

Ergebnisse zur Ermittlung der optimalen Raumbelastung

ETI Arbeitsgruppe Biogas, 5.12.2007
Rietz-Neuendorf, OT Sauen

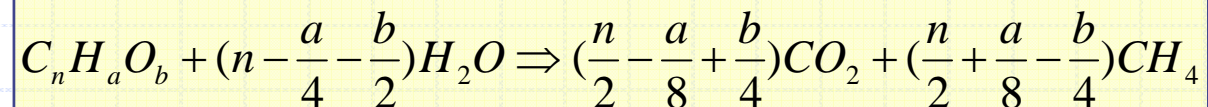
1. Einführung
2. Systeme zur Biogasgewinnung
3. Entwicklung eines einfachen Modells
4. Untersuchte Substrate und Versuchsanlagen
5. Versuchsergebnisse
 - Batch-Versuche
 - Belastungssteigerungsversuche
6. Nachgärung
7. Fazit

Bernd Linke, Pia Männert, Jan Mumme
Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim (ATB)
BTN Nordhausen

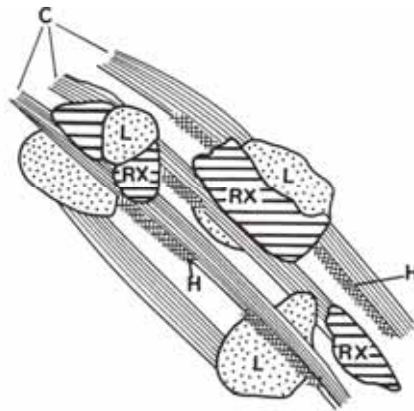
Biogasausbeuten verschiedener Stoffgruppen

Stoffgruppen	Molgewicht [g·mol ⁻¹]	Molanteile CO ₂ und CH ₄ im Biogas [mol]	Molvolumen des Biogases [l·mol ⁻¹]	mögliche Biogasausbeute [l·g ⁻¹]
Kohlenhydrate				
C ₆ H ₁₂ O ₆ oder (CH ₂ O) _n	180	3CO ₂ + 3CH ₄	6 x 22,4 = 134,4	134,4/180 = 0,746
Fette (z.B. Palmitin)				
C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256	4,5CO ₂ + 11,5 CH ₄	16 x 22,4 = 358,4	358,4/256 = 1,39
Proteine mit 21 Aminosäuren				
C ₁₃ H ₂₅ O ₇ (N ₃ S)	367	5,125CO ₂ + 7,857CH ₄	13 x 22,4 = 291	291/367 = 0,79
Pflanzliche Biomasse				
C ₃₈ H ₆₀ O ₂₆	932	18 CO ₂ + 20 CH ₄	38 x 22,4 = 851	851/932 = 0,91

**BUSSWELL
Formel**

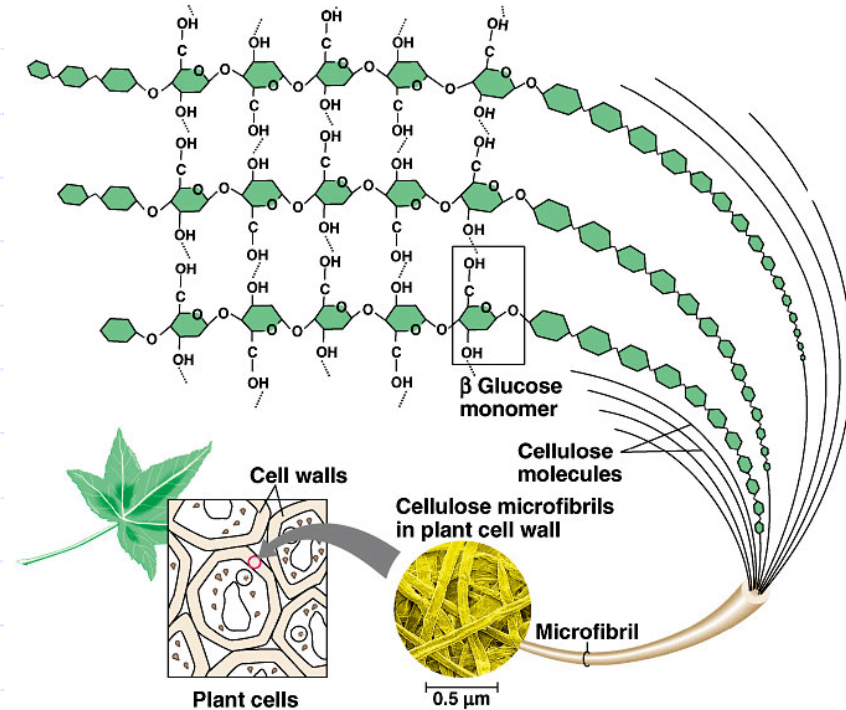


Aufbau und Charakteristik pflanzlicher Biomasse



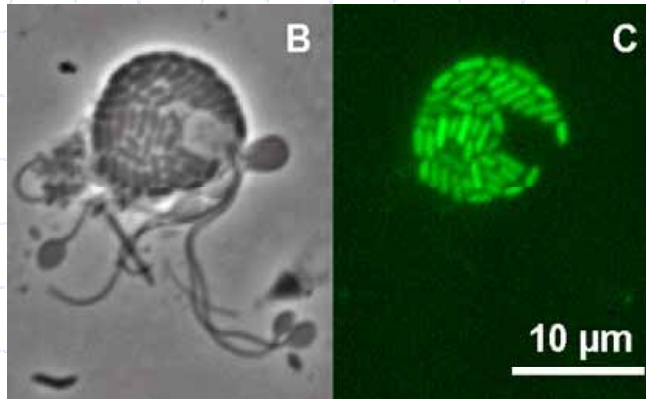
C Cellulose fibres
L Lignin
H Hemicellulose
RX Xylane

Quellen:
www.tucows.vc-graz.ac.at
www.kennmadsen.dk

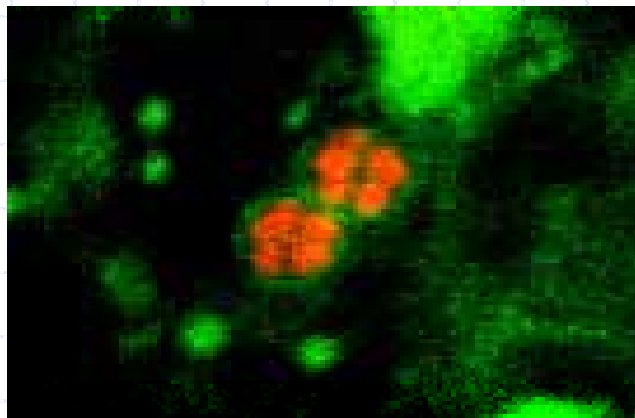


- Cellulose und Hemicellulose Hauptbestandteile pflanzlicher Zellwände
- glycosidische Bindungen zwischen Glucose-Einheiten leicht hydrolysierbar
- für Abbau jedoch viele Enzyme erforderlich (symbiotische Wirkung, Wiederkäuer)
- Bei Verholzung Bildung amorphes Netz phenolischer Polymere, Schutz vor enzymatischem Anagriff
- Ausnahme: Pilze und Actinomyceten haben Strategie zum Abbau entwickelt, Grundlagenforschung an Termiten, symbiotische Wirkung vieler Mikroorganismen

Symbiotische Mischkulturen bei der Biogasbildung



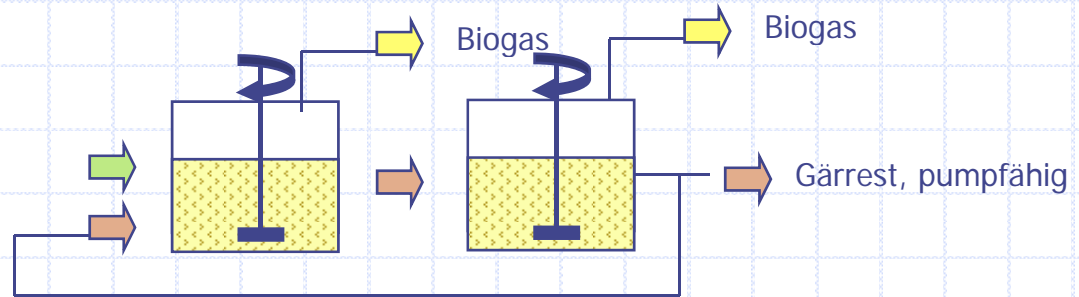
Probe aus Termitendarm
Wasserstoff produzierenden Protozoen
(B) sind eng mit Wasserstoff
verbrauchenden methanogenen Archäen
vergesellschaftet, die an ihrer grünen
Eigenfluoreszenz (C) zu erkennen sind
Quelle: Max-Planck-Institut für
terrestrische Mikrobiologie, Marburg



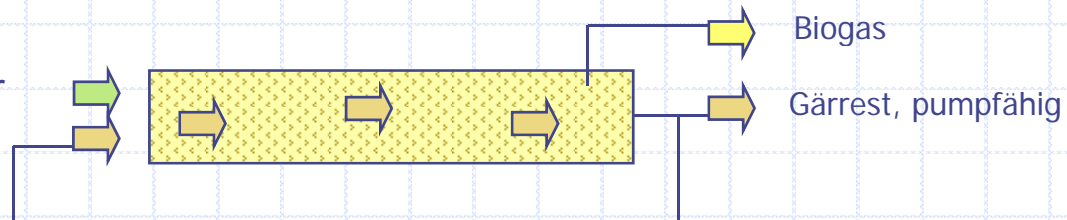
Probe aus Biogasanlage (Rindergülle, Maissilage,
Getreidekörner, mesophil
Methanogene Archäen (Rot) sind von Wasserstoff-und
Acetat bildenden Eubakterien (grün) umgeben
Quelle: ATB, Potsdam

Systeme zur Biogasgewinnung aus NawaRos und Gülle (vereinfacht)

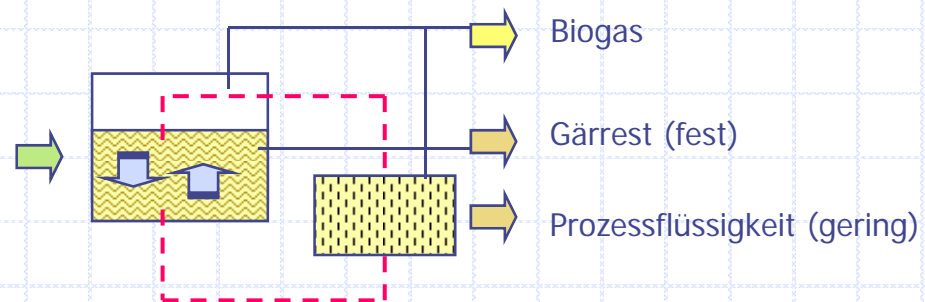
Rührkessel (CSTR)
NawaRos
Gülle



Pfropfenstromreaktor (horizontal/vertikal)
NawaRos
Gülle

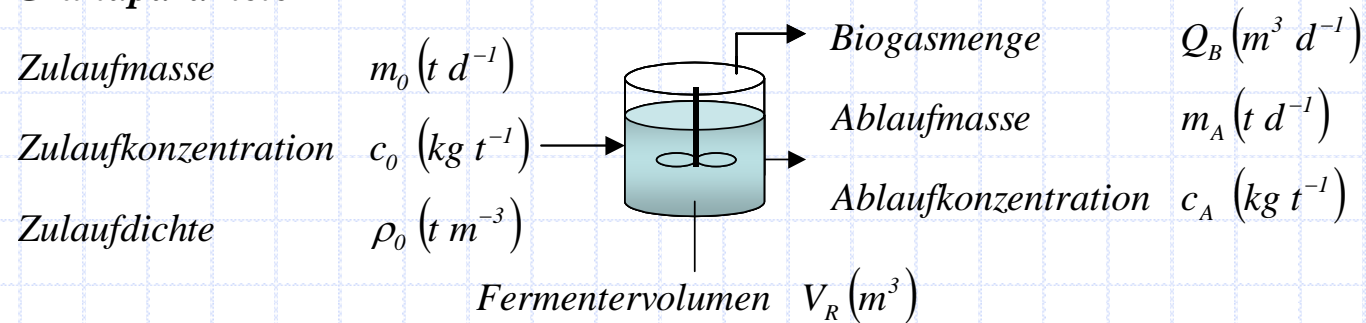


Bioleachingsystem
NawaRos, Stallmist



Belastungs- und Leistungsparameter des Fermenters

Grundparameter



Belastungsparameter

Raumbelastung $B_R (kg m^{-3} d^{-1})$

$$B_R = \frac{m_0 \cdot c_0}{V_R}$$

Mittlere hydraulische Verweilzeit $t_m (d)$

$$t_m = \frac{V_R \cdot \rho_0}{m_0} = \frac{c_0 \cdot \rho_0}{B_R}$$

Leistungsparameter

Biogausbeute $y (m^3 kg^{-1})$

$$y = \frac{Q_B}{m_0 \cdot c_0} = \frac{Q_B}{B_R \cdot V_R}$$

Biogasbildungsrate $r (m^3 m^{-3} d^{-1})$

$$r = \frac{Q_B}{V_R} = y \cdot B_R$$

Modellbildung nach Reaktion 1. Ordnung

umgesetzte Biogasmasse
 m_G ist Produkt aus
 Reaktionsmasse
 und Reaktionsgeschwindigkeit

Reaktion 1. Ordnung

V_R aus Faulraumbelastung

(2) und (3) in (1) einsetzen

Definition Biogasausbeute

(5) nach m_G umstellen

(4) und (6) gleichsetzen und
 nach y umstellen

(8) und (9) in (7) einsetzen

$$(1) m_G = V_R \cdot \rho_A \cdot r(c_A)$$

$$(2) r(c_A) = -k \cdot c_A$$

$$(3) V_R = \frac{m_0 \cdot c_0}{B_R}$$

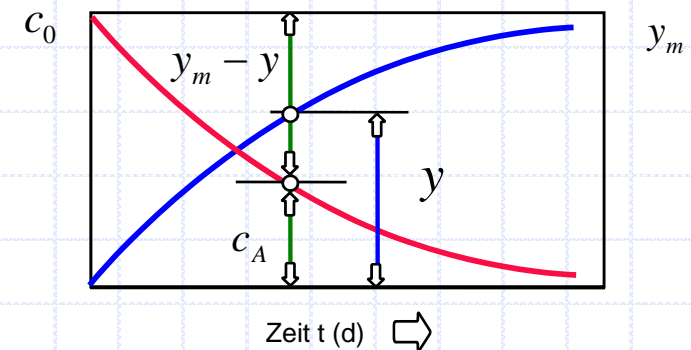
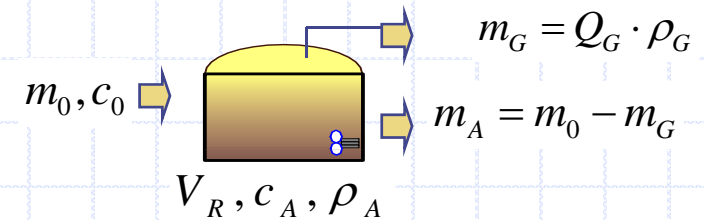
$$(4) m_G = \frac{m_0 \cdot c_0}{B_R} \cdot \rho_A \cdot k \cdot c_A$$

$$(5) y = \frac{Q_G}{m_0 \cdot c_0} = \frac{m_G / \rho_G}{m_0 \cdot c_0}$$

$$(6) m_G = y \cdot m_0 \cdot c_0 \cdot \rho_G$$

$$(7) y = \frac{c_0}{B_R} \cdot k \cdot \frac{\rho_A}{\rho_G} \cdot \frac{c_A}{c_0}$$

$$(10) y = y_m \frac{k' \cdot c_0}{k' \cdot c_0 + y_m \cdot B_R}$$



$$(8) \frac{c_A}{c_0} = \frac{y_m - y}{y_m}$$

$$(9) k' = k \cdot \frac{\rho_A}{\rho_G}$$

Linearisierung der Bemessungsgleichung

$$(10) \quad y = y_m \frac{k' \cdot c_0}{k' \cdot c_0 + y_m \cdot B_R}$$

Reziproke Darstellung von (10)
liefert Geradengleichung (11)

$$(11) \quad \frac{1}{y} = \frac{1}{y_m} + \frac{1}{k' \cdot c_0} \cdot B_R$$

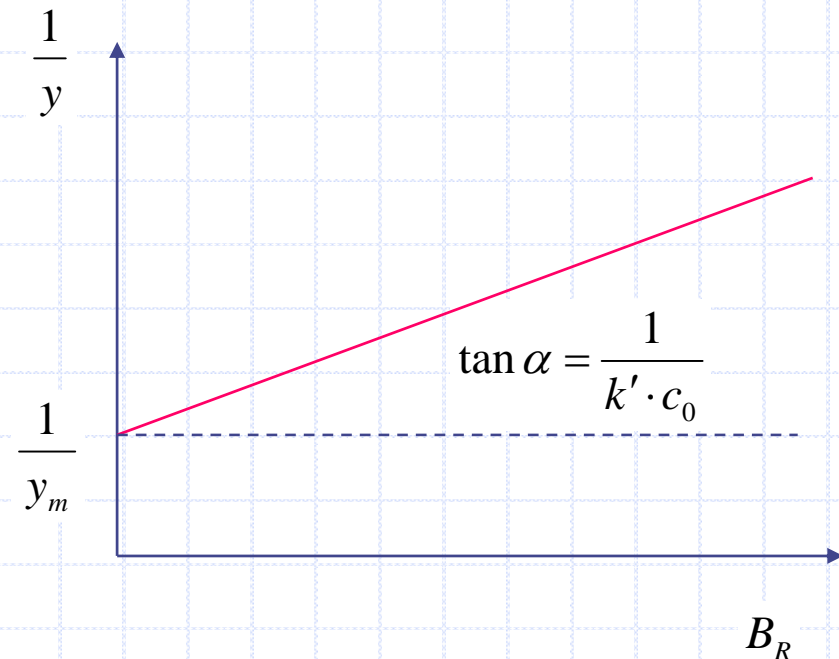
$$k' = k \frac{\rho_A}{\rho_G} \quad \rho_A \approx 1$$

$$\rho_G = \frac{p_{CH_4} \cdot 16 + p_{CO_2} \cdot 44}{22,4}$$

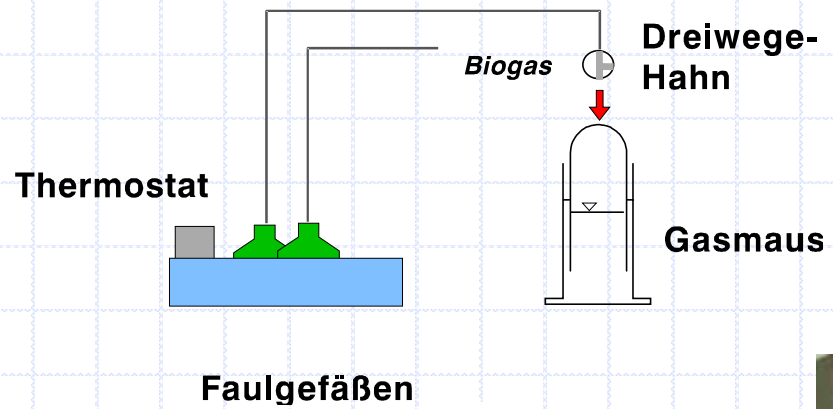
Lineare Regressionsgleichung
der Wertepaare $1/y$ und B_R
liefert y_m und $k' \rightarrow k$

$$B_R = \frac{c_0}{t_m}$$

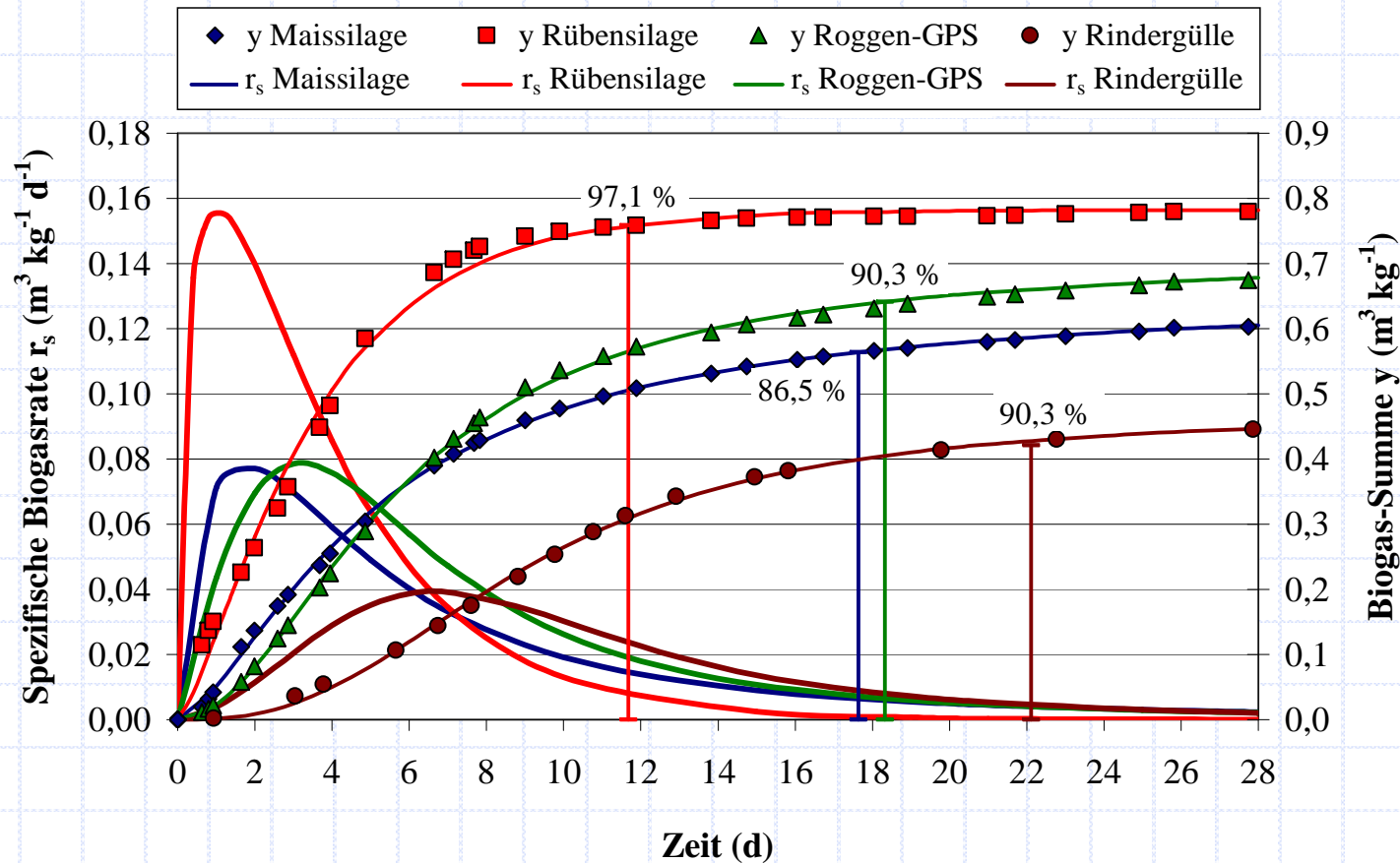
$$\frac{y}{y_m} = \frac{k'}{k' + y_m / t_m}$$



Aufbau der batch Versuchsanlage



Biogasausbeute im Gärtest nach VDI-Richtlinie 4630



Hill-Funktion

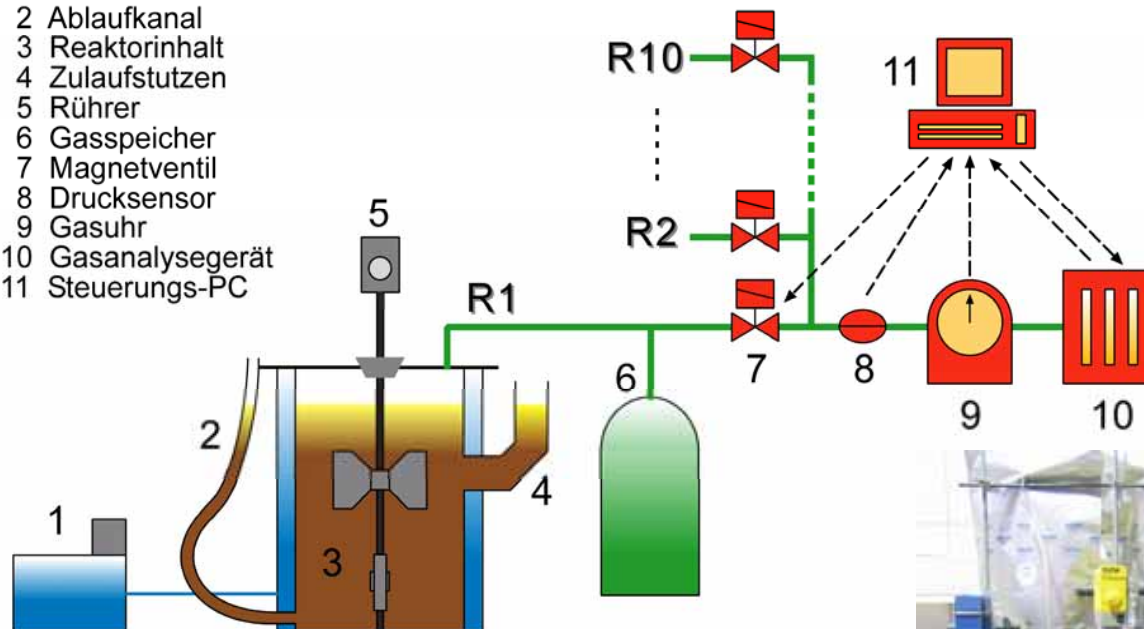
$$y = y_{\max} \frac{t^b}{c^b + t^b}$$

Chapman-Funktion

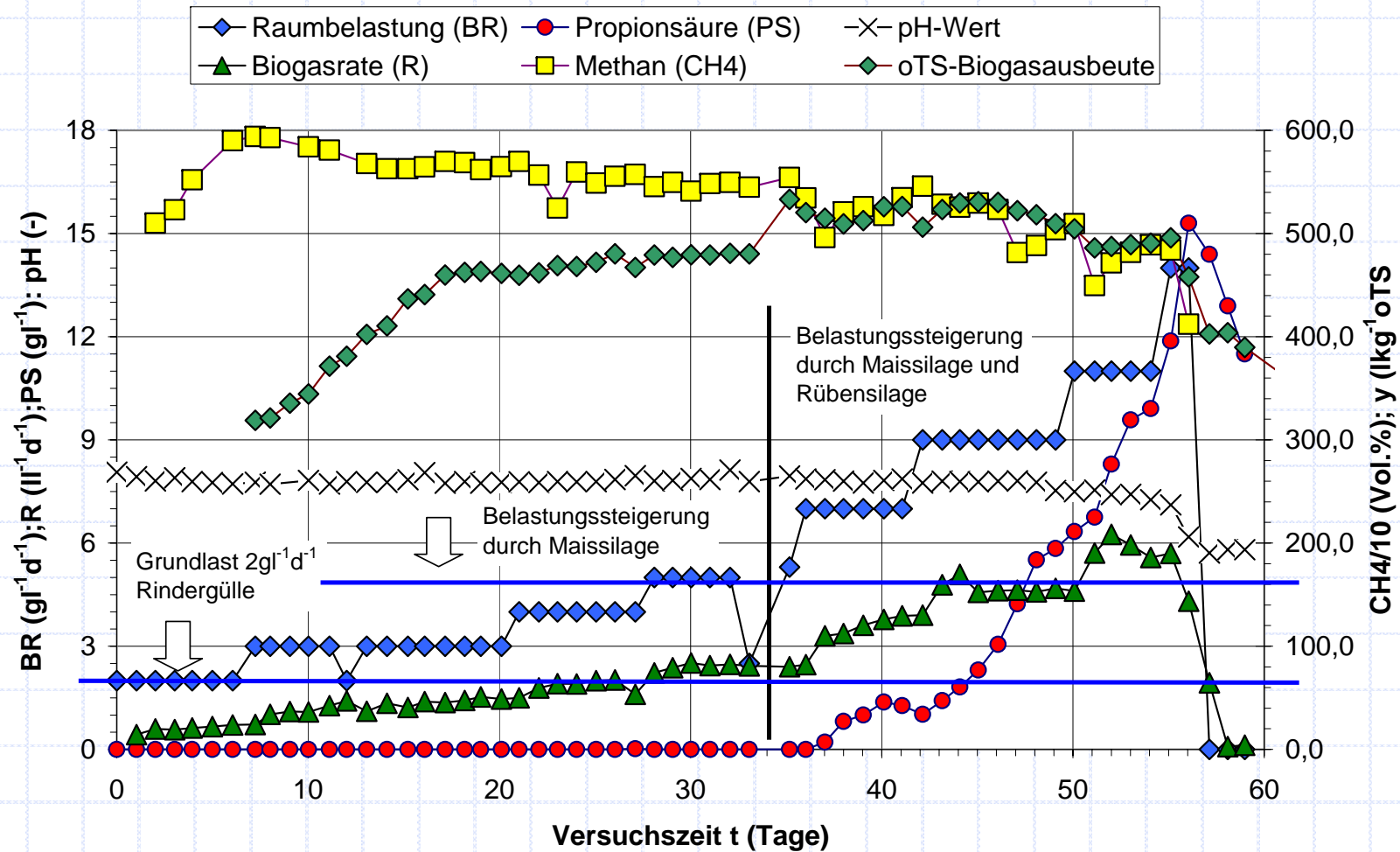
$$y = y_{\max} (1 - e^{-b \cdot t})^c$$

Aufbau der kontinuierlichen Versuchsanlage

- 1 Thermostat für Wassermantel
- 2 Ablaufkanal
- 3 Reaktorinhalt
- 4 Zulaufstutzen
- 5 Rührer
- 6 Gasspeicher
- 7 Magnetventil
- 8 Drucksensor
- 9 Gasuhr
- 10 Gasanalysegerät
- 11 Steuerungs-PC



Steigerung der Raumbelastung Rindergülle, Maissilage, Rübensilage



Systematische Steigerung der Raumbelastung

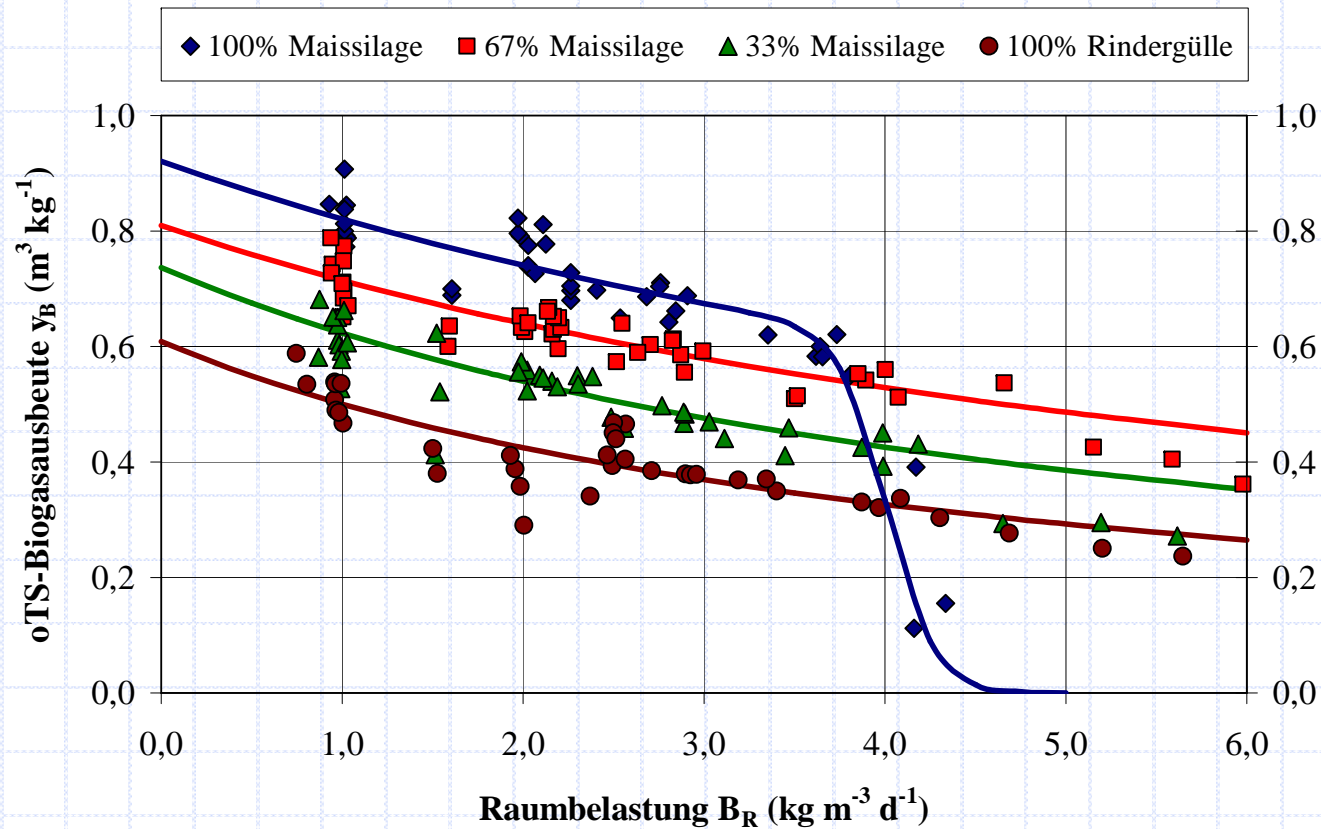
Reaktor	Substrat
1	100% Maissilage
2	67% Maissilage, 33% Gülle
3	33% Maissilage, 67% Gülle
4	100% Rübensilage
5	67% Rübensilage, 33% Gülle
6	33% Rübensilage, 67% Gülle
7	100% Roggen-GPS
8	67% Roggen GPS, 33% Gülle
9	33% Roggen-GPS, 67% Gülle
10	100% Rinder- bzw. Schweinegülle



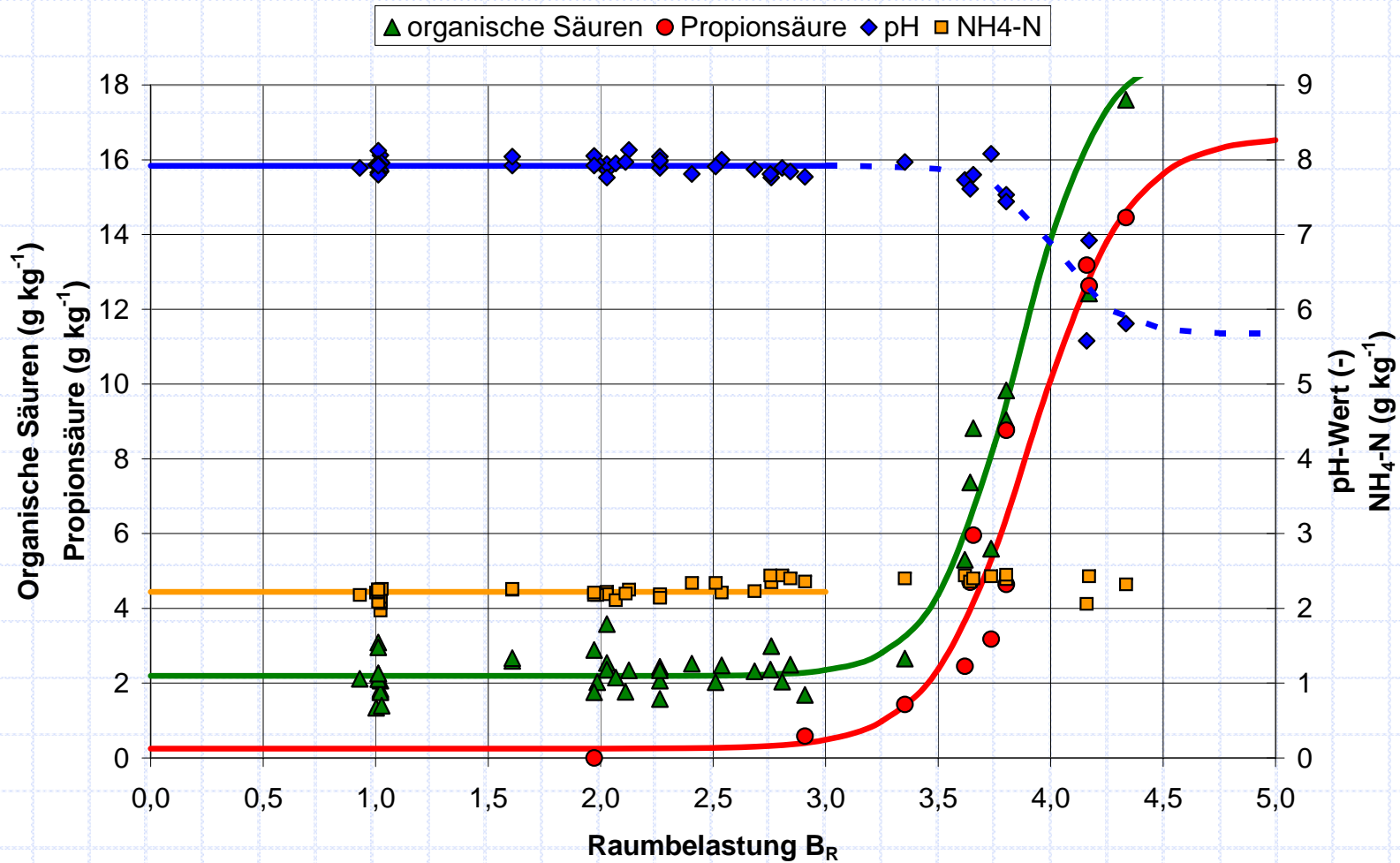
Beispiel Reaktor 2:

67% der oTS-Masse im zugegebenem Substrat bestand aus Maissilage und 33% aus Rindergülle

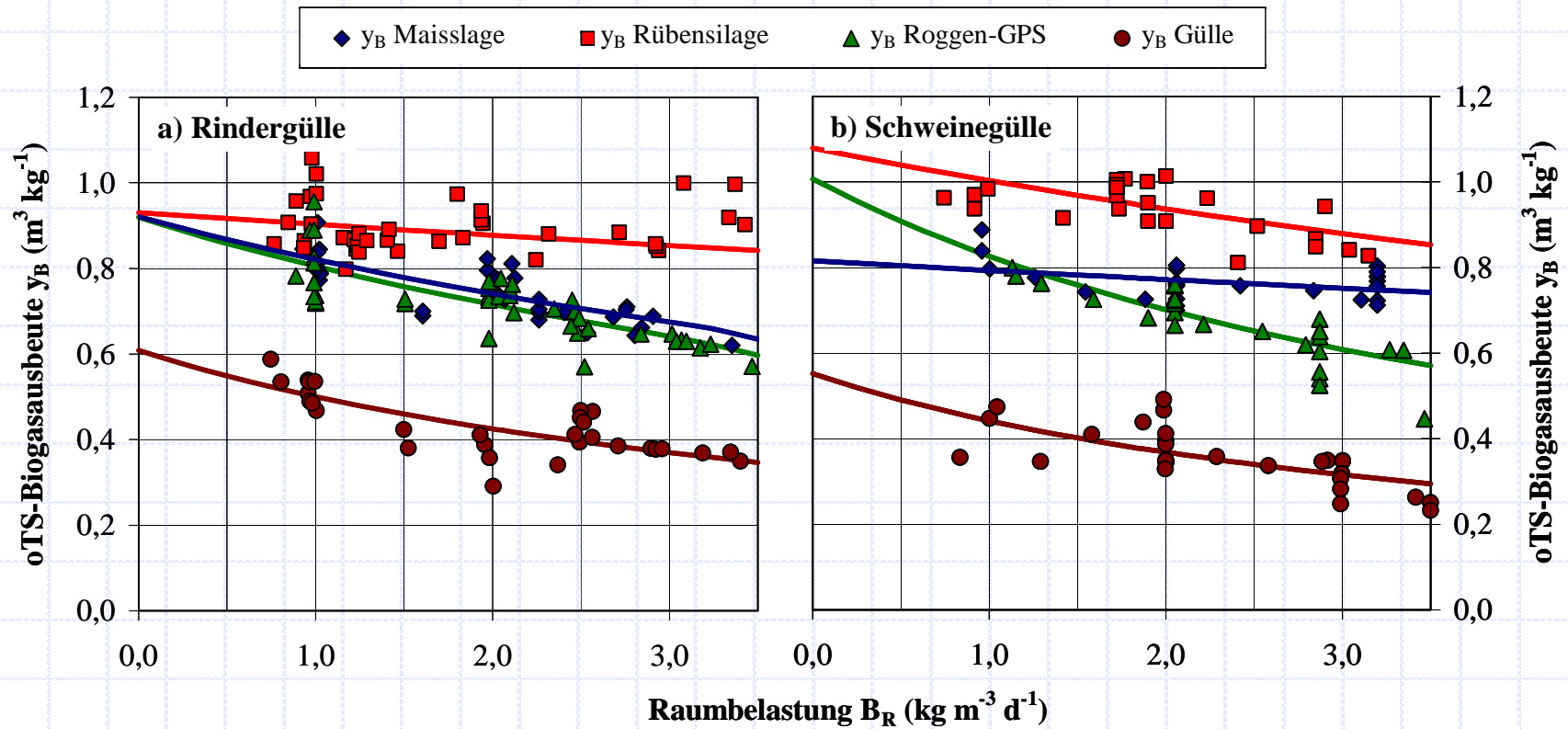
Maissilage mit Rindergülle im konti-Versuch mesophil, $y_B = f(B_R)$



Analysen im Fermenter bei Vergärung von Maissilage bei steigender Raumbelastung (35°C)



Monovergärung von NawaRos und Gülle mesophil, $y_B = f(B_R)$

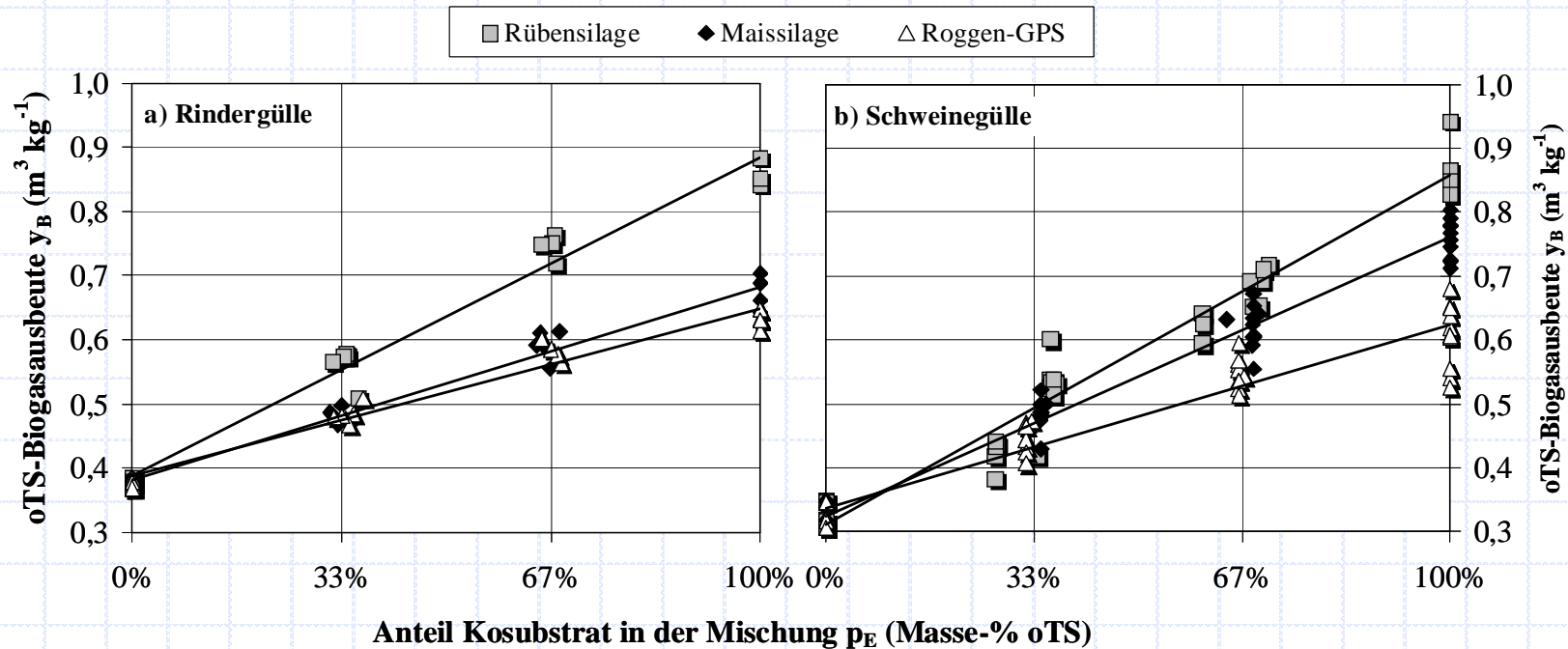


Gärrest aus Rindergülle
als Impfmaterail

Gärrest aus Schweinegülle
als Impfmaterail

Biogasausbeute von Mischungen Gülle/NawaRos

Beispiel: $B_R = 3 \text{ kgm}^{-3}\text{d}^{-1}$



$$y_M = y_G + (y_E - y_G) \cdot p_E / 100$$

Kinetische Parameter aus Kurvenanpassung

$y_B = f(B_R)$ **mesophil,**

Anteil in Mischung	Rindergülle					Schweinegülle				
	c_0 [g kg ⁻¹]	ρ_g [kg m ⁻³]	R^2 [%]	y_{max} [m ³ kg ⁻¹]	k [d ⁻¹]	c_0 [g kg ⁻¹]	ρ_g [kg m ⁻³]	R^2 [%]	y_{max} [m ³ kg ⁻¹]	k [d ⁻¹]
100 % Maissilage	292	1,279	59,7	0,92	0,033	253	1,286	14,8	0,82	0,147
67 % Maissilage	147	1,253	80,0	0,81	0,052	99	1,258	31,1	0,69	0,301
33 % Maissilage	97	1,224	84,4	0,74	0,051	60	1,205	52,5	0,62	0,119
100 % Rübensilage	124	1,258	7,9	0,93	0,316	114	1,293	40,5	1,08	0,162
67 % Rübensilage	100	1,245	13,7	0,80	0,252	73	1,237	47,0	0,89	0,155
33 % Rübensilage	84	1,221	69,2	0,73	0,113	55	1,192	49,8	0,73	0,105
100 % Roggen-GPS	198	1,232	58,6	0,92	0,040	202	1,237	68,3	1,01	0,028
67 % Roggen-GPS	125	1,219	81,9	0,82	0,052	92	1,219	80,8	0,88	0,052
33 % Roggen-GPS	92	1,199	86,5	0,73	0,054	59	1,181	82,0	0,81	0,057
100 % Gülle	72	1,175	65,2	0,61	0,046	44	1,116	51,2	0,55	0,057

Größe Fermenter zur Größe Nachgärer

Quotient y / y_m liefert Abbaugrad η

$$(2) \quad \eta = \frac{y}{y_m} = \frac{k' \cdot c_0}{k' \cdot c_0 + y_m \cdot B_R}$$

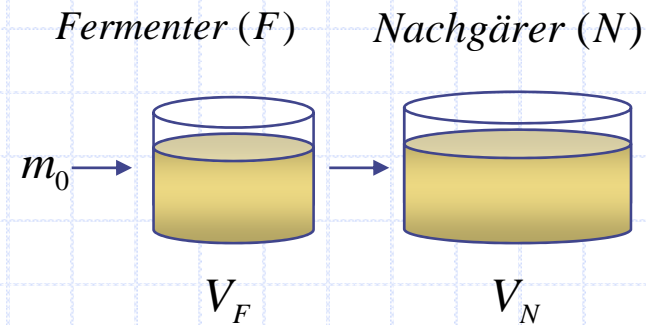
Substitution von B_R durch $m_0 \cdot c_0 / V_F$ und umstellen nach V_F

$$(3) \quad V_F = y_m \frac{m_0 \cdot \eta_F}{k' \cdot (1 - \eta_F)}$$

Analog B_R durch $m_0 \cdot c_0 / (V_F + V_N)$ ersetzen und nach $V_F + V_N$ auflösen

$$(4) \quad V_F + V_N = y_m \frac{m_0 \cdot \eta_{F+N}}{k' \cdot (1 - \eta_{F+N})}$$

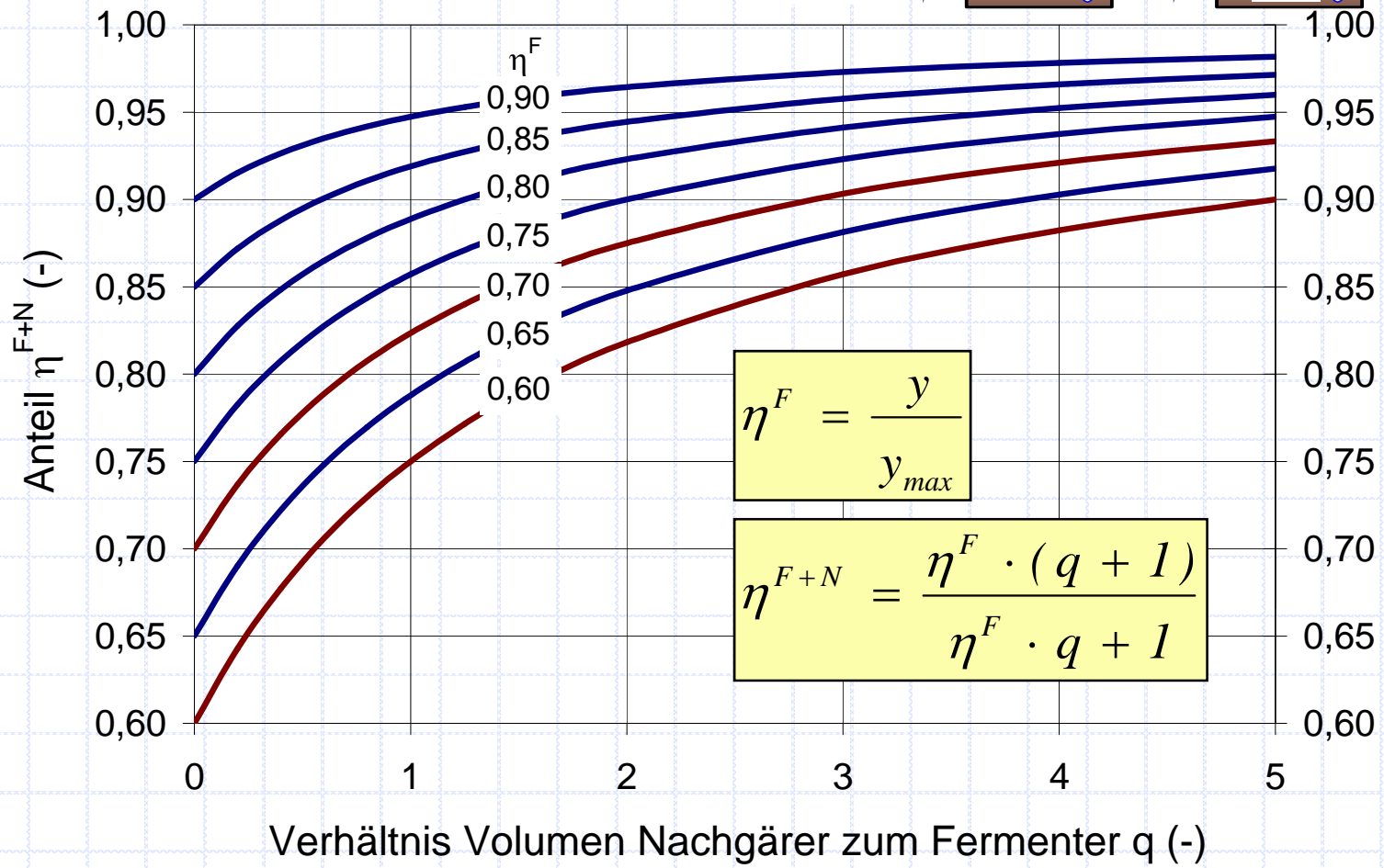
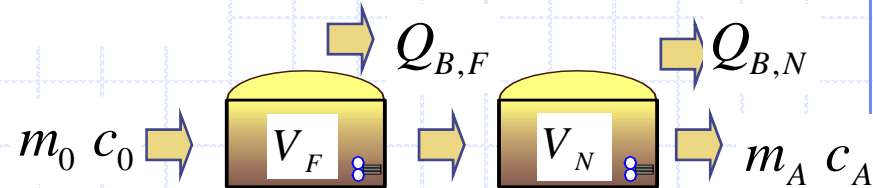
Quotient $V_F / (V_F + V_N)$ bilden, für $V_N / V_F = q$ setzen und nach η_{F+N} auflösen



$$(1) \quad y = y_m \frac{k' \cdot c_0}{k' \cdot c_0 + y_m \cdot B_R}$$

$$(6) \quad \eta_{F+N} = \eta_F \cdot \frac{q+1}{q \cdot \eta_F + 1}$$

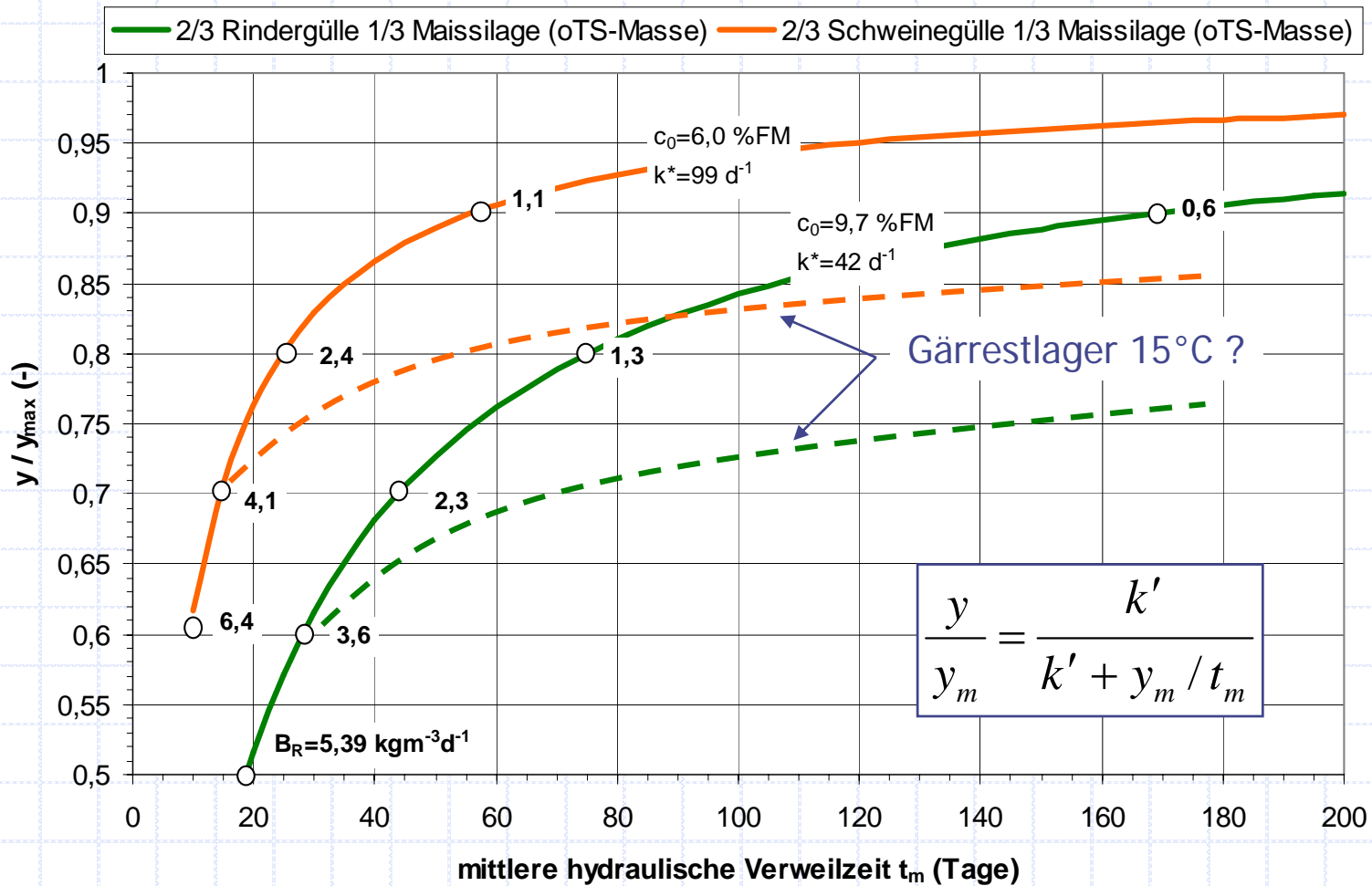
Biogasausbeuten von Fermenter und Nachgärer



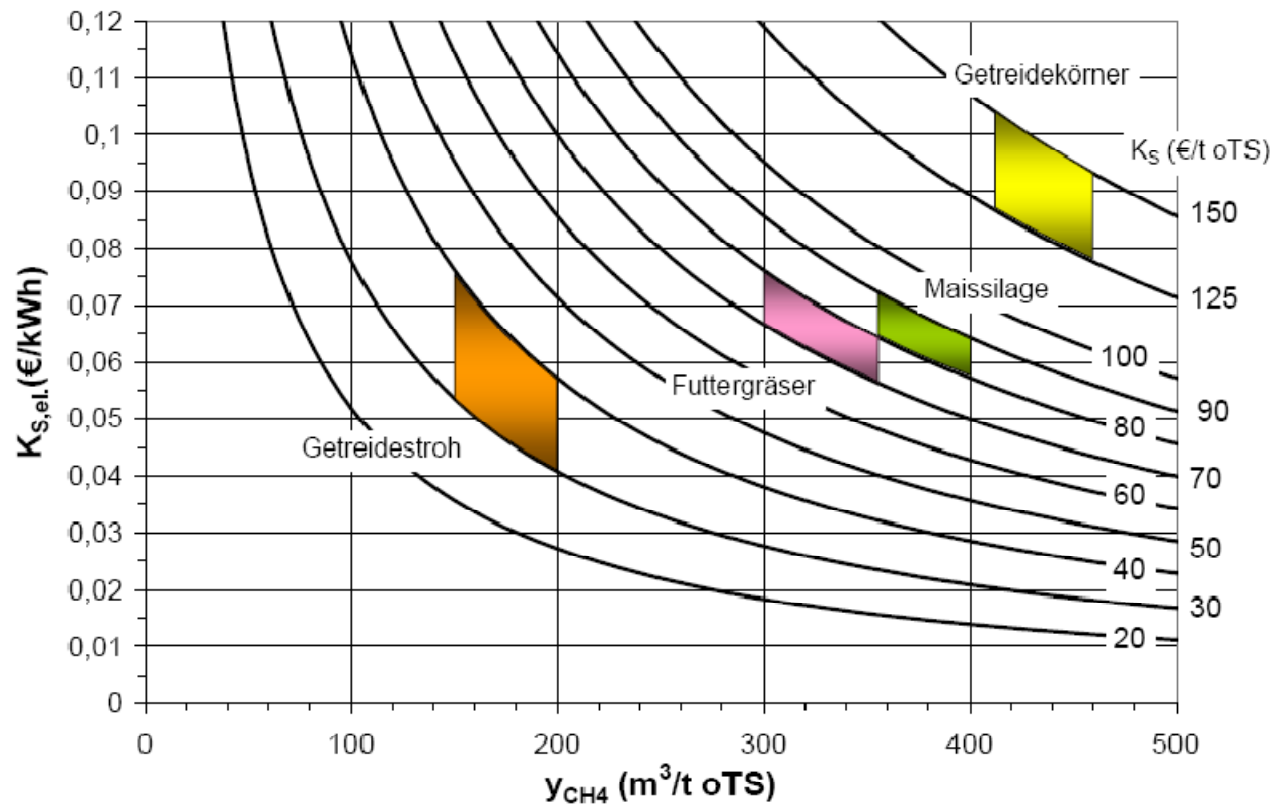
$$\eta^F = \frac{y}{y_{max}}$$

$$\eta^{F+N} = \frac{\eta^F \cdot (q + 1)}{\eta^F \cdot q + 1}$$

Wirkungsgrad der Biogasausbeute als Funktion von t_m bzw. B_R , zwei Fallbeispiele



Spezifische Stromgestehungskosten



Fazit

- ▶ oTS-Faulraumbelastung B_R wichtigster Parameter für Auslegung der Fermentergröße (beheiztes Fermentervolumen)
- ▶ Einfluss von B_R auf Biogasausbeute y kann durch eine Reaktionskinetik 1. Ordnung beschrieben werden, mit steigender B_R Rückgang von y
- ▶ Biogasausbeute von Mischungen aus Gülle und NawaRos kann aus Einzelsubstraten berechnet werden, Proportionalität zwischen y und oTS- Anteil der NawaRos im Gemisch
- ▶ Gemeinsame Vergärung von NawaRos mit Gülle erlaubt hinsichtlich Prozessstabilität deutlich höhere oTS- Faulraumbelastungen als Monovergärung von NawaRos (Rührkessel)
- ▶ Für Ermittlung der optimalen Raumbelastung sind Substratgestehungskosten, sowie Kosten für Betrieb der Anlage zu berücksichtigen
- ▶ Gasdichte Lagerung des Gärrestes bei praxisüblichen Werten für B_R empfohlen