

teme das Ergebnis eines evolutionären Wechselspiels. Sie sind der Mittler zwischen den verfügbaren Nahrungsquellen und den Bedürfnissen des Organismus. Weil Lebewesen nur ungern als Nahrung enden, findet ein ständiger Wettlauf zwischen ihren Abwehr- oder Vermeidungsstrategien und den Verdauungstrakten ihrer Konsumenten statt. Im Laufe der Entwicklungsgeschichte haben sich daher sehr variantenreiche Verdauungssysteme herausgebildet. Im Folgenden eine kleine, nicht repräsentative Auswahl von Tieren und ihren unterschiedlichen Strategien für die Nährstoffversorgung, die – nach dem Atmen – elementarste Aufgabe eines Organismus.

## Das Schweigen der Lämmer

**Nahrung:** Gräser, Kräuter, Blätter, Triebe, Knospen von Sträuchern und Bäumen

**Anatomie und Funktion:** Das Schaf ist ein typischer Wiederkäuer. Beim Weiden schlingt es große Pflanzenmengen in den Pansen hinunter, also in seinen ersten Vormagen. „Vormagen“ deshalb, weil er wie die beiden nächsten Mägen (Netz- und Blättermagen) ursprünglich aus Speiseröhrenabschnitten entstanden ist. Die hochaktive Mikroflora des Pansens beginnt nun damit, die Cellulose und Hemicellulose abzubauen, die für Säuger ansonsten unverdaulich wäre. Einige Zeit später wird die Masse hoch gewürgt und in Ruhe gründlich durchgekaut. Nach einer erneuten Fermentation gelangt der Nahrungsbrei vom Pansen in den Netzmagen. Dieser verdichtet faserige Bestandteile zu kleinen Klümpchen, um sie erneut wiederkäuen zu können. Der restliche feine Nahrungsbrei gelangt in den Blättermagen, wo er weiter zerrieben und ausgepresst wird.

Erst jetzt geht es in den eigentlichen Magen, den Labmagen. Dort wirken, wie bei Tieren mit nur einem Magen (Monogastriden) auch, Salzsäure und Enzyme, die Fette und Eiweiß spalten, sodass die Nährstoffe im angrenzenden Dünndarm aufgenommen werden können. Im Magen wird die Mikroflora des Speisebreis abgetötet und chemisch aufbereitet. Denn Wiederkäuer leben nicht vom „Gras“, sondern davon, dass sie ihre Mikroflora verdauen, die ihnen das lebenswichtige Eiweiß liefert. Der Pansen ist ein Reaktor, der wie eine Biogasanlage mit pflanzlichem Material beschickt wird, um Single Cell Protein zu ernten. Dabei entstehen allerdings große Mengen an Nukleinsäuren. Glücklicherweise verfügen Wiederkäuer über effektive Pancreasribonukleasen, die eine Entgiftung ermöglichen.

Ihren Energiebedarf decken die Tiere hingegen mit kurzkettigen, flüchtigen Fettsäuren wie Acetat und Butyrat, die ebenfalls im Pansen von den Mikroben

## Wasserstoff in der Wüste

Zahlreiche Tiere wie Rinder, Giraffen, Flusspferde, Kängurus oder Stummelaffen sind Wiederkäuer. Einige von ihnen, beispielsweise Schafe, speichern in ihren großen Vormägen Wasser, das sie während Trockenperioden nutzen, sodass sie geraume Zeit ohne Tränke auskommen. Aus diesem Grund können Wiederkäuer nicht nur von den kargen Weiden des Hochgebirges oder arktischer Regionen leben, sondern gleichermaßen die Wüsten dieser Erde besiedeln.

Ihren evolutionären Erfolg verdanken die Wiederkäuer natürlich auch der Anpassungsfähigkeit ihrer Pansenflora, die ein einzigartiges Ökosystem aus Bakterien, Pilzen und Protozoen bildet. Dort leben fast ausschließlich Anaerobier, denen die Zufuhr von Sauerstoff schlecht bekommen würde. Mangels Kultivierbarkeit dieser Mikroben liegen noch viele Vorgänge im Dunkeln. Sicher ist aber, dass das ganze System aus ineinandergreifenden Kreisläufen besteht. Ammoniak und Kohlendioxid beispielsweise, die von einem Symbionten abgegeben werden, werden von anderen fixiert und wieder dem Stoffwechsel zugeführt. Eine wichtige Stickstoffquelle ist der Harnstoff, der vom Wiederkäuer nur teilweise über die Nieren ausgeschieden wird. Ein erheblicher Teil gelangt in den Speichel und wird der Pansenflora wieder zur Eiweißsynthese zur Verfügung gestellt. Beim Abbau von Zellulose entsteht Wasserstoff, der Spezialisten wie *Methanobacterium ruminantium* als Energiequelle dient. Zusammen mit Kohlendioxid produzieren sie daraus Methan.

## Urwald im Bauch

Neben den bakteriellen Gesellschaften besiedeln auch viele Pilze den Pansen. Ihnen obliegt es beispielsweise, die schützende Wachsschicht auf Blättern abzubauen. Die Protozoen wiederum ernähren sich von Pilzen bzw. Bakterien und kontrollieren damit deren Population. Pro Minute weiden sie schätzungsweise ein Prozent der Mikroben im Pansen ab. Andere Protozoen sind „carnivor“ und erbeuten ihrerseits Protozoen, die sie damit ebenfalls regulieren.

Die Pansenflora entspricht in ihrer Komplexität einem tropischen Ökosystem. Da es sich teilweise um Spezialisten handelt, die ausschließlich im Pansen vorkommen, müssen sie vom Muttertier auf das Kalb übertragen werden. Dies geschieht offenbar durch das Ablecken des Kälbchens. Wie die Anaerobier allerdings in den Nachwuchs gelangen ist bislang ungeklärt.

gebildet werden. Lediglich die Propionsäure hat eine Sonderstellung, denn sie kann vom Wiederkäuer in Kohlenhydrate umgewandelt werden.

**Vorteile:** Die Ausbeute ist hoch, weil die mehrfache mechanische Zerkleinerung alle Pflanzenbestandteile der komplexen Mikroflora zugänglich macht. Diese kann sogar Harnstoff verwerten, um daraus Eiweiß zu bilden, was den Konsum minderwertigen Futters erlaubt. Das komplexe Aufschlusssystem ermöglicht es dem Schaf, viele verschiedene Pflanzen zu nutzen, also nicht nur Gräser und Kräuter, sondern auch Laub von Sträuchern und Bäumen. Die Entgiftung der Antinutritiva wird der artenreichen Pansenflora überlassen. Damit finden die Tiere immer irgendetwas Fressbares und die verminderte innerartliche Konkurrenz um hochwertige Nahrung erlaubt ihnen ein Leben in der Herde, was dem Einzeltier Schutz bietet.

**Nachteile:** Fermentationsanlagen erfordern viel Raum, da große Rohstoffmengen auch einer großen Zahl von Mikroben ein geeignetes Habitat bieten müssen. Bei der Fermentation entstehen – wie bei einem Bioreaktor – enorme Mengen Verdauungsgase (bei einem Schaf etwa sechs Liter pro Stunde, bei einem Rind 40 Liter). Können sie nicht entweichen, führt dies schnell zum Tod des Tieres.

Das Schaf ist fast den ganzen Tag mit Fressen und Wiederkäuen beschäftigt. Dennoch kann es nicht alle Pflanzen verwerten. Es meidet giftige und unverdauliche

Pflanzen. Geeignete Gräser oder Büschel werden mit den Lippen umfasst, mit den Schneidezähnen gegen die Gaumenplatte gepresst und dabei tief abgeschnitten. Damit sind Schafe – obwohl Weidetiere – keine „selbstfahrenden Rasenmäher“, sondern genauso wählerisch wie Allesfresser, die natürlich auch nicht alles fressen.

## Falsches Spiel mit Roger Rabbit

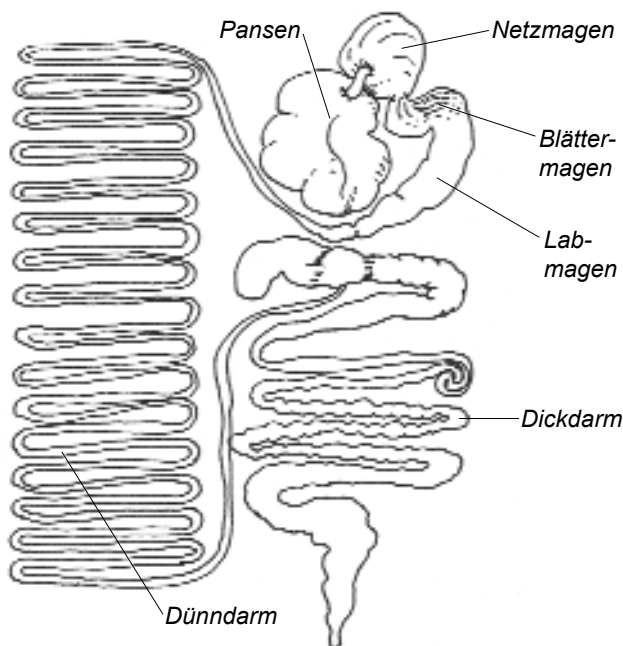
**Nahrung:** Gras, Gemüse, eigener Kot

**Anatomie und Funktion:** Das Kaninchen hat einen so genannten Stopfmagen, der die Nahrung vorverdaut. Allerdings besitzt dieser kaum Muskeln und kann deshalb den Speisebrei nicht selbst weiterleiten. Der Mageninhalt wird nur durch frisch hinzu kommendes Futter weitergeschoben. Deshalb fressen Kaninchen unentwegt.

Kaninchen zählen trotz ihrer geringen Größe ebenfalls zu den Wiederkäuern. Das ist in zweierlei Hinsicht bemerkenswert: Erstens haben kleine Tiere pro Kilo Körpergewicht einen viel höheren Energiebedarf als große. Zweitens bietet ihr Körper wenig Platz für große Fermentationsanlagen. Sie haben deshalb eine andere Methode entwickelt: Sie pflegen ihren eigenen Kot zu fressen. Man nennt dieses Verhalten Coprophagie (Verzehr von Kot) oder Caecotrophie (Verzehr von Blinddarmkot). Kaninchen fressen meistens den nährstoffreicheren Blinddarmkot. Ihr Blinddarm (Caecum) fasst, um eine bakterielle Fermentation zu ermöglichen, bis zu fünfmal mehr Verdauungsbrei als ihr Magen. Bei der ersten Passage durch den Darm werden zwar nur acht Prozent der Cellulose aufgeschlossen, doch dank der Tätigkeit der Mikroben ist dieser Kot mit mikrobiellem Eiweiß angereichert (bis zu 39 Prozent i. Tr.). Da das Eiweiß an dieser Stelle im Verdauungstrakt aber nicht mehr aufgeschlossen werden kann, verspeisen es die Tiere nach der Ausscheidung für einen zweiten Durchgang.

Die Trennung von Blinddarmkot und rohfaserreichen harten Köttern erfolgt mechanisch durch antiperistaltische Bewegungen und retrograden Fluss im Darm. Dadurch gelangen größere Partikel in das Colon, während die Flüssigkeit samt der feinen Partikel und der Mikroorganismen in das Caecum transportiert wird. Dieser Vorgang ersetzt den Netzmagen der echten Wiederkäuer.

Der helle und weiche Blinddarmkot wird morgens zum Frühstück frisch vom Anus gefressen. Eine feste Membran schützt die darin enthaltenen Mikroben vor dem sauren Magensaft. So verbleibt der Kötter für eini-



### Schaf

(nach Stevens CE, Hume ID 1995)