Plenarsitzung 2022 vom Niedersächsischen Biogasforum:

„Potentiale und Optionen für Biogas in der Energie- und Gaskrise“

12. September 2022

Vergärung faserreicher Substrate zu Biogas - Alternativen zu Energiepflanzen

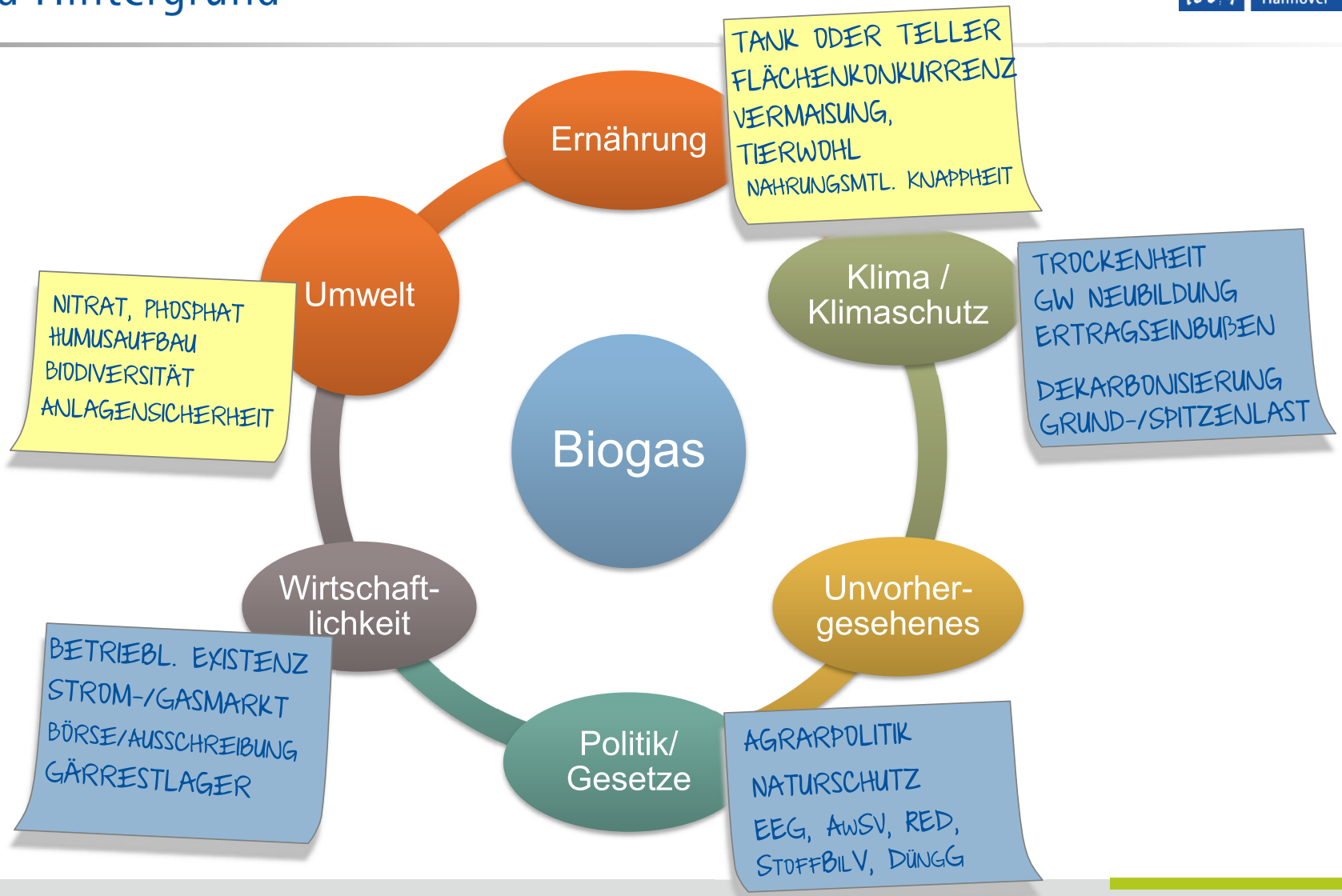
Priv.-Doz.. Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (ISAH)
Leibniz Universität Hannover
weichgrebe@isah.uni-hannover.de

Gliederung

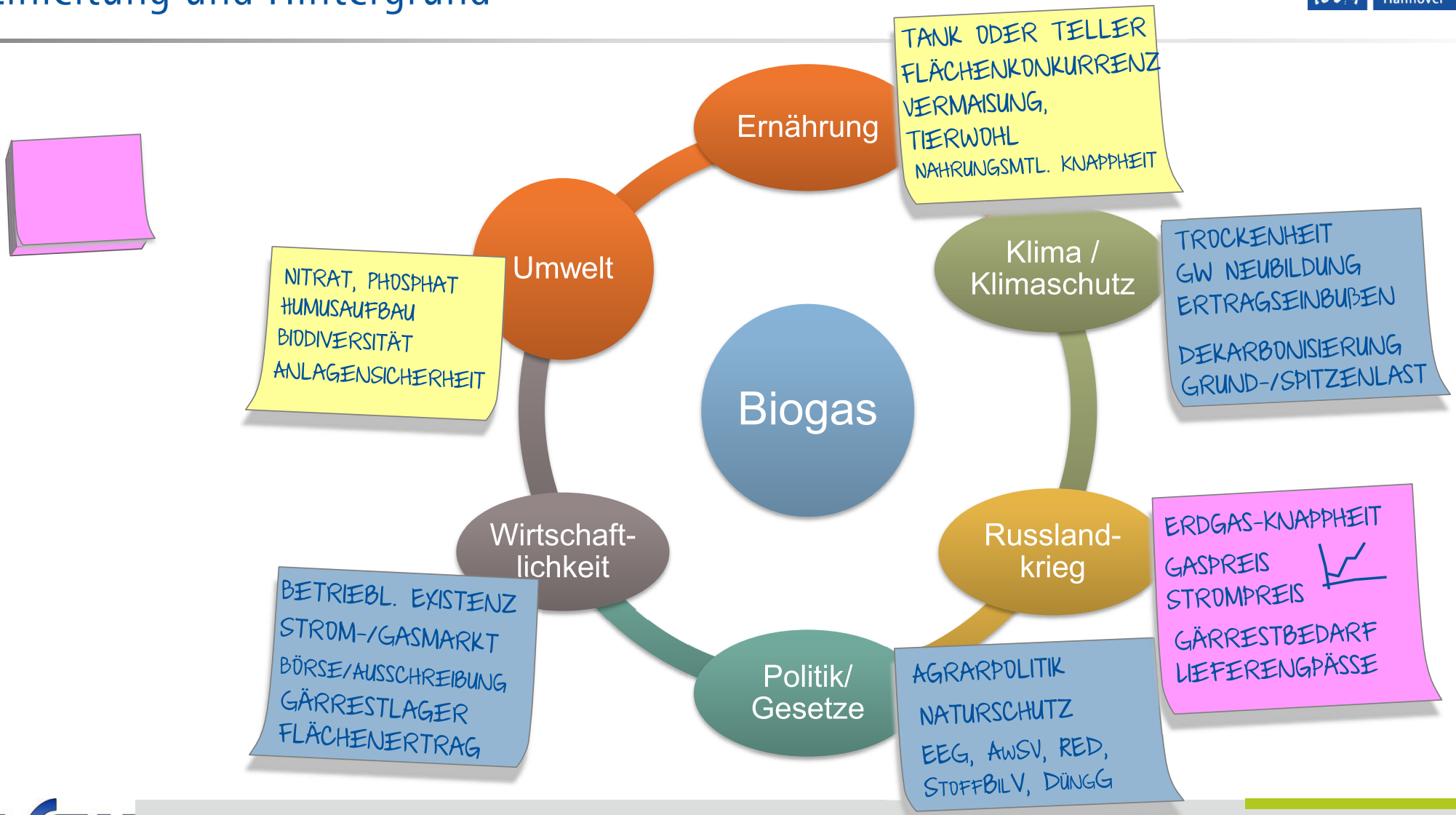
Roter Faden

- Einleitung
- Verfahrensansatz
- Faserreiche Substrate
- DAUMEN 1, 2, 3
- Bioökonomie
- Zusammenfassung

Einleitung und Hintergrund



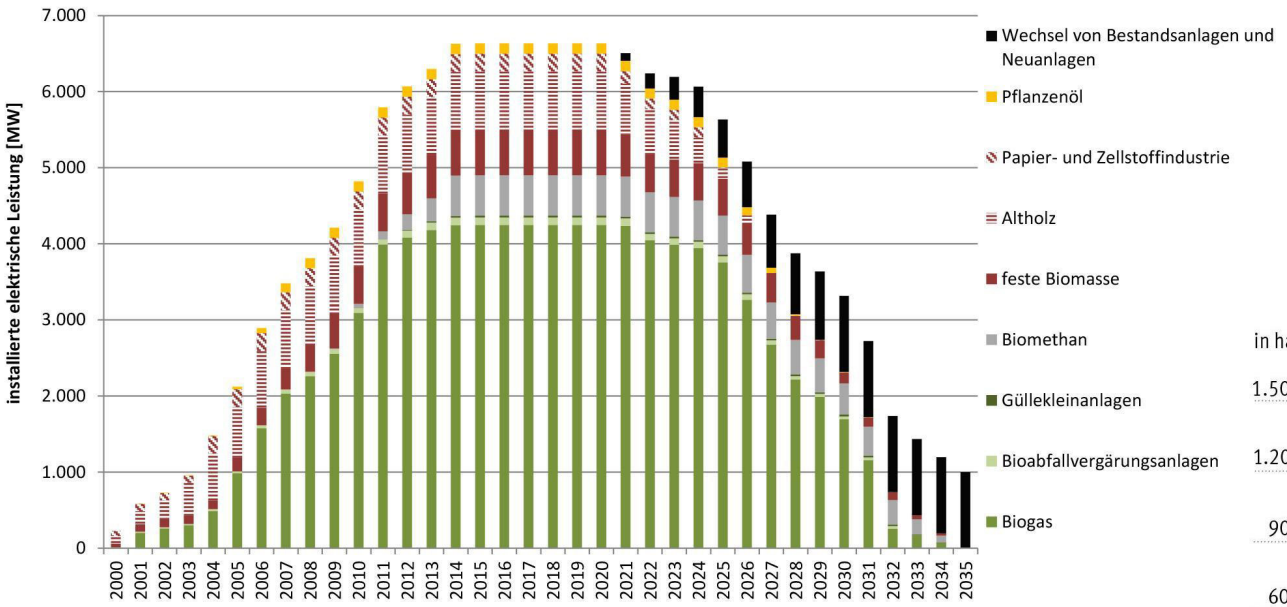
Einleitung und Hintergrund



Entwicklung Biogasanlagen in Deutschland

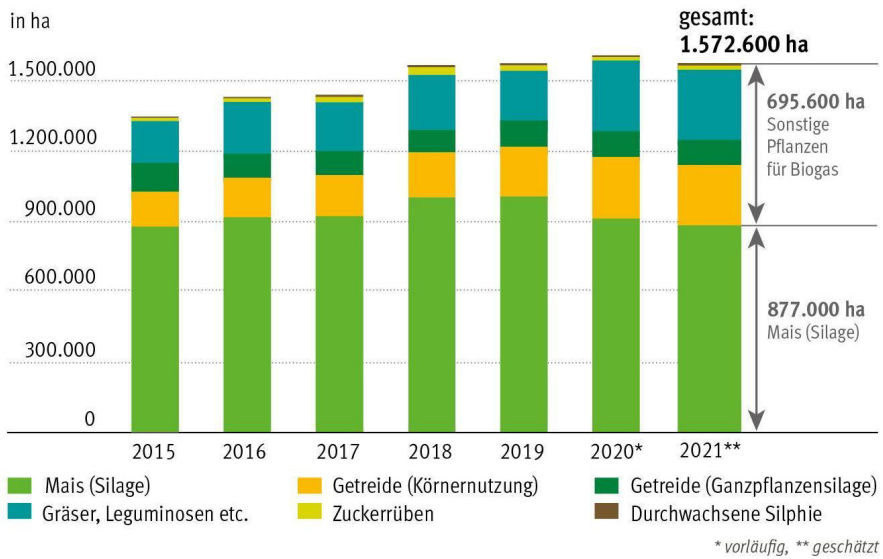
Leibniz Universität Hannover

Rückgang der Zahl der Biogasanlagen und Strommenge



Quelle: DBFZ

Weiterhin Mais als das Hauptsubstrat !



Quelle: FNR, BMEL (2021)
© FNR 2022

FNR

Einleitung

Lösungsansatz:

Einsatz von faserreichen bzw. Cellulose-basierten Substraten (CbS) und eine daran angepasste Anlagentechnik.

Faserreiche bzw. Cellulose-basierte Substrate (CbS)

Leibniz Universität Hannover

Grassilage

Mais
(ohne Frucht)

Sonnenblume
(ohne Frucht)

Grasschnitt

Rübenblätter

Bananenblätter

Biertreber

Herbstlaub

Getreidestroh

Rosenstrauch

Heu

Einstreu

Gärrest

Reisstroh

Strauchschnitt

Hanfstroh

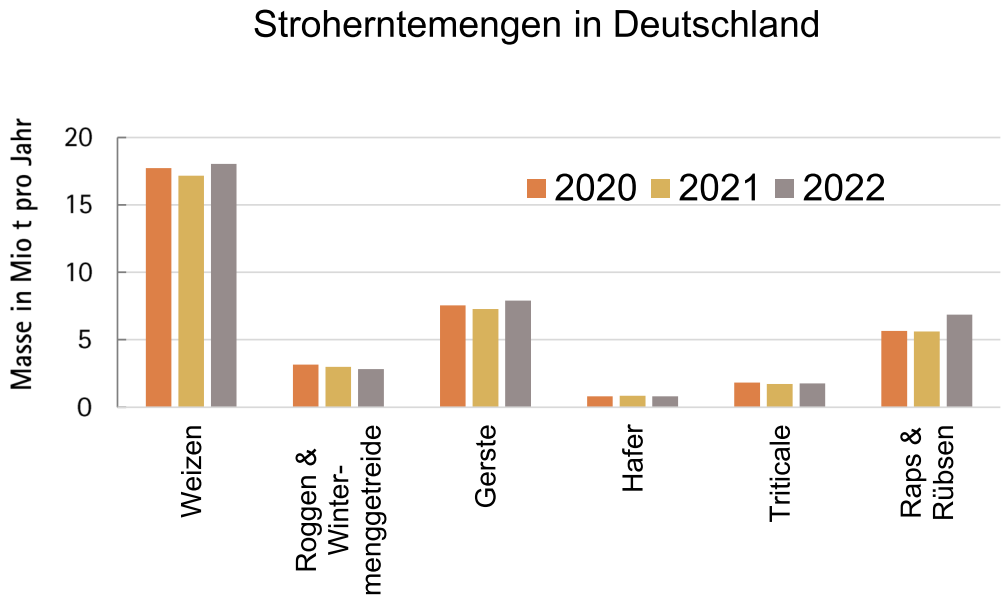
Leinenstroh

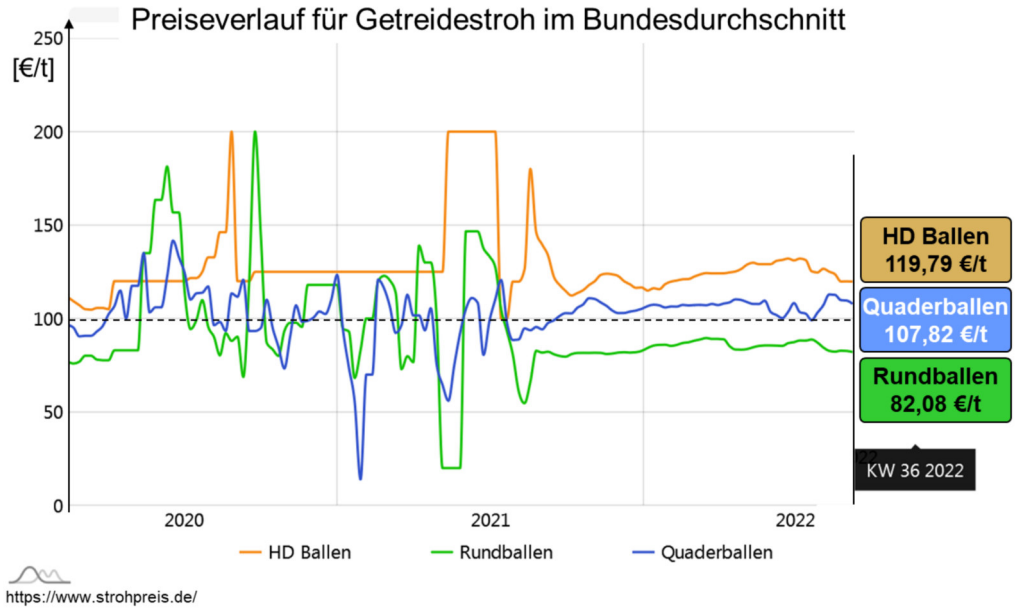
Rapsstroh

Substratwechsel und Anlagenanpassung

Anders als beim Anbau von Energiepflanzen bedingt die energetische Nutzung von faserreichen Ernterückständen wie Stroh keine Konkurrenz um Flächen zur Nahrungsproduktion.

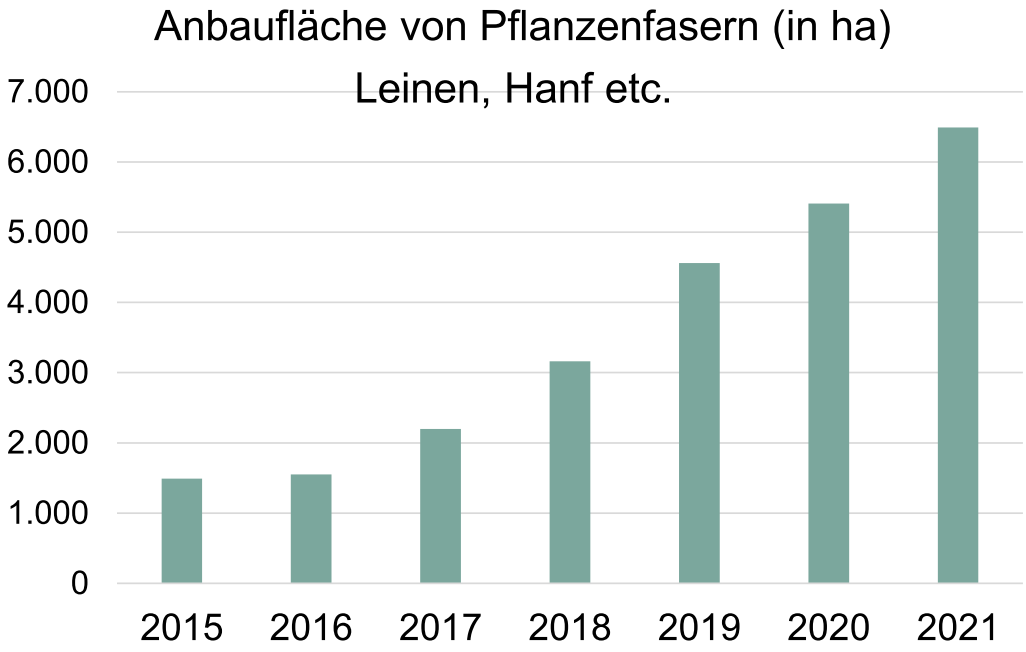
Da die Vergärungsrückstände auf die Äcker ausgebracht werden können, tritt auch nur begrenzt Nährstoffverlust auf.

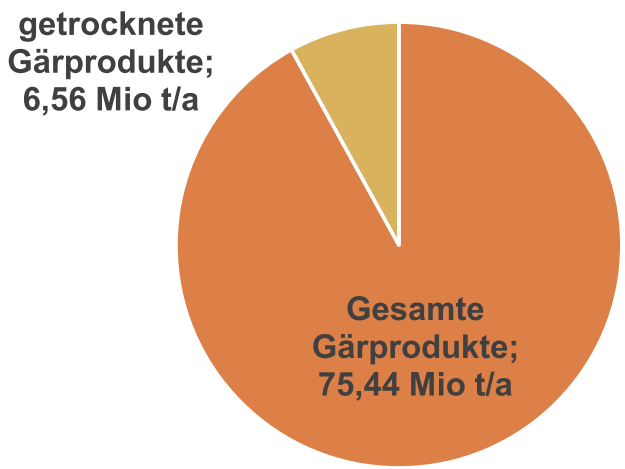




Daten: https://llh.hessen.de/unternehmen/unternehmensfuehrung/analyse-strategie-und-finanzen/hinweise-zu-getreidestroh-und-naehrstoffwert/
https://www.agrarzeitung.de/pflanzenbautipps/pflanzenbau-allgemein/weizen-und-raps-wie-viel-phosphor-benoetigt-der-bestand-92139?crefresh=1

Substratwechsel und Anlagenanpassung





Daten: https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22004416.xlsx

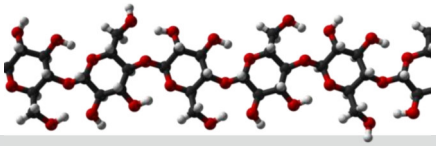
Einleitung

Einleitung

Was passiert eigentlich mit dem derzeit vertrockneten Mais?

Ziel

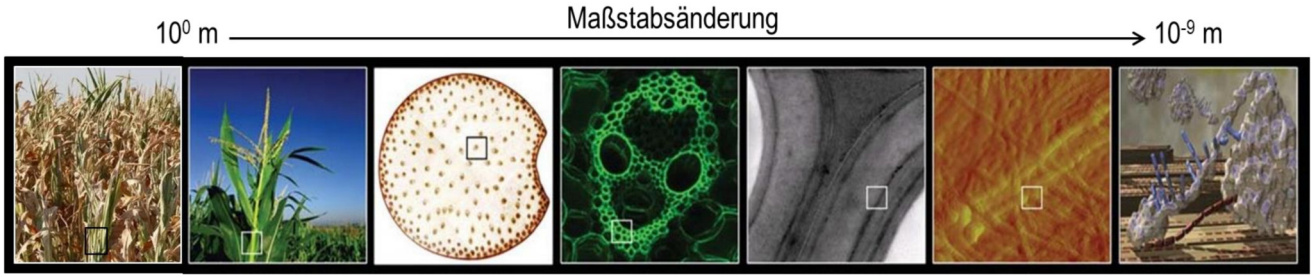
- Senkung / Vermeidung fossiler Kohlenstoffemissionen
- Begegnung der Konkurrenz von Nahrung und Energie durch vollständige Nutzung der Biomasse => *Frucht für den Teller* und *Reststoff für den Tank*
- Erschließung faserreicher bzw. Cellulose-basierter Substrate (cbS) wie z.B. Stroh, Landschaftspflegematerial, Grasschnitte, Kleie etc.) zur Biogasproduktion
- Sicherung der Biogastechnologie als Beitrag zur Energieversorgung (speicherfähiger Energieträge Methan)
- Breites Spektrum einsetzbarer Pflanzensorten
- **Nutzung der am meisten auf der Erde vorkommenden organischen Substanz: Cellulose**



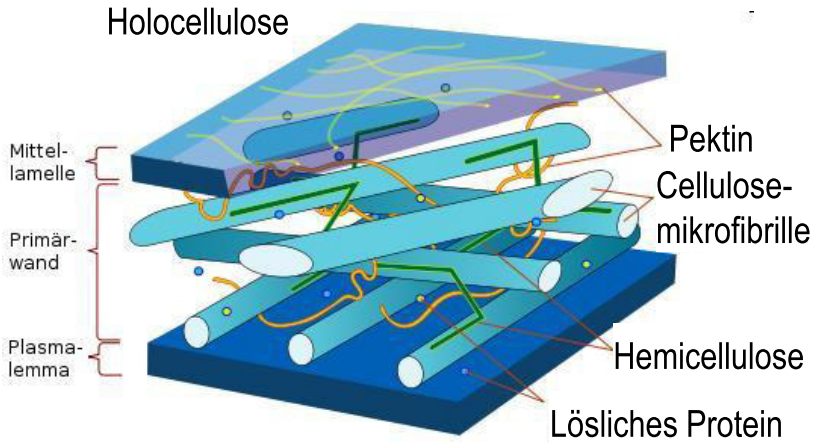
Verfahrensansatz

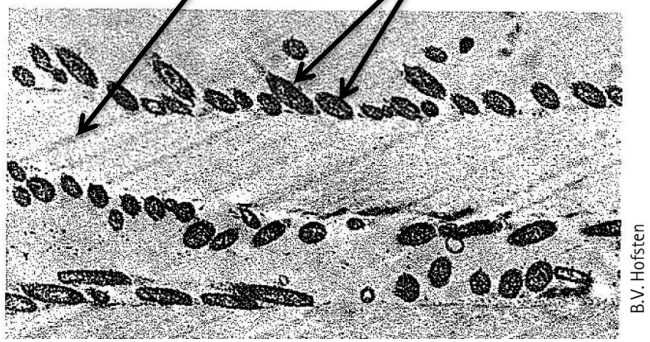
Faserreiche bzw. Cellulose basierte Substrate (CbS)

Cellulose ist der Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellwänden, (Grünpflanzen, Algen usw.), 20-90 % liegen in kristalliner, **unlöslicher** Form vor.



nach [Chundawat at al, 2011]



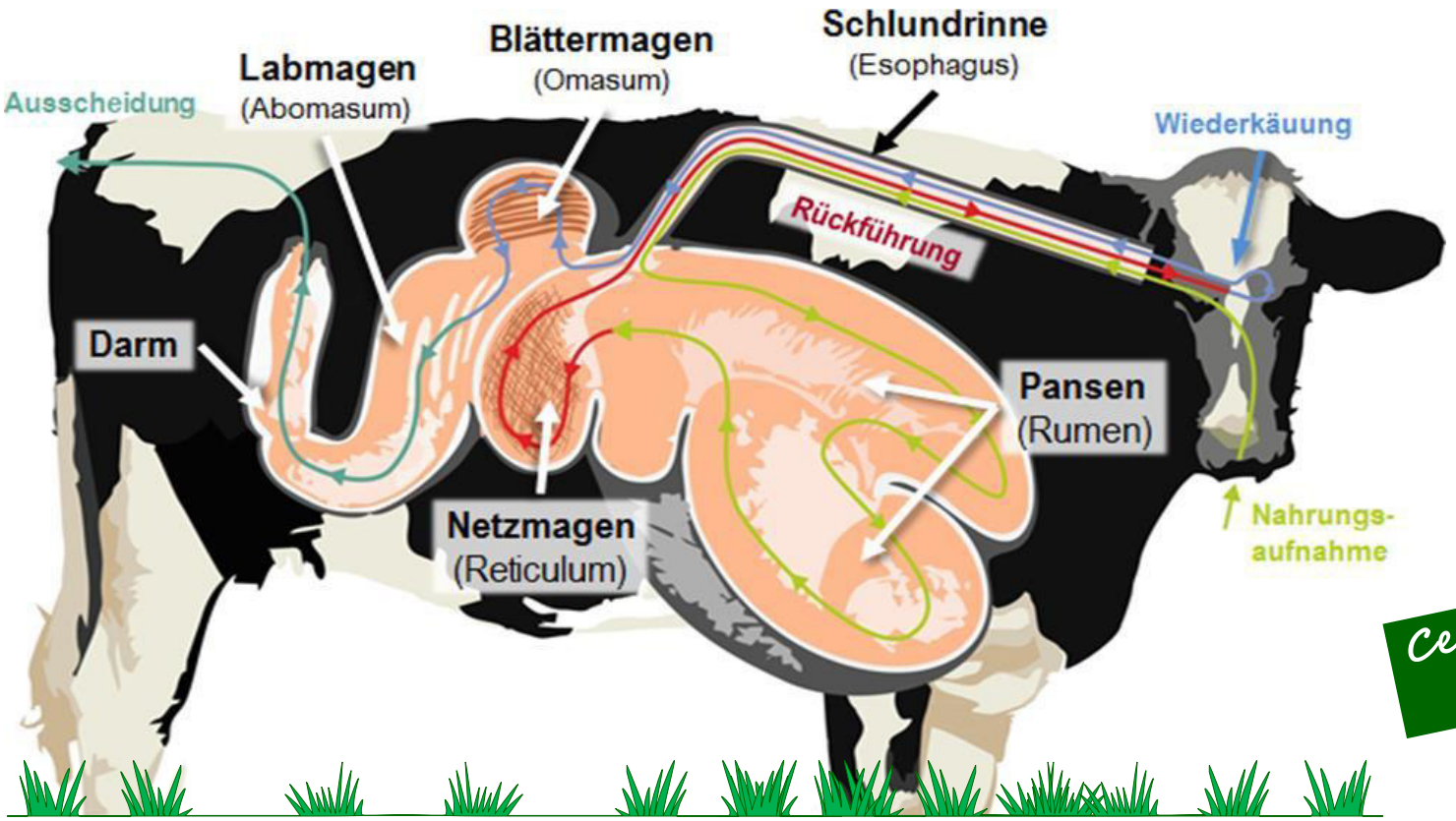


B.V. Hofsten

Clostridien
einzellige Pilze
Ciliaten

Verfahrensansatz

Natur als Vorbild



Cellulose abbau: 50-60%

Darmflora der Wale ähnelt denen der Wiederkäuer

https://www.scinexx.de/news/biowissen/wale-haben-wiederkaeuer-darmflora/

Verfahrensansatz

Natürliche Verdauungssysteme – ruminales Mikrobiom

Funktionstyp	Spezies	Gärungsprodukte	
cellulolytisch	*Fibrobacter succinogenes*	Succinat, Acetat, Formiat	
Cellulose- und Hemicellulose-	*Butyrivibrio fibrisolvens*	Acetat, Formiat, Lactat, Butyrat,	H_2, CO_2
Abbauer	*Ruminicoccus albus*	Acetat, Formiat	H_2, CO_2
	Clostridium lochheadii	Acetat, Formiat, Butyrat	H_2, CO_2
amylolytisch	*Prevotella ruminicola*	Formiat, Acetat, Succinat	
Stärke- und Zucker-Abbauer	*Ruminobacter amylophilus*	Formiat, Acetat, Succinat	
	Selenomonas ruminantium	Acetat, Propionat, Lactat	
	Succinomonas amylolytica	Acetat, Propionat, Succinat	
	Streptococcus bovis	Lactat	
lactolytisch	*Selenomonas lactilytica*	Acetat, Succinat	
Laktat-Abbauer	*Megasphaera elsdenii*	Acetat, Propionat, Butyrat, Valerat, Capronat	H_2, CO_2
(Laktat → Propionat + Acetat)			
succinolytisch	*Schwartzia succinovorans*	Propionat	CO_2
Succinat-Abbauer			
(Succinat → Propionat + CO2)			
pektinolytisch	*Lachnospira multiparus*	Acetat, Formiat, Lactat	H_2, CO_2
Pectin-Abbauer			
Methanbildner*	Archaeen, z.B.		CH_4
(anaerobe "Carbonatatmung")	*Methanobrevibacter*		
$CO_2 + H_2 \rightarrow CH_4$	*ruminantium*		
alternativ: Formiat → Methan			

Quelle: Brade, Distl (2022) Berichte über Landwirtschaft

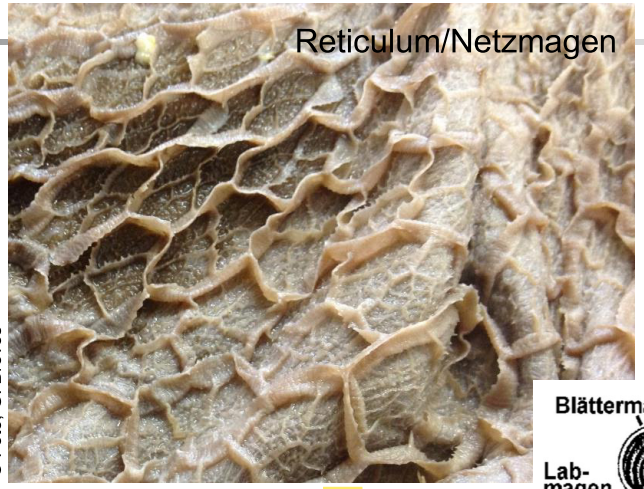
rel. Anteil verschiedener Domänen am ruminalen Mikrobiom

ca. 82 % Bacteria
ca. 15 % Protozoa + Fungi
ca. < 2% Archäen

Quelle: Lin, Raskin, Stahl (1997)

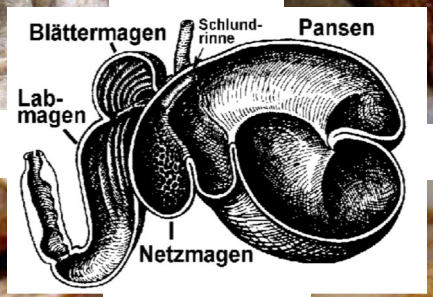
Verfahrensansatz

Verdauungssystem der Wiederkäuer



© Foto, G. Breves

© Foto, G. Breves



© Foto, G. Breves

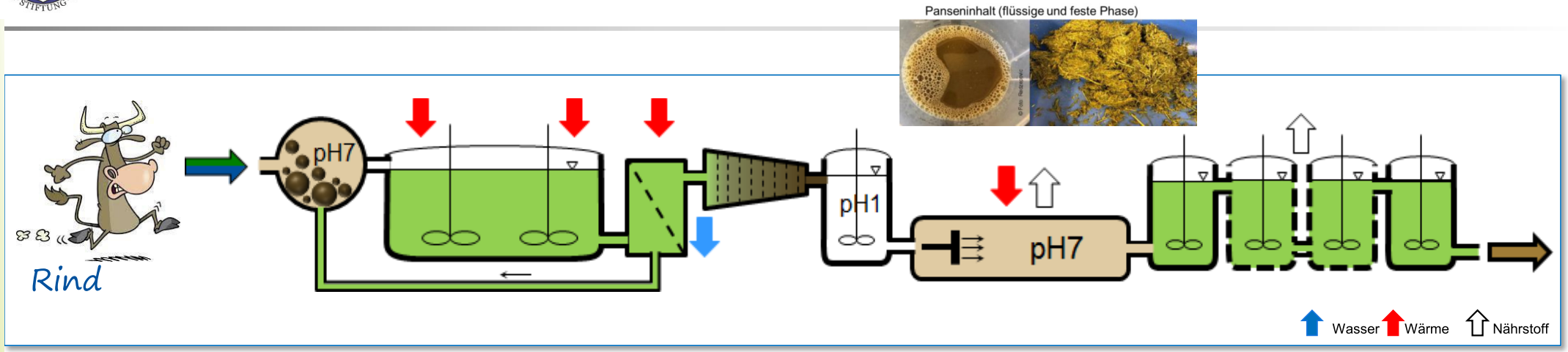
Omasum/Blättermagen

© Foto, G. Breves

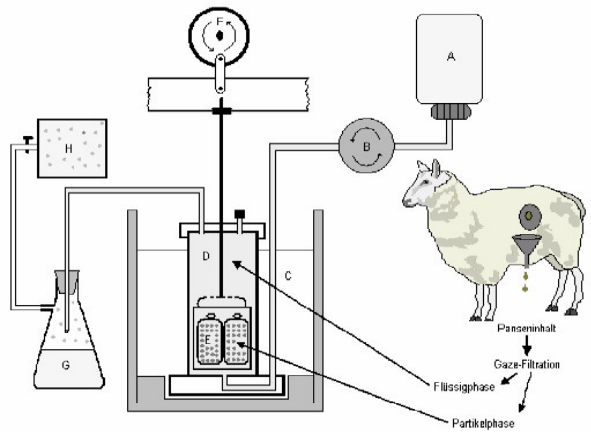
Abomasum/Labmagen

Verfahrensansatz

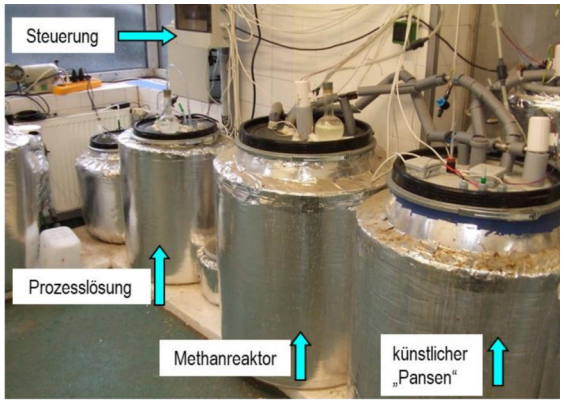
Natürliche Verdauungssysteme -> bionische Umsetzung



Labormaßstab: RUSITEC (Bestimmung der Verdaulichkeit von Substraten / Futter etc.)



verändert nach CZERKAWSKI & BRECKENRIDGE (1977)

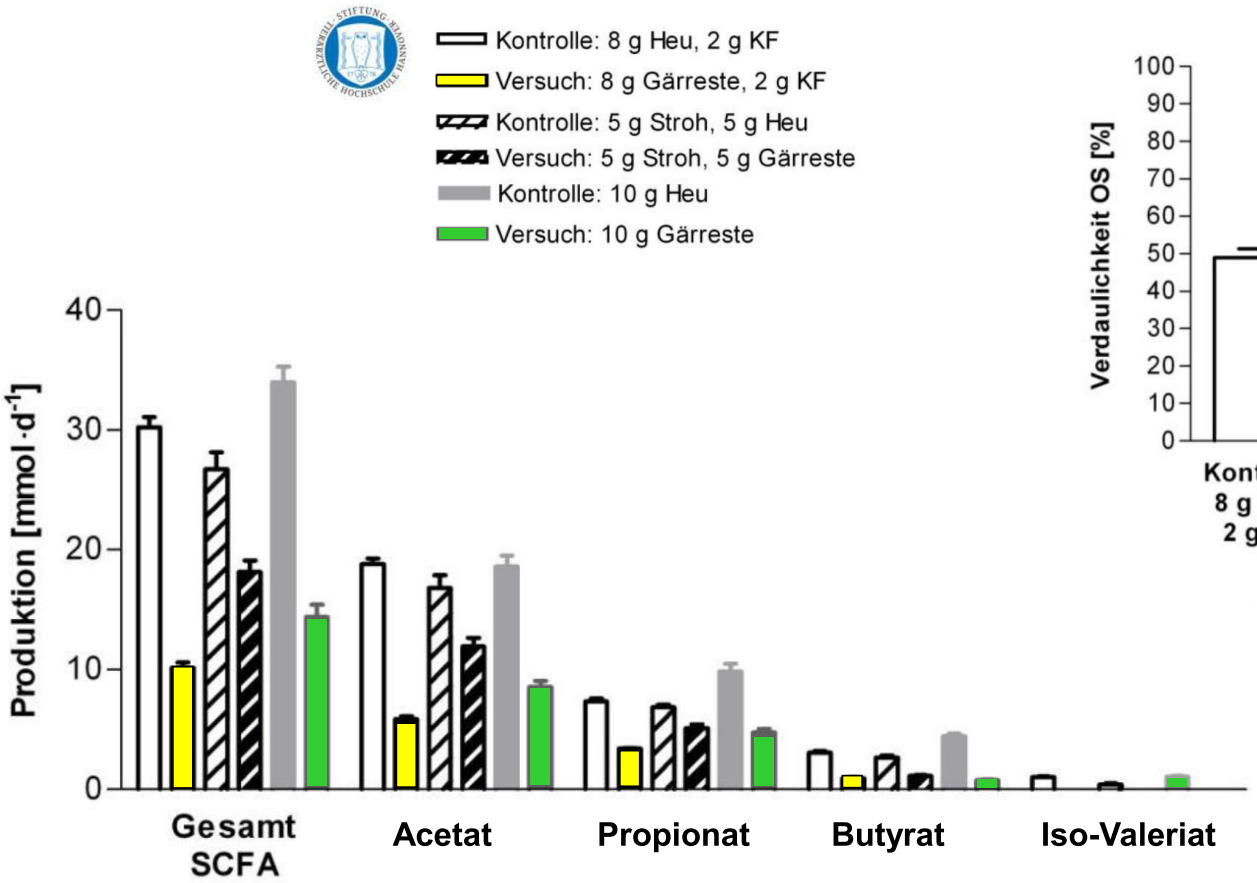


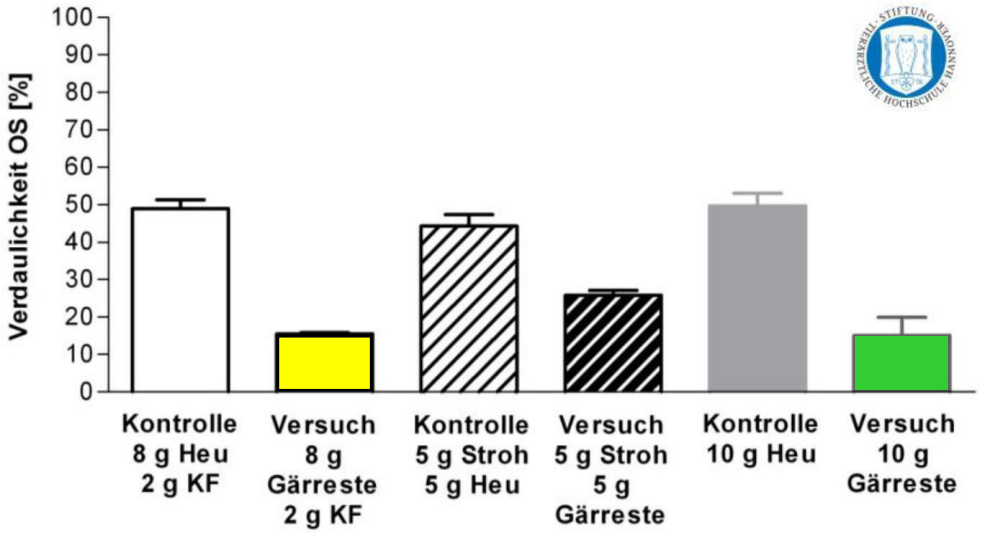
Erster Scale-Up Stufe 50 L, TiHo, Strecker

Verfahrensansatz

Fettsäureproduktion und Verdaulichkeit- Stroh / Gärrest

aus NaWaRo-BGA (Festphase)





Quelle: Breves, G. (2012), Bericht Forschungsvorhaben

Verfahrensansatz

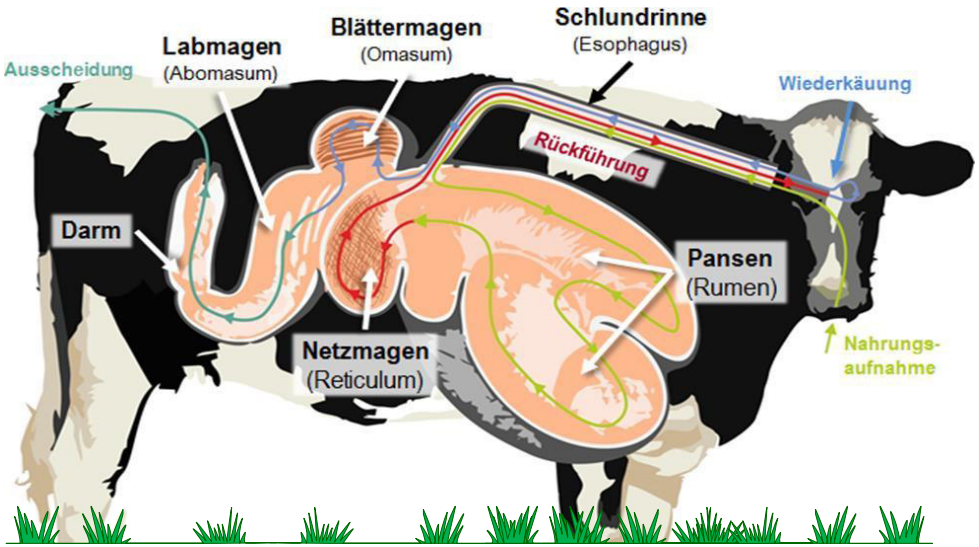
Verdaulichkeit im Vergleich

	Substrat	RUSITEC			VDI 4630		
		A_{CH4}	k_H	Abbaugrad	A_{CH4}	k_H	Abbaugrad
		L CH_4 (i.N.)/kg oTM	d^{-1}	% oTM	L CH_4 (i.N.)/kg oTM	d^{-1}	% oTM
1	Maissilage (CCM)	307	0,316	75,0	345	0,181	85,4
2	Rosenstrauch	228	0,830	58,3	322	0,131	82,5
3	Reisstroh	239	0,343	55,4	315	0,067	72,9
4	Weizenstroh 2 mm	235	0,506	62,2	307	0,193	81,3
5	Einstreu	289	0,200	77,9	300	0,053	80,8
6	Grasschnitt	297	0,991	74,3	291	0,153	72,8
7	Weizenstroh 8 mm	307	0,391	81,4	288	0,166	76,3
8	Weizentroh 31 mm	305	0,384	80,7	284	0,165	75,2
9	Banane Blatt	192	0,284	45,8	257	0,066	61,3
10	Banane Pseudost.	290	0,280	73,7	246	0,146	62,5
11	Biertreber getrocknet	210	0,478	49,0	220	0,173	51,3
12	Strauchschnitt	197	0,698	49,6	220	0,130	55,4
13	Festmist (Rind)	200	0,301	51,2	200	0,053	51,2
14	Rinde	176	0,766	45,5	151	0,057	39,0
15	Herbstlaub	162	1,010	37,3	122	0,069	28,0

verändert n.: Stopp, P. (2016) Diss.

Verfahrensansatz

Natur als Vorbild



- Futtermenge (Input) = 12,8 - 22,5 kg oTM/d
- V_{Pansen} = 0,15 m^3
- $t_{Substrat}$ = 18 – 72 h
- B_R ≈ 85-150 kg oTM/(m^3·d)
- SCFA Prod. = 5 – 9 kg SCFA/d
- spez. SCFA Prod. ≈ 0,4 kg SCFA/(kg oTM·d)

- Speichelfluss = 200 L/d
- Wasseraufnahme = 80 L/d
- $t_{hydraulisch}$ = 0.5 d
- Ausbeute = 170 – 209 LCH_4/(kg oTM·d)
- Produktivität = ca. 11 m^3 CH_4/(m^3 ·d)
  (Inkl. Methanisierung der SCFA)

Verfahrensansatz

Anaerober Abbau von faserreichen Substraten (CBS)

Verfahrensansatz

- Die **Hydrolyse** des faserreichen Materials ist der die Prozessgeschwindigkeit bestimmende Schritt im Abbau komplexer organischer Substrate.
  Für bereits hydrolysiertes organisches Materials ist die Methanogenese limitierend.

- Die Abbaurate kann daher durch verbesserte Hydrolyse (oder **Cellulase Aktivität)** im Reaktor gesteigert werden

- Entwicklung einer Verfahrenstechnik mit permanenter hoher **Cellulase-Aktivität** ohne Zugabe von Additiven

- Nutzung der Pansen Mikroorganismen, da diese spezialisiert sind, auf den Celluloseabbau und eine hohe **cellulytische Aktivität** zeigen

Substratvergleich

		Weizenstroh	Roggenstroh	Mais	Rindergülle	Schweinegülle
Wassergehalt	[% der FM]	14	14	65	**91**	**95**
Trockenmasse	[% der FM]	**86**	**86**	35	9	5
organ. TM	[% der TM]	92	94	96	80	74
anorg. TM	[% der TM]	8	6	4	20	26
Rohfaser	[kg/ t TM]	**429**	**472**	178	217	139
Rohfett	[kg/ t TM]	13	13	30	33	94
Rohprotein	[kg/ t TM]	37	37	80	181	**226**
Biogaspotenzial						
	[m^3_N Biogas/ t oTM]	500	490	**600**	321	400
	[m^3_N Biogas/ t FM]	396	396	202	23	15
Methanpotenzial						
	[m^3_N CH_4/ t oTM]	255	250	**312**	210	240
	[m^3_N CH_4/ t FM]	208	208	106	15	9
Fugatfaktor		0,60	0,60	0,76	1,00	1,00

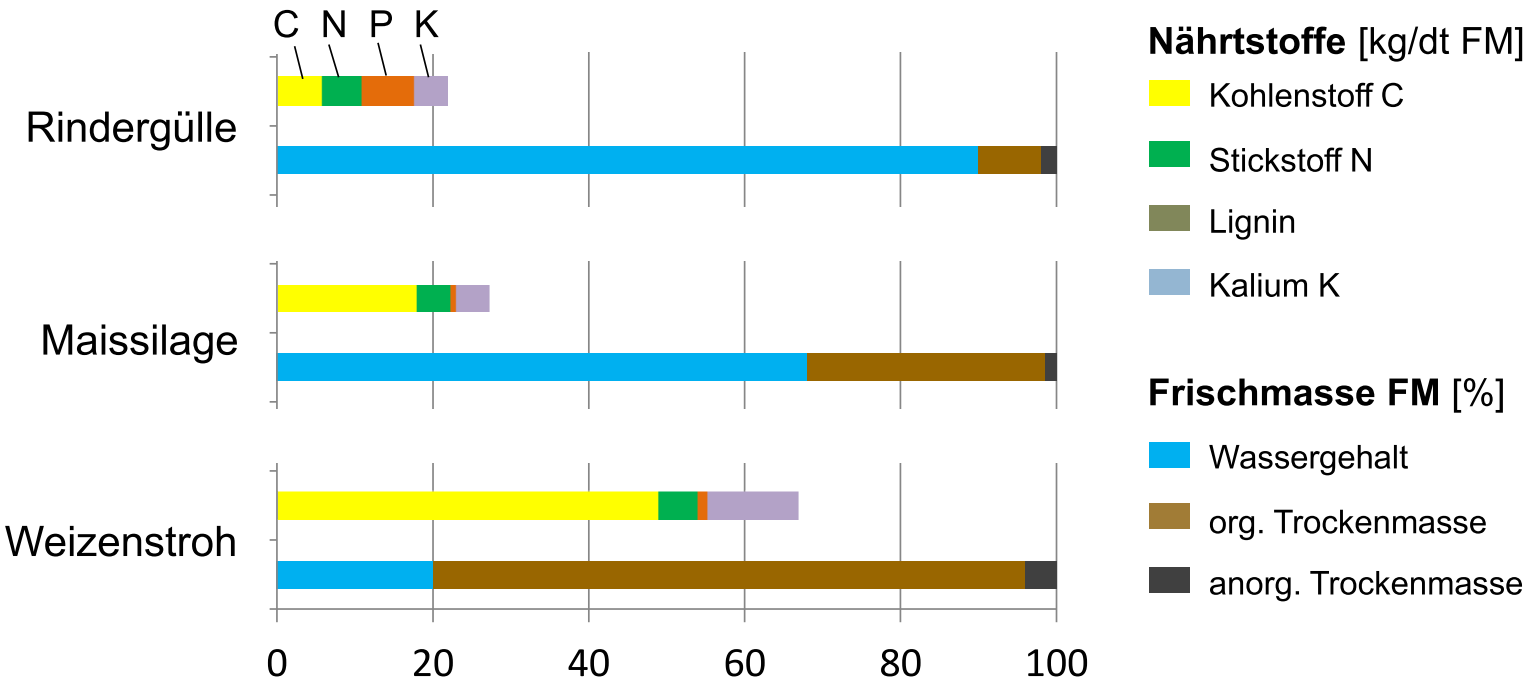
Verfahrensansatz

Substratvergleich

		Weizenstroh	Roggenstroh	Mais	Rindergülle	Schweinegülle
Wassergehalt	[% der FM]	• relativ hoher Feststoffgehalt, • geringer Nährstoffgehalt		65	• relativ hoher Wassergehalt, • relativ hoher Stickstoffgehalt	
Trockenmasse	[% der FM]			35		
organ. TM	[% der TM]			96		
anorg. TM	[% der TM]			4		
Rohfaser	[kg/ t TM]	eher Trocken-fermentation (20 – 40 % TM)		178	eher Nassfermentation (3 – 15 % TM)	
Rohfett	[kg/ t TM]			30		
Rohprotein	[kg/ t TM]			80		
Biogaspotenzial						
	[m^3_N Biogas/ t oTM]	zweistufig		**600**	einstufig	
	[m^3_N Biogas/ t FM]			202		
Methanpotenzial		mit Nährstoff-versorgung			mit Substrat-management	
	[m^3_N CH_4/ t oTM]			**312**		
	[m^3_N CH_4/ t FM]			106		
Fugatfaktor				0,76		

Verfahrensansatz

Substratvergleich anhand von Nährstoffgehalten



Verfahrensansatz

Prozesstechnischer Ansatz des DAUMEN Verfahrens

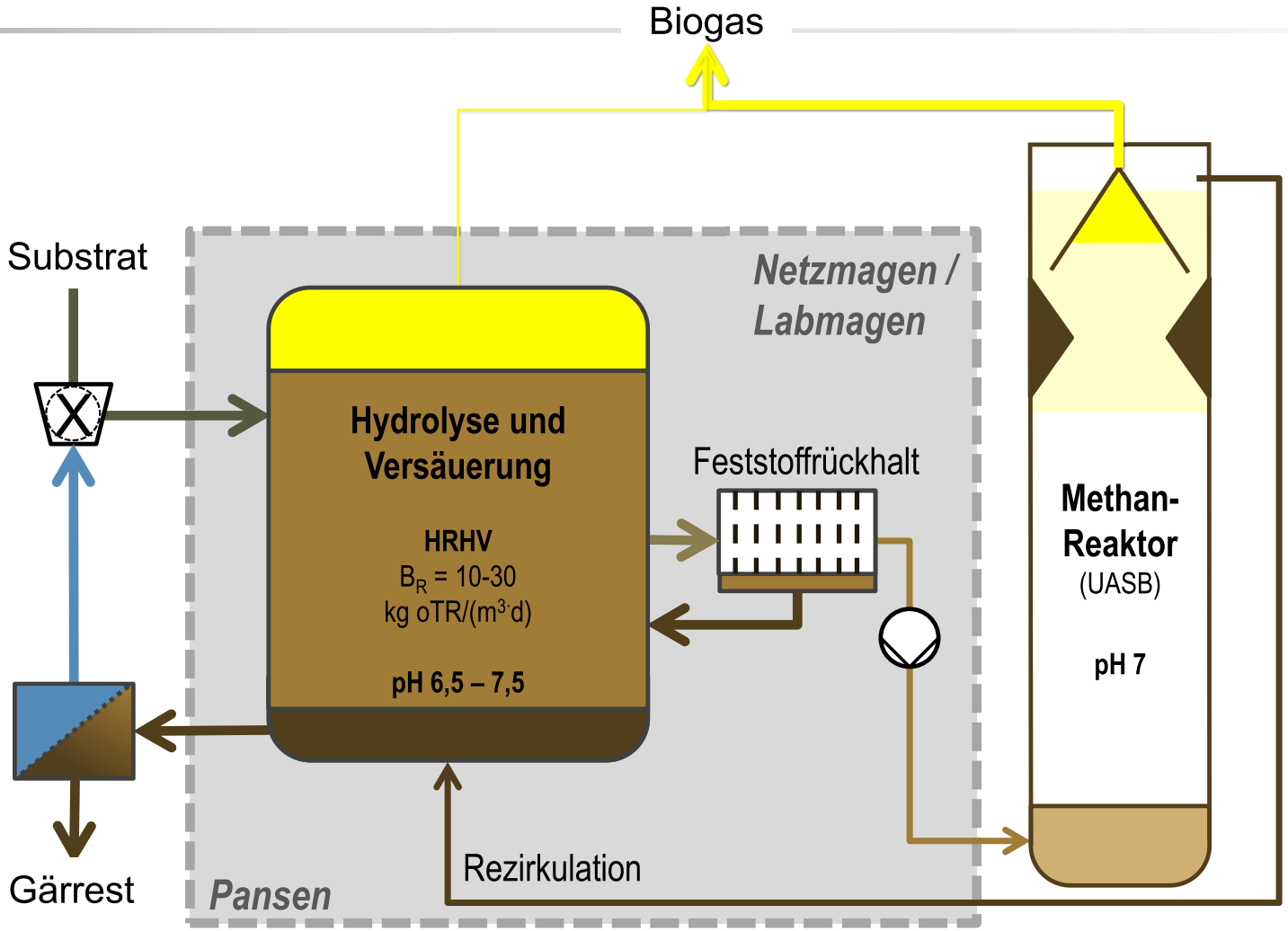
Verfahrensansatz

DAUMEN

Design for

Augmented

Methanisation



Prozesstechnischer Ansatz des DAUMEN Verfahrens

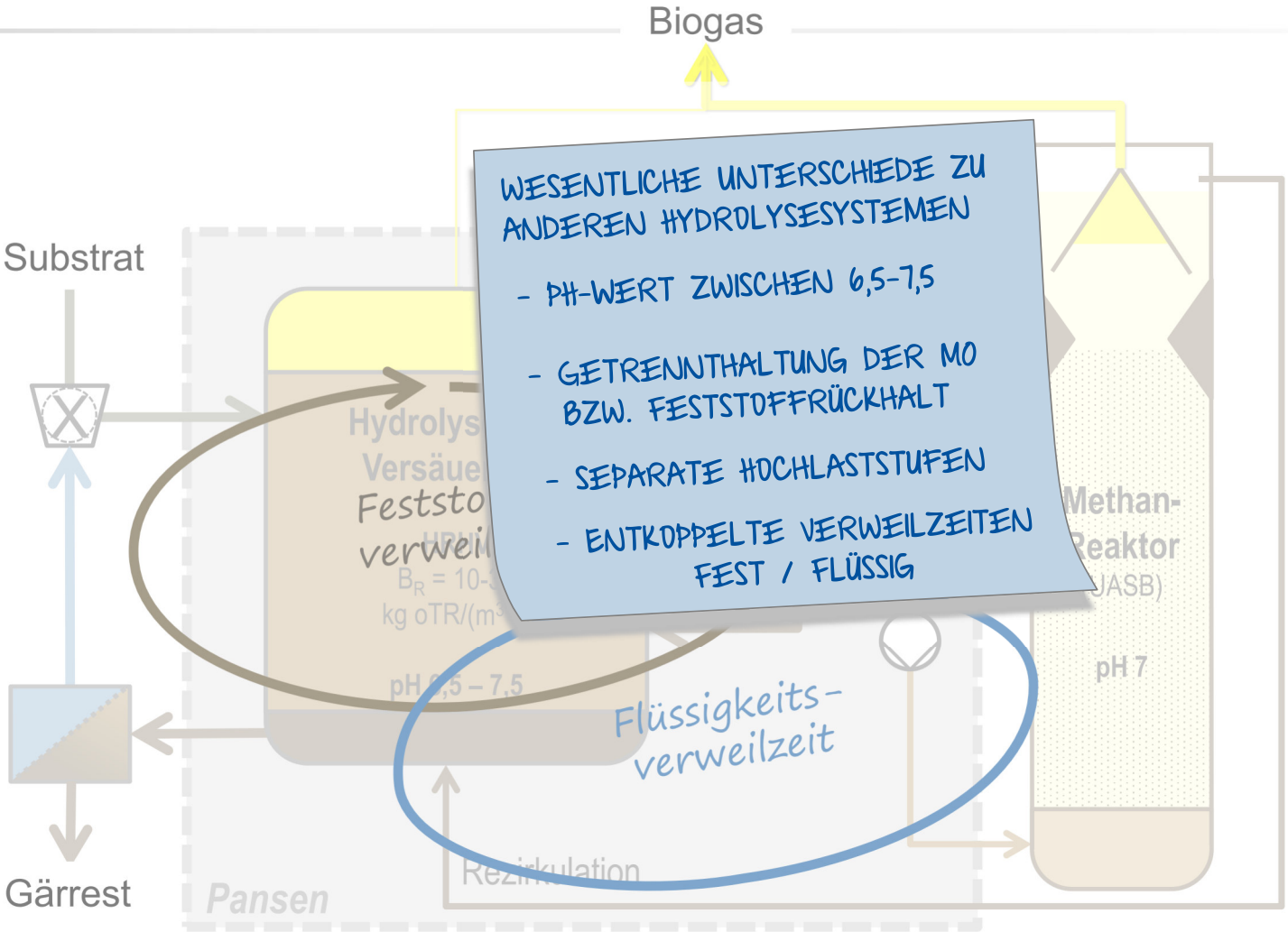
Verfahrensansatz

DAUMEN

Design for

Augmented

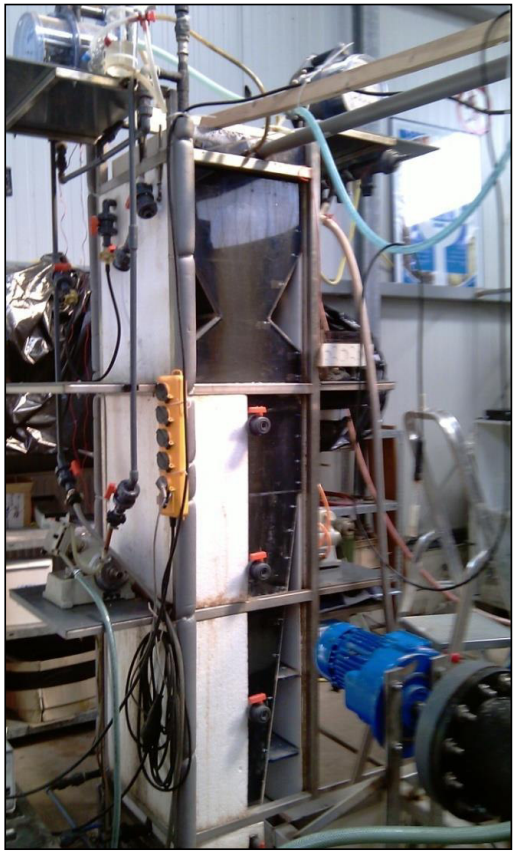
Methanisation



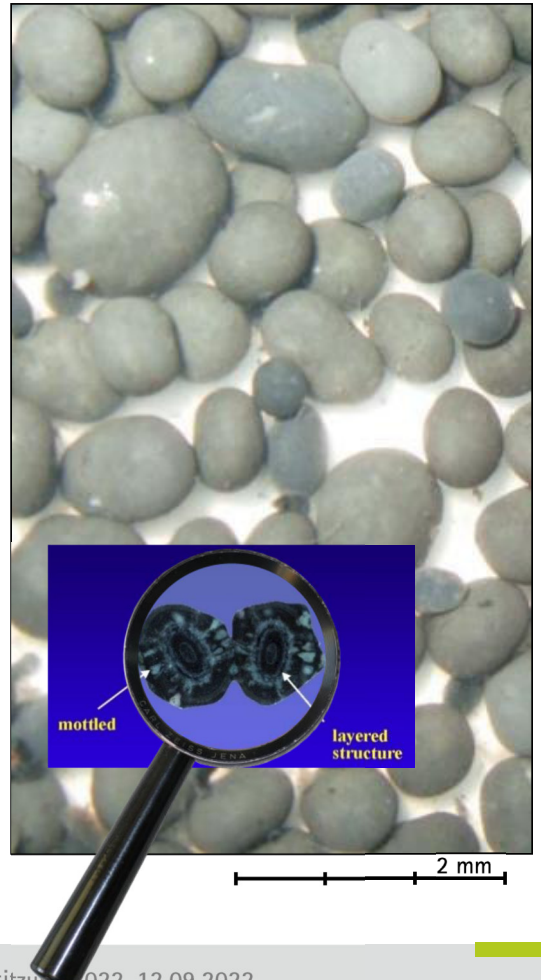
Versuchsanlage DAUMEN 1

Hydrolyse (1 m³)

UASB-Reaktor (210 L)



Pelletschlamm



Gefördert duch

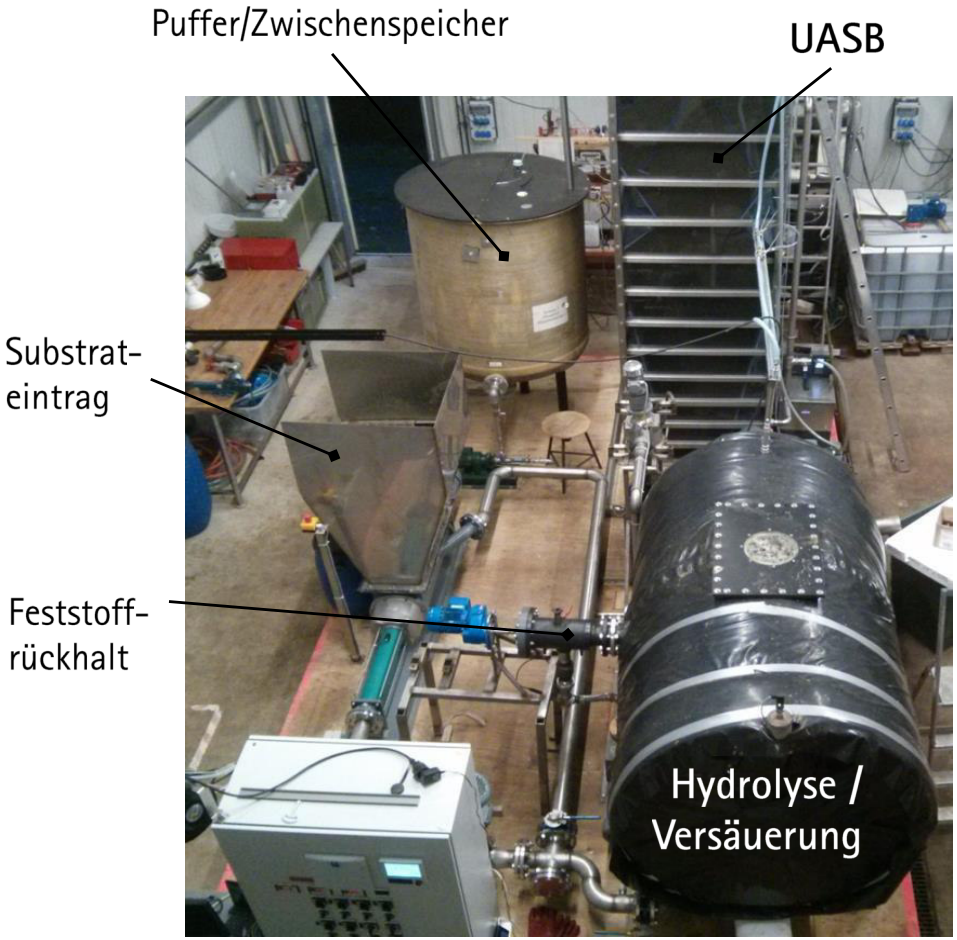
Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

NBank
Wir fördern Niedersachsen

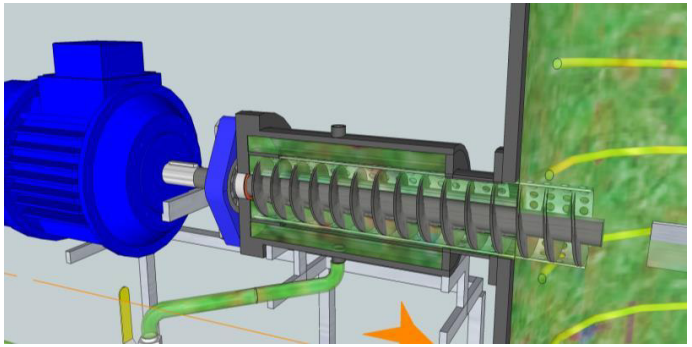
Laufzeit 2J. (2009 -2011)

DAUMEN 1, 2, 3.0

Versuchsanlage DAUMEN 2



			HRHV	UASB
Anlagen-volumen	**V**	[m³]	2,3	2,7
Reaktions-volumen	**V_R**	[³]	1,5	1,25
Rezirkulation	**Q_R**	[L/d]	750	
Substrat-zugabe	**Q_{Zu}**	[L/d]	60	



Quelle: Stopp, P. (2016), Diss.

gefördert durch:

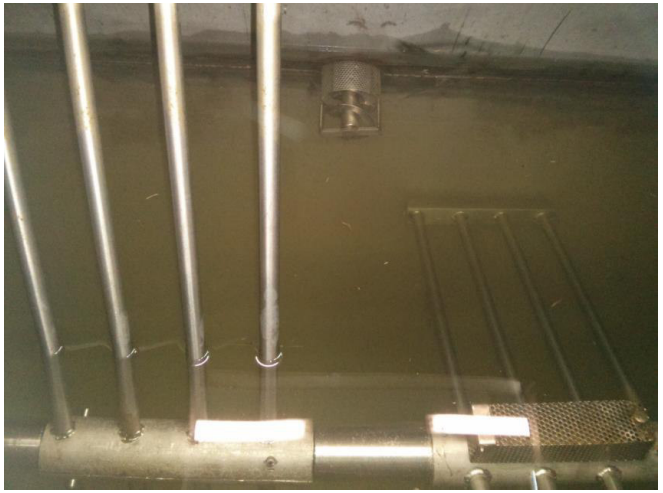
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Laufzeit 3J.
(09´2012 -08´2015)
FKZ 22025211

DAUMEN 1, 2, 3.0

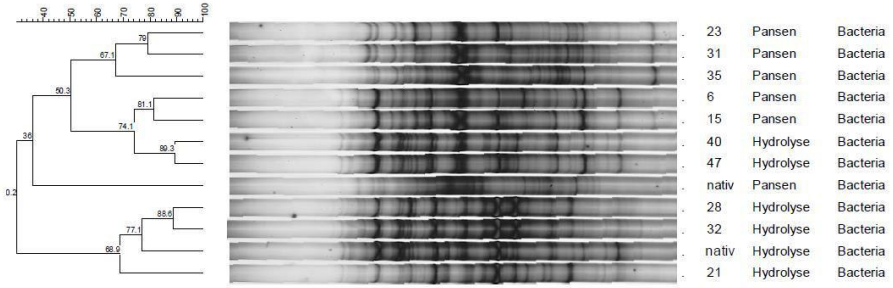
Betriebserfahrungen DAUMEN 2

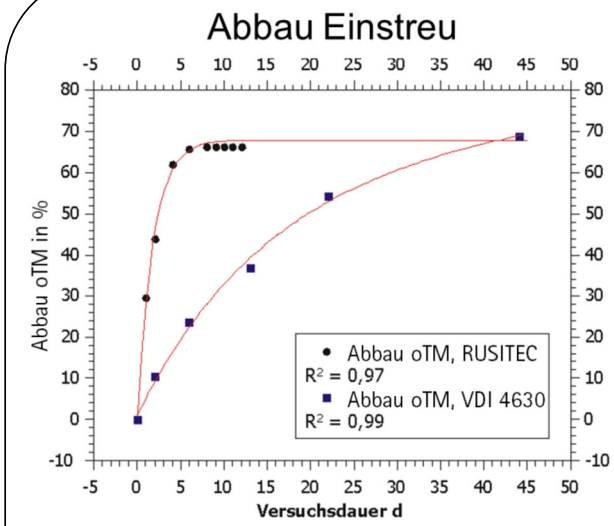


DAUMEN 1, 2, 3.0

Ergebnisse DAUMEN 2

- Die **Hydrolyse** des faserreichen Materials ist der die Prozessgeschwindigkeit bestimmende Schritt –> zweistufiger Ansatz richtig!
- Etablierung einer Pansen-biozönose mit permanent hoher **Cellulase-Aktivität (ohne Zugabe von Additiven)** erfolgreich





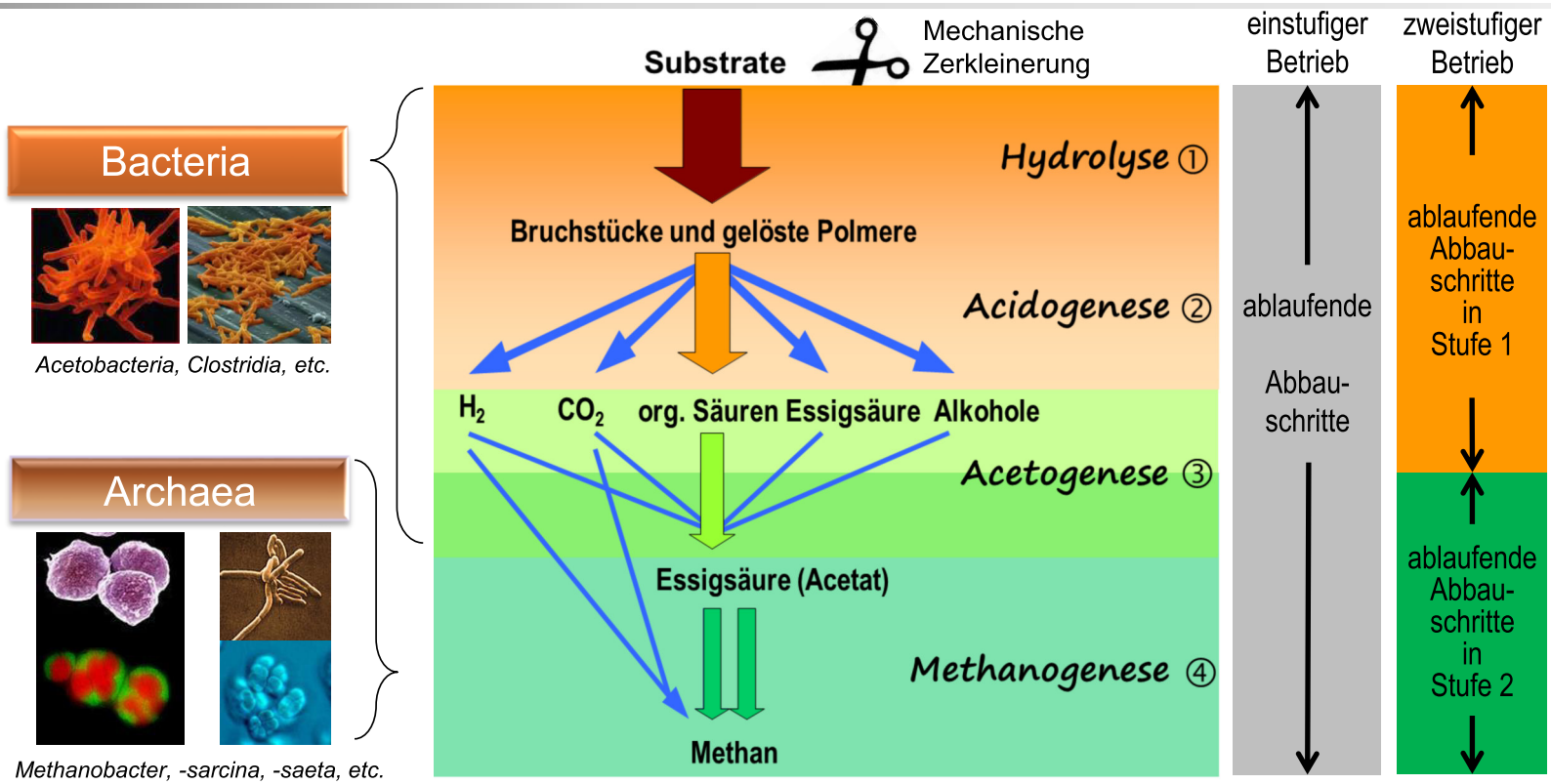
	Einstreu	
	VDI 4630	RUSITEC
Methanertrag (L CH_4 (i.N.)/g oTM)	315	290
Abbau oTM (%)	65	66
Abbaurate (d^{-1})	0.05	**0.75**

- Beide Stufen arbeiten als Hochlaststufen
- B_R (HRHV) ca. 10 kg oTR/(m^3·d)
- Ähnliche Produktivität wie NaWaRo BGA (1,2 m^3 / m^3)
- Feststoffabtrennung ist zu optimieren

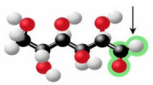
Quelle: Weichgrebe, et al.(2015) Abschlussbericht FKZ **22017612** (FNR)

DAUMEN 1, 2, 3.0

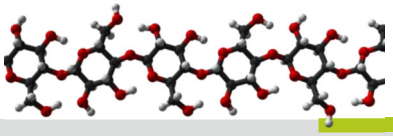
Schritte des anaeroben Abbaus



- *leicht* abbaubare Substrates (z.B. Zucker)
  $(dc/dt)_{①}$, $(dc/dt)_{②}$, $(dc/dt)_{③}$ >> $(dc/dt)_{④}$



- *schwer* abbaubare Substrate (z.B. Cellulose)
  $(dc/dt)_{①}$ << $(dc/dt)_{②}$, $(dc/dt)_{③}$, $(dc/dt)_{④}$



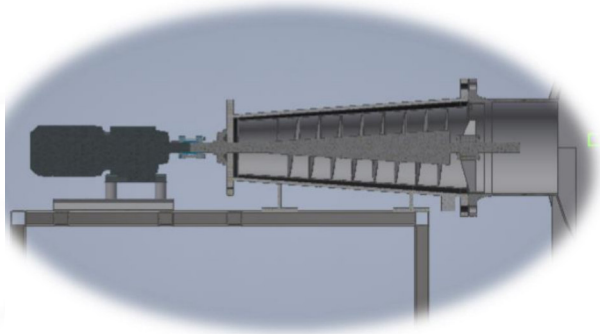
DAUMEN 1, 2, 3.0

„Stärkung der landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffverwertung für die Biogaserzeugung"

Praxisumsetzung und Demonstration
- Verbesserung der Feststofftrenneinheit
- Anlagen Betrieb an einer bestehenden BGA (Agrargenossenschaft Bergland, Clausnitz) mit faserreichen Substraten (separierter Gärrest, Leinenstroh, Festmist und Mischsubstrat)

Mikrobiologische Begleitung
- Beobachtung und Bewertung der Biozönosen
- Bewertung des Hygienestatus

Transferabschätzung
- Stoff- und Energiebilanz
- Mathematische Modellierung
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (BIORESTEC GmbH, Latzen)

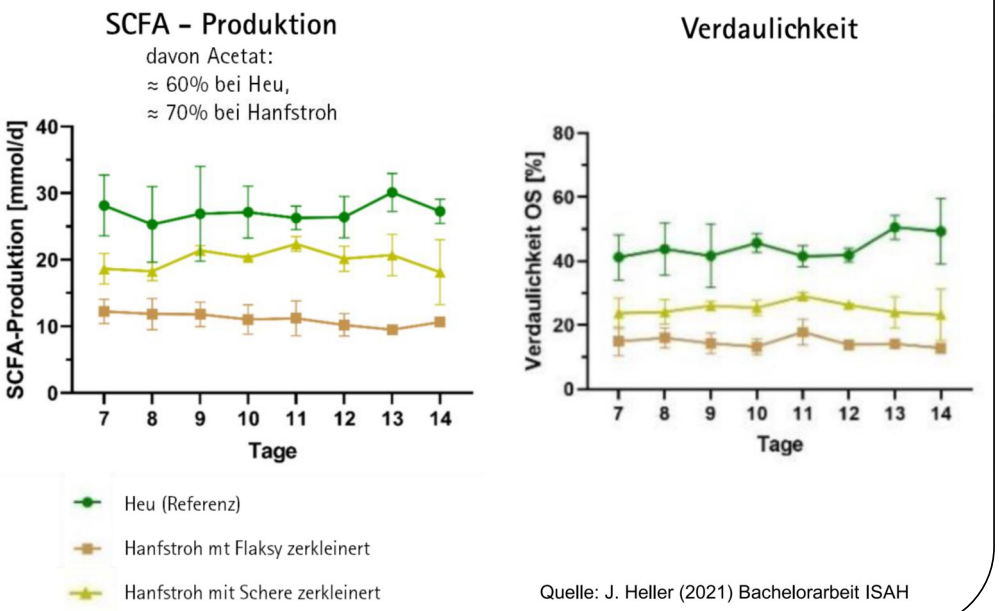


Gefördert durch:
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
FNR
Laufzeit: 3 J.
10´2020 – 09´2023
FKZ 2220NR035A

Fettsäureproduktion und Verdaulichkeit

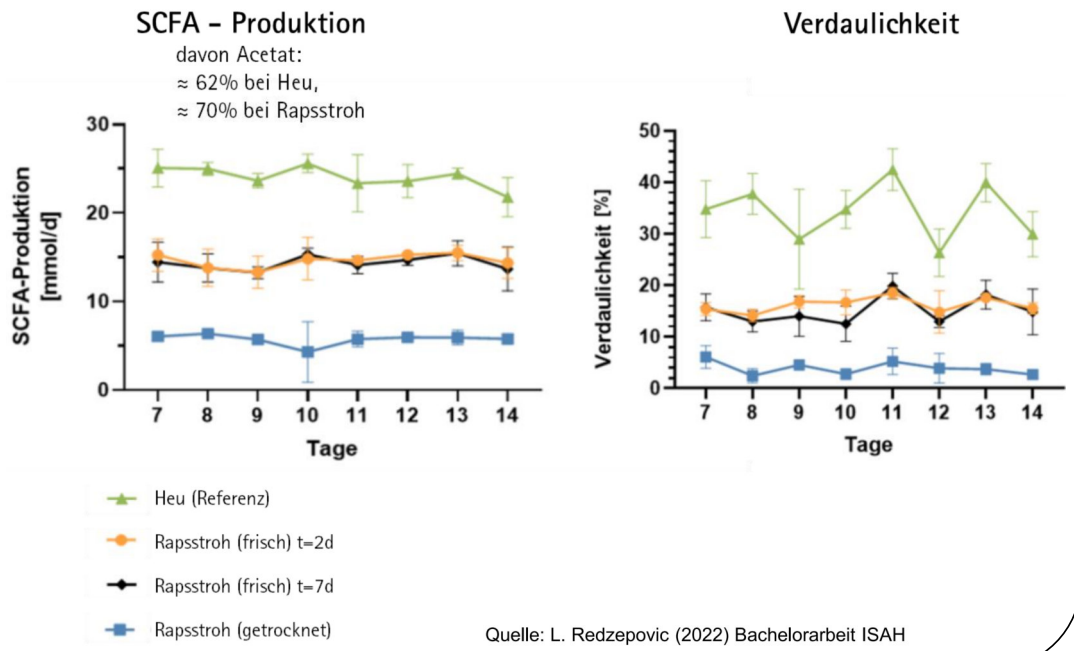
Faserreiche Substrate CbS

- Hanfstroh -



Quelle: J. Heller (2021) Bachelorarbeit ISAH

- Rapsstroh -



Quelle: L. Redzepovic (2022) Bachelorarbeit ISAH

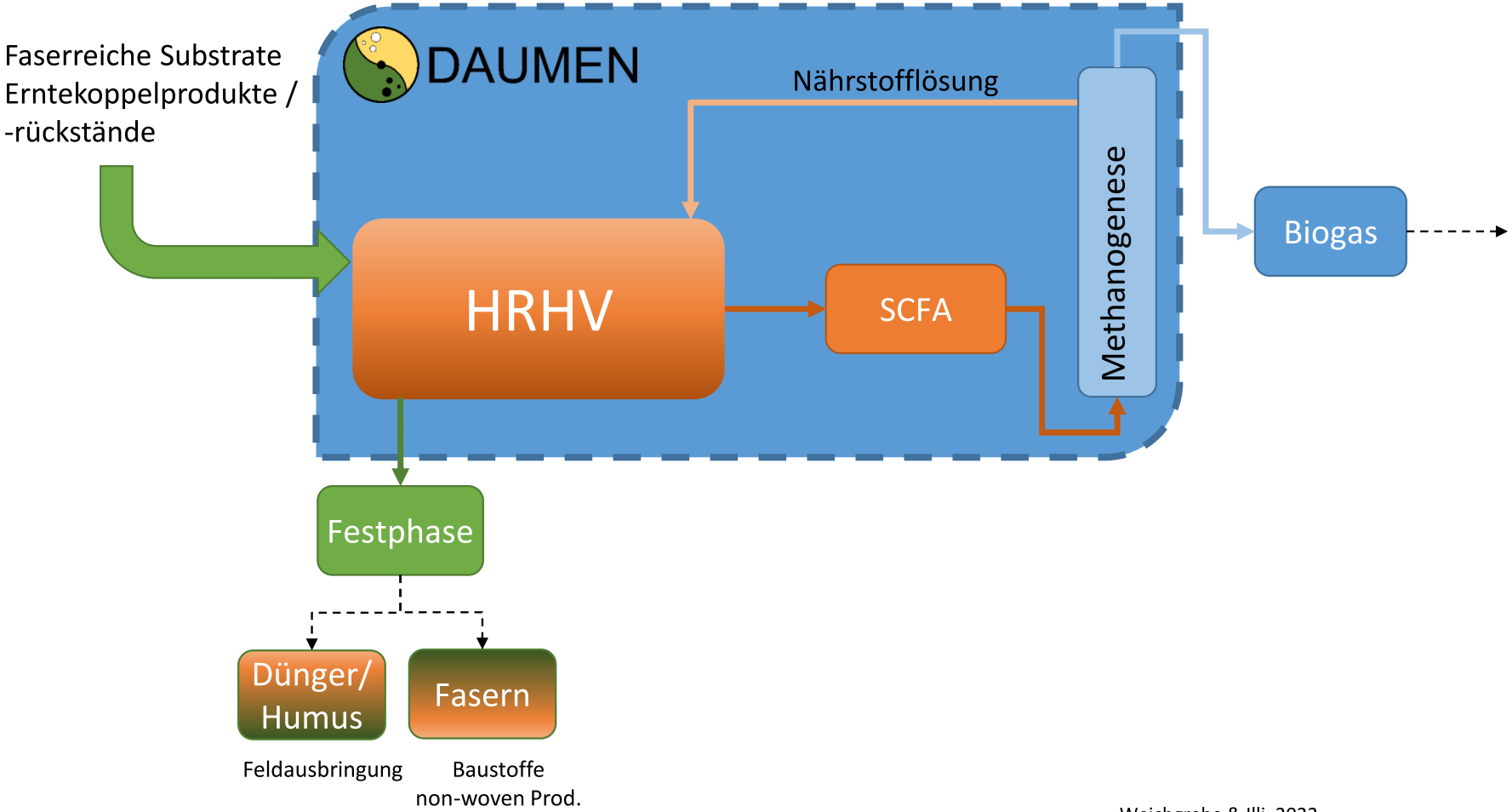
Ausblick für Anwendungsfälle des DAUMEN Verfahrens

Leibniz Universität Hannover

- Bioökonomie nimmt Fahrt auf
- DAUMEN Verfahren als Konditionierungsstufe für pflanzenbasierter Produkte

Biookonomie

Beitrag zur Bioökonomie



Weichgrebe & Illi, 2022

Beitrag zur Bioökonomie

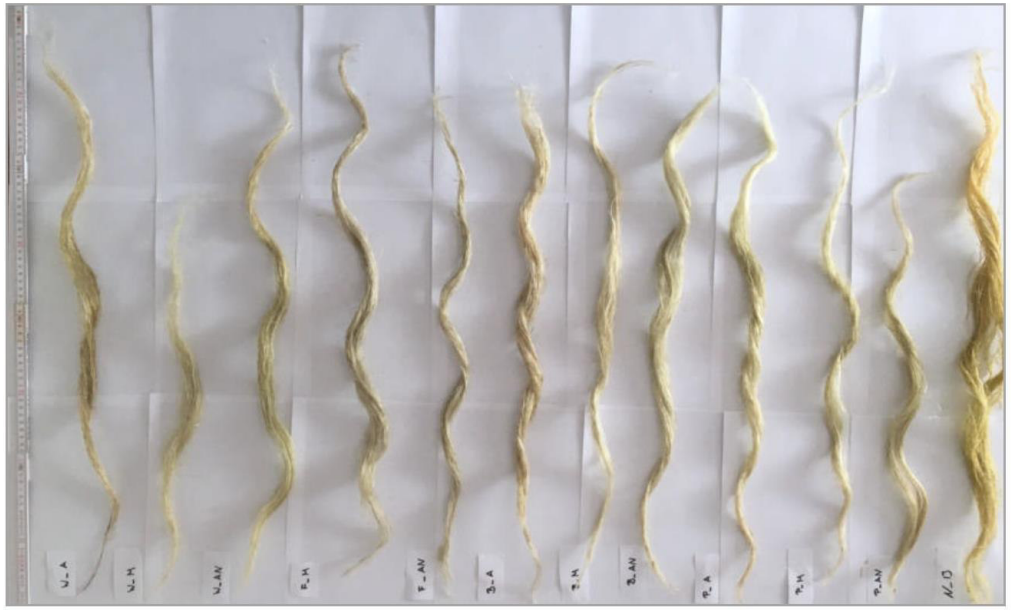
Hanfstroh nach anaeroben Aufschlussversuchen **mit Pansenflora**;
(links vorbehandeltes Stroh, rechts nicht vorbehandeltes Stroh)

Bioökonomie

Beitrag zur Bioökonomie

Leibniz Universität Hannover

Ölleinenstroh / Fasergewinnung



W_A	W_M	W_AN	F_M	F_AN	B_A	B_M	B_AN	P_A	P_M	P_AN	N_B

Abb. 4-20: Längenausbeute [1]

mit Pansenflora

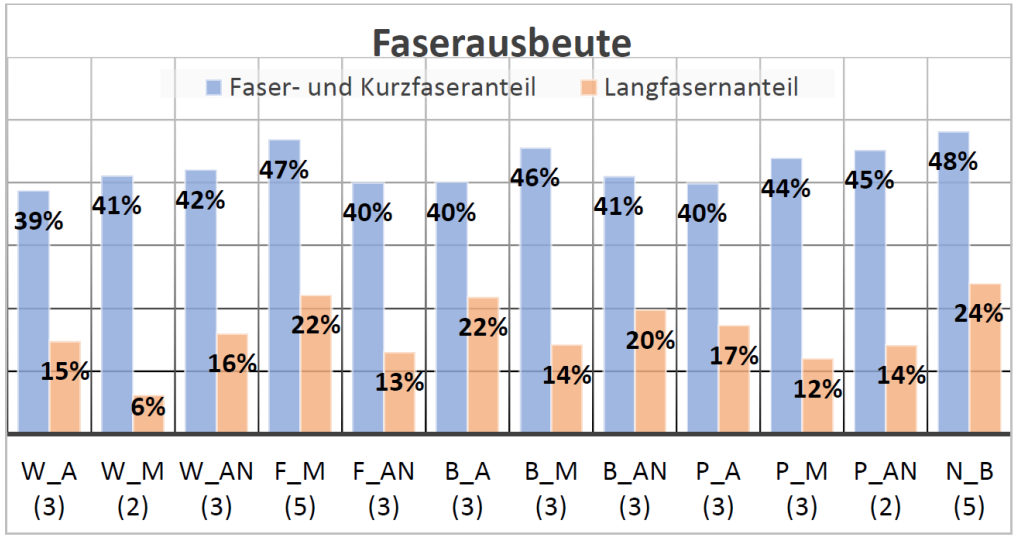


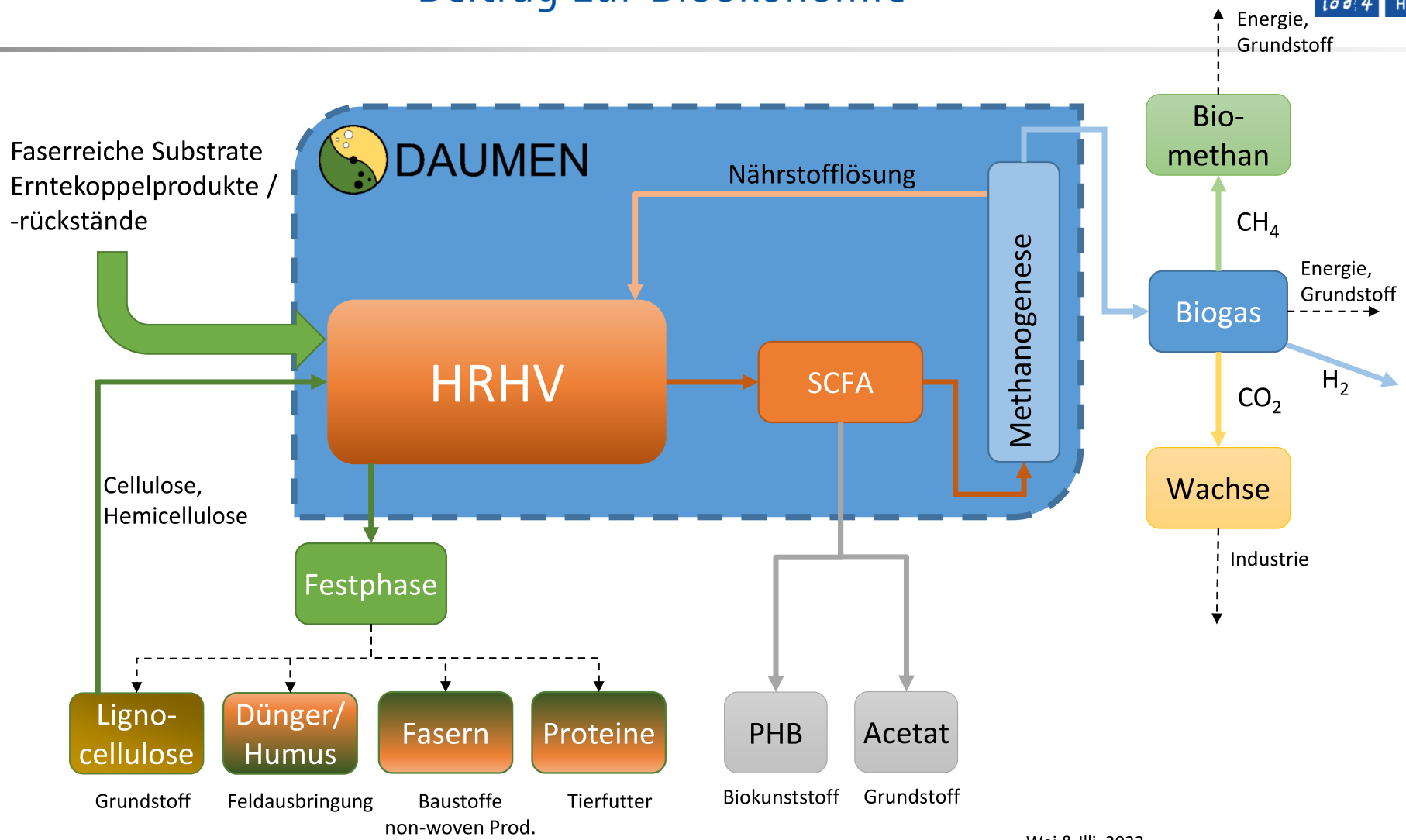
Abb. 4-21: Faserausbeute (lang und kurz) [2] und Langfaserausbeute [3] in Relation zum Ausgangsfaser wicht

mit Pansenflora

Quelle: Ann-Christin Illi (2018) Masterarbeit, ISAH

Bioökonomie

Beitrag zur Bioökonomie



Wei & Illi, 2022

Bioökonomie

Zusammenfassung und Fazit

Leibniz Universität Hannover

- Erhalt der Biogastechnologie zur Bereitstellung des speicherfähigen Energieträgers Methan
- Die Nutzung von faserreichen Substraten (landwirtschaftlicher Reststoffe, Ernterückstände und Gärreste) zur Biogasgewinnung kann einen wertvollen Beitrag zur Konfliktlösung Ernährung/Energie/Wasser/Klima liefern
- Biogasproduktion auf Basis von CbS (ohne Gülleeinsatz) führt zur Reduktion der N-Last und ermöglich das Recycling zentraler Pflanzennährstoffe (N, P, K)
- Eine kontrollierte Hydrolyse bei ca. pH 7 – betrieben mit Pansenbiozönose – bringt deutliche Vorteile im Säurespektrum und eine Effizienzsteigerung
- kürzere Verweilzeit und höhere Raumbelastung
  → damit kleinere Reaktoren
- Die mikrobielle Population hat einen starken Einfluss auf die Effizienz der Hydrolyse und der Biogasbildung
- Stabile Hochlast-Prozesse erfordern eine an den mikrobiellen Stoffwechsel angepasste Verfahrenstechnik und Prozessführung

Zusammenfassung und Fazit

Leibniz Universität Hannover

- **Die meisten Biogasanlagen sind für den gezielten Einsatz von spezialisierten Mikroorganismen nicht konzipiert aber erweiterbar**
- **Umrüstung / Ergänzung bestehender Biogasanlagen**
- **Als vorgeschaltete Hydrolyse kann sowohl der unkontrollierten Versäuerung entgegenwirkt als auch der Substrataufschluss gesteigert werden**
- Ein künstlicher Pansen leistet zusätzliche Synthesesaufgaben, z.B. Proteingewinnung (ca. 25 kg mikrobielle Zellmasse pro m^3 und d -> Tierfutter?
- Neben dem Beitrag zur Konfliktlösung Ernährung/Energie/Wasser/Klima liefert der Verfahrensansatz auch einen Beitrag zur Bioökonomie
  - Gewinnung von biobasierten Produkten (Fasern, Grundchemikalien, etc.)

Zusammenfassung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Ich bedanke mich bei dem Fördermittelgebern

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

FNR
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Gefördert duch

Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

NBank
Wir fördern Niedersachsen

Ich bedanke mich auch bei meinen Co-Autoren und den Projektpartnern

Priv. Doz. Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe
Leibniz Universität Hannover
Institut für Siedlungswasserwirtschaft
und Abfalltechnik
Welfengarten 1, 30167 Hannover

www.isah.uni-hannover.de
Tel: + 49 511 762 2899
Fax: + 49 511 762 2881
weichgrebe@isah.uni-hannover.de

www.daumen-process.de

Prof. G. Breves,
Melanie Brede, PhD

Lukas Illi, MSc.
Jan Tetzlaff