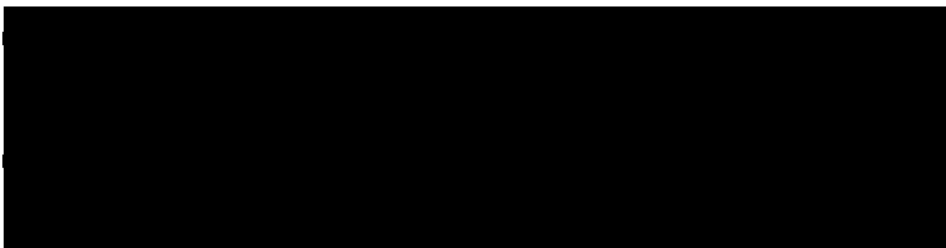
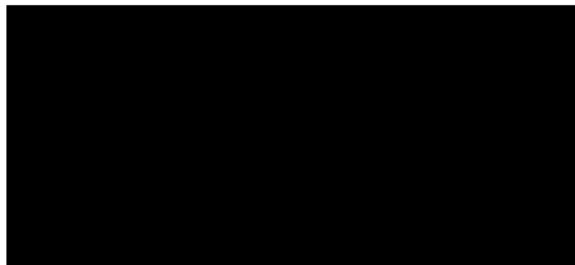


März 1990

Abschätzung und Beurteilung der mikrobiellen Mobilisierung  
chemischer Elemente im Endlager Grube Konrad



## Inhaltsverzeichnis:

	Seite:
1. Einleitung	
2. Kurzbeschreibung der relevanten Bakterien	
2.1 Sulfat- und Schwefel- reduzierende Bakterien	
2.1.1 Sulfat- reduzierende Bakterien	
Desulfovibrio	2
Desulfonema	12
Desulfobacter	14
Desulfobulbus	15
Desulfosarcina	16
Desulfotomaculum	17
Desulfomonas	20
Desulfococcus	20
Desulfobacterium	21
Thermodesulfobacterium	24
2.1.2 Schwefel- reduzierende Bakterien	
Desulfuromonas	25
2.2 Schwefel- oxidierende Bakterien	
Thiobacillus	27
Thiomicrospira	39
Thiosphaera	43
Acidiphilium	44
Thiobacterium	45
Macromonas	46
Thermothrix	46
Thiobacillus Q	47
Sulfobacillus	48
2.3 Nitrat- reduzierende Bakterien	
Paracoccus	49
Pseudomonas	50
Moraxella	52
Neisseria	52
Flavobacterium	52
Corynebacterium	53
Wolinella	53
Campylobacter	53
Vibrio	55
Citrobacter	55
Klebsiella	56
Azotobacter	56
Azomonas	57
Veillonella	57
Clostridium	58
Bacillus	58
Escherichia	59
Selenomonas	59
Propionibacterium	60
Bradyrhizobium	60
Salmonella	61
Staphylococcus	61

2.4 Eisen- und Mangan- oxidierende Bakterien	
Siderocapsa	62
Naumanniella	64
Siderococcus	66
Ochrobium	66
Gallionella	67
Sphaerotilus	67
Leptothrix	68
Metallogenium	69
Hyphomicrobium	70
Leptospirillum	71
Pseudomonas	72
Thiobacillus	73
2.5 Eisen- und Mangan- reduzierende Bakterien	
Bacteroides	74
Clostridium	74
Bacillus	74
Mycobacterium	75
Agrobacterium	75
Aquaspirillum	76
Enterobacter	76
Micrococcus	77
Serratia	77
Bacillus	79
2.6 Methanogene Bakterien	
Methanobacterium	80
Methanobrevibacter	85
Methanothermus	87
Methanococcus	88
Methanomicrobium	92
Methanospirillum	93
Methanogenium	94
Methanosarcina	97
Methanlobus	100
Methanotherix	101
Methanococcoides	102
Methanoplanus	103
Methanosphaera	104
Methanocorpusculum	104
Methanohalophilus	106
2.7 Restliche Archaeobakterien	
Archaeoglobus	107
Thermoplasma	108
Thermococcus	109
Pyrococcus	110
Thermoproteus	111
Thermofilum	111
Desulfurococcus	112
Staphylothermus	112
Pyrodictium	113
Sulfolobus	113
Acidianus	114
Desulfurolobus	115
Pyrobaculum	115
NS-C	116

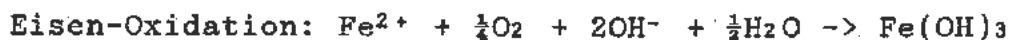
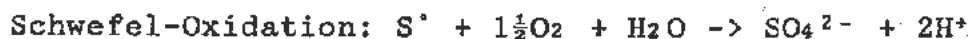
2.8 Halobakterien	
Halobacterium	117
Haloarcula	120
Haloferax	121
Halococcus	123
Natronobacterium	124
Natronococcus	125
2.9 Halophile anaerobe Eubakterien	
Clostridium	126
Halocanaerobium	126
Halobacteroides	127
3. Tabellarische Zusammenfassung der beschriebenen Bakterien mit den wichtigsten Eigenschaften	
Tabelle 1	128
4. Relevante Umweltbedingungen in der Grube Konrad	139
4.1 Auswirkung von Strahlung, Druck, Temperatur und Feuchtigkeit auf die Bakterien in der Grube Konrad	141
5. Einengung	
5.1 Tabelle 2: Bakterien, die bei einem pH $\geq$ 8.0 wachsen können, ohne Berücksichtigung des zu erwartenden Salzgehaltes von 19%	143
5.2 Tabelle 3: Bakterien, die bei einem Salzgehalt von 19.0% wachsen können	147
5.3 Tabelle 4: Weitere Bakterien, die bei einem Salzgehalt von $\geq$ 10% wachsen können	148
6. Beurteilung der tatsächlich zu erwartenden Umsetzungen	149
7. Schlußfolgerungen und Einschränkungen	157
8. Literaturangaben	158

1.

## Einleitung

Es wurde in diesem Bericht versucht abzuschätzen, inwieweit vorhandene und eingebrachte Bakterien in der Lage sind, unter den zu erwartenden Umweltbedingungen die im Endlager Konrad zu lagernden, radioaktiven Abfälle durch mikrobielle Umsetzung zu mobilisieren. Die Bakterien werden durch Wasserströme verfrachtet, kommen aber nicht schneller voran als das strömende Medium. Die Eigenbeweglichkeit ist, wenn überhaupt vorhanden, gering. Bei den im Endlager zu überwindenden Entfernungen ist eine durch Attraktion bewirkte gerichtete Bewegung ausgeschlossen. Als relevant für die Einlagerung in der Grube Konrad wurden die Bakterien angesehen, die Gase wie  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  produzieren und so unter Umständen radioaktive Nuklide freisetzen können (Methanbildner, Sulfat-Reduzenten, Denitrifikanten), solche, die die Eisenkorrosion beschleunigen (Sulfat-Reduzenten, Metalle umsetzende Bakterien), und die Bakterien, die unter den anaeroben, halophilen Bedingungen leben können und ein Glied in der mikrobiellen Nahrungskette darstellen (lithoautotrophe Bakterien, z.B.  $\text{S}^0$ -oxidierende Bakterien, Metalle-oxidierende Bakterien; halophile Bakterien).

Wichtige Umsatzgleichungen dieser Bakteriengruppen:



Die derzeit bekannten Bakterien, die relevante Umsetzungen zu katalysieren vermögen, wurden in Form von Kurzbeschreibungen und einer Tabelle zusammengestellt.

Unter den in den Einlagerungskammern herrschenden Bedingungen, die vorgegeben waren, können nur wenige der insgesamt erfaßten ca. 270 Bakterienarten wachsen. Diese in die engere Auswahl gezogenen Bakterien wurden dann in Tabelle 2 und 3 zusammengefaßt. Unter welchen speziellen Bedingungen diese Bakterien in die Behälter gelangen und sich vermehren können, wird im Schlußkapitel diskutiert.

## 2.1 Sulfat- und Schwefel-reduzierende Bakterien

### 2.1.1. Sulfat-reduzierende Bakterien

#### Desulfovibrio sp.

##### **Morphologie:**

die Gestalt wird beeinflusst von Entwicklung und Alter;  
0.5-1.5 x 2.5-10µm; beweglich; Gram negativ; keine  
Endosporen

##### **Physiologie:**

obligat anaerob  
chemoorganotroph  
mixotrophe Ernährung mit H<sub>2</sub> (Energiequelle) und Acetat +  
CO<sub>2</sub> (C-Quelle)  
hauptsächlich Atmung, bei einigen auch Gärung  
Substrate: organische Substanzen wie Lactat (kaum Zucker),  
Pyruvat, EtOH, Malat, Formiat  
sowohl vollständige als auch unvollständige Oxidation  
Wachstumsvoraussetzungen: Reduktionsmittel, u.U. Vitamine,  
bei einigen NaCl

Nitratreduktion: manchmal

Stickstofffixierung: gewöhnlich (12 von 15)

Elektronenkettenphosphorylierung: Sulfatreduktion :

Cytochrome vom c- und b-Typ, häufig auch Desulfovibridin

Temp.: r.: 0-44°C , auch einige thermophile; opt.: 25-35°C

bei geringen Sulfat Konzentrationen können Desulfovibrio sp. auf  
Lactat in Mischkultur mit H<sub>2</sub> - verwertenden Bakterien (z.B.  
Methanogenen Bakterien) aufgrund eines sogenannten Interspecies  
-Hydrogentransfers wachsen

##### **Lebensraum:**

anaerober Schlamm (Frisch- , Brack-, Meerwasser),  
Verdauungstrakt, Feces

(22)

##### **Stämme:**

#### Desulfovibrio desulfuricans

##### **Morphologie:**

ø 0.5-1.0µm x 3.0-5.0µm; vibrioide Stäbchen; beweglich  
durch einzelne polare Geißel

##### **Physiologie:**

benötigt Sulfat, ersetzbar durch Thiosulfat/Sulfit

Energiequellen beschränkt auf:

Lactat, Pyruvat, Formiat, Cholin, einfache Alkohole (incl.  
Methanol, EtOH, Propanol, Butanol)

N<sub>2</sub>-Fixierung: +(26)

fermentatives Wachstum ohne Sulfat wird unterstützt von  
Cholin, Pyruvat

das Wachstum wird durch eine Hemmstoffkonzentration von 10  
-25 mg pro Liter gehemmt

Temp.: opt.: 34°-37°C , max.: 42°-45°C

Nitrat-Atmung mit H<sub>2</sub>/Lactat/Fumarat als Elektronendonator  
(Nitrit zu NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)(5)(30)->chemolithotrophes Wachstum

Cytochrome: ca

D.desulfuricans kann drei Stunden aerob überleben(6)

**Lebensraum:**

Frischwasser, verschmutztes Wasser (Abwasser), Boden (vor allem mit Wasser vollgesogener, reich an org. Material); Meer- und Brackwasser

**Unterarten:**

**Desulfovibrio desulfuricans desulfuricans:** benötigt kein NaCl

**Desulfovibrio desulfuricans aestuarii:** benötigt ca. 2.5% NaCl (überlebt nicht in Frischwasser)

(22)

**D.d.var. aestuarii stain :Skarvs Nes No 61:**

**Morphologie:**

sigmoide Stäbchen; 0.5-0.6 x 3-10µm; manchmal verlängerte Form: 0.5-0.6 x 15-20µm; schnell beweglich (einzelnes polares Flagellum)

**Physiologie:**

obligat anaerob

benötigt niedrigen Eh (0 bis -150mV)

Reduziert Sulfat zu Sulfit

C-Quelle: Sulfat+

Lactat, Pyruvat, Malat, Cholin

nicht: Acetat, Formiat, Propionat, Tartrat, Succinat, Citrat, Glucose, Fructose, Sucrose, Lactose, Galactose, Maltose, Raffinose, Salicin, Xylose, Glycerol, Dulcitol

Malat: unterstützt Wachstum nicht bei Sulfat Abwesenheit

Cholin: dürftiges Wachstum bei Sulfat Abwesenheit

Pyruvat: kein Wachstum bei Sulfat Abwesenheit

Nitratreduktion: nein

Cytochrom: c<sub>3</sub>

Desulfoviridin: +

Temp.: 5°-10°C langsam, 20°-30°C gut, bei 37°/42°C kein Wachstum

NaCl: obligatorisches Bedürfnis: 0.5-5.0%, >10% schwaches Wachstum

(18)

(D.d.var.azotovorans "stain Berre S": ebenfalls N<sub>2</sub>-Fix.)(16)

**Desulfovibrio vulgaris**

**Morphologie:**

ø 0.5-1.0 x 3.0-5.0µm; vibrioide Stäbchen, beweglich durch eine polare Geißel

**Physiologie:**

Elektronenakzeptor: nur Sulfat

Substrate: Lactat, Pyruvat, z.T. Cholin; z.T Gärung mit Pyruvat, Cholin

kein NaCl-Bedürfnis, 2.5% Habitant-Resistenz

Temp.: opt.: 34°-37°, max.: 40°-45°C

N<sub>2</sub>-Fixierung: +(26)

Desulfoviridin vorhanden

Desulfovibrio vulgaris NCIB8303 sammelt (wie D.HL21) bei Begrenzung von Fe<sup>2+</sup> oder NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Polyglucose an (33)

D.vulgaris miyazaki besitzt zwei verschiedene Hydrogenasen(17)

D.vulgaris (Marburg) wächst auf  $H_2 + SO_4^{2-}$  als alleiniger Energiequelle im Chemostaten (Begrenzung durch Sulfat-Verfügbarkeit) Wachstum im Chemostaten ebenfalls mit:  
 $H_2 + \text{Sulfit}$   
 $H_2 + \text{Thiosulfat}$   
 Pyruvat (ohne Sulfat)  
 } als alleinigen Energiequellen  
 Acetat und  $CO_2$  werden, außer bei Wachstum mit Pyruvat, als C-Quelle benötigt(15)  
 Art von D.vulgaris, die Acetylen nur in Gegenwart von Sulfat reduziert, wenn Lactat oder Pyruvat als  $e^-$  und Energiequelle vorhanden sind;  $H_2$ , das als  $e^-$  und Energiequelle für die Sulfat-Reduktion dient, vermag Acetylen auch nicht in Gegenwart von Sulfat zu reduzieren(31)  
 D.vulgaris setzt 1Lactat  $\rightarrow$  1Acetat + 1 $CO_2$  + 2 $H_2$  um (20)  
 kann drei Stunden aerob überleben (6)

Unterarten:

D.v. vulgaris:

kann nicht Oxamat, Oxalat oder Cholin metabolisieren; kann Pyruvat in Gegenwart von Sulfat metabolisieren

D.v. oxamicus: Substrate u.a. Oxamat, Oxalat, Cholin; Pyruvat wird ohne Sulfat umgesetzt

(22)

### Desulfovibrio salexigens

Morphologie:

$\varnothing$  0.5-1.0 x 3.0-5.0 $\mu m$ ; vibrioide Stäbchen, beweglich durch einzelne polare Geißel

Physiologie:

Substrate: Lactat, Pyruvat, Malat, (Pyruvat ist nicht ohne Sulfat verwertbar)

NaCl-Bedarf: normal 2.5-5%; Toleranz variabel

Temp.: opt.: 34°-37°C, max.: 42°-45°C

Desulfoviridin +

D.salexigens kann drei Stunden aerob überleben (6)

Lebensraum:

See-, Meerwasser, Schlamm aus Mündungen, Salzsole?

(22)

### Desulfovibrio africanus

Morphologie:

$\varnothing$  0.5 x 5.0-10.0 $\mu m$ ; sigmoide Stäbchen, beweglich durch lophotriche Begeißelung

Physiologie:

Substrate: Lactat, Pyruvat, Malat

kein NaCl-Bedarf

Temp.: opt.: 34°-37° ; max.: ca. 40°C

Desulfoviridin +

Lebensraum:

Salz- und Frischwasser in Afrika; sehr salztolerant

(22)



### Desulfovibrio gigas

#### Morphologie:

ø 1.2-1.5 x 5.0-10.0µm ; spirilloide Stäbchen, beweglich durch lophotriche Geißeln

#### Physiologie:

Substrate: Lactat, Pyruvat; Malat in Abhängigkeit von Sulfat

kein NaCl-Bedarf, Eh: -80mV geeignet

Temp.: opt.: 34°-37°C, max.: ca.40°C

Desulfovirdin: +

N<sub>2</sub>-Fixierung: +

langsames Wachstum

D.gigas NCIB9332 synthetisiert große Mengen Polyglycose bei Wachstum auf normalen Medien (33)

oxidative Phosphorylierung ist verbunden mit der Oxidation von H<sub>2</sub> und Reduktion von Bisulfit, Thiosulfat, 'S', Fumarat (5)

N<sub>2</sub>-Fixierung schwach und launenhaft (in Lactat/Sulfat)(25)

#### Lebensraum:

Salzwasser

(22)

### Ein Stamm von D.gigas:

#### Morphologie:

gekrümmte Stäbchen; 1 x 5-6µm(3-10); manchmal in Paaren oder Ketten; beweglich mit polarem Flagellum\*

#### Physiologie:

Substrate: EtOH\* , Lactat, Pyruvat, Fumarat }+ Sulfat

nicht: Cholin, Oxamat, Malat, Formiat, Acetat,

Propionat, Butyrat, Glucose

ohne Sulfat: Wachstum nur mit Fumarat

NaCl: nicht benötigt, hemmt ab 2.5µg/ml

Cytochrom: c<sub>3</sub>

Desulfovirdin: +

Temp.: 34°, nicht bei 55°C

#### Lebensraum:

Schlamm von 'sewage plant'

\*sonst wie D.gigas

(29)

### Desulfovibrio baculatus

#### Morphologie:

ø 0.6 x 1.3µm; kurze gerade Stäbchen mit runden Enden beweglich durch einzelne polare Geißel

#### Physiologie:

Substrate: Lactat, Pyruvat, Malat } in Gegenwart von Sulfat

keine Substrate sind: Acetat, Alkohole, Oxalat, Zucker

Wachstum mit H<sub>2</sub>, Formiat in Gegenwart von Hefeautolysat

Elektronenakzeptor: neben Sulfat auch Sulfit, Thiosulfat

Temp.: opt.: 28°-37°C; r.: 2°-41°C

Cytochrome: +

Desulfovirdin: -

**Lebensraum:**

Magnesium-Erze (in UdSSR)

(22)

**Desulfovibrio saprovorans**

**Morphologie:**

ø 1.5 x 3.5-5.5µm ; vibrioide Stäbchen, beweglich durch einzelne polare Geißel, eingehüllt; PHB- Granula

**Physiologie:**

Elektronenakzeptor: Sulfat, Sulfit -> H<sub>2</sub>S

nicht aber : Thiosulfat, S<sup>0</sup>, Fumarat, Nitrat, O<sub>2</sub>

Substrate: Lactat, Pyruvat (auch in Abwesenheit von Sulfat), Butyrat, 2-Methylbutyrat, höhere Fettsäuren bis C<sub>18</sub>, alle Substrate werden unvollständig zu Acetat oxidiert

Fettsäuren mit ungeraden C-Atome -> Acetat + Propionat

gutes Wachstum auf Palmitat, langsames auf Stearat

nicht metabolisiert werden: H<sub>2</sub>, Formiat, Acetat, Propionat, Isobutytrat, 3-Methylbutyrat, Alkohole, Succinat, Fumarat, Benzoat, Cyclohexancarboxylate, Zucker

Wachstumsvoraussetzungen: kein NaCl, Sulfid als Reduktionsmittel, keine Vitamine

pH: r.: 6.5-9.3; opt.: 7.7

Temp.: r.: 15°-38°C; opt.: 34°C

Desulfoviridin: -

Cytochrome: b/c typ

**Lebensraum:**

anaerober Schlamm, Frischwasser

(22)

**Desulfovibrio baarsii**

**Morphologie:**

ø 0.5-1.0 x 2.0-4.0µm ; vibrioide, durch einzelne polare Geißel bewegliche Stäbchen

**Physiologie:**

Elektronenakzeptor: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat ->H<sub>2</sub>S

nicht: S<sup>0</sup>, Fumarat, Nitrat, O<sub>2</sub>

Substrate: Formiat, Butyrat, 2-Methylbutyrat,

3-Methylbutyrat, höhere Fettsäuren bis C<sub>18</sub>, mit Acetat und Propionat nur langsames Wachstum

alle Substrate werden vollständig oxidiert (zu CO<sub>2</sub>)

nicht metabolisiert werden: H<sub>2</sub>, Isobutytrat, Alkohole, Lactat, Pyruvat, Succinat, Fumarat, Malat, Benzoat, Cyclohexancarboxylat, Zucker

keine Vergärung von org. Substraten

Wachstumsbedingungen: Mineralmedium mit Sulfid als

Reduktionsmittel; gutes Wachstum (opt.) bei 7g NaCl + 1g MgCl<sub>2</sub>/l

Temp.: r.: 20°-43°C; opt.: 35°-39°C  
pH: r.: 6.5-8.2; opt.: 7.3  
C-Quelle: wächst auch auf Formiat als alleiniger C-Quelle  
Desulfoviridin: -  
Cytochrome: b/c Typ

**Lebensraum:**

anaerober Schlamm in Frisch- und Brackwasser

(22)

**Desulfovibrio thermophilus**

**Morphologie:**

ø 0.5 x 2.0µm ; gerade Stäbchen mit abgerundeten Enden,  
oftmals paarweise oder in Ketten; beweglich mit einzelner  
polaren Geißel

**Physiologie:**

Elektronenakzeptor: Sulfit, Thiosulfat, Sulfat  
Substrate: Lactat, Pyruvat (in Gegenwart von Sulfat),  
nicht: Methanol, Ethanol, Butanol, Isobutanol, Acetat,  
Malat, Oxalat, Glucose, Lactose  
Temp.: r.: 45°-85°C, opt.: 65°C  
Wachstumsbedingungen: NaCl wird nicht benötigt  
Desulfoviridin: +

**Lebensraum:**

bei 84°C in Petroleum-Lager (in der Nähe des Kaspischen  
Meeres)

(22)

**Arten, an deren Existenz Zweifel bestehen:**

D. "rubentschikii": ähnlich D. desulfuricans, besitzt aber die  
Fähigkeit Acetat zu CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O zu oxidieren

"Desulforistella hydrocarbonoblastica": obligat anaerob  
fakultativ autotroph

Temp.: 30°C, nicht bei 37°C

verwendet Formiat/Lactat/Propionat/Acetat, u.a. org.  
Verbindungen

(22)

**Desulfovibrio fructosovorans**

**Morphologie:**

ø 0.5-0.7 x 2-4.0µm; vibrioid, in alten Kulturen spirilloid  
einzeln oder in Paaren; beweglich durch polares Flagellum

**Physiologie:**

strikt anaerob

Elektronenakzeptoren: S<sup>0</sup>, Sulfat, Sulfit, Thiosulfat  
-> H<sub>2</sub>S

Substrate: H<sub>2</sub>, Formiat, Lactat, Pyruvat, Glycerol, Fumarat,  
Malat, Fructose

Wachstum mit H<sub>2</sub> + Formiat erfordert Acetat als C-Quelle;  
Methanol kann verwertet werden, wenn die Zellen auf Pyruvat  
gewachsen sind

Fructose, Pyruvat, Malat, Fumarat, Glycerol können auch in Abwesenheit von Sulfat genutzt werden (Gärung!)  
nicht genutzt werden können: Acetat, Propionat, Butyrat,  
Succinat, Oxalat, Cholin  
Sulfat + EtOH/Glycerol/Lactat/Pyruvat -> vollständige  
Oxidation zu Acetat  
+ CO<sub>2</sub>

MeOH kann nicht als alleinige Energiequelle genutzt werden,  
auch nicht bei Anwesenheit von Acetat

Bei Abwesenheit von Sulfat: Fructose -> Succinat + Acetat +  
etwas EtOH;

Fumarat/Malat -> Succinat/Acetat

Pyruvat -> hauptsächlich Acetat

Glycerol -> 3 Hydroxypropionat + 1.3- Propandiol

Wenn Sulfat und Fumarat vorhanden sind, wird Fumarat als  
Elektronenakzeptor bevorzugt (Sulfid wird nicht produziert)  
unvollständige Oxidation von Pyruvat + Lactat -> Acetat +  
CO<sub>2</sub>

N<sub>2</sub> fix.:?

keine Nitratreduktion

Wachstumsbedingungen: keine Vitamine benötigt

NaCl wird nicht benötigt und hemmt  
über 4%

Temp.: opt.: 35°C

pH: opt.: 6.5-7.0

Desulfovibrin: +

Cytochrome: c3

G+C: 64.13 mol%

Lebensraum:

den Gezeiten ausgesetzte Sedimente (weite Flußmündungen,  
Meeresarme)

(19)

### Desulfovibrio carbinolicus

verwertet Succinat; MeOH kann als alleinige Energiequelle genutzt  
werden; unbeweglich

### Stamm EDK 82:

#### Morphologie:

Ø 0.6-1.1 x 1.5-5.0µm; unbewegliche, gekrümmte Stäbchen

#### Physiologie:

Sulfat kann als Elektronenakzeptor durch Thiosulfat,  
Sulfit, S<sup>0</sup> ersetzt werden

In Mineralmedium, das mit EtOH + Fumarat versetzt wurde,  
wird Fumarat eher vergärt, als daß es als  
Elektronenakzeptor dient.

In einem Medium mit EtOH kann weder Nitrit noch Nitrat als  
Elektronenakzeptor dienen.

Außer Fumarat werden Malat, Pyruvat, Glycerol vergoren

Fumarat + Malat -> Succinat, Acetat (2:1), +CO<sub>2</sub>

Pyruvat -> Acetat (hauptsächlich)

Glycerol -> 1.3 Propandiol + 3 Hydroxypropionat

MeOH (als alleinige Energie-Quelle) wird nur bei SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-  
-Anwesenheit umgesetzt

Substrate: Sulfat +  
 H<sub>2</sub>, Formiat, Methanol, Ethanol, Glycerol,  
 Propanol(1), Butanol-1, Succinat, Fumarat,  
 Malat, Oxalacetat, Pyruvat, Lactat  
 vollständige Oxidation von Formiat, Methanol -> CO<sub>2</sub>  
 unvollständige Oxidation von:  
 Glycerol, Propanol-1, Butanol-1 -> 3-Hydroxypropionat,  
 Propionat, Butyrat  
 alle anderen: -> Acetat + (abhängig vom Elektronendonator)  
 CO<sub>2</sub>  
 Wachstum mit H<sub>2</sub>, Formiat, MeOH benötigen Acetat als C  
 -Quelle  
 kein Wachstum mit:  
 Acetat, Propionat, Isobutytrat, Butyrat,  
 2-Methylbutyrat, Isovalerat, Valerat,  
 Caproat, Heptanoat, Caprylat, Pelargonat,  
 Benzoat, 3-Hydroxybenzoat, Propanol-2,  
 Citrat, Glucose, Fructose, Cholin,  
 Aspartat, Glutamat, Alanin, Serin,  
 Glycin, Cystein, Threonin, Valin, Leucin,  
 Histidin

**Lebensraum:**  
 anaerobes Abwasser (?)  
 (13)

**Stamm: MB6**

**Morphologie:**  
 1.0 x 2.5µm; beweglich, vibrioid;

**Physiologie:**  
 pH.:opt.: 6.5  
 Temp.:opt.: 32°C  
 Substrate: EtOH, Lactat, Malat, Pyruvat, Fumarat,  
 Casaminosäuren, Pepton, CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>  
 schlechtes Wachstum mit: Propanol, Formiat, Succinat,  
 kein Wachstum mit: MeOH (allein), Acetat, Malonat, Citrat,  
 Propionat, Ribose, Saccharose,  
 Fructose, Alanin, Glycin, Hefeextrakt,  
 Cholin, Methan  
 Wachstum ohne Sulfat mit:  
 Pyruvat, Malat, aber nicht mit Cholin  
 kein Wachstum auf MeOH + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, MeOH + Acetat, MeOH + CO<sub>2</sub>  
 [MeOH] ≥ 500mM hemmen das Wachstum auf Pyruvat nicht  
 SrB kann Methanol abbauen, wenn es zuvor auf Pyruvat,  
 Malat oder Fumarat gewachsen ist  
 Methanol wird vollständig oxidiert ->CO<sub>2</sub>, aber nicht in  
 das Zellmaterial eingebaut  
 SrB ähnelt D.vulgaris, D.desulfuricans (Unterschiede: siehe  
 MeOH-Abbau)

**Lebensraum:**  
 Schlamm (sewage sludge)  
 (3)

## Desulfovibrio simplex

### Morphologie:

gekrümmte vibrioide Stäbchen, einzeln oder in Paaren,  
0.5-1.0 x 1.5-3.0µm, einzelnes polares Flagellum, Gram  
negativ

### Physiologie:

strikt anaerob, chemolithotroph/-organotroph

mesophil: Temp.: opt.: 37°C; r.: >15°-<45°C

pH: opt.: ca. 7.0

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>; nicht: SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> wird nach  
Adaptation genutzt

e<sup>-</sup>-Donatoren: L(+)-Lactat, Pyruvat, Fumarat, Malat,  
Formiat, EtOH, 1-Propanol, 1-Butanol, H<sub>2</sub>

<sup>63</sup>Ni<sup>2+</sup> und <sup>185</sup>WO<sub>4</sub><sup>2-</sup> werden in wachsende Zellen eingebaut

Wachstum auf H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> nur in Gegenwart von Hefeextrakt oder  
Acetat; L(+)-Lactat wird unvollständig zu Acetat oxidiert  
kein Wachstum bei 18g NaCl/l.

G+C: 47.5 mol%, DSM 4141/Stamm XVI

Lebensraum: isoliert aus anaerobem Abfall

(43)

## extrem halophile, aber unbenannte Desulfovibrio-Stämme:

Gr.A:

### Morphologie:

vibrioid, 0.7 x 2.0-3.0µm; beweglich durch einzelnes  
polares Flagellum (ein Stamm mit zwei polaren Flagellen)

### Physiologie:

alle verwerten Formiat

NaCl: Bedürfnis: mind.5%, wachsen bis zu 19%

-> Ähnlichkeit mit D.d. aestuarii Sylt

Gr.B:

### Morphologie:

beweglich mit einzelner polarem Flagellum

### Physiologie:

weites Substratspektrum

NaCl-Bedürfnis: (bis auf einen), obere Grenze 10%

Desulfovibridin:+

-> ähnlich D.desulfuricans

Gr.c:

### Morphologie:

lang spiralförmig - sigmoid; 0.7 x 4-8µm

beweglich mit Hilfe eines polaren Flagellums

### Physiologie:

benötigt Wachstumsfaktoren

Substrate: EtOH, Succinat, Fumarat, Malat, Citrat

Dismutation von Fumarat

Casaminosäuren (von einigen)

Formiat wird nicht genutzt, Dismutation von Pyruvat/Malat  
beschränkt sich auf einige wenige Stämme

kein NaCl-Bedürfnis, 8% begrenzen das Wachstum

-> ev. Art von Desulfovibrio oder eine Varietät von D.  
desulfuricans

Gr.d:

**Morphologie:**

kurze vibrioide bis stäbchenförmige Zellen; 0.7-2-3µm  
mit ein bis zwei polaren Flagellen

**Physiologie:**

NaCl-Bedürfnis, Toleranz bis 10%

-> ev. *D. salexigens*

Gr.E:

**Morphologie:**

vibrioid bis sigmoid; 0.7 x 5µm (formen Sphäroblasten)

**Physiologie:**

Substrate: Formiat, Succinat, Fumarat, Malat

z.T.: Dismutation von Fumarat + Pyruvat

NaCl-Bedürfnis: 1-10%

Untergruppe, die Aspartat und Alanin als C-/Energie-Quelle nutzt

Gr.F:

*Desulfovibrio* sp.10455

**Morphologie:**

ähnlich *D. africanus*; 1-3 bipolare Flagellen

**Physiologie:**

Substrate: EtOH, Formiat, Malat

Pyruvat wird von den meisten Stämmen dismutiert

kein NaCl-Bedürfnis, obere Toleranzgrenze: 2.5%

Gr.G:

**Physiologie:**

kein NaCl-Bedürfnis, toleriert nur bis 2.5%

Pyruvat wird dismutiert

-> Gruppe ähnlich *D. vulgaris*

(32)

**Desulfovibrio sulfodismutans**

**Morphologie:**

bewegliche, gekrümmte Stäbchen, manchmal sigmoid oder  
spirilloid; 0.7 x 2.5-3.5µm

**Physiologie:**

Energiequellen: Thiosulfat, Sulfit, Dithionit ->  
disproportioniert zu Sulfat + Sulfid

Acetat + Bicarbonat werden als C-Quellen benötigt

Substrate für die dissimilatorische Sulfat-Reduktion:

Lactat, EtOH, Propanol, Butanol, (unvollständig oxidiert)

nicht genutzt werden können: Formiat, Acetat, Propionat,

Butyrat, Fumarat, Succinat,

Malat, Pyruvat, Cholin,

Fructose, Benzoat;

S<sup>0</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Fumarat, Malat } werden nicht reduziert

strikt anaerob

Wachstumsfaktoren: Mineralmedium (1g NaCl + 0.4g MgCl<sub>2</sub> \*  
6 H<sub>2</sub>O); Sulfid oder Dithionit als  
reduzierende Agentien  
Pantothenat + Biotin

pH: r.: 6.8-8.2, opt.: 7.3

Temp.: r.: 15'-45°C, opt.: 35°C

Cytochrome: +

Desulfovirdin: +

G+C: 64.1 mol%

Lebensraum:

anaerober Schlamm oder Frisch-, Brack-, Seewasser  
(Umgebungen)

Typ Stamm: ThAc01, DSM3696

(1)[bei Schwefelreduzenten]

### Genus Desulfonema

#### Morphologie:

Vielzellige Filamente mit z.T. mehr als 1mm Länge und  
sichtbaren Cross-walls. Die Filamente sind immer ans  
Medium gebunden. Gleitende Fortbewegung (gewöhnlich),  
gleichzeitige Rotation kann auftauchen. Gram negativ.

#### Physiologie:

strikt anaerob

chemoorganotroph oder chemolithotroph

Atmung

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> u.a. oxidierte S-Verbindungen  
[reduziert zu H<sub>2</sub>S]

Substrate: Fettsäuren, u.a. organische Säuren  
vollständige Oxidation zu CO<sub>2</sub>

Wachstumsfaktoren: Reduktionsmittel + Vitamine  
marine Formen benötigen Brack- oder  
Seewasserkonzentrationen an NaCl, MgCl<sub>2</sub>  
+ CaCl<sub>2</sub>

#### Lebensraum:

anaerobe sulfatreiche Sedimente mit sich zersetzendem  
Pflanzenmaterial

Typ. Vertreter: Desulfonema limicola

(37)

### Desulfonema limicola

#### Morphologie:

gleitende Filamente von 3µm ø; eine Zelle ist 2.5-3.5µm  
lang

#### Physiologie:

e<sup>-</sup> Akzeptoren: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, Thiosulfat

kein Wachstum mit Fumarat, Malat oder NO<sub>3</sub><sup>-</sup> als e<sup>-</sup> Akzeptor,  
S<sup>-</sup> ist Hemmstoff

Substrate: H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, Formiat, Acetat, Propionat, höhere  
Fettsäuren bis zu 14 C-Atomen, Lactat, Pyruvat,  
Succinat, Fumarat.



Auf Acetat allein ist Wachstum ziemlich gering, kann aber durch Zufügen von einer Mischung von Fettsäuren oder Auszügen aus anaerobem Schlamm stimuliert werden.  
Wachstum mit  $H_2/CO_2$  oder Formiat benötigt keine zusätzliche C-Quelle, wird aber von Acetat unterstützt.  
Nicht verwertet werden: Alkohole, Benzoate, Zucker  
keine Gärung mit organischen Komponenten  
Wachstumsfaktor: Biotin  
pH: r.: 6.5-8.8; opt.: 7.6  
Temp.: r.: 15-36°C; opt.: 30°C  
benötigt: 12g NaCl + 2g  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  /l Kultur für opt.  
Wachstum; entwickelt sich nicht in Frischwassermedien  
Cytochrome: c-typ (Membran, Cytoplasma)  
b-typ (Membran, kleinere Mengen)  
Desulfoviridin: +

G+C: 34.5 mol%

Typ strain: "Jadebusen", 5ac10 DSM2076  
(37)

### Desulfonema magnum

#### Morphologie:

gleitende Filamente, 6.8µm ø, eine Zelle ist 9-13µm lang

#### Physiologie:

Atmung abhängig von  $SO_4^{2-}$  als  $e^-$ -Akzeptor  
wächst nicht mit  $SO_3^{2-}$ , Thiosulfat, Fumarat, Malat oder  
Nitrat als  $e^-$  Akzeptor,  $S^0$  hemmt

Substrate: Acetat, Propionat, Butyrat, höhere Fettsäuren  
bis zu 10 C-Atomen, Succinat, Fumarat, Malat,  
Benzoat, 4-Hydroxybenzoat, Hippurat,  
Phenylacetat und 3-Phenylpropionat

Wachstum auf Acetat allein: ärmlich  
wird durch Extrakte aus anaerobem Schlamm aber stimuliert.  
vom Typ Stamm nicht verwendet werden:

$H_2$ , Lactat, Pyruvat, Alkohol, 2-Hydroxybenzoat,  
3-Hydroxybenzoat, Cyclohexancarboxylat, Zucker  
keine Gärung mit org. Substraten

Wachstumsfaktoren: Biotin, 4-Aminobenzoessäure, Vitamin B<sub>12</sub>  
pH: r.: 6.6-7.5; opt.: 7.0

Temp.: r.: 15-37°C; opt.: 32°C

opt. Wachstum benötigt: 20g NaCl, 5g  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ , 1g  
 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  /l

bei niedrigeren Salzkonzentrationen ist das Wachstum  
eingeschränkt, in Frischwasser werden die Zellen beschädigt  
Cytochrome: b, c-typ

Desulfoviridin: -

G+C: 41.6 mol%

Typ Stamm: "Montpellier", 4be13, DSM2077  
(37)

### Desulfobacter postgatei

**Morphologie:** (1.0-2.0)x(1.7-3.5µm), stäbchenförmig bis ellipsoid mit abgerundeten Enden; einzeln oder paarweise, Tendenz zum Zusammenklumpen, Gram negativ, nicht beweglich oder durch eine polare Geißel beweglich

#### **Physiologie:**

chemoorganotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat;

nicht Nitrat, Fumarat, Malat, S<sup>2-</sup>

Substrate: hauptsächlich Acetat, auch Ethanol, Lactat;

vollständige Oxidation der Substrate (TCC)

keine Vergärung von Zuckern, Pyruvat, Fumarat

Wachstumsbedingungen: für Meerwasserstämmen 20g NaCl/l und

3g MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O/l; p-Aminobenzoesäure, Biotin,

Sulfid als Reduktionsmittel

T(Opt.)=28-32°C; T(R)=10-37°C

pH(Opt.)=7.3; pH(R)=6.2-8.5

N-Quelle: Ammonium, mäßiges diazotrophes Wachstum

**Lebensraum:** schwarze anaerobe Sedimente in Brack- und Meerwasser, auch aus Frischwasser isoliert

(39,42)

### Desulfobacter hydrogenophilus ("AcRS1")

**Morphologie:** (1-1.3)x(2-3µm), länglich-ovale Zellen, Gram negativ, z.T. Schleimbildung, nicht beweglich

#### **Physiologie:**

fakultativ lithoautotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Acetat, auch Ethanol, Pyruvat, vollst. Oxidation

Wachstumsbedingungen: Biotin, p-Aminobenzoat, 2% NaCl, 0.3% MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O

N-Quelle: N<sub>2</sub>; gutes diazotrophes Wachstum

T(Opt.)=29-32°C; T(R)=0-35°C

pH(Opt.)=6.6-7.0; pH(R)=5.5-7.6 (5.3-7.9)

G+C-Gehalt=45 mol%

**Lebensraum:** marine Sedimente

(4,36)

### Desulfobacter latus ("AcRS2")

**Morphologie:** (1.6-2.4)x(4-7µm), länglich-ovale Zellen Gram negativ, z.T. beweglich

#### **Physiologie:**

chemoorganotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptor: nur Sulfat

Substrat/C-Quelle: nur Acetat

Wachstumsbedingungen: Biotin, Thiamin, 2% NaCl, 0.3% MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O

N-Quelle: N<sub>2</sub>, schlechteres diazotrophes Wachstum  
T(Opt.)=29-32°C  
pH(Opt.)=7.0-7.3  
G+C-Gehalt:44 mol%  
Lebensraum: marine Sedimente  
(36)

#### Desulfobacter curvatus ("AcRM3")

**Morphologie:** (0.5-1)x(1.7-3.5µm), spirillenförmige Zellen  
Gram negativ, beweglich

**Physiologie:**

chemoorganotroph  
strikt anaerob  
e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat  
Substrate/C-Quelle: Acetat, Ethanol, auch Pyruvat, wenig H<sub>2</sub>  
Wachstumsbedingungen: Biotin, c<sub>N</sub>ac1 ≥0.7g/l, 0.13g/l  
MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O

N-Quelle: N<sub>2</sub>, gutes diazotrophes Wachstum  
T(Opt.)=28-31°C  
pH(Opt.)=6.8-7.2  
G+C-Gehalt:46 mol%

Lebensraum: hauptsächlich marine Sedimente, auch Frischwasser-  
Sedimente

weitere isolierte Stämme: AcKo, AcRm4, AcRM5: alle ohne  
Vitaminbedarf, organotroph, sonst keine herausragenden  
Eigenschaften vgl. mit Desulfobacter sp.  
(36)

#### Desulfobulbus propionicus

**Morphologie:** (1.0-1.3)x(1.5-2.0µm), ellipsoide Zellen, zitronen-  
förmig oder zwiebförmig mit spitzen Enden; einzeln,  
paarweise oder in Ketten; Gram negativ, Typ-Stamm ist  
unbeweglich

**Physiologie:**

chemoorganotroph, mixotroph  
strikt anaerob  
e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat, auch Nitrat  
nicht: Fumarat, Malat, S<sup>0</sup>

**Atmung/Gärung**

Gärung: Lactat/Pyruvat -> Propionat, Acetat  
Ethanol -> Propionat + Acetat ; Vergärt auch  
ButOH, PropOH

Ethanol + H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> -> Propionat (quantitativ)

Substrate: Propionat, Lactat, Pyruvat, Ethanol, Propanol, H<sub>2</sub>;  
unvollständige Oxidation zu Acetat, z.T. Butyrat

C-Quelle: heterotroph, bei H<sub>2</sub>: Acetat+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Wachstumsbedingungen: Sulfid als Reduktionsmittel, Vitamine,  
NaCl-/MgCl<sub>2</sub>-Bedarf (bei marinem Stamm)

T(Opt.)= 28- 39°C, T(R)= 10- 43°C  
pH(Opt.)= 7.1-7.5; pH(R)= 6.0- 8.6  
N-Quelle: Ammonium  
c<sub>N</sub>ac1:min.: 1.5% (marine Stämme)

**Lebensraum:** anaerober schwarzer Schlamm in Frisch-, Brack- und Meerwasser, Rinderpansenflüssigkeit, Intestinaltrakt von Tieren, anaerober Schlamm von tierischen Düngelagern und Reisfelder (Abwasser)  
(11,33,41,42)

### Desulfobulbus elongatus

**Morphologie:** (0.6-0.7)x(1.5-2.5µm), gerade bis leicht gekrümmte Stäbchen mit spitzen Enden, einzeln oder paarweise  
Gram negativ, beweglich durch einzelne polare Geißel

#### **Physiologie:**

chemoorganotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat → H<sub>2</sub>S  
nicht Nitrat, Fumarat

Gärung: Lactat+Pyruvat → Acetat/Propionat-Mischung

Substrate: Propionat, Lactat, Pyruvat, Ethanol, Propanol  
werden unvollständig zu Acetat oxidiert ;  
H<sub>2</sub> mit Acetat+CO<sub>2</sub> als C-Quelle

Wachstumsbedingung: p-Aminobenzoat

T(Opt.)=35°C; T(R)= 20-40°C

pH(Opt.)= 7.0; pH(R)= 6.0-7.8

N-Quelle: Ammonium

G+C-Gehalt: 59.0 mol%

**Lebensraum:** anaerobe Schlamm

(27)

### Desulfosarcina variabilis

**Morphologie:** unregelmäßig geformte, in großen Sarcina-Paketen angeordnete Zellen; nach wiederholtem Medienwechsel (1.0-1.5)x(1.5-2.5µm), coccoid bis ellipsoid, einzeln oder paarweise  
Gram negativ, normal unbeweglich, aber z.T. beweglich durch einzelne polare Geißel

#### **Physiologie:**

chemoorganotroph, fakultativ chemoautotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat → H<sub>2</sub>S  
nicht S<sup>0</sup>, Nitrat ;  
in Gegenwart von Sulfat chemoautotrophes Wachstum mit H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

Gärung: Lactat/Pyruvat → Acetat, Propionat;

Fumarat → Acetat, Propionat, Succinat

Substrate/C-Quelle: Formiat, Propionat, Butyrat, Valerat, 2-Methylbutyrat, 3-Methylbutyrat, höhere Fettsäuren bis C<sub>14</sub>, Lactat, Pyruvat, Succinat, Fumarat, prim. Alkohole C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>, Benzoat, Phenylacetat, 3-Phenylpropionat, 3-Hydroxybenzoat, Hippurat, Cyclohexancarboxylat, Acetat (langsameres Wachstum); langsames W. auf H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>  
vollständige Oxidation aller Substrate

Wachstumsbedingungen: ev. Selenit, keine Vitamine, Sulfid als Reduktionsmittel, kein Licht, >1% NaCl, 0.2% MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O

T(Opt.)=33°C; T(R)=15-38°C

pH(Opt.)=7.4; pH(R)=6.7-9.0

N-Quelle: Ammonium

Lebensraum: anaerober Schlamm von Brack- und Meerwasser  
(4,42)

#### Desulfotomaculum nigrificans

Morphologie: (0.3-0.5)x(3-6µm), gerade bis gekrümmte Stäbchen mit abgerundeten Enden, manchmal linsenförmig bis angeschwollen;  
peritriche Begeißelung  
Sporenbildung

#### Physiologie:

chemoorganotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Sulfit, Cystein -> H<sub>2</sub>S

Substrate: Lactat, Pyruvat, Glucose, Ethanol, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, CO, Formiat

Vergärung von Pyruvat

thermophil, T(Opt.)=55°C (z.T.30-37°C); T(R)=45-70°C

(10,32a,35)

#### Desulfotomaculum nigrificans subsp. salinus

Morphologie: (0.9-1.3)x(2-5µm), stäbchenförmig, z.T.spindelförmig, einzeln oder in Ketten zu 2-3 Zellen  
Gram negativ, peritriche Begeißelung  
Sporenbildung

#### Physiologie:

chemoorganotroph

obligat anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat; Sulfit und Thiosulfat nur mit Lactat

Vergärung von Pyruvat

Substrate: Lactat, Pyruvat, Malat, Fumarat, Ethanol, Butanol

Wachstumsbedingungen: obligater Bedarf an NaCl, c<sub>NaCl</sub>(Opt.)=1%, Toleranz bis 4%; Mikroelemente

T(Opt.)=60°C; T(R)=40-70°C

Lebensraum: Ölschichten der Tyumensk-Region, Schichtwasser in Gasfeld

(14)

#### Desulfotomaculum ruminis

Morphologie: 0.5x(3-6µm), gerade bis leicht gekrümmte Stäbchen, z.T.paarweise, mit abgerundeten Enden  
peritriche Begeißelung, Sporenbildung

#### Physiologie:

e<sup>-</sup>-Akzeptor: Sulfat

Substrate: Lactat, Pyruvat, Formiat, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

Pyruvat-Vergärung

geringe N<sub>2</sub>-Fixierung (Postgate, 1970)

mesophil, T(Opt.)=37°C, T(R)=30-48°C

(10,23,32a)

### Desulfotomaculum orientis

**Morphologie:** 1.5x 5µm, dicke gekrümmte Stäbchen,  
peritriche Begeißelung, Sporenbildung

**Physiologie:**

chemoorganotroph, chemoautotroph mit H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>+(Sulfat, Sulfit  
oder Thiosulfat)

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptor: Sulfat

Substrate: Methanol, Formiat, Methoxygruppe von Trimethoxy-  
benzoat, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, CO

ohne Sulfat langsames Wachstum mit Formiat, Methanol, Ethanol,  
Lactat, Pyruvat, Trimethoxybenzoat; Acetat-Ausscheidung

C-Quelle: bei Wachstum mit C<sub>1</sub>-Verbindungen ist keine zusätz-  
liche C-Quelle nötig

Wachstumsbedingung: Thioglycolat

mesophil, T(Opt.)=30-37°C; T(R)=30-42°C

N<sub>2</sub>-Fixierung

(7,10,23,32a)

### Desulfotomaculum antarcticum

**Morphologie :** (1.0-1.2)x(4-6µm), dicke Stäbchen mit runden Enden,  
z.T. paarweise oder in kurzen Ketten  
peritriche Begeißelung, Sporenbildung

**Physiologie:**

chemoorganotroph

obligat anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptor: Sulfat

Substrate: Lactat, Pyruvat; Säurebildung aus Glucose

Wachstumsbedingung: c<sub>w</sub>NaCl ≤ 2.5%,

keine Nitrat-Reduktion

mesophil, T(Opt.)=20-30°C

(32a)

### Desulfotomaculum acetoxidans

**Morphologie:** (1-1.5)x(3.5-9µm), gerade bis leicht gekrümmte Stäb-  
chen mit spitzen Enden

Gram negativ

beweglich durch einzelne dicke polare Geißel

Sporenbildung nur mit Acetat als Substrat

**Physiologie:**

chemoorganotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat; Thiosulfat, Fumarat (beide nur mit Acetat), nicht aber Sulfit, S<sup>0</sup>, Nitrat, O<sub>2</sub>

Substrate: Acetat, Butanol, (Iso-)Butyrat, Ethanol werden vollständig zu CO<sub>2</sub> oxidiert;

Valerat -> CO<sub>2</sub>+Propionat

selten Formiat-Verwertung (benötigt Acetat als C-Quelle)

keine Gärung

Wachstumsbedingungen: Sulfid und Dithionit als Reduktionsmittel, Biotin, 1-2% NaCl für marine Stämme,

sonst ≤7g/l NaCl, ≤1g/l MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O, kein S<sup>0</sup>

mesophil, T(Opt.)=36°C; T(R)=20-40°C

pH(Opt.)=7.1; pH(R)=6.6-7.6

**Lebensraum:** Dünger und Fäkalien von höheren Tieren, Panseninhalt, anaerober Frischwasserschlamm, im Fall vom Verschmutzung durch Fäkalien

(32a,38,40)

Desulfococcus niacini

**Morphologie:**

ø 1.5-3µm, kugelförmige bis ovale Zellen, z.T. unregelmäßig, je nach Wachstumsbedingungen; Gram negativ; langsam beweglich durch eine polare Geißel

**Physiologie:**

strikt anaerob,  
chemolithotroph, z.T. autotroph (H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>; H<sub>2</sub>+Formiat)  
e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat -> H<sub>2</sub>S  
nicht aber Malat, Fumarat, Nitrat

**Substrate/C-Quellen:**

EtOH + höhere Alkohole, H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>, Formiat, Butyrat,  
höhere Fettsäuren bis C<sub>16</sub>, Pyruvat, Malat, Fumarat,  
Succinat, höhere Dicarbonsäuren, Nicotinsäure,  
Glutamat, Glutarat, Pimelat

vollständige Oxidation der Substrate

langsames Wachstum auf Acetat, Propionat

nicht oxidiert werden:

MetOH + Acetat, Isobutyrat, 2-/3-Methylbutyrat,  
Stearat, Lactat, Adipat, Itaconat, Dimethylmaleat,  
Benzoate etc.

keine Vergärung org.Verbindungen

Wachstumsbedingungen: Biotin + Thiamin, bei Nicotinsäure:  
Selenit als Spurenelement,  
mind. 12g NaCl + 2g MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O/l

pH: r.: 6.5-8.3; opt.: 7.4

Temp.: r.: 15°-37°C; opt.: 29°C

G+C: 45,8 mol%

**Lebensraum:**

marine Sedimente

(8)

Genus Desulfobacterium

**Morphologie:**

oval bis stäbchenförmig; Gram negativ

**Physiologie:**

chemoorganotroph, z.T. lithotroph

obligat anaerob

e<sup>-</sup> Akzeptoren: Sulfat, oft auch Sulfit, Thiosulfat

Substrate: Pyruvat, Lactat, Fettsäuren u.a., z.T.  
aromatische Verbindungen

C-Quelle: heterotroph, z.T. autotroph

Wachstumsbedingungen: Reduktionsmittel, meist Vitamine,  
Meerwasser-Salzkonzentration

**Lebensraum:**

Sedimente in Brack- und Meerwasser, seltener in  
Frischwasser

Spezies: Desulfobacterium indolicum, D. catechoicum, D. auto-  
trophicum, "HRM 4", "HRM6", D. phenolicum

(1)



Desulfobacterium indolicum

**Morphologie:**

0.7-1.5 x 2-2.5µm, auf Indol größer, oval bis stäbchenförmig, Gram-negativ

**Physiologie:**

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Thiosulfat

nicht : Sulfit, S<sup>0</sup>, Fumarat, Nitrat

Substrate: langsam auf Formiat, Acetat, Propionat, Ethanol, Propanol, Butanol, Pyruvat, Malat, Fumarat, Maleinat, Succinat, Anthranilat, Quinolin;

schnell auf Indol (1.5 mM/Woche), Indol wird vollständig oxidiert

Wachstumsbedingungen: c(Indol) < 1.5 mmol/l, Vitamin B<sub>12</sub>  
c(NaCl) = 20g/l, c(MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O) = 3g/l

G+C: 47.4 mol%

**Lebensraum:**

marine Sedimente

(1)

Desulfobacterium catecholicum

**Morphologie:**

1.3-1.8 x 2.2-2.8µm; oval bis zitronenförmig, einzeln oder paarweise, umgeben von Schleim, nicht beweglich, Gram-negativ

**Physiologie:**

fakultativ chemolithoautotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat, Dithionit,

Nitrat, (->NH<sub>4</sub>)

nicht: S<sup>0</sup>

Substrate: Catechol, Resorcinol, Hydroquinone, Benzoat, 4-Hydroxybenzoat, Protocatechuate, 2-Aminobenzoat, Phloroglucinol, Pyrogallol, Cyclohexancarboxylat, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, primäre Alkohole C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>, Fettsäuren bis cis, Lactat, Pyruvat, Malat, Fumarat, Glutarat, Pimelat, Glutamat;

vollständige Oxidation aller Substrate

Vergärung von Pyruvat, Fumarat

Wachstumsbedingungen: Vitamine, Reduktionsmittel (100µM Dithionit), c(NaCl) ≤ 0.55%, c(Catechol) ≤ 1mM

Nitrat-Reduktion zu Ammonium

Temp.: opt.: 28°C

pH: opt.: 6.9-7.1

G+C: 52.4 ± 0.5

**Lebensraum:**

anaerober Schlamm aus Delaware Bay, Neuseeland

(34)

Desulfobacterium phenolicum

**Morphologie:**

1-1.5 x 2-3µm auf Phenol, sonst gekrümmte Stäbchen unterschiedlicher Größe

**Physiologie:**

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Thiosulfat

Substrate: Phenol, p-Cresol, 4-/2-Hydroxybenzoat, 4-Hydroxyphenylacetat, Benzoat (bestes Wachstum), Phenylacetat, 2-Aminobenzoat, Indol, Phenylalanin; vollständige Oxidation dieser Substrate; ferner: Formiat, Acetat, Butyrat, EtOH, PropOH, Butanol, Pyruvat, Malat, Fumarat, Maleinat, Succinat, Glutarat (sehr gutes Wachstum), Cyclohexancarboxylat

Wachstumsbedingungen: mind. 20g/l NaCl, 3g/l MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O; Dithionit

G+C: 40.6 mol%

**Lebensraum:**

marine Sedimente

(2)

Desulfobacterium autotrophicum ("HRM2")

**Morphologie:**

1-1.5 x 2-2.5µm, ovale Zellen; normalerweise beweglich, eine polare Geißel, Gram-negativ

**Physiologie:**

fakultativ chemolithoautotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup> Akzeptoren: Sulfat, Thiosulfat,

nicht: Sulfit, S<sup>0</sup>, Nitrat

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, EtOH und höhere Alkohole, Formiat, Butyrat bis Palmitat, Lactat, Pyruvat, Succinat, Fumarat, Malat, langsames Wachstum auf Acetat und Propionat;

vollständige Oxidation aller Substrate

Vergärung von Lactat, Pyruvat, Fumarat, Malat

C-Quelle: fakultativ autotroph

Wachstumsbedingungen: Biotin, p-Aminobenzoat, Nicotinat  
20g NaCl/l, 3g MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O/l

Temp.: opt.: 25°-28°C, Zellyse bei höheren Temperaturen

pH: opt.: 6.7 (bei autotrophen Wachstum)

G+C: 47.6 mol%

**Lebensraum:**

marine Sedimente, ev. anaerobes Frischwasser

Weitere fakultativ chemolithoautotrophe Stämme: HRM 4, HRM 6

Desulfobacterium vacuolatum:

lithoautotroph auf CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> und auf Formiat; Isolierung über SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+ Isobutytrat

(4)

Desulfobacterium anilini

**Morphologie:**

stäbchenförmig, 1.25x1.5-3µm, Gram-negativ, nicht beweglich, keine Sporen

**Physiologie:**

chemoorganotroph

e<sup>-</sup>-Akzeptor: Sulfat, Sulfit.

nicht: S<sup>0</sup>, Nitrat

Thiosulfat kann zu Sulfat + Sulfit ohne Wachstum umgesetzt werden

Substrate: Anilin, Phenol, p-Cresol einige Hydroxy- und Aminobezoate, Indoylacetat, Formiat, Acetat, höhere Fettsäuren bis Stearat; Pyruvat, Cyclohexanol, Cyclohexanon, Cyclohexancarboxylat  
nicht: Bicarboxylsäure

meist vollständig zu CO<sub>2</sub> oxidiert

Anilin -> CO<sub>2</sub> (quant.) + NH<sub>3</sub>

Wachstumsbedingungen: Vitamin B<sub>12</sub>, Thiamin, Dithionit 100 -200µM

cx<sub>NaCl</sub>: opt.: 14g/l; 2g MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O/l

pH: opt.: 6.9-7.5

Temp.: opt.: 35°C

G+C: 59.1 mol%

**Lebensraum:**

marine Sedimente

(28)

Thermodesulfobacterium commune

**Morphologie:**

0.3x0.9µm, kleine Stäbchen, einzeln oder paarweise; Gram-negativ, nicht beweglich

**Physiologie:**

obligat anaerob

chemoorganotroph

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Sulfat, Thiosulfat,

nicht: Fumarat, Nitrat, Sulfit

Gärung: Pyruvat -> H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>+Acetat

Substrate: Lactat, Pyruvat, H<sub>2</sub>

Wachstumsbedingungen: cx<sub>NaCl</sub><2%

Temp.: r.: 45-85°C; opt.: 70°C

pH: r.: 6.0-8.0; opt.: 7.0

G+C: 34.4 mol%

**Lebensraum:**

anaerobe Nischen verknüpft mit vulk. thermalen Besonderheiten

(43)

## 2.1.2 Schwefel-reduzierende Bakterien

### Desulfuromonas acetoxidans

**Morphologie:** (0.4-0.8)x(1-4µm), gerade oder leicht gekrümmte dünne Stäbchen  
Gram negativ  
beweglich durch eine laterale oder subpolare Geißel

**Physiologie:**

chemoorganotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: S<sup>0</sup> ->H<sub>2</sub>S; L-Malat, Fumarat -> Succinat

nicht: Sulfat, Sulfit, Thiosulfat, Nitrat, O<sub>2</sub>

Substrate: Acetat, Ethanol, Propanol, ButOH u.a. einfache organische Verbindungen,; vollständige Oxidation der Substrate

keine Vergärung

Wachstumsbedingungen: 0.01-0.03% Na<sub>2</sub>S\*9H<sub>2</sub>O als Reduktionsmittel, >1.5-2% NaCl und >0.3% MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O bei marinen Stämmen, ev. Biotin

T(Opt.)=30°C

pH(Opt.)=7.2-7.5; pH(R)=6.5-8.5

50.9-51.7 mol% G+C

**Lebensraum:** anaerobe Sedimente in Meer-, Brackwasser und Salzseen, syntrophe Mischkulturen mit phototrophen grünen Schwefelbakterien

(21,42)

### Desulfuromonas "acetexigens"

**Morphologie:** (0.8-1.2)x(1.2-2.5µm), länglich-ovale Stäbchen  
Gram negativ,  
beweglich durch eine polare oder subpolare Geißel

**Physiologie:**

Substrate: z.T. nur Acetat, andere Acetat und Pyruvat

**Lebensraum:** anaerobe Frischwasser-Sedimente

(42)

### DL-1

**Morphologie:**

klein, spirilloid, 0.5 x 2µm, auch länger, je nach Wachstumsbedingungen, Gram-negativ, nicht beweglich

**Physiologie:**

fakultativ anaerob

Substrate: Lactat, Succinat -> Hauptprodukt Acetat;  
H<sub>2</sub> (wenn Acetat als C-Quelle dient)

nicht: Glucose, EtOH

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: Dimethylsulfoxid, Sulfit, Thiosulfat, S<sup>0</sup>,  
Methioninsulfoxid, Tetramethylsulfoxid,  
Nitrat, O<sub>2</sub> (microaerophil)

nicht: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (wird nicht einmal assimiliert)

Wachstumsbedingungen: S-Quelle in Hefeextrakt, außer wenn  
Thiosulfat als e<sup>-</sup>-Akzeptor dient

Biochemie: Cytochrom c, kein Desulfovirdin

**Lebensraum:**

Seeschlamm

(ähnlich Spirillum 5175)

(45)

## 2.2 Schwefel-oxidierende Bakterien

### Thiobacillus denitrificans

#### **Morphologie :**

kurze Stäbchen, 0.5x1-3 µm; Gram negativ; unter Umständen mit Hilfe eines polaren Flagellums beweglich

#### **Physiologie:**

fakultativ anaerob;

anaerob: Oxidation von Schwefel ist gekoppelt an Reduktion von Stickstoffhaltigen Komponenten, z.B. Nitrat

obligat chemolithotroph

CO<sub>2</sub>-Assimilation, in Gegenwart einer anorganischen C

-Quelle auch Aufnahme von organischem Kohlenstoff

auf anorganische Schwefelquelle angewiesen

häuft unter optimalen Wachstumsbedingungen keine

Zwischenprodukte an

nicht strikt autotroph, kann in begrenztem Umfang auch organische C-Verbindungen als C-Quelle nutzen (47)

**Substrate :** Thiosulfat, u.a. reduzierte

Schwefelverbindungen, inc. Polythionat und Sulfid

elementarer Schwefel wird langsam oxidiert

anaerobe Oxidation von Thiosulfat als Energie-Quelle: die Reduktionsäquivalente werden über Elektronentransportkette auf Nitrat übertragen, das in 4 Schritten zu N<sub>2</sub> reduziert wird; (10)

**Denitrifikation :** positiv

kann Nitrat aber nicht als N-Quelle

nutzen; die Denitrifikation wird

inhibiert durch das Endprodukt Sulfat

> 5g SO<sub>4</sub> /l(10)

pH : opt. 6.8 - 7.4

Temperatur : opt. 28 -32°C

#### **Lebensraum :**

Frisch-, Seewasser Sedimente, Kanalwasser, Minenwässer

**Bemerkungen:** Spezies setzt sich aus vielen Stämmen zusammen, inc. einigen, die mineralisierte Sulfide oxidieren und die gegen viele Schwermetalle resistent sind

ein Stamm : pH opt.: 7.5 - 8.0

Temp.opt.: 30°C (10)

**G+C :** 63 - 67.5 mol%

(27,49)

### Thiobacillus neapolitanus

#### **Morphologie :**

kurze Stäbchen , 0.5 x 1.0-1.5µm; Gram negativ  
unbeweglich (einige marine Stämme beweglich)

#### **Physiologie:**

strikt aerob  
obligat chemolithotroph  
strikt autotroph (assimiliert jedoch org.Verbindungen in  
Gegenwart einer oxidierbaren Schwefelverbindung)  
Substrate: Thiosulfat , elementarer Schwefel ,  
Schwefelwasserstoff, u.a. teilweise reduzierte  
Schwefelverbindungen

kein Wachstum auf org. Medien (wächst nur auf  
anorg.Schwefelverbindungen)

Denitrifizierung : negativ

Stickstoffquelle: Nitrat, Ammonium (4)

Temp.: r.: 8°-37°C ;opt.: 28°C

pH.: r.: 3-8.5 ; opt.: 6.2 -7.0

**Bemerkungen :** ertägt hohe Konzentrationen von Thiosulfat + Chlorid  
marine + halophile Stämme (Lange-Posduva 1930

beschrieb einen Stamm , der in 40% igem Na-Thiosulfat wuchs)  
Th.neapol. kann unter anaeroben Bedingungen Polyglycose, die er  
während des aeroben Wachstums gespeichert hat (bis zu 8% des  
Trockengewichts bei N-begrenztem Wachstum) (Energie-/C-Quellen  
Speicher) zu EtOH, Lactat, und CO<sub>2</sub> im Verhältnis 1:1:1 vergären  
(heterofermentative Milchsäuregärung)(3)

#### **Lebensraum:**

wahrscheinlich weit verbreitet in Erde , Frischwasser ,  
Meer- , und Mündungssediment

(27,49)

### Thiobacillus novellus

#### **Morphologie:**

kurze Stäbchen, coccoid oder ellipsoide Zellen; 0.4 - 1.0 x  
0.6 - 4.0µm; einzeln, gelegentlich in Paaren, unbeweglich  
Gram negativ

#### **Physiologie:**

strikt aerob  
fakultativ chemolithotroph  
Elektronenakzeptor: Sauerstoff  
Substrate: benötigt anorganischen Schwefel oder org.  
Verbindungen als Energie- und C-Quelle;  
Thiosulfat, Tetrathionat, Sulfit, Sulfid  
(8)

das Wachstum wird stark stimuliert durch Verfügbarkeit von  
org. Verbindungen (z.B. : in synthetischen org.Medien  
unterstützen nur Glutamat und Asparatsäure(?) das Wachstum  
gut)

u.a. org. Säuren und Zucker (C1-C6)

Citrat wird langsam genutzt

Nutzung von org.Verbindungen unterdrückt die Oxidation von  
Thiosulfat

kein sichtbares Wachstum auf S<sup>-</sup>-Medien  
der Typ-Stamm besitzt mixotrophes Potential (er nutzt in  
mixotrophen Medien Glucose und Thiosulfat gleichzeitig,  
aber:  
dies hat keinen Einfluß auf Wachstumsrate oder Umfang (d.h.  
keine Steigerung gegenüber heterotrophem Wachstum)(40)  
fakultativ autotroph (Wachstum unter autotrophen  
Bedingungen langsam)  
(in Gegenwart von 4.0µM Ammoniummolybdat wächst er  
autotroph)(45)  
Diauxie (bei Wachstum auf einer Mischung von Glucose und  
Thiosulfat)  
pH: r.: 5.0 - 9.2                      opt.: 7.8 - 9.0  
Temp.: opt.: 30°C  
Denitrifikation: negativ  
Biotinbedürfnis; kann ersetzt werden durch Coenzym A oder  
Thiaminpyrophosphat (37)

**Lebensraum:**

Erde, wahrscheinlich weit verbreitet

G+C: 66-68 mol%

Referenz Stamm: ATCC 8093

(27,46,49)

**Thiobacillus thioparus**

**Morphologie:**

dünne kurze Stäbchen, 0.5 x 1.0 - 3.0µm; durchschnittlich  
0.5 x 1.7µm; Gram negativ; beweglich durch polares  
Flagellum;

**Physiologie:**

strikt aerob (kann allerdings anaerob in  
Gegenwart von Nitrat wachsen - im Unterschied zu  
Th.neapolitanus)

obligat chemolithotroph

strikt autotroph (allerdings begrenzte Fähigkeit org. C-  
Quellen zu assimilieren - Acetat,  
Succinat - diese dienen aber nicht als  
Energiequelle!)

**Substrate:** Thiosulfat, andere red. Schwefelverbindungen  
werden z.T. auch oxidiert (z.B. Thiocyanat, HzS,  
Tetrathionat)

elementarer Schwefel wird langsam oxidiert  
Schwefelgranula und Polythionate können angesammelt werden,  
abhängig von den Kulturbedingungen

Nitrat- und Ammoniumsalze dienen als N- Quelle

pH: r.: 4.5 - 7.8 einige Stämme sogar bis pH 10.0 !

opt.: 6.6 - 7.2

Temp.: opt.: 28°C

**Lebensraum:**

Schlamm, Erde, Kanalwasser u.a. Frischwasserressourcen,  
weit verbreitet

**Bemerkungen:** stellt im Thiosulfat-Medium sofort Schwefel für  
Th.novellus bereit

Stamm Tk-m: kann autotroph auf CS<sub>2</sub> und auf COS als alleinigen  
Substraten wachsen



anaerob mit CS<sub>2</sub> produziert er aufeinanderfolgend COS+H<sub>2</sub>S  
CO<sub>2</sub>-Fixierung, Wachstum auch auf Dimethylsulfid und Thiocyanat als  
alleiniger Energiequelle,  
nicht bei (2mM CS<sub>2</sub>) : Th. neapolitanus, Th. versutus,  
Th.thioparus, Th.acidophilus, Th.thiooxidans, Th. aquaesulis,  
Th.tepedarius (44)

G+C: 62-66 mol%  
(27,49)

### Thiobacillus intermedius

#### **Morphologie:**

dünne kurze Stäbchen, 0.5 x 1.0-2.0µm; Gram negativ

#### **Physiologie:**

strikt aerob

fakultativ chemolithotroph, wächst auch autotroph in  
anorganischen Medien

**Substrate:** Thiosulfat

wächst weitaus schneller bei einer Mischung von Thiosulfat  
(Elektronen Donator) und Glucose (C-Quelle)

Glucose allein oder in Mischung mit anderen org.

Verbindungen wird ebenfalls abgebaut (als Elektronenquelle)

Rate und Intensität des Wachstums in Thiosulfatmedien wird  
gesteigert bei Zugabe von Hefeextrakt, Glucose, Fructose,  
Sucrose, Maltose, Aspartat oder Glutamat,

viele andere Kohlenhydrate , Alkohole , und Säuren haben  
keinen Effekt

Während weder Thiosulfat noch org. Verbindungen das  
Wachstum unterstützen können, tritt optimales Wachstum in  
Gegenwart von Glutaminsäure und Glucose auf

In Medien, die sowohl Schwefel als auch organische  
Verbindungen enthalten, werden beide gleichzeitig oxidiert  
(im Gegensatz zu Th. novellus)

**Wachstumsvoraussetzungen:** benötigt reduzierte  
Schwefelverbindungen als  
Schwefelquelle

**Denitrifikation:** negativ

pH: r.: 1.9 - 7.0

opt.: (nicht untersucht; wahrscheinlich zw. 6.0 - 7.0)

Temp.: opt.: 30°C

#### **Lebensraum:**

Frischwassersedimente

G+C: 64.8

Typstamm: ATCC 15466

(27,49)

### Thiobacillus perometabolis

**Morphologie:**

dünne lange Stäbchen, 0.5 x 1.0 - 2.0µm; Gram negativ

**Physiologie:**

obligat aerob

chemolithotroph

kein autotrophes Wachstum (anorg. Schwefelverbindungen werden nur in Anwesenheit von org. Verbindungen oxidiert); wächst auch autotroph(21)

(Sauerstoffverbrauch nur in Verbindung mit Thiosulfat/Tetrathionat - Oxidation alleine ist nachgewiesen, aber org. Verbindungen werden zum Wachstum benötigt)

**Substrate:** Hefeextrakt, Thiosulfat, Tetrathionat, S<sup>0</sup>, Sulfid,

org. Verbindungen : beschränkt in Rate und Umfang

optimales Wachstum benötigt partiell reduzierte Schwefelverbindungen + organische Verbindungen (obligat mixotroph)

**Denitrifikation:** negativ

**pH:** r.: 2.8 - 6.8

**Temp.:** opt. 30°C

**Lebensraum:**

Erde (wahrscheinlich sehr weit verbreitet)

**G+C:** 65 - 67.9 mol%

(27,49)

### Thiobacillus thiooxidans

**Morphologie:**

kurze Stäbchen, 0.5 x 1.0 - 2.0µm; einzeln, in Paaren oder kurzen Ketten; Gram negativ

**Physiologie:**

obligat aerob

obligat chemolithotroph

strikt autotroph

**Substrate:** oxidiert sehr schnell S<sup>0</sup>

andere partiell reduzierte Schwefelverbindungen werden ebenfalls verbraucht

**Stickstoffquelle:** Ammoniumsalze; bei 2 Stämmen auch Nitrat

**Denitrifikation:** negativ

eine Pyruvatkonzentration von 5x10<sup>-3</sup> M hemmt die Veratmung von Schwefel vollständig (bei ruhenden Zellen)(2)

**pH:** r.: 0.5 - 6.0; opt.: 2.0 - 3.5

**Temp.:** r.: 10 - 37°C; opt.: 28 - 30°C

**Lebensraum:**

Erde mit Schwefelblume, Schwefelquellen, saure Minengewässer, korrodierender Stahl, Erde

**G+C:** 52 - 57.9 mol%

**Referenz Stamm:** k.R. Butlin 3/TA; NCIB 8343; ATCC 19377

**Bemerkung:** Begleitpilze können sich unter Umständen positiv auf das Wachstum auswirken(36)

(27,49)

### Thiobacillus ferrooxidans

#### **Morphologie:**

kurze Stäbchen, 0.5 x 1.0µm, gerundete Enden, einzeln oder in Paaren, selten in kurzen Ketten; beweglich; Gram negativ

#### **Physiologie:**

strikt aerob

obligat chemolithotrophe und fakultativ chemolithotrophe Stämme

**Substrate:** oxidiert Schwefel (und wahrscheinlich andere reduzierte Schwefelverbindungen) in Verbindung mit Thiosulfat, auch (21): Pyrit, Schwefelminerale, Thiosulfat, Tetrathionat  
Oxidation von angesäuerten Eisenionen löslichen Eisensulfaten.

(Die Fähigkeit  $Fe^{2+}$  -Ionen zu oxidieren, ist das Schlüsselcharakteristikum von Th.ferrooxidans)  
einige Stämme sind auch auf organische Verbindungen angewiesen

**Stickstoffquelle:** Ammonium, Nitrat wird langsam genutzt  
Fixierung von  $N_2$  (35)

**Denitrifikation:** negativ

**pH:** r.: 1.4 - 6.0 , ev. unter 1.4; opt.: 2.5 - 5.8  
(r.: 1.3-4.4; opt.:2.5)(21)

**Temp.:** opt.: 15 - 20° / 25°C;

(r.:10°-37°C/nicht bei 42°C;opt.:30°-35°C)(21)

#### **Lebensraum:**

bitumenhaltige Kohlenmienen, Drainagewässer, stark Säure und Fe-Ionen haltige Erde, die Pyrit oder Marcasit enthält

**G+C:** 53.6 - 60.1 mol%; (58-59 mol%)(21)

**Bemerkungen:** Begleitpilze (säuretolerante) können sich positiv auf das Wachstum auswirken; Th.ferrooxidans ist resistent gegenüber Silberionen bis  $5 \times 10^{-4}$   $AgNO_3$  (36)  
(27,49)

### Thiobacillus acidophilus

#### **Morphologie:**

stäbchenförmig, beweglich/unbeweglich; Gram negativ

#### **Physiologie:**

aerob

fakultativ chemolithotroph

fakultativ autotroph

**Substrate:** eine Vielzahl von org. Verbindungen kann in Mineralsalzmedien als Energiequelle dienen  
(Glucose, Fructose, Galactose, Mannitol, Xylose, Ribose, Arabinose, Sucrose, Citrat, Malat, Aspartat, Glutamat)

wächst gut auf org. Verbindungen und elementarem Schwefel  
heterotrophes Wachstum auf Glucose  
chemolithoautotroph auf CO<sub>2</sub> + Tetrathionat  
mixotroph (simultane Oxidation von Tetrathionat + Glucose)  
wächst auch auf Thiosulfat, Trithionat, Tetrathionat,  
genauso wie auf S<sup>0</sup>  
kann Fe<sup>2+</sup> als alleinige Energiequelle nicht nutzen, sonst  
sehr ähnlich Th. ferrooxidans  
Denitrifikation: negativ  
pH: opt.: 2 - 4.5  
wenig bis kein Wachstum bei einem pH von ≥6.0  
Temp.: mesophil  
G+C: 63 -64 mol%

**Bemerkungen:** Unterschied zu Th. ferrooxidans u.a. höherer G+C  
Gehalt, Th.organoparus wird jetzt als ein Stamm von Th.acidophilus  
angesehen (physiolog. Ähnlichkeiten, ident. G+C- Gehalt, hohe DNA-  
DNA Homologie)

**Type Stamm:** ATCC 27807  
(13,15,27,38)

### Thiobacillus organoparus

#### **Physiologie:**

acidophil  
wächst chemolithotroph auf Schwefelverbindungen und  
organotroph auf Glucose (fakultativ chemolithotroph)  
Denitrifikation: negativ

**Bemerkungen:** gilt heute als Stamm von Th. acidophilus  
(27)

Thiobacillus delicatus

**Morphologie:**

Stäbchen, gewöhnlich einzeln, seltener in Paaren  
0.4 - 0.6 x 0.7 - 1.6µm; unbeweglich; Gram negativ

**Physiologie:**

fakultativ aerob  
fakultativ chemolithotroph und mixotroph  
Substrate: wächst autotroph mit Schwefel, Thiosulfat,  
Tetrathionat, nicht mit Thiocyanat  
wächst mixotroph auf Thiosulfatmedien +  
Tricarbonsäurecyclus-Zwischenprodukten oder  
Aminosäuren.

kann nicht heterotroph auf einfachen C-Verbindungen wachsen  
optimales Wachstum erfordert sowohl organische Substrate +  
Thiosulfat/Schwefel

reduziert Nitrat und produziert Nitrit in mixotrophen und  
autotrophen Medien mit Thiosulfat oder Tetrathionat

Stickstoffquelle: Ammoniumsalze, Nitrat, Urea, Glutamat,  
Aspartat

pH: r.: 5.0 - 7.0; opt.: 5.5 - 6.0

Temp.: r.: 15 - 42°C; opt.: 30 - 35°C

**Lebensraum:**

Minengewässer

G+C: 66 - 67 mol%

Typ Stamm: IAM 12624

(27)

Thiobacillus prosperus

**Morphologie:**

Stäbchen, 3-4 x 0.3µm; beweglich durch einzelnes polares Flagellum; Gram negativ

**Physiologie:**

strikt aerob

strikt chemolithoautotroph

**Substrate:** wächst auf Sulfid-Erzen wie : Pyrit, Sphalerit, Chalcopyrit, Arsenopyrit, Galena ;

außerdem auf: H<sub>2</sub>S, schwaches Wachstum auf elementarem Schwefel und Fe-Ionen

produziert Schwefelsäure aus reduzierten S-Verbindungen

pH: r.: 1.0 - 4.5; opt.: ca. 2

Temp.: opt.: ca. 37 -41°C;

NaCl: 0 - 3.5 %

G+C: 64 mol%

**Type Stamm:** Thiobacillus prosperus, (LM3), DSM 5130

weitere Stämme: L7, LM1, MSB9a, MSB11, MSB12, VC15, VM17

L7, LM3, VC15: Temp :r.: 20 - 45°C (VC15 -41°C)

L7, VC15: opt.: 37°C

LM3: opt.: 33°C

VM17: Salztoleranz bis 6%

VC15 wächst durch Oxidation von FeS (Ausnahme!)

keiner kann auf organischen Substraten wachsen

elementarer Schwefel, Eisensulfat als Substrat bei:

LM1, MSB9a, VM17

(17)

Thiobacillus versutus

(ehemals Thiobacillus A2)

**Morphologie:**

stäbchenförmige Zellen mit gerundeten Enden

0.4 - 0.5 x 1.1 - 1.7µm; einzeln oder in Paaren; beweglich

mit Hilfe eines Büschels polarer Flagellen; Gram negativ

**Physiologie:**

fakultativ anaerob

fakultativ chemolithotroph

anaerobes Wachstum (im Chemostaten) auf Acetat+Nitrat (i.e. Denitrifikation)(11)

**Substrate:** Elektronen Donator: Thiosulfat, elementarer Schwefel wird langsam oxidiert

nutzt verschiedene org. Verbindungen als alleinige Energiequelle

additive Wachstumsraten bei Wachstum auf Glucose + Galactose(51)

Prferenz: Fructose vor Glucose(51),kein Wachstum auf β-glycosidischen Zuckern(51)

Tetrathionat oder Thiocyanat unterstützen das Wachstum nicht

**Stickstoffquelle:** Kaliumnitrat und Ammoniumchlorid (Urea nicht); Glutamat und Aspartat werden sowohl als N-, als auch als C-Quelle genutzt

**C-Quellen:** CO<sub>2</sub>, Alanin, Serin, Leucin, Isoleucin, Aspartat, Glutamat, Prolin, Histidin, Phenylalanin, Arabinose, Ribose, Glucose, Galactose, Fructose, Maltose, Sucrose, Gluconat, Glyarol, Mannitol, Formiat, Acetat, Propionat, n-Butyrat, Lactat, Pyruvat, Malat, Succinat,  $\alpha$ -Ketogutarat, Glutarat, Adipat, EtOH, n-Propanal, n-Butanol, Benzoat, m-Hydroxybenzoat, p-Hydroxybenzoat

heterotrophes Wachstum wird durch Anwesenheit von Thiosulfat nicht stimuliert

wächst anaerob in Gegenwart von Nitrat als Elektronen-Akzeptor

produziert reichlich N<sub>2</sub> mit organischen Substraten, nicht aber mit Thiosulfat in Mineralsalzmedien

Acetat-Konzentrationen über 40mM wirken inhibitorisch (24)

pH: r.: 6.5 - 9.5; opt.: 7.5 - 8.0 (By-Medium), 8.0 - 9.0 (SM basal salts-thiosulfat medium)

Temp.: r.: 17 - 40°C; nicht 10/42°C; opt.: 30 - 37°C

Gelatineverflüssigung: negativ

Wachstumsfaktoren: negativ

schnelle Wachstumsrate

G+C: 67 mol%

**Lebensraum:**

Erde

**Typ Stamm:** THI 041, ATCC 25364

add. Stamm: THI 024, ATCC 27793

**Bemerkung:** für lithoautotrophes Wachstum wird Molybdän benötigt(12)

(15)

### Thiobacillus tepidarius

**Morphologie:**

kleine Stäbchen, 0.5 x 1.0 - 2.0µm; beweglich durch einzelnes polares Flagellum; Gram negativ

**Physiologie:**

aerob

obligat chemolithoautotroph

**Substrate:** Sulfid, Thiosulfat, Trithionat, Tetrathionat, Sulfit(?); Hexathionat, Heptathionat (autotroph)(52)

nicht: Thiocyanat; Dithionat, Sulfit (als alleinige Energiequelle(52))

oxidiert Thiosulfat zu Sulfat mit Tetrathionat als obligatem Zwischenprodukt

**Stickstoffquelle:** Ammoniumsalze

pH: r.: 5.2 - 8.0; opt.: 6.8 - 7.5

Temp.: r.: 20 - 52°C; opt.: 43 - 45°C

G+C: 66.6 mol%

**Typ Stamm:** DSM 3134, ATCC 43215

(21,34)

### Thiobacillus albertis

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.45 x 1.2 - 1.5µm; beweglich mit polar inseriertem Flagellenbüschel

**Physiologie:**

aerob

obligat chemolithotroph + autotroph

Substrate: Schwefel, Thiosulfat, Tetrathionat

(Tetrathionat wird bei Wachstum auf Thiosulfat vorübergehend angehäuft - nicht auf Schwefel)

Stickstoffquelle: Ammoniumsalze

pH: r.: 2.0 - 4.5; opt.: 3.5 - 4.0

Temp.: r.: ?; opt.: 28 - 30°C

G+C: 61.5 mol%

**Lebensraum:**

isoliert aus extrem sauren Böden

Typ Stamm: ATCC 35403

(21)

### Thiobacillus aquaesulis

**Morphologie:**

kurze Stäbchen, 0.3 x 0.9µm; beweglich; speichert Polyphosphate; Gram negativ

**Physiologie:**

fakultativ anaerob (aber nur schwächlich)

fakultativ heterotroph auf komplexen Medien

wächst aber nicht auf gewöhnlichen Zuckern, org. Säuren, Formiat oder Methylaminen als einzigen Substraten

Substrate: produziert Nitrit und Schwefel aus Thiosulfat und Nitrat

pH.:opt.: 7.6 - 8.2

Temp.: opt.: 40 - 50°C

G+C: 65.7 mol%

Typ Stamm: wird katalogisiert bei DSM+ATCC

(21)



Thiobacillus sp.IV-85

Stäbchen, beweglich mit polarem Flagellum  
Gram negativ  
marin  
Substrat: Thiosulfat  
(39)

thermophile S-Oxidierer:

thermophiles Bakterium, ähnlich dem mesophilen Th.ferrooxidans:  
oxidiert reduzierte anorganische S-Verbindungen, S<sup>0</sup> und Fe<sup>3+</sup>, über  
einen weiten pH Bereich;  
wächst auf Thiosulfat bei pH:7.5 und 60°C/75°C  
pH:4.8 60°C/75°C  
auf Fe<sup>3+</sup> bei pH:3.5 60°C

Lebensraum:  
isoliert aus einer heißen Quelle in Island  
(42)

weiteres unbenanntes Bakterium:

**Morphologie:**

Stäbchen, Gram negativ

**Physiologie:**

autotroph, auch heterotrophes Wachstum auf NB-Medium, aber  
nicht auf einzelnen, org. Verbindungen  
oxidiert red. S-Verbindungen  
geringes Wachstum  
unvollständige Nutzung von Thiosulfat in autotrophen Medien  
pH: 2.7 bei 38°C /nicht bei 50°C  
r.: 4.8-8.0; opt.: 5.6 } bei 50°C (=Temp.opt.)

(50)

Thiobacillus thermophilica imshenetskii

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.4-0.6 x 1.0-4.5µm, kurze oder lange Ketten,  
beweglich, Gram negativ, Sporen

**Physiologie:**

strikt aerob  
obligat chemolithotroph (obligat autotroph)  
Substrate: oxidiert verschiedene S-Verbindungen,  
org.Substanzen können inhibitorisch wirken  
Temp.: r.:40°-80°C; opt.: 55°-60°C

**Lebensraum:**

Braguust: heiße Quellen

(9)

Genus Thiomicrospira

**Allgemeine Beschreibung**

**Morphologie:**

kleine spiralförmige Zellen, die Bänder formen  
0.2 - 0.3µm ø und 1 - 2 µm Länge; Gram negativ  
beweglich mit Hilfe polarer Flagellen oder unbeweglich  
keine Ruheformen bekannt

**Physiologie:**

Energiegewinnung durch Atmung  
chemolithotroph (CO<sub>2</sub> als hauptsächliche oder alleinige  
C-Quelle)  
Substrate: Oxidation von einer oder mehreren vollständig  
oder teilweise reduzierten anorganischen  
Schwefelverbindungen, incl. Sulfid, S<sup>0</sup>,  
Thiosulfat  
letztlich Sulfat als finales Oxidationsprodukt, aber S<sup>0</sup>  
kann im Medium angesammelt werden  
metabolische Eigenschaften sehr ähnlich Thiobacillus  
einige Stämme benötigen Vitamin B<sub>12</sub>  
G+C: 36 -44 mol%

Typ Stamm: Th. pelophila

Thiomicrospira pelophila

**Morphologie:**

Durchmesser 0.2 - 0.3µm; Länge: 1 -2µm; marines  
spirillenförmiges oder vibrioides Bakterium, beweglich mit  
einem polaren Flagellum oder unbeweglich

**Physiologie:**

microaerophiles Wachstum  
obligat. chemolithotroph  
physiologisch sehr ähnlich Thiobacillus thioparus und Th.  
neapolitanus  
hohe Sulfid-Toleranz  
Substrate: Oxidation von molekularem Schwefel und  
reduzierten Schwefelverbindungen wie Sulfid,  
Thiosulfat, Tetrathionat  
autotroph (CO<sub>2</sub>- Fixierung primäre C-Quelle , geringe Mengen  
von org. Verbindungen können ebenfalls aufgenommen werden  
als sekundäre C-Quelle)  
Stickstoffquelle: Ammoniumsalze  
Wachstumsvoraussetzungen: benötigt 1.5 -3.0 % NaCl  
einige Stämme benötigen Vitamin  
B<sub>12</sub>  
pH: opt.: 6.5 - 7.5  
Temp.: opt.: 28 - 30°C  
G+C: 44 mol%

(25,27,28)

Thiomicrospira denitrificans

**Morphologie:**

spiralförmig, vibrioid, 0.3µm ø; unbeweglich

**Physiologie:**

microaerophil

obligat chemolithotroph (etwas ähnlich Thiobacillus  
denitrificans)

wächst sehr gut unter anaeroben Bedingungen in einem Medium  
mit Thiosulfat oder Sulfid in Gegenwart von Nitrat  
(Nitratatmung?)

**Substrate:** Schwefelverbindungen werden zu Schwefelsäure  
oxidiert, während Nitrat zu N<sub>2</sub> reduziert wird  
unter aeroben Bedingungen wächst Thiomicrospira nur bei  
sehr geringen Sauerstoffpartialdrücken (pO<sub>2</sub> < 2%,  
0.5 % (25))

kein NaCl-Bedürfnis

pH: opt.: 7,0

Temp.: opt.: 22°C

**Lebensraum:**

Schlamm mariner Tiden, in denen Sulfid produziert wird

G+C: 36 mol%

(25,27,28)

Thiomicrospira crunogena

**Morphologie:**

vibrioid, 0.4 - 0.5 x 1.5 - 3.0µm; beweglich durch polares Flagellum

**Physiologie:**

obligat aerob (kann aber auch unter microaerophilen Bedingungen wachsen)

obligat chemolithotroph

**Substrate:** oxidiert und wächst, wenn Thiosulfat, Sulfid oder molekularer Schwefel als Energiequelle dienen / nicht mit Sulfit oder Thiocyanat

Wachstumsrate höher als bei anderen Thiomicrospirae autotroph (CO<sub>2</sub> als primäre C-Quelle)

opt. Konzentration an Sulfit für die CO<sub>2</sub>-Fixierung ist 100µM

CO<sub>2</sub>-Fixierung bis zu einer Sulfit-Konzentration von 800µM

Sulfit wirkt ab 2000µM toxisch

kein Wachstum bei einem Druck ≥ 400 atm

NaCl-Bedürfnis: 10% vom Meerwassergehalt

Denitrifikation: negativ

Stickstoffixierung: negativ

pH: r.: 5.0 - 8.5; opt.: 7.5 - 8.0

Temp.: r.: 4.0 - 38.5°C; opt.: 28 - 32°C

**Type Stamm:** ATCC 35932 / LMD 84.00

(18)

Thiomicrospira sp. strain L-12

Physiologie:

obligat chemolithotroph

microaerophil

Stickstofffixierung

NaCl-Bedürfnis : nicht unter 80mM, am besten bei 200 - 400mM  
auf zweiwertige Ionen angewiesen: MgSO<sub>4</sub> , CaCl<sub>2</sub> Kombination  
(für maximales Wachstum)

Substrate: Thiosulfat

toleriert 300µM Sulfid

Druck über 100 atm verringert CO<sub>2</sub>-Fixierung, bei 500 atm.

keine CO<sub>2</sub> - Fixierung

pH: r.: 6.0 - 8.5; opt.: 8.0

Temp.: r.: 10 - 35°C; opt.: 25°C

(41)

## Beschreibung Genus Thiosphaera

### **Morphologie:**

coccoide Zellen, einzeln, in Paaren oder in Ketten;  
gewöhnlich unbeweglich; Gram negativ

### **Physiologie:**

Atmung, Nutzung von Sauerstoff, Nitrat, Nitrit, oder  
Nitrogenoxid als terminale e<sup>-</sup> -Akzeptoren  
können reduzierte Schwefelverbindungen als e<sup>-</sup> Donator  
nutzen (auch Wachstum auf Formiat als alleiniger Energie-  
und Kohlenstoff-Quelle, wenn der Anfangs pH 6.8 beträgt)  
CO<sub>2</sub>-Fixierung als alleinige C-Quelle  
Oxidase/Katalase positiv

**Typ Stamm:** Thiosphaera pantotropha

## Thiosphaera pantotropha

### **Morphologie:**

coccoid, 0.7 x 0.9µm; unbeweglich, meist in Paaren oder in  
Ketten; Gram negativ

### **Physiologie:**

fakultativ anaerob  
fakultativ autotroph  
verwertet Nitrat/Nitrit als e<sup>-</sup> - Akzeptor bei anaerobem  
Wachstum  
auf heterotrophen Substraten aber auch auf Sulfid oder  
Thiosulfat

kann auch Fumarat anstelle von Nitrat nutzen

**Stickstoffquellen:** Ammonium, Nitrat, Urea, Casaminosäuren,  
Glutamat, kann nicht Methylamin  
verwenden (im Gegensatz zu Th.A2)

**Denitrifikation:** aerob bei Wachstum auf Acetat, Thiosulfat  
oder einer Mischung von beidem (in  
Gegenwart von Sulfid ist die Gasproduktion  
geringer)

### **Substrate:**

aerob/anaerob auf  
H<sub>2</sub>?, Fructose, Mannose, Glucose, Acetat, Lactat,  
Pyruvat, Succinat, Aspartat, Fumarat, Gluconat,  
Glutamat, Alanin, Histidin, Isoleucin, Leucin,  
Prolin, Hefeextrakt, Casaminosäure, Aceton,  
Propen-1,2-diol, Propen-2-ol, Acetal, Propionat

aerob auf:

Benzoat

anaerob auf:

Propionaldehyd

kein Wachstum auf:

Arabinose, Lactose, Methanol, Methan, Pimelat, Oxalat,  
Methylacetat, Methylethylketon, Propylenamid?

aerob:(e<sup>-</sup> Donator) Thiosulfat, Sulfid (Stamm GB17 auch  
anaerob)

pH: r.: 6.5 - 10.5; opt.: 8.0

Temp.: r.: 15 - 42°C; opt.: 37°C

G+C: 65.8 - 66.0 mol%

**Typ Stamm:** ATCC 35512 (LMD 82.5)

**Bemerkung:** für lithoautotrophes Wachstum mit Thiosulfat wird  
Molybdän benötigt(12)

(7,31,42)

### Genus Acidiphilium

#### Morphologie:

gerade Stäbchen mit gerundeten Enden, je nach Stamm  
0.3 - 1.2 x 0.6 - 4.2µm; beweglich mit polaren oder zwei  
lateralen Flagellen; einige Stämme unbeweglich; Gram  
negativ; keine Endosporen

#### Physiologie:

aerob

acidophil

chemoorganotroph

Substrate: wachsen nicht mit elementarem Schwefel,  
anorganischen Schwefelverbindungen, oder Fe<sup>2+</sup>  
-Ionen als Energiequelle,

aber: schwache Oxidation von S<sup>0</sup> kann bei einigen  
Stämmen vorkommen, wenn die Zellen  
chemoorganotroph wachsen, Fe<sup>2+</sup> stimuliert  
möglicherweise das Wachstum

pH: r.: 2.5 - 5.9, nicht bei 6.1, einige auch noch bei 2.0

Temp.: opt.: 31 - 41°C, Wachstum unter 20°C ist

langsam, nicht bei 47°C

#### Lebensraum:

gewöhnlich saure Minen oder Umgebungen wie Drainagen von  
Pyritminen, Kupfer- und Uranminen

Typ Stamm: *Acidiphilium cryptum*  
(15,16)

### Acidiphilium cryptum

#### Morphologie:

Stäbchen 0.3 - 0.5 x 0.6 - 1.5µm

#### Physiologie:

Substrate: Glucose, Glycerat, Lactose  
nicht: Glutamat

pH: 2.0 - 6.0

Wachstum wird durch Acetat inhibiert

G+C: 66 - 70 mol%

Typ Stamm: ATCC 33463 (Lhet2, DSM 2389, NCIB 11690)  
(15,16)

### Acidiphilium rubrum

#### Morphologie:

in Citronensäuremedium: 0.6 x 2.2µm; polare Flagellen

#### Physiologie

Wachstum inhibiert durch Acetat

verwertet: Citrat, Glucose, L-Malat, α-Ketoglutarat

nicht: Cis-Aconitat, Glycerat, Lactose, Fumarat,  
Pyruvat, EtOH

G+C: 63(Bd) mol%

Typ Stamm: ATCC 35903 (Stamm OP)  
(15,16)

Acidiphilium angustum

**Morphologie:**

in Citronensäuremedium: 0.8 x 2.9µm; polare Flagellen

**Physiologie:**

Inhibitor: Acetat

EtOH, Citronensäure, Glycerat unterstützen Wachstum

nicht: α-Ketoglutarat, Cis-Aconitat, Glutamat, Glucose,  
Lactose, Succinat, L-Malat, Pyruvat, Fumarat

G+C: 67(Bd) mol%

Typ Stamm: ATCC 35903

(15,16)

Acidiphilium falus

**Morphologie:**

in Citronensäuremedium: 0.7 x 1.8µm; häufig in Ketten und  
kleinen Flocken; beweglich mit polaren Flagellen

**Physiologie:**

das Wachstum wird nicht durch Acetat inhibiert  
wächst schneller als die übrigen

Urea wird hydrolysiert; Glucose, Citronensäure, Glycerat,  
Lactose, Cis-Aconitat, Glutamat, Succinat, L-Malat,  
Fumarat, α-Ketoglutarat, EtOH unterstützen das Wachstum

G+C: 65(Bd) mol%

Typ Stamm: ATCC 35904 (Stamm PW2)

(15,16)

Acidiphilium organovorum

**Morphologie:**

0.6 x 0.8 - 1.0µm;

**Physiologie:**

Inhibitor: Acetat, Pyruvat

kein Wachstum mit : Lactose, Maltose, Cellobiose

andere einfache Zucker unterstützen das Wachstum ebenso wie  
Zuckeralkohole, Carboxysäuren, Aminosäuren

wächst auch bei hohen Konzentrationen von organischen  
Substraten

G+C: 64(Ez) mol%

Typ Stamm: ATCC 43141

(15,16)

Genus Thiobacterium

Stäbchenförmig, speichert Schwefel; unbeweglich, keine  
Überdauerungsstadien bekannt; wächst nicht in Reinkultur

Typ Spezies: Thiobacterium bovista

0.4 - 1.5 x 2.5 - 9.0µm

Gram negativ

Lebensraum: Meerwasser, Brackwasser, Frischwasser die H<sub>2</sub>S  
enthalten und therm. Quellen bis zu 45°C

Typ Stamm: keine Kulturen verfügbar

(30)



### Genus Macromonas

Zylindrische bohnenförmige Zellen  
beweglich, ein polares Flagellum bestehend aus einem Büschel von  
Flagellen  
verschieden große Einschlüsse  
Typ Spezies: *Macromonas mobilis*

3-14 x 10-30µm  
aerob, aerotaktisch  
alle bisher isolierten Stämme sind heterotroph, können aber Sulfid  
zu Schwefel mit Hilfe von H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidieren  
Lebensraum: Frischwasser mit niedrigen O<sub>2</sub>-Konzentrationen, z.B.  
Hypolimnion, obere Schichten von Schlamm  
(29)

#### i *Macromonas mobilis*

9x20µm bis 6-14 x 10-30µm  
(29)

#### ii *Macromonas bipunctata*

##### Morphologie:

einzelnd oder in Paaren, birnenförmig, zylindrisch oder  
gekrümmt; 2.2-4 x 3.3-6.5µm

##### Physiologie:

strikt aerob

chemoorganotroph

Substrate: Acetat, Succinat, Malat, Fumarat, Benzoat, Salze  
anderer org. Säuren

nicht: Zucker, Alkohol, Aminosäuren

Stickstoffquelle: Ammoniumsalze und organische  
N-Verbindungen

Vitamine: +

pH: opt.: 7.5 - 8.2

Temp.: opt.: 28°C

G+C: 67.6 mol%

Typ Stamm: VKM 1366

(29)

### Genus Thermothrix

##### Morphologie:

Stäbchenförmig, gewöhnlich 0.5-1.0 x 3-5µm; beweglich,  
einzelnd; wenn Sauerstoff das Wachstum begrenzt: filamentöse  
Zellen; Gram negativ; keine Überdauerungsstadien

##### Physiologie:

fakultativ anaerob

fakultativ chemolithotroph

Substrate: anorganische Schwefelverbindungen und organische  
Verbindungen können als Elektronendonator  
genutzt werden  
veratmete Substrate incl. Glucose, Sulfid,  
Thiosulfat

Elektronenakzeptor: entweder O<sub>2</sub> oder NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Typ Spezies: *Thermothrix thiopara*

(5)

### Thermothrix thiopara

#### Physiologie:

Substrate: primär Sulfid, auch Thiosulfat, S<sup>0</sup>, Sufit, Pyrit  
nicht: S-haltige Kupferkonzentrate

S<sup>0</sup>, Sufit Polythionat werden vorübergehend angehäuft, dann  
aber vollständig zu Schwefelsäure oxidiert

Denitrifikation: nur bei heterotrophem Wachstum (N<sub>2</sub> als  
primäres Ausscheidungsprodukt, nur geringe  
Mengen NO)

bei Wachstum auf Thiosulfat:

pH: opt.: 6.7 - 7.1

Temp.: opt.: 73°C

allgemeine Temp.: r.: 60 - 80°C  
opt.: 73°C

bei Wachstum auf entweder org. oder anorg. Medien

Typ Stamm: ATCC 29244

(5)

### Thiobacillus Q (gehört eventuell zu *Pseudomonas alcaligenes*)

#### Morphologie:

vibrioid (Tendenz in reichen Medien Spirillen zu formen) .  
beweglich; Gram negativ

#### Physiologie:

nicht anaerob

obligat heterotroph

Substrate: aerob: Acetat, Glyoxylat, Glycerat, Propionat,  
Lactat, Malat, Pyruvat, Butyrat,  
Succinat, Fumarat

oxidiert Thiosulfat, Sulfid bei Energie-  
begrenzung in Gegenwart von org. Substraten,  
kann aber nicht autotroph auf ihnen wachsen

keine CO<sub>2</sub>-Fixierung (?)

komplette Inhibierung der Thiosulfatoxidation bei 400µM  
Sufit

Acetat-/Sulfid- Oxidation wird bei dieser Sufit-  
konzentration nicht inhibiert .

die maximale Thiosulfat-/Sulfidoxidation ist 10-20 mal  
geringer als bei anderen autotrophen/mixotrophen S  
-Oxidierern

Wachstum nicht auf:

Fructose, Glucose, Arabinose, Mannose, Galactose, Maltose,  
Lactose, Xylose, Mannitol, Dulcitat, Gluconat, Glycogen,  
Adipat, Cetrat, Oxalacetat, Glycerol, Dihydroxyaceton, EtOH,  
Oxalat, Formaldehyd, Benzoat, Methylamin, Dimethylamin,  
Urea, Methionin, Serin

> Unfähigkeit auf Zucker und (Poly-) Alkoholen zu wachsen  
(im Gegensatz zu *Th. novellus*, *Th. versutus*)

sammelt unter bestimmten Bedingungen Polyphosphat an

Wachstumsbedingungen: Biotin, Vitamin B<sub>12</sub>

pH: r.: 6.5 - 8.5; opt.: 7.5

Temp.: opt.: 30 - 35°C

#### Lebensraum:

wahrscheinliche ökologische Nische: Umgebungen mit  
niedriger S-Konzentration

Deponiert unter LMB 81.11 Delf culture collection

(14)

Sulfobacillus thermosulfidooxidans

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.6-0.8 x 1.0-6.0; mit runden oder spitz zulaufenden Enden, unbeweglich, einzeln, in Paaren oder kurzen Ketten, Gram positiv, Sporen

**Physiologie:**

strikt aerob

fak.chemolithotroph

Substrate: oxidiert Schwefel, Eisen, und schwefelhaltige Mineralien wie Pyrit

kann an heterotrophes Wachstum auf Mineralmedien mit 0.1% Gluc./Sucrose adaptiert werden

acidophil: opt.pH.: 1.9-2.4

Temp.: r.: 28°-60°C; opt.:50°C

**Lebensraum:**

isoliert aus selbsterhitzten Zonen von Kupfer-Zink-Pyrit Deponien in Nikolaw, UdSSR

(9)

## 2.3 Nitrat-reduzierende Bakterien

### Paracoccus denitrificans

#### **Morphologie:**

coccoid oder kurzer cocco-Bacillus (in der log-Phase)  
ca. 1.1 X 1.3µm ; in der statischen Phase: sphärisch, 1µm ø  
einzeln, in Paaren und in Aggregaten; Gram negativ  
unbeweglich

#### **Physiologie:**

chemoorganotrophe und fakultativ chemolithotrophe (H<sub>2</sub>  
-Oxidation) Stämme  
fakultativ anaerob  
Elektronen-Akzeptor: O<sub>2</sub> , NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, (Nitrat über NO zu N<sub>2</sub>)  
Wachstumsfaktoren: während des aerob/anaeroben Wachstums  
auf organischen Substraten sind keine  
Wachstumsfaktoren notwendig, ebenso bei  
autotrophem Wachstum auf anorg. Medien  
mit H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>  
aber: bei Wachstum mit H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sind org. Substraten  
notwendig (z.B. Hefeextrakt)  
Substrate: 64 verschiedene organische Verbindungen  
Stickstoff-Quelle: Ammoniumsalze und Nitrat  
Temp.: r.: 5-37°C , opt.: 30°C

(12,13,31)

### Paracoccus halodenitrificans

#### **Morphologie:**

Coccus, ca. 0.5µm ø; einzeln oder in Paaren; unbeweglich;  
Gram negativ

#### **Physiologie:**

Chemoorganotroph  
fakultativ anaerob  
Atmung , keine Gärung  
Elektronen-Akzeptoren: Sauerstoff, Nitrat (Nitrat zu N<sub>2</sub>)  
Substrate: besitzt komplexes Nährstoffbedürfnis  
kein Wachstum in Mineral-Medien mit einfachen  
C-Quellen  
Pepton unterstützt Wachstum gut  
Acetat, Pyruvat, Glycerat werden verbraucht,  
wenn sie zu komplexen Medien zugegeben werden  
NaCl: benötigt mind. 0.4 M NaCl, gutes Wachstum bei 0.8  
-1.6M NaCl; langsames Wachstum bis zu 4M NaCl  
Temp.: r.: 0-32°C, opt.: 20°C  
G+C: 64-66 mol %

Holotyp: ATCC 13511

(13)

Genus Pseudomonas

**Morphologie:**

stark oder schwach gekrümmte Stäbchen, 0.5-0.8 x 1.5-5.0µm,  
Gram negativ, beweglich (eine oder mehrere polare  
Flagellen), seltener: unbeweglich

**Physiologie:**

aerob, Atmung, einige mit Nitrat anaerob

(26)

Pseudomonas fluorescens

Temp.:opt.: 25-30°, auch bei 41°

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas chlororaphis

Temp.:opt.: 30°C

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas aureofaciens

Temp.:opt.: 30°C

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas pseudoalcaligenes

Temp.:opt.: 35°C, auch bei 41°C

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas pseudomallei

Temp.:opt.: 37°C, auch bei 40°C

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas mallei

Temp.:opt.: 37°C, auch bei 40°C

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas caryophylli

Temp.: opt.: 30-33°C, auch bei 40°C

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas pichettii

Temp.:opt.: 35°C, auch bei 41°C

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas solanacearum

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas lemoignei

Denitrifikation

(26)

Pseudomonas aeruginosa

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.5-0.8 x 1.5-3.0µm; einzeln, in Paaren oder in kurzen Ketten; beweglich mit polaren monotrichen Flagellen

**Physiologie:**

obligat aerob (außer in Medien mit Nitrat), Atmung chemoorganotroph  
sehr weites Substratspektrum: 76-82 oder mehr verschiedene organische Substrate  
benötigt keine Wachstumsfaktoren  
Temp.: opt.: 37°C / Wachstum auch bei 41°C

**Lebensraum:**

Erde, Wasser

G+C: ca. 67mol%

Neotyp Stämme: ATCC 10145, NCIB 8295, NCTC 10332  
(12, 14, 17, 22, 35)

Pseudomonas stutzeri

**Morphologie:**

beweglich (hauptsächlich mit monotrich polaren Flagellen)

**Physiologie:**

obligat aerob außer in Nitrat-haltigen Medien, Atmung mit Sauerstoff bzw. Nitrat  
Substratspektrum weit und heterogen (ca. 50-65 verschiedene org. Substrate, u.a. Glycolat, Ethylenglycol)  
nicht: Pentosen, Hexosen außer Glucose und Fructose, Disaccharide außer Maltose, 2-Ketoglutarat, Arginin, Histidin, Saccosin  
Temp.: 40-41°C, manche bei 43°C; opt.: ca. 35°C

**Lebensraum:**

Erde Wasser

G+C: 60.7-66.3mol%

Vermutete Neotyp Stämme: Lautrop AB201, Stanier221, ATCC17588  
(14, 22)

Pseudomonas mendocina

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.7-0.8x1.4-2.8µm; einzeln und in Paaren beweglich (hauptsächlich mit monotrich polaren Flagellen)

**Physiologie:**

obligat aerob, außer in Nitrat-haltigen Medien  
Atmung mit Sauerstoff oder Nitrat als term. Elektronen-Akzeptor  
Substrate: 56-65 oder mehr verschiedene org. Substrate, incl. Arginin, Geraniol, Glycolat, Ethylenglycol, Propylenglycol, Sarcosin  
nicht: Pentosen, Hexosen außer Gluc. und Fructose, Disaccharide, Mannitol  
benötigt keine org. Wachstumsfaktoren  
Temp.: opt. 35°C, Wachstum auch bei 41°C

**Lebensraum:**

Erde, Wasser

G+C: 62.8-64.3mol%

Typ Stamm: ATCC25411, NCIB10541  
(14, 22)

### Pseudomonas alcaligenes

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.5x2-3µm; beweglich mit polarem Flagellum

**Physiologie:**

obligat aerob

beschränktes Substratspektrum (23 von 123 getesteten org. Verbindungen.)

Temp.: opt.: 35°C, Wachstum auch bei 41°C

G+C: 66.3mol%

Vermutete Neotyp Stämme: Hugh1577, Stanier142, NCTC10367,

ATCC14909, NCIB9945

(14,22)

### Genus Moraxella

**Morphologie:**

Stäbchen (1.0-1.5 x 1.5-2.5µm) oder Kokken (0.6-1.0µm ø),  
einzeln oder in Paaren

**Physiologie:**

aerob, einige: schwach wachsend unter anaeroben Bedingungen

Temp.: opt.: 33-35°C

G+C: 40.0-47.5 mol%

(4)

### Genus Neisseria

**Morphologie:**

Kokken, 0.6-1.0µm, einzeln, häufig in Paaren; Ausnahme:  
eine Spezies: kurze Stäbchen, 0.5µm, als Diplobacilli,  
oder kurze Ketten

**Physiologie:**

aerob

Temp.: opt.: 35-37°C, r.: 22-40°C

häufig: Nitratreduktion

chemoorganotroph

(39)

### Flavobacterium

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.5 x 1.0-3.0µm, Gram negativ, unbeweglich

**Physiologie:**

Aerob, Atmung

chemoorganotroph

Temp.: r.: 5-42°C

**Lebensraum:**

Wasser und Boden

(18)

Corynebacterium

**Morphologie:**

stark oder schwach gekrümmte Stäbchen, Gram positiv, unbeweglich

**Physiologie:**

fakultativ anaerob, chemoorganotroph  
Temp.: r.:30-37°C

(10)

Wolinella succinogenes

**Morphologie:**

helikale, gekrümmte oder gerade Zellen; 0.5-1.0x2-6µm, gerundete oder spitz zulaufende Enden; Gram positiv beweglich (polare Flagellen)

**Physiologie:**

anaerob, mit H<sub>2</sub> und Formiat als Elektronen Donatoren  
C-Quelle während der Nitratatmung: Succinat, Fumarat  
Fumarat und Nitrat als Elektronen Akzeptoren  
(Formiat zu CO<sub>2</sub>; Fumerat zu Succinat); H<sub>2</sub>S oder Cystein für  
Wachstum auf Nitrat erforderlich(3)  
keine Gärung (mit Kohlenhydraten)  
produziert H<sub>2</sub>S  
Nitrat wird über Nitrit zu NH<sub>3</sub> reduziert (nicht zu N<sub>2</sub>)  
Temp.: 37°C in einer Atmosphäre von 80% N<sub>2</sub>, 10% CO<sub>2</sub>, 10% H<sub>2</sub>  
(pH: 7.8)(3)

**Lebensraum:**

Pansen von Wiederkäuern

G+C: 47mol%

Typ Stamm: ATCC29543

(3,36)

Campylobacter sp.

allgemein:

**Morphologie:**

schlanke, spiralig gekrümmte Stäbchen; 0.2-0.5x0.5-5µm  
Gram negativ; beweglich, korkenzieherähnlich mit einem  
polarem Flagellum (an einem oder beiden Enden)

**Physiologie:**

chemoorganotroph  
Atmung  
mikroaerophil (O<sub>2</sub>: 3-15%; CO<sub>2</sub>: 3-5%)  
keine Gärung, kein Energiegewinn aus Kohlenhydraten  
Nitratreduktion  
pH: das Wachstumsmedium wird alkalisch (pH 8.5-9.0), diese  
ungünstigen pH-Werte führen zu coccoiden Zellen

**Lebensraum:**

Reproduktionsorgane, Intestinaltrakt und 'oral cavity' von  
Mensch und Tier



>Liste:

Campylobacter fetus

Physiologie:

wächst nicht bei 3.5%NaCl

finaler pH: 8.2-8.7

pH opt.: 7.0

Temp.: 37°C

kein oder nur wenig Wachstum unter strikt anaeroben Bedingungen

subspezies fetus: Temp.: 25°C, gewöhnlich nicht bei 42°C

subspezies venerealis: seltene und geringe H<sub>2</sub>S-Produktion

Campylobacter jejuni

Temp.: 42°, 45°C ; nicht: 25°C

Campylobacter sputorum

Physiologie:

Nitrat verstärkt Wachstum

mikroaerophil bis anaerob

anaerob bei Fumarat (allein), Formiat + Fumarat, H<sub>2</sub> + Fumarat

finaler pH (halbfestes Glucose Medium, 0.16% Agar): 6.7-7.0 (nach drei Wochen)

subspezies sputorum:

Wachstum mit 2.0% NaCl, nicht: 3.5%NaCl

H<sub>2</sub>S-Produktion

Temp.: 43°, 45.5°C

Lebensraum:

'gingival crevice flora of man'

subspezies bubulus:

anaerob mit Nitrat, Nitrit(12), Fumarat oder Malat als Elektronen-Akzeptor; H<sub>2</sub>, Formiat, L-Lactat(12) als Elektronen-Donator;

membrangebundene Nitritreductase: Nitrit zu NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (12)

Wachstum auch bei 3.5% NaCl

subspezies mucosalis

Campylobacter coli

Campylobacter concisus

(32)

Vibrio fischeri

**Morphologie:**

gerade oder gekrümmte Stäbchen; 0.5-0.8µm; Gram negativ  
(in flüssigen Medien) beweglich mit polaren Flagellen, die  
in einer Scheide zusammengeschlossen sind

**Physiologie:**

fakultativ anaerob

Gärung und Atmung

chemoorganotroph

Na<sup>+</sup> für die meisten absolut notwendig

'respiratory nitrit reductase' (20)

minimale Konzentration: 5-700mM für opt. Wachstum

Temp.: 30/35°C

**Substrate:** z.B.: D-Mannose, D-Galactose, D-Mannitol,  
Cellubiose, D-Gluconat, DL-Lactat und  
Pyruvat

**Lebensraum:**

aquatisch mit weitem Salz-Toleranzbereich, Meer und Küste,  
Oberfläche und Intestinaltrakt von Meerestieren

G+C: 39-41 mol%

Typ Stamm: ATCC7744

(1)

Citrobacter sp.

**Allgemein:**

**Morphologie:**

gerade Stäbchen, ca. 1.0x2.0-6.0µm; einzeln oder in Paaren  
Gram negativ; gewöhnlich beweglich mit peritrichen  
Flagellen

**Physiologie:**

fakultativ anaerob

Atmung und Gärung

chemoorganotroph

Citrat kann als alleinige C-Quelle genutzt werden

dissimilatorische Nitritreduktion durch Citrobacter sp. zu  
NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (33)

G+C: 50-52 mol%

>Liste:

Citrobacter freundii:

**Morphologie:** einige eingekapselte Stämme

**Physiologie:** produziert H<sub>2</sub>S

**Lebensraum:** in Mensch, Tier, Erde, Wasser, Schlamm,  
Nahrungsmitteln, Urin, u.a.

Citrobacter amalonaticus:

**Lebensraum:** u.a.: Feces von Mensch und Tier, Erde, Schlamm, Wasser

**Citrobacter diversus:-**

(28)

Klebsiella sp.

Allgemein:

**Morphologie:**

gerade Stäbchen, 0.3-1.0x0.6-6.0µm; einzeln, in Paaren oder kurzen Ketten; eingekapselt; Gram negativ; unbeweglich

**Physiologie:**

fakultativ anaerob  
Atmung und Gärung  
produziert kein H<sub>2</sub>S  
G+C: 53-58 mol%

Klebsiella pneumoniae

NO<sub>2</sub><sup>-</sup> -> NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (N<sub>3</sub>); neben der assimilatorischen auch dissimilatorische Nitritreduktion (NO<sub>2</sub><sup>-</sup> -> N<sub>2</sub>O + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)(5%/95%)(N<sub>12</sub>)(unter anaeroben Bedingungen)

Substrate: Glucose, Pyruvat, Formiat(N<sub>12</sub>)

Lebensraum: Intestinaltrakt von Mensch und Tier

ATCC 13883

(12,25)

Azotobacter sp.

Allgemein:

**Morphologie:**

große eiförmige Zellen; 1.5-2.0µm ø; pleomorph (Stäbchen bis Coccus); einzeln, in Paaren oder irregulären Klumpen, formen Cysten; Gram negativ; beweglich (peritriche Flagellen) oder unbeweglich

**Physiologie:**

aerob (kann aber auch unter abnehmendem O<sub>2</sub>-Druck wachsen)  
N<sub>2</sub>-Fixierer / Molybdänbedürfnis  
Nitrat und Ammoniumsalze als N-Quelle (bis auf eine Art)  
1% NaCl; Nitratreduktion zu Nitrit  
pH: r.: 4.8-8.5; opt.: 7.0-7.5

**Lebensraum:**

Erde und Wasser

G+C: 63.2-67.5 mol%

>Liste:

Azotobacter chroococcum:

**Physiologie:**

Ammonium und Nitrat als Stickstoffquelle mit Inhibition der N<sub>2</sub>-Fixierung  
assimilatorische Nitratreductase (keine Nitrat-Atmung)(16)  
Temp.: 18-32°/37°C  
pH: 6.5-10.0

Azotobacter vinelandii:

**Morphologie:**

einige unbeweglich

**Physiologie:**

H<sub>2</sub>S-Produktion aus Thiosulfat  
Temp.: 14°-37°C  
pH: 6.0-10.0

(37)

Azomonas agilis

**Morphologie:**

2.0µm ø und variable Länge; Stäbchen - coccoid  
(Pleomorphismus); einzeln, in Paaren oder in Klumpen  
Gram negativ /variabel; beweglich (peritriche Flagellen)

**Physiologie:**

aerob (wächst aber auch unter abnehmendem O<sub>2</sub>-Druck)  
chemoorganotroph  
Substrate: Zucker, Alkohole, Salze org.Säuren  
Stickstoffixierung /Molybdänbedürfnis  
Stickstoffquelle: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Nitrat nur spärlich  
assimilatorische ? Nitritreduktion(41)  
Temp.: 14°-37°C  
pH: opt.: ca.7.0; r.:6.5-10.0  
1% NaCl

(38)

Veillonella parvula

**Morphologie:**

Coccus, 0.3-0.5µm; Diplococcen und kurze Ketten  
Gram negativ; unbeweglich

**Physiologie:**

chemoorganotroph  
anaerob  
Gärung: Pyruvat, Lactat, Malat, Fumarat, Oxalacetat als  
Substrate; nicht vergoren werden Kohlenhydrate und  
Polyole(?)  
Lactat wird zu Acetat + Propionat + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>  
vergoren  
komplexes Nährstoffbedürfnis, CO<sub>2</sub> wird benötigt  
Nitritreduktion, induziert durch Nitrat/Nitrit, inhibiert  
durch ansteigende Mengen von reduzierten  
N-Verbindungen(Nitratatmung?)(41)  
Temp.: opt.: 30°-37°C  
pH: opt.: 6.5-8.0  
kein Wachstum bei 4% NaCl

**Lebensraum:**

parasitisch in Mund und Intestinalbereich von Mensch und  
Tier

G+C:38-41mol%

ATCC10790

(12,21,27)

Clostridium perfringens

**Morphologie:**

(Zellen in PYG broth cultur); Gram positiv; 'atrichous'  
unbewegliche gerade Stäbchen mit 'blunt ends'; einzeln oder  
in Paaren; 0.6-2.4x1.3-19.0µm; Sporen

**Physiologie (in PYG):**

Gärung

obligat anaerob

chemoorganotroph

pH nach einer Woche in PYG: 4.8-5.6

Temp.: Typ A,D,E: 45°C

Typ B,C: 37°-45°C

r.: die meisten zwischen 20°-50°C

pH: schnelles Wachstum bei :5.5-8.0

produziert auch H<sub>2</sub>

Wachstum wird nicht inhibiert durch 2% NaCl

Inhibition bei 6.5% NaCl

**Lebensraum:**

Mensch (infizierter)

G+C:24-27mol%

ATCC13124

(7,12)

Clostridium KDH S2:

Reduktion von NO<sub>3</sub><sup>-</sup> zu NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, wahrscheinlich dissimilatorisch (8)

Bacillus sp.

**Allgemein:**

**Morphologie:**

Stäbchenförmig, gerade; Endosporen; Gram positiv; Flagellen  
peritrich oder degeneriert

**Physiologie:**

aerob/fakultativ anaerob

chemoorganotroph / eine Art fak.chemolithotroph

normalerweise Sauerstoff als terminaler Elektronenakzeptor,  
manchmal ersetzt, Atmung

benötigt verschiedene Wachstumsfaktoren

(9)

>Liste:

Bacillus cerus:

**Morphologie:** Tendenz in Ketten aufzutreten

**Physiologie:** absolutes Bedürfnis für Aminosäuren (eine oder  
mehrere, je nach Stamm)

kein Vitamin-Bedürfnis

pH: (in V-P Groth): <6 +

>7 -

(in Nutrient Broth): 6.8 +

5.7 +

Temp.: 10°-40°C

reduziert Nitrat zu Nitrit

NaCl: wächst bei 7%

**Lebensraum:** Sporen weit verbreitet

(9,17)

### Bacillus licheniformis:

**Morphologie:** oft in Ketten

**Physiologie:** frisch isolierte Bakterien wachsen mit  $\text{NH}_4^+$  als N-Quelle in Abwesenheit von Wachstumsfaktoren

pH: (in V-P) <6 +  
>7 -

Wachstum bei 7% NaCl  
(in NB) 6.8 +  
5.7 +

Temp.: 30°-35°C

dissimilatorische Nitratreduktion(30)

**Lebensraum:** Sporen in Erde weit verbreitet  
(9)

### Bacillus stearothermophilus

**Physiologie:** pH (in V-P) <6 +  
>7 -

Wachstum bei 5% NaCl  
(in NB) 6.5 +  
5.7 -

Temp.: 40°-65°C  
(9,15)

### Escherichia coli

**Morphologie:**

gerade Stäbchen; 1.1-1.5 x 2.0-6.0µm; einzeln oder in Paaren; Gram negativ; beweglich (mit peritrichen Flagellen) oder unbeweglich

**Physiologie:**

fakultativ anaerob

Atmung und Gärung

chemoorganotroph

Nitratreduktase wird unter anaeroben Bedingungen bei Anwesenheit von Nitrat induziert (auch Nitratatmung?)(2)(40)

Temp.: opt.:37°C

**Lebensraum:**

unterer Teil des Gastrointestinaltraktes von Warmblütlern  
(12,24)

### Selenomonas sp.

**Allgemein:**

**Morphologie:**

gekrümmte bis helikale Stäbchen; gewöhnlich 0.9-1.1 x 3.0-6.0µm; mit spitz zulaufenden und gerundeten Enden; oder vibrioid; Gram negativ; beweglich durch Taumeln (bis 16 Flagellen - linear als Bündel nahe dem Zentrum im Bereich der 'cell fision' auf der konkaven Seite)

**Physiologie:**

strikt anaerob  
chemoorganotroph  
Gärung (Kohlenhydrate und manchmal Aminosäuren und Lactat  
als vergärbare Substanz)  
Glucose->Essigsäure, Propionsäure, CO<sub>2</sub> und/oder Lactat  
geringe Mengen H<sub>2</sub> + Succinat werden produziert

**Lebensraum:**

Pansen von Tieren

Typ Stamm: *Selenomonas sputigena*

>Liste:

*Selenomonas sputigena*  
*Selenomonas ruminantium*  
*Selenomonas ruminantium* subspezies *ruminantium*  
*Selenomonas ruminantium* subspezies *lactilytica*  
(5,21)

**Propionibacterium acedipropionicum**

**Morphologie:**

pleomorph, 0.5-0.8 x 1-5µm; coccoid/bifid/geteilt  
Gram positiv; unbeweglich

**Physiologie:**

chemoorganotroph  
Gärung  
anaerob/aerotolerant  
pH: (in Glucose Nährmedium) final: 4.1-4.9  
Temp.: opt. 30°-37°C  
(dissimilatorische Nitratreduktion(21))

(11)

**Bradyrhizobium japonicum**

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.5-0.9 x 1.2-3.0µm; pleomorph, beweglich  
(subpolares Flagellum)

**Physiologie:**

einige Stämme chemolithotroph mit H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und geringen  
Mengen O<sub>2</sub>  
Atmung  
Temp.: 25°-30°C opt.  
pH: 6-7 opt.

**Lebensraum:**

symbiontisch in Gegenwart von Wurzelknollen (als "swollen  
forms"), N<sub>2</sub> - Fixierung  
manchmal auch N<sub>2</sub>-Fixierung unter freilebenden Stämmen  
(Denitrifizierer(31))

(19)

Salmonella typhimurium

**Morphologie:**

gerade Stäbchen; 0.7-1.5 x 2.0-2.5µm; typische  
Enterobacteriaceae; Gram negativ; gewöhnlich unbeweglich

**Physiologie:**

fakultativ anaerob  
Gärung und Atmung  
reduziert Nitrat zu Nitrit  
(ev. Nitratatmung?(2))  
produziert aus Glucose Gas  
(pH: 4.5-7.5)(2)

**Lebensraum:**

(siehe Enterobacteriaceae) , Mensch und Tier  
(23)

Staphylococcus sp.

**Allgemein:**

**Morphologie:**

sphärisch, 0.5-1.5µm ø; einzeln oder in Paaren; Gram  
positiv; unbeweglich

**Physiologie:**

fakultativ anaerob  
Atmung und Gärung  
chemoorganotroph  
**Substrate:** verschiedene Kohlenhydrate  
Temp.: 18°-40°C  
Wachstum bei 10% NaCl

**Lebensraum:**

natürlich auf der Hautoberfläche von Warmblütlern

>Liste:

Staphylococcus aureus:

**Physiologie:**

relativ schwaches Wachstum bei 15% NaCl  
Temp.: r.: 15°-45°C, opt.: 30°-37°C  
pH: r.: 4.2-9.3, opt. 7.0-7.5  
Nitratreduktase : NO<sub>3</sub><sup>-</sup> zu NH<sub>4</sub><sup>+</sup>  
Nitratatmung?(6)

Staphylococcus epidermis

**Physiologie:**

NaCl: bis 7.5% gutes, bei 10% nur schwaches Wachstum  
Temp.:r.:15°-45°C, opt.: 30°-37°C

(17)



## 2.4 Eisen- und Mangan-oxidierende Bakterien

### Familie Siderocapsaceae

#### Allgemeine Beschreibung und Eigenschaften

Zellen zeigen starke Variabilität, was Morphologie und Einkapselung anbetrifft.

#### Morphologie:

sphärisch, ellipsoid, stäbchenförmig, mit  $Fe^{3+}$ - und  $Mn^{4+}$  Oxiden inkrustiert

Taxonomie zweifelhaft -> keine physiologischen und biochemischen Charakterisierungen vorhanden, die meisten sind nicht in Reinkulturen verfügbar.

Unsichere Genera sind: 'Ferribacteria', 'Sideroderma', 'Siderobacter', 'Sideromonas', 'Sideronema', 'Siderosphaera', 'Siderocystis'

-> sie können, da keine Reinkulturen vorhanden sind, nicht bestätigt werden

-> es gibt keinen Nachweis, daß die Oxidation/Prezipitation von Fe/Mn für sie biochemisch 'vorteilhafte' Reaktionen sind

-> diese Bakterien wurden nicht chemolithotroph (mit  $Fe^{2+}/Mn^{2+}$ ) oder autotroph kultiviert

-> eventuell sollten sie nicht zu den Fe/Mn-oxidierenden Bakterien gezählt werden, sondern als 'Fe/Mn-Oxid präzipitierende Bakterien' geführt werden

alle sind aerob oder microaerophil

(fakultativ/obligat anaerob für Ochrobium)

einige Mitglieder dieser Familie (Sidero.) wurden im aeroben Epilimnon, andere im anaeroben Hypolimnon gefunden

(11)

### Siderocapsa

#### Deponiert Fe- oder Mn- Oxide

#### Morphologie:

Einzelne oder mehrere sphärisch bis eiförmige Zellen, umgeben von einer Kapsel, die, z.T. oder völlig mit Fe- oder Mn-Oxiden inkrustiert ist;

Kapselaufbau scheint der Deponierung von Fe/Mn- Oxiden vorauszugehen;

deponieren häufig ringförmig, wenn Zellen direkt auf der Substratoberfläche leben

#### Lebensraum:

Gewöhnlich in Frischwasser an der Oberfläche oder planktisch (einige Spezies könnten mit Arthrobacter sp. verglichen werden, wenn sie im Labor gezogen werden).

Die einzelnen Siderocapsa sp. unterscheiden sich vor allem in ihrer Morphologie

Typ. Spezies: Siderocapsa treubii

(11)

Siderocapsa treubii

**Morphologie:**

Kapseln mit Fe-Oxiden inkrustiert; Coccus, 0.4-0.6µm

**Lebensraum:**

weit verbreitet an der Oberfläche aquatischer Umgebungen

(11)

Siderocapsa major

**Morphologie:**

ähnlich S.treubii; coccoid, 0.7-1.8µm; Kapseln weniger definiert, häufig 2-4 Zellen/Kapsel, dann eiförmig bis stäbchenförmig

**Lebensraum:**

weit verbreitet an der Oberfläche aquatischer Umgebungen

(11)

Siderocapsa monoica

**Morphologie:**

eine einzelne coccoide Zelle/Kapsel; 0.5-0.8µm

**Lebensraum:**

auf untergetauchten Wasserpflanzen

(11)

Siderocapsa anulata

**Morphologie:**

einzeln; coccoid, 0.2-0.5µm; Kapseln mit Fe-Oxiden: rostbraun und dick; häufig: mehrere Zellen mit nicht inkrustierter Kapsel werden von einer äußeren, inkrustierten Kapsel umgeben

(11)

Siderocapsa geminata

**Morphologie:**

eiförmig bis stäbchenförmig; 0.5-0.6 x 0.6-1.6µm; in Paare  
Kapsel rund 7-11µm ø

**Lebensraum:**

Hypolimnion, Epilimnion während Herbst-/Frühlings-  
Zirkulation

(11)

Siderocapsa coronata

**Morphologie:**

2-8 Zellen in einer ungleichmäßigen Kapsel (-24µm ø)

**Lebensraum:**

Neuston alpiner und subalpiner Gewässer; auch unter  
microaerophilen Bedingungen

(11)

Siderocapsa arlbergensis

**Morphologie:**

Kapseln ungleichmäßig sphärisch; 6-15µm, typisch granulös  
geringe Kapselaggregation; Zellen: 0.4-1.0µm, 1-4  
Zellen/Kapsel

(11)

Siderocapsa eusphaera

**Morphologie:**

Kapseln regelmäßig sphärisch, 10-50µm ø; Zellmorphologie  
abhängig von Alter und Entwicklung der Kultur; coccoidal  
oder stäbchenförmig

**Lebensraum:**

Umkapselte Zellen sind typisch planktonisch, Hypo-  
Epilimnon

**Bemerkung:** gehören eventuell zu Artrobacter, als A.eusphaera

(11)

Siderocapsa hexagonata

**Morphologie:**

Zellen sphärisch-ellipsoid; 0.6-0.8µm; umgeben von einer  
regelmäßigen hexagonalen Kapsel

**Physiologie:**

eventuell strikt autotroph

(11)

Siderocapsa quadrata

**Morphologie:**

sphärisch bis ellipsoid; 0.5-1.0µm; Kapsel: 2.2-2.5µm

**Lebensraum:**

Mineralwässer

(11)

Genus Naumanniella

**Morphologie:**

meist stäbchenförmig, manchmal ellipsoid/coccoid; jede  
Zelle mit gleichmäßiger Kapsel (Fe/Mn-Oxide)

**Lebensraum:**

helle Fe-Quellen, tiefe Brunnen (in allen Fällen aerob oder  
microaerophil)

Typ Spezies: N.neustonica

(11)

Naumanniella neustonica

**Morphologie:**

gerade, stäbchenförmige Zellen; Zelle + Kapsel: 1.8-3.3 x 4.9-20µm; einzeln

**Physiologie:**

wächst auf Eisencitrat-Lösungen; manchmal können die Zellen aneinander hängen bleiben und von einer gemeinsamen Kapsel umgeben werden

**Lebensraum:**

Neuston

(11)

Naumanniella minor

**Morphologie:**

gekrümmt oder spiralförmig; Zelle + Kapsel 1.2-1.5 x 3.1-3.6µm; einzeln

**Lebensraum:**

Sedimente von eisenhaltigen Quellen/Brunnen

(11)

Naumanniella catenata

**Morphologie:**

etwas gekrümmte Stäbchen und meist in kurzen Ketten; Zelle + Kapsel 1.0-1.2 x 4.9-5.5µm; (die Stäbchen können manchmal sehr klein sein)

(11)

Naumanniella pygmaea

**Morphologie:**

gerade Stäbchen mit gerundeten Enden, einzeln; Zelle + Kapsel 1.0-2.0µm

**Physiologie:**

wächst langsam auf 'Boden-extrakt' Agar

(11)

Naumanniella elliptica

**Morphologie:**

Zellen ellipsoid, mit ebensolchen Kapseln, einzeln; Zelle + Kapsel 2.0 x 2.5-3.0µm

(11)

Naumanniella polymorpha

**Morphologie:**

Zellen ellipsoid, manchmal coccoid; 0.7-1.0 x 1.0-2.0µm

**Physiologie:**

kein Wachstum auf normalen organischen Medien (aber: Wachstum auf Mn-Carbonat Agar/ Mn-Acetat Agar); oxidiert Mn-Verbindungen, nicht aber Fe-Verbindungen

(11)

bis auf *N.elliptica* + *N. polymorpha* sind alle psychrophil  
(11)

### Genus Siderococcus

#### **Morphologie:**

sphärisch, klein; 0.2-0.5µm ø; einzeln oder in kleinen  
Aggregaten; eventuell beweglich

#### **Physiologie:**

Fe-Oxidation und Deponierung von Fe-Hydroxiden in den  
Zellen (kann unterstellt werden)

#### **Lebensraum:**

verbreitet in Schlammhorizonten mit niedrigem O<sub>2</sub>-Gehalt und  
neutralem pH; in Frischwasserablagerungen, z.B. 'iron spring  
horizon' in der Nähe von Itzehoe

Temp.: 9°-12°C

pH: 6.2-7.0

1-15 mg Fe<sup>2+</sup>/l

2-4 mg O<sub>2</sub>/l

Typ Species: *Siderococcus limoniticus*

(11)

### Siderococcus limoniticus

s.Genus Beschreibung

Bemerkung: Dorff(1934) meint, das Bakterium könnte chemolithotroph  
sein (aufgrund der hohen Oxidationsrate von Fe<sup>2+</sup>)

(11)

### Genus Ochrobium

#### **Morphologie:**

ellipsoid oder stäbchenförmig; 0.5-0.7 x 0.7-1.5µm; z.T.  
von einer Kapsel umgeben, die mit Fe-Oxiden impregniert  
sein kann (mit unterschiedlichem Gehalt an Fe-Oxiden);  
Zelle und Kapsel: 1-3 x 1.5-5µm; ein Ende der Kapsel bleibt  
offen ('für's Flagellum'); auch: Ochrobium mit  
geschlossenen Kapseln: dann unbeweglich; Aggregate zu 2,4  
oder selten 8 Zellen

#### **Physiologie:**

kann wahrscheinlich anaerob wachsen (nicht in Reinkultur  
vorhanden)

wachsen nicht in Gegenwart von NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/S<sup>2-</sup>

wahrscheinlich nicht chemolithoautotroph (Fe-Impregnation  
eventuell ein Artefakt -> Bildung wenn das Bakterium  
Sauerstoff ausgesetzt wird)

#### **Lebensraum:**

weit verbreitet in Fe-haltigem Frischwasser

Typ Species: *Ochrobium tectum*

(11)

## Genus Gallinonella

### **Morphologie:**

nierenförmig; 0.5-0.7 x 0.8-1.8µm; formt anorganische Stützen ("stalks"); 0.3-0.5 x 400µm; keine Kapsel, keine Endosporen, Gram negativ; beweglich durch einzelnes polares Flagellum; speichert PHB und glycogenähnliches Material

### **Physiologie:**

strikt aerob, microaerophil

Substrate: Fe<sup>2+</sup> (nur!!), nicht Mn, CO<sub>2</sub> als C-Quelle  
chemolithoautotroph

benötigt 150g Fe pro Gramm Trockengewicht

pH: 6.0-7.6

Temp.: 8°-16°C, aber auch bei 47°C

En: +200 bis +320mV

O<sub>2</sub>: 0.1-1.0 mg/l (microaerophil, lebt aber auch unter höheren O<sub>2</sub>-Konzentrationen)

CO<sub>2</sub>: 20 und mehr mg/l

geringer Gehalt an org. Verbindungen (nicht über 12 mg/l)

Fe<sup>2+</sup>: 5-25 mg/l (wichtigster Faktor)

} häufigste allgemeine Lebensbedingungen

### **Lebensraum:**

Vorkommen meist in oligotrophen Fe-haltigen Wässern,  
(Frisch-/See-), auch: Metalimnion eines eutrophen Sees; auch  
marine Lb

Typ Stamm: existiert nicht in Reinkultur (Beschreibung bezieht sich auf Stamm B1)

(5)

## Sphaerotilus natans

### **Morphologie:**

gerade Stäbchen; 1.2-2.5 x 2-10µm; einzeln oder paarig, freie Zellen beweglich mit Bündel subpolarer Flagellen; Scheide gewöhnlich dünn ohne Inkrustierungen von Fe-/Mn-Oxiden

### **Physiologie:**

chemoorganotroph

Atmung, nie fermentativ

kann unter niedrigem pO<sub>2</sub> wachsen (< 0.1 mg/ml)

Substrate: Alkohol, verschiedene org. Säuren und Zucker  
(als C-/Energie-Quelle)

N-Quelle: Ammoniumsalze + NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in Gegenwart von Vit B<sub>12</sub> oder Methionin/Pepton, Casaminsäuren, Mischungen von Aspartat und Glutamat + Vit B<sub>12</sub> oder Methionin  
-> besser

Temp.: r.: 10°-37°C; opt.: 20°-30°C

pH.: opt.: 6.5-7.5

- manchmal inkrustiert mit Fe-Oxiden

- keine Mn-Oxidation

G+C: 70 mol%

### **Lebensraum:**

langsam fließende Frischwasser, stark verunreinigt mit Abwasser (Agrarindustrie)

(9)

## Genus Leptothrix

### **Morphologie:**

gerade Stäbchen; 0.6-1.4 x 1-12µm; als Ketten in Scheiden, oder freischwimmend; einzeln, in Paaren oder kurzen Ketten (bis 8); freie Zellen beweglich durch ein polares Flagellum (eine Spezies: subpolares Büschel von Flagellen); Scheiden sind impregniert/bedeckt mit Fe/Mn- Oxiden ; Gram negativ

### **Physiologie:**

chemoorganotroph

Atmung/nie Gärung

Wachstum und Mn-Oxidation bei niedrigem O<sub>2</sub>-Druck

Substrate: eine Reihe von Zuckern, incl. Glucose , Fructose, Sucrose; organische Säuren, incl. Lactat, Malat, und β-Hydroxybuttersäure Glycerol ( bei den meisten Stämmen als C+Energiequelle); Acet- und Zitronensäure werden nicht oder nur wenig genutzt

der Umfang der Nutzung organischer Substrate ist bei Leptothrix geringer als bei S.natans

Temp.: r.: 10°-35°C; opt.: ca.25°C (gilt für die meisten Stämme)

pH:.opt.: 6.5-7.5

N-Quelle: einige: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

die meisten: keine anorganische N-Quelle; dann:

Mischung von organischen N-Verbindungen wie:

Aspartat + Glutamat, Casaminosäuren, Pepton oder andere komplexen N-Verbindungen

bestimmte Aminosäuren wirken in größerem Umfang inhibitorisch

Wachstumsfaktoren: wenn Methionin, dann auch Vit B<sub>12</sub>

einige Stämme: Biotin + Thiamin;

Adenin + Guanin

Gewöhnlich: Deponierung großer Mengen von Fe/Mn-Oxiden in und auf ihren Scheiden

der Fe-Oxid-Gehalt in der Scheide wächst mit der Fe-Konzentration des Mediums

Achtung: die Ansammlung von Fe-Oxiden in /auf der Scheide ist kein Beweis, das dieser Organismus Fe<sup>2+</sup> zu Fe<sup>3+</sup> oxidiert

-> Wachstum erfolgt bei pH 6-7.5, aerob (auch: nicht-biologische Fe-Oxidation)

aber: klarer Mn-Oxidierer (nichtbiologische Mn-Oxidation erst > pH 9; oxidiert große Mengen Mn<sup>2+</sup>

chemolitho(auto)tropher Charakter noch nicht abgeklärt

(Energienutzung aus Fe<sup>2+</sup>/Mn<sup>2+</sup> - Oxidation sehr zweifelhaft)

G+C:69.5-71 mol%

Typ Spezies: *Leptothrix ochracea*

(10)

### 1. *Leptothrix ochracea*

Nutzung der Fe<sup>2+</sup>-Oxidation als Energiequelle unsicher

Mn<sup>2+</sup>-Oxidation nicht nachgewiesen, aber unter natürlichen Lebensbedingungen wahrscheinlich

keine Reinkulturen

2. "Leptothrix pseudo-ochracea"

stark beweglich, ein dünnes Flagellum  
insg.: dünner

**Lebensraum:**

langsam fließende nicht verschmutzte, Fe/Mn haltige Frischgewässer  
von Gräben und Bächen

3. "Leptothrix discophora"

Zellen klein

starke Mn- und Fe-Oxid Deponierung

4. Leptothrix cholodnii

auf stärkere Unterstützung von org. Substraten angewiesen

5. Leptothrix lopholea

vergleichbar S.natans

kaum auf ansteigende organische Substrate angewiesen  
(Energiegewinn durch Mn-Oxidation?)

Stämme mit unsicherem Status (unter Umständen Synonyme der oben  
erwähnten Stämme):

- a. L.shujae (-> L.discophora)
- b. L.thermalis (-> ev. thermophile Variante von L.discophora)
- c. L.sideropous (-> L.lopholea)
- d. L.echinata (-> L.lopholea)

Unbefriedigend beschriebene Stämme:

- e. L.major 1.4 x 5-10µm (z.T. verzweigt),  
unregelmäßig inkrustiert mit Fe-Oxiden
- f. L.winogradskii 0.9µm ø  
sehr filamentös auf Fe-Ammonium-Citrat Agar
- g. L.pseudivacuolata nicht identisch mit L.discophora

Vielleicht den Cyanobakterien zugehörig:

- h. L.volubilis
  - i. L.epiphytica
- (10)

Metallogenium

**Morphologie:**

coccoid, 0.2-1.5µm ø; gewöhnlich in Haufen, wachsen in sich  
verjüngenden Filamenten 0.2-0.02µm ø x 1-10µm, stark  
inkrustiert mit Mn-Oxiden

**Physiologie:**

oxidiert Mn-haltige Verbindungen  
aerob  
chemoorganotroph oder parasitisch auf "mycelial-fungi"  
Temp.: opt.: 28°C  
pH.: 6.8-7.2

**Lebensraum:**

weit verbreitet im Plankton der Frischwasserseen und im  
Bodenniederschlag; bislang nicht im Meer nachgewiesen

Typ Spezies: M.personatum



Bemerkung: können andere Mikroorganismen infizieren, die dann als "binary cultures" für Jahre Mn oxidieren können

Oxidiert Fe : pH:r.: 3.5-6.8

100mg/l  $Fe^{2+}$  sind toxisch, wenn kein Komplexbildner vorhanden ist;

$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  : 24x schneller als chemische Oxidation

(3)

#### 1. Metallogenium personatum

z.T. auch Ansammlungen von Fe

Lebensraum:

Obere Schichten im Bodenniederschlag , reduzierende Horizonte in Süßwasserseen, die Mn enthalten

#### 2. M.symbioticum

mesophil

oxidiert Mn sehr schnell

(15)

#### Genus Hyphomicrobium

##### **Morphologie:**

0.3-1.2 x 1-3µm; stäbchenförmig, mit spitzen Enden; oder: oval, eiförmig-bohnenförmig; produzieren ein- oder beidseitig filamentartige Auswüchse von variabler Länge und 0.2-0.3µm Durchmesser

##### **Physiologie:**

chemoorganotroph

aerob

CO<sub>2</sub> wird zum Wachstum benötigt

oligocarbophil (kann auf Mineralsalzmedium ohne zusätzliche C-Quelle wachsen); wächst gut mit Cl-Verbindungen

N-Quelle: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, auch organische N-Verbindungen, keine Nitrifizierung

Temp.: mesophil; einige wachsen noch bei 45°C

pH: opt >7 (Ausnahme: eine Spezies mit < pH)

G+C: 59-65 mol%

NaCl: 2.5 %

##### **Lebensraum:**

weit verbreitet in Erde und aquatischen Lebensräumen

(aber: kein Hinweis auf Mn-Oxidation)

(7)

#### obligat acidophiles, heterotrophes Bakterium

Isoliert aus saueren Minengewässern und natürlichen Minen +

Drainagen:

. besitzt die Fähigkeit, eine Reihe von organischen Säuren als alleinige C-Quelle zu nutzen.

. kein chemolithotrophes Wachstum auf anorganischen reduzierten Eisen- und Schwefelkomponenten

**Morphologie:**

stäbchenförmig, einzeln oder in Paaren; gerundete Enden,  
0.5-1.1 x 1.0-4.2µm, abhängig von der C-Quelle; Gram  
negativ; keine Sporen; beweglich

**Physiologie:**

strikt aerob;  
pH: 2.6, nicht bei 6.0  
alle: Wachstum auf Citronensäure  
folgende Substrate können nicht genutzt werden (als  
alleinige E-Quelle): Fe-Ionen, S', Thiosulfat

(13)

**Leptospirillum ferrooxidans**

**Morphologie:**

Morphologisch variable, helical gekrümmte Stäbchen  
beweglich durch einzelnes polares Flagellum

**Physiologie:**

acidophil, wächst autotroph auf Fe-Ionen und  
Mineralsulfiden (Stamm BU-1. DSM2391)  
Temp.: 25°C, auch: 30°-35°C, nicht 37°C  
während des Wachstums auf Fe-Ionen weniger sensitiv  
gegenüber Uran, Molybdat + Stilben (als Th.ferrooxidans)  
relativ empfindlich gegenüber plötzlicher Kupfer

**Exponierung**

aber: (relativ) hohe Toleranz gegenüber Kupfer beim  
Wachstum auf Mineralen (20 g Cu/l)  
keine S-Oxidation während des Wachstums auf Mineralsulfiden  
(Unterschied zu Th.ferrooxidans)  
G+C: 51.7mol%

(6)

**Thermoacidophile Eisen-oxidierende Bakterien**

(ALV IBC14)

CO<sub>2</sub> als alleinige C-Quelle, wenn Eisensulfat als Elektronen-  
Donator zur Verfügung steht (autotroph)

nicht als Energiequelle, sondern zur S-Assimilation benötig:  
reduzierte S-Verbindungen (Thiosulfat, Tetrathionat)

kein Wachstum auf org. Substraten ohne FeSO<sub>4</sub>-Zugabe

aber: mixotrophes Wachstum

(14)

**Bakterium, nahe verwandt Sulfobacillus thermosulfidooxidans,**

**Stamm ALV(s.o.):**

autotrophes Wachstum auf Fe ist möglich, wenn CO<sub>2</sub> Drücke  
herrschen, die größer sind, als der atmosphärische CO<sub>2</sub> Druck  
auch: langsames heterotrophes Wachstum

aber: Wachstum auf Fe + organischen Substraten (mixotrophes  
Wachstum), ist wesentlich schneller, wobei die Fe-Oxidation den  
hauptsächlichen Energiegewinn darstellt (im Vergleich zu den  
Zuckern)

(14)

Unbenanntes Fe-Oxidierendes Bakterium

**Morphologie:**

in verdichtetem Medium: kurze Stäbchen; 0.5 x 1-2.0µm  
in frischem flüssigen Medium: als Filament

**Physiologie:**

obligat chemoautotroph (Fix. von CO<sub>2</sub>)  
Fe<sup>2+</sup>-Oxidation: r.: 50-500µg Fe<sup>2+</sup>-Ionen/ml  
opt.: 200µg/ml  
oxidiert nicht: Thiosulfat, Sulfid, Mangan-Ionen  
Wachstum wird nicht durch org.Verbindungen stimuliert  
pH: r.: 2.0-4.5; opt.: 2.5  
der pH ändert sich während des Wachstums nicht

(4)

Eisenoxidierendes Bakterium

(vermutlich Th.ferrooxidans)

**Morphologie:**

"ähnlich anderen autotrophen Fe-oxidierenden Pseudomonaden"

**Physiologie:**

wächst auf anorganischen Medien  
autotroph  
Substrate: Fe<sup>2+</sup> -> Fe<sup>3+</sup>  
S -> SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>  
auch auf Thiosulfat (weniger gut)  
pH.: 2.0-3.0  
aerob: Q O<sub>2</sub>(n) 2400-4200

(2)

unbenanntes Bakterium

**Morphologie:**

stäbchenförmig

**Physiologie:**

autotroph nur bei ansteigendem CO<sub>2</sub>-Gehalt  
bestes Wachstum mixotroph mit Fe-Ionen oder Pyrit und  
Hefeextrakt oder einfachen organischen Zusätzen  
benötigt unter Umständen geringe Mengen red. S-Verbindungen  
variable Fähigkeit, S<sup>-</sup> zum Wachstum zu benutzen  
Temp.: opt.: 45°-50°C; Wachstum auch bei 30°C  
G+C:48mol%

Pseudomonas manganoxidans

oxidiert Mn, wobei die Mn<sup>2+</sup>-Konzentration zwischen 5-10mg/l liegt;  
darüber: deutliche Hemmung der Mn-Oxidation

(8)

Thermophiler Thiobacillus

**Physiologie:**

acidophil, wächst in  $\text{Fe}^{2+}$ -/und Thiosulfatmedien  
oxidiert: Schwefel, red.S-Verbindungen, und  $\text{Fe}^{2+}$   
-Ionen [bei 30°-50°C mit 0.02% Hefeextrakt] über eine Reihe  
von pH-Einheiten  
Temp: 58°-86°C  
pH: 4.1-8.9  
Wachstum auf Pyrit: 40°-55° ; nicht 30°/60°C  
pH: 1.1-2.6

(3)

## 2.5 Eisen- und Mangan-reduzierende Bakterien

Bakterien, die Eisen-Reduktion assimilatorisch betreiben  
(soweit nicht an anderer Stelle erwähnt)

### Bacteroides hypermegas

**Morphologie:**

2:0-3.0 x 5.0-11.0µm; gerundete Enden

**Physiologie:**

fermentativ (Wachstum wird stimuliert durch  
Kohlenhydrate)

Temp.: r.: 25°-45°C; opt.: 37°C

pH: r.: 4.8-8.6

NaCl: > 1.5% wirken inhibitorisch

**Lebensraum:**

Intestinaltrakt von z.B. Mensch und Hund

(3,10)

### Clostridium sticklandii

**Morphologie:**

gerade dünne Stäbchen; Gram positiv; beweglich

0.3-0.5 x 1.3-3.8µm; einzeln, in Paaren oder kurzen Ketten

Sporen

**Physiologie:**

Gärer

anaerob

pH (auf PYG): 6.0 (nach 6 Tagen)

Temp.:r.: 25°-45°C; opt.: 30°-37°C

(3)

### Bacillus

ausführlichere Beschreibung s.o.

#### Bacillus megaterium:

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + Glucose als N/C-Quelle

wächst bei 7% NaCl

(9,17)

#### Bacillus circulans

z.T. Celluloseverwerter

wächst bei 7%NaCl

(17)

#### Bacillus subtilis

wächst anaerob mit Nitrat in komplexen Medien (beschränktes  
Wachstum)

pH: 5.5-8.5

wächst bei 7% NaCl

(9)

Bacillus alvei

anaerobes Wachstum auf komplexen Medien  
wächst bei 5%NaCl  
(17)

Bacillus sphaericus

wächst bei 7%NaCl  
Lebensraum: Erde, See- und Frischwasser, Milch, Nahrungsmittel  
(17)

Bacillus pumilus

benötigt Biotin  
einige Stämme benötigen Aminosäuren  
wächst bei 7% NaCl  
(17)

Bacillus polymyxa

N<sub>2</sub>-Fixierung unter anaeroben Bedingungen  
(17)

Bacillus thuringiensis

wächst bei 7% NaCl  
(17)  
(4)

Mycobacterium smegmatis

**Morphologie:**

Stäbchen, 3-5µm lang, gelegentlich gekrümmt, mit geteilten  
Y-förmigen Zellen; Gram positiv (gewöhnlich); unbeweglich

**Physiologie:**

aerob (häufig parasitisch)

Temp.: 25°-45°C

bei 28°C:

Nitrat-Reduktion

Eisenaufnahme

NaCl-Toleranz

Citrat als Substrat

Mannitol (-Verwertung)

(5,9,20)

Agrobacterium tumefaciens

-> Tumor induzierend bei Pflanzen

**Morphologie:**

Stäbchen ; 0.6-1.0 x 1.5-3.0µm; einzeln oder in Paaren

Gram negativ; beweglich durch 1-6 peritriche Flagellen

**Physiologie:**

aerob

Atmung (O<sub>2</sub> als Elektronenakzeptor)

(manche Stämme : anaerob in Gegenwart von NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

chemoorganotroph

z.T. Denitrifikation

Temp.: 25°-28°C

**Lebensraum:**

Pflanzen

(9,13)

Alteromonas putrefaciens

(unsichere Spezies)

**Morphologie:**

gerade/gekrümmte Stäbchen; 0.7-1.5 x 1.8-3.0µm;  
Gram negativ; beweglich durch ein polares Flagellum

**Physiologie:**

chemoorganotroph  
Atmung  
keine Denitrifikation  
benötigt Seewasser (Na<sup>+</sup> > 100mM)  
benötigt organische Wachstumsfaktoren  
Temp.: 20°C

**Lebensraum:**

Fischabfälle (?), klinische Proben

(2)

Aquaspirillum itersonii

**Morphologie:**

generell helikal; 0.2-1.4µm ø; (1.0-2.2 x 2.0-10.0µm)  
beweglich durch polare Flagellen (bipolare Büschel)

**Physiologie:**

aerob (microaerophil)  
Atmung (O<sub>2</sub>, einige wenige: mit NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, dann anaerob)  
chemoorganotroph (einer lithotroph mit H<sub>2</sub>)  
Substrat: u.a. wenige Zucker  
Temp.: r.: 12°-42°C; opt.: 32°-35°C  
pH: 5.5-9.0  
N-Quelle: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> als alleinige N-Quelle  
NO<sub>3</sub><sup>-</sup> unterstützt das Wachstum nicht oder nur sehr wenig

**Lebensraum:**

stehende Frischwasser (Teiche), Frischwassermuscheln

(5,15)

Enterobacter

**Morphologie:**

bewegliche Stäbchen (peritrich begeißelt); einige:  
eingekapselt; Gram negativ

**Physiologie:**

Gärung, Atmung  
fakultativ anaerob  
chemoorganotroph  
Nitrat -> Nitrit  
Temp.: opt.: 37°C

1. Enterobacter cloacae

Gas Produktion bei der Vergärung der meisten Kohlenhydrate bei  
37°C

**Lebensraum:** Feces von Mensch und Tier, Urin, Boden und Wasser

## 2. Enterobacter aerogenes

auch Gasproduktion bei 44.5°C /variiert

**Lebensraum:** Feces von Mensch+Tier, Schlamm, Wasser, Abfallprodukten

(17)

(18)

## Micrococcus

### **Morphologie:**

sphärisch, 0.5-2.0µm ø ; als Paare, Tetraden oder irreguläre Anhäufungen; Gram positiv; gewöhnlich unbeweglich

### **Physiologie:**

chemoorganotroph

Atmung

aerob (eine Spezies eventuell fakultativ anaerob)

≤5%NaCl

Temp.:opt.: 25°-37°C

### **Lebensraum:**

1. Menschliche Haut
2. Fleisch- + Abfallprodukte  
Boden + Wasser

## Micrococcus roseus

1.0-1.5µm ø, in Paaren/Tetraden

Temp.: 25°-35°C

beschränkt auf Boden und Wasser

Nitrat -> Nitrit

wächst bei 7.5% NaCl (nicht bei 10%)

(17,19)

## Serratia marcescens

### **Morphologie:**

gerade Stäbchen; 0.5-0.8 x 0.9-2.0µm; gerundete Enden  
beweglich

### **Physiologie:**

chemoorganotroph

Atmung + Gärung

Temp.: 10°-36°C

pH: 5-9

NaCl:0-4%, opt.:0.5%

benötigt keine Wachstumsfaktoren

Nitratreduktase: +

Substrate: auch: Benzoate, 3-Hydroxybenzoate,  
4-Hydroxybenzoate

Dl-Carnitin als alleinige C-Quellen

### **Lebensraum:**

Wasser, Pflanzenoberfläche; oder als humanpathogenes Bakterium  
(8,17)



Dissimilatorisches Fe<sup>III</sup>- und Mn<sup>IV</sup> reduzierendes Bakterium

Pseudomonas sp.GS-15

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.5 x 2-4µm; Gram negativ; nicht beweglich  
keine Sporen

**Physiologie:**

Temp.: 30°-35°C, nicht unter 10°C oder bei 50°C

pH: opt.:7, Wachstum nicht bei 5/6/8/9

wächst in einem definierten Medium:

anaerob

Acetat als alleiniger Elektronen Donator

Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>4+</sup> oder NO<sub>3</sub><sup>-</sup> als alleinige Elektronen Akzeptoren

GS-15 reduziert natürliches amorphes Fe<sup>3+</sup>, nicht aber hoch  
kristallines Fe<sup>3+</sup>

amorphes Fe<sup>3+</sup> -> Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

Fe<sup>III</sup>citrat -> Fe<sup>2+</sup>

pH: opt.:6.7-7.0

Temp.: r.:30°-35°C

Substrat: EtOH, Butyrat, Propionat;

eine Vielzahl anderer organischer Verbindungen + H<sub>2</sub> nicht!

MnO<sub>2</sub> -> Mn<sup>2+</sup> (vollständig)

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> -> reduziert zu Ammonium

O<sub>2</sub> kein Elektronenakzeptor und wirkt hemmend

(16)

Fe<sup>3+</sup>-Reduktion durch nicht genauer benannte chemoorganotrophe

Bakterien:

**Morphologie:**

Stäbchen, 0.8-1.0 x 1.5-2.0µm; einzelnes Flagellum

Gram negativ

**Physiologie:**

fak. anaerob

aktive Reduktion von Fe<sup>3+</sup>

fermentativ (in Hugh-Leiform Medium)

Temp.: opt.: 30°C,

Rate der Fe<sup>3+</sup> - Reduktion ist

abhängig von der Fe<sup>3+</sup> Konzentration

-> gehört anscheinend zum Genus Vibrio

(11)

Fe<sup>3+</sup>-Reduktion durch Misch- und Reinkultur eines chemolithotrophen

Bakteriums:

**Morphologie:**

coccoider Bacillus; 0.9-1.2µm lang; Gram negativ

**Physiologie:**

fak. anaerob

fak. autotroph

chemolithotroph

H<sub>2</sub> als Elektronen-Donator

CO<sub>2</sub> als C-Quelle

Fe<sup>3+</sup> als Elektronen-Akzeptor

Wachstum steigert sich bei Anwesenheit von Hefeextrakt  
(aber sehr gering);

höherer ATP-Gewinn in Gegenwart von Fe<sup>3+</sup>

(11)

## Bacillus 29

### **Morphologie:**

marines Stäbchen; beweglich; Gram positiv; Sporenbildung

### **Physiologie:**

Isoliert bei 25°C

reduziert  $Mn^{4+}$  →  $Mn^{2+}$

kann Fe aus den Mineralien Limonit ( $FeO(OH)_x \cdot nH_2O$ ), Geolith ( $FeO(OH)$ ) und in beschränktem Umfang auch Hemalit ( $Fe_2O_3$ )

sowohl aerob als auch anaerob (bei Anwesenheit von Phenosafranin) herauslösen, wenn es in Gegenwart von Glucose wächst.

Produziert aus Glucose Säure (nicht aber aus Lactose)

nicht: Hydrolyse von Stärke

Nitratreduktion

Indolproduktion

Wachstum in Nutrient Broth bei 10% NaCl

(6)

## Wasserstoffbakterium, das $H_2$ als Elektronen Donator und $Fe^{3+}$ als Akzeptor benutzt

-> gehört zu den Pseudomonaden

-> reduziert ebenfalls Nitrat zu Nitrit

reduziertes Fe und Nitrit inhibieren das Wachstum :

kann mit  $O_2$  als Elektronenakzeptor wachsen (bis  $cO_2 > 1\%$ )

Hierarchie:  $O_2$  /  $NO_3^-$  /  $Fe^{3+}$

Wachstumsfaktoren: geringe Mengen Hefeextrakt (aerob/anaerob)

Substrate: ETOH, Sorbitol, Dulcitol, verschiedene organische Säuren, Zucker, Glucose, Maltose, Sucrose, Arabinose, Rhamnose, Lactose

(1)

## 2.6 Methanogene Bakterien

### Ordnung Methanobacteriales

- i. Familie Methanobacteriaceae
- ii. Familie Methanothermaceae

#### Allgemeine Beschreibung:

##### Morphologie:

kurze, speerförmige Kokken, bis lange filamentöse Stäbchen, nicht beweglich; Zellwand: Gram positiv, eventuell auch Gram-variabel; Pseudomurein als vorherrschendes Peptidoglycan-Polymer; Cytoplasmamembran: polyisoprenoide Kohlenwasserstoffe an Glycerol über Etherbrücken gebunden

##### Physiologie:

strikt anaerob; chemolithoautotroph  
e<sup>-</sup>-Akzeptoren: CO<sub>2</sub>, auch: S<sup>0</sup> -> H<sub>2</sub>S, dann aber kein Wachstum

Substrate: H<sub>2</sub>, auch Formiat, CO  
nicht: Kohlenhydrate, proteinhaltige Verbindungen, sonstige org. Verbindungen

Coenzym M, F<sub>420</sub>, F<sub>430</sub>, Methanopterin  
G+C: 27-61 mol%

##### Lebensraum:

weit verbreitet  
anaerobe Gebiete wie aquatische Sedimente, Boden, Abwasserfäkalien, Gastrointestinaltrakt von Tieren, Ökosysteme mit angereichertem H<sub>2</sub> (geothermisch produziert)

(5)

### Familie Methanobacteriaceae

Wenig oder kein Wachstum bei Temp. ≥ 70°C  
(Vergleiche: Methanothermaceae: kein Wachstum unterhalb 60°C;  
Temp.: opt.: > 70°C)  
sonst Beschreibung wie Ordnung Methanobacteriales  
(5)

#### Genus 1: Methanobacterium

##### Morphologie:

∅ 0.5-1.0µm, gekrümmte bis gerade Stäbchen, lang bis filamentös; variierende Gram-Färbung, hauptsächlich Gram -positiv; unbeweglich; keine Endosporen

##### Physiologie:

sehr strikt anaerob  
z.T. autotroph  
e<sup>-</sup>-Akzeptoren: CO<sub>2</sub> -> CH<sub>4</sub>  
S<sup>0</sup> -> H<sub>2</sub>S (kein Wachstum)

Substrate: H<sub>2</sub>, Formiat, CO

N-Quelle: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

S-Quelle: z.T.: H<sub>2</sub>S

C-Quelle: CO<sub>2</sub>, Formiat, Acetat nicht essentiell

Temp.: opt.: 37°-45°C bei mesophilen, >55°C bei thermophilen Vertretern

G+C: 32-61 mol%

**Lebensraum:**

anaerober Faulschlamm, Frischwasser-Sedimente, heiße Quellen, sumpfige Böden, Pansen von Rindern und Schafen

(5)

**Methanobacterium formicium**

**Morphologie:**

0.4-0.8 x 2-15µm; schlanke gekrümmte Stäbchen mit stumpfen abgerundeten Enden, oftmals Ketten und Filamente bildend, var. Gram-Färbung, nicht begeißelt, unbeweglich

**Physiologie:**

e<sup>-</sup>-Akzeptor: CO<sub>2</sub>

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat  
z.T. autotroph

Wachstumstimulierend: eventuell Acetat, Cystein

Temp.: opt.: 37°-45°C; r.: 10°-50°C

pH: opt.: 7.7; r.: 6.5-8.5

g(37°C): 15h auf Formiat, 22h auf H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

G+C: 38-42 mol%

**Lebensraum:**

hauptsächlich anaerober Faulschlamm, anaerobe Frischwasser-Sedimente, auch Rinderpansen, als Endosymbiont in anaeroben Protozoen (Ciliat *Metapus striatus* McMurrich)

(5,7)

**Methanobacterium thermoautotrophicum**

**Morphologie:**

0.35-0.6 x 3-7µm; schlanke, zylindrische, unregelmäßig gekrümmte Stäbchen, häufig Filamente (10-120µm) bildend; Gram-positiv; nicht beweglich; keine Endosporen

**Physiologie:**

opt. Wachstum : chemolithoautotroph

e<sup>-</sup>-Akzeptor: CO<sub>2</sub>

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, nicht Formiat

N-Quelle: NH<sub>3</sub>; S-Quelle: SH<sup>-</sup>

Wachstumstimulierend: Cystein, nicht Acetat (trotz Assimilation)

Temp.: opt.: 65°-70°C, thermophil; r.: ca. 40°-75°C

pH: opt.: 7.2-7.6; r.: 6.0-8.8

g(opt.): 5h

G+C: 50-52 mol%

**Lebensraum:**

wärmer bis heißer anaerober Faulschlamm

(5,45)

Methanobacterium wolfei

**Morphologie:**

0.4 x 2.4-2.7µm; Stäbchen mit abgerundeten Enden, einzeln, paarweise oder in Ketten; Gram positiv; nicht beweglich

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

Wachstumsbedingungen: Mineralmedium, Bedarf an Wolfram  
(nicht durch Nickel ersetzbar),

Hefeextrakt stimuliert Wachstum

C<sub>NaCl</sub>(opt.): 10g NaCl/l (C<sub>max</sub>≤2%)

Temp.: r.: 37°-76°C; opt.: 55°-65°C

pH.: r.: 6.0-8.2; opt.: 7.0-7.5

t<sub>d</sub>(Temp.opt.): ca. 4h

G+C: 61 mol%

**Lebensraum:**

anaerober Faulschlamm und anaerobe Frischwasser-Sedimente  
(5,41)

Methanobacterium ivanovii

**Morphologie:**

Stäbchen, einzeln oder 2-3 Zellen zusammen; 0.5-0.8 x 1.2µm  
keine langen Filamente; Gram-positiv; nicht beweglich

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>; Acetat wird assimiliert

Temp.: opt.: 45°C; geringes Wachstum auch bei 37°C

pH: r.: 6.5-8.2; opt.: 7.0-7.4

N-Quelle: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Glutamin

S-Quelle: HS<sup>-</sup>, S<sup>0</sup>, Cystein, Methionin

G+C: 36.6 mol%

**Lebensraum:**

ca. 1650 m Tiefe, aus ölhaltigen Gebirgssedimenten in UdSSR  
(14)

Methanobacterium uliginosum

**Morphologie:**

0.2-0.6 x 1.9-3.8µm; Stäbchen (eventuell mit kugelförmigen  
Zellanhängseln); eventuell Kapselbildung; nicht beweglich  
Gram-positiv

**Physiologie:**

Substrat: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

N-Quelle: ev. NH<sub>3</sub>; S-Quelle: ev. SH<sup>-</sup>

Temp.: r.: 15°-45°C; opt.: 37°-40°C mit t<sub>d</sub>: 11h

pH: r.: 6.0-8.5; opt.: ?

G+C: 29-34 mol%

**Lebensraum:**

sumpfige Böden  
(5,17)

### Methanobacterium alcaliphilum

#### Morphologie:

0.5-0.6 x 2-25µm; lange Stäbchen, einzeln oder paarweise, seltener in kurzen Ketten und Filamenten; Gram negativ nicht beweglich

#### Physiologie:

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Acetat wird assimiliert

Wachstumsbedingungen: Vitamine aus Pepton oder Hefextrakt

Temp.: opt. 37°C

pH: opt.: 8.1-9.1 (ein Stamm auch pH:r.: bis 9.9)

G+C: 57 mol%

#### Lebensraum:

Sedimente in alkalischen Seen

(5,42)

### Methanobacterium thermoformicum

#### Morphologie:

0.3-0.6 x 2-7µm; schlanke, gekrümmte Stäbchen, häufig Filamente (10-120µm lang); Gram-positiv, nicht beweglich

#### Physiologie:

chemolithoautotroph

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat

schnelles Wachstum auf Mineralmedium, nur mit CO<sub>2</sub> als C-Quelle

org. Verbindungen stimulieren nicht das Wachstum, Acetat wird aber assimiliert

N-Quelle: NH<sub>3</sub>;

S-Quelle: HS<sup>-</sup>

Temp.: r.: 40°-65°C; opt.: 50°-60°C ;(anderer Stamm mit: r.: 23°-45°C; opt.: 36°C)

pH:r.: 6.0-8.7; opt.: 7.0-7.8

G+C: 43 mol%

#### Lebensraum:

mesophiler oder thermophiler Abwasserschamm

(5,52)

### Methanobacterium bryantii

#### Morphologie:

ø 0.5-1.0µm; schlanke Stäbchen mit stumpfen, abgerundeten Enden; oftmals Ketten und unregelmäßig gekrümmte Filamente bildend (10-15µm lang); Gram-Färbung verschieden; nicht beweglich

#### Physiologie:

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

N-Quelle: NH<sub>3</sub>

Wachstumstimulierend: (sehr) Acetat, Cystein, B-Vitamine

Temp.: opt.: 37°-39°C

pH:opt.: 6.9-7.2

G+C: 33-38 mol%

#### Lebensraum:

anaerober Faulschlamm und Sedimente

(5)

Methanobacterium thermoaggregans

**Morphologie:**

regelmäßige Stäbchen, meist in Filamenten oder Aggregaten  
einzelne Zellen: 4-8 x 0.4µm; Gram negativ; nicht beweglich

**Physiologie:**

obligat anaerob  
Substrate: nur H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>  
Wachstum wird durch Hefeextrakt stimuliert  
benötigt kein NaCl, c<sub>NaCl</sub> max <2%)  
Temp.: r.: 40°-75°C; opt.: 65°C  
pH: r.: 6.5-9.0; opt.: 7.0-7.5  
G+C: 42 mol%

**Lebensraum:**

Schamm von Viehfutter, Weidegras

(3,5)

Methanobacterium thermalcaliphilum

**Morphologie:**

0.3 x 3-4µm; schlanke Stäbchen, oft Ketten oder Filamente  
bildend; Gram-negativ; nicht beweglich

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>  
N-Quelle: NH<sub>3</sub>  
Wachstum wird durch Hefeextrakt und Nickel stimuliert  
Temp.: r.:40°-69°C; opt.: ca. 60°C  
pH:r.: 6.5-10.0; opt.: 7.5-8.5  
c<sub>NaCl</sub>: max: <2.0%; opt.: 0.06%  
G+C:39 mol%

**Lebensraum:**

methanogener Faulschlamm, Biogas-Fermenter, Vieh-Dung

(2,5)

Methanobacterium palustre

**Morphologie:**

stäbchenförmig; 0.5 x 2.5-5µm; gelegentlich Bildung von  
Filamenten bis 65µm Länge; Gram-positiv; nicht beweglich

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat, 2-Propanol+CO<sub>2</sub>, 2-Butanol+CO<sub>2</sub>;  
für Wachstum und/oder CH<sub>4</sub>-Produktion  
Temp.: r.: ca. 20°-45°C;opt.: 37°C  
pH: opt.: ca.7  
kein Salzbedarf, Toleranz bis 1.8% NaCl  
G+C: 34 mol%

**Lebensraum:**

Moorboden

(47)

Fam. Methanobacteriaceae

Genus 2: Methanobrevibacter

**Morphologie:**

0.5-0.7 x 0.8-1.4µm; kurze Stäbchen, normalerweise paarweise oder in Ketten; Gram-positiv; nicht beweglich, keine Sporenbildung

**Physiologie:**

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptor: CO<sub>2</sub> -> CH<sub>4</sub>

Substrate: H<sub>2</sub>, z.T. Formiat

nicht: Acetat, MeOH, Methylamine, andere org. Verbindungen

N-Quelle: hauptsächlich NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

C-Quelle: z.T. hauptsächlich Acetat

Wachstumsbedingungen: 1- mehrere Vitamine

Temp.: r.: ca. 30°-45°C: opt.: 37°-39°C

**Lebensraum:**

Gastrointestinaltrakt von Wiederkäuern, Menschen u.a. Tieren, städt. Abwasserschlämme, verfaulendes holziges Gewebe

(5)

Methanobrevibacter ruminantium

**Morphologie:**

0.7 x 0.8-1.7µm; kurze ovale Stäbchen oder "Kokkobacillus" mit konischen Enden, paarweise (junge Kulturen) oder in Ketten (ältere Kulturen); Gram-positiv; nicht beweglich

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, langsames Wachstum mit Formiat

C-Quelle: zu 60% aus Acetat

N-Quelle: hauptsächlich NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, auch AS

Wachstumsbedingungen: 1- mehrere B-Vitamine;

2-Mercaptoethansulfonsäure

2-Methylbuttersäure, verschiedene AS

keine 2-Bromethansulfonsäure

pH: r.: 6-8

Temp.: r.: 33°-45°C

G+C: 30.6 mol%

**Lebensraum:**

Panseninhalt, Gras- und/oder Alfalfa-gefütterte junge Ochsen

(5,31)



Methanobrevibacter smithii

**Morphologie:**

0.6-0.7 x 1.0µm; kurze ovale Stäbchen, oder Kokken  
paarweise oder Ketten von 4-6 Zellen; Gram positiv; nicht  
beweglich.

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, geringes Wachstum mit Formiat,  
(ev.CO<sub>2</sub>?,bewirkt aber kein Wachstum)

C-Quelle: hauptsächlich Acetat

N-Quelle: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

S-Quelle: ev. H<sub>2</sub>S

Wachstumsbedingungen: 1 oder mehrere B-Vitamine (ev. nur  
Wachstumstimulierend), Nickel,  
andere Spurenmetalle nicht getestet

G+C: 31 mol%

**Lebensraum:**

anaerober Abwasserschamm, menschliche Fäkalien

(5)

Methanobrevibacter arboriphilicus (Hauptstamm "DH1")

(=Methanobacterium arboriphilium)

**Morphologie:**

0.5 x 1.2-1.4µm; kurze Stäbchen mit abgerundeten, ev.  
"abgeschnittenen" Enden, einzeln oder paarweise, auch in  
Ketten (in flüssigen Medien); auf Agar bis zu 12x länger  
Gram-positiv; nicht beweglich, keine Geißeln

**Physiologie:**

chemolithoautotroph

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, nicht Formiat

C-Quelle: ev. alleinige: CO<sub>2</sub>

N-Quelle: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

pH: r.: 6.4-8.6; opt.: 7.5-8.0

Temp.:r.:10°-45°C; opt.:30°-37°C

CO-Oxidation mit Benzylviologen, nicht aber e<sup>-</sup>-Donator  
für CO<sub>2</sub>

Wachstumsbedingungen: 1 bis mehrere B-Vitamine

Wachstumstimulierend: Trypticase, Hefeextrakt,  
Pansenflüssigkeit

G+C: 27.5-31.6 mol%

**Lebensraum:**

Dh1 :vermodernde amerik.Pappel

Az u.a. Stämme: anaerober Abwasserschamm

**Besonderheiten:**

Stamm "Az":

einzelne polare Geißel;

Substrate: Formiat; H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> nur in Gegenwart von Na<sup>+</sup>

(5,44)

Familie Methanothermaceae

Genus Methanothermus

**Morphologie:**

0.3-0.4 x 1-3µm; gerade bis leicht gekrümmte Stäbchen, einzeln oder in Ketten, bei 97°C: Zellen mit ø 2µm auftauchend; Gram positiv; Begeißelung: 2 Büschel aus polaren Flagellen

**Physiologie:**

strikt anaerob, chemolithotroph

e<sup>-</sup>-Akzeptoren: CO<sub>2</sub> -> CH<sub>4</sub>

S<sup>0</sup> -> H<sub>2</sub>S (wird in großem Umfang gebildet, wenn S<sup>0</sup>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> zugegen)

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

nicht: Formiat, Acetat, Methanol, Methylamine

Temp.: r.: (55-60)°-97°C; opt.: 80°-85°C

G+C: 33 mol%

**Lebensraum:**

anaerobe heiße Gebiete von Solfatara-Feldern

(5)

Methanothermus fervidus

**Morphologie:**

einzeln oder paarweise, nicht in langen Filamenten; nicht beweglich; Gram-positiv

**Physiologie:**

pH: opt.: 6.5 (bei 83°C)

Wachstumsbedingung: Hefeextrakt bei künstlichem Medium

**Lebensraum:**

heiße Quellen in Island

(5,36)

Methanothermus sociabilis

**Morphologie:**

0.3-0.4 x 3-5µm; mit Pili-ähnlichen Fortsätzen (12nm ø x 7µm), die lateral und terminal herausragen; Gram-positiv, nicht beweglich; wachsen in großen Haufen

**Physiologie:**

Temp.: opt.: 88°C

pH: opt.: 6.5 (88°C)

G+C: 33 mol%

**Lebensraum:**

isländisches solfatarisches Wasserloch

(5,19)

Ordnung: Methanococcales; Familie Methanococcaceae

Genus Methanococcus

**Morphologie:**

ø 1.0-2.0µm, unregelmäßige Kokkenus; keine Gram-Färbung möglich; beweglich, polares Flagellenbüschel

**Physiologie:**

obligat anaerob

obligat methanogen

e<sup>-</sup>-Akzeptor: CO<sub>2</sub> -> CH<sub>4</sub>

Substrate: H<sub>2</sub>, meist auch Formiat

nicht: Acetat, Methanol, Methylamine

C-Quelle: überwiegend CO<sub>2</sub> (außer einer Spezies)

N-Quelle: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub>, Alanin

S-Quelle: HS<sup>-</sup>; viele auch S<sup>0</sup>->HS<sup>-</sup>

Temp.: mesophil (opt.:35°-40°C), thermophil (ca.65°C), extrem thermophil (opt.85°C)

pH: opt.:6-8

Wachstumsbedingungen: NaCl-Bedarf: c<sub>opt</sub>(NaCl):0.5-4%  
HS<sup>-</sup> als Reduktionsmittel

Wachstumstimulierung durch Aminosäuren, Acetat, Mg<sup>2+</sup>, Selen, Wolfram, u.a. Spurenelemente, Hefeextrakt

G+C: 29-34 mol%

**Lebensraum:**

Sedimente aus salzigem Sumpf, Flußmündung oder Meer

(5)

Methanococcus vanniellii

**Morphologie:**

ø 1.0µm, unregelmäßiger Kokkus

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat

Wachstumsstimulierend: Selen, Wolfram, Nickel

N-Quelle: NH<sub>3</sub>

C-Quelle: CO<sub>2</sub>

S-Quelle: HS<sup>-</sup>, S<sup>0</sup>

Temp.: r.: 20°-40°C; opt.: 35°-40°C

pH: r.: 7-9; opt.:ca.8

G+C: 33 mol%

**Lebensraum:**

Küste vom San Francisco Bay

(5,35)

Methanococcus voltae

**Morphologie:**

ø 1.5µm, unregelmäßige Kokken

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat

Wachstumsbedarf: Acetat, Isoleucin, Leucin, Ca<sup>2+</sup> (1mM)

Wachstumstimulierend: Selen, Pantoyllacton, Pantothenat,  
Cobalt, Eisen, Nickel, Cobalt (z.T.  
Wachstumsbedingung)

C-Quelle: heterotroph

N-Quelle: NH<sub>3</sub>

S-Quelle: HS<sup>-</sup>, S<sup>0</sup>

Temp.: r.: 20°-45°C; opt.: 35°-45°C

pH: r.: 6.5-8; opt.: 6.0-7.0

cnaci:opt.: 0.4M

g(komplexes Medium, Temp.: 38°C): 1.2h

G+C: 30 mol%

**Lebensraum:**

Sedimente aus Flußmündung von Waccasassa, Florida

(5,38)

Methanococcus maripaludis (=M.paludismaritimae)

**Morphologie:**

ø 1.0µm, unregelmäßige Kokken; schwach beweglich

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat

Wachstumstimulierung: Selen

C-Quelle: autotroph

N-Quelle: NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, Alanin

S-Quelle: HS<sup>-</sup>, S<sup>0</sup>

Temp.: r.: 20°-45°C, opt.: 35°-40°C

pH: r.: 6.5-8; opt.: 6.8-7.2

G+C: 33 mol%

cmg<sub>2+</sub> opt.: 15mM

**Lebensraum:**

Salz-Sumpf

(5,15)

"Methanococcus deltae"

in etwa wie M.maripaludis

aber: unbeweglich

G+C: 40 mol%

Temp. r.: 30°-45°C; opt.: 37°C

cnaci-Bedarf: 3%;opt.: 3.5-4%

(5)

Methanococcus thermolithotrophicus

**Morphologie:**

ø 1.0-1.5µm, unregelmäßige Kokken, einzeln oder paarweise,  
mit Flagellenbüschel

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat  
C-Quelle: autotroph  
N-Quelle: NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>,  
S-Quelle: Sulfid, S<sup>0</sup>, Thiosulfat, Sulfit, Sulfat  
Temp.: r.: 30°-70°C; opt.: 65°C  
pH: r. 6.5-8; opt.: 6.5-7.5  
c<sub>NaCl</sub>: r.: 1.3-8.3%; opt.: 4%  
g(65°C): 55 min  
G+C: 31-34 mol%

**Lebensraum:**

geothermal erhitzte Sedimente  
(5,12,34)

Methanococcus jannaschii

**Morphologie:**

ø 1.5µm, unregelmäßige Kokken, einzeln, paarweise,  
beweglich, 2 Geißelbüschel an einem Pol inseriert

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, nicht: Formiat  
Wachstumsbedarf: HS<sup>-</sup>  
Wachstumstimulierend: Selen  
C-Quelle: autotroph  
N-Quelle: NH<sub>3</sub>  
S-Quelle Sulfid, S<sup>0</sup>  
Temp.: r.: 50°-86°C; opt.: 85°C mit g=26 min  
pH: r.: 5-7; opt.: 6.0  
c<sub>NaCl</sub>: opt.: 0.5M (Salzbedarf für Wachstum)  
G+C: 31 mol%

**Lebensraum:**

submarines, hydrothermales "Loch" im East Pacific Rise  
(5,16)

Weitere Spezies (deren Zuordnung nicht völlig gesichert ist):

Methanococcus halophilus (-> Methanosarcina)

**Morphologie:**

ø 0.5-2µm, unregelmäßige Kokken, nicht beweglich

**Physiologie:**

strikt anaerob  
Substrate: Methylamine, Methanol; nicht: H<sub>2</sub>, Formiat,  
Acetat  
Temp.: opt.: 26°-36°C  
pH: opt.: 6.5-7.4  
c<sub>NaCl</sub>: opt.: 7-9%

(5)

Methanococcus frisius (-> Methanosarcina frisia)

**Morphologie:**

ø 0.9-1.6µm, regelmäßige Kokken, einzeln, paarweise, nicht beweglich

**Physiologie:**

strikt anaerob

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Methanol, Methylamine;

nicht: Formiat, Acetat

Wachstumstimulierend: Hefeextrakt

Temp.: r.: 22°-42°C; opt.: 36°C

pH: opt.: 6.5-7.2;

NaCl: opt.: 2%

G+C: 38.2±1.0 mol%

**Lebensraum:**

mariner Schlamm einer Sandbank

(1,5)

"Methanococcus aeolicus"

nicht vollständig beschrieben

**Physiologie:**

autotroph

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat; nicht Acetat, Methanol, Methylamine

N-Quelle: NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>

Wachstumsstimulierend: weder Acetat noch Aminosäuren

(5)

Ordnung Methanomicrobiales

Fam.1: Methanomicrobiaceae

Fam.2: Methanosarcinaceae

Fam.3: Methanoplanaceae

Fam.4: Methanocorpusculaceae

**Allgemeine Merkmale:**

keine Muraminsäure

Wachstum: a) H<sub>2</sub>/CHOO<sup>-</sup> mit CO<sub>2</sub> -> CH<sub>4</sub>, Methanol

b) Vergärung von Methylaminen, MeOH, Acetat zu CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>  
einige Stämme oxidieren 1-/2- Propanol, 2-Butanol oder EtOH zu Propionat, Aceton, 2-Butanon oder Acetat und reduzieren CO<sub>2</sub> zu CH<sub>4</sub>

z.T S<sup>0</sup>-Reduktion, jedoch ohne Wachstum

**Lebensraum:**

weit verbreitet, anaerobe Gegenden wie aquatische Sedimente, anaerober Faulschlamm, Gastrointestinaltrakt von Tieren

(5)

Fam.1 Methanomicrobiaceae

**Morphologie:**

Kokken bis gerade oder leicht gekrümmte Stäbchen; Gram  
-negativ

**Physiologie:**

Substrate:  $H_2$  ( $\rightarrow H^+$ ),  $HCOO^-$  ( $\rightarrow H^+ + HCO_3^-$ ), EtOH  
( $\rightarrow$ Acetat), 2-Propanol ( $\rightarrow$ Propionat), 2-Butanol  
( $\rightarrow$  2-Butanon)  
 $e^-$  Akzeptor:  $CO_2 \rightarrow CH_4$

(5)

Genus 1: Methanomicrobium

Genus 2: Methanospirillum

Genus 3: Methanogenium

Genus 1: Methanomicrobium

**Morphologie:**

0.6-0.7 x 1.5-2.5 $\mu$ m, kurze gerade oder leicht gekrümmte  
unregelmäßige Stäbchen mit abgerundeten Enden; je nach  
Substrat auch kokkoide Formen möglich; einzeln oder  
paarweise, nicht in Ketten; keine Kapselbildung, Gram  
-negativ, beweglich (eine polare Geißel) oder unbeweglich

**Physiologie:**

strikt anaerob  
Substrate:  $H_2 + CO_2$ , ev. auch Formiat  
C-Quelle: Acetat  
Temp.: r.: 25°-45°C; opt.: ca. 40°C  
pH: r.: 5.9-7.7; opt.: 6.1-7.0  
G+C: 44.9-48.8 mol%

**Lebensraum:**

Rinderpansen, marine Sedimente, Gebiete mit rel. hoher  $Na^+$ -  
Konzentration

(5)

Methanomicrobium mobile (=Methanobacterium mobilis)

**Morphologie:**

0.7 x 1.5-2.0 $\mu$ m, schwach beweglich, polare Geißel,  
proteinöse Zellwand

**Physiologie:**

Substrate:  $H_2 + CO_2$ , Formiat  
nicht aber: Acetat, Propionat, Butyrat,  
Isobutyrat, Valerat, Isovalerat,  
Caproat, Succinat, Glucose, Pyruvat,  
MetOH  $\rightarrow$  PropOH/Isoprop., ButOH  
Wachstumsbedingungen: Acetat, Isobutyrat, 2-Methylbutyrat,  
Isovalerat, Tryptophan, Pyridoxin,  
Thiamin, Biotin, hitzestab. Faktor  
aus Rinderpansenflüssigkeit und  
Methanobact..thermoautotrophicum  
Wachstumstimulierend: p-Aminobenzoat  
Temp.: r.: 30°-45°C; opt.: 40°C  
pH: r.: 5.9-7.7 ( $HCO_3$  oder Acetat-Puffer); opt.: 6.1-6.9

Wachstumshemmend: Tris-hydrochlorid (0.1M), Phosphat  
(0.1M)

G+C: 48.8 mol%

**Lebensraum:**

Rinderpansen

(5,27)

**Methanomicrobium paynteri**

**Morphologie:**

unregelmäßige Stäbchen, einzeln, keine Filamente, bildend,  
unbeweglich, nicht begeißelt

**Physiologie:**

Substrate: nur H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

nicht: EtOH, MeOH, Methylamine, Formiat, Acetat,  
Pyruvat, Propionat,  
Glutamat, Guucose

Wachstumsbedingung: Acetat

Wachstumstimulierend: Hefeextrakt, Trypticase-Peptide

Wachstumshemmend: weder Tris HCl noch Phosphat

Na<sup>+</sup>-Konzentration: r.: 0-0.8M, opt.: 0.15M

Temp.: r.: 25°-42°C; opt.: 40°C

pH: r.: 6.6-7.3; opt.: 7.0

G+C: 44.9 mol%

**Lebensraum:**

Marine Sedimente aus Mangroven.Sumpf (Grand Cayman,  
Britisch West Indies)

(5,28)

**Methanospirillum hungatei**

**Morphologie:**

0.4-0.5 x 7.4-10µm, symmetrisch gekrümmte Stäbchen, bilden  
normalerweise gewellte Filamente von 15- mehr. Hundert µm;  
Gram-negativ; beweglich durch polares Büschel von  
Flagellen; Scheide

**Physiologie:**

strikt anaerob

autotroph oder heterotroph (St. GP-1 benötigt Acetat)

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat

Wachstumsstimulierend: Aminosäuren, B-Vitamine oder  
Hefeextrakt + Trypticase (für JF-1)

Wachstumshemmend für GP1: Hefeextrakt, Trypton

Temp.: opt.: 30°-37°C

pH: opt.: 6.6-7.4

G+C: 45 (46.5- 49.5 mol%)

**Lebensraum:**

Abwasserschlämme und verfaulender Birnenabfall

M.hungatei ist das dominierende H<sub>2</sub>-oxidierende Bakterium in  
Anreicherungskulturen mit Benzoat und Fettsäuren-oxidierenden  
Bakterien nicht-mariner Gegenden (auch ein salztoleranter Stamm  
isoliert)

(5,9,10)



Genus 3: Methanogenium

**Morphologie:**

ø 1.0-2.6µm, unregelmäßige Kokken, einzeln oder paarweise, Gram-negativ, z.T. begeißelt, bisher keine Beweglichkeit beobachtet

**Physiologie:**

strikt anaerob, chemolithotroph

e<sup>-</sup> Akzeptor: CO<sub>2</sub>->CH<sub>4</sub>

Substrate: H<sub>2</sub>, Formiat (nur *M. olentangyi* nicht)  
nicht Acetat, MetOH

Wachstumsbedingungen: Vitamine, meist NaCl, z.T. nur stimulierend

Temp.: opt.: 20°-60°C, mesophil/thermophil

pH: opt.: 6.2-7.3

G+C: 52-61 mol%

**Lebensraum:**

anaerobe Meer- oder Frischwassersedimente

(5,30)

Methanogenium cariaci

**Morphologie:**

ø bis 2.6µm, peritrich begeißelt, aber anscheinend unbeweglich; keine Kapsel, Pili vorhanden

**Physiologie:**

heterotroph, benötigt Acetat

Wachstumsbedingungen: Hefeextrakt, c<sub>NaCl</sub> opt.: 0.46M,

Wachstum bei 15°C, nicht bei 65°C

Temp.: opt.: 20°-25°C

pH: opt.: 6.8-7.3

G+C: 52 mol%

**Lebensraum:**

Sedimente aus Cariaco Trench

(5,30)

Methanogenium marisnigri

**Morphologie:**

bis ø 1.3µm, peritrich begeißelt, anscheinend unbeweglich, keine Kapsel, keine Pili

**Physiologie:**

Wachstumsbedingungen: Trypticase, kein Acetat, kein Hefeextrakt, c<sub>NaCl</sub> opt.: 0.1M, salzbedürftig (opt.: 0.19M Na<sup>+</sup>)

Wachstum bei 15°C, nicht bei 60°C

Temp.: opt.: 20°-25°C

pH: opt.: 6.2-6.6

G+C: 61 mol%

**Lebensraum:**

Sedimente im Schwarzen Meer

(5,30)

Methanogenium thermophilicum

**Morphologie:**

1.0-1.3µm ø, einzeln oder paarweise, z.T. begeißelt (eine  
eizelne Geißel), keine Kapsel, z.T. Pili; Gram-negativ

**Physiologie:**

Wachstumsbedingungen: Trypticase (BBL), Vitamine in Spuren,  
kein Acetat, c<sub>NaCl</sub>: opt.: 0.2M  
Substrate: Formiat, H<sub>2</sub> ; nicht: Met/EtOH, Acetat,  
Propionat, Pyruvat  
Temp.: r.: 37°-65°C; opt.: 55°C  
pH: r.: 6.2-7.8; opt.: 7.0  
g(min): 2.5h  
G+C: 59 mol%

**Lebensraum:**

Sediment bei Heißwasserausfluß von AKW  
(5,29)

Methanogenium olentangyi

**Morphologie:**

ø 1.0-1.5µm, keine Geißel, Kapsel oder Pili, unregelmäßige  
Kokken, nicht beweglich

**Physiologie:**

Wachstumsbedingungen: Acetat, c<sub>NaCl</sub>: opt.: 0.17M  
Temp.: r.: 30°-45°C; opt.: 37°C  
Substrate: H<sub>2</sub>; nicht: Formiat, MetOH, Methylamine  
g(min): 11h  
G+C: 54 mol%

**Lebensraum:**

Süßwassersedimente in Olentangy River, Ohio  
(5,8)

Methanogenium tationis (=M.tatii)

**Morphologie:**

ø 3µm, peritrich begeißelt, anscheinend unbeweglich, keine  
Kapsel, keine Pili, Gram negativ

**Physiologie:**

Wachstumsbedingungen: Hefeextrakt, Pepton, c<sub>NaCl</sub>: opt.: 0.1M  
Acetat  
Substrate: Formiat, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>  
Temp.: r.: 25°-45°; opt.: 37°-40°C  
pH: r.: 6.3-8.8; opt.: ca. 7  
g(min): 12h  
G+C: 54 mol%

**Lebensraum:**

Schlamm aus kleinem, mittelmäßig thermophilem Solfatara  
Becken, Mount Tatio, Chile  
(5,43)

Methanogenium aggregans

**Morphologie:**

ø 1-2µm, Kokken im Aggregat, nicht begeißelt, unbeweglich, Kapsel, keine Pili, Gram-negativ

**Physiologie:**

Wachstumsbedingungen: Acetat, Hefe oder Trypticase (BBL),  
c<sub>NaCl</sub>: opt.: 0.003M, Bedarf < 0.2%

Substrate: Formiat, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

Temp.: opt.: 35°C

pH: opt.: 6.5-7.0

G+C: 52 mol%

**Lebensraum:**

Faulturm bei Bourg-en-Bresse, France  
(5,23,24)

Methanogenium bourgense

**Morphologie:**

1-2µm ø, unregelmäßige Kokken, weder Geißeln, Kapsel noch Pili; unbeweglich

**Physiologie:**

Wachstumsbedingungen: Hefeextrakt oder Trypticase (hoch stimulierend), Acetat, c<sub>NaCl</sub>: opt.:  
0.017M

Substrate: Formiat, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

Acetat-Bedarf, aber nicht als methanogenes Substrat

Temp.: opt.: 37°C

pH: r.: 5.5-8.0; opt.: 6.7

**Lebensraum:**

"digester fermenting tannery by-products, which was originally inoculated with digested sludge from Bourg-en-Bresse, France"  
(5,23)

Methanogenium frittonii

**Morphologie:**

unregelmäßige Kokken, 1-2.5µm ø, einzeln oder paarweise, nicht beweglich

**Physiologie:**

strikt anaerob, autotroph

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>+Formiat

Wachstumstimulierend: Hefeextrakt, Tryptose, Casaminoäuren

Temp.: r.: 26°-62°; opt.: 57°C

pH: r.: 6-8.25; opt.: 7-7.5

t<sub>d</sub>: 1-2h bei Temp. 37°-60°C

kein NaCl-Bedarf; c<sub>NaCl</sub> ≤ 2% (Toleranz)

G+C: 49.2 mol%

**Lebensraum:**

anaerobe Sedimente von Süßwassersee in Norfolk, England (Fritton Lake)  
(5,11)

Methanogenium organophilum

**Morphologie:**

unregelmäßige Kokken, nicht beweglich,  $\varnothing$  0.5-1.5 $\mu$ m

**Physiologie:**

H<sub>2</sub>, Formiat, 2-PropOH, 2-ButOH, EtOH, 1-PropOH;

nicht: MetOH, Actat

C-Quelle: Acetat-Zusatz erforderlich, außer bei EtOH

Wachstumsbedingung: 4-Aminosäurebenzoat, Biotin, B<sub>12</sub>,  
Wolfram als Spurenelement

Wachstumstimulierend: ev. Hefeextrakt

Temp.: opt.: 30-35°C; max.: 39°C

pH: r.: 6.4-7.3

c(Salz)-Bedarf: 2% NaCl, 0.3% MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O

**Lebensraum:**

mariner Schlamm

(39)

Fam.2 Methanosarcinaceae

**Morphologie:**

unregelmäßige sphärische Körper, einzeln, in Aggregaten,  
Cysten oder als "verkleidete Stäbchen"; 0.8-2.5 $\mu$ m, Gram  
-variabel

**Physiologie:**

mesophil oder thermophil

Substrate: MetOH, methylierte Amine, oftmals

H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Acetat; nicht: Formiat

e<sup>-</sup> Akzeptor: CO<sub>2</sub> -> CH<sub>4</sub>

S<sup>-</sup> -> H<sub>2</sub>S, dann kein Wachstum

**Lebensraum:**

anaerobe Gebiete, besonders wo Acetat oder Methylaminie  
verfügbar sind, einschließlich aquat. Sedimente, anaerober  
Faulschlamm, Gastrointestinaltrakt (besonders Pansen)

(5)

Genus 1: Methanosarcina

Genus 2: Methanolobus

Genus 3: Methanotherix

Genus 4: Methanococcoides

Gen.1 Methanosarcina

**Morphologie:**

unregelmäßige, sphärische Körper (1->1000 $\mu$ m  $\varnothing$ ), allein oder  
als Zellaggregate, z.T. als große Cysten mit gemeinsamer  
äußerer Wand, die einzelne kokkoide Zellen umgibt; Gram  
-variabel, nicht beweglich, ev. Gasvesikel

**Physiologie:**

sehr strikt anaerob, autotroph bis heterotroph

e<sup>-</sup> Akzeptor: CO<sub>2</sub>->CH<sub>4</sub>

Substrate: Acetat, MetOH, Mono-/Di-/Trimethylamine, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>,  
ev.CO

z.T N<sub>2</sub>-Fixierung

Temp.: opt: 30°-40°C für mesophile; opt.: 50°-55°C für  
thermophile Spezies  
G+C: 36-43 mol%  
Acetat-Abbau: Acetoclastische Reaktion, Methylgr. → CH<sub>4</sub>,  
Carboxylgr. → CO<sub>2</sub>

**Lebensraum:**

anaerober Faulschlamm, Frischwasser + marine Sedimente,  
Pansen von Rindern + Schafen

(5)

**Methanosarcina barkeri**

**Morphologie:**

ø 1.5-2.0µm, coccoide Körper, meist als unregelmäßige  
Aggregate (bis einige 100µm), unbeweglich, Gram positiv,  
äußere Zellschicht aus Heteropolysacchariden

**Physiologie:**

sehr strikt anaerob

e<sup>-</sup> Akzeptor: CO<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub>

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, MetOH, Mono-, Di-, Trimethylamine,  
Acetat, CO (Methylgruppe von MetOH oder Acetat  
wird, ohne Zwischenoxidation zu CO<sub>2</sub> zu CH<sub>4</sub>  
reduziert); nicht vergoren werden:  
Kohlenhydrate, As., Formiat, EtOH, Propionat,  
Butyrat

N-Quelle: Ammonium, z.T. N<sub>2</sub>-Fixierung

S-Quelle: HS<sup>-</sup>

besseres Wachstum+CH<sub>4</sub>-Bildung auf H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> als mit Acetat  
bei Wachstum auf MetOH+H<sub>2</sub> → ist Acetat Wachstumsbedingung  
die Biosynthese

Temp.: opt : 30°-50°C

pH: opt.: 7.0

G+C: 39-44 mol%

**Lebensraum:**

Frisch- und Meerwasserschlamm, Pansen von Huftieren,  
tierischen Abfall-Lagunen", Faulschlamm

(5)

**Methanosarcina mazei**

**Morphologie:**

unregelmäßige kokkoide Zellen, 1.0-3.0µm ø, zu  
unregelmäßigen Klumpen (20-100µm ø oder mehr), die zu großen  
Flächen (>1000µm) zusammenkleben, später auch Cysten (ev.  
abhängig Lebenszyklus); unbeweglich, Gram-negativ

**Physiologie:**

sehr strikt anaerob

Substrate: MetOH, Methyl-, Dimethyl-, Trimethylamin → CH<sub>4</sub>  
Acetat, H<sub>2</sub> +CO<sub>2</sub> (langsamer),  
nicht: Butyrat, EtOH, ButOH, Aceton

Wachstumsbedingungen: Hefeextrakt, Trypticase, Pepton

Wachstumstimulierend: flüssiger Schlammüberstand

N-Quelle: Ammonium

Temp.: r.: 30°-40°C

pH: r.: 5.5-8.0; opt.: 7.0-7.2

Generationszeit: Acetat: 17h; H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>: 9h

G+C: 42 mol%

**Lebensraum:**

verfaulende Blätter, Gartenerde, Faulschlamm,  
schwarzer Schlamm, Fäkalien von pflanzenfressenden Tieren,  
auch isoliert aus städtischen festem Abfall, Lagunen

(5,20)

**Methanosarcina acetivorans**

**Morphologie:**

individuelle, unregelmäßige kokkoide Zellen, 1.5-2.5 µm ø,  
auf Acetat: septierte Zellaggregate; diese Aggregate werden  
zu Cysten, die innerhalb einer gemeinsamen Wand Zellen  
beinhalten, nicht beweglich, Gram negativ, dicke  
Zellwand aus Protein (10nm)

**Physiologie:**

sehr strikt anaerob  
Substrate: Acetat, MetOH, Mono-, Di-, Trimethylamin →CH<sub>4</sub>  
nicht: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat  
keine org. Wachstumsfaktoren  
cs<sub>12</sub>:opt.: NaCl: 0.2M, Mg<sup>2+</sup>: 50-1000mM,  
Wachstumsbedingungen: geringe Salzkonzentration, MgSO<sub>4</sub>  
Temp.: r.: >10°- <50°C; opt.: 35°-40°C  
pH: r.: 5.5-8.0; opt.: 6.5-7.0  
Verdopplungszeit: MetOH 5.2h; 1-3 Methylamine: 6.7-7.8h;  
Acetat: 24.1h

G+C: 41 mol%

**Lebensraum:**

marine Küstensedimente

(5,33)

**Methanosarcina thermophila**

**Morphologie:**

unregelmäßige Aggregate, > 100µm, aus kokkoiden Körpern  
(anscheinend einzelne Zellen), viele nicht-"rechtwinklige"  
Zellteilungen, keine Tetraden, selten einzelne Zellen,  
nicht beweglich, Gram positiv,

**Physiologie:**

sehr strikt anaerob  
Substrate: Acetat, MetOH, Mono-, Di-, Trimethylamine,  
(H<sub>2</sub>+MetOH), langsam auf H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>; nicht: Formiat  
N-Quelle: NH<sub>3</sub>, kein N<sub>2</sub>  
Wachstumsbedingung: p-Aminobenzoat  
Temp.: r.: < 35°-55°C; opt.: 50°C  
pH: r.: 5.5-8.0; opt.: 6.0-7.0  
G+C: 42 mol%

**Lebensraum:**

Thermophiler anaerober Faulschlamm, 55°C

(5,49)

Methanosarcina vacuolata

**Morphologie:**

kokkoide Körper, 1-2µm ø, manchmal als einzelne Zellen, meist als unregelmäßig runde Aggregate (bis mehrere 100µm), nicht beweglich, Gasvesikel, Gram-positiv

**Physiologie:**

CH<sub>4</sub>-Bildung

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, MetOH, Methylamine, Acetat (langsames Wachstum als auf MetOH); nicht: Formiat

keine Vergärung von KH, As, Formiat, EtOH, Propionat, Butyrat

N-Quelle: Ammonium

S-Quelle: HS<sup>-</sup>

Temp.: r.: 18°-45°C; opt.: 37°-40°C

pH: r.: 6.0-8.0; opt.: 7.5

G+C: 36.3 mol%

**Lebensraum:**

Boden, Frischwasserschlam, anaerober Abwasserschlam digestors

(5,53)

Gen.2: Methanlobus

**Morphologie:**

unregelmäßige Kokken, ø 0.8-1.25µm, z.T. in losen Aggregaten, umgeben von proteinöser Hülle; wenn begeißelt, dann monotrich, Gram-negativ

**Physiologie:**

strikt anaerob, chemoorganotroph

Substrate: MetOH, Methylamine (Mono-/Di-/Tri-); nicht: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat, Acetat

S<sup>-</sup>-Reduktion zu H<sub>2</sub>S zusätzlich zu CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>-Produktion

Temp.: r.: (10-15)° - (40-45)°C; opt.: 37°C

csalz: opt.: ca.3%; r.: 0.3-7.5%

G+C: 38-42 mol%

(5)

Methanlobus tindarius

**Morphologie:**

0.8-1.25µm ø, monotriche Begeißelung, Zellyse bei 50°C

**Physiologie:**

Temp: r.: 10°-40°C; opt.: 25°/37°C (mesophil)

pH: r.: 5.5-8.0; opt.: 6.5

csal: r.: 0.06-1.27M; opt.: 0.47M

Generationszeit: MetOH+Vitamine:6h, ohne Vit: 10.8h

Vitamine stimulieren Wachstum

G+C: 40 mol%

**Lebensraum:**

marine scharze Sedimente (See Tindari, Sizilien)

(5,18)

Methanolobus siciliae

**Physiologie:**

Temp.: r.: 20°-48°C; opt.: 37°C  
G+C: 41 mol%

(5)

Methanolobus vulcani

**Morphologie:** z.T. Begeißelung beobachtet

**Physiologie:** Temp.: r.: 15°-45°C; opt.: 37°C  
G+C: 39 mol%

(5)

Gen.3: Methanotherix

**Morphologie:**

0.7-1.2 x 2.0-6.0µm, stäbchenförmige Zellen mit abgeflachten Enden, bilden lange, bewegliche Filamente, die zu Bündelbildung tendieren, Gram-negativ, nicht beweglich, eine Spezies mit Gasvakuolen, proteinöse Zellwand

**Physiologie:**

strikt anaerob, aerotolerant, chemoorganotroph  
Substrate: nur Acetat(->CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>), Methanbildung nur aus Methylgr. von Acetat; nicht: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> (kein Wachstum), Formiat, MetOH, Methylamine

C-Quelle: nur CO<sub>2</sub>+Acetat

S-Quelle: HS<sup>-</sup>

N-Quelle: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

Temp.: r.: 3°-ca.50°C; opt.: 35°-40°C (mesophil)  
r.: 35°-75°C; opt.: 65°C (thermophil)

pH: r.: 6.8-8.3; opt.: 7.1-7.8

Wachstumsbedingungen: Vitamine, z.T. Hefeextrakt

G+C: 52-61 mol%

**Lebensraum:**

Faulschlamm, Biogas-Fermenter, run with human and/or animal waste, sanitary landfills

(5,13)

Methanotherix soehngeni (=Methanobacterium soehngeni)

**Physiologie:**

Temp.: opt.: 35°-40°C  
pH.: r.: 6.8-8.2; opt.: 7.4-7.8  
Verdopplungszeit: 84-144h  
G+C: 52 mol%

**Lebensraum:**

Digester, Faulschlamm (Hausmüll, Biogas-Fermenter, animal waste, sanitary landfill, mechanisches "rohes" Abwasser

(5,13)



Methanotrix concilii

**Physiologie:**

Temp.: opt.: 37°-40°C  
pH: opt.: 7.1-7.5 (ta: <24h)  
Substrate: CO<sub>2</sub>+Acetat (acetoclastische Reaktion)  
G+C: 61 mol%

**Lebensraum:**

Abwasserschlämm

(5,25)

Methanotrix thermoacetophila

**Morphologie:**

lange gerade Stäbchen, 1.0-2.0 x 2.0-6.0µm; Gram-negativ,  
keine Geißeln, nicht beweglich

**Physiologie:**

Temp.: r.: 50-70°C; opt.: 65°C  
pH: r.: >5.5-<8.4; opt.: ca.6.5  
Wachstumstimulierend: Vitamine, geringe Konzentration an  
Dünger-Extrakt  
Substrate: chemoorganotroph mit Acetat (->CH<sub>4</sub>)

**Lebensraum:**

Schlamm

(5,22,50)

Gen.Methanococcoides

**Morphologie:**

extrem unregelmäßige Kokken, 1±0.2µm ø, einzeln oder  
paarweise, nicht beweglich, keine Geißeln oder Pili, Gram  
negativ; einschichtige proteinöse Zellwand

**Physiologie:**

strikt anaerob  
Substrate: Mono- bis Trimethylamine, MetOH; nicht: Acetat,  
Formiat, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>  
Temp.: r.: 15°-35°C; opt.: 30°-35°C  
pH: opt.: 7.0-7.5  
Wachstumsbedingungen: cNaCl: opt.: 0.2-0.6M; cMgSO<sub>4</sub> : opt.:  
0.025-0.2M; Biotin, Spurenelemente:  
Ni, Fe,Co

**Lebensraum:**

anaerobe marine Sedimente

(5,32)

Methanococcoides methylutens

**Physiologie:**

Wachstumstimulierend: Hefeextrakt, Trypticase,  
Pansenflüssigkeit, B-Vitamine  
max(?) Verdopplungszeit: 5.2h  
G+C: 42 mol%

**Lebensraum:**

mariner Graben mit viel org. Material

(5,32)

Fam. Methanoplanaceae/Gen. Methanoplanus

**Morphologie:**

plattenförmige Zellen (dicke Platten mit scharfen Kanten /Zacken), 0.07-0.3(dick) x 1.6-3.4(lang) x 1.5µm(breit), begeißelt, Zellhülle aus Glykoproteinen, Gram negativ

**Physiologie:**

strikt anaerob, chemolithotroph

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat; nicht: MetOH, Methylamine

e<sup>-</sup>-Akzeptor: CO<sub>2</sub> -> CH<sub>4</sub>

S<sup>0</sup> -> H<sub>2</sub>S

Temp.: r.: 16°-41°C; opt.: 32°-40°C, mesophil

Wachstumsbedingungen: 0.4-6% NaCl

G+C: 38.7-47.5 mol%

**Lebensraum:**

freilebend in anaeroben Sumpfgewässern, oder als Endosymbionten

(5,40)

Methanoplanus limicola

**Morphologie:**

0.07-0.3 x 1.6-2.8 x 1.5µm, einzeln, schwach beweglich, Büschel von Flagellen

**Physiologie:**

Temp.: r.: 17°-41°C; opt.: 40°C, mit Verdopplungszeit von 7h

pH: opt.: 7

NaCl: opt: 1%

absoluter Acetat-Bedarf: 0.1%

Wachstumstimulierend: Pepton + Vitamine oder Hefeextrakt

G+C: 47.5 mol%

**Lebensraum:**

Sumpf, Abfall und Wasser von Dampf-"drilling"; Meer- und Frischwasserschlamm

(5,40)

Methanoplanus endosymbiosus

**Morphologie:**

1.6-3.4µm ø, einzeln, peritriche Begeißelung

**Physiologie:**

Temp.: r.: 16°-36°C; opt.: 32°C

pH: opt.: 7.0

NaCl: opt.: 0.25M

kein Acetat-Bedarf; Wolfram-Bedarf(0.1M)

Wachstumstimulierend: Hefeextrakt, Trypton-Soya-Brühe, Pansenflüssigkeit

Generationszeit: 7-12h

G+C: 38.7 mol%

**Lebensraum:**

mariner Ciliat (Metopus contortus)

(5,6)

### Gen. Methanosphaera

#### Morphologie:

kugelrunde Zellen,  $\varnothing$  1.0  $\mu$ m, normalerweise in Paaren, Tetraden, Clustern, Gram positiv, Zellwand aus Pseudomurein, unbeweglich, keine Geißeln

#### Physiologie:

strikt anaerob, chemoorganotroph

Substrate: a)  $H_2 + MeOH \rightarrow CH_4 + H_2O$

b) ohne  $H_2$ : keine  $CH_4$ -Produktion

keine Substrate sind: Acetat, Methylamine, Formiat, (EtOH+ $H_2$ );

MeOH ( $e^-$  Akzeptor) wird nicht ersetzt durch:

$CO_2$ , CO, Sulfat, Fumarat, Cholin, Nitrat

Wachstumsbedingungen:  $CO_2$ , Acetat, B-Vitamine

N-Quelle:  $NH_4^+$ , As

G+C: 26 mol%

(5,21)

### Methanosphaera stadtmanae

#### Physiologie:

Wachstumsbedingungen: Acetat,  $CO_2$ , Thiamin, Biotin (stimulierend)

C-Quelle: 50%  $CO_2$ , 50% Acetat

N-Quelle:  $NH_4^+$ , As

Temp.: r.: 30°-40°C; opt.: 36°-40°C

pH: opt: 6.5-6.9

#### Lebensraum:

menschliche, tierische Fäkalien

(5,21)

### Fam. Methanocorpusculaceae

#### Gen. Methanocorpusculum

#### Morphologie:

kleine, unregelmäßige Kokken, meist einzeln, schwach beweglich, bzw. unbeweglich, Gram negativ

#### Physiologie:

strikt anaerob, chemoorganotroph

Substrate:  $H_2 + CO_2$ , Formiat, 2-PropOH+ $CO_2$  und/oder 2-ButOH+ $CO_2$

mesophil; neutrophil

Wachstumsbedingungen: kein Salz-Bedarf, aber Salz-Toleranz

Wachstumstimulierend: Pansenflüssigkeit, ev. Wolfram

G+C: 47.7-52 mol%

#### Lebensraum:

anaerobe Standorte in Sedimenten, Bioreaktoren

(48)

Methanocorpusculum sinense

**Morphologie:**

<1µm ø, unregelmäßige Kokken, normalerweise einzeln, begeißelt, schwach beweglich, Gram negativ

**Physiologie:**

strikt anaerob, chemoorganotroph

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat

nicht: Acetat, Methylamine, MetOH, EtOH, 1-PropOH, 2-PropOH+CO<sub>2</sub>, 1-ButOH, 2-ButOH+CO<sub>2</sub>, Cyclohexanol

Wachstumsbedingungen: Faktoren in Pansenflüssigkeit

kein NaCl-Bedarf

Temp.: r.: 15°-45°C; opt.: 30°C

pH: opt.: 7.0

G+C: 52 mol%

**Lebensraum:**

anaerobe Biogas-Pflanzen, "behandelt" mit Brennerei-Abfallwasser

(48)

Methanocorpusculum bavaricum

(sonst wie M. sinense)

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat, 2-PropOH+CO<sub>2</sub>, 2-ButOH+CO<sub>2</sub>

nicht: Acetat, Methylamine, MetOH, EtOH, 1-PropOH, 2-ButOH, Cyclohexanol

Wachstumsbedingungen: Pansenflüssigkeit (gereinigt)

Temp.: r.: 15°-45°C; opt.: 37°C

pH: opt.: 7.0

G+C: 47.7 mol%

**Lebensraum:**

anaerobe Sedimente bei Abwasserausfluß von Zuckerfabrik bei Regensburg

(48)

Methanocorpusculum parvum

**Morphologie:**

schwach beweglich durch einzelne Geißel

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat, 2-Propanol+CO<sub>2</sub> (weniger)

Wachstumsbedingungen: Acetat, Hefeextrakt, Wolfram

(c<sub>wolfram</sub>: opt.: 1µmol/l für H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>)

Wachstumstimulierend: gereinigte Pansenflüssigkeit

Temp.: r.: 15°-45°C; opt.: 37°C (mit Verdopplungszeit von 8h)

pH: opt.: 6.8-7.5

G+C: 48.5 mol%

**Lebensraum:**

Abwasserschläm, anaerobe Sauermolke, beimpft mit Abwasserschläm

(46)

Methanocorpusculum labreanum

**Morphologie:**

unregelmäßige unbewegliche Kokken;  $\varnothing$  0.4-2.0 $\mu$ m, Gram negativ

**Physiologie:**

Substrate: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat

Wachstumsbedingungen: Trypticase-Peptone oder Hefeextrakt  
Acetat ev. stimulierend

Temp.:opt.: 37°C

pH: r.: 6.5-7.5; opt.: 7.0

cNaCl: opt.: 0-15g/l

G+C: 50 mol%

**Lebensraum:**

Oberflächensedimente von Tar Pit-Lake

(51)

Methanohalophilus mahii

**Morphologie:**

unregelmäßige Kokken, einzeln oder in kleinen Klumpen, unbeweglich, Gram-negativ, keine Sporenbildung

**Physiologie:**

strikt anaerob

Substrate: MetOH, Methylamine (Di-/Tri-Methylaminen),  
nicht: H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>, Formiat, Acetat. u.a.

Wachstumsbedingungen: Natrium, cNaCl: opt.: 0.5-2.5M, Mg,  
Fe, Kalium

Temp.:r.: $\leq$ 45°C; opt.: 35°C

pH: opt.: ca.7.5

cNaCl: opt.: 2.0M

G+C: 48.5 mol%

**Lebensraum:**

anaerobe Sedimente aus Great Salt Lake, Utah

(26)

## 2.7 Restliche Archaeobakterien

### **Gr.2: Archaeobacteriale Sulfat-Reduzenten**

#### Archaeoglobus fulgidus

##### **Morphologie:**

regelmäßige bis unregelmäßige coccoide Zellen;  $\varnothing$  0.4-1 $\mu$ m;  
monopolare polytriche Begeißelung, einzeln oder paarweise;  
Gram negativ, weder Murein noch Pseudomurein

##### **Physiologie:**

strikt anaerob

chemolithoautotrophes Wachstum auf  $H_2+CO_2$ +Thiosulfat

chemoorganotrophes Wachstum auf Formiat, Formamid, D/L-  
Lactat, Glucose, Stärke,  
Casaminosäure, Pepton,  
Gelatine, Wurst-Extrakt,  
Eu/Arch.-Extrakt } mit  
Sulfat, Sulfit, Thiosulfat  
(nicht:  $S^0$ )

Temp.:r.: 65°-95°C; opt.:83°C

pH:r.:5.5-7.5

Stoffwechselprodukte:  $H_2S$ , Spuren von  $CH_4$

G+C: 46 mol%

##### **Lebensraum:**

geothermal erhitzter Seeboden bei Vulcano, Italien

(12,13)

#### Gruppe 4: Zellwandlose Archaeobakterien

##### Gen. Thermoplasma

###### Morphologie:

verschiedengestaltig, von kugelförmig  $\varnothing$  0.3-2.0 $\mu$ m, bis filamentös; keine echte Zellwand, nur einzelne 3-schichtige Membran (5-10nm dick); Gram negativ; überwiegend beweglich und begeißelt (meist monopolar, monotrich); keine Dauerformen

###### Physiologie:

fakultativ aerob (wenig O<sub>2</sub> stimuliert, viel O<sub>2</sub> inhibiert das Wachstum; komplette Atmungskette anscheinend vorhanden), microaerophil

chemoorganotroph, obligat heterotroph

obligat thermo-acidophil

kein aerobes Wachstum auf S<sup>0</sup> oder Fe<sup>2+</sup>

anaerobes Wachstum : S<sup>0</sup> -> H<sub>2</sub>S

Temp.: r.: 33°-67°C; opt.: 55°-59°C

pH: r.: 0.5-4; opt.: 1-2

Wachstumsbedingungen: Hefeextrakt (0.025-0.25%),  
Wurstextrakt, oder Extrakt aus Eu  
-/Archaeobakt.

Wachstumstimulierend: Sucrose, Glucose, Galaktose, Mannose,  
Fruktose

Salztoleranz: bis  $\geq$ 2%, z.T. bis 4%

bestes Wachstum in Gegenwart von S<sup>0</sup>; ohne S<sup>0</sup> Wachstum vollständig inhibiert durch CO<sub>2</sub>; nicht inhibierend aber auch nicht sichtbar stimulierend wirkt H<sub>2</sub> (mit oder ohne S<sup>0</sup>)

anaerobes geringes Wachstum auch ohne S<sup>0</sup> (unbekannter e-Akzeptor)

gopt.: 5h

###### Lebensraum:

freilebend in Hitze-produzierenden Kohlenabfallhaufen (Temp.: 32-80°C; pH: 1.2-5.2) und Solfatarafeldern

(7,9)

##### Thermoplasma acidophilum

###### Physiologie:

Temp.: r.: 45°-63°C; opt.: 59°C

pH: r.: 0.5-4; opt.: 1-2

G+C: 46 mol%

###### Lebensraum:

Solfatarafelder und selbsterhitzte Kohlenabfallhaufen

(7,9)

##### Thermoplasma volcanium

###### Physiologie:

Temp.: r.: 33°-67°C; opt.: 60°C

pH: r.: 1-4; opt.: 2

G+C: 38 mol%

###### Lebensraum:

Submarine und kontinentale Solfataras bei Vulcano-Inseln, Italien, u.a., auch: trop. Sumpf in Java

(9)

## Gruppe 5: Extrem thermophile S<sup>-</sup>-Metabolisierer

### Allgemeine Beschreibung:

Stäbchen, Filamente oder Kokken; Gram negativ  
obligat thermophil (Temp.: opt.: 70°-105°C), aerob bis fakultativ  
aerob oder strikt anaerob; acido- und neutrophil: autotropes oder  
heterotropes Wachstum  
(6)

### Ordnung: Thermococcales/Fam. Thermococcaceae

#### Morphologie:

kugelförmig bis länglich, ø 1µm, oft als Diplokokken; kein  
Murein, Gram-negativ

#### Physiologie:

strikt anaerob  
e<sup>-</sup>-Akzeptoren: S<sup>-</sup>->H<sub>2</sub>S (u.a.)  
C-Quelle: Peptide  
produziert Glykogen

#### Lebensraum:

Marine Solfatara-Biotope, (neutraler pH, Temp.: 80°-103°C  
oder höher), in heißen Quellen oder in NaCl reichen  
Wasserlöchern

(6)

Genus 1: Thermococcus

Genus 2: Pyrococcus

### Thermococcus celer

#### Morphologie:

Kokken, einzeln oder paarweise, ø 1µm; monopolare,  
polytriche Begeißelung, Gram negativ, kein Murein

#### Physiologie:

strikt anaerob  
chemoorganotroph,  
e<sup>-</sup>-Akzeptor: S<sup>-</sup>->H<sub>2</sub>S  
Substrate: org. Verbindungen, Peptide aus Hefeextrakt,  
Bactotrypton oder Casein wurden mit S<sup>-</sup> oxidiert  
oder -weniger effektiv- fermentiert

Temp.: opt.: 88°C (extrem thermophil)

pH: opt.: 5.8

NaCl: opt.: 38g/l

Generationszeit: 50min (unter opt. Bedingungen + S<sup>-</sup> +  
Hefeextrakt)

hohe Wachstumsrate

Wachstumstimulierend: 2g/l Sucrose

Wachstumsbedingung: p<sub>H<sub>2</sub>S</sub> ≤ 2\*10<sup>4</sup> Pa

Stoffwechselprodukte: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S

G+C: 56.6 mol%

#### Lebensraum:

Solfatara, marine Wasserlöcher von Vulkanen, (ca. 90°C)

(6,16)



### Pyrococcus furiosus

**Morphologie:** leicht unregelmäßige Kokken, 0.8-2.5µm breit, einzeln oder paarweise, hochbeweglich durch monopolare polytriche Begeißelung  
Gram negativ

#### **Physiologie:**

chemoorganotroph

strikt anaerob

e<sup>-</sup>-Akzeptor: S<sup>0</sup> -> H<sub>2</sub>S;

S<sup>0</sup> nur nötig bei hohen H<sub>2</sub>-Konzentrationen,

Substrate: Hefeextrakt, Pepton (-> H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>)

T(Opt.)=100°C; T(R)=70-103°C

pH(Opt.)=7; pH(R)=5-9

c<sub>NaCl</sub>(Opt.)=2%; c<sub>NaCl</sub>(R)=0.5-5%

t<sub>d</sub>(opt.Bedingungen)=37 min

38mol% G+C

Wachstumsbedingung: keine zu hohen H<sub>2</sub>-Konzentrationen

(3,6)

### Pyrococcus woesei

**Morphologie:** ø0.5-2µm, kugelförmig bis länglich; regelmäßig in Zweiergruppen durch kurze dicke Fäden verbunden.  
Gram negativ, ev. begeißelt (noch unklar)

#### **Physiologie:**

chemoorganotroph

strikt anaerob

anaerobe Atmung

e<sup>-</sup>-Akzeptor: S<sup>0</sup> ->H<sub>2</sub>S mit Hefe + Pepton

Polysaccharide mit H<sub>2</sub> und S<sup>0</sup>

Hefeextrakt mit H<sub>2</sub> in Abwesenheit von S<sup>0</sup> (ev.

endogener e<sup>-</sup>-Akzeptor)

keine Vergärung

ultrathermophil, T(R)< 104.8°C

pH(Opt.)=6.0-6.5

c<sub>NaCl</sub>(Opt.)=30g/l

Generationszeit g=35 min

G+C: 37.5 mol%

**Lebensraum:** marine Solfatara (100-103°C, 30g/l NaCl), Sedimente (102-103°C) in Löchern von marinen Solfatara vom Vulkan Island (Italien)

(6,17)

### Thermoproteales/ Thermoproteaceae

**Morphologie:** Stäbchen, 0.1-0.5 x 1-100µm lang, Scheiben oder kugelförmige Zellen (0.5-5µm ø) unterschiedlicher Größe; Gram negativ; keine Muraminsäure

#### **Physiologie:**

anaerob

extrem thermophil: Temp.: opt.: 85°-100°C

chemolithoautotroph: H<sub>2</sub> + S<sup>0</sup>->H<sub>2</sub>S; C-Quelle: CO<sub>2</sub>

oder

chemoorganoheterotroph: S<sup>0</sup>->H<sub>2</sub>S, auch -S-S-, Malat

Substrate: organische Verbindungen->CO<sub>2</sub>  
z.T.: unbekannte Gärung.

**Lebensraum:**

Solfatara-Heißwasser, Schlammlöcher bis  $T=100^{\circ}\text{C}$ , oder in überhitzt-submarinen Solfatara-Gegenden (6,18)

**Thermoproteus tenax**

**Morphologie:** starre Stäbchen,  $0.4 \times (<1-100\mu\text{m})$ ,  
Gram negativ  
nicht beweglich, seitliche oder terminale Pili

**Physiologie:**

strikt anaerob  
chemolithoautotroph mit  $\text{H}_2+\text{S}^{\circ}$ ,  $\text{CO}_2$  als C-Quelle  
chemoorganotroph  
 $e^{-}$ -Akzeptor:  $\text{S}^{\circ}$  oder Malat  
Substrate: Glucose, Stärke, Glykogen, Fumarat, Ethanol, Malat, Formamid, Amylose, Amylopektin, Methanol, Formiat, Propionat, Casamino-säure  
nicht: Lactat, Acetat, Pyruvat  
Wachstumsbedingung:  $\text{H}_2\text{S}$  als Reduktionsmittel  
Wachstumsstimulierend: Hefeextrakt (0.2-0.5g/l)  
 $T(\text{Opt.})=90^{\circ}\text{C}$ ;  $T(\text{R})=80- >96^{\circ}\text{C}$   
 $\text{pH}(\text{Opt.})=5$ ;  $\text{pH}(\text{R})=2.5-6$   
55 mol% G+C

**Lebensraum:** Krafla (Island), saure heiße Quellen und Wasserlöcher (6,18)

**Thermoproteus neutrophilus**

**Morphologie** wie Th.tenax

**Physiologie:**

fakultativ chemolithoautotroph  
Energie:  $\text{H}_2+\text{S}^{\circ} \rightarrow \text{H}_2\text{S}$  mit  $\text{CO}_2$  als C-Quelle  
C-Quelle:  $\text{CO}_2$  oder Acetat (70%)  
autotroph g=9-14h  
fak. heterotroph g=3-4h (mit Acetat-Zusatz)  
Wachstumsstimulierend: Acetat, leicht Succinat  
 $T(\text{Opt.})=85^{\circ}\text{C}$   
 $\text{pH}(\text{Opt.})=6.5$ ;  $\text{pH}(\text{R})$  bis 7.0

(6,8)

**Thermofilum pendens**

**Morphologie:** dicke Stäbchen,  $(0.15-0.35) \times (1 \rightarrow 100\mu\text{m})$  mit terminalen Pili, selten verzweigt oder mit scharfer Krümmung, oft mit terminaler kugelförmiger Vorwölbung an beiden Enden, manchmal mit angeschwollenen Bereichen  
Gram negativ

**Physiologie:**

anaerob  
thermoacidophil  
 $e^{-}$ -Akzeptor:  $\text{S}^{\circ}$   
Substrat: Peptide  
Wachstumsbedingung: polare Lipidkomponente aus Th.tenax  
 $T(\text{Opt.})=85-90^{\circ}\text{C}$ ;  $T(\text{R})$  bis mindestens  $95^{\circ}\text{C}$   
 $\text{pH}(\text{Opt.})=5-6$ ;  $\text{pH}(\text{R})=4-6.5$   
g( $\text{pH}=5.2$ ;  $T=88^{\circ}\text{C}$ )=10h

**Lebensraum:** heiÙe Solfatara-Quellen und Wasserlöcher (pH=2.8-6.7;  
T bis 100°C)  
(6,15)

**Desulfurococcus mucosus**

**Morphologie:** Kokken, ø 0.3-2µm  
Gram negativ  
produziert scharf riechendes unbekanntes Produkt und  
Polymer auf der Zelloberfläche  
nicht beweglich

**Physiologie:**  
anaerob  
S<sup>-</sup>-Atmung oder Gärung  
Substrate: Proteine, Peptide, Kohlenhydrate  
C-Quellen: Hefeextrakt, Casein  
bestes Wachstum in Gegenwart von S<sup>-</sup>  
O<sub>2</sub>-Spuren inhibieren das Wachstum  
T(Opt.)=85°C mit g=4h  
pH(Opt.)=6; pH(R)=4.5-7.0  
51.3 mol% G+C

**Lebensraum:** heiÙe Solfatara-Quellen (pH=2.2-6.5; T bis 95°C)  
(6,19)

**Desulfurococcus mobilis**

**Morphologie:** keine Schleimproduktion  
beweglich durch Flagellenbündel  
T(Opt.)=85°C mit g=3h  
50.8 mol% G+C  
(6,19)

**Staphylothermus marinus**

**Morphologie:** leicht unregelmäßige Kokken, ø 0.5-1µm (bis 15µm,  
wenn viel Hefeextrakt vorhanden); einzeln, paarweise,  
als kurze Ketten und Aggregate bis zu 100 Zellen  
Gram negativ; unbeweglich

**Physiologie:**  
strikt anaerob  
chemoorganoheterotroph  
e<sup>-</sup>-Akzeptor: S<sup>-</sup> -> H<sub>2</sub>S ; S<sup>-</sup> unbedingt notwendig für Wachstum  
Substrate: Pepton, Trypton, Hefeextrakt, Wurstextrakt,  
Extrakte von Eu- und Archaeobakterien  
Stoffwechselprodukte: H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, Acetat, Isovalerat  
extrem thermophil, T(Opt.)=92°C mit t<sub>a</sub>=270 min; T(R)=65-98°C  
bei opt. Nährstoffangebot in Minimalmedium: T (Opt.): 85°;  
T(max): 92°C  
pH(Opt.)=6.5; pH(R)=4.5-8.5  
c<sub>NaCl</sub>(Opt.)=1.5%; c<sub>NaCl</sub>(R)=1-3.5%  
35 mol%G+C

**Lebensraum:** geothermal erhitzte Sedimente (Strand von Vulcano,  
Italien), submarines hydrothermales Loch (East Pacific  
Rise)

(4,6)

Pyrodictium occultum

**Morphologie:** (0.3-2.5)x0.2µm, scheiben- bis plattenförmig,  
produziert Netzwerk-bildende Fasern (ø 0.04-0.08µm);  
Gram negativ  
nicht beweglich, keine Flagellen

**Physiologie:**

strikt anaerob  
chemolithoautotroph  
Energie:  $H_2 + S^0 \rightarrow H_2S$  , (leicht)  
Wachstumsstimulierend: Hefeextrakt, Citronensäure  
T(Opt.)=105°C; T(R)=82-110°C; überleben aber 2 Jahre bei T=4°C  
pH(Opt.)=5.5; pH(R)=5-7  
c<sub>NaCl</sub>(Opt.)=1.5%; c<sub>NaCl</sub>(R)=0.2-12%  
Stoffwechselprodukt Pyrit  
62 mol% G+C

**Lebensraum:** heißer Seeboden und Strand von Vulkan-Insel, Italien  
(6,14)

Pyrodictium brockii

anderes dominierendes Glykoprotein in der Zellwand als P.occultum  
Wachstumsstimulierend: Hefeextrakt (stark); (sonst wie P.occultum)  
51.5-56.6 mol% G+C  
(6)

Thermodiscus

**Morphologie:** scheibenförmige Zellen  
**Physiologie:** obligat chemoorganotroph, S<sup>0</sup> nicht unbedingt  
notwendig  
T(Opt.)=90°C  
c<sub>NaCl</sub>(R)=1-4%

(6)

Sulfolobus solfataricus

**Morphologie:**  
kugelförmige unregelmäßige Zellen mit abgerundeten Enden,  
einzeln; in bestimmten Medien vielfach gelappt; nicht  
beweglich

**Physiologie:**

aerob  
Substrate: S<sup>0</sup>, Hefeextrakt  
Temp.: r.: 50°-87°C; opt.: 87°C  
pH: r.: 3-5.5; opt.: 4.5; Zellyse bei pH>7.5  
G+C: 36 mol%

(2,6)

Sulfolobus acidocaldarius

**Morphologie:**  $\varnothing$ 0.8-2 $\mu$ m, coccoid, sehr unregelmäßig, normal einzeln  
nicht beweglich, nicht begeißelt

**Physiologie:**

aerob

fakultativ lithoautotroph

organische Substrate: Hefeextrakt, Trypton, Pepton, Casein-  
Hydrolysat

lithotrophe Substrate:  $S^{\circ}$  (z.T.  $Fe^{2+}$ ),  $HS^-$ , Tetrathionat

kein anaerobes Wachstum über  $S^{\circ}$ -Reduktion (sondern über  $Fe^{3+}/$   
 $MoO_4^{2-}$ -Reduktion)

autotrophes Wachstum auf  $S^{\circ}$

T(Opt.)=70-75°C; T(R)=55-85°C

pH(Opt.)=2-3; pH(R)=1-6, Zellyse bei pH>7.5

37 mol% G+C-Gehalt

g(0.1% Hefeextrakt)=6.5-8h

Wachstumsinhibierend: 0.1% Phosphat

**Lebensraum:** Solfatara-Gebiete, thermale saure Böden, saure heiße  
Quellen

(2,6,11)

Acidianus infernus

**Morphologie:** kokkoide Zellen, sehr unregelmäßig,  $\varnothing$ 0.5-2 $\mu$ m, meist  
einzeln,  
Gram negativ, nicht beweglich oder begeißelt

**Physiologie:**

fakultativ anaerob

obligat chemolithotroph

Wachstum:- aerob hetero-oder autotroph über  $S^{\circ}$ -Oxidation  
- anaerob autotroph über  $H_2+S^{\circ} \rightarrow H_2S$

C-Quelle: autotroph, oder heterotroph auf Hefeextrakt

thermoacidophil, T(Opt.)=90°C; T(R)=65-96°C

pH(Opt.)=2; pH(R)=1.0-5.5; Zellyse bei pH>8.5

$c_{NaCl}$ (Opt.)=0.2%;  $c_{NaCl}$ (Max.)=4%

31 mol% G+C

kein Wachstum bei sehr niedrigem Redoxpotential in Abwesenheit  
von  $S^{\circ}$  und/oder  $H_2$

**Lebensraum:** saure Solfatara-Quellen und Schlammlöcher, marine  
Sedimente, geothermale Quellen

(6,10)

Acidianus brierleyi (früher: "Sulfolobus brierleyi")

**Morphologie:**  $\varnothing$  1-1.5 $\mu$ m, kugelförmig  
nicht beweglich

**Physiologie:**

strikt chemolithotroph

Wachstum:- aerobe  $S^{\circ}$ -oder  $Fe^{2+}$ -Oxidation

- anaerob autotroph über  $H_2+S^{\circ} \rightarrow H_2S$

- organotroph aerob auf Hefeextrakt, Pepton Trypton,  
Fleischextrakt oder Casaminosäure

T(Opt.)=70°C; T(R)=45-75°C

pH(Opt.)=1.5-2.0; pH(R)=1-6; Zellyse bei pH=7

$Mg^{2+}$ -Bedarf

**Lebensraum:** saure Solfatara-Quellen

(6,10)

### Desulfurolobus ambivalens

**Morphologie:** Zellen mehr oder weniger kugelförmig mit partiell planarer Oberfläche und zugehörigen Kanten  
Gram negativ

#### **Physiologie:**

fakultativ aerob  
obligat chemolithoautotroph  
Wachstum:- aerob durch  $S^0$ -Oxidation  
- anaerob:  $H_2 + S^0 \rightarrow H_2S$   
Wachstumsstimulierend: Hefeextrakt (nur bei pH=3.5)  
T(Opt.)=80°C; T(Max.)=87°C  
pH(R)=1-3.5  
g(opt. Bedingungen)=4h  
N-Quelle: Ammonium  
32.7 mol % G+C

**Lebensraum:** heißes saures Solfatara-Wasser und Schlamm bis 95°C,  
pH=1.5-6.3

(20)

### Pyrobaculum islandicum

**Morphologie:** 2.5x0.5µm; Stäbchen mit rechtwinkligen Enden, einzeln und in Aggregaten bipolare polytriche Begeißelung

#### **Physiologie:**

strikt anaerob  
fakultativ organotroph  
 $e^-$ -Akzeptoren:  $S^0$ , Cystein, ox.Glutathion, Sulfit, Thiosulfat  
Substrate: Hefeextrakt, Pepton, Wurst-, Eu-/Archaeobakterien-Extrakt  
lithoautotrophes Wachstum auf  $H_2, CO_2 + S^0$   
thermophil: T(Opt.)=100°C ( $t_d=260$  min); T(R)=74-102°C  
pH(Opt.)=6; pH(R)=5-7  
 $C_{NaCl}(R)=0-0.5\%$ ; Wachstum bei T=74°C und 0.8% NaCl

**Lebensraum:** neutrales bis leicht alkalisches kochendes Solfatara-Wasser, geothermales Wasser

(5)

### Pyrobaculum organotrophum

**Morphologie:** (3-5.5)x0.5µm, Floß-förmige Aggregate aus bis zu 20 Zellen, peritriche Begeißelung

#### **Physiologie:**

strikt anaerob  
strikt organotroph  
 $e^-$ -Akzeptoren:  $S^0$ ; L-Cystein, ox.Glutathion  
Substrate: Hefeextrakt, Pepton, Wurstextrakt  
T(Opt.)=100°C (mit  $t_d=690$  min); T(R)=78-102°C  
pH(Opt.)=6; pH(R)=5-7  
 $C_{NaCl}$ : r.: 0-0.5%  
kein Wachstum bei T=74°C und 0.8% NaCl

**Lebensraum:** kochendes Solfatara-Wasser

(5)

Thermophiles Archaeobakterium - Stamm "NS-C"

**Morphologie:** 0.5-3µm, unterschiedliches Aussehen, z.T.kugelförmig,  
z.T.vielfach gelappt,  
keine Begeißelung

**Sporenbildung**

**Physiologie:**

obligat anaerob (nur im Wachstumsbereich, sonst aerotolerant)

obligat heterotroph

keine Substrate sind: Lactat, Glucose, Sucrose, Mannitol,  
Glutamat, Glycin, EtOH, MetOH, Glycerol,  
Acetat, Lactose, Formiat, Propionat,  
Stärke

e<sup>-</sup>-Akzeptor: S<sup>0</sup> -> H<sub>2</sub>S ; Wachstum auch ohne S<sup>0</sup> möglich

thermophil, T(Opt.)=88°C; T(R)=55-98°C

neutrophil, pH(Opt.)=7.2; pH(R)=6.0-8.5

Wachstumsbedingung: c<sub>NaCl</sub>(Opt.)=25g/l; bis 1.9% oder 0.3%

Totalsalzgehalt

optimales Wachstum auf "Meer"-Nährboden

**Lebensraum:** seichte submarine Thermalquelle

(1)

## 2.8 Halobakterien

### Gruppe 3: Extrem halophile Archaeobakterien

#### Ordg.: Halobacteriales/Fam. Halobacteriaceae

##### Morphologie:

Stäbchen, Kokken, eine Vielzahl an Einrollungsformen von Scheiben bis Dreiecken; nicht beweglich oder beweglich durch Büschel von polaren Flagellen; Gram negativ oder Gram positiv; keine Dauerformen

##### Physiologie:

aerob oder fakultativ anaerob (mit oder ohne Nitrat)  
anaerobes Wachstum: unbekannter Gärungsstoffwechsel mit Arginin-Umsetzung oder dissimilatorische Nitrat-Reduktion

chemoorganoheterotroph

C-Quellen: Aminosäuren, Kohlenhydrate

Salzbedarf mindestens 1.5M NaCl (=8.8%); die meisten Stämme wachsen am besten bei 3.5-4.5M NaCl (=20-26%)

T(Opt.)= 35-50°C

Bakteriorhodopsin (lichtgetriebene Protonenpumpe) vorhanden

##### Lebensraum:

Halobakterien sind an Standorten mit hohen Salzkonzentrationen weit verbreitet, d.h. in Salzseen, Soda-Seen, Salinen sowie in rohem Sonnensalz und proteinhaltigen, kräftig gesalzenen Produkten (Fisch, Felle).

Zur quantitativen Verbreitung: Sonnensalz kann  $10^5$ - $10^6$  lebende Halobakterien pro Gramm enthalten, die über viele Jahre hinweg unter Lagerbedingungen überleben; Salzseen können  $10^7$ - $10^8$  Zellen pro ml aufweisen.

##### Untergliederung:

A: pH(R)= 5-8, Mg<sup>2+</sup>-Bedarf >5mM : Halobacterium  
Haloarcula  
Haloferax  
Halococcus

B: pH(R)= 8.5-11, Mg<sup>2+</sup>-Bedarf <1mM : Natronobacterium  
Natronococcus

(3)

#### Genus: Halobacterium

##### Morphologie:

stäbchenförmig unter optimalen Bedingungen, pleomorphe Formen verbreitet; Zellteilung durch Zusammenziehen; Gram negativ; beweglich durch polares Geißelbüschel; keine Dauerformen

##### Physiologie:

überwiegend strikt aerob, einige fakultativ anaerob  
chemoorganotroph

c<sub>NaCl</sub>(R)= 3.0-5.2M; c<sub>NaCl</sub>(R)= 3.5-4.5M

T(R)= (15°-20°) - 55°C; T(Opt.)= 35°-50°C

pH(R)= 5.5-8.5



Wachstumsbedingungen:

Aminosäuren (die meisten Stämme sind proteolytisch),  
Mg<sup>2+</sup>-Bedarf: 0.1-0.5M in Komplex-Medium,  
0.005M in Meerwasser-Medium

Wachstumstimulierend: z.T.Kohlenhydrate, Vitamine  
anaerobes Wachstum auf Aminosäuren u. Kohlenhydraten  
g(aerob):3, meist 6-7h

Lebensraum:

streng neutrales Salzwasser, rohes Sonnensalz, gesalzene  
Produkte

(3)

Halobacterium salinarium

(umfaßt die Spezies H.halobium u. H.cutirubrum)

Morphologie:

stäbchenförmig, (0.5-1.0)x(1.0-26.0µm); beweglich durch  
Flagellenbüschel

Physiologie:

hauptsächlich aerob, anaerobes Wachstum entweder photo-  
troph in Gegenwart von Licht (->Bakteriorhodopsin) oder  
fermentativ in Gegenwart von Arginin

chemoorganotroph

c<sub>NaCl</sub>(Opt.)= 3.5-4.5M; gutes Wachstum auch in gesättigter  
NaCl-Lösung; c<sub>NaCl</sub>(Min.)= 3M

T(Opt.)= ca.50°C; T(R)= 20°-55°C

pH(R)= 5.5-8.0

Mg<sup>2+</sup>-Bedarf: 0.005-0.05M

Wachstumsbedarf: Aminosäuren

Wachstumstimulierend: Glycerol

Gelatine-Hydrolyse, Arginin-Dehydrolase vorhanden

G+C-Gehalt: 66-70.9mol% (gr. Komponente); 57-60 mol%  
(kleine Komponente)

Lebensraum:

proteinhaltige, stark mit rohem Sonnensalz gesalzene  
Produkte

H.halobium: aerobes Wachstum auf Glycerol, Pyruvat,

anaerobe Fermentation auf Glycerol,Pyruvat, Arginin

H.cutirubrum: aerobes Wachstum auf Glycerol, Lactat

(3,5)

Halobacterium denitrificans

Morphologie:

stark pleomorph auch scheibenförmige Stäbchen, (0.8-1.5)x  
(2-3µm); nicht beweglich

Physiologie:

fakultativ anaerob in Gegenwart von Nitrat und Nitrit  
(->N<sub>2</sub>-Entwicklung)

chemoorganotroph

C-Quellen: Glucose, Galactose, Fructose, Maltose, Sucrose,  
Acetat, Citrat, Fumarat, Glycerol, Lactat, α-  
Ketoglutarat, Malat, Succinat, Pyruvat,(  
->Zuckersäuren)

$c_{NaCl}(Opt.) = 2-3M$ ;  $c_{NaCl}(R) = 1.5-4.5M$   
 $T(Opt.) = 50^{\circ}C$ ;  $T(R) = 30^{\circ}-55^{\circ}C$   
Stärke -Hydrolyse, Gelatine-Verflüssigung  
Thiosulfat  $\rightarrow H_2S$   
kein Bedarf an Aminosäuren

**Lebensraum:**

San Francisco Bay Saline

(3)

**Halobacterium saccharovorum**

**Morphologie:**

stäbchenförmig,  $(0.6-1.2) \times 2.5\mu m$ , beweglich

**Physiologie:**

strikt aerob

chemoorganotroph

Substrate: verschiedene Zucker ( $\rightarrow$  Säuren)

$c_{NaCl}(Opt.) = 3.5-4.5M$ ;  $c_{NaCl}(R) = 1.5-5.2M$ ; Zellyse bei  $pH < 6$

$T(Opt.) = ca. 50^{\circ}C$ ;  $T(R) = 30-56^{\circ}C$

Bedarf an Aminosäuren

Bildung von Nitrit, aber keine Gasproduktion aus Nitrat

**Lebensraum:** marine Salinen

(3,11)

**Halobacterium sodomense**

**Morphologie:**

stäbchenförmig,  $0.5 \times (2.5-5\mu m)$ ; beweglich durch polares  
Flagellenbüschel

**Physiologie:**

strikt aerob

chemoorganotroph

$c_{NaCl}(Opt.) = 1.7-2.5M$  (i.G.  $0.6-1.2M Mg^{2+}$ )

$c_{NaCl}(R) = 0.5$  (i.G.  $1.5-2M Mg^{2+}$ )  $-4.3M$

$Mg^{2+}$ -Bedarf:  $0.005M$ ;  $c(Opt.) = 0.6-1.2M$  (i.G.  $2M NaCl$ )

$T(Opt.) = ca. 40^{\circ}C$ ;  $T(R) = 20-50^{\circ}C$

Wachstumsbedingungen: Aminosäuren, Stärke oder  
Schlüsselmineralien

schwache Nitrat-Reduktion zu Nitrit, aber kein anaerobes  
Wachstum mit Nitrat

**Lebensraum:** Totes Meer

(3,8)

**Halobacterium trapanicum**

**Morphologie:**

pleomorphe Stäbchen;  $(0.7-1.0) \times (1.5-3.0\mu m)$ , unbeweglich

**Physiologie:**

strikt aerob

chemoorganotroph, Zucker  $\rightarrow$  Säuren

Nitrat-Reduktion zu Nitrit

**Lebensraum:** Sonnensalz

(3)

### Gen. Haloarcula

#### **Morphologie:**

Stäbchen oder extrem pleomorph; Dauerformen unbekannt; Gram negativ; unbeweglich oder beweglich

#### **Physiologie:**

aerob oder fakultativ anaerob

chemoorganotroph

Substrate/C-Quellen: Zucker (->Zuckersäuren)

extrem halophil:  $c_{NaCl}(R)=2.0-5.2M$ ;  $c_{NaCl}(Opt.)=2.5M$

$T(R)=30^{\circ}-55^{\circ}C$ ;  $T(Opt.)=40^{\circ}-45^{\circ}C$

$Mg^{2+}$ -Bedarf: 0.005M

kein Bedarf an Aminosäuren

$H_2S$ -Produktion aus Cystein

anaerobes Wachstum auf KH, Arginin, Ornithin, Lysin

langsames Wachstum,  $g=ca.5h$

Oxidase- und Katalase-positiv

G+C-Gehalt: 61.9-64.7 mol%

#### **Lebensraum:**

thalassohaline und athalassohaline Gebiete einschließlich Totes Meer, Salz-Becken in Death Valley und marine Salinen

(3,5,12)

### Haloarcula vallismortis

#### **Morphologie:**

pleomorphe Stäbchen,  $(0.6-1.0) \times (3-5\mu m)$ ; beweglich

#### **Physiologie:**

möglicherweise fakultativ anaerob in Gegenwart von Nitrat  
(-> Gas)

Substrate: Glucose, Fructose, Galactose, Sucrose, Maltose, Trehalose, Glycerol, Gluconat (-> Zuckersäuren)  
Sorbitol, Pyruvat

$T(R)=20^{\circ}-45^{\circ}C$ ;  $T(Opt.)=40^{\circ}C$

$pH(R)=5.5-8.5$ ;  $pH(Opt.)=7.4-7.5$

$c_{NaCl}(Min.)=2.5M$ ;  $c_{NaCl}(Opt.)=4.3M$

$Mg^{2+}$ -Bedarf: 0.005M

anaerobe Fermentation auf Glucose, Fructose, Glycerol, Pyruvat

Indol-Produktion, Stärke-Hydrolyse

$H_2S$ -Produktion aus Cystein und Thiosulfat

Reduktion von Nitrat und Nitrit mit Gasbildung

G+C-Gehalt: 64.7 mol%

(2,3,5,12)

### Haloarcula hispanica

#### **Morphologie:**

kleine, pleomorphe Stäbchen,  $(0.5-1.0) \times 0.3\mu m$ ; beweglich durch polare Geißel

**Physiologie:**

möglicherweise fakultativ anaerob in Gegenwart von Nitrat  
Substrate: Glucose, Lactose, Sucrose, Glycerol, Mannitol,  
Sorbitol, Acetat, Citrat, Lactat, Malat,  
Pyruvat, Succinat, Arginin, Glutamin, Lysin  
(-> Zuckersäuren)

T(R)= 25°-50°C; T(Opt.)= 35°-40°C

c<sub>NaCl</sub>(R)= 0.005-5.2M

Stärke-, ev.auch Casein-Hydrolyse

**Lebensraum:**

marine Salinen in Spanien

(3)

**Existente, aber kaum beschriebene Spezies:**

*Halobacterium marismortui* (aerobes Wachstum auf: Zuckern,  
Glycerol, Propionat, Mannitol, Sorbitol, Pyruvat, Acetat,  
Succinat, Citrat; anaerobe Fermentation auf Glucose,  
Fructose, Glycerol, Pyruvat)

*Haloarcula californiae*, (lipolytisch, Thiosulfat->H<sub>2</sub>S;  
Nitratreduktion); *Haloarcula sinaiensis*, *Amoebobacter*  
*morrhuae* (Sulfid-negativ)

(3,5)

**Gen.Haloferax**

**Morphologie:**

extrem pleomorph; Dauerformen unbekannt; Gram negativ;  
beweglich

**Physiologie:**

strikt aerob

chemoorganotroph

Substrate: Zucker ( ->Zuckersäuren)

extrem halophil: c<sub>NaCl</sub>(R)= 1.5-4.5M; c<sub>NaCl</sub>(Opt.)= 2.5M  
Zellyse bei 0.51M NaCl

T(R)= 30°-55°C; T(Opt.)= 35°C

Mg<sup>2+</sup>-Bedarf: 0.01-0.02M

kein Bedarf an Aminosäuren

unter bestimmten Bedingungen PHB-Akkumulation

H<sub>2</sub>S-Produktion aus Cystein

Oxidase- und Katalase-positiv.

**Lebensraum:**

Totes Meer, Thallasohaline Salinen

(3,12)

**Haloferax volcanii**

**Morphologie:**

extrem pleomorph, beweglich, aber Geißeln noch nicht  
entdeckt; Lysis in hypotonem Medium

**Physiologie:**

strikt aerob

chemoorganotrophes Wachstum auf Zuckern, Glycerol, Pyruvat,  
Acetat, Succinat

c<sub>NaCl</sub>(Opt.)= 1.5-2.5M (bei 30-40°C); c<sub>NaCl</sub>(R)= ca.1-5M

c<sub>Mg</sub>(Opt.)= 0.2M; c<sub>Mg</sub>(R)= 0.02-(>1.5)M

T(Opt.)= 45°C

anaerobe Fermentation auf Glucose, Fructose, Glycerol,  
Pyruvat, Acetat  
H<sub>2</sub>S-Produktion aus Thiosulfat und Cystein  
Nitrat-Reduktion zu Nitrit, aber kein anaerobes Wachstum

**Lebensraum:** Totes Meer  
(3,5,7)

### Haloferax mediterranei

**Morphologie:**

pleomorphe Stäbchen, 0.5x 2µm, beweglich durch polares  
Flagellenbüschel

**Physiologie:**

chemoorganotroph  
strikt aerob im Dunkeln  
Substrate: hauptsächlich Zucker + Malat, Succinat, Lactat,  
Pyruvat, Citrat, Acetat, Glutamat, Lysin,  
Arginin, KH, Polyalkohole, organische Säuren, As  
Nitrat- + Nitrit-Reduktion zu N<sub>2</sub>  
keine H<sub>2</sub>S-Produktion  
produziert Bakteriozine (Halozine) aktiv gegen eine Reihe  
anderer Halobakterien  
Temp.: r.: 25-45°C; opt.: 35-37°C  
pH: opt.: 6.5; min.: 5  
NaCl-Toleranz: 1-5.2M (opt.: 20%), Ca<sup>2+</sup>: min.: 0.02M; Lyse  
bei <3% Totalsalzgehalt

**Lebensraum:**  
marine Salinen in Spanien  
(3,9)

### Haloferax gibbonsii

**Morphologie:**

kurze pleomorphe Stäbchen, 0.5 x 0.5-2.5µm, beweglich durch  
Flagellenbüschel

**Physiologie:**

chemoorganotroph  
Substrate: Zucker  
cNaCl: r.: 1.5-5.2M, opt.: 3-4M (40°C), 2-3M (30°C)  
Temp.: r.: 25-55°C, opt.: 37°C  
Mg<sup>2+</sup>-Bedarf: 0.2M  
produziert H<sub>2</sub>S aus Thiosulfat

**Lebensraum:**  
wie H.mediterranei  
(3)

### Halococcus saccharolyticus

#### Morphologie:

Kokken,  $\varnothing$  0.8-1.5 $\mu$ m, in Paaren, Tetraden, Sarcina-Paketen oder unregelmäßigen Clustern, Gram-negativ, nicht beweglich

#### Physiologie:

strikt aerob

Substrate: N-Acetylglucosamin, Amygdalin, D-Fruktose, D-Glucose, Maltose, Lactose, D-Mannose, D-Salicin, Trehalose, Adonitol, Ethanol, Erythritol, DL-Glycerol, myo-Inositol, D-Mannitol, Propanol, D-Sorbitol, Acetat, cis-Aconitat, S-Aminovalerat, Butyrat, Fumarat, D-Gluconat, D-Glucuronat, Hippurat, DL-Lactat, DL-Malat, Pyruvat, Propionat, Quinat, D-Saccharat oder Succinat

D-Glucose -> Säure

Lactose, D-Mannitol, Sucrose -> keine Säure

Temp.: r.: 28-42°C; opt.: 37-40°C

pH: r.: 6.0-8.0

mwac1: r.: 15% bis Sättigung; opt.: 25% (37°C)

Mg<sup>2+</sup>-Bedarf: 4%

Selenit wird reduziert

H<sub>2</sub>S aus Cystein, nicht aus Thiosulfat

anaerobes Wachstum auf Arginin, Ornithin Lysin (Genus Angabe)

Nitrat -> Nitrit

N-Quelle: As (auch gleichzeitig als Energie-Quelle)

#### Lebensraum:

marine Salinen

(5,6)

### Halococcus morrhuae

#### Morphologie:

Kokkus, 0.8-1.5 $\mu$ m  $\varnothing$ ; in Paaren, Tetraden, Sarcina-Paketen, oder unregelmäßigen Clustern; überwiegend Gram negativ; nicht beweglich

#### Physiologie:

strikt aerob

chemoorganotroph

Substrate: As, Glucose

mwac1: min.: 2.5M; opt.: 3.5-4.5M

Temp.: opt.: 30°-37°C

pH: r.: 5.5-<8; opt.: 7.2

Wachstumsbedarf: As

produziert H<sub>2</sub>S aus Thiosulfat und oft aus Cystein

anaerobes Wachstum auf Arginin, Ornithin, Lysin (Genus Angabe)

Nitrat -> Nitrit

G+C: 61-66 mol%

(3,5)

### Gen. Natronobacterium

#### **Morphologie:**

(unter bestimmten Kulturbedingungen) Stäbchen, 0.5-1.0 x 2-15µm; keine Dauerformen, Gram negativ, z.T. beweglich durch polares Geißelbüschel, Lysis in hypotonen Lösungen

#### **Physiologie:**

strikt aerob  
chemoorganotroph  
C-Quelle: Casaminosäure, KH  
N-Quelle: Casaminosäure, Glutamat  
extrem halophil: c<sub>NaCl</sub>:r.: 2-5.2M; opt.: 3.5M  
Temp: r.: 20°/25°-50°C; opt.: 37°-45°C  
alkaliphil, mit obligatem Bedarf an Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> :  
pH:r.: 8.5-11.0; opt.: 8.5-9.5  
Mg<sup>2+</sup>-Bedarf: <0.01M  
Oxidase-/Katalase- positiv

#### **Lebensraum:**

hochsaline Soda-Seen und ihre Salz-Krusten

(3,10)

### Natronobacterium gregoryi

#### **Morphologie:**

lange, dicke unbewegliche Stäbchen, 0.7 x 10-15µm (in flüssigen Medien), kugelförmig in festen Medien, Zellyse in hypotonen Medien (<1.5M NaCl)

#### **Physiologie:**

chemoorganotroph  
strikt aerob  
Substrate: Zucker wie Ribose, Fruktose, Glucose, Mannitol, Sucrose  
Temp.: r.: 25-40°C; opt.: 37-40°C  
pH: opt.: 9.5; min.: 8.5; obligater Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Bedarf  
c<sub>NaCl</sub>: r.: 12-30%; opt.: 17.5%  
N-Quelle: Casaminosäure  
produziert H<sub>2</sub>S aus Thiosulfat  
keine Reduktion von Nitrat oder Nitrit

(3,10)

### Natronobacterium magadii

#### **Morphologie:**

kurze Stäbchen, 0.7-0.9 x 2-4µm (in flüssigen Medien), kugelförmig (in festen Medien), beweglich durch polares Flagellenbüschel, Lysis in hypotonen Medien

#### **Physiologie:**

Substrate: keine Zucker  
Wachstumsstimulierend: Acetat  
Temp.: r.: 20-50°C; opt.: 37-40°C  
pH: opt.: 9.5, obligater Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Bedarf  
c<sub>NaCl</sub>: r.: 12-30%; opt.: 20%  
N-Quelle: Casaminosäure  
produziert H<sub>2</sub>S aus Thiosulfat  
keine Nitrat-/Nitrit-Reduktion

(3,10)

### Natronobacterium pharaonis

#### Morphologie:

kurze Stäbchen, 0.8X 1-3µm (in flüssigen Medien), in festen Medien: kugelförmig; beweglich durch polares Geißelbüschel; Lysis in hypotonen Medien

#### Physiologie:

strikt aerob

Substrate: Pyruvat, Fumarat, Formiat, Butyrat (alle, wenn Glutamat als N-Quelle dient); keine Zucker

Temp.: r.: 25-50°C; opt.: 45°C (leicht thermophil)

pH: opt.: 8.5-9.0

NaCl: r.: 12-30%; opt.: 20%; min.: 9.0% ;

Mg<sup>2+</sup>-Bedarf: <0.01M

N-Quelle: Casaminosäure, Glutamat; nicht: Nitrat, Ammonium  
produziert H<sub>2</sub>S aus Thiosulfat

Nitrat-Reduktion zu Nitrit

#### Lebensraum:

hochsaline alkalische Seen, Soda-Seen und ihre Salz-Krusten

(1,3,10)

### Natronococcus occultus

#### Morphologie:

Kokken, ø 1-2µm, in refraktilen, unregelmäßigen Clustern, auch paarweise und einzeln; keine Dauerformen; Gram variabel, nicht beweglich

#### Physiologie:

strikt aerob

chemoorganotroph

extrem halophil: NaCl: r.: 8-30%; opt.: 20-22% bei 37°C

Temp.: r.: 20°/25°-45°C; opt.: 35°-40°C

alkaliphil: pH: r.: 8.5-11.0; opt.: 9.5

Wachstumsstimulierend: Glucose, Ribose, Sucrose, Xylose

N-Quelle: Casaminosäure

H<sub>2</sub>S-Produktion aus Cystein

Nitrat-Reduktion zu Nitrit

Oxidase-, Katalase- positiv

#### Lebensraum:

hochsaline Soda-Seen

(3,10)



## 2.9 Halophile anaerobe Eubakterien

### Clostridium lortetii

#### Morphologie:

Stäbchen, 2.5-10 x 0.5-0.6µm mit abgerundeten Enden, beweglich durch peritriche Geißel; Sporen rund, terminal mit anhängenden Gas-Vakuolen; Gram negativ

#### Physiologie:

obligat anaerob

Gärung, Gärungsprodukte: Acetat, Propionat, n-Butyrat, Iso-Butyrat, Isovalerat, H<sub>2</sub>

Sulfid-Bildung aus Cystein

gutes Wachstum in Medium mit Glutaminsäure, Hefeextrakt, nutrient broth, Casaminosäuren

Wachstumsstimulierend: KH (Glucose, Fructose, Maltose, Sucrose, Stärke)

halophil,  $c_{NaCl}$  : r.: 0.7-2.5M; opt.: 1-2M

copt. (2-wertige Kationen): 20mM

Temp.: opt.: 37-45°C; 37° (bei 1.4-1.5M NaCl)/45° (bei 1.7M;)

max: 55°C

#### Lebensraum:

Sedimente im Toten Meer

(1)

### Haloanaerobiaceae

#### Morphologie:

Gram-negative Stäbchen, nicht beweglich oder beweglich durch peritriche Flagellen, keine Sporenbildung

#### Physiologie:

chemoorganotroph

obligat anaerob

halophil, opt. Wachstum bei  $c_{NaCl}$ : 2-3M

(3)

### Haloanaerobium praevalens

#### Morphologie:

gerade Stäbchen, 1-2.4µm, Gram-negativ, nicht beweglich, keine Sporen

#### Physiologie:

obligat anaerob

chemoorganotroph

Gärung, Hauptgärungsprodukte von Glucose: Butyrat, Acetat, Propionat, H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>

Methylmercaptan aus Methioninabbau, keine Reduktion von Sulfat, Nitrat oder Fumarat

Substrate: KH, Pecton, Aminosäuren, Trypticase, n-Acetylglucosamin

obligat halophil;  $c_{NaCl}$ : opt.: 12.5%, kein Wachstum bei  $c < 2\%$  /  $> 30\%$  Salz; g (25% NaCl): 7h

Temp.: r.: 5-60°C; opt.: 37°C

pH: r.: 6.0-9.0; opt.: 7.0-7.4

**Lebensraum:**

Sedimente und anoxisches Wasser, assoziiert mit hypersalinen aquatischen Ökosystemen

(4)

**Halobacteroides**

**Morphologie:**

flexible, nicht sporenbildende Stäbchen, Gram negative Eubakterien, beweglich durch peritriche Flagellen

**Physiologie:**

obligat anaerob

Gärung, Substrate: KH und einige organische Säuren, z.B. Glucose -> EtOH, Acetat, CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>

keine Sulfid-Produktion

halophil: cwac1: opt.: 1.5-2.5M: bei 37°-42°C(mit g=1h);

Bedarf: 1.4-2.8M

(2)

**Halobacteroides halobius**

**Morphologie:**

lange Stäbchen, 10-20 x 0.5µm,  
in älteren Kulturen: kugelförmig

**Physiologie:**

obligat anaerob, ev. aerotolerant

Gärung; Substrate: Glucose, Fructose, Sucrose, Maltose, Raffinose, Stärke, Galactose, Pyruvat

Wachstumsbedarf: Biotin, p-Aminobenzoat

Mg<sup>2+</sup>-Toleranz: ≥1M

Temp.: opt.: 37-45°C; max.: 50°C

g(min): bei 41°C, 1.5M NaCl: 55min

pH: min.: <5

keine Nitrat Reduktion zu Nitrit

3. Tabellarische Zusammenfassung der beschriebenen Bakterien mit den wichtigsten Eigenschaften - Tabelle 1

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp.	pH	cNaCl	Gas/Bes.
<b>Thiobacillus</b>						
denitrificans	fAn	olitho	o28-32°	o6.8-7.4	*	vCO <sub>2</sub> /pN <sub>2</sub>
ein Stamm			o30°	o7.5-8.0		
neapolitanus	oA	olitho	r8-37°	r3.0-8.5	hoch	vCO <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> S
novellus	oA	flitho	o30°	r5.0-9.2	*	vCO <sub>2</sub>
thioparus	oA	olitho	o28°	r4.5-7.8	*	vCO <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> S
einige St.				bis 10.0		
intermedius	oA	flitho	o30°	r1.9-7.0	*	vCO <sub>2</sub>
perometabolis	oA	flitho	o30°	r2.8-6.8	*	vCO <sub>2</sub>
thiooxidans	oA	olitho	r10-37°	r0.5-6.0	*	vCO <sub>2</sub>
ferrooxidans	oA	o/flitho	r10-37°	r1.3-6.0	*	oxFe <sup>2+</sup>
acidophilus	A	flitho	meso.	o2.0-4.5	*	vCO <sub>2</sub>
organoparus	siehe T. acidophilus					
delicatus	fA	flitho	r15-42°	r5.0-7.0	*	vCO <sub>2</sub>
prosperus	oA	olitho	o37-41°	r1-4.5	0-3.5	vCO <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> S
einige St.			-45°		t6.0	
versutus	fAn	flitho	r17-40°	r6.5-9.5	*	vCO <sub>2</sub> /pN <sub>2</sub>
tepidarius	A	olitho	r20-52°	r5.2-8.0	*	vCO <sub>2</sub>
albertis	A	olitho	o28-30°	r2.0-4.5	*	vCO <sub>2</sub>
aquaesulis	fAn	*	o40-50°	o7.6-8.2	*	vCO <sub>2</sub>
Q	oA	flitho	o30-35°	r6.5-8.5	*	
sp. IV-85	*	litho	*	*	*	
thermophilica						
imshenetskii	oA	olitho	r40-80°	*	*	vCO <sub>2</sub>
<b>Thiomicrospira</b>						
pelophila	mA	olitho	o28-30°	o6.5-7.5	b1.5-3.0	vCO <sub>2</sub>
denitrificans	mA/fAn	olitho	o22°	o7.0	*	pN <sub>2</sub>
crunogena	oA/mA	olitho	r4-38.5°	r5.0-8.5	b	vCO <sub>2</sub>
sp.str.L-12	mA	olitho	r10-35°	r6.0-8.5	b	vN <sub>2</sub>
<b>Thiosphaera</b>						
pantotropha	fAn	flitho	r15-42°	r6.5-10.5	*	vCO <sub>2</sub>
<b>Acidiphilium</b>						
cryptum	A	oorgan	o31-41°	r2.5-5.9	*	
rubrum				r2.0-6.0		
angustum						
falsus						
organovorum						
<b>Thiobacterium</b>						
	*	*	-45°	*	*	
<b>Macromonas</b>						
mobilis	A	flitho	*	*	*	
bipunctata	oA	organ	o28°	o7.5-8.2	*	
<b>Thermotrix</b>						
thiopara	fAn	flitho	r60-80°	o6.7-7.1	*	pN <sub>2</sub>
<b>unbenannt</b>						
unbenannt	*	litho	-75°	weit	*	oxFe <sup>2+</sup>
unbenannt	*	flitho	o50°	r4.8-8.0	*	
<b>Sulfobacillus</b>						
thermosulfido-						
oxidans	oA	flitho	r28-60°	o1.9-2.4	*	Sporen

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp.	pH	cNaCl	Gas/Bes.
<b>Siderocapsa</b>	A	*	*	*	*	
treubii						
major						
monoica						
anulata						
geminata						
coronata	mA					
arlbergensis						
eusphaera						
hexagonata						vCO <sub>2</sub>
quadrata						
<b>Naumaniella</b>	A	*	*	*	*	
neustonica			psychro.			
minor			psychro.			
catenata			psychro.			
pygmaea			psychro.			
elliptica						
polymorpha						
<b>Siderococcus</b>	A	*	9-12°	6.2-7.0	*	
limoniticus						
<b>Orchrobium</b>	An	*	*	*	*	
tectum						
<b>Gallionella</b>	oA/mA	litho	r8-47°	6.0-6.7	*	vCO <sub>2</sub>
<b>Sphaerotilus</b>	mA	organ	r10-37°	o6.5-7.5	*	
natans						
<b>Lephotrix</b>	mA	vflitho	r10-35°	o6.5-7.5	*	
ochracea						
pseudo-						
ochracea						
discophora						
cholodnii						
lopholea						
shujae						
thermalis						
sideropous						
echinata						
major						
winogradskii						
pseudivacuolata						
volubilis						
epiphytica						

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp.	pH	cNaCl	Gas/Bes.
<b>Metallogenium</b> personatum symbioticum	A	organ	o28°	6.8-7.2	*	
<b>Hyphomicrobium</b>	A	organ	meso/45°	o >7	2.5	
<b>unbenannt</b>	oA	organ	*	2.6	*	
<b>Leptospirillum</b> ferrooxidans	*	litho	25-35°	*	*	vCO <sub>2</sub>
<b>ALV IBC14</b>	*	flitho	thermo	acido	*	vCO <sub>2</sub>
<b>unbenannt</b>	*	flitho	*	*	*	vCO <sub>2</sub>
<b>unbenannt</b>	*	olitho	*	2.0-4.5	*	vCO <sub>2</sub>
<b>unbenannt</b>	A	litho	*	2.0-3.0	*	vCO <sub>2</sub>
<b>unbenannt</b>	*	mixo	30-50°	*	*	vCO <sub>2</sub>
<b>Pseudomonas</b> manganoxidans						
<b>Thermophiler</b> thiobacillus	A	litho	58-86°	4.1-8.9	*	
<b>Bacteroides</b> hypermegas	An	organ	r25-45°	r4.8-8.6	t1.5	
<b>Clostridium</b> sticklandii	An	organ	r25-45°	6.0		
<b>Bacillus</b> megaterium	A/fAn	organ			t7.0	
<b>circulans</b>	A				t7.0	
<b>subtilis</b>	fAn			r5.5-8.5	t7.0	
<b>alvei</b>	fAn				t5.0	
<b>sphaericu</b>	A				t7.0	
<b>pumilus</b>	A				t7.0	
<b>polymyxa</b>	fAn				*	
<b>thuringiensis</b>	A				t7.0	
<b>Mycobacterium</b> smegantis	A	*	r28-45°	*	t	
<b>Agrobacterium</b> tumefaciens	A/fAn	organ	25-28°	*	*	

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp	pH	cNaCl	Gas/Bes.
<b>Alteromonas</b> putrefaciens	A	organ	20°	*	*	
<b>Aquaspirillum</b> itersonii	mA/fAn	org/litho	r12-42°	r5.5-9.0	*	
<b>Enterobacter</b> cloacae aerogenes	fAn	organ	o37°			
<b>Micrococcus</b> roseus	A	organ	o25-37° 25-35	*	t t7.5	
<b>Serratia</b> marcescens	fAn	organ	r10-36°	r5.0-9.0	t4.0	
<b>Pseudomonas</b> sp.GS-15	An	organ	r30-35°	o6.7-7.0	*	
unbenannt	fAn	organ	o30°	*	*	
unbenannt	fAn	litho	*	*	*	vCO <sub>2</sub>
<b>Bacillus</b> 29	fAn	organ	25°	*	t10.0	
unbenannt	fAn	flitho	*	*	*	
<b>Paracoccus</b> denitrificans	fAn	organ /flitho	r5-37°	*	*	vCO <sub>2</sub>
halo- denitrificans	fAn	organ	r0-32°	*	t4M	

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp.	pH	cNaCl	Gas/Bes.
<b>Pseudomonas</b>						
fluorescens	fAn	organ	o25-30°	*	*	*
chlororaphis	fAn	organ	o30°	*	*	*
aureofaciens	fAn	organ	o30°	*	*	*
pseudo-						
alcaligenes	fAn	organ	o35°	*	*	*
pseudomallei	fAn	organ	o37°	*	*	*
caryophylli	fAn	organ	o30-37°	*	*	*
mallei	fAn	organ	o37°	*	*	*
pichettii	fAn	organ	o35°	*	*	*
solanacearum	fAn	organ	*	*	*	*
lemoinei	fAn	organ	*	*	*	*
aeruginosa	fAn	organ	o37°	*	*	*
stutzeri	fAn	organ	35-43°	*	*	*
mendocina	fAn	organ	o35°	*	*	*
alcaligenes	A	organ	o35°	*	*	*
<b>Moraxella</b>	fAn	*	o33-35°	*	*	*
<b>Neisseria</b>	fAn	organ	r22-40°	*	*	*
<b>Flavobacterium</b>	fAn	organ	r5-42°	*	*	*
<b>Corynebacterium</b>	fAn	organ	r30-37°	*	*	*
<b>Wolinella</b>						
succinogenes	An	litho	37°	*	*	*
<b>Campylobacter</b>						
fetus	mA	organ	*	-9.0	*	*
jeguni			37°	o7.0	u3.5	*
sputorum	mA/An		-45°		*	*
sub.bubulus			-45.5	-7.0	u3.5	t3.5

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp.	pH	cNaCl	Gas/Bes
<b>Vibrio</b>						
fischeri	fAn	organ	30/35°	*	t	
<b>Citrobacter</b>	fAn	organ	*	*	*	
freundii						pH <sub>2</sub> S
amalonaticus						
<b>Klebsiella</b>	fAn	organ	*	*	*	
pneumoniae						
<b>Azotobacter</b>	A	*	*	r4.8-8.5	t1.0	
chroococcum			r18-32/37°	r6.5-10.0		
vinelandii			r14-37°	r6.0-10.0		
<b>Azomonas</b>						
agilis	A	organ	r14-37°	r6.5-10.0	t1.0	
<b>Veillonella</b>						
parvula	An	organ	o30-37°	o6.5-8.0	u4.0	
<b>Clostridium</b>						
perfringens	oAn	organ	r20-50°	r5.5-8.0	u6.5	
KDH S2						
<b>Bacillus</b>						
cerus	fAn	organ	r10-40°	5.7/6.8	t7.0	
licheniformis	fAn	organ	30-35°	5.7/6.8	t7.0	
stearo-						
thermophilus	fAn	organ	40-65°	6.0/6.5	*	
<b>Escherichia</b>						
coli	fAn	organ	o37°	*	*	
<b>Selenomonas sp.</b>	oAn	organ	*	*	*	
<b>Propioni-</b>						
<b>bacterium</b>						
acediprop-						
ionicus	An	organ	o30-37°	4.1-4.9	*	
<b>Bradyrhizobium</b>						
japonicum	A	litho	o25-30	o6.0-7.0	*	
<b>Salmonella</b>						
thyphimurium	fAn	organ	*	4.5-7.5	*	
<b>Staphylococcus</b>						
aureus	fAn	organ	r14-45°	r4.2-9.3	t15.0	
epidermis	fAn	organ	r15-45°	*	t10.0	



Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp	pH	cNaCl	Gas/Bes.
<b>Desulfovibrio</b>	oAn	organ	r0-44°	*	*	pH <sub>2</sub> S, p+
desulfuricans			-45°		*	
d.aestuarii					t>10.0	
vulgaris		flitho	-45°		*	
salexigens		organ	-45°		b-5.0	
africanus			-40°		st	
gigas			-40°		t	
baculatus			r2-41°		*	
saprovorans			r15-38°	r6.5-9.3	*	
baarsii			r20-43°	r6.5-8.2	t	
thermophilus			r45-85°	*	*	
fructosovorans			o35°	o6.5-7.0	t4.0	
carbinolicus			*	*	*	
MB6			o32°	o6.5		
unbenannt a			*	*	t19.0	
unbenannt b			*	*	t10.0	
unbenannt c			*	*	t8.0	
unbenannt d			*	*	t10.0	
unbenannt e			*	*	t10.0	
sp.10455			*	*	t2.5	
unbenannt g			*	*	t2.5	
sulfodismutans			r15-45°	r6.8-8.2	*	
simplex			>15-<45	o7.0	<1.8	
"rubentschikii"		ähnlich D.desulfuricans				
"Desulboristella						
hydrocarbono-						
blastica			30°	*	*	
<b>Desulfonema</b>						
limicola	oAn	flitho	r15-36°	r6.5-8.8	t	
magnum	oAn	flitho	r15-37°	r6.6-7.5	t	
<b>Desulfuromonas</b>						pH <sub>2</sub> S
acetoxidans	oAn	organ	o30°	r6.5-8.5	b≥2.0	
"acetexigens"	oAn	organ	o30°	r6.5-8.5	*	
<b>Desulfomonas</b>						
pigra	oAn	organ	*	*	*	pH <sub>2</sub> S
<b>Desulfococcus</b>						pH <sub>2</sub> S
multivorans	oAn	organ	o35°	*	t	
niacini	oAn	litho	r15-37°	r6.5-8.3	b≥1.2	vCO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
<b>Desulfobacterium</b>						pH <sub>2</sub> S
indolicum	oAn	organ	*	*	b2.0	
phenolicum	oAn	organ	*	*	b≥2.0	pNH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
catecholicum	oAn	flitho	o28°	o6.9-7.1	b<0.5	vCO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
autotrophicum	oAn	flitho	o25-28°	o6.7	b2.0	vCO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
anilini	oAn	organ	o35°	o6.9-7.5	o1.4	
<b>Desulfobacter</b>						pH <sub>2</sub> S
postgatei	oAn	organ	r10-37°	r6.2-8.5	b2.0	vN <sub>2</sub>
hydrogeno-						
philus	oAn	flitho	r0-35°	r5.3-7.9	b2.0	vCO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
latus	oAn	organ	o29-32°	o7.0-7.3	b2.0	vN <sub>2</sub>
curvatus	oAn	organ	o28.31°	o6.8-7.2	b>0.07	vN <sub>2</sub>

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp	pH	cNaCl	Gas/Bes
<b>Desulfobulbus</b>						pH <sub>2</sub> S
propionicus	oAn	org/mixo	r10-43°	r6.0-8.6	b	vCO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
elongatus	oAn	org/mixo	r20-40°	r6.0-7.8	*	vCO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
<b>Desulfosarcina</b>						pH <sub>2</sub> S
variabilis	oAn	flitho	r15-38°	r6.7-9.0	>1.0	vCO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
<b>Desulfotomaculum</b>						pH <sub>2</sub> S, Spo
nigrificans	oAn	organ	r45-70°	*	*	vCO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
salinus	oAn	organ	r40-70°	*	-4.0	
ruminis	oAn	flitho	r30-48°	*	*	vN <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
orientis	oAn	flitho	r30-42°	*	*	vCO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
antarcticum	oAn	organ	o20-30°	*	o2.5	
acetoxidans	oAn	organ	r20-40°	r6.6-7.6	o-2.0	
<b>Thermodesulfo-</b> <b>bacterium</b>						
commune	oAn	organ	r45-85°	r6.0-8.0	<2.0	
<b>Pyrococcus</b>						pH <sub>2</sub> S
furiosus	oAn	organ	r70-103	r5.0-9.0	t-5.0	
woesei	oAn	organ	<104.8°	o6.0-6.5	o3.0	
<b>Thermoproteus</b>						pH <sub>2</sub> S
tenax	oAn	flitho	r80≥96°	r2.5-6.0	*	vCO <sub>2</sub>
neutrophilus	An	flitho	o85°	r≤7.0	*	vCO <sub>2</sub>
<b>Thermopfilum</b>						pH <sub>2</sub> S
pendens	An	organ	≤95°	r4-6.5	*	
<b>Desulfurococcus</b>						pH <sub>2</sub> S
mucosus	An	organ	o85°	r4.5-7.0	*	
mobilis	An	organ	o85°	*	*	
<b>Staphylothermus</b>						pH <sub>2</sub> S
marinus	oAn	organ	r65-98°	r4.5-8.5	t-3.5	
<b>Pyrodictum</b>						pH <sub>2</sub> S, vH <sub>2</sub>
occultum	oAn	litho	r82-110	r5.0-7.0	t-12.0	vCO <sub>2</sub>
brockii	oAn	litho	r82-110	r5.0-7.0	t-12.0	vCO <sub>2</sub>
<b>Thermodiscus</b>	*	organ	o90°	*	t-4.0	
<b>Sulfolobus</b>						
solfataricus	A	flitho	r50-87°	r3.0-3.5	*	
acidocaldarius	A	flitho	r55-85°	r1.0-6.0	*	
<b>Acidianus</b>						pH <sub>2</sub> S, vCO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
infernus	fAn	olitho	r65-96°	r1.0-5.5	t-4.0	
brierleyi	fAn	olitho	r45-75°	r1.0-6.0	*	
<b>Desulfurolobus</b>						pH <sub>2</sub> S
ambivalens	fA	olitho	r -87°	r1.0-3.5	*	

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp.	pH	cNaCl	Gas/Bes.
<b>Pyrobaculum</b>						
islandicum	oAn	forgan	r74-102	r5.0-7.0	t-0.8	pH <sub>2</sub> S, vCO <sub>2</sub>
organotrophum	oAn	oorgan	r78-102	r5.0-7.0	t-0.5	pH <sub>2</sub> S
<b>NS-C</b>	oAn	organ	r55-98°	r6.0-8.5	o2.5	pH <sub>2</sub> S, Spo
<b>Archaeoglobus</b>						
fulgidus	oAn	flitho	r65-95°	r5.5-7.5	*	pH <sub>2</sub> S, vCO <sub>2</sub> pCH <sub>4</sub>
<b>Halobacterium</b>				r5.5-8.5		
salinarium	fAn	organ	r20-55°	r5.5-8.0	o-26.0	
saccharovorum	oA	organ	r30-56°	r>6.0	o-26.0	
sodomense	oA	organ	r20-50°	*	t-25.0	
trapanicum	oA	organ	*	*	o≥20.0	
denitrificans	fAn	organ	r30-55°	*	t-26.0	
<b>Haloarcula</b>						
vallismortis	fAn	organ	r20-45°	r5.5-8.5	o25.0	
hispanica	fAn	organ	r25-50°	*	t-30.0	
<b>Haloferax</b>						
gibbonsii	oA	organ	r25-55°	*	t-30.0	
mediterranei	oA	organ	r25-45°	o6.5	t-30.0	
volcanii	oA	organ	o45°	*	o-14.6	
<b>Halococcus</b>						
morrhuae	oA	organ	o30-37°	r<8.0	o-26.0	
saccharo- lyticus	oA	organ	r28-42°	r6.0-8.0	t-30%	
<b>Natrono- bacterium</b>						
gregoryi	oA	organ	r20-50°	r8.5->9.5	t-30.0	
magadii	oA	organ	r20-50°	o9.5	t-30.0	
pharaonis	oA	organ	r25-50	o8.5-9.0	t-30.0	
<b>Natrono- coccus</b>						
occultus	oA	organ	r20-45°	r8.5-11.0	t-30.0	
<b>Thermoplasma</b>						
acidophilum	fA	organ	r45-63	r0.5-4.0	t-4.0	pH <sub>2</sub> S
volcanium	fA	organ	r33-67°	r1.0-4.0	t-4.0	
<b>Thermococcus</b>						
celer	oAn	organ	o88°	o5.8	o3.8	pH <sub>2</sub> S

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp.	pH	cNaCl	Gas/Bes.
<b>Methanobacterium</b>						vCO <sub>2</sub> , pCH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S
formicium	oAn	litho	r10-50°	r6.5-8.5	*	
thermo-						
autotrophicum	oAn	litho	r40-75°	r6.0-8.8	*	
wolfei	oAn	litho	r37-76°	r6.0-8.2	t<2.0	
uliginosum	oAn	litho	r15-45°	r6.0-8.5	*	
alcaliphilum	oAn	litho	o37°	o8.1-9.1	*	
thermo-						
formicium	oAn	litho	r40-65°	r6.0-8.7	*	
ivanovii	oAn	litho	o45°	r6.5-8.2	*	
thermo-						
aggregans	oAn	litho	r40-75°	r6.5-9.0	t≤2.0	
palustre	oAn	litho	r20-45°	o7.0	t-1.8	
bryantii	oAn	litho	o37-39°	o6.9-7.2	*	
thermalcaliphilum	oAn	litho	r40-69°	r6.5-10.0	t<2.0	
<b>Methanobrevibacter</b>						vCO <sub>2</sub> , pCH <sub>4</sub>
ruminantium	oAn	litho	r33-45°	r6.0-8.0	*	
smithii	oAn	litho	r30-45°	*	*	
arbori-						
philicus	oAn	litho	r10-45°	r6.4-8.6	*	
<b>Methanothermus</b>						vCO <sub>2</sub> , pCH <sub>4</sub> , pH <sub>2</sub> S
fervidus	oAn	litho	r55-97°	o6.5	*	
sociabilis	oAn	litho	r55-97°	o6.5	*	
<b>Methanococcus</b>						o-4.0 vCO <sub>2</sub> , pCH <sub>4</sub>
vanniellii	oAn	litho	r20-40°	r7.0-9.0		
voltae	oAn	litho	r20-45°	r6.5-8.0	o2.0	
maripaludis	oAn	litho	r20-45°	r6.5-8.0		vN <sub>2</sub>
thermolitho-						
trophicus	oAn	litho	r30-70°	r6.5-8.0	t-8.3	vN <sub>2</sub>
jannaschii	oAn	litho	r50-86°	r5.0-7.0	o2.5	
halophilus	oAn	organ	o26-36°	o6.5-7.4	o-9.0	
frisius	oAn	litho	r22-42°	o6.5-7.2	o2.0	
aeolicus	oAn	litho	*	*	*	vN <sub>2</sub>
deltae	oAn	litho	r30-45°	*	o-4.0	
<b>Methanomicrobium</b>						pCH <sub>4</sub>
mobile	oAn	litho	r30-45°	r5.9-7.7	*	
paynteri	oAn	litho	r25-42°	r6.6-7.3	-5.0	
<b>Methanospirillum</b>						
hungatei	oAn	litho	o30-37°	o6.6-7.4	t	pCH <sub>4</sub>
<b>Methanogenium</b>						b pCH <sub>4</sub>
cariaci	oAn	litho	<15-<65	o6.8-7.3	o3.0	
marisnigri	oAn	litho	<15-<65	o6.2-6.6	o0.6	
thermophilicum	oAn	litho	r37-65°	r6.2-7.8	o1.2	
olentangyi	oAn	litho	r30-45°	*	o1.0	
tationis	oAn	litho	r25-45°	r6.3-8.8	o0.6	
aggregans	oAn	litho	o35°	o6.5-7.0	b<0.2	
bourgense	oAn	litho	o37°	r5.5-8.0	o0.1	
frittonii	oAn	litho	r26-62	r6.0-8.25	≤2.0	
organophilum	oAn	litho	o30-35°	r6.4-7.3	b2.0	

Spezies	an/aerob	chemotroph	Temp.	pH	cNaCl	Gas/Bes.
<b>Methanosarcina</b>						pCH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S vN <sub>2</sub>
barkeri	oAn	litho	o30-50°	o7.0	*	
mazei	oAn	litho	r30-40°	r5.5-8.0	*	
acetivorans	oAn	organ	>10-<50	r5.5-8.0	o1.2	
thermophila	oAn	litho	<35-55°	r5.5-8.0	*	
vacuolata	oAn	litho	r18-45°	r6.0-8.0		
<b>Methanobolus</b>						pCH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S
tindarius	oAn	organ	r10-40°	r5.5-8.0	-7.0	
siciliae	oAn	organ	r20-48°	*	*	
vulcani	oAn	organ	r15-45°	*	*	
<b>Methanotrix</b>	at					vCO <sub>2</sub> , pCH <sub>4</sub>
soehngeni	oAn	organ	o35-40°	r6.8-8.2	*	
concilii	oAn	organ	o37-40°	o7.1-7.5	*	
thermo- acetophila	oAn	organ	r50-70	>5.5-<8.4	*	
<b>Methanococcoides</b>						
methylutens	oAn	organ	r15-35°	o7.0-7.5	o-3.5	
<b>Methanoplanus</b>						b-6.0 pH <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub>
limicola	oAn	litho	r17-41°	o7.0	o1.0	
endosymbiosus	oAn	litho	r16-36°	o7.0	o1.5	
<b>Methanosphaera</b>						
stadtmanae	oAn	organ	r30-40°	o6.5-6.9	*	vCO <sub>2</sub> , pH <sub>2</sub> S
<b>Methanocorpusculum</b>						vCO <sub>2</sub>
sinense	oAn	organ	r15-45°	o7.0	b0.0	
bavaricum	oAn	organ	r15-45°	o7.0	*	
parvum	oAn	organ	r15-45°	o6.8-7.5	*	
labreanum	oAn	organ	o37°	r6.5-7.5	o-1.5	
<b>Methanohalophilus</b>						
mahii	oAn	organ	r≤45°	o7.5	o12.0	
<b>Halobacteroides</b>						
halobius	oAn	organ	<37-50°	*	b16.0	
<b>Haloanaerobium</b>						
praevalens	oAn	organ	r5-60°	r6.0-9.0	t-30.0	
<b>Clostridium</b>						
lortetii	oAn	organ	<37-55°	*	t-14.6	Spo

#### Legende:

f=fakultativ      litho=lithotroph      t=Bedarf  
 o=obligat      organ=organotroph      b=Bedarf  
 A=aerob      mixo=mixotroph      o(bei Temp./cNaCl)=optimal  
 An=anaerob      v=verbraucht      r=Toleranzbereich  
 mA=mikroaerophil      p=produziert      spo=Sporenbildung  
 \*=keine Angaben      at=aerotolerant      cNaCl= in %  
 z.B.: o-1.5: optimales Wachstum bis cNaCl=1.5%

4.

Relevante Umweltbedingungen im Endlager Konrad

**i. Betriebsphase**

Temperatur: 30°-40°C  
pH: ≥8-10  
Druck: Atmosphärendruck  
O<sub>2</sub>: aerob / ev. anaerobe Mikrostandorte [> ermöglichen,  
bei vorhandenen Substraten, das Überleben sowohl von  
aeroben als auch von anaeroben Bakterien]

Restfeuchte  
Belichtung

Eintragung von Mikroorganismen:  
a) durch Oberflächenwasser  
b) durch aktive Belüftung  
c) durch Arbeiter, Material, Abfallgebinde u.a.

Eintragung von organischem Material in begrenztem Umfang (z.B.  
durch Oberflächenwasser, Verschmutzung durch Arbeiter, Maschinen  
u.a.)

**ii. Nachbetriebsphase**

Temperatur: 43°-53°C  
pH: ≥8-10 (wird nicht durch das Formationswasser  
erniedrigt)  
Druck: 250 atm  
O<sub>2</sub>: anoxisch  
hohe Feuchtigkeit (Tiefenwasser)

Zusammensetzung (Tiefenwasser):

pH: ≥4.5  
214 mg/l K<sup>+</sup>  
0.2% Mg<sup>2+</sup>  
1.3% Ca<sup>2+</sup>  
57 mg/l Fe<sup>2+/3+</sup>  
51 mg/l NH<sub>4</sub><sup>+</sup>  
600 mg/l SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>  
kein Nitrat  
19% NaCl

**Sowohl in der Betriebs-, als auch in der Nachbetriebsphase gelten:**

**organisches Material (in den Einlagerungskammern):**

unverfestigtes nicht gärfähiges org. Material mit niedriger Aktivität wie Papier, Zellstoff, Plastikhandschuhe;  
Bitumen, Ionenaustauscherharze (flüssige Stoffe sind verfestigt)

**chemotoxische Stoffe: 3% des organischen Materials;**

Dosisleistung der Abfallgebinde schränkt das Bakterienwachstum nicht völlig ein.

aus:

- 1 G.Tittel, H. Eschrich: Bewertung des möglichen Einflusses mikrobiologischer Vorgänge im geplanten Endlager Schachtanlage Konrad auf die Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden, Braunschweig, 1989
- 2 Anlage 1: Randbedingungen für die Umweltsituation, mit dem Anschreiben des TÜV Hannover vom 6.11.1989
- 3 Anlage 2: Gasbildung durch Mikroorganismen, mit dem Anschreiben des TÜV Hannover vom 6.11.1989

#### 4.1 Auswirkung von Strahlung, Druck, Temperatur und Feuchtigkeit auf die Bakterien im Endlager Konrad

Die im Endlager Konrad zur Zeit der Betriebsphase/Nachbetriebsphase herrschenden Bedingungen wie Strahlung, Druck, Temperatur und Feuchtigkeit beeinflussen nicht unwesentlich die Überlebenschancen vorhandener und eingetragener Bakterien.

Die Strahlungsresistenz der Bakterien ist vor allem abhängig von der zu betrachtenden Bakterienart, von der Anwesenheit von O<sub>2</sub>, der herrschenden Temperatur und der umgebenden Feuchtigkeit.

Während einige Bakterienarten wie *Corynebacterium*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Bacillus*arten (bis auf deren Sporen), *Serratia marcescens*, *Pseudomonas* sp. sehr rasch durch relativ geringe Strahlung abgetötet werden können, gibt es auch sehr strahlungsresistente Bakterien wie *Micrococcus radiophilus*, *Micrococcus radiodurans* und Bakterien der *Acinetobacter/Moraxella*-Gruppe.

Hierbei ist zu beachten, daß die Anwesenheit von O<sub>2</sub> den schädigenden (tödlichen) Effekt von radioaktiver Strahlung verstärkt, während unter vollständiger Anaerobiose die Resistenz der Bakterien gegenüber Strahlung um einen Faktor von 2.4-4.7 größer ist.

Die Temperatur beeinflusst, innerhalb gewisser Grenzen, ebenfalls die Sensibilität gegenüber radioaktiver Strahlung. So kann man davon ausgehen, daß höhere Temperaturen eine erhöhte Todesrate zur Folge haben.

Ein weiterer Punkt ist der Feuchtigkeitsgrad, da Bakterien eine stärkere Resistenz gegenüber ionisierender Strahlung bei Trockenheit besitzen; zudem ist zu beachten, daß bei der angenommenen Restfeuchte in den Einlagerungskammern die infrage kommenden Bakterien ohnehin auf Dauer nur überleben können, wenn ihnen ein entsprechendes, abbaubares Substrat zur Verfügung steht.

Bei der Betrachtung der in den Abfallgebänden herrschenden ionisierenden Strahlung ist allerdings zu bedenken, daß sie nicht vollständig abtötend wirkt, sondern daß es während der Vermehrung der Bakterien zur Selektion von strahlenresistenten Mutanten kommen kann.

Diese "strahlungsresistenten" Mutanten können dann, wie am Beispiel einer strahlungsresistenten Mutante von *Salmonella typhimurium*, auch Änderungen in anderen physiologischen Merkmalen erfahren haben, wie z.B. hier die Abhängigkeit von bestimmten Aminosäuren oder die Verkleinerung des umsetzbaren Substratspektrums.

Ein Aspekt, der erst in der Nachbetriebsphase wirksam werden kann, ist die Erhöhung des Drucks auf die Bakterien in den Einlagerungskammern von Atmosphärendruck auf 250 atm.

Die Erhöhung des sie umgebenden Drucks hat auf die Bakterien einen vielfältigen Einfluß:

zum einen auf die Morphologie, was u.U. zum Verlust der Bewegungsfähigkeit führen kann (allerdings sind dazu, selbst bei relativ druckempfindlichen Arten wie *E.coli*, *Serratia marcescens*, *Proteus vulgaris*, Drücke von  $\geq 300$  atm. nötig);

zum anderen, was hier wesentlich bedeutsamer ist, zeigen Arbeiten, daß Bakterien bei zunehmendem Druck unter höheren Temperaturen zu wachsen vermochten, als sie das bei normalem Druck taten.



Allerdings stellte man ebenfalls fest, daß, wenn man die Temperatur konstant ließ, bei erhöhtem Druck der pH-Toleranzbereich (vor allem im alkalischen Bereich), bei einigen Bakterien deutlich abnahm.

Ein Druck von 250 atm. bedeutet keine sonderliche Einschränkung des bakteriellen Wachstums, solche Verminderungen wurden erst bei Drücken um 400 atm. gefunden.

(4,5)

<u>Spezies</u>	<u>pH</u>	<u>Temp.</u>	<u>cNaCl</u>
<b>Clostridium</b>			
perfringens	r5.5-8.0	r20-50°	<6.5
KDH S2			
<b>Staphylococcus</b>			
aureus	r4.2-9.3	r14-45	t15.0
<b><u>Sulfat- und Schwefel- reduzierende Bakterien</u></b>			
<b>Desulfovibrio</b>			
saprovorans	r6.5-9.3	r15-38°	*
baarsii	r6.5-8.2	r20-43°	t
sulfodismutans	r6.8-8.2	r15-45°	*
<b>Desulfonema</b>			
limicola	r6.5-8.8	r15-36°	t
<b>Desulfuromonas</b>			
acetoxidans	r6.5-8.5	o30°	>2.0
"acetexigens"	r6.5-8.5	o30°	*
<b>Desulfococcus</b>			
niacini	r6.5-8.3	r15-37°	b≥1.2
<b>Desulfobacter</b>			
postgatei	r6.2-8.5	r10-37°	b2.0
<b>Desulfobulbus</b>			
propionicus	r6.0-8.6	r10-43°	b
<b>Desulfosarcina</b>			
variabilis	r6.7-9.0	r15-38°	>1.0
<b>Thermodesulfo-</b>			
<b>  bacterium</b>			
commune	r6.0-8.0	r45-85°	<2.0
<b><u>Archaeobakterien</u></b>			
<b>Pyrococcus</b>			
furius	r5.0-9.0	r70-103°	t-5.0
<b>Staphylothermus</b>			
marinus	r4.5-8.5	r65-98°	t-3.5
<b>NS-C</b>	r6.0-8.5	r55-98°	o2.5
<b>Halobacterium</b>			
salinarium	r5.5-8.0	r20-55°	t-23.0
<b>Haloarcula</b>			
vallismortis	r5.5-8.5	r20-45°	t-25.0
<b>Halococcus</b>			
saccharo-			
lyticus	r6.0-8.0	r28-42°	t-30%

## 5. Einengung

5.1 Tab.2: Bakterien, die bei einem  $\text{pH} \geq 8.0$  wachsen können, ohne Berücksichtigung des zu erwartenden Salzgehaltes von  $>19\%$ :

Spezies	pH	Temp.	cNaCl
<b><u>Schwefel-Oxidanten</u></b>			
<b>Thiobacillus</b>			
denitificans	o7.5-8.0	o30°	*
neapolitanus	r3.0-8.5	r8-37°	hoch
novellus	r5.0-9.2	o30°	*
thioparus	r -10.0	o28°	*
versutus	r6.5-9.5	r17-40°	*
tepidarius	r5.2-8.0	r20-52°	*
aquaesulis	o7.6-8.2	o40-50°	*
Q	r6.5-8.5	o30-35°	*
<b>Thiomicrospira</b>			
crunogena	r5.0-8.5	r4-38.5°	b
sp.str.L-12	r6.0-8.5	r10-35°	b
<b>Thiosphaera</b>			
pantotropha	r6.5-10.5	r15-42°	*
<b>Macromonas</b>			
bipunctata	o7.5-8.2	o28°	*
unbenannt	r4.8-8.0	o50°	*
<b>Thermophiler</b>			
thiobacillus	4.1-8.9	58-86°	*
<b><u>Fe<sup>3+</sup>-reduzierende Bakterien</u></b>			
<b>Bacteroides</b>			
hypermegas	r4.8-8.6	r25-45°	t1.5
<b>Bacillus</b>			
subtilis	r5.5-8.5	*	t7.0
<b>Aquaspirillum</b>			
itersonii	r5.5-9.0	r12-42°	*
<b>Serratia</b>			
marcescens	r5.0-9.0	r10-36°	t4.0
<b><u>Nitrat-reduzierende Bakterien</u></b>			
<b>Campylobacter</b>			
	r -9.0	r -45.5°	t-4.0
<b>Azotobacter</b>			
chroococcum	r4.8-10.0	r18-37°	t1.0
vinelandii	r6.0-10.0	r14-37°	t1.0
<b>Azomonas</b>			
agilis	r6.5-10.0	r14-37°	t1.0
<b>Veillonella</b>			
parvula	o6.5-8.0	o30-37°	<4.0

Spezies	pH	Temp.	cNaCl
<b>Natrono-</b>			
<b>bacterium</b>			
gregoryi	r8.5->9.5	r20-50°	t-30.0
magadii	o9.5	r20-50°	t-30.0
pharaonis	o8.5-9.0	r25-50°	t-30.0
<b>Natrono-</b>			
<b>coccus</b>			
occultus	r8.5-11.0	r20-45°	t-30.0
<b><u>Methanbakterien</u></b>			
<b>Methanobacterium</b>			
formicium	r6.5-8.5	r10-50°	*
thermo-			
autotrophicum	r6.0-8.8	r40-75°	*
wolfei	r6.0-8.2	r37-76°	t<2.0
uliginosum	r6.0-8.5	r15-45°	*
alcaliphilum	o8.1-9.1	o37°	*
thermo-			
formicium	r6.0-8.7	r40-65°	*
thermo-			
aggregans	r6.5-9.0	r40-75°	t≤2.0
ivanovii	r6.5-8.2	o45°	*
thermal-			
alcaliphilum	r6.5-10.0	r40-69°	t<2.0
<b>Methanobrevibacter</b>			
ruminantium	r6.0-8.0	r33-45°	*
arboriphilicus	r6.4-8.6	r10-45°	*
<b>Methanococcus</b>			
vanniellii	r7.0-9.0	r20-40°	o-4.0
voltae	r6.5-8.0	r20-45°	o2.0
maripaludis	r6.5-8.0	r20-45°	o-4.0
thermolitho-			
trophicus	r6.5-8.0	r30-70°	t-8.3
<b>Methanogenium</b>			
tationis	r6.3-8.8	r25-45°	o0.6
bourgense	r5.5-8.0	o37°	o0.1
frittonii	r6.0-8.25	r26-62°	t≤2.0
<b>Methanosarcina</b>			
mazei	r5.5-8.0	r30-40°	*
acetivorans	r5.5-8.0	>10-<50°	o1.2
thermophila	r5.5-8.0	<35-55°	*
vacuolata	r6.0-8.0	r18-45°	*
<b>Methanolobus</b>			
tindarius	r5.5-8.0	r10-40°	t-7.0
<b>Methanotrix</b>			
soehngenii	r6.8-8.2	o35-40°	*
thermoaceto-			
phila	>5.5-<8.4	r50-70°	*

Spezies                      pH                      Temp.                      cNaCl

Extrem halophile obligat anaerobe Eubakterien

**Haloanaerobium**

**praevalens**            r6.0-9.0                      r5-60°                      t-30.0

5.2 Tabelle 3

Bakterien, die bei einem Salzgehalt von 19.0% wachsen können:

<u>Spezies</u>	<u>tolerierter Salzgehalt</u>	<u>pH</u>	<u>Temp.</u>
<b>Paracoccus</b>			
halodenitrificans	23.1%	*	r0-32°
<b>Desulfovibrio</b>			
unbenannt a	19.0%	*	*
<b>Halobacterium</b>			
salinarium	26.0%	r5.5-8.0	r20-55°
denitrificans	26.0%	*	r30-55°
saccharovororum	26.0%	r>6.0	r30-56°
sodomense	25.0%	*	r20-50°
trapanicum	20.0%	*	*
<b>Haloarcula</b>			
vallismortis	o25.0%	r5.5-8.5	r20-45°
hispanica	30.0%	*	r25-50°
<b>Haloferax</b>			
mediterranei	30.0%	o6.5	r25-45°
gibbonsii	30.0%	*	r25-55°
<b>Halococcus</b>			
morruhae	o26.0%	r5.5-<8	o30-37°
saccharo-lyticus	30.0%	r6.0-8.0	r28-42°
<b>Natronobacterium</b>			
gregoryi	30.0%	r8.5->9.5	r20-50°
magadii	30.0%	o9.5	r20-50°
pharaonis	30.0%	o8.5-9.0	r25-50°
<b>Natronococcus</b>			
occultus	30.0%	r8.5-11.0	r20-45°
<b>Haloanaerobium</b>			
praevalens	<30.0%	r6.0-9.0	r5-60°

5.3 Tabelle 4

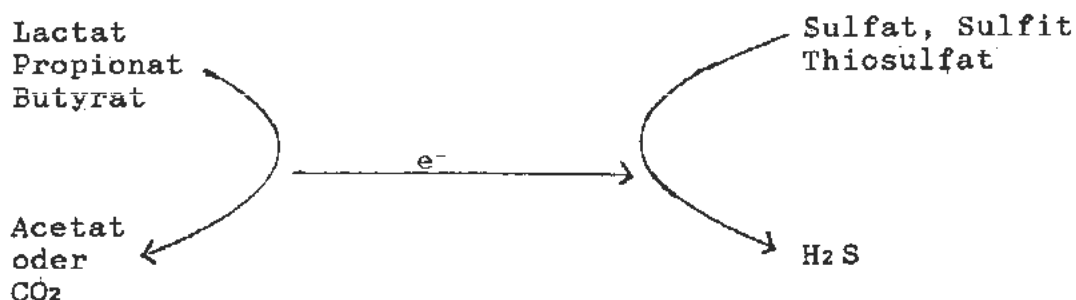
Weitere Bakterien, die bei einem Salzgehalt von  $\geq 10\%$  wachsen können:

<u>Spezies</u>	<u>tolerierter Salzgehalt</u>	<u>pH</u>	<u>Temp.</u>
<b>Bacillus</b> 29	10.0%	*	20°
<b>Staphylococcus</b> aureus	15.0%	r4.2-9.4	r14-45°
epidermis	10.0%	*	r15-45°
<b>Desulfovibrio</b> desulfuricans			
aestuarii	>10.0%	*	r0-45°
unbenannt b	10.0%	*	*
unbenannt d	10.0%	*	*
unbenannt e	10.0%	*	*
<b>Pyrodictum</b> occultum	12.0%	r5.0-7.0	r82-110°
brockii	12.0%	r5.0-7.0	r82-110°
<b>Haloferax</b> volcanii	0-14.6%	*	0-45°
<b>Clostridium</b> lörtetii	14,6%	*	<37-55°
<b>Halobacteroides</b> halobius	b16.0%	*	<37-50°

## 6. Beurteilung der tatsächlich zu erwartenden Umsetzungen

### Sulfat- und Schwefel-reduzierende Bakterien

Die Sulfat- und Schwefel-reduzierenden Bakterien (abgekürzt SRB) stellen eine physiologische Gruppe dar, die durch die Verwendung von Sulfat oder Schwefel als terminalen Elektronenakzeptor gekennzeichnet ist. Neben Sulfat können auch andere oxidierte Schwefelverbindungen wie Thiosulfat und Sulfit zu  $H_2S$  reduziert werden. Die SRB sind strikt anaerob und als Energiequelle auf organische niedermolekulare Substrate wie Lactat, Acetat, Propionat, Butyrat, Formiat und höhere Fettsäuren angewiesen, die vollständig zu  $CO_2$  oder unvollständig zu Acetat oxidiert werden, das ausgeschieden wird.



Manche Spezies wachsen chemolithotroph mit  $H_2+CO_2$ ; fermentativer Stoffwechsel, Nitrat-Reduktion und  $N_2$ -Fixierung treten selten auf. An chemisch komplexen Verbindungen können beispielsweise Benzoate, Phenylcarbonsäuren und Catechol abgebaut werden. In ihren natürlichen Lebensräumen wie anaerobem Schlamm und Sedimenten treten die SRB in Konkurrenz zu den methanogenen Bakterien um die Substrate  $H_2$  und Acetat, wobei sie in Gegenwart von Sulfat aus energetischen Gründen im Vorteil sind.

Die SRB gehören zu den stoffwechselphysiologisch vielseitigsten Bakterien und bedürfen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle einer eingehenden Betrachtung: Als anaerobe Bakterien können sie während der Nachbetriebsphase unter  $O_2$ -Abschluß wachsen und das mikrobielle Ökosystem des Grubengebäudes insofern beeinflussen, als der produzierte Schwefelwasserstoff in geringer Konzentration anderen Bakterien als S-Quelle dient und in hoher Konzentration toxisch ist. (Bei den Eisenkonzentrationen des Formationswassers von 57 mg/l  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  wird ein Großteil als  $FeS$  ausfallen.) Durch ihre chemischen Umsetzungen können die radioaktiven Nuklide  $^{14}C$  und  $^3H$  aus komplexen organischen und  $^{35}S$  auch aus anorganischen Verbindungen der Abfallgebinde mobilisiert und als radioaktive Gase  $CO_2$  und  $H_2S$  freigesetzt werden. Dadurch daß die SRB den bei der Selbstoxidation des Eisens gebildeten und vor weiterer Zersetzung schützenden  $H_2$ -Film entfernen und als Substrat nutzen, wird die Eisen-Korrosion vorangetrieben.

Abschätzung der Überlebensfähigkeit der SRB während der Betriebsphase:

Aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber  $O_2$  können SRB nur an anaeroben Mikrostandorten mit niedrigem Redoxpotential wachsen, welches für die Sulfat-Atmung  $E_0'(SO_4^{2-}/HS^-) = -0.25V$  beträgt. Sulfat ist im Formationswasser zu 600mg/l gelöst. Den während der Betriebsphase wachstumsbegrenzenden Faktor stellt der hohe pH-Wert



von mind. 8-10 in den Einlagerungskammern dar. Elf der bekannten 50 Spezies sind mit Sicherheit schwach alkaliphil ( $\text{pH}(r) \geq 8.0$ ), von weiteren 6 Spezies muß dies angenommen werden, da sie bei  $\text{pH} \geq 7.0$  optimal wachsen. Diese 16 zu berücksichtigenden Spezies unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer Substratspezifität: Wegen ihres fakultativ lithotrophen Wachstums und der damit verbundenen Unabhängigkeit von org. Substraten sind *Desulfococcus niacini*, *Desulfonema limicola*, *Desulfosarcina variabilis* und *Desulfobacterium catecholicum* von besonderer Bedeutung. Komplexe org. Verbindungen können von *Desulfococcus niacini* (höhere Dicarbonsäuren, Nicotinsäure, Pimelat), *Desulfosarcina variabilis* (Benzoate, Phenylcarbonsäuren, Hippurat, Cyclohexanocarboxylat), *Desulfobacterium catecholicum* (Catechol, Resorcinol, Hydroquinon, Benzoate, Protocatechuat, Phloroglucinol, u.a.) und *Desulfobacterium anilini* (u.a. Phenol, Benzoate, Cyclo-Verbindungen) umgesetzt werden. Die übrigen Vertreter weisen ein enges Substratspektrum auf.

Der für die Betriebsphase unterstellte, durch Belüftung unterhalb der Gebirgstemperatur liegende Temperaturbereich von 30-40°C begrenzt das Wachstum dieser Bakterien nicht. Zu den Wachstumsvoraussetzungen der SRB zählen im allgemeinen Sulfid als Reduktionsmittel, Salzkonzentrationen von ca. 2% NaCl für Meeresstämme und z.T. Vitamine.

Es ist zu berücksichtigen, daß von 54% der Spezies (27/50) überhaupt keine Angaben über pH (opt.) oder pH-Toleranzbereich vorliegen, so daß ihre Lebensfähigkeit bei  $\text{pH} \geq 8.0$  im Grubengebäude nicht abzuschätzen ist. Zu dieser Gruppe gehört insbesondere die sporenbildende Gattung *Desulfotomaculum*, die Zeiten mit lebensfeindlichen Umweltbedingungen durch Sporenbildung überbrücken kann.

#### Nachbetriebsphase:

Die gegenüber der Betriebsphase veränderten Umweltbedingungen bestehen in leicht erhöhter Temperatur entsprechend der Gebirgstemperatur wegen fehlender Belüftung, anaeroben Verhältnissen und, da das Formationswasser nicht mehr abgepumpt wird, in zunehmender Auffüllung der Stollen mit Wasser von extrem hohem Salzgehalt (19%NaCl). Dieser Salzgehalt stellt in der Nachbetriebsphase den entscheidenden wachstumslimitierenden Faktor für die Bakterien dar. Zum überwiegenden Teil sind die SRB Salz-sensibel und ertragen keinen Salzstreß. Von 20% der bearbeiteten Spezies fehlen jegliche Angaben zur Salztoleranz. Extreme Salztoleranz zeigen nur Vertreter der Gattung *Desulfovibrio*, und zwar *D. desulfuricans aestuarii* ( $t(\text{NaCl}) > 10.0\%$ ), 4 unbenannte Spezies mit einer NaCl-Toleranz von 8-10%, und nur eine Spezies ( $t$  bis 19%), die den Salzgehalt des Formationswassers toleriert. Stoffwechselphysiologisch sind diese Spezies völlig unzureichend beschrieben.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die SRB während der Betriebsphase in recht großer Mannigfaltigkeit im Grubengebäude wachsen können -allerdings nur an anaeroben Mikrostandorten-, während für die Nachbetriebsphase nur ein *Desulfovibrio*-Stamm bekannt ist, der die 19% NaCl des Formationswassers toleriert.

## Schwefel-oxidierende Bakterien

Bei den aus der Gruppe der Schwefel-Oxidanten hier in Betracht zu ziehenden Bakterien, d.h. Bakterien, die oberhalb eines pH's von 8 noch wachsen können, handelt es sich sowohl um lithotrophe (obligat/fakultativ), die nicht auf organische Substrate angewiesen sind, als auch um obligat organotrophe Bakterien (*Macromonas bipunctata*).

Von diesen Bakterien kann eine Korrosion des Eisens ausgehen. Diese beruht auf der durch Oxidation von verschiedenen reduzierten Schwefelverbindungen produzierten Schwefelsäure. Diese Oxidation ist nur in Gegenwart von Luftsauerstoff oder Nitrat möglich. Schwefelsäure könnte möglicherweise zu Schäden an der Einlagerungsmatrix (Korrosion der Metalle und Spaltung von Beton) führen.

Zudem könnte es, bei entsprechend zahlreichem Vorkommen und starker, bzw. lang andauernder Produktion von  $H_2SO_4$ , zu einer Absenkung des pH-Wertes in den Einlagerungskammern kommen, was wiederum zu grundsätzlich anderen Lebensbedingungen führen und Grundlage für die Existenz anderer Bakterien bilden würde. Zumindest die Bildung von Mikrostandorten mit niedrigerem pH kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Da einige Arten dieser Bakterien auch mit organischen Substraten zu wachsen vermögen, können sie sich auch ohne Schwefel vermehren und sich an der Oxidation organischer Abfälle beteiligen.

Ein weiterer Punkt ist die Produktion von gasförmigem  $CO_2$  (aus organischem Material) und  $N_2$  (aus Nitrat).

Außerdem werden durch diese Bakteriengruppe, solange  $O_2$  zur Verfügung steht, Elektronen-Akzeptoren (Sulfat) für eine andere bedeutsame Gruppe (Sulfatreduzenten) bereitgestellt.

Limitierender Faktor für das Wachstum der hier aufgeführten Schwefeloxidanten stellt weniger der zu erwartende Temperaturbereich (da praktisch mit einer Ausnahme alle als mesophil bezeichnet werden können), als vielmehr die Verfügbarkeit von oxidierbaren anorganischen Substraten dar.

Für die Betriebsphase ergibt sich, da es sich hier vor allem um aerobe Bakterien handelt, eine größere Anzahl von Wachstumsmöglichkeiten als für die Nachbetriebsphase. Nur wenige Bakterien wie *Thiobacillus denitrificans*, *Th. versutus*, *Th. aquaesulis* und *Thiosphaera pantotropha* vermögen auch anaerob zu wachsen, wenn Nitrat vorliegt. Die genannten Schwefel-oxidierenden Bakterien gehören durchweg zu den nicht-halotoleranten Bakterien. Sie halten also keine Salzkonzentrationen aus, die höher als die des Seewassers sind. Der in der Nachbetriebsphase zu erwartende hohe Salzgehalt verhindert das Wachstum und die Wirksamkeit dieser Bakteriengruppe.

## Fe-reduzierende Bakterien

Grundsätzlich verfügen die meisten Bakterien über die Möglichkeit, das gewöhnlich als  $Fe^{3+}$  vorliegende Ion zu reduzieren und sich Eisen als  $Fe^{2+}$  im Zellstoffwechsel verfügbar zu machen. Es ist zwischen assimilatorischer und dissimilatorischer  $Fe^{3+}$ -Reduktion (=anaerobe Atmung) zu unterscheiden. Bei den in der Einengung (siehe Tabelle) auftretenden Bakterien handelt es sich

ausschließlich um solche, die assimilatorische  $\text{Fe}^{3+}$ -Reduktion betreiben; hierbei ist, wie gesagt, zu bedenken, daß auch wohl alle anderen hier aufgeführten Bakterien über die Möglichkeiten zur assimilatorischen Eisenreduktion verfügen. Im übrigen kann nur  $\text{Fe}^{3+}$  zu  $\text{Fe}^{2+}$  reduziert werden. Eine weitere Reduktion von  $\text{Fe}^{2+}$  zu metallischem Eisen ist nicht möglich.

Die Bakterien, die zu einer dissimilatorischen Fe-Red. befähigt sind, d.h.  $\text{Fe}^{3+}$  als terminalen  $e^-$  Akzeptor nutzen (anaerobe Atmung), sind äußerst empfindlich, eben erst nachgewiesen und physiologisch noch nicht untersucht worden. Die einzige Wirkung, die von ihnen ausgehen kann, ist eine geringfügige Entwicklung von  $\text{CO}_2$  aus oxidiertes Essigsäure.

### Fe-oxidierende Bakterien

Über  $\text{Fe}^{2+}$ -oxidierende Bakterien waren (mit Ausnahme von *Th. ferrooxidans*) kaum physiologische Merkmale zu erhalten. Man kann allerdings davon ausgehen, daß, da solche Bakterien u.a. auf  $\text{Fe}^{2+}$  als Substrat angewiesen sind und dieses hauptsächlich unter sauren Bedingungen vorliegt, unter den gegebenen Umweltbedingungen (pH 8-10) diese keine Rolle spielen.

### Nitrat-reduzierende Bakterien

Die Bedeutung dieser physiologischen Bakteriengruppe liegt darin, daß die Angehörigen Nitrat als terminalen Elektronenakzeptor verwerten können, also eine anaerobe Atmung durchführen können und auch in Abwesenheit von Sauerstoff, wenn organische Substanzen und Nitrat vorhanden sind, wachsen können. Sie könnten sich in der Nachbetriebsphase möglicherweise entwickeln, allerdings nicht bei den hohen zu erwartenden Salzgehalten. Selbst der moderat halophile *Paracoccus halodenitrificans* hält nur 3% NaCl aus. Eine Schädigung ist von dieser Bakteriengruppe also nicht zu erwarten.

### Methanogene Bakterien

Die methanogenen Bakterien bilden eine hochspezialisierte Organismengruppe mit überwiegend lithoautotrophem Wachstum auf Wasserstoff und Kohlendioxid als alleiniger Kohlenstoff- und Energiequelle und sind durch die Produktion von Methan ( $\text{CH}_4$ ) gekennzeichnet. Mit Ausnahme der aerotoleranten Gattung *Methanothrix* werden sie als streng anaerobe Bakterien durch Luftsauerstoff abgetötet. Zu ihrem engen Substratspektrum zählen neben  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  die organischen Verbindungen Formiat, Methanol, Acetat und Methylamine. Zusätzlich zur Methan-Bildung und  $\text{CO}_2$ -Fixierung reduzieren viele Organismen Schwefel nicht-dissimilatorisch zu  $\text{H}_2\text{S}$ , und bei den Gattungen *Methanococcus* und *Methanosarcina* ist  $\text{N}_2$ -Fixierung bekannt.

Sie stellen an das Redoxpotential hohe Ansprüche und wachsen nur, wenn der  $E_0'$ -Wert weniger als  $-250$  mV beträgt. Sie sind darauf angewiesen, daß Sulfat-reduzierende Bakterien  $H_2S$  in geringem Maße bereitstellen und zudem der Sauerstoff durch biotische oder abiotische Prozesse verbraucht ist. Diese Zusammenhänge sind der folgenden Abbildung zu entnehmen.

### Control of Methane Production in Terrestrial Ecosystems

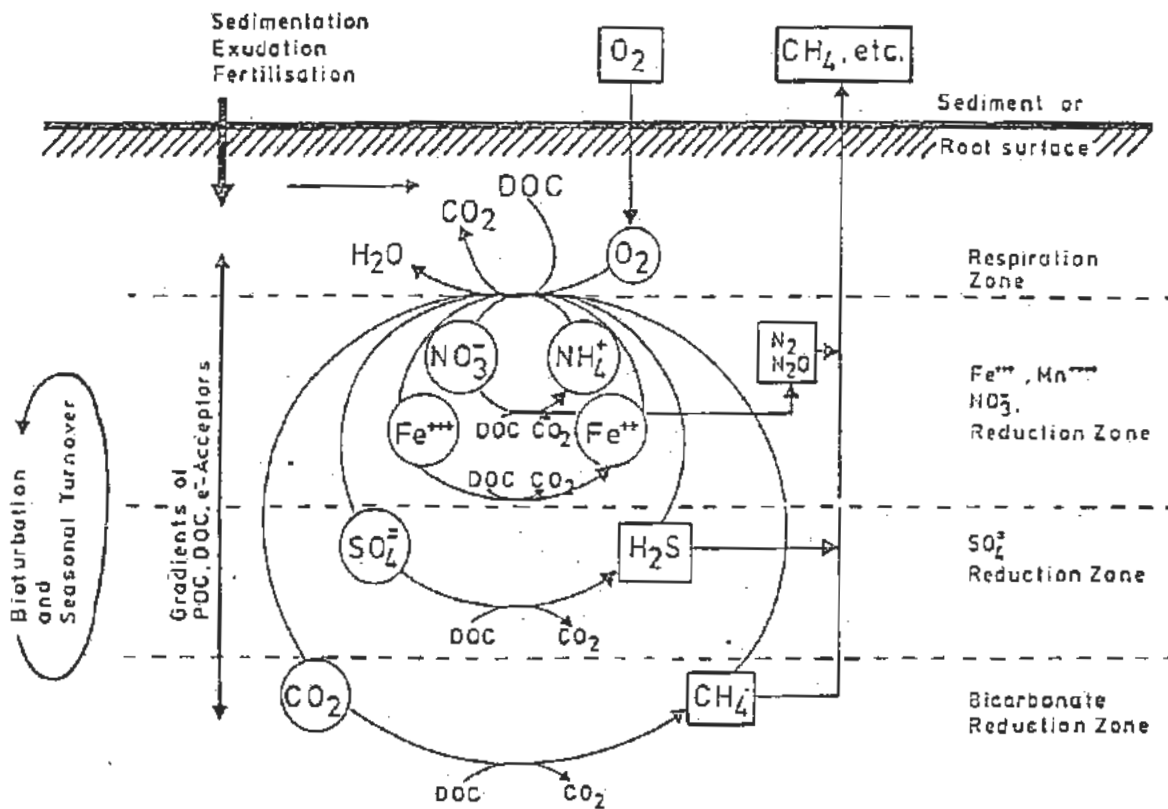


Fig. 5—Structure of methanogenic ecosystems with respect to redox zonation, regeneration of inorganic electron acceptors, and role of dissolved organic carbon (DOC). The scheme does not depict the reoxidation of  $CH_4$  within the  $O_2$  zone (see Fig. 2).

aus: Conrad, R.: Control of Methane Produktion in Terrestrial Ecosystems, in: Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere, eds. M.O. Andreae and D.S. Schimel, pp.39-58, Dahlem Konferenzen 1989, John Wiley and Sons Ltd.

An ihren natürlichen Standorten wie in Sümpfen und Mooren bilden die methanogenen Bakterien das letzte Glied der anaeroben Nahrungskette und konkurrieren mit acetogenen und Sulfat-reduzierenden Bakterien um den von eng vergesellschafteten H<sub>2</sub>-produzierenden Bakterien freigesetzten Wasserstoff.

Im Endlager kann die Tätigkeit der methanogenen Bakterien durch die Bereitstellung von geringen Mengen lithotroph synthetisierten organischen Materialien für organotrophe Bakterien eine ganz geringe Rolle spielen.

Durch den im Endlager zu erwartenden pH-Wert zwischen 8-10 wird die Überlebensfähigkeit der methanogenen Bakterien als Gesamtheit nur unbedeutend eingeschränkt. Der pH-Toleranzbereich von 44% der bekannten Spezies beträgt pH(r) ≥ 8.0; als ebenfalls schwach alkalitolerant müssen weitere 28% angenommen werden, von denen nur pH(opt.) ≥ 7.0 vorliegt. Die Temperatur zwischen 43-53°C in den Einlagerungskammern beeinträchtigt nur unwesentlich das Wachstum der überwiegend mesophilen Organismen. Die lithoautotrophen Substrate CO<sub>2</sub> und molekularer Wasserstoff, gebildet bei mikrobieller Fermentation; bei Radiolyse und Korrosion, stehen in großem Umfang zur Verfügung. Während der Betriebsphase werden die O<sub>2</sub>-Toxizität und das für die Methanproduktion erforderliche niedrige Redoxpotential (E<sub>0</sub>' ca. -0.350 V) die wachstums-limitierenden Faktoren sein.

Während der Nachbetriebsphase verbessern sich einerseits die Lebensbedingungen aufgrund der zunehmend anaeroben Verhältnisse und des sinkenden Redoxpotentials, andererseits vermindert das ins Endlager eindringende stark salzhaltige Formationswasser das Bakterienwachstum drastisch. Unter den methanogenen Bakterien sind bisher nur 4 Spezies bekannt, die extreme Salzkonzentrationen tolerieren: Als einziger lithotroph wachsender Vertreter toleriert *Methanococcus thermolithotrophicus* NaCl-Konzentrationen bis 8.3%, ist zur Stickstoff-Fixierung befähigt und nutzt verschiedene S-haltige anorganische Verbindungen. *Methanobolus tindarius* wächst organotroph bis zu 7% NaCl und entwickelt H<sub>2</sub>S. Von *Methanococcus halophilus* und *Methanohalophilus mahii*, beide organotroph auf Methanol und Methylaminen wachsend, ist bisher nur optimales Wachstum bei 7-9% bzw. 12% NaCl bekannt. Ihre Toleranz gegenüber 19% Salz enthaltendem Formationswasser ist nicht untersucht. Wenn es unter den vielen neu beschriebenen, aber physiologisch noch ungenügend untersuchten Methanbildnern noch Arten geben sollte, die mehr als 10% NaCl aushalten, ist ihre Entwicklung unwahrscheinlich, da die mit ihnen vergesellschafteten sulfat-reduzierenden Bakterien bei Verfügbarkeit von Substraten und von Sulfat so hohe Konzentrationen an H<sub>2</sub>S erzeugen, daß die methanogenen Bakterien nicht mehr wachsen können. Eine Schädigung halten wir daher unter den im Endlager gegebenen Bedingungen für äußerst unwahrscheinlich.

#### Archaeobakterien (ohne Halo- und methanogene Bakterien)

Die in diesem Kapitel behandelten Archaeobakterien gehören zur Gruppe der extrem thermophilen S<sup>-</sup>Metabolisierer oder zu den Gattungen *Archaeoglobus* (Gr.2: Archaeobakteriale Sulfat-Reduzenten) oder *Thermoplasma* (Gr.4: Zellwandlose Archaeobakterien).

In letzterer sind überwiegend extrem thermophile und acidophile Archaeobakterien mit mannigfaltigem Stoffwechsel zusammengefaßt. Das Wachstum kann chemolithotroph entweder anaerob durch  $H_2S$ -Autotrophie oder durch autotrophe Schwefel-Oxidation (*Sulfolobus*) und organotroph über Schwefel-Atmung, Gärung oder aerobe Atmung erfolgen.

Den pH-Wert von  $pH \geq 8.0$ , wie er für die Grube Konrad unterstellt wird, können die Archaeobakterien *Pyrococcus furiosus*, *Staphylothermus* und *NS-C* tolerieren. Bis auf den aerotoleranten Vertreter *NS-C* sind sie obligat anaerob und wachsen organotroph auf komplexen Nährstoffen (hauptsächlich Hefeextrakt). Am Stoffwechsel ist Schwefel unter Bildung von Schwefelwasserstoff beteiligt. Für *Pyrococcus* und *NS-C* wird darüber hinaus ein endogener, bisher nicht weiter charakterisierter Elektronenakzeptor postuliert. *NS-C* bildet Sporen. Aufgrund der für diese thermophilen Mikroorganismen zu niedrigen Grubentemperatur von ca.  $40^\circ C$ , ihrer  $O_2$ -Sensitivität und ihrer fehlenden Salz-Toleranz dürften sie weder für die Betriebs- noch für die Nachbetriebsphase eine Rolle spielen. Für *Staphylothermus* wurde allerdings gezeigt, daß sein Temperatur-Toleranzbereich bei minimalem Nährstoffangebot abgesenkt ist.

Von den fakultativ lithotrophen Spezies könnte eventuell bei leichter Adaptation oder pH-Absenkung ( $pH(r) = 5.5-7.5$ ;  $T(r) = 65-95^\circ C$ ) *Archaeoglobus fulgidus* im Grubengebäude leben.

Die einzigen halophilen/halotoleranten Spezies weist die Gattung *Pyrodictium* auf, die bis zu einer NaCl-Konzentration von 12% wachsen und somit im Formationswasser wahrscheinlich nicht überleben.

Somit werden diese Archaeobakterien im Ökosystem Grube Konrad vorraussichtlich keine Rolle spielen.

## Halobakterien

Die den Archaeobakterien zugeordneten Halobakterien sind an Standorte extrem hohen Salzgehaltes angepaßt, wie marine Salzgärten, Salz- und Sodaseen und gesalzene Lebensmittel. Für optimales Wachstum benötigen sie NaCl-Konzentrationen von 12-26%. Den neutrophilen Gattungen *Halobacterium*, *Haloarcula*, *Haloferax* und *Halococcus* mit hohem  $Mg^{2+}$ -Bedarf stehen die alkaliphilen Gattungen *Natronobacterium* und *Natronococcus* gegenüber. Sie alle sind überwiegend obligat aerob und auf Substrate wie Amino- und organische Säuren und oftmals auf Wachstumsfaktoren angewiesen.

Insbesondere der am besten untersuchten Gattung *Halobacterium* stehen folgende Möglichkeiten zur Energiegewinnung zur Verfügung:

1. Oxidative Phosphorylierung unter aeroben Verhältnissen
2. Photophosphorylierung bei Licht und  $O_2$ -Limitierung
3. Substratkettenphosphorylierung unter anaeroben Verhältnissen
  - 3.1 Fermentatives Wachstum auf Arginin (Hartmann et al. 1970), Glucose, Fructose, Glycerol, Pyruvat, Ornithin und Lysin (Javor)
  - 3.2 Anaerobe Atmung durch Nitrat-,  $S^0$ - oder Thiosulfat-Reduktion (Brock)

Neuere Forschungsergebnisse zeigen, daß auch die Gattungen *Halococcus*, *Haloferax* und *Haloarcula* als fakultativ anaerob angenommen werden müssen. Das anaerobe Wachstum verläuft allerdings wesentlich langsamer als das aerobe.

Der pH-Toleranzbereich der Halobakterien ist für die alkaliphilen Gattungen *Natronobacterium* und *Natronococcus* gut untersucht, wonach alle Spezies bei  $\text{pH} \geq 8.0$  wachsen. Für die übrigen Gattungen liegen kaum Informationen vor, so daß keine Ausgliederung vorgenommen werden kann. Alle Halobakterien sind mesophil und zwischen  $T=40-50^\circ\text{C}$  überlebensfähig. Wachstumsbegrenzender Faktor sind die überwiegend hohen Nährstoffansprüche der organotrophen Spezies.

Die Halobakterien sind für die Grube Konrad von großer Bedeutung, weil sie bei dem Salzgehalt des Formationswassers von 19% NaCl optimal wachsen und zumindest einige Spezies unter den anaeroben Bedingungen der Nachbetriebsphase leben können.

### Extrem halophile anaerobe Eubakterien

An extrem halophilen anaeroben Eubakterien mit fermentativem Stoffwechsel sind bis heute die Spezies *Clostridium lortetii*, *Haloanaerobium praevalens* und *Halobacteroides halobius* bekannt.

Während *C.lortetii* und *H.halobius* mindestens bis 14.6%NaCl wachsen, toleriert *H.praevalens* noch gesättigte NaCl-Lösungen. Soweit untersucht, sind alle Spezies mesophil und liegen im pH-Toleranzbereich  $\geq 8.0$ . Als Substrate dienen in erster Linie Kohlenhydrate und organische Säuren, *H.halobius* ist Vitaminbedürftig.

Für die Endlagerung sind diese Mikroorganismen indirekt von Bedeutung, als sie durch ihre Anwesenheit und Aktivität dem Ökosystem "Grube Konrad" Vielfalt und Flexibilität verleihen und durch ihre Gärungsprodukte Substrate für methanogene Bakterien und Sulfat-Reduzenten bilden. Die Aerotoleranz von *H.halobius* und die Sporenbildung von *C.lotetii* begünstigen die Ansiedlung dieser anaeroben Bakterien während der aeroben Betriebsphase, wohingegen *H.praevalens* als obligat anaerober Vertreter während der Betriebsphase auf anaerobe Mikrostandorte angewiesen ist.

Was den Salzgehalt und die Temperatur, pH- und  $\text{O}_2$ -Verhältnisse anbetrifft, liegen demnach die Randbedingungen im Grubengebäude im Bereich der Wachstumsgrenzen von *H.praevalens* und *H.halobius* ( $\text{C}_{\text{NaCl}}$ -Bedarf: 16%). Das nur in begrenztem Umfang zur Verfügung stehende, durch Verschmutzung eingebrachte und biosynthetisierte organische Material wird das Wachstum dieser Mikroorganismen limitieren.

## 7. Schlußfolgerungen und Einschränkungen

In dieser Studie wurden etwa 270 Bakterienarten erfaßt, die potentiell unter den im Endlager Konrad herrschenden Bedingungen wachsen könnten, wenn

- a) Sauerstoff als Elektronen-Akzeptor und lösliche organische Stoffe,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $S^0$ ,  $H_2S$ ,  $Fe^{2+}$ , Kohlenwasserstoffe zur Verfügung stehen
- b) kein Sauerstoff zur Verfügung steht, aber vergärbare organische Stoffe vorliegen
- c) kein Sauerstoff zur Verfügung steht, aber Sulfate, Nitrate,  $Fe^{3+}$  oder  $CO_2$  als Elektronen-Akzeptoren vorliegen.

Manche der Bakterien kommen in der Natur zu üppiger Entwicklung (z.B.  $H_2S$ - und  $S^0$ -oxidierende Bakterien, Methanbildner). Die meisten Bakterien sind aber äußerst empfindlich und wachsen in Laboratorien unter sehr diffizil einzuhaltenden Bedingungen.

Die einzigen Bakterien, die in der Industrie bisher Störungen ausgelöst haben, sind die Sulfat-reduzierenden Bakterien. Sie vermögen in Kühlwasserkreisläufen mit Ölen und Fetten als Substraten und Sulfat als H-Akzeptor zu wachsen. Da sie dabei  $H_2S$  bilden, fördern sie die Korrosion von Eisenrohren. Man bekämpft sie durch Zusatz von Detergenzien (SDS, CTAB, Alkylsulfonsäuren) mit vollem Erfolg.

Wenn die vorliegende Recherche auch ergeben hat, daß unter den gegebenen Bedingungen die Entwicklung einer vollständigen mikrobiellen Nahrungskette, bei der es zu einem Massenwachstum von Mikroorganismen und zur signifikanten Mobilisierung von Radionukliden kommen könnte, sehr unwahrscheinlich ist, so muß doch auf die Grenzen der Aussagekraft unserer Ermittlungen hingewiesen werden:

1. Eine Vielzahl der in die Recherche einbezogenen Bakterien ist physiologisch nur unzureichend untersucht worden und insbesondere auf Wachstum bei höheren Salzgehalten nicht geprüft worden. Von salzhaltigen Standorten (Totes Meer, Salzgärten zur Gewinnung von Kochsalz und anderen Salzen in Kalifornien und im Süden von Israel) sind Vertreter der oben aufgeführten Bakteriengruppen zu isolieren versucht worden. Keines der genannten Bakterien ist aufgefunden worden. Es ist danach sehr unwahrscheinlich, daß es Lebewesen gibt, die die im Endlager zu erwartenden Salzkonzentrationen aushalten.
2. Viele der genannten Bakterien sind in der Natur an so wenigen Orten anzutreffen, daß von ihnen bisher nur eine Spezies isoliert und beschrieben werden konnte.
3. Es ist sehr unwahrscheinlich, daß es unter den gegebenen Bedingungen durch Mutation zu besser angepaßten Bakterien kommt. Wenn diese Anpassung mehrere Mutationen in ein und derselben Zelle voraussetzt, und die Mutantenhäufigkeit durchschnittlich nur  $10^{-8}$  beträgt, müßte es zum Wachstum von tausend Litern einer sehr dichten Bakteriensuspension ( $10^{10}$  Zellen/ml) kommen, damit eine Doppelmutante, die besser angepaßt ist, entsteht.
4. In den letzten 10 Jahren sind viele neue Vertreter unter den Archaeobakterien entdeckt worden. Diese sind häufig Bakterien extremer Standorte, insbesondere heißer Quellen. Zwar ist mit der Auffindung weiterer Arten und Stoffwechselformen in dieser Bakteriengruppe zu rechnen. Wenn sie vorhanden sind, so sind sie aber sehr selten.



Wir halten die Wahrscheinlichkeit, daß es zu einer mikrobiell bedingten Mobilisierung von Radionukliden kommt, für äußerst gering. Um das durch obige Unsicherheitsfaktoren bedingte Restrisiko zu minimieren, sollte das Bakterienwachstum im Endlager kontrolliert werden. Auf Grund unserer Studie lassen sich Angaben über die Aufbereitung und Einschließung radioaktiv verseuchter Abfälle machen, die jegliche mikrobielle Tätigkeit ausschließen und so das ohnehin äußerst geringe Restrisiko auf Null vermindern.

## 8. Literaturangaben

### Sulfat-und Schwefel reduzierende Bakterien

- 1 Bak, F., Widdel, F.: Anaerobic degradation of indolic compounds by sulfate-reducing enrichment cultures, and description of *Desulfobacterium indolicum* gen.nov., sp.nov. Arch.Microbiol. 146, 170-176 (1986)
- 2 Bak, F., Widdel, F.: Anaerobic degradation of phenol and phenol derivatives by *Desulfobacterium phenolicum* sp.nov. Arch.Microbiol. 146, 177-180 (1986)
- 3 Braun, M., Stolp, H.: Degradation of methanol by a sulfate-reducing bacterium. Arch.Microbiol. 142, 77-80 (1985)
- 4 Brysch, K., Schneider, C., Fuchs, G., Widdel, F.: Lithoautotrophic growth of sulfate-reducing bacteria, and description of *Desulfobacterium autotrophicum* gen.nov., sp.nov. Arch.Microbiol. 148, 264-274 (1987)
- 5 Burton, L.L., LeGall, J., Odom, J.M., Peck jr., H.D.: Energy coupling to nitrite respiration in the sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio gigas*. J. Bacteriol. 153 (2), 867-871 (1983)
- 6 Cypionka, H., Widdel, F., Pfennig, N.: Survival of sulfate-reducing bacteria after oxygen stress, and growth in sulfate-free oxygen-sulfide gradients. FEMS Microbiol.Ecology 31, 39-45 (1985)
- 7 Cypionka, H., Pfennig, N.: Growth yields of *Desulfotomaculum orientis* with hydrogen in chemostat culture. Arch.Microbiol. 143, 396-399 (1986)
- 8 Imhoff-Stuckle, D., Pfennig, N.: Isolation and characterisation of a nicotinic acid-degrading bacterium, *Desulfococcus niacini* sp.nov.. Arch. Microbiol. 136:194-198 (1983)
- 9 Jones, H.E., Skyring, G.W.: Effect of enzymic assay conditions on sulfite reduction catalysed by Desulfovibridin from *Desulfovibrio gigas*. Biochem.Biophys.Acta 377, 52-60 (1975)
- 10 Klemps, R., Cypionka, H., Widdel, F., Pfennig, N.: Growth with hydrogen, and further physiological characteristics of *Desulfotomaculum* species. Arch Microbiol. 143, 203-208 (1985)
- 11 Laanbroek, H.J., Abee, T., Voogd, I.L.: Alcohol conversion by *Desulfobulbus propionicus* Lindhorst in the presence and absence of sulfate and hydrogen. Arch.Microbiol. 133, 178-184 (1982)
- 12 Moore, W.E.C., Johnson, J.L., Holdeman, L.V.: Emendation of *Bacteroidaceae* and *Butyrivibrio* and descriptions of *Desulfomonas* gen.nov. and ten new species of the genera *Desulfomonas*, *Butyrivibrio*, *Eubacterium*, *Clostridium* and *Ruminococcus*. Int.J.Syst.Bact. 26, 238-252 (1976)
- 13 Nanninga, H.J., Gottschal, J.C.: Isolation of a sulfate-reducing bacterium growing with methanol. FEMS Microbiol.Ecol. 38, 125-130 (1986)

- 14 Nazina, T.N., Rozanova, E.P.: Thermophilic sulfate-reducing bacteria from oil strata. *Microbiology* 47, 113-118 (1978)
- 15 Nethe-Jenchen, R., Thauer, R.K.: Growth yields and saturation constant of *Desulfovibrio vulgaris* in chemostat culture. *Arch. Microbiol.* 137: 236-240 (1984)
- 16 Newman, D.J., Postgate, J.R.: Rubredoxin from a nitrogen-fixing variety of *Desulfovibrio desulfuricans*. *European J. Biochem.* 7, 45-50 (1968)
- 17 Odom, J.M., Peck jr., H.D.: Hydrogen cycling as a general mechanism for energy coupling in the sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio spec.*
- 18 Okazaki, H., Iizuka, H.: A salt-requiring sulfate-reducing bacterium isolated from antarctica. *J. Gen. Appl. Microbiol.* 18, 135-142 (1972)
- 19 Ollivier, B., Cord-Ruwisch, R., Hatchikian, E.C., Garcia, J.L.: Characterisation of *Desulfovibrio fructosovorans* sp. nov.. *Arch. Microbiol.* 149: 447-450 (1988)
- 20 Pankhania, I.P., Spormann, A.M., Hamilton, W.A., Thauer, R.K.: Lactat conversion to acetate, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> in cells suspensions of *Desulfovibrio vulgaris* (Marburg): indications for the involvement of an energy driven reaction. *Arch. Microbiol.* 150, 26-31 (1988)
- 21 Pfennig, N., Biebl, H.: *Desulfuromonas acetoxidans* gen. nov. and sp. nov., a new anaerobic, sulfur-reducing acetate-oxidizing bacterium. *Arch. Microbiol.* 110, 3-12 (1976)
- 22 Postgate, J.R.: Genus *Desulfovibrio*, in: B. Vol 1, 666-672
- 23 Postgate, J.R.: Nitrogen fixation by sporulating sulfate-reducing bacteria including rumen strains. *J. Gen. Microbiol.* 63, 137-139 (1970)
- 24 Postgate, J.R., Campbell, L.L.: Classification of *Desulfovibrio* species, the nonsporulating sulfate-reducing bacteria. *Bact. Rev.* 30, 732-738 (1966)
- 25 Postgate, J.R., Kent, H.M.: Derepression of nitrogen fixation in *Desulfovibrio gigas* and its stability to ammonia or oxygen stress in vivo. *J. Gen. Microbiol.* 130: 2825-2831 (1984)
- 26 Riederer-Henderson, M.A., Wilson, P.W.: Nitrogen fixation by sulphate-reducing bacteria. *J. Gen. Microbiol.* 61, 27-31 (1970)
- 27 Samain, E., Dubourguier, H.C., Albagnac, G.: Isolation and characterization of *Desulfobulbus elongatus* sp. nov. from a mesophilic industrial digester. *System. Appl. Microbiol.* 5, 391-401 (1984)

- 28 Schnell,S, Bak,F., Pfennig,N.: Anaerobic degradation of aniline and dihydroxybenzenes by newly isolated sulfate-reducing bacteria and description of *Desulfobacterium anilini*. Arch.Microbiol. 152, 556-563 (1989)
- 29 Schoberth,S.: A new strain of *Desulfovibrio gigas* isolated from a sewage plant. Arch.Microbiol. 92, 365-368 (1973)
- 30 Seitz,J.-J., Cypionka,H.: Chemolithotrophic growth of *Desulfovibrio desulfuricans* with hydrogen coupled to ammonification of nitrate or nitrite. Arch.Microbiol. 146, 63-67 (1986)
- 31 Sekiguchi,T., Noguchi,A., Nosoh,Y.: ATP and acetylene-reducing activity of a sulfate-reducing bacterium. Can.J.Microbiol. 23, 567-572 (1977)
- 32 Skyring,G.W., Jones,H.E., Goodchild,D.: The taxonomy of some new isolates of dissimilatory sulfate-reducing bacteria. Can.J.Microbiol. 23, 1415-1425 (1977)
- 32a Sneath,P.H.A.: Endospore-forming Gram-positive rods and cocci, in B.Vol 2, 1200-1202
- 33 Stams,F.J.M., Veenhuis,M., Weenk,G.H.,Hansen,T.A.: Occurrence of polyglucose as a storage polymer in *Desulfovibrio* species and *Desulfobulbus propionicus*. Arch.Microbiol. 136, 54-59 (1983)
- 34 Szewzyk,R., Pfennig,N.: Complete oxidation of catechol by the strictly anaerobic sulfate-reducing *Desulfobacterium catecholicum* sp.nov..Arch.Microbiol. 147, 163-168 (1987)
- 35 Trudinger,P.A.: Carbon monoxide-reacting pigment from *Desulfotomaculum nigrificans* and its possible relevance to sulfite reduction. J.Bact. 104, 158-170 (1970)
- 36 Widdel,F.: New types of acetate-oxidizing, sulfate-reducing *Desulfobacter* species, *D. hydrogenophilus* sp.nov., *D. latus* sp. nov., and *D. curvatus* sp.nov..Arch.Microbiol. 148, 286-291 (1987)
- 37 Widdel,F., Kohring,G.-W., Mayer,F.: Studies on dissimilatory sulfate-reducing bacteria that decompose fatty acids.III. Characterisation of the filamentous gliding *Desulfonema limicola* gen.nov. sp.nov. and *Desulfonema magnum*, sp.nov..Arch.Microbiol. 134, 286-294 (1983)
- 38 Widdel,F., Pfennig,N.: A new anaerobic, sporing, acetate-oxidizing, sulfate-reducing bacterium *Desulfotomaculum* (emend.) *acetoxidans*. Arch.Microbiol. 112, 119-122 (1977)
- 39 Widdel,F., Pfennig,N.: Studies on dissimilatory sulfate-reducing bacteria that decompose fatty acids. 1.Isolation of new sulfate-reducing bacteria enriched with acetate from saline environments. Description of *Desulfobacter postgatei* gen. nov., sp.nov..Arch.Microbiol. 129, 395-400 (1981)

- 40 Widdel, F., Pfennig, N.: Sporulation and further nutritional characteristics of *Desulfotomaculum acetoxidans*. Arch. Microbiol. 129, 401-402 (1981)
- 41 Widdel, F., Pfennig, N.: Studies on dissimilatory sulfate-reducing bacteria that decompose fatty acids, II Incomplete oxidation of propionate by *Desulfobulbus propionicus* gen. nov., sp. nov.. Arch. Microbiol. 131, 360-365 (1982)
- 42 Widdel, F., Pfennig, N.: Dissimilatory sulfate- or sulfur-reducing bacteria, in B. Vol 1, 663-677
- 43 Zeikus, J.G., Dawson, M.A., Thompson, T.E., Ingvorson, K., Hatchikian, E.C.: Microbial ecology of volcanic sulphidogenesis: Isolation and characterization of *Thermodesulfobacterium commune* gen. nov. and sp. nov.. J. Gen. Microb. 129, 1159-1169 (1983)
- 44 Zellner, G., Messner, P., Kneifel, H., Winter, J.: *Desulfovibrio simplex* spec. nov., a new sulfate-reducing bacterium from a sour whey digester. Arch. Microbiol. 152, 329-334 (1989)
- 45 Zinder, St.H., Brock, T.D.: Dimethyl sulfoxide as an electron acceptor for anaerobic growth. Arch. Microbiol. 116, 35-40 (1978)

### Schwefel-Oxidanten

- 1 Bak, F., Pfennig, N.: Chemolithotrophic growth of *Desulfovibrio sulfodismutans* sp. nov. by disproportionation of inorganic sulfur compounds. Arch. Microbiol. 147, 184-189 (1987)
- 2 Butler, R.G.: Pyruvate inhibition of the carbon dioxide fixation of the strict chemolithotroph *Thiobacillus thiooxidans*. Can. J. Microbiol. 21, 2089-2093 (1975)
- 3 Beudeker, R.F., DeBoer, W., Kuenen, J.G.: Heterolactic fermentation of intercellular polyglucose by the obligate chemolithotroph *Thiobacillus neapolitanus* under anaerobic conditions. FEMS Microbiol. Letters 12, 337-342 (1981)
- 4 Beudeker, R.F., Kerver, J.W.M., Kuenen, J.G.: Occurrence, structure and function of intracellular polyglucose in the obligate chemolithotroph *Thiobacillus neapolitanus*. Arch. Microbiol. 129, 221-226 (1981)
- 5 Brannan, D.K., Caldwell, D.E.: Ecology and metabolism of *Thermotrix thiopara*. Adv. Appl. Microbiol. 31, 233-270 (1986)
- 6 Caldwell, D.E.: Genus *Thermotrix*, in B. Vol 3, 1868-1871
- 7 Chandra, T.S., Friedrich, C.G.: Tn 5 induced mutations affecting sulfur-oxidizing activity (sox) of *Thiosphaera panotropha*. J. Bacteriol. 166, 446-452 (1986)

- 8 Charles, A.M., Suzuki, I.: Mechanism of thiosulfate oxidation by *Thiobacillus novellus*. *Bioch. Biophys. Acta* 128, 510-521 (1966)
- 9 Claus, D., Berkeley, R.C.W.: Genus *Bacillus*, in B. Vol 2, 1105-1139
- 10 Claus, G., Kutzner, H.J.: Physiology and kinetics of autotrophic denitrification by *Thiobacillus denitrificans*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 22, 283-288 (1985)
- 11 Claussen, P.A.M., Zehnder, A.J.B.: Isocitrat lyase activity in *Thiobacillus versutus* grown anaerobically in acetate and nitrate. *J. Gen. Microbiol.* 132, 3179-3185 (1986)
- 12 Friedrich, D.G., Meyer, O., Chandra, T.S.: Molybdenum-dependent sulfur oxidation in facultatively lithoautotrophic thiobacteria. *FEMS Microbiol. Letters* 37, 105-108 (1986)
- 13 Guay, R., Silver, M.: *Thiobacillus acidophilus* sp. nov. isolation and some physiological characteristics. *Can. J. Microbiol.* 21, 281-288 (1975)
- 14 Gommers, P.J.F., Kuenen, J.G.: *Thiobacillus* strain Q a chemolithoheterotrophic sulfur bacterium. *Arch. Microbiol.* 150, 117-125 (1988)
- 15 Harrison, A.P. jr.: Genomic and physiological comparison between heterotrophic thiobacilli and *Acidiphilium cryptum*, *Thiobacillus versutus* sp. nov., and *Thiobacillus acidophilum* nom. rev.. *Intern. J. Syst. Bacteriol.* 33, 211-217 (1983)
- 16 Harrison, A.P. jr.: Genus *Acidiphilium*, in B. Vol 3, 1863-1868
- 17 Huber, H., Stetter, K.O.: *Thiobacillus prosperus* sp. nov., represents a new group of halotolerant metal-mobilizing bacteria isolated from an marine geothermal field. *Arch. Microbiol.* 151, 479-485 (1989)
- 18 Jannasch, H.W., Wirsen, C.A., Nelson, D.C., Robertson, L.A.: *Thiomicrospira crunogena* sp. nov. a colorless, sulfur-oxidizing bacterium from a deep-sea hydrothermal vent. *Intern. J. Syst. Bacteriol.* 35, 422-424 (1985)
- 19 Katayama, Y., Kuraishi, H.: Characteristics of *Thiobacillus thioparus* and its thiocyanate assimilation. *Can. J. Microbiol.* 24, 804-810 (1978)
- 20 Katayama-Fujimura, Y., Kawashima, I., Tsuzaki, N., Kuraishi, H.: Reidentification of *Thiobacillus perometabolis* ATCC27793 and *Thiobacillus* strain A2 with reference to a new species *Thiobacillus rapidicrescens* sp. nov.. *Intern. J. Syst. Bacteriol.* 33, 532-538 (1983)
- 21 Kelly, D.P., Harrison, A.P.: Genus *Thiobacillus*, in B. Vol 3, 1842-1858

- 22 Kelly, D.P., Wood, A.P., Gottschal, J.C., Kuenen, J.G.: Autotrophic metabolism of formate by *Thiobacillus* strain A2. J.Gen.Microbiol. 144, 1-13 (1979)
- 23 Kelly, D.P., Wood, A.P.: Autotrophic growth of *Thiobacillus* A2 on methanol. FEMS Microbiol.Letters 15, 229-233 (1982)
- 24 Kelly, D.P., Wood, A.P., Gottschal, J.C., Kuenen, J.G.: Metabolism of formate by *Thiobacillus* strain A2. J.Gen.Microbiol., 144, 1-13 (1979)
- 25 Kuenen, J.G., Robertson, L.A.: Genus *Thiomicrospira*, in B.Vol 3, 1858-1861
- 26 Kuenen, J.G., Robertson, L.A.: Genus *Thiosphaera*, in B.Vol 3, 1861-1862
- 27 Kuenen, J.G., Tuovinen, O.H.: The genera *Thiobacillus* and *Thiomicrospira*, in The Prok.Vol 1, 1021-1036
28. Kuenen, J.G., Veldkamp, H.: *Thiomicrospira pelophila*, gen.n., sp.n., a new obligately chemolithotrophic colourless sulfur bacterium. Antonie van Leeuwenhoek 38, 241-256 (1972)
- 29 La Riviere, J.W.M., Dubinina, G.G.: Genus *Macromonas*, in B.Vol 3, 1838-1840
- 30 La Riviere, J.W.M., Kuenen, J.G.: Genus *Thiobacterium*, in B.Vol 3, 1838
- 31 La Riviere, J.W.M., Kuenen, J.G.: Genus *Thiospira*, in B.Vol 3, 1840-1841
- 32 La Riviere, J.W.M., Kuenen, J.G.: Genus *Thiovulum*, in B.Vol 3, 1841-1842
- 33 Levin, R.A.: Fatty acids of *Thiobacillus thiooxidans*. J.Bact. 108, 992-995 (1971)
- 34 Lu, W.-P., Kelly, D.P.: Kinetic and energetic aspects of inorganic sulphur compound oxidation by *Thiobacillus tepidarius*. J.Gen.Microbiol. 134, 865-876 (1988)
- 35 Mackintosh, M.E.: Nitrogen fixation by *Thiobacillus ferrooxidans*. J.Gen.Microbiol. 105, 215-218 (1978)
- 36 Marchlewitz, B., Schwartz, W.: Untersuchungen über die Mikroben-Assoziation saurer Grubenwässer. Zeitschrift für Allgemeine Mikrobiologie 1, 100-114 (1961)
- 37 Martin, A., Kahan, F.S., Leefeld, R.H.: Growth factor requirement of *Thiobacillus novellus*. Arch.Microbiol. 129, 91-95 (1980)
- 38 Mason, J., Kelly, D.P.: Mixotrophic and autotrophic growth of *Thiobacillus acidophilus* on tetrathionat. Arch.Microbiol. 149, 317-328 (1988)

- 39 Murphy, J.R., Griard, A.E., Tillon, R.C.: Ultrastructure of a marine thiobacillus. *J.Gen.Microbiol.* 85, 130-138 (1979)
- 40 Perez, R.C., Martin, A.: Growth of *Thiobacillus novellus* on mixed substrates (mixotrophic growth). *J.Bacteriol.* 142, 633-638 (1980)
- 41 Ruby, E.G., Jannasch, H.W.: Physiological characteristics of *Thiomicrospira* sp. strain L-12 isolated from deep-sea hydrothermal vents. *J.Bacteriol.* 149, 161-165 (1982)
- 42 Robertson, L.A., Kuenen, J.G.: *Thiosphaera pantotropha* gen. nov. sp. nov., a facultatively autotrophic sulphur bacterium. *J.Gen.Microbiol.* 129, 2847-2855 (1983)
- 43 Roux, V.W. Le, Wakerky, D.S., Hunt, S.D.: Thermophile *Thiobacillus* -type bacteria from Icelandic thermal areas. *J.Gen.Microbiol.* 100, 197-201 (1977)
- 44 Smith, N.A., Kelly, D.P.: Oxidation of carbon disulphide as the sole source of energy for the autotrophic growth of *Thiobacillus thioparus* strain TK-m. *J.Gen.Microbiol.* 134, 3041-3048 (1988)
- 45 Southerland, W.M., Toghrol, F.: Sulfite oxidase activity in *Thiobacillus novellus*. *J.Bacteriol.* 156, 941-944 (1983)
- 46 Taylor, B.F., Hoare, D.S.: A new facultative *Thiobacillus* and a reevaluation of the heterotrophic potential of *Thiobacillus novellus*. *J.Bacteriol.* 100, 487-497 (1969)
- 47 Taylor, B.F., Hoare, D.S., Hoare, S.L.: *Thiobacillus denitrificans* as an obligate chemolithotroph. Isolation and growth studies. *Arch.Microbiol.* 78, 193-204 (1971)
- 48 Thiele, O.W., Oulevely, J., Hunneman, D.H.: Ornithin-containing lipids in *Thiobacillus A2* and *Achromobacter* sp.. *Eur.J.Biochem.* 139, 131-135 (1984)
- 49 Vishniac, W.V.: Genus *Thiobacillus*, in B.8th ed., 456-461
- 50 Williams, R.A.D., Horare, D.S.: Physiology of a new facultativ thermophilic *Thiobacillus*. *J.Gen.Microbiol.* 70, 555-566 (1972)
- 51 Wood, A.P., Kelly, D.P.: Heterotrophic growth of *Thiobacillus A2* on sugar and organic acids. *Arch.Microbiol.* 113, 257-264 (1977)
- 52 Wood, A.P., Kelly, D.P.: Chemolithotrophic metabolism of the newly isolated moderately thermophilic, obligately autotrophic *Thiobacillus tepidarius*. *Arch.Microbiol.* 144, 71-77 (1986)



### Nitratreduktion

- 1 Baumann,P., Furniss,A.L., Lee,J.V.: Genus *Vibrio*, in B.Vol 1, 518-538
- 2 Barrett,E.L., Riggs,D.L.: Evidence for a second nitrate reductase activity that is distinct from the respiratory enzyme in *Salmonella typhimurium*. J.Bacteriol. 150, 563-571 (1982)
- 3 Bokranz,M., Katz,J., Schöder,I., Robertson,A.M., Kröger,A.: Energy metabolism and biosynthesis of *Vibrio succinogenes* growing with nitrate or nitrite as terminal electron acceptor. Arch.Microbiol. 135, 36-41 (1983)
- 4 Bovre,K.: Genus *Moraxella*, in B.Vol 1, 296-303
- 5 Bryant,M.P.: Genus *Selenomonas*, in B.Vol 1, 650-653
- 6 Burke,K.A., Lascelles,J.: Partial purification and some properties of the *Staphylococcus aureus* cytoplasmic nitrate reductase. J.Bacteriol. 139, 120-125 (1979)
- 7 Cato,E.P., George,W.L., Finegold,S.M.: Genus *Clostridium*, in B.Vol 2, 1141-1200
- 8 Caskey,W.H., Tiedje,J.M.: The reduction of nitrate to ammonium by a *Clostridium* sp. isolated from soil. J.Gen.Microbiol. 119, 217-223 (1980)
- 9 Claus,D., Berkeley,R.C.W.: Genus *Bacillus*, in B.Vol 2, 1105-1139
- 10 Collins,M.D., Cummins,C.S.: Genus *Corynebacterium*, in B.Vol 2, 1266-1276
- 11 Cummins,C.S., Johnson,J.L.: Genus *Propionibacterium*, in B.Vol 2, 1346-1353
- 12 De Vries,W., Niekus,H.G.D., Van Berchum,H., Southamer,A.G.: Electrontransport-linked proton translocation at nitrite reduction in *Campylobacter sputorum* subspecies *bubulus*. Arch.Microbiol. 131, 132-139 (1982)
- 13 Doudoroff,M.: Genus *Paracoccus*, in B.8th.ed., 439-440
- 14 Doudoroff,M., Palleroni,N.J.: Genus *Pseudomonas*, in B.8th ed., 217-243
- 15 Forget,P.: The bacterial nitrate reductases. Solubilization, purification and properties of the enzyme A of *Escherichia coli* K12. Eur.J.Biochem. 42, 325-332 (1974)
- 16 Guerrero,M.G., Vega,J.M., Leadbetter,E., Losada,M.: Preparation and characterization of soluble nitrate reductase from *Azotobacter chroococcum*. Arch.Microbiol. 91, 287-304 (1973)

- 17 Hackenthal,G., Mannheim,W., Hackenthal,R., Becker,R.: Die Reduktion von Perchlorat durch Bakterien. I Untersuchung von intakten Zellen. *Bioch.Pharmacol.* 13, 195-206 (1964)
- 18 Holmes,B., Owen,R.J., McMeekin,T.A.: Genus *Flavobacterium*, in B.Vol 1, 353-361
- 19 Jordan,D.C.: Genus *Bradyrhizobium*, in B.Vol 1, 242-244
- 20 Kajie,Shin-ichi, Anraku,Y.: Purification of a hexaheme cytochrome *cs<sub>2</sub>* from *Escherichia coli* K12 and its properties as a nitrite reductase. *Eur.J.Biochem.* 154,457-463 (1986)
- 21 Kaneko,M., Sihimoto,M.: A study on nitrate reductase from *Propionibacterium acidipropionici*. *J.Biochem.* 83, 191-200 (1978)
- 22 Lee,H.S., Hancock,R.E.W., Ingraham,J.L.: Properties of a *Pseudomonas stutzeri* outer membrane channel-forming protein (NosA) required for production of copper-containing N<sub>2</sub>O reductase. *J.Bacteriol.* 171, 2096-2100 (1989)
- 23 Minor,L.L.: Genus *Salmonella*, in B.Vol 1, 427-458
- 24 Orskov,F.: Genus *Escherichia*, in B.Vol 1, 420-423
- 25 Orskov,I.: Genus *Klebsiella*, in B.Vol 1, 461-465
- 26 Palleroni,N.J.: Genus *Pseudomonas*, in B.Vol 1, 141-199
- 27 Rogesa,M.: Genus *Veillonella*, in B.Vol 1, 681-683
- 28 Sakazaki,R.: Genus *Citrobacter*, in B.Vol 1, 458-461
- 29 Satoh,T., Hom,S.S.M., Shanmugam,K.T.: Production of nitrouxide from nitrite in *Klebsiella pneumoniae*: mutants altered in nitrogen metabolism. *J.Bacteriol.* 155, 454-458 (1983)
- 30 Schulp,J.A., Stouthamer,A.H.: Isolation and characterization of mutants resistant against chlorate of *Bacillus licheniformis*. *J.Gen.Microbiol.* 73, 95-112 (1972)
- 31 Shapleigh,J.P.,Payne,W.J.: Nitric oxide-dependent proton translocation in various denitrifiers. *J.Bacteriol.* 163, 837-840 (1985)
- 32 Smibert,R.M.: Genus *Campylobacter*, in B.Vol 1, 111-118
- 33 Smith,M.-S.: Dissimilatory reduction of NO<sub>2</sub><sup>-</sup> to NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and N<sub>2</sub>O by a soil *Citrobacter* sp.. *Appl.Envirom.Microbiol.* 43, 854-860 (1982)
- 34 Stouthamer,A.H., Bettenhausen,C., van Hartingsveld,J.: Nitrate reduction in *Aerobacter aerogenes*. *Arch.Microbiol.* 58, 228-247 (1967)

- 35 Tan, T.-L.: Physiologie der Nitratreduktion bei *Pseudomonas aeruginosa*. Zeitschrift für Allg.Mikrobiol. 13, 83-94 (1973)
- 36 Tanner, A.C.R., Socransky, S.S.: Genus *Wolinella*, in B.Vol 1, 646-650
- 37 Tchan, Y.-T., New, P.B.: Genus *Azotobacter*, in B.Vol 1, 220-229
- 38 Tchan, Y.-T., New, P.B.: Genus *Azomonas*, in B.Vol 1, 230-234
- 39 Vedros, N.A.: Genus *Neisseria*, in B.Vol 1, 290-296
- 40 Villareal-Moguel, E.I., Ibarra, V., Ruiz-Herrera, J., Gitler, C.: Resolution of the nitrate reductase complex from the membrane of *Escherichia coli*. J.Bacteriol. 113, 1264-1267 (1973)
- 41 Yordy, D.M., Delwiche, E.A.: Nitrite reduction in *Veillonella alcalescens*. J.Bacteriol. 137(2), 905-911 (1979)

#### Eisen- und Mangan-oxidierende Bakterien

- 1 Adams, L.F., Ghiorse, W.C.: Physiology and ultrastructure of *Leptothrix discophora* SS-1. Arch.Microbiol. 145, 126-135 (1986)
- 2 Beck, J.V.: A ferrous-iron-oxidizing bacterium. J.Bacteriol. 79, 502-509 (1960)
- 3 Brierley, C.C.: Bacterial leaching. Critical Reviews in Microbiol. 6, 207-262 (1978)
- 4 Cameron, F.J., Edwards, C., Jones, M.V.: Isolation and preliminary characterization of an iron-oxidizing bacterium from an ochre-polluted stream. J.Gen.Microbiol. 124, 213-217 (1981)
- 5 Hanert, H.H.: Genus *Gallionella*, in B.Vol 3, 1974-1979.
- 6 Harrison, A.P., Norris, P.R.: *Leptospirillum ferrooxidans* and similar bacteria: some characteristics and genomic diversity. FEMS Microbiol.Letters 30, 99-102, (1985)
- 7 Hirsch, P.: Genus *Hyphomicrobium*, in B.Vol 3, 1895-1899
- 8 Jung, W.K., Schweisfurth, R.: Manganoxydierende Bakterien. III Wachstum und Manganoxidation bei *Pseudomonas manganoxidans*. Zeitschrift Allg.Mikrobiol. 16, 587-597 (1976)
- 9 Mulder, E.G.: Genus *Sphaerotilus*, in B.Vol 3, 1994-1998
- 10 Mulder, E.G.: Genus *Leptothrix*, in B.Vol 3, 1998-2003
- 11 Tuovinen, O.H., Hirsch, P., Zavarzin, G.A.: Family "Siderocapsaceae", in B.Vol 3, 1874-1882

- 12 Tyler, P.A., Marshall, K.C.: Form and function in manganese oxidizing bacteria. Arch.Microbiol. 56, 344-353 (1967)
- 13 Wichlacz, P.L., Unz, R.F.: Acidophilic, heterotrophic bacteria of acidic mine waters. Appl.Environmental Microbiol. 41, 1254-1261 (1981)
- 14 Wood, A.P., Kelly, D.P.: Autotrophic and mixotrophic growth of three thermoacidophilic iron-oxidizing bacteria. FEMS Microbiol.Letters 20, 107-112 (1983)
- 15 Zavarzin, G.A.: Genus "*Metallogenium*", in B.Vol 3, 1986-1988

#### Eisen- und Mangan- reduzierende Bakterien

- Balaskova, Zavarina: Anaerobic reduction of ferric iron by hydrogen bacteria. Microbiol. 48, 635-639
- 2 Baumann, P., Gauthier, M.J., Baumann, L.: Genus *Alteromonas*, in B.Vol 1, 343-352
  - 3 Cato, E.P., George, W.L., Finegold, S.M.: Genus *Clostridium*, in B.Vol 2, 1141-1200
  - 4 Claus, D., Berkeley, R.C.W.: Genus *Bacillus*, in B.Vol 2, 1105-1139
  - 5 Cox, C.D.: Iron reductases from *Pseudomonas aeruginosa*. J.Bacteriol. 141, 199-204 (1980)
  - 6 De Castro, A.F., Ehrlich, H.L.: Reduction of iron oxide minerals by a marine *Bacillus*. Antonie van Leeuwenhoek 36, 317-327 (1970)
  - 7 Fischer, W.R., Pfanneberg, T.: An improved method for testing the rate of iron (III) oxide reduction by bacteria. Zbl.Mikrobiol. 139, 163-166 (1984)
  - 8 Grimm, P.A.D., Grimm, F.: Genus *Serratia*, in B.Vol 1, 477-484
  - 9 Hayer, M., Page, W.J.: Ferric reductase activity in *Azotobacter vinelandii* and its inhibition by  $Zn^{2+}$ . J.Bacteriol. 171, 4031-4037 (1989)
  - 10 Holdemann, L.V., Kelley, R.W., Moore, W.E.C.: Genus *Bacteroides*, in B.Vol 1, 604-631
  - 11 Jones, J.G., Gardener, S., Simon, B.M.: Bacterial reduction of ferric iron in a stratified eutrophic lake. J.Gen.Microbiol. 129, 131-139 (1983)
  - 12 Jones, J.G., Davison, W., Gardener, S.: Iron reduction by bacteria: range of organisms involved and metals reduced. FEMS Microbiol.Letters 21, 133-136 (1984)
  - 13 Kersters, K., Ley, J.D.: Genus *Agrobacterium*, in B.Vol 1, 244-254

- 14 Kloos, W.E., Schleifer, K.H.: Genus *Staphylococcus*, in B.Vol 1, 1013-1035
- 15 Krieg, N.R.: Genus *Aquaspirillum*, in B.Vol 1, 72-90
- 16 Lovley, D.R., Phillips, E.J.P.: Novel mode of microbial energy metabolism: organic carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron or manganese. *Appl. Environ. Microbiol.* 54, 1472-1480 (1988)
- 17 Ottow, J.C.G.: Evaluation of iron-reducing bacteria in soil and physiological mechanism of iron-reduction in *Aerobacter aerogenes*. *Zeitschr. Allg. Mikrobiol.* 8, 441-443 (1968)
- 18 Sakazaki, R.: Genus *Enterobacter*, in B.8th.ed., 324-325
- 19 Schleifer, K.H.: Family *Micrococcaceae*, in B.Vol 2, 1003-1035
- 20 Wayne, L.G., Kubica, G.P.: Genus *Mycobacterium*, in B.Vol 2, 1436-1457
- 21 Williams, H.D., Poole, R.K.: Reduction of iron (III) by *Escherichia coli* K12: Lack of involvement of the respiratory chains. *Current Microbiol.* 15, 319-324 (1987)

#### METHANOGENE BAKTERIEN

- 1 Blotevogel, K.-H., Fischer, U., Lüpkes, K.H.: *Methanococcus frisius* sp.nov., a new methylotrophic marine methanogen. *Can. J. Microbiol.* 32, 127-131 (1986)
- 2 Blotevogel, K.-H., Fischer, U., Mocha, M., Jannsen, S.: *Methanobacterium thermoalcaliphilum* sp.nov., a new moderately alkaliphilic and thermophilic autotrophic methanogen. *Arch. Microbiol.* 142, 211-217 (1985)
- 3 Blotevogel, K.-H., Fischer, U.: Isolation and characterization of a new thermophilic and autotrophic methane producing bacterium: *Methanobacterium thermoaggregans* sp.nov.. *Arch. Microbiol.* 142, 218-222 (1985)
- 4 Bomar, M., Knoll, K., Widdel, F.: Fixation of molecular nitrogen by *Methanosarcina barkeri*. *FEMS Microbiol. Ecology* 31, 47-55 (1985)
- 5 Boone, D.R., Mah, R.A.: Methanogenic Archaeobacteria, in B.Vol 3, 2173-2216
- 6 van Bruggen, J.J.A., Zwart, K.B., Hermans, J.G.F., van Hove, E.M., Stumm, C.K., Vogels, G.D.: Isolation and characterization of *Methanoplanus endosymbiosus* sp.nov., an endosymbiont of the marine sapropelic ciliate *Metopus contortus* Quennerstedt. *Arch. Microbiol.* 144, 367-374 (1986)

- 7 van Bruggen, J.J.A., Zwart, K.B., van Assema, R.M., Stumm, C.K., Vogels, G.D.: *Methanobacterium formicium*, an endosymbiont of the anaerobic ciliate *Metopus striatus* Mc Murrich. Arch. Microbiol. 139, 1-7 (1984)
- 8 Corder, R.E., Hook, L.A., Larkin, J.M. Frea, J.I.: Isolation and characterisation of two new methane-producing cocci: *Methanogenium olentangyi*, sp.nov., and *Methanococcus deltae*, sp.nov. Arch.Microbiol. 134, 28-32 (1983)
- 9 Ferry, J.G., Smith, P.H., Wolfe, R.S.: *Methanospirillum*, a new genus of methanogenic bacteria, and characterisation of *Methanospirillum hungatei* sp.nov. Int.J.Syst.Bact. 24, 465-469 (1974)
- 10 Ferry, J.G., Wolfe, R.S.: Nutritional and biochemical characterization of *Methanospirillum hungatei*. Appl.Environ.Microbiol. 34, 371-376 (1977)
- 11 Harris, J.E., Pinn, P.A., Davis, R.P.: Isolation and characterization of a novel thermophilic, freshwater methanogen. Appl.Environm. Microbiol. 48, 1123-1128 (1984)
- 12 Huber, H., Thomm, M., König, H., Thies, G., Stetter, K.O.: *Methanococcus thermolithotrophicus*, a novel thermophilic lithotrophic methanogen. Arch.Microb. 132, 47-50 (1982)
- 13 Huser, B.A., Wuhrmann, K., Zehnder, A.J.B.: *Methanotherix soehngeni* gen.nov., sp.nov., a new acetotrophic non-hydrogen-oxidizing methane bacterium. Arch.Microbiol. 132, 1-9 (1982)
- 14 Jain, M.K., Thompson, T.E., Conway de Macario, E., Zeikus, J.G.: Speciation of *Methanobacterium* strain Ivanov as *Methanobacterium ivanovii*, sp.nov.. Syst.Appl. Microb. 9, 77-82 (1987)
- 15 Jones, W.J., Paynter, M.J.B., Gupta, R.: Characterization of *Methanococcus maripaludis* sp.nov., a new methanogen isolated from salt marsh sediment. Arch.Microbiol. 135, 91-97 (1983)
- 16 Jones, W.J., Leigh, J.A., Mayer, F., Woese, C.R., Wolfe, R.S.: *Methanococcus jannaschii* sp.nov., an extremely thermophilic methanogen from a submarine hydrothermal vent. Arch.Microbiol. 136, 254-261 (1983)
- 17 König, H.: Isolation and characterization of *Methanobacterium uliginosum* sp.nov. from a marshy soil. Can.J.Microbiol. 30, 1477-1481 (1984)
- 18 König, H., Stetter, K.O.: Isolation and characterization of *Methanlobus tindarius*, sp.nov., a coccoid methanogen growing only on methanol and methylamines. Zbl.Bakt.Hyg., 1.Abt.Orig.C3, 478-490 (1982)

- 19 Lauerer, G., Kristjansson, J.K., Langworthy, T.A., König, H., Stetter, K.O.: *Methanothermus sociabilis* sp.nov., a second species within the *Methanothermaceae* growing at 97°C. Syst.Appl.Microbiol. 8, 100-105 (1986)
- 20 Mah, R.A.: Isolation and characterization of *Methanococcus mazei*. Curr.Microbiol. 3, 321-326 (1980)
- 21 Miller, T.L., Wolin, M.J.: *Methanosphaera stadtmaniae* gen.nov., sp.nov.: a species that forms methane by reducing methanol with hydrogen. Arch.Microbiol. 141, 116-122 (1985)
- 22 Nozhevnikova, A.N., Chudina, V.I.: The morphology of the thermophilic acetate methanogenic bacterium *Methanotherrix thermoacetophila* sp.nov. Microbiology 53-5, 756-761 (1984)
- 23 Ollivier, B.M., Mah, R.A., Garcia, J.L., Boone, D.R.: Isolation and characterization of *Methanogenium bourgense* sp.nov. Int.J.Syst. Bact. 36, 297-301 (1986)
- 24 Ollivier, B.M., Mah, R.A., Garcia, J.L., Robinson, R.: Isolation and characterisation of *Methanogenium aggregans* sp. nov. Int.J.Bact. 35, 127-130 (1985)
- 25 Patel, G.B.: Characterization and nutritional properties of *Methanotherrix concilii* sp. nov., a mesophilic, aceticlastic methanogen. Can.J.Microbiol. 30, 1383-1396 (1984)
- 26 Paterek, J.R., Smith, P.H.: *Methanohalophilus mahii* gen.nov., sp. nov., a methylotrophic halophilic methanogen. Int.J.Syst.Bact. 38, 122-123 (1988)
- 27 Paynter, M.J.B., Hungate, R.E.: Characterization of *Methanobacterium mobilis* sp.nov., isolated from the bovine rumen. J.Bact. 95, 1943-1951 (1968)
- 28 Rivard, C.J., Henson, J.M., Thomas, M.V., Smith, P.H.: Isolation and characterization of *Methanomicrobium paynteri* sp.nov., a mesophilic methanogen isolated from marine sediments. Appl.Environ.Microbiol. 46, 484-490 (1983)
- 29 Rivard, C.J., Smith, P.H.: Isolation and characterization of a thermophilic marine methanogenic bacterium, *Methanogenium thermophilicum* sp.nov. Int.J.Syst.Bacteriol. 32 (4), 430-436 (1982)
- 30 Romesser, J.A., Wolfe, R.S., Mayer, F., Spiess, E., Walther-Mauruschat, A.: *Methanogenium*, a new genus of marine methanogenic bacteria, and characterization of *Methanogenium cariaci* sp.nov. and *Methanogenium marisnigri* sp.nov. Arch. Microbiol. 121, 147-153 (1979)
- 31 Smith, P.H., Hungate, R.E.: Isolation and characterization of *Methanobacterium ruminantium* sp.nov. J.Bact. 75, 713-718 (1958)

- 32 Sowers, K.R., Ferry, J.G.: Isolation and characterization of a methylotrophic marine methanogen, *Methanococcoides methylutens* gen.nov., sp.nov. Appl.Environm. Microbiol. 45,684-690 (1983)
- 33 Sowers, K.R., Baron, S.F., Ferry, J.G.: *Methanosarcina acetivorans* sp.nov., an acetotrophic methane-producing bacterium isolated from marine sediments. Appl.Environm.Microbiol. 47,971-978 (1984)
- 34 Sparling, R. Daniels, L.: Source of carbon and hydrogen in methane produced from formate by *Methanococcus thermolithotrophicus*. J.Bacteriol. 168 (3), 1402-1407 (1986)
- 35 Stadtman, Th.C., Barker, H.A.: Studies on the methane fermentation. J.Bact. 62, 269-280 (1951)
- 36 Stetter, K.O., Thomm, M., Winter, J., Wildgruber, G., Huber, H., Zillig, W., Janéková, D., König, H., Palm, P., Wunderl, S.: *Methanothermus fervidus* sp.nov., a novel extremely thermophilic methanogen isolated from an Icelandic hot spring. Zentralbl.Bakteriol.Microbiol.Hyg.1.Abt.Orig.C2, 166-178 (1981)
- 37 White, R.H.: Structural diversity among *Methanofurans* from different methanogenic bacteria. J.Bacteriol. 170, 4594-4597 (1988)
- 38 Whitman, W.B., Ankwanda, E., Wolfe, R.S.: Nutrition and carbon metabolism of *Methanococcus voltae*. J. Bacteriol. 149, 852-863 (1982)
- 39 Widdel, F., Rouvière, P.E., Wolfe, R.S.: Classification of secondary alcohol-utilizing methanogens including a new thermophilic isolate. Arch.Microbiol. 150, 477-481 (1988)
- 40 Wildgruber, G., Thomm, M., König, H., Ober, K., Ricchiuto, T., Stetter, K.O.: *Methanoplanus limicola*, a plate-shaped methanogen representing a novel family, the *Methanoplanaceae*. Arch.Microbiol. 132, 31-36 (1982)
- 41 Winter, J., Lerp, C., Zabel, H.-P., Wildenauer, F.X., König, H., Schindler, F.: *Methanobacterium wolfei* sp.nov., a new tungsten-requiring, thermophilic, autotrophic methanogen. Syst.Appl. Microb..5, 457-466 (1984)
- 42 Worakit, S., Boone, D.R., Mah, R.A., Abdel-Samie, M.-E., El-Hawagi, M.M.: *Methanobacterium alcaliphilum* sp.nov., an H<sub>2</sub>-utilizing methanogen that grows at high pH values. Int.J.Syst.Bact. 36, 380-382 (1986)
- 43 Zabel, H.P., König, H., Winter, J.: Isolation and characterisation of a new coccoid methanogen, *Methanogenium tatii* sp.nov. from a solfataric field on Mount Tatio. Arch.Microbiol. 137, 308-315 (1984)



- 44 Zeikus, J.G., Henning, D.L.: *Methanobacterium arboriphilicum* sp.nov. an obligate anaerobe isolated from wetwood of living trees. A.v.Leeuwenhoek J.Microb.and Serol. 41, 543-552 (1975)
- 45 Zeikus, J.G., Wolfe, R.S.: *Methanobacterium thermoautotrophicus* sp.nov., an anaerobic, autotrophic, extreme thermophil. J.Bact. 109, 707-713 (1972)
- 46 Zellner, G., Alten, C., Stackebrandt, E., Conway de Macario, E., Winter, J.: Isolation and characterization of *Methanocorpusculum parvum*, gen.nov., sp.nov., a new tungsten requiring, coccoid methanogen. Arch. Microbiol. 147, 13-20 (1987)
- 47 Zellner, G., Bleicher, K., Braun, E., Kneifel, H., Tindall, B.J., Conway de Macario, E., Winter, J.: Characterization of a new mesophilic, secondary alcohol-utilizing methanogen, *Methanobacterium palustre* sp.nov. from a peat bog. Arch. Microbiol. 151, 1-9 (1989)
- 48 Zellner, G., Stackebrandt, E., Messner, P., Tindall, B.J., Conway de Macario, E., Kneifel, H., Sleytr, U.B.: *Methanocorpusculaceae* fam.nov., represented by *Methanocorpusculum parvum*, *Methanocorpusculum sinense* sp.nov., and *Methanocorpusculum bavaricum* sp.nov. Arch. Microbiol. 151, 381-390 (1989)
- 49 Zinder, S.H., Sowers, K.R., Ferry, J.G.: *Methanosarcina thermophila* sp.nov., a thermophilic, acetotrophic, methane-producing bacterium. Intern.J.Syst.Bacteriol. 35, 522-523 (1985)
- 50 Zinder, S.H., Anguish, T., Lobo, A.L.: Isolation and characterization of a thermophilic acetotrophic strain of *Methanotherix*. Arch.Microbiol. 146, 315-322 (1987)
- 51 Zhao, Y., Boone, D.R., Mah, R.A., Boone, J.E., Xun, L.: Isolation and characterisation of *Methanocorpusculum labreanum* sp.nov. from the LaBrea Tar Pits. Int.J.Syst.Bacteriol. 39, 10-13 (1989)
- 52 Zhilina, T.N., Ilarisnov, S.A.: Characteristics of formate assimilating methane bacteria and description of *Methanobacterium thermoformicium* sp.nov., an anaerobic, autotrophic extrem thermophil. Microbiology 53, 647-651 (1985)
- 53 Zhilina, T.N., Zavarzin, G.A.: Comparative cytology of *Methanosarcinaceae* and description of *Methanosarcina vacuolata* sp.nov. Microb. 48, 223-228 (1979)

### Restliche Archaeobakterien

(ohne Halo- und Methanogene Bakterien)

- 1 Belkin, S., Jannasch, H.W.: A new extremely thermophilic, sulfur-reducing heterotrophic marine bacterium. Arch. Microbiol. 141, 181-186 (1985)
- 2 Brock, T.D., Brock, K.M., Belly, R.T., Weiss, R.L.: *Sulfolobus*: A new genus of sulfur-oxidizing bacteria living at low pH and high temperature. Arch. Mikrobiol. 84, 54-68 (1972)
- 3 Fiala, G., Stetter, K.O.: *Pyrococcus furiosus* sp. nov. represents a novel genus of marine heterotrophic archaeobacteria growing optimally at 100°C. Arch. Microb. 145, 56-61 (1986)
- 4 Fiala, G., Stetter, K.O., Jannasch, H.W., Langworthy, T.A., Madon, J.: *Staphylothermus marinus* sp. nov. represents a novel genus of extremely thermophilic submarine heterotrophic archaeobacteria growing up to 98°C. Syst. Appl. Microb. 8, 106-113 (1986)
- 5 Huber, R., Kristjansson, J.K., Stetter, K.O.: *Pyrobaculum* gen. nov., a new genus of neutrophilic, rod-shaped archaeobacteria from continental solfataras growing optimally at 100°C. Arch. Microbiol. 149, 95-101 (1987)
- 6 König, H., Stetter, K.O.: Extremely thermophilic S<sup>0</sup>-metabolizers, in B. Vol 3, 2236-2253
- 7 Langworthy, T.A., Smith, P.F.: Cell wall-less archaeobacteria, in B. Vol 3, 2233-2236
- 8 Schäfer, S., Barkowski, C., Fuchs, G.: Carbon assimilation by the autotrophic thermophilic archaeobacterium *Thermoproteus neutrophilus*. Arch. Microbiol. 146, 301-308 (1986)
- 9 Segerer, A., Langworthy, T.A., Stetter, K.O.: *Thermoplasma acidophilum* and *Thermoplasma volcanium* sp. nov. from Solfatara Fields. Syst. Appl. Microbiol. 10, 161-171 (1988)
- 10 Segerer, A., Neuner, A., Kristjansson, J.K., Stetter, K.O.: *Acidianus infernus* gen. nov., sp. nov., and *Acidianus brierleyi* comb. nov.: Facultatively aerobic, extremely acidophilic thermophilic sulfur-metabolizing archaeobacteria. Int. J. Syst. Bact. 36, 559-564 (1986)
- 11 Shivers, D.W., Brock, T.D.: Oxidation of elemental sulfur by *Sulfolobus acidocaldarius*. J. Bact. 114, 706-710 (1973)
- 12 Stetter, K.O.: Archaeobacterial sulfate reducers, in B. Vol 3, 2216
- 13 Stetter, K.O.: *Archaeoglobus fulgidus* gen. nov., sp. nov.: a new taxon of extremely thermophilic archaeobacteria. Syst. Appl. Microb. 10, 172-173 (1988)

- 14 Stetter, K.O., König H., Stackebrandt, E.: *Pyrodictium* gen.nov., a new genus of submarine disc-shaped sulphur reducing archaeobacteria growing optimally at 105°C. Syst.Appl.Microbiol. 4, 535-551 (1983)
- 15 Zillig, W., Gierl, A., Schreiber, G., Wunderl, S., Janekovic, D., Stetter, K.O., Klenk, H.P.: The archaeobacterium *Thermofilum pendens* represents a novel genus of the thermophilic, anaerobic sulfur respiring *Thermoproteales*. Syst.Appl.Microb. 4, 79-87 (1983 a)
- 16 Zillig, W., Holz, J., Janekovic, D., Schäfer, W., Reiter, W.D.: The archaeobacterium *Thermococcus celer* represents a novel genus within the thermophilic branch of the archaeobacteria. Syst. Appl.Microb. 4, 88-94 (1983)
- 17 Zillig, W., Holz, I., Klenk, H.-P., Trent, J., Wunderl, S., Janekovic, D., Imself, E., Haas, B.: *Pyrococcus woesei* sp.nov., an ultra-thermophilic marine archaeobacterium, representing a novel order, *Thermococcales*. Syst.Appl.Microb. 9, 62-70 (1987)
- 18 Zillig, W., Stetter, K.O., Schäfer, W., Janekovic, D., Wunderl, S., Holz, I., Palm, P.: *Thermoproteales*: A novel type of extremely thermoacidophilic anaerobic archaeobacteria isolated from Icelandic solfataras. Zbl.Bakt.Hyg., 1.Abt., Orig.C2, 205-227 (1981)
- 19 Zillig, W., Stetter, K.O., Prangishvilli, D., Schäfer, W., Wunderl, S., Janekovic, D., Holz, I., Palm, P.: *Desulfurococcaceae*, the second family of the extremely thermophilic, anaerobic, sulfur-respiring *Thermoproteales*. Zbl.Bakt.Hyg., 1.Abt.Orig.C3, 304-317 (1982)
- 20 Zillig, W., Yeats, S., Holz, I., Böck, A., Rattenberger, M., Gropp, F., Simon, G.: *Desulfurolobus ambivalens* gen.nov., sp.nov., an autotrophic archaeobacterium facultatively oxidizing or reducing sulfur. Syst.Appl.Microbiol. 8, 197-203 (1986)

### Halobakterien

- 1 Gaber, S., Soliman, H., Trüper, H.G.: *Halobacterium pharaonis* sp.nov., a new, extremely haloalkaliphilic archaeobacterium with low magnesium requirement. Zbl.Bakt.Hyg., 1.Abt.Orig.C3, 318-329 (1982)
- 2 Gonzalez, C., Gutierrez, C., Ramirez, C.: *Halobacterium vallismortis* sp.nov., an amylolytic and carbohydrate-metabolizing extremely halophilic bacterium. Can.J.Microbiol. 24, 710-715 (1978)
- 3 Grant, W.D., Larsen, H.: Extremely halophilic *Archaeobacteria*, in B.Vol 3; 2216-2233

- 4 Hartmann, R., Sickinger, H.-D., Oesterhelt, D.: Anaerobic growth of halobacteria. Proc.Natl.Acad.Sci.USA 77(6), 3821-3825 (1980)
- 5 Javor, B.J.: Growth potential of halophilic bacteria isolated from solar salt environments: Carbon sources and salt requirements. Appl.Environmental Microbiol. 48, 352-360 (1984)
- 6 Montero, C.G., Ventosa, A., Rodriguez-Valera, F., Kates, M., Moldoveanu, N., Ruiz-Berraquero, F.: *Halococcus saccharolyticus* sp.nov., a new species of extremely halophilic non-alkaliphilic cocci. Syst.Appl.Microbiol. 167-171, 1989
- 7 Mullakhanbhai, M.F., Larsen, H.: *Halobacterium volcanii* sp.nov., a Dead Sea halobacterium with a moderate salt requirement. Arch.Microbiol. 104, 207-214 (1975)
- 8 Oren, A.: *Halobacterium sodomense* sp.nov., a Dead Sea Halobacterium with an extremely high magnesium requirement. Int.J.Syst.Bacteriol. 33, 381-386 (1983)
- 9 Rodriguez-Valera, F., Juez, G., Kushner, D.J.: *Halobacterium mediterranei* sp.nov., a new carbohydrate-utilizing extreme halophile. Syst.Appl.Microbiol. 4, 369-381 (1983)
- 10 Tindall, B.J., Ross, H.N.M., Grant, W.D.: *Natronobacterium* gen.nov. and *Natronococcus* gen.nov., two genera of haloalkaliphilic archaebacteria. Syst.Appl.Microbiol. 5, 41-57 (1984)
- 11 Tomlinson, G.A., Hochstein, L.J.: *Halobacterium saccharovorum* sp.nov., a carbohydrate-metabolizing, extremely halophilic bacterium. Can.J.Microbiol. 22, 587-591 (1976)
- 12 Torreblanca, M., Rodriguez-Valera, F., Juez, G., Ventosa, A., Kamekura, M., Kates, M.: Classification of non-alkaliphilic halobacteria based on numerical taxonomy and polar lipid composition, and description of *Haloarcula* gen.nov. and *Haloferax* gen.nov.. Syst.Appl.Microbiol. 8, 89-99 (1986)

#### Extrem halophile anaerobe Eubakterien (Gärer)

- 1 Oren, A.: *Clostridium lortetii* sp.nov., a halophilic obligatory anaerobic bacterium producing endospores with attached gas vacuoles. Arch.Microbiol. 136, 42-48 (1983)
- 2 Oren, A., Weisburg, W.G., Kessel, M., Woese, C.R.: *Halobacteroides halobius* gen.nov., sp.nov. a moderately halophilic anaerobic bacterium from the bottom sediments of the Dead Sea. Syst.Appl.Microbiol. 5, 58-70 (1984)
- 3 Oren, A., Paster, B.H., Woese, C.R.: *Haloanaerobiaceae*: A new family of moderately halophilic, obligatory anaerobic bacteria. Syst.Appl.Microbiol. 5, 71-80 (1984)

- 4 Zeikus, J.G., Hegge, P.W., Thompson, T.E., Phelps, T.J., Langworthy, T.A.: Isolation and description of *Haloanaerobicum praevalens* gen. nov. and sp. nov., an obligately anaerobic halophile common to Great Salt Lake sediments. *Curr. Microbiol.* 9, 225-234 (1983)

### Ergänzende Literatur

- 1 Atlas, R.M., Bartha, R.: *Microbial ecology: Fundamentals and applications*; Addison-Wesley Publishing Company 1981
- 2 Buchanan, R.E., Gibbons, N.E.: *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. 8th Edition 1974, The Williams + Wilkins Comp.: bei Verwendung abgekürzt als: B. 8th ed.
- 3 Brock, T.D., Smith, D.W., Madigan, M.T.: *Biology of Microorganisms* 5th ed. 1989, Prentice/Hall International editions
- 4 Davies, R.: The inactivation of vegetative bacterial cells by ionizing radiation; in: Skinner, F.A., Hugo, W.B.: *Inhibition and Inactivation of vegetative Microbes*. Academic Press, 239-255 (1976)
- 5 Dring, G.J.: Some aspects of the effects of hydrostatic pressure on Micro-organisms, in: Skinner, F.A., Hugo, W.B.: *Inhibition and Inactivation of vegetative Microbes*. Academic Press, 239-255 (1976)
- 6 Krieg, N.R., Holt, J.G.: *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, Vol I, Williams + Wilkins, Baltimore/London 1984: bei Verwendung abgekürzt als: B. Vol 1
- 7 Schlegel, H.G.: *Allgemeine Mikrobiologie*, 6. Auflage 1985, G. Thieme Verlag Stuttgart/New York
- 8 Sneath, P.H.A., Mair, N.S., Sharpe, M.E., Holt, J.G.: *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, Vol II, Williams + Wilkins, Baltimore/London 1986: bei Verwendung abgekürzt als: B. Vol 2
- 9 Staley, J.T., Bryant, M.P., Pfennig, N., Holt, J.G.: *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, Vol III, Williams + Wilkins, Baltimore/London 1989: bei Verwendung abgekürzt als: B. Vol 3
- 10 Starr, M.P., Stolp, H., Trüper, H.G., Balows, A., Schlegel, H.G.: *The prokaryotes: A Handbook on Habitats, Isolation, and Identification of Bacteria*, Vol 1. Springer Verlag (1981): bei Verwendung abgekürzt als: *The Prok. Vol 1*.
- 11 Stolp, H.: *Microbial ecology: Organisms, habitats, activities*; Cambridge University Press 1988