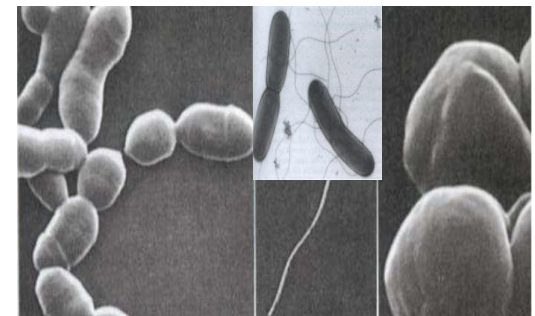
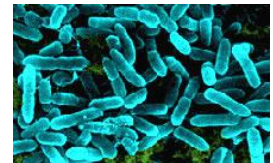
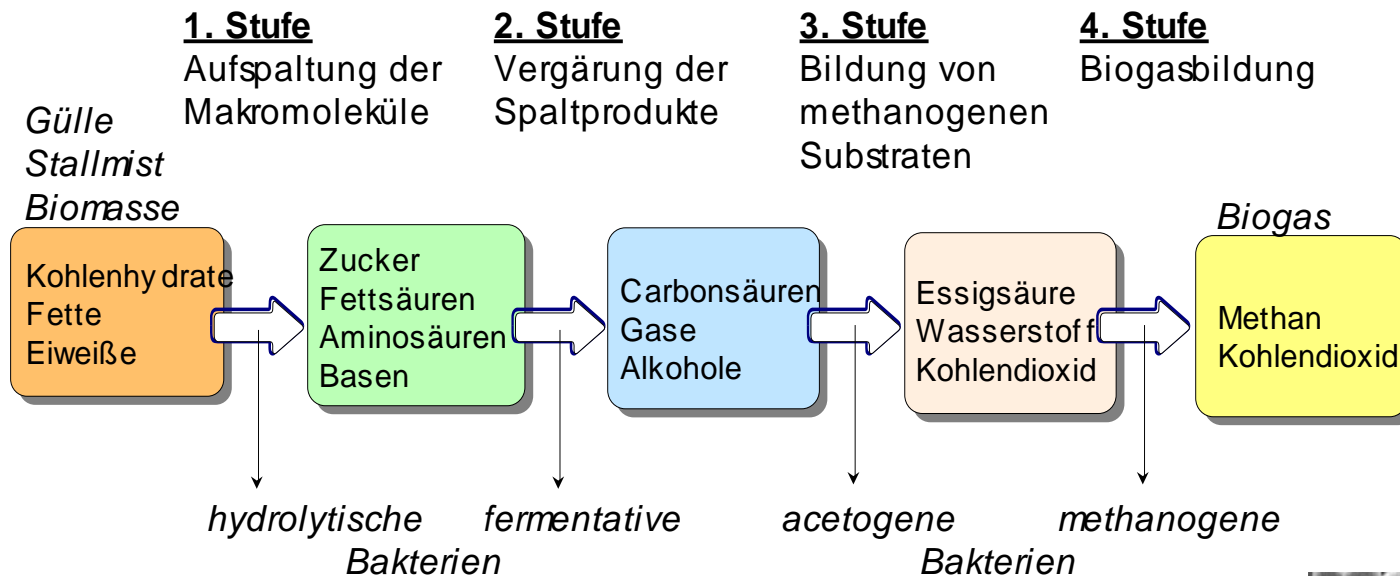


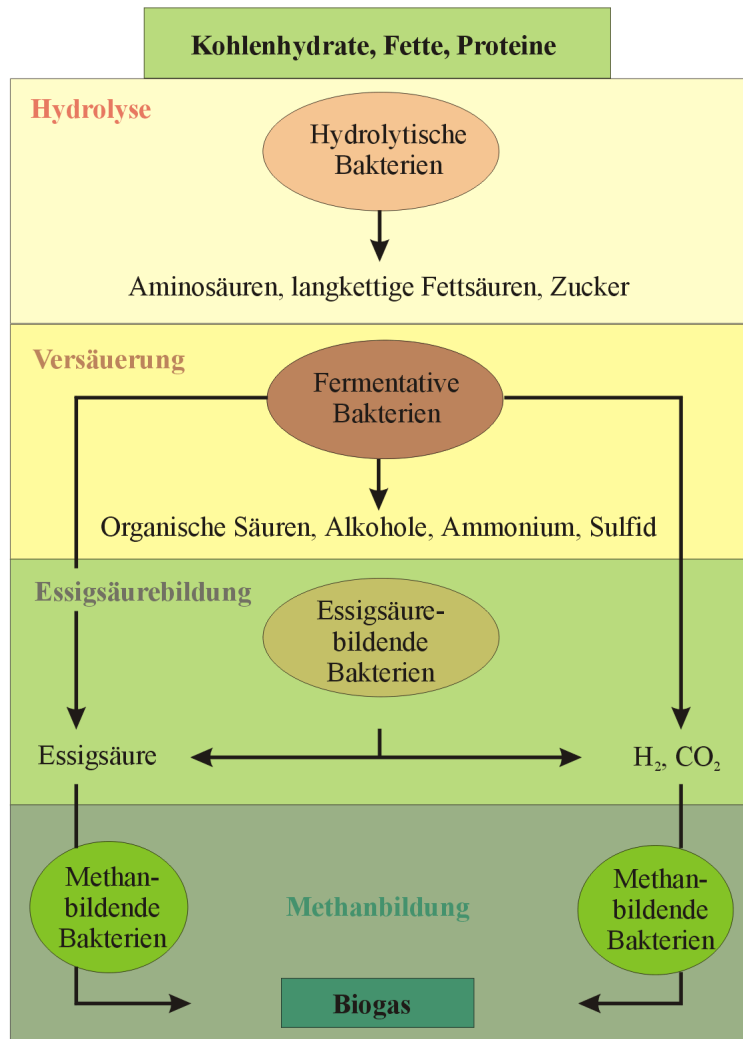
# Biogasherstellung

## 1 Grundlagen

# Das 4-Stufen Modell der Biomethanisierung



# Biogasbildung und Prozessparameter



**stabile Temperatur**

mesophil (25 – 35 °C)

thermophil (45 - 55 °C)

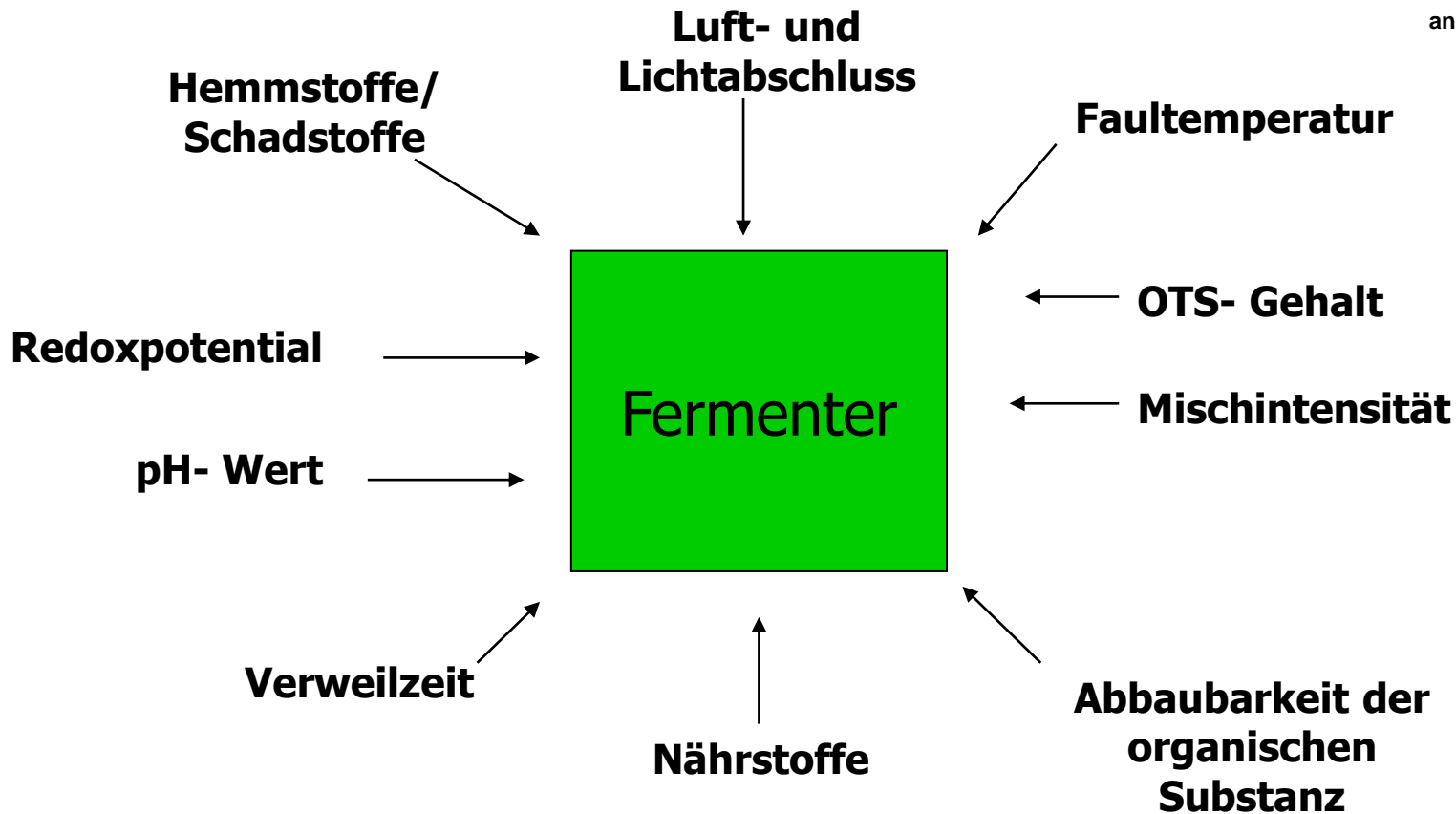
**anaerob**

**pH-Wert ca. 7,5**

**hydraulische Verweilzeit**

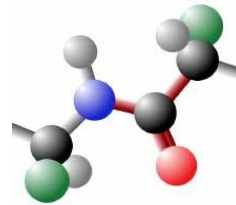
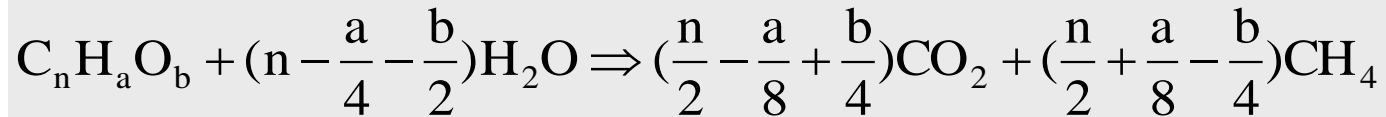
40 – 50 Tage

**Vermeidung von Hemmstoffen**



# Calculation of theoretical biogas yield

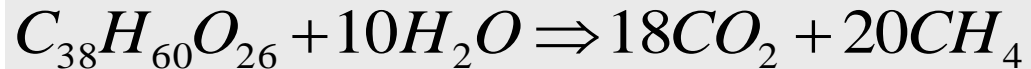
Example: vegetable fiber



Source: A.M. Buswell 1936

**Biomass content (DM):**

**C:** 45%  
**O<sub>2</sub>:** 42%  
**H<sub>2</sub>:** 6%  
**rest:** 7%



**47% CO<sub>2</sub>**      **53%CH<sub>4</sub>**

1 Mol Biomass	38 x 12 = 456 g	} 932 g →	18 Mol CO <sub>2</sub> + 20 Mol CH <sub>4</sub>
	60 x 1 = 60 g		
	26 x 16 = 416 g		

*38 Mol Biogas fill the Volume of 38 x 22,4 = 851 l!*

Theoretical biogas yield:

**851 / 932 = 0,91 l Biogas per gram of DM**

Source: B. Linke ATB Potsdam

## Hypothetical biogas yield and hypothetical biogas composition at the fermentation from carbohydrate, fat and protein (VDI, 2006)

Kind of substrat composition	Hypothetical biogas yield	Hypothetical biogas composition	
	(l <sub>N</sub> /kg oTS)	CH <sub>4</sub> (Vol.%)	CO <sub>2</sub> (Vol.%)
<b>Carbohydrate</b>	<b>750</b>	<b>50</b>	<b>50</b>
<b>Fat</b>	<b>1390</b>	<b>72</b>	<b>28</b>
<b>Protein</b>	<b>800</b>	<b>60</b>	<b>40</b>

# Umrechnung Biogas auf Normzustand

Umrechnung des gemessenen Biogasvolumens auf Normzustand bei Normtemperatur (0°C=273,15 K) und Normdruck (1013 mbar)

$$V_0 = V \cdot \frac{(p_L - p_W) \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$$

$V_0$ ...Normvolumen des Biogases

$V$ ...gemessenes Volumen des Biogases

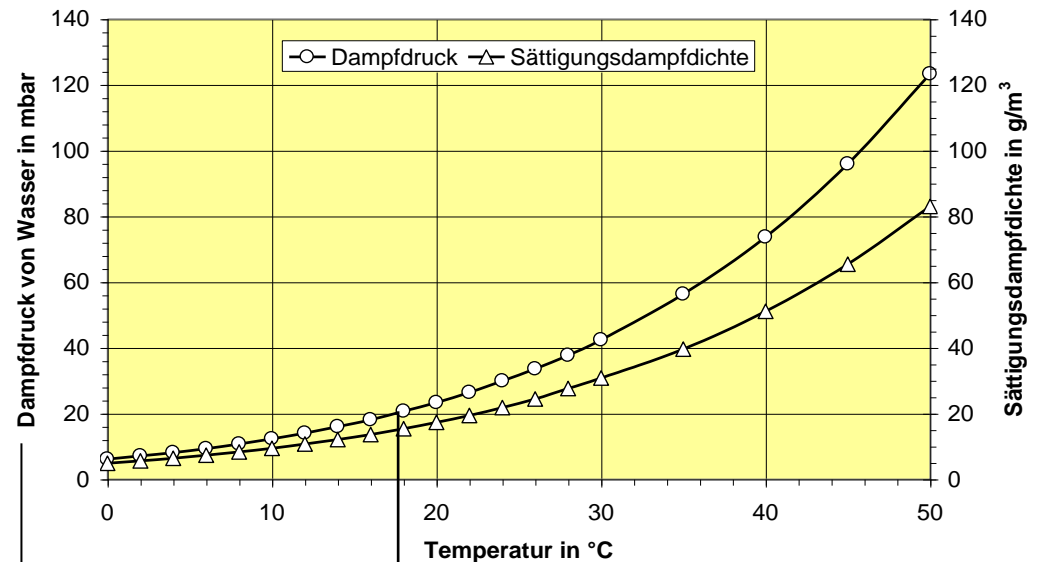
$p_L$ ...Luftdruck in mbar

$p_W$ ...Dampfdruck des Wassers

$p_0$ ...Normdruck (1013mbar)

$T_0$ ...Normtemperatur (273,15K)

$T$ ...gemessene Temperatur des Biogases



$$V_0 = 100 \cdot \frac{(980 - 20) \cdot 273,15}{1013 \cdot (273,15 + 18)}$$

$$V_0 = 100 \cdot 0,89 = 89 \text{ m}^3$$

↑ Temperatur im Gasspeicher (°C)

# Eigenschaften von säure- und methanbildenden Bakterien

## Teil 1 (nach Werner et al. 1986)



<b>Einflussfaktoren</b>	<b>säurebildende Bakterien</b>	<b>methanbildende Bakterien</b>
vorherrschende Mikroorganismen	fakultativ anaerobe Bakterien	obligat anaerob
Empfindlichkeit gegen Temperaturschwankungen	kaum	sehr empfindlich bereits ab Schwankungen um 1 °C bis 3 °C irreversible Schädigungen
pH-Wert Bereiche	saurer Bereich (5,0 bis 6,5)	alkalischer Bereich (6,5 bis 7,5)
Wachstumsraten	rel. kurze Verdopplungszeit; i. d. Regel kleiner als 24 h	rel. lange Verdopplungszeit zwischen 2 und 10 Tagen



# Eigenschaften von säure- und methanbildenden Bakterien



## Teil 2 (nach Werner et al. 1986)



University of Natural Resources

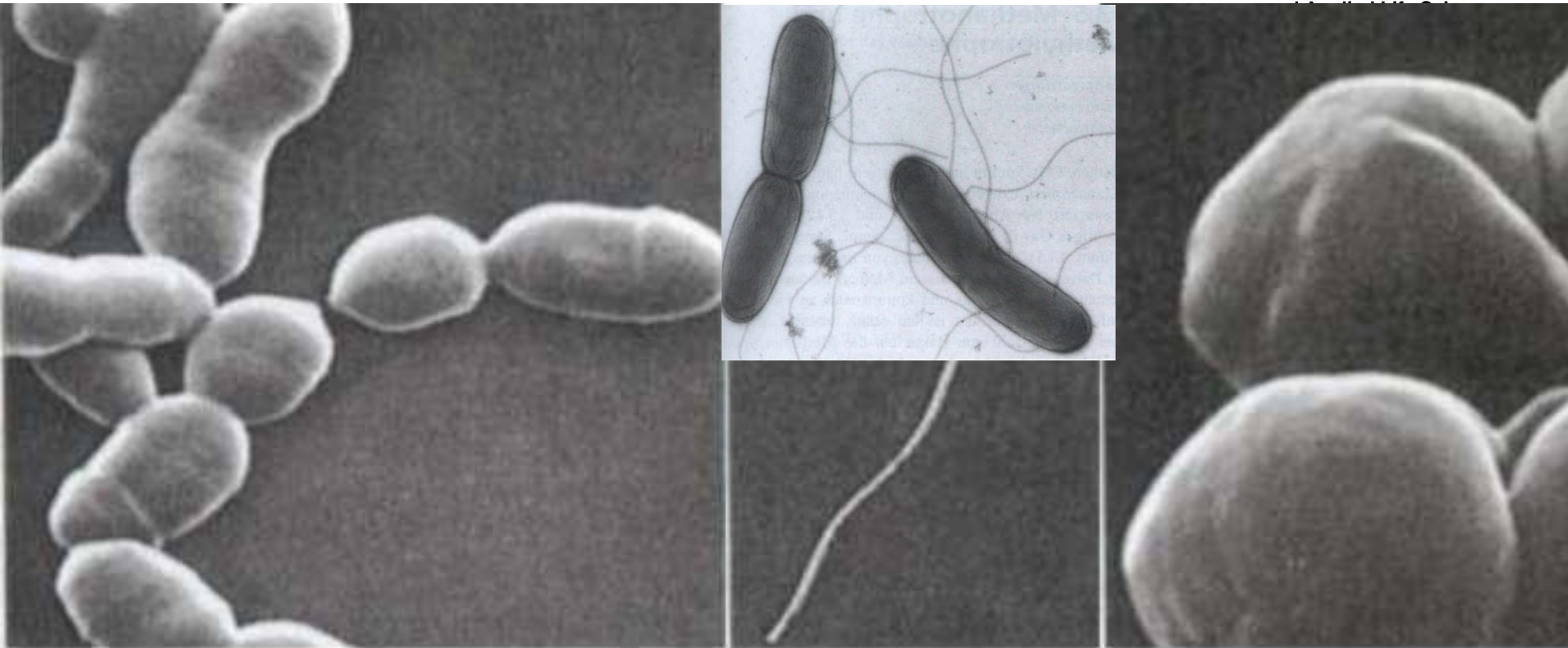
<b>Einflussfaktoren</b>	<b>säurebildende Bakterien</b>	<b>methanbildende Bakterien</b>
Stoffwechselprodukte	organische Säuren, Wasserstoff, Kohlendioxid	Methan, Kohlendioxid
Medium	wässrig (Wassergehalt größer 60 %)	
Empfindlichkeit gegen Zellgifte	geringer	größer
Anforderungen an die Nährstoffzusammensetzung	ausgeglichenes Nährstoffangebot	
Besonderheiten	lebensfähig mit und ohne Sauerstoff	lebensfähig nur bei Abwesenheit von freiem Sauerstoff und Dunkelheit

# Optimale Bedingungen für die CH<sub>4</sub> Bildung



Betriebsparameter	Optimalbedingungen
Temperatur	psychrophile Bakterien (unterhalb von 20 °C) mesophile Bakterien (zwischen 20 °C und 40 °C) thermophile Bakterien (zwischen 40 °C und 60 °C)
pH-Wert	im neutralen Bereich zwischen pH 7,0 und 7,2
Konzentration an flüchtigen Fettsäuren	bei frischem Substrat: 3.000 bis 10.000 mg/l bei ausgegorenem Substrat: unter 1.000 mg/l
Ammoniakgehalt	unter 3.000 mg/l mindestens 20 mg/l als Nährstoff
Schwefelwasserstoff	unter 3 mMol/l bzw. 100 mg Sulfid/l Substrat das entspricht einem Anteil von 1 Vol.% im Gas
Redox-Potential	unter 250 mV
Kohlenstoff/Stickstoffverhältnis	nicht größer als 100:3
Phosphor	1 mg/l
Nickel, Kobalt, Selen	0,1 mg (in fast allen Substraten in ausreichender Menge vorhanden)

# Methanogene Archaea und Wasserstoffoxidierende Bakterien



Quelle: Brock Mikrobiologie (617); A. Zehnder

Methanbildner oder methanogene Bakterien =

Gruppe der Archaea-Bakterien, die unter Ausschluß von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) Methan bilden

# Merkmale methanogener Archaea

nach: Brock Mikrobiologie S. 618



University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences

Gattung	Morphologie	Anzahl der Arten	Substrate für die Methanogenese	DNS (Mol % GC)
<b>Methanomicrobiales</b>				
Methanomicrobium	kurze Stäbchen	2	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat	45-49
Methanogenium	unregelmäßige Kokken	11	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat	51-61
Methanospirillum	Spirilla	1	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat	46-50
Methanoplanus	plattenförmige Zellen	3	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat	38-47
Methanocorpusculum	unregelmäßige Kokken	5	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat, Alkohole	48-52
Methanoculleus	unregelmäßige Kokken	6	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat, Alkohole	54-62

# Merkmale methanogener Archaea

nach: Brock Mikrobiologie S. 618



University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences

Gattung	Morphologie	Anzahl der Arten	Substrate für die Methanogenese	DNS (Mol % GC)
<b>Methanobacteriales</b>				
Methanobacterium	lange Stäbchen	19	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat	29-31
Methanobrevibacter	kurze Stäbchen	7	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat	27-31
Methanosphaera	Kokken	2	Methanol + H <sub>2</sub>	26
Methanothermus	Stäbchen	2	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat kann S <sup>0</sup> reduz., hyperthermophil	33
<b>Methanococcales</b>				
Methanococcus	unregelmäßige Kokken	11	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat, Pyrovat + CO <sub>2</sub>	29-34
<b>Methanopyrales</b>				
Methanopyrus	Stäbchen mit Ketten	1	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Hyperthermophil, Wachst. bei 110 °C	60

# Merkmale methanogener Archaea

## nach: Brock Mikrobiologie S. 618



Gattung	Morphologie	Anzahl der Arten	Substrate für die Methanogenese	DNS (Mol % GC)
<b>Methanosarcinales</b>				
Methanosarcina	große, unregelmäßige Kokken in Paketen	8	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Methanol, Methylamine, Acetat	41-43
Methanobolus	unregelmäßige Kokken in Aggregaten	5	Methanol, Methylamine	38-42
Methanohalobium	unregelmäßige Kokken	1	Methanol, Methylamine; halophil (MO m. NaCl-Bed.)	44
Methanococcoides	unregelmäßige Kokken	2	Methanol, Methylamine	42
Methanohalophilus	unregelmäßige Kokken	3	Methanol, Methylamine, Methylsulfide; halophil	41
Methanothrix (Methanosaeta)	lange Stäbchen bis Filamente	4	Acetat	52-61

# Substrate, die von verschiedenen methanogenen Archaea in Methan umgewandelt werden

## nach: Brock Mikrobiologie S. 618



University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences

### 1. CO<sub>2</sub>-artrige Substrate

- ◆ Kohlendioxid, CO<sub>2</sub> (mit Elektronen aus H<sub>2</sub>, bestimmten Alkoholen oder Pyrovat)
- ◆ Formiat, HCOO<sup>-</sup>
- ◆ Kohlenmonoxid, CO

### 2. Methylsubstrate

- ◆ Methanol, CH<sub>3</sub>OH
- ◆ Methylamin, CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup>
- ◆ Dimethylamin, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NH<sub>2</sub><sup>+</sup>
- ◆ Trimethylamin, (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>NH<sup>+</sup>
- ◆ Methylmercaptan CH<sub>3</sub>SH
- ◆ Dimethylsulfid, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S

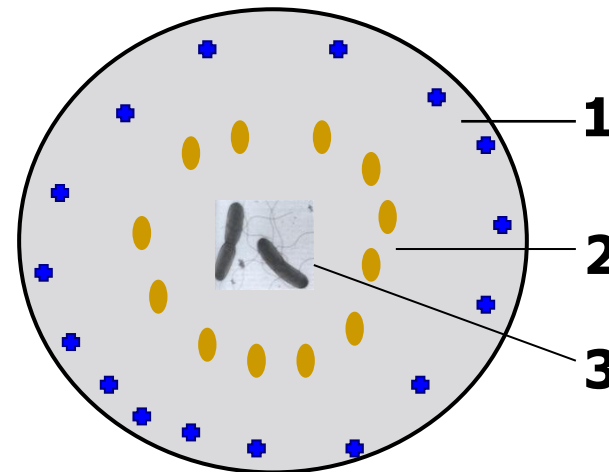
### 3. Acetotrophes Substrat

- ◆ Acetat, CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>

# Gemischte Mikrokolonien nach: LIOR CD-ROM Biogas

Zur besseren Kooperation organisieren sich Bakterien und Archaea-Bakterien in globularen Mikrokolonien an

1. Fermentative Bakterien
2. Acetogene Bakterien
3. Methanogene Archaea-Bakterien





# Hemmstoffe und ihre Wirkung nach Weiland 2001; Edelmann 2000



University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences

Hemmstoff	Hemmkonzentration	Anmerkungen
Sauerstoff	> 0,1 mg/l O	Hemmung der obligat anaeroben Methanbakterien.
Schwefelwasserstoff	> 50 mg/l H <sub>2</sub> S	Hemmwirkung sinkendem pH-Wert.
Flüchtige Fettsäuren	> 2.000 mg/l HAc (pH = 7,0)	Hemmwirkung steigt mit sinkendem pH-Wert. Hohe Adaptionfähigkeit der Bakterien.
Ammoniumstickstoff	> 3.500 mg/l NH <sub>3</sub>	Hemmwirkung steigt mit steigendem pH-Wert und steigender Temperatur. Hohe Adaptionfähigkeit der Bakterien.
Schwermetalle	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Nur gelöste Metalle wirken inhibierend. Entgiftung durch Sulfidfällung.
Desinfektionsmittel Antibiotika	ab ca. 1 bis 100 mg/l	Hemmungen können, müssen aber nicht auftreten, anaerobe B. sprechen nicht auf alle Antibiotika an; z.B. wirkt Penicillin auf die Zellwandsynthese von aeroben Bakterien;

# Hemmstoffe und ihre Wirkung nach Edelmann 2000



University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences

Hemmstoff	Hemmkonzentration	Anmerkungen
Natrium	6 bis 30 g/l	Regulierung des pH-Wertes der methanogenen MO; Anpassung der Populationen bis 60 g/l; Wechselwirkungen zu Kalium möglich.
Kalium	ab 3 g/l	Regulierung der Osmose der Methanbakterien; Wechselwirkungen mit Natrium und Ammonium.
Kalzium	ab 2,8 g/l $\text{CaCl}_2$	Wechselwirkungen mit langkettigen Fettsäuren
Magnesium	ab 2,4 g/l $\text{MgCl}_2$	Wechselwirkung mit Fettsäuren
Verzweigte Fettsäuren	ab 50 mg/l	z.B. Iso-Buttersäure
Wasserstoff	Ab $1 \mu\text{mol/l} \approx 1,3 \text{ g/l}$ im Gas	Entsteht beim Abbau und Akkumulierung von niederen Fettsäuren, für Propionsäureabbau möglichst niedrige Konzentrationen erwünscht

## Raumbelastung $B_R$

$$B_R = \frac{\dot{m} \times c}{V_R}$$

$\dot{m}$  = zugeführte Substratmenge je Zeiteinheit (kg/d)

$c$  = Konzentration der organischen Substanz (%)

$V_R$  = Reaktorvolumen (l)

Gibt an wie viel Kilogramm organischer Trockensubstanz (oTS) dem Fermenter je  $m^3$  Volumen und Zeiteinheit zugeführt werden kann.

## Hydraulische Verweilzeit HRT

$$HRT = \frac{V_R}{\dot{V}}$$

$V_R$  = Reaktorvolumen

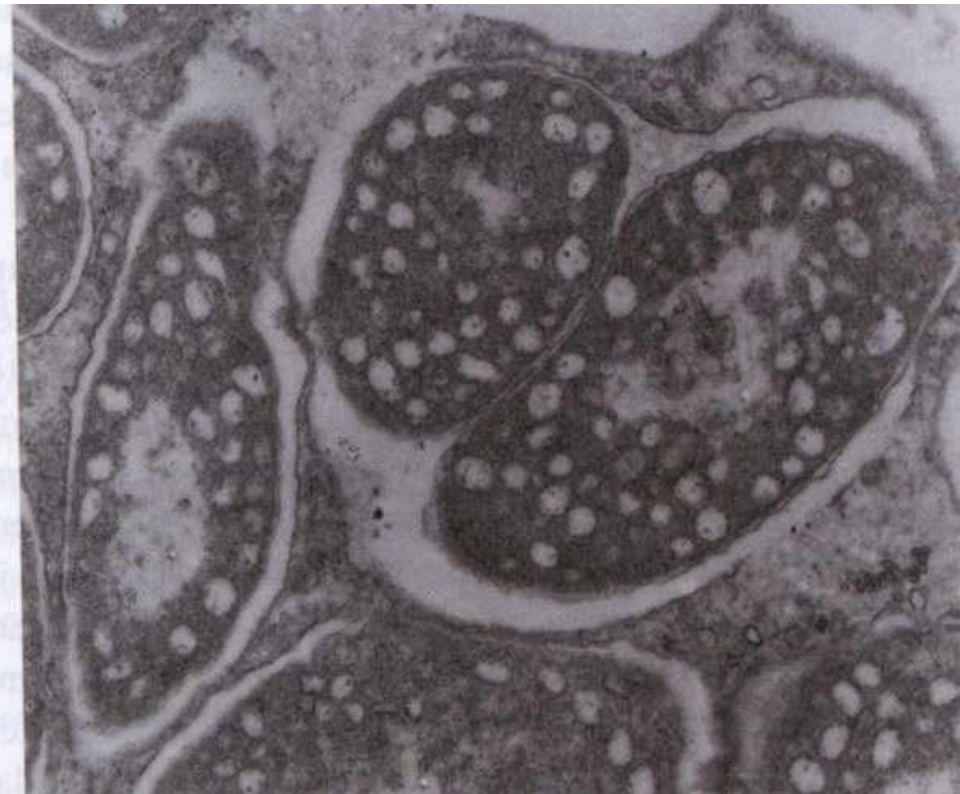
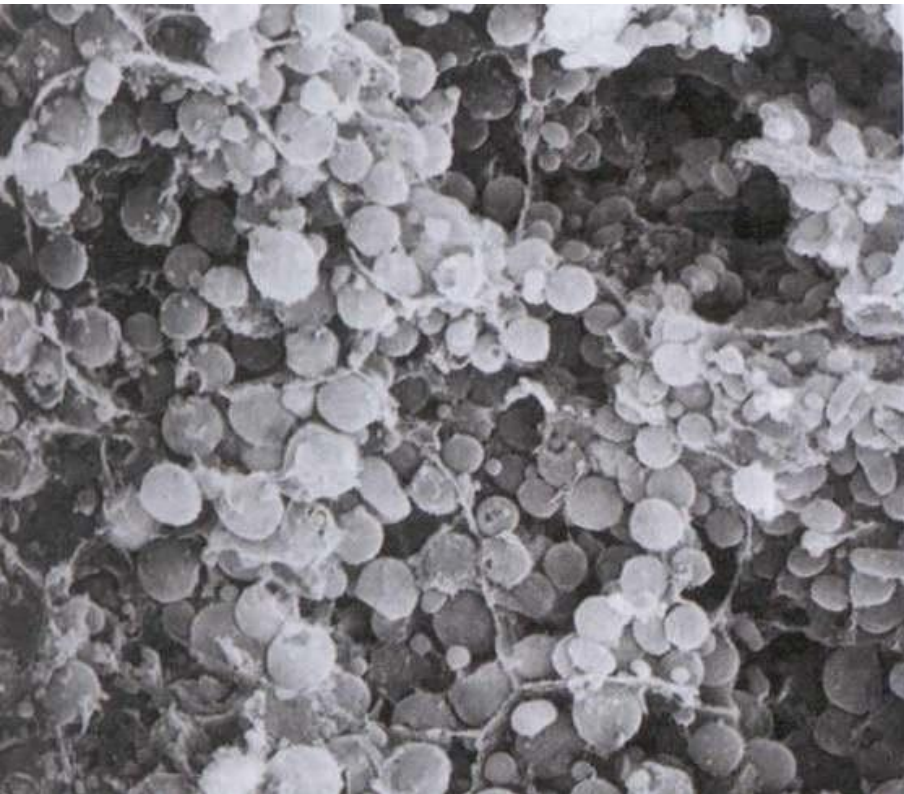
$\dot{V}$  = zugeführte Substratmenge

Dies ist die Zeitdauer, die ein zugeführtes Substrat im Mittel bis zu seinem Austrag im Fermenter verbleibt.

# Zusammensetzung des Biogases in [Vol.%]

Methan		50 - 75
Kohlendioxid		25 - 50
Wasserdampf		1 - 10
Stickstoff		0 - 5
Sauerstoff		0 - 2
Wasserstoff		0 - 1
Ammoniak		0 - 1
Schwefelwasserstoff	[ppmv]	50 - 6.000

# Chemolithotrophe schwefeloxidierende Bakterien



Quelle: Brock Mikrobiologie (749)

# Laboratory for Anaerobic Digestion Experiments (BOKU)



# Treatment of samples in the laboratory

## Crude milling



## Fine milling



Sonnenblumensilage 1 Ernte



Sonnenblumensilage 3 Ernte

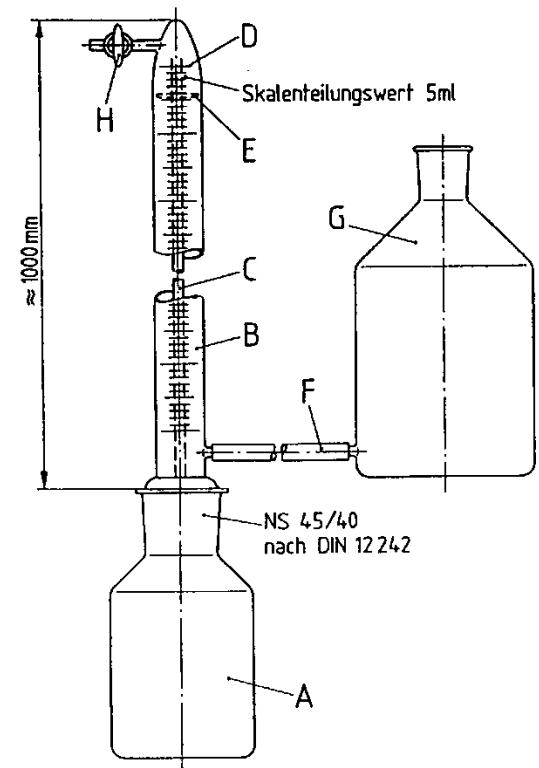


Silage MAIS+ Sonnenblumen

# DIN Norm- 38414 Wasser, Abwasser und Schlammuntersuchungen

Bestimmt:

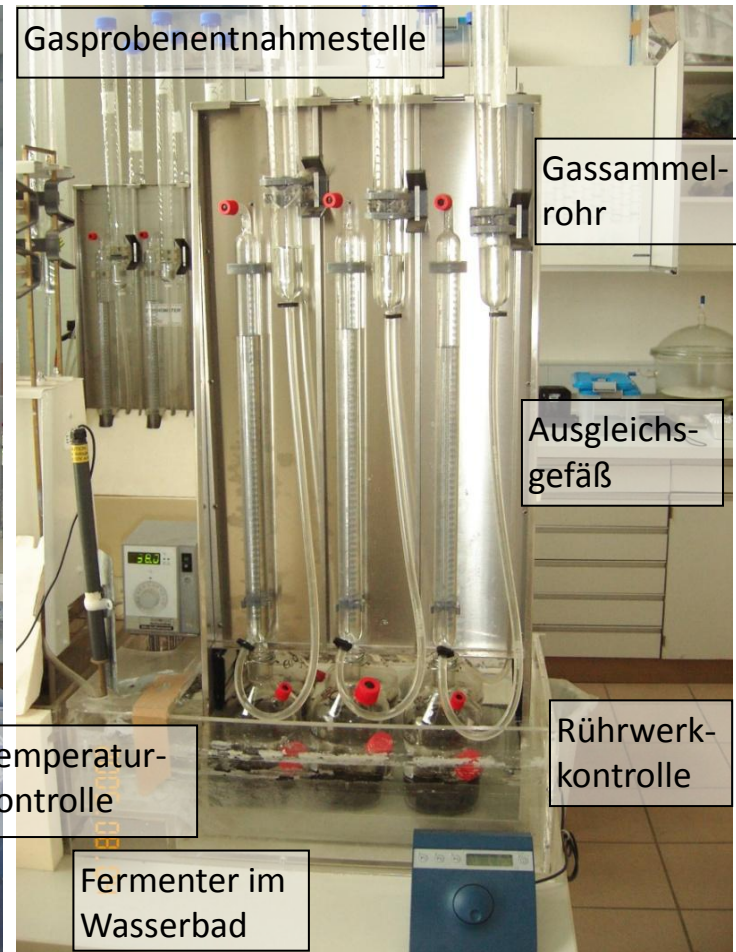
- Anwendungsbereich
- Zweck
- Störungen
- Geräte und Chemikalien
- Probenvorbereitung
- Bereitstellung des Impfschlammes
- Durchführung
- Auswertung
- Angabe der Ergebnisse
- Untersuchungsbericht



- A Standflasche mit Schlammprobe, Inhalt 500 ml, z. B. DIN 12 039 – W 500
- B Eudiometerrohr, Inhalt 300 bis 400 ml, Durchmesser 30 bis 35 mm, Skalenteilungswert 5 ml
- C Verbindungsrohr, Durchmesser etwa 6 mm
- D Nullmarke
- E Haltestifte bzw. Abstandhalter oder Lochverbindung zwischen Eudiometerrohres und Verbindungsrohr
- F Schlauchverbindung
- G Niveaugefäß, Inhalt min. 750 ml, z. B. Stutzenflasche DIN 12 242
- H Einweg-Kegelhahn, z. B. Küken DIN 12 541 – EM 3

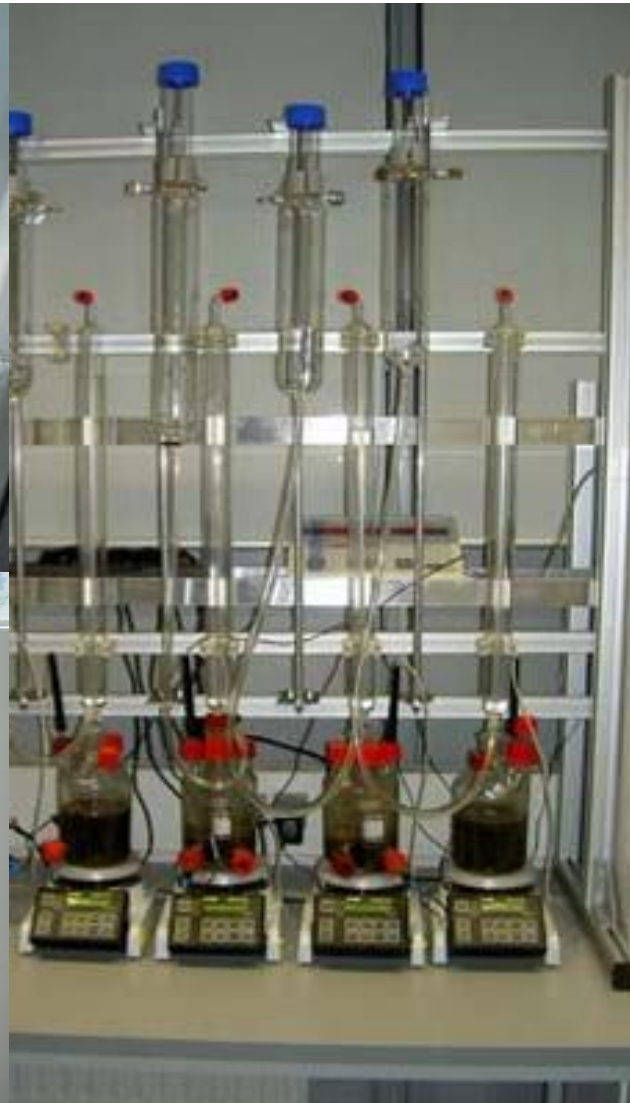


# Laborversuchsanlage DIN Norm- 38414 (batch) BOKU

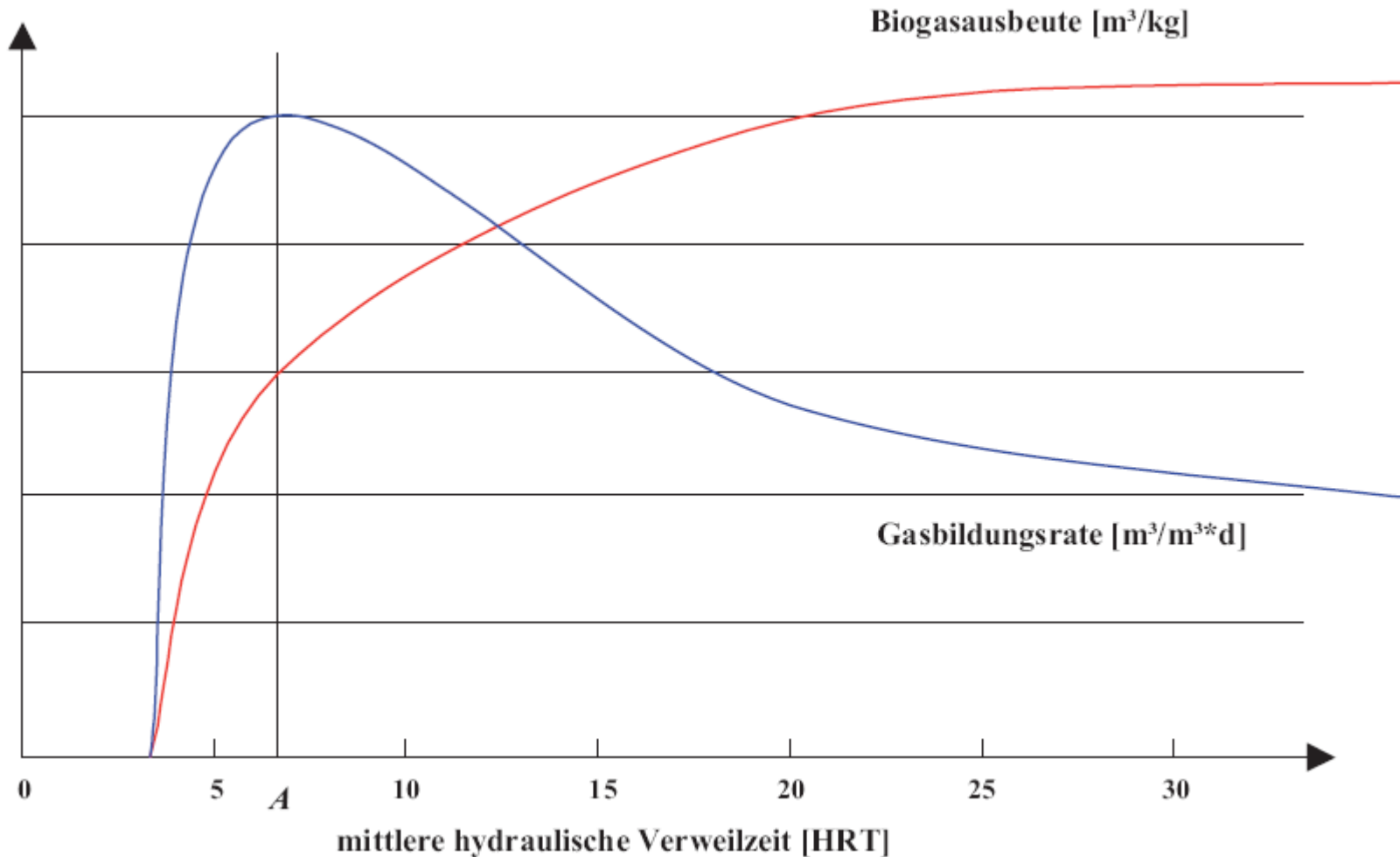


# Laborversuchsanlage

## DIN Norm- 38414 (continuierlich) BOKU



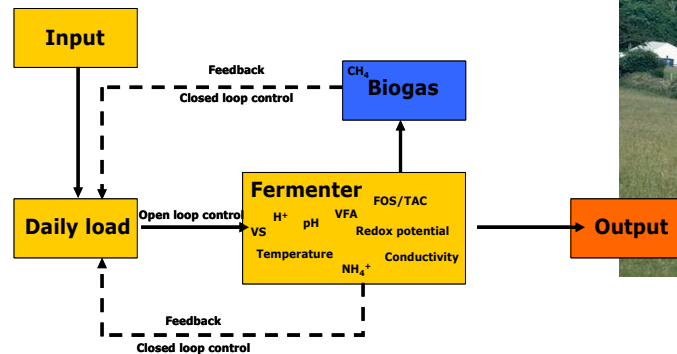
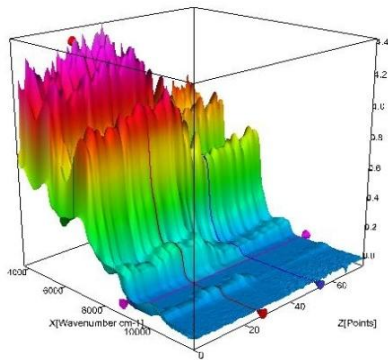
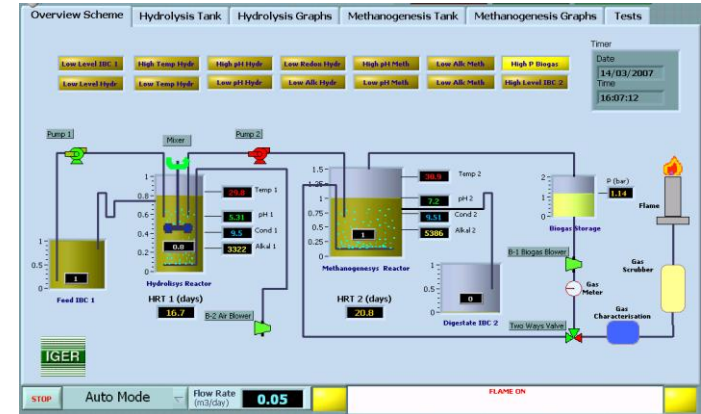
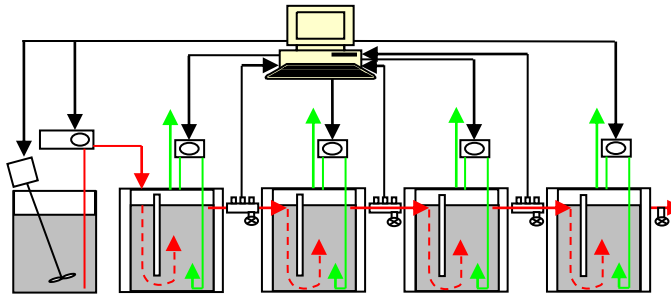
# Biogasausbeute und Gasbildungsrate in Abhängigkeit von der Verweilzeit (Quelle: FNR 2009)



# Development of an Early-Warning System

- Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS)
- real time monitoring through a mathematical model with the parameters:

- pH
- alkalinity
- VFAs
- VFA/TIC
- redox potential
- $H^+$  in the biogas
- trends in biogas production



# Laboranlagen zur Biogaserzeugung am Institut für Landtechnik, Hohenheim

## 57 Kolbenprober (30 ml)

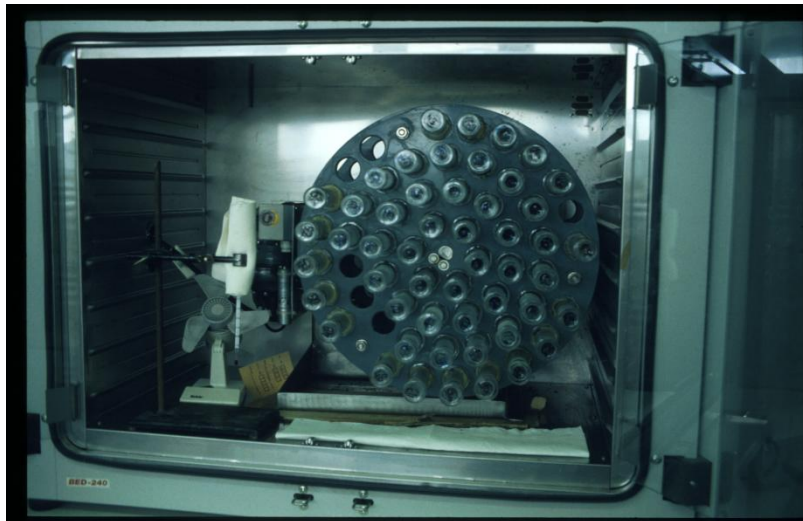
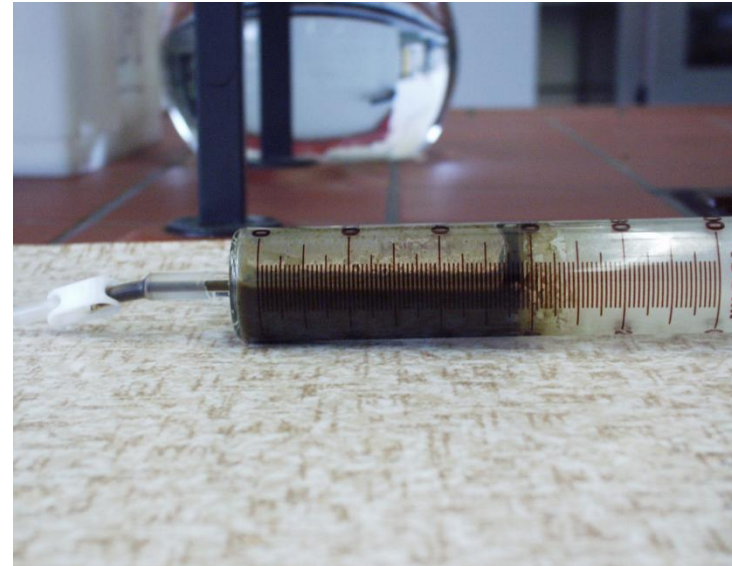
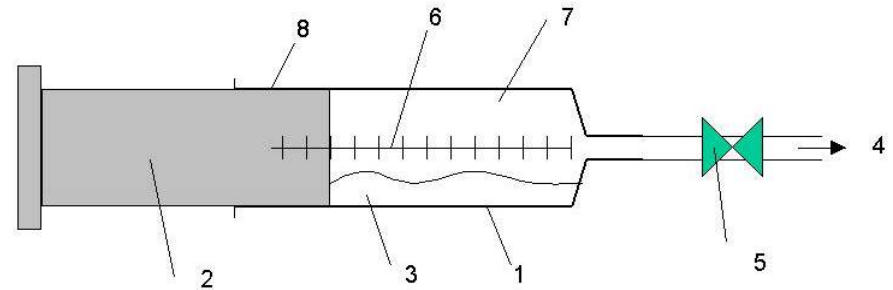
Batch-Betrieb

### Versuchsdurchgang:

16 verschiedene Varianten / Substrate  
+ 2 Standards

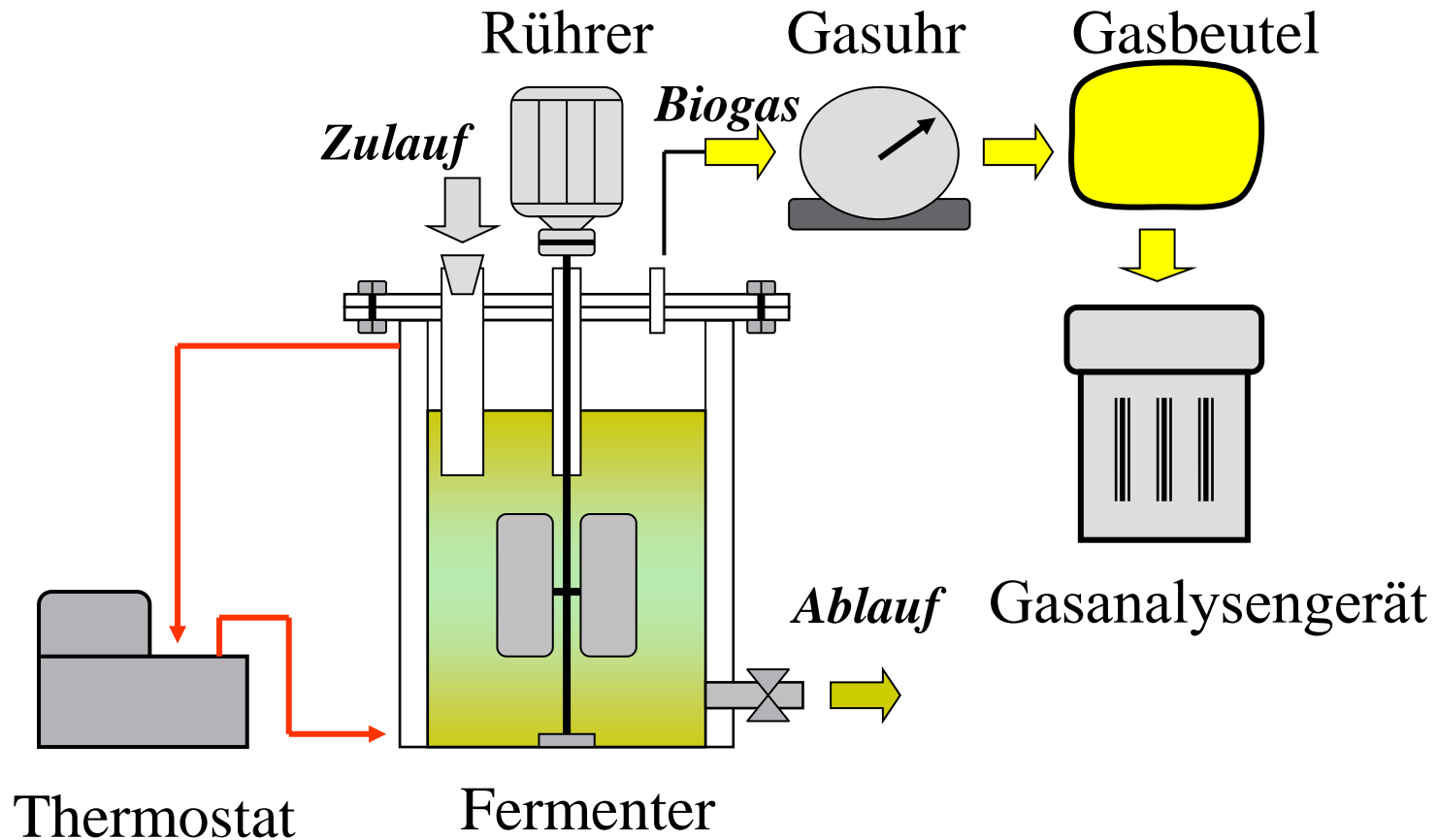
+ Nullvariante

mit je 3 Wiederholungen



Quelle: Oechsner, Helffrich, 2004

# Schematische Darstellung Kleintechnische, kontinuierliche Versuchsanlage



Quelle: B. Linke ATB Potsdam

# Anlage für kontinuierliche Gärversuche an der FAL Braunschweig



University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences



# Laboranlagen zur Biogaserzeugung am Institut für Agrartechnik Bornim (ATB)



University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences





# Laboranlagen zur Biogaserzeugung am Institut für Agrartechnik Bornim (ATB)



University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences



Quelle: B. Linke ATB Potsdam

# Versuchsanlage zur kontinuierlichen Gärtests an der NAUU, Kiev



# Labor Versuchsanlagen Aarhus Dänemark



©  
University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences

