

Verdauungssysteme

Mensch

Wiederkäuer (Pansen)

Termite

Symbiosen (Nematoden, Pogonophoren, Muscheln)

Verdauungssysteme

in der Regel charakterisiert durch Nährstoffüberschuss

Sind die Mikroorganismen

Konkurrenten oder Symbionten?

Zwei Modelle:

Competition Modell

v.a. Carnivore

Cooperation Modell

v.a. Herbivore

Competition Modell

- Mikroben und Wirt konkurrieren um dieselben Ressourcen.
- Der Zutritt von Mikroben wird durch die "Säureschranke" im Magen verhindert (Fehlgärungen).
- Richtig entwickeln können sich die Mikroben erst im Dickdarm, wo sie auf dem wachsen was der Wirt "überlässt."

Cooperation Modell

- Der Wirt ist zum auf die Mikroben angewiesen, um Nahrungsbestandteile verwerten zu können (z.B. Cellulose).

Sind Mikroben im Verdauungstrakt von Carnivoren nur Konkurrenten?

Experimente mit Tieren ohne Darmflora

- Aseptische Aufzucht, keine Entwicklung der Darmflora
- Hohe Dosen von Antibiotika, Zerstörung der Darmflora

————→ In der Regel Zeichen starker Unterernährung, oft Tod des Tieres
(Herbivoren können überhaupt nicht ohne Darmflora leben)

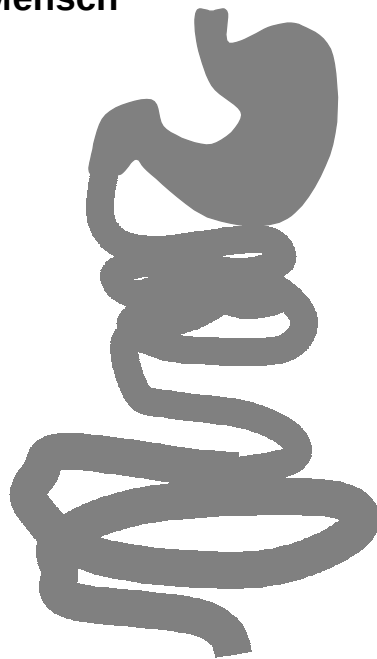
Warum?

————→ Vitaminexkretion: Thiamin, Riboflavin, Pyridoxin, Vitamine B₁₂ und K
Essentielle Aminosäuren, u.a.

Was bestimmt die Zusammensetzung der mikrobiellen Darmflora?

- **Wirtsart**
Jede Tierart hat eine recht spezifische Zusammensetzung der Darmflora, die sich auch regional nur wenig unterscheidet.
Bsp. Termiten: *Desulfovibrio intestinalis* in bodenfressenden Termiten aus Afrika und Australien
- **Ernährung**
Je nach Zusammensetzung der Nahrung ergeben sich Verschiebungen in der Darmflora.
Bsp. Rind: Stärkereiche Nahrung (Körner) fördert die Dominanz von *Streptococcus bovis*, der sonst nur eine untergeordnete Rolle spielt.
- **Zeit der Darmpassage**
Bsp. Mensch, Darmpassage dauert etwa 24 h. Faeces besteht zu knapp 1/3 aus mikrobieller Biomasse. In der Regel teilen sich Darmbakterien etwa zweimal am Tag.

Mensch



Magen
pH 1,5

in der Regel bakterienfrei

Dünndarm
pH 2-5

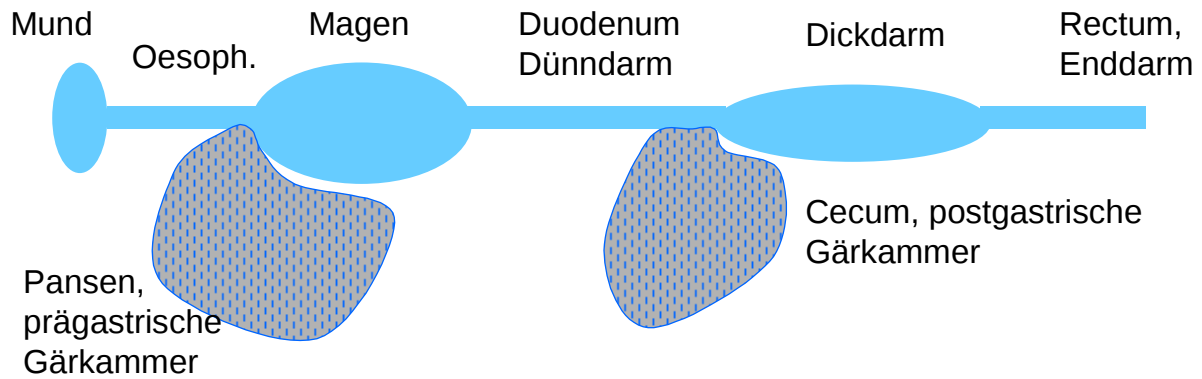
pH-Wert steigt kontinuierlich an
Im vorderen Teil des Jejunum
 10^2 - 10^3 Zellen·ml⁻¹, v.a. *Lactobacillus* sp., *Enterococcus* sp.

Dickdarm
pH 7

1 - $3 \cdot 10^{11}$ Zellen·ml⁻¹
z.B. *Bacteroides*, *Bifidobacterium*,
Enterococcus, *Peptococcus*,
Enterobacter, u.a.

Menschlicher Kot besteht zu 30-50% aus bakterieller Biomasse.

Allgemeiner Aufbau eines Vertebraten-Verdauungssystems



Die meisten herbivoren Vertebraten verfügen über eine Gärkammer, in der die Fermentation von Pflanzenmaterial abläuft. Bei Wiederkäuern (Rind, Schaf, Kamel) liegt sie (Pansen) vor dem eigentlichen Magen. Bei anderen Herbivoren liegt sie am Ende des Dünndarms vor dem Dickdarm (z.B. Nagetiere, Pferde).

Pansen

Erweiterung des Ösophagus

Gärkammer mit großem Volumen	Rind	ca. 100-250 l
	Schaf	ca. 6 l

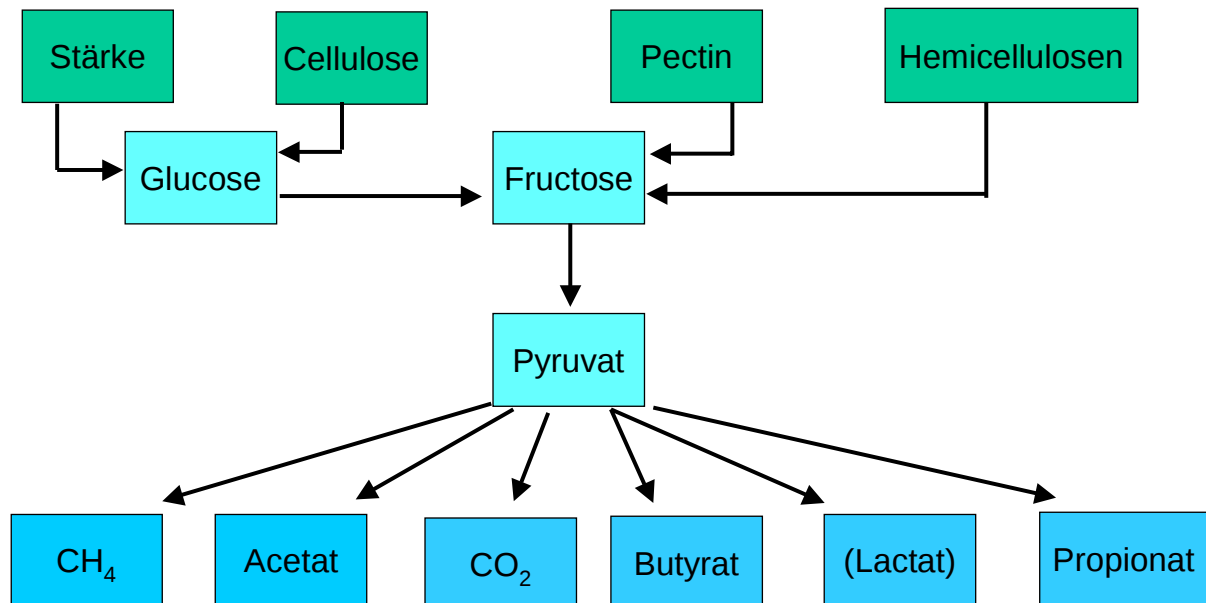
Verweildauer der Nahrung im Pansen	9-12 h
------------------------------------	--------

Die Nahrung wird verschluckt, mit Speichel (Bicarbonat-gepuffert) gemischt und gelangt in den Pansen. Dort wird die Masse gut durchmischt und ist wegen der Bewegung der Muskeln in der Pansenwand ständig in Bewegung. Im Netzmagen werden faserige Bestandteile der Nahrung ausgesiebt und zu kleinen Klumpen verdichtet, die nach Heraufwürgen wiedergekaut werden. Danach gelangt die Nahrung in den eigentlichen Magen (Abomasum).

Was passiert im Pansen?

Vergärung von Pflanzenbestandteilen

100 Glucose $\longrightarrow$ 113 Acetat + 35 Propionat + 26 Butyrat + 104 CO_2 + 61 CH_4 + 43 H_2O



Was hat die Kuh davon?

- Gärungsendprodukte (Acetat, Propionat und Butyrat)
- Bakterielle Biomasse, gelangt nach dem Wiederkäuen in das Abomasum
- Im Pansen wird Stickstoff durch anaerobe Mikroorganismen fixiert

Warum entwickeln sich im Pansen keine acetotrophen Methanogenen oder syntrophe Fettsäureoxidierer?

Die Aufenthaltszeit der Nahrung im Pansen ist zu kurz, damit sich diese langsam wachsenden Bakteriengruppen etablieren können.

Die "Aufgabe" der hydrogenotrophen Methanogenen im Pansen besteht im Abfangen des während der Gärung entstandenen Wasserstoffs.

Acetogene Bakterien spielen nur eine untergeordnete Rolle, sie sind gegenüber den Methanogenen zu konkurrenzschwach (für H_2).

Welche Mikroorganismengruppen kommen im Pansen vor?

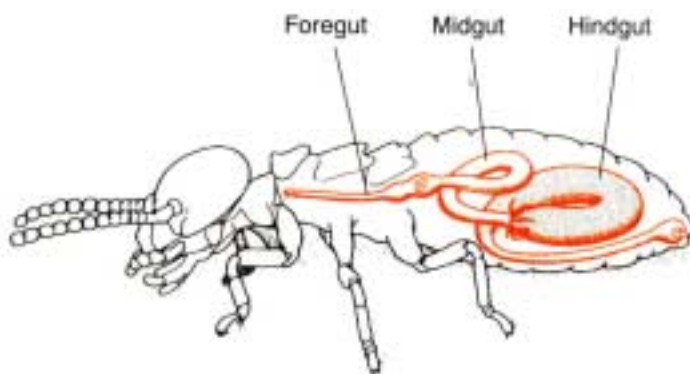
Cellulose- und Hemicellulose-Abbauer	<i>Ruminococcus albus</i> , <i>Butyrivibrio fibrisolvens</i> , <i>Fibrobacter succinogenes</i> , <i>Clostridium locheadii</i> , <i>Lachnospira multiparus</i>
Stärke und Zucker-Abbauer	<i>Selenomonas ruminantium</i> , <i>Succinomonas amylolytica</i> , <i>Bacteroides ruminicola</i> , <i>Streptococcus bovis</i>
Lactat-Verwerter $Lac \rightarrow Prop + Ac$	<i>Selenomonas lactilytica</i> , <i>Megasphaera elsdenii</i> , <i>Veillonella sp.</i>
Succinat-Verwerter $Succ \rightarrow Prop + CO_2$	<i>Selenomonas ruminantium</i> , <i>Veillonella parvula</i>
Methanogene $CO_2 + H_2 \rightarrow CH_4$	<i>Methanobrevibacter ruminantium</i> , <i>Methanomicrobium mobile</i>

Pilze und Protozoen sind am Polymerabbau beteiligt, spielen aber nur eine untergeordnete Rolle. Ciliaten ernähren sich von den Bakterien und sind somit wichtig in der Aufrechterhaltung einer stabilen Bakteriengemeinschaft.

Kennparameter des Pansens

pH	5,5 - 6,9 (im Mittel 6,4)
Temperatur	37-42°C
Osmolarität	250-350 meq·l ⁻¹
Trockenmasse	10-18 %
Redoxpotential	-350 bis -400 mV
Gasphase	65 % CO ₂ , 27 % CH ₄ , 7 % N ₂ , 0,6 % O ₂ , 0,2 % H ₂
Gelöste Fettsäuren	68 mM Acetat, 20 mM Propionat, 10 mM Butyrat, 2 mM FS > C ₄
Ammonium	2-12 mM
Prokaryonten	10 ¹⁰ - 10 ¹¹ g ⁻¹ (über 200 Arten)
Ciliaten	10 ⁴ - 10 ⁶ g ⁻¹
Pilze	10 ² - 10 ⁴ g ⁻¹ (Zoosporen)

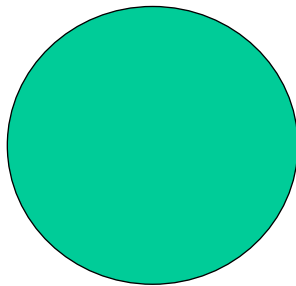
Termitendarm



Bei holzverwertenden ‚niederen‘ Termiten (z.B. *Reticulitermes flavipes*, ca. 3 mm lang) ist der vergrößerte Enddarm (Hindgut) die Gärkammer. Sie beinhaltet eine Lebensgemeinschaft aus Bakterien und Protozoen, die in der Lage ist Lignocellulose zu verwerten.

Brune 1998 Trends in Biotechnology 168:16ff.

Wie die Wiederkäuer sind Termiten auf anoxische Bedingungen in der Gärkammer angewiesen. Aerobe Mikroorganismen würden die Nahrungsbestandteile bis zum CO_2 durchoxidieren.



Kuhpansen

Volumen V ca. 100 l

Oberfläche A ca. 1 m²

A : V 10 m²·m⁻³

Oxischer Anteil des Volumens < 0,01 %



Termitendarm

Volumen V ca. 1 µl

Oberfläche A ca. 5 mm²

A : V 5000 m²·m⁻³

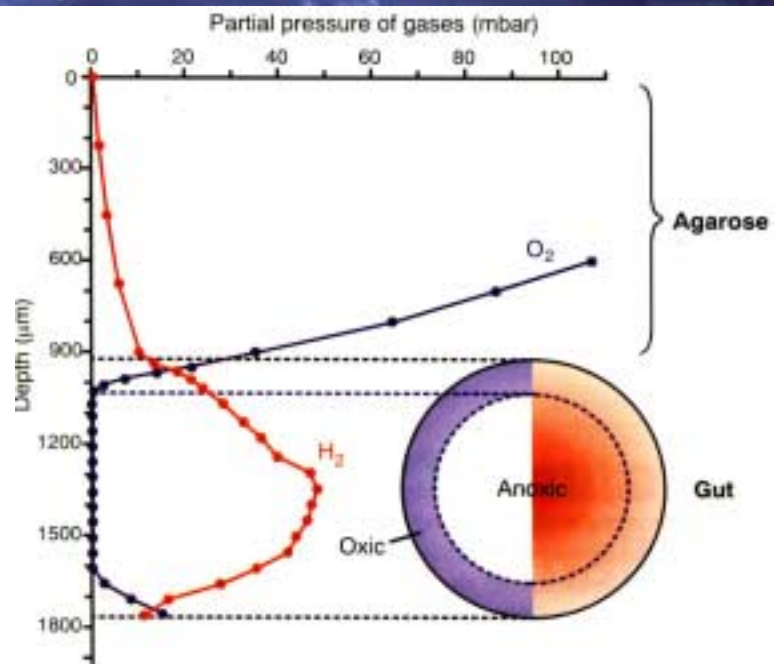
Oxischer Anteil des Volumens > 40 %

Messung von physikochemischen Parametern im Darmlumen mittels Mikroelektroden. Der Termitendarm wurde in Agarose eingebettet. Die Spitze einer Mikroelektrode ist mit einem Pfeil gekennzeichnet.

Brune 1998 Trends in Biotechnology 168:16ff.

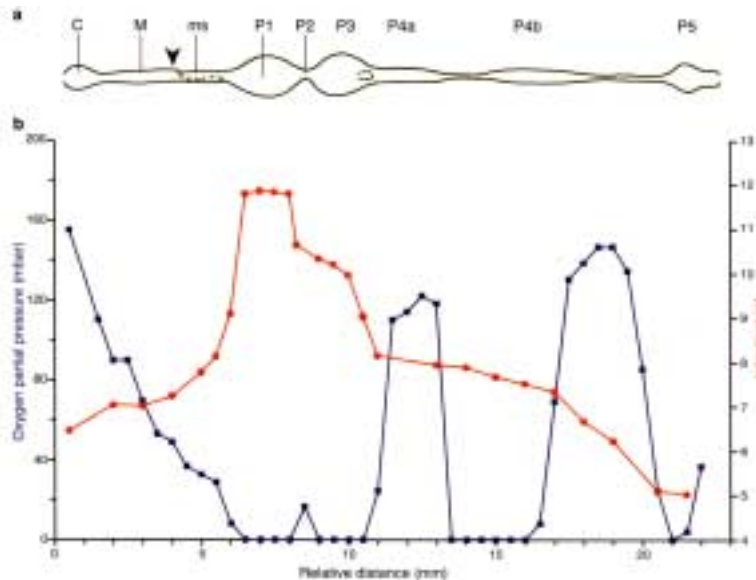


Radiale Sauerstoffprofile im Enddarm von *Reticulitermes flavipes*. Brune 1998 Trends in Biotechnology 168:16ff.

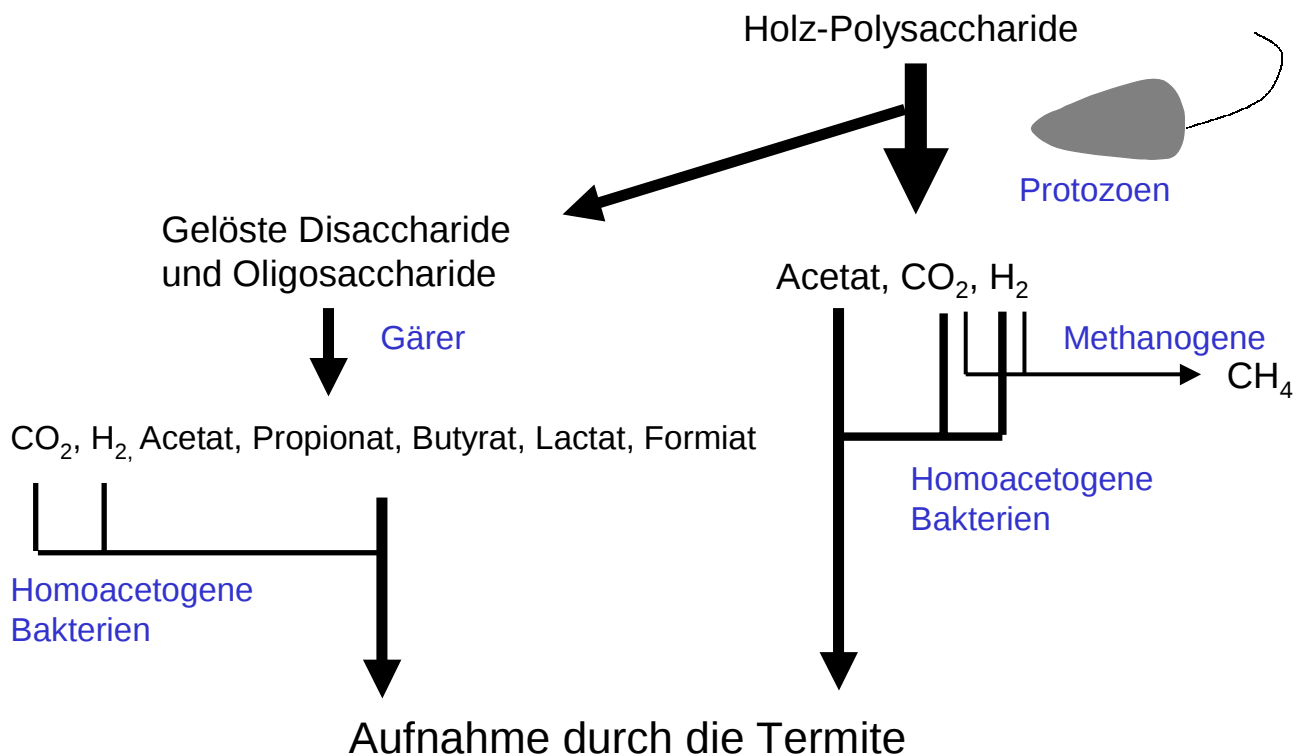


Bodenfressende Termiten stellen die zahlenmäßig wichtige Gruppe von Termiten dar (> 50 % aller Arten). Ihre Nahrung ist arm an leicht verwertbaren Kohlehydraten aber reich an polyphenolischen Komponenten, die schwer aufzuschließen sind.

Lösung: alkalische Hydrolyse



Schematische Zeichnung des Darms einer Arbeiterin von *Thoracotermes macrothorax* (a). B: pH und Sauerstoffgehalte in den verschiedenen Darmabschnitten. Der im Abschnitt P1 gemessene pH-Wert von 11,5-12 ist der höchste je in einem biologischen System gemessene pH-Wert. Nur die erweiterten Darmabschnitte sind im Zentrum anoxisch. Brune 1998 Trends in Biotechnology 168:16ff.



Die genauen Mechanismen, wie die Protozoen die Holzbestandteile verarbeiten und dabei die Polysaccharide so effektiv von den Lignin-Bestandteilen trennen ist noch weitestgehend unklar. Vermutlich spielt der in den Darm eindringende Sauerstoff eine wichtige Rolle in der partiellen Depolymerisation des Lignins; der größte Teil des Lignins wird jedoch mit den Faeces ausgeschieden.

Deutliche Unterschiede gibt es bei der Emission von Methan durch Termiten. Einige Arten scheiden Methan aus, während bei anderen (z. B. *Reticulitermes flavipes*) der größte Teil des Methans in den oxischen Bereichen an der Darmwand oxidiert wird.

Vögel



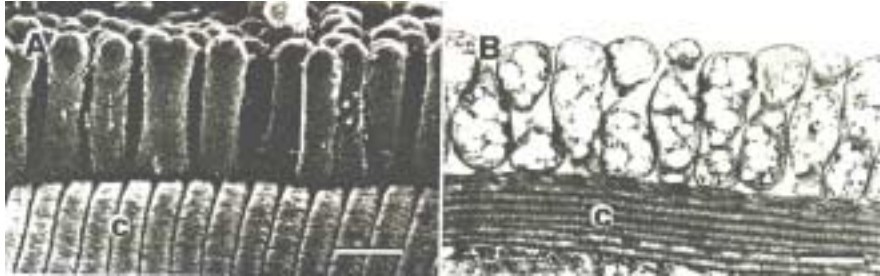
Der Hoatzin, ein Vogel mit einer dem Pansen entsprechenden sack-artigen Erweiterung des Ösophagus. Es ist der einzige bekannte Vogel, der eine derartige Gärkammer besitzt.



Der Honigzeiger, ein Vogel der Bienenwachs frisst. Die Verdauung des Wachses (d.h. die Oxidation zu Fettsäuren) übernehmen symbiotische Bakterien.

Nematoden (*Stilbonematidae*):

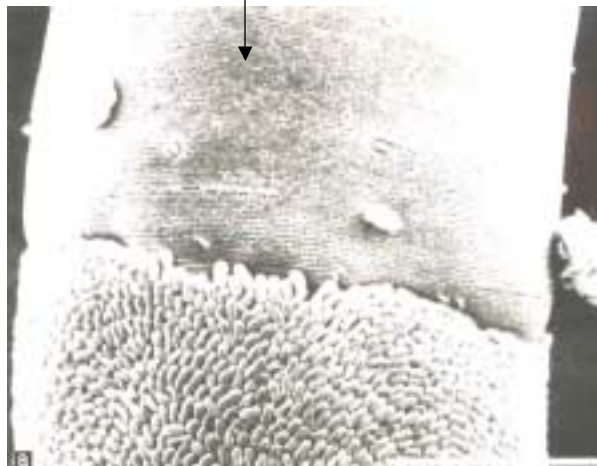
Nematoden wandern entlang der Redoxgradienten, wobei die Epibionten Sulfid oder Sauerstoff aufnehmen können. Der Nematode sorgt dafür, dass die Bakterien ihren Bedarf an Elektronenakzeptoren und -donatoren decken können. Die Lebensgemeinschaften aus Nematoden und Bakterien sind ausgesprochen stabil. In der Regel wird ein Bakterien-Phylotyp pro Wurm gefunden.



A: Anordnung epibiontischer Bakterien auf der Cuticula eines *Laxus* sp. (*Stilbonematidae*). Gut zu erkennen die sehr regelmäßige Anordnung der Bakterien und der "Kragen" an dem der Bakterienaufwuchs endet.

B: TEM Schnitt durch Wurmcuticula und Bakterienrasen.
(Polz et al. 1994 Appl Environ Microbiol 60:4461ff.)

Der Nematode weidet den
Bakterienrasen ab.

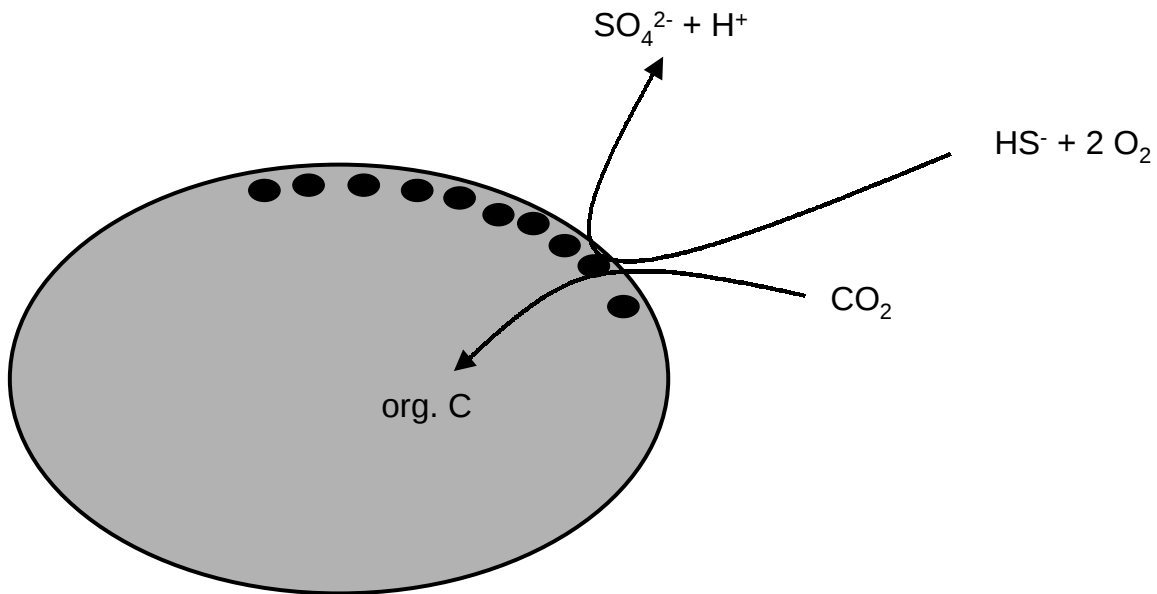


Inandrilus leukodermatus (Oligochaeta):

Vorkommen in kalkig-sandigen Sedimenten der Subtropen.

Der Organismus hat keinen Darm und verfügt über endosymbiontische Schwefeloxidierer. Da diese nicht abgeweidet werden können müssen sie ihren Wirt über abgegebenes organisches Material ernähren.

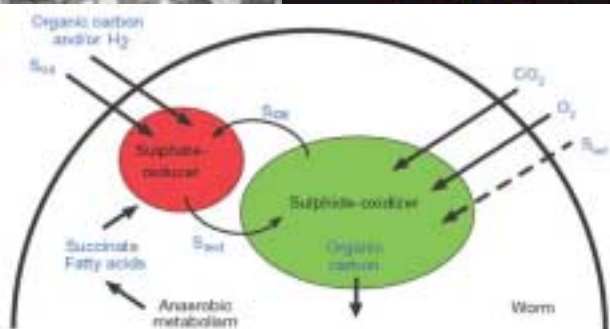
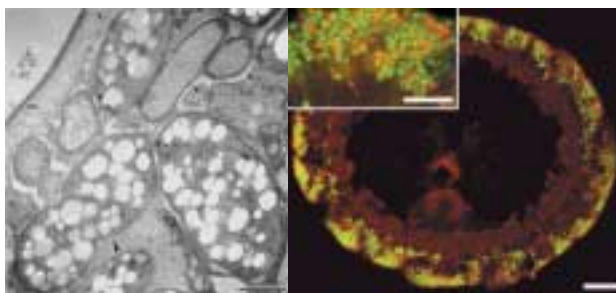
Die Endosymbionten sind chemolithoautotroph.



Olavius algarvensis (Tubificidae, Oligochaeta):

Vorkommen in sandigen Sedimenten von Seegrasbeständen.

Der Organismus hat zwei Typen von Endosymbionten: einen Sulfatreduzierer und einen Schwefeloxidierer.



Oben links: TEM Aufnahme eines Querschnitts durch *O. algarvensis*.

Dicht unterhalb der Cuticula die endosymbionten; SOB mit Zelleinschlüssen, SRB ohne Zelleinschlüsse.

Oben rechts: Fluoreszenz *in situ* Hybridisierung der Endosymbionten, SOB sind grün, SRB rot angefärbt.

Unten: Schema des postulierten Schwefelkreislaufs in *O. algarvensis*. Das System benötigt allerdings externe Elektronendonatoren.

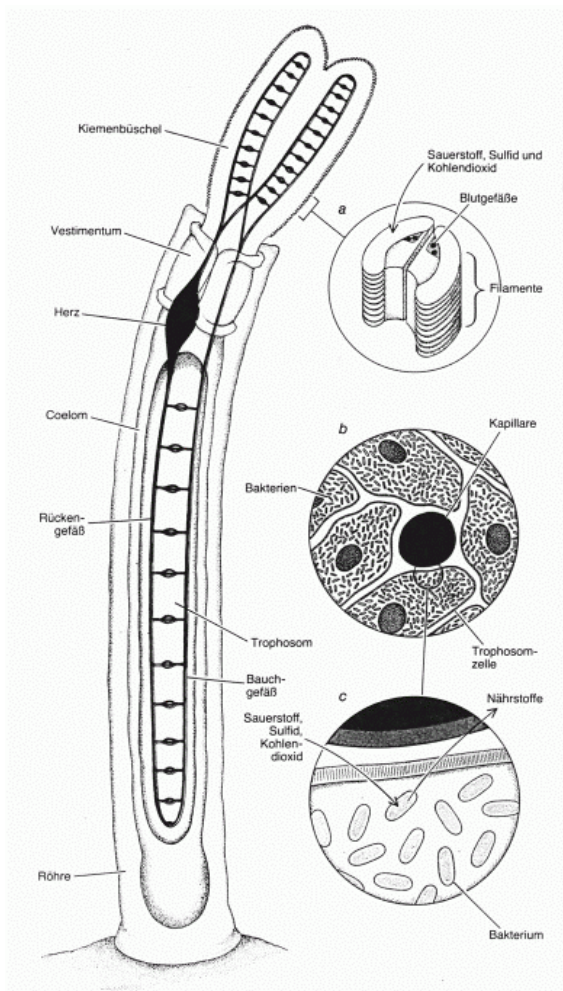
Pogonophoren

Wurmartige Organismen ohne Mundöffnung, Darm und After.

Diese Organismen sind von endosymbiontischen Bakterien abhängig.

Es gibt zwei Typen.

- Schwefeloxidierende Bakterien als Endosymbionten (z.B. *Riftia pachyptila*)
- Methanoxidierende Bakterien als Endosymbionten (z.B. *Siboglinum poseidon*)



Riftia pachyptila

Bis zu 2 m langer Röhrenwurm an Hydrothermalquellen der Tiefsee.

Der Wirt versorgt die im Trophosomengewebe sitzenden symbiontischen Bakterien mit allen notwendigen Nährstoffen, und den Substraten O_2 und HS^- , die er über die Kiemen aufnimmt. Das Trophosom macht etwa 50 % der Masse des Wurms aus.

Andere interessante Tier-Bakterien Beziehungen

- Schiffsbohrwürmer (Teredinidae), Muscheln
Diese Organismen haben am Ösophagus eine "Tasche" mit Bakterien (nahezu eine Reinkultur), die eine Cellulase bilden, die vom Wirt genutzt wird.
- Schwämme (*Axinella mexicana*) / Crenarchaeota ("*Cenarchaeon symbiosum*")
Die trophischen Beziehungen konnten bislang noch nicht geklärt werden.