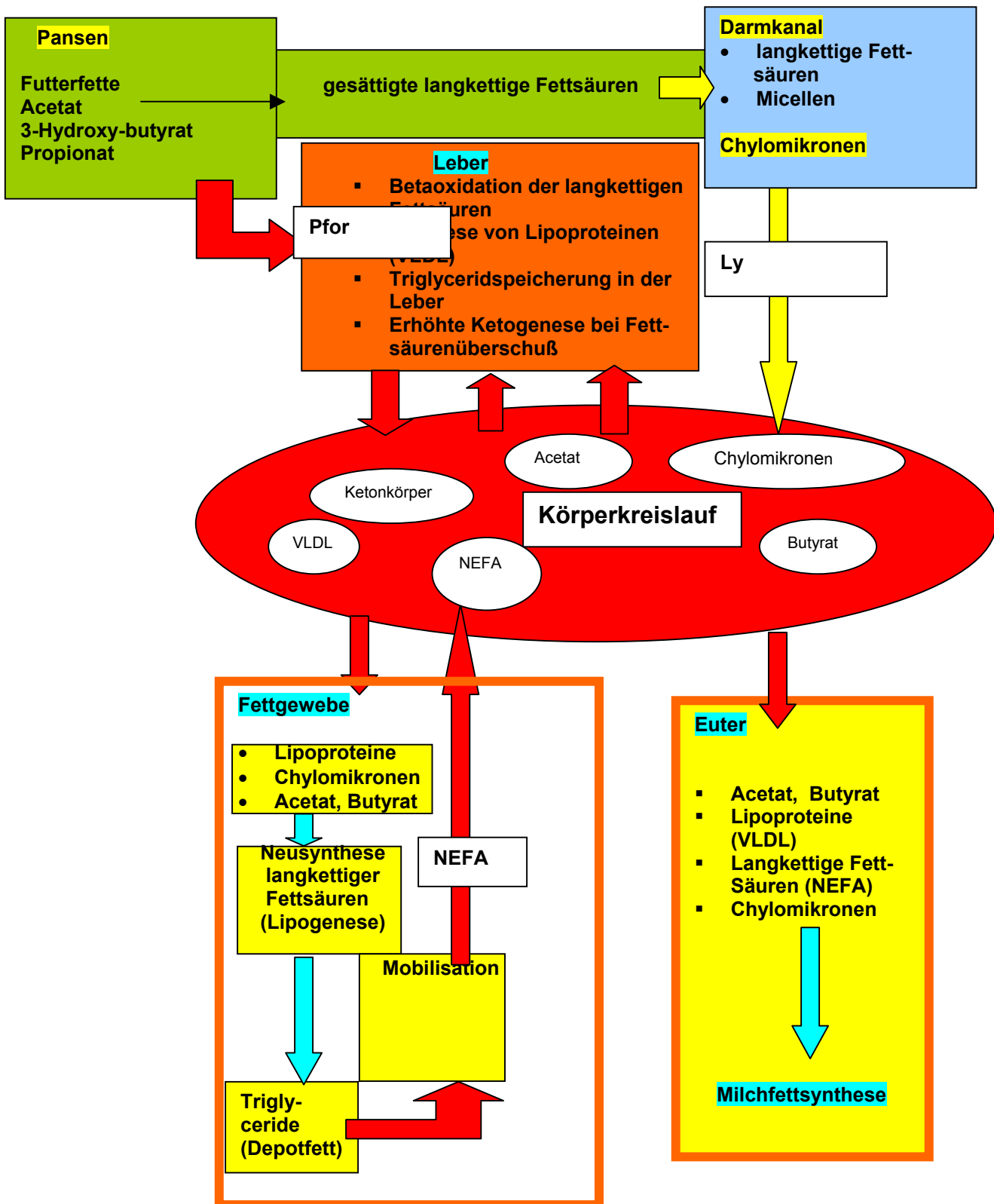


Abb.12: Zusammenfassende schematische Übersicht über den Fettstoffwechsel der Milchkuh

Stoffwechsel der Proteine und N-Verbindungen

Nahrungsproteine liefern Aminosäuren, die für die Aufrechterhaltung lebenswichtiger Funktionen, für Reproduktion, Wachstum und Laktation erforderlich sind. Während Nichtwiederkäuer vollständig auf die Zufuhr lebenswichtiger (essentieller) Aminosäuren mit der Nahrung angewiesen sind, haben Wiederkäuer die Möglichkeit, Aminosäuren aus im Pansen entstandenem Mikrobenprotein zu verwerten. Als Stickstoffquelle werden dabei auch NPN-Verbindungen genutzt. Des weiteren verfügt der Wiederkäuer über Mechanismen der Einsparung von Stickstoff. Überschüssiger Harnstoff, der normalerweise über die Nieren ausgeschieden wird, kann über den Speichel in den Pansen rezykliert werden und steht dort der mikrobiellen Proteinsynthese erneut zur Verfügung. Forschungen haben ergeben, dass es möglich ist, Kühe mit proteinfreien Rationen zu füttern, wenn ausreichend NPN-Verbindungen vorhanden sind. Dabei ließen sich pro Kuh und Tag etwa 580 g hochwertiges Milchprotein und bis zu 4000 kg Milch/Jahr erzeugen.

Die durch proteolytische Enzyme freigesetzten Aminosäuren werden in den Enterozyten des Dünndarms in Alanin und Glutaminsäure umgewandelt, ehe sie über den Pfortaderkreislauf in die Leber gelangen. Hier werden sie wieder in verschiedene Aminosäuren rückverwandelt, ins Blut abgegeben oder zur intrahepatischen Proteinsynthese herangezogen. Die Leber synthetisiert z. B. Plasmaproteine (Albumine, Globuline, Gerinnungsfaktoren) und zahlreiche andere Proteine (Enzyme, Strukturproteine, Hormone u.a.).

Ständig werden die Proteine auf- und wieder abgebaut. Da ein Teil der Proteine verstoffwechselt wird, ist das Tier auf den Ersatz aus Nahrungsproteinen angewiesen. Die Aminosäuren werden im Dünndarm absorbiert und der Leber zugeführt. Aus dem Aminosäurenpool der Leber werden sie für die Synthese von Gewebs- und Milchprotein sowie von Enzymen und Hormonen genutzt. Bei Proteinmangel kann die Leber aus Kohlenhydraten (Pyruvat, Zuckerphosphate u.a.) auch selbst Aminosäuren synthetisieren. Umgekehrt kann sie aus dem Proteinabbau stammende Aminosäuren für die Neubildung von Glucose nutzen, was in der Phase der negativen Energiebilanz nach dem Abkalben äußerst wichtig ist.

Im Wiederkäuerorganismus entsteht **Ammoniak** auf zweierlei Wegen:

- Durch Abbau von Futterprotein im Pansen
- Durch Desaminierung und Transaminierung der Aminosäuren im Stoffwechsel.

Ammoniak ist schon in niedrigen Konzentrationen ein Zellgift. Es wirkt vor allem toxisch auf das Nervensystem. Seine rasche Umwandlung in nichttoxische Verbindungen ist daher lebenswichtig.

Es werden vor allem 2 Wege besprochen: Bildung von Glutamin und Bildung von Harnstoff

Bildung von Glutamin aus Glutaminsäure (Glutamat) und Ammoniak, vermittelt durch das Enzym Glutamin-Synthetase. Glutamin dient im Stoffwechsel gleichzeitig als die Transportform des Ammoniaks. Es kann mittels Glutaminase wieder in Glutamat und Ammoniak gespalten werden. Glutaminase findet sich vor allem in der Niere, sodass Ammoniak über den Harn ausgeschieden werden kann.

Bildung von Harnstoff

Die wichtigste Entgiftungsreaktion von Ammoniak erfolgt über den sogenannten **Ornithin-Zyklus**. In ihm wird Ammoniak in nichttoxischen, durch biologische Membranen leicht diffundierenden Harnstoff umgewandelt, der entweder über die Nieren ausgeschieden oder über die Speicheldrüsen in den Pansen rezykliert wird.

Der in der Leber aus überschüssigem Ammoniak im Ornithin-Zyklus synthetisierte Harnstoff wird über den Harn und die Milch ausgeschieden, was diagnostisch genutzt werden kann (s. Stoffwechselüberwachung). Niedrige Harnstoffkonzentrationen in Blutplasma oder Milch sind ein Zeichen für zu geringe Versorgung mit Futterprotein. Hohe Harnstoffkonzentrationen deuten hingegen auf eine überschüssige Rohproteinversorgung bei gleichzeitigem Mangel an leichtfermentierbaren Kohlenhydraten hin.

Eine zusammenfassende Übersicht von Verdauung und Stoffwechsel der Proteine und N-Verbindungen gibt Abb. 13.

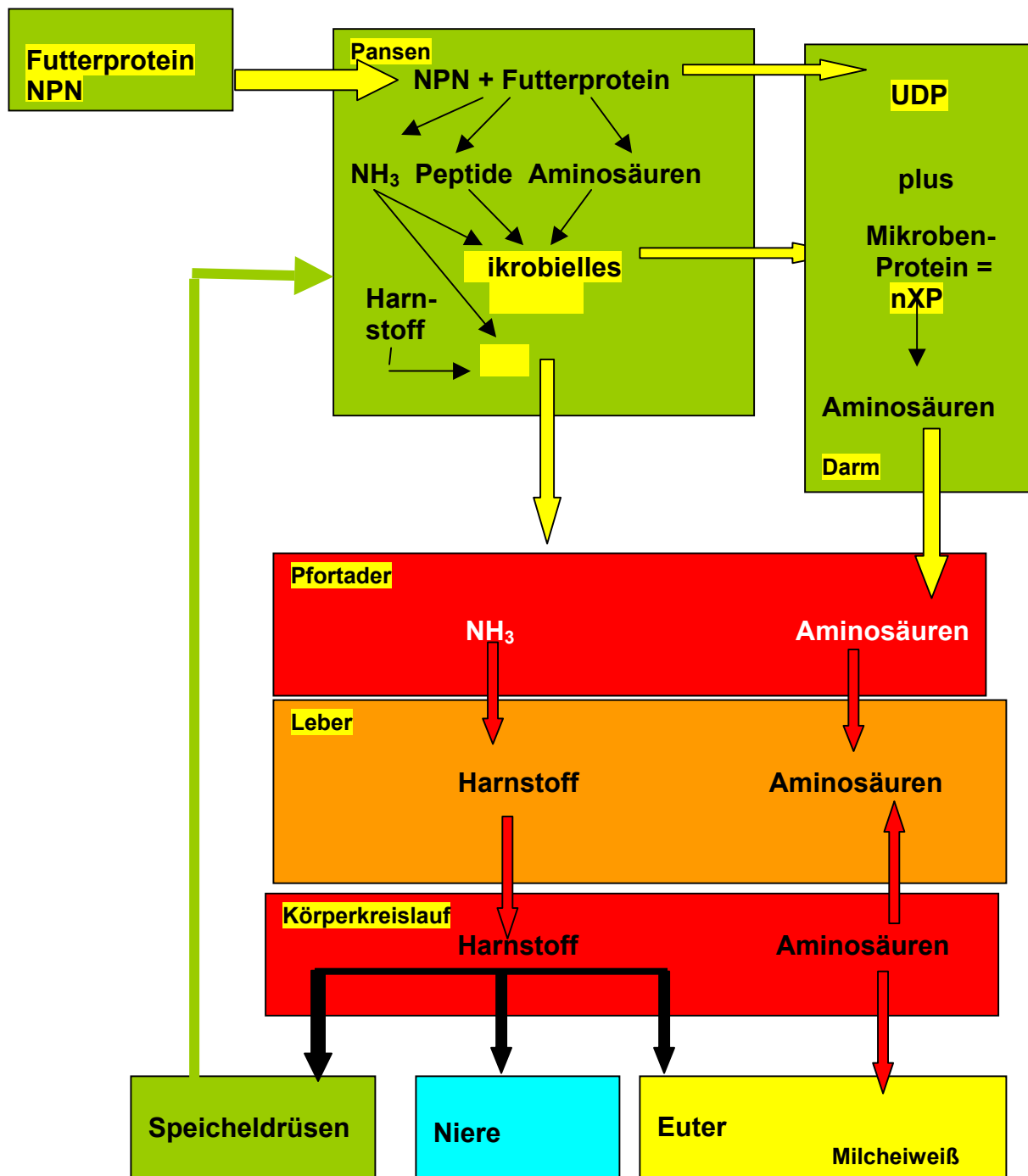


Abb.13: Verdauung und Stoffwechsel der Proteine und N-Verbindungen

Literatur

Agripedia Livestock nutrition
Digestive tract of the ruminant
<http://frost.ca.uky.edu/agripedia/acs106/girumin.htm>

Anonym
From feed to milk. Understanding rumen function
Part 1 and Part 2
<http://www.das.cas.psu.edu/dcn/catnut/422/part1.htm>
<http://www.das.cas.psu.edu/dcn/catnut/422/part2/feed.htm>

Anonym
The ruminant digestive tract
<http://asnet.tamu.edu/www/nutr/ansc689/>

Anonym
Part I: The digestive system of the ruminant
<http://www.gov.nf.ca/agric/pubfact/livestoc/LSD037.htm>
Part II: The rumen: The key to effective feeding
<http://www.gov.nf.ca/agric/pubfact/livestoc/Lsd040.htm>
Part III: Feed management and the rumen
<http://www.gov.nf.ca/agric/pubfact/livestoc/LSD039.htm>

Anonym:

Animal nutrition

Carbohydrates in ruminants
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl07sum.htm>
Lipids- classification
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl08sum.htm>
Lipids-Transport and mobilization
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl09sum.htm>
Lipids-Metabolism
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl10sum.htm>
Proteins
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl11sum.htm>
Proteins-Digestion and absorption
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl12sum.htm>
Proteins-Quality
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl13sum.htm>
Energy metabolism-1
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl14sum.htm>
Energy metabolism-2
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl15sum.htm>
Water soluble vitamins-1
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl16sum.htm>
Water soluble vitamins-2
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl17sum.htm>
Fat soluble vitamins-1
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl18sum.htm>
Fat soluble vitamins-2
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl19sum.htm>
Macrominerals
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl20sum.htm>
Microminerals-1
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl21sum.htm>

Microminerals-2
<http://osu.orst.edu/instruct/ans311/cl22sum.htm>

AUSTGEN, Laura, BOWEN, R. A. (1998):
Pathophysiology of the digestive system
<http://arbl.cvmb.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/index.html>
Rumen physiology and rumination
<http://arbl.cvmb.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/herbivores/rumination.html>
Basic fermentation chemistry
<http://arbl.cvmb.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/herbivores/ferment.html>
Fermentation microbiology and ecology
<http://arbl.cvmb.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/herbivores/microbes.html>
Digestive anatomy in ruminants
http://arbl.cvmb.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/herbivores/rumen_anat.html
Nutrition absorption and utilization in ruminants
http://arbl.cvmb.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/herbivores/rum_absorb.html

- BLUM, J. W. (2001):
Mikrobielle Verdauung und Verwertung mikrobieller Produkte bei vet.-med. relevanten Säugern
Neues Curriculum, Block Verdauungsapparat, WS 2001-2002, Vet. med. Fak. Univ. Bern
- DIRKSEN, G. : Verdauungsapparat (S. 288-397)
In DIRKSEN, G.; GRÜNDER, H.D.; STÖBER, M. (Hsg.) (1990):
Die klinische Untersuchung des Rindes
Verlag Paul Parey Berlin und Hamburg
- HERDT, T. "Assessment of rumen function"
Slds. 01 - 46
<http://zebu.cvm.msu.edu/courses/vm556/rumen1/sld001.htm>
- HOGENKAMP, D. ; EITING, L. (2001):
Das Sano-Fütterungskonzept - TMR für Milchkühe
Handbuch der tierischen Veredlung 2001
Karlage Verlag Osnabrück, S.251
- GASTEINER, J. (2001):
Grundlagen zu den Verdauungsvorgängen beim Rind - Pansenphysiologie, Pansenazidose
28. Viehwirtschaftliche Fachtagung BAL Gumpenstein 2001
- MÜLLER, M. (2001):
Auswirkungen der veränderten futtermittelrechtlichen Lage auf die Proteinversorgung der Hochleistungs-
kuh
Rekasan-Journal, 8., Heft 15/16; S. 36
- OKINE, E. K.; KENELLY, J. J. (1994):
From fiber to starch: The evolution of the cow
<http://www.afns.ualberta.ca/dairy/dp472-5q.htm>
- Pennsylvania State University Cooperative Extension Service
From feed to milk
Understanding rumen function. Part I and Part II
http://animsci.agrenv.mcgill.ca/courses/450/extra/feed_to_milk/index.html
- STOKES, S. R.
Balancing carbohydrates for optimal rumen function and animal health
<http://www.afns.ualberta.ca/wcds/wcd97/ch06-97.htm>
- TUCKER, B. (1996):
Buffers and acid/base balance in dairy cows
<http://www.moormans.com/feedfacts/dairy/dairysept96/buffers.htm>
- WILKS, D. L. (1997):
Feed rumen microbes first
<http://www.moormans.com/feedfacts/dairy/dairysept97/rumen.htm>
- WOLFRAM, S.
Motorik, Verdauungs- und Sekretionsprozesse der Vormägen und des Labmagens - eine kurze Übersicht
Schweiz. Arch. Tierheilkunde, H. 7, 1996