

# Einfluss der Fermentation auf den Abbau der Inhaltsstoffe

*Dr. Gerd Reinhold*

Fachtagung

„Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen“

20. und 21. März 2013

Umweltforum Auferstehungskirche Berlin

## **Impressum**

Herausgeber: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft  
Naumburger Str. 98, 07743 Jena  
Tel.: 03641 683-0, Fax: 03641 683-390  
Mail: [pressestelle@tll.thueringen.de](mailto:pressestelle@tll.thueringen.de)

März, 2013

1. Auflage 2013

### **Copyright:**

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen und der foto-mechanischen Wiedergabe sind dem Herausgeber vorbehalten.

## Einfluss der Fermentation auf den Abbau der Inhaltsstoffe

G. Reinhold, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Jena

Mit Inkraftsetzung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) und besonders mit den Novellen in 2004 und 2009 wurde eine breite Einführung der Biogastechnologie ermöglicht. Durch die Anreize zum Einsatz von Wirtschaftsdüngern und nachwachsenden Rohstoffen (NAWARO) werden zunehmend Biogasgülle bzw. Gärreste mit im Vergleich zu klassischen Wirtschaftsdüngern veränderten Eigenschaften anfallen und in der Düngungspraxis eingesetzt werden.

Thüringen verfügt mit Stand 2012 über 226 landwirtschaftliche Biogasanlagen (BGA) mit 102 MW installierter elektrischer Leistung. In diesen Anlagen werden zurzeit pro Jahr rund 2,57 Mio. m<sup>3</sup> flüssiger und 0,31 Mio. t feste Wirtschaftsdünger, Feldfrüchte von 40.000 ha (Mais 20 Tha, Getreide 12,8 Tha, Anwelksilage (AWS) 6,6 Tha, ...) und ca. 0,165 Mio. t Bioabfälle eingesetzt. Damit werden ca. 55 % der flüssigen, fast 20 % der festen Wirtschaftsdünger und 0,95 Mio. t Feldfrüchte anaerob vergoren.

Unter Beachtung des durch die Fermentation bedingten Masseabbaus ergibt sich ein Anfall von 3,5 Mio. m<sup>3</sup> Biogasgülle bzw. Gärrest für Thüringen. Durch den Einsatz von NAWARO und Bioabfällen als Substrate erhöht sich somit der Anfall um ca. 750.000 m<sup>3</sup>/a bzw. 12 %.

Davon ausgehend wurde 2004 in Thüringen ein Monitoring der Biogasanlagen aufgelegt. Durch die im zwei- bis vierjährigen Abstand erfolgenden Erhebungen in den Thüringer Biogasanlagen (BGA) besteht die Möglichkeit, die Einsatzstoffe und Gärreste gut zu charakterisieren. Dazu erfolgte in jeder beteiligten Anlage eine Probenahme aller Substrate und der Gärreste. Der vorliegende Datensatz ermöglicht die Bewertung der Stoffeigenschaften der Substrate und Gärreste sowie Rückschlüsse vom biologischen Prozess auf die Eigenschaften der Gärreste durch die Kombination der technisch technologischen Erhebungsdaten und der Untersuchungsergebnisse. So gestattet z. B. die Kenntnis des Biomasseeinsatzes und speziell des Kohlenstoffeinsatzes in Verbindung mit der realisierten Anlagenleistung eine Bilanzierung der Abbauvorgänge und die Charakterisierung der Gärreste.

In Auswertung der Untersuchungsjahre zeigt sich bei dem für Thüringen typischen Gülleanteil im Substratmix von > 70 %, dass sowohl bei Rinder- als auch bei Schweinegülle ein leichter Trend zur Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes festzustellen ist. Aus dem rechnerisch ermittelten Mischsubstrat mit 13,2 % TS entsteht ein Gärrest mit 5,8 % TS (Tabelle 1). Der Trockenmasseabbau führt zu deutlichen Vorteilen für das Gülle-Management, da die Neigung zu Verstopfungen der Gülletechnik reduziert wird und die Vergärung eine Homogenisierung der Biogasgülle bewirkt.

In den untersuchten Biogasanlagen kamen neben ca. 70 % Wirtschaftsdünger vorwiegend Maissilage, Getreide und Anwelksilage als Ko-Substrate zum Einsatz. Die hierbei ermittelten Eigenschaften entsprachen dem bekannten Wissen. Für die Biogaserzeugung sind der organische Trockenmassegehalt des Substrates und dessen Abbaubarkeit von großer Bedeutung. Auffällig ist besonders bei der Anwelksilage die hohe Variabilität des Gehaltes an organischer Trockenmasse.

Der Biogasprozess führt zu einer deutlichen Reduzierung des Gehaltes an organischer Trockenmasse von 81 % der TS in der Substratmischung auf 72 % der TS in der Biogasgülle bzw. des C<sub>org</sub>-Gehaltes von 44 % der TS auf 39 % der TS, der ähnlich wie bei der aeroben Rotte zu einer Stabilisierung des Kohlenstoffs führt. Das C:N-Verhältnis im Mischsubstrat ist mit 5...25:1 stark vom Gülleanteil abhängig. Beim Gärrest dagegen ist ein enges C:N-Verhältnis von 3...8:1 festzustellen, was dem der Gülle ähnelt.

Der mittlere Gesamtstickstoffgehalt sinkt durch die Vergärung von 0,51 % auf 0,45 %. Gleichzeitig ist der NH<sub>4</sub>-N-Anteil am Gesamt-N von 42 % in der Substratmischung vor der Vergärung auf 67 % in der Biogasgülle gestiegen. Die Vergärung bewirkt einen Anstieg des pH-Wertes auf 7,7 und infolge dessen kommt es zu einer verstärkten Umwandlung von Ammonium in Ammoniak. Bei den im Biogasreaktor vorherrschenden pH-Werten und den Temperaturbedingungen ist ein Übergang dieses Ammoniaks im Biogasreaktor in die Gasphase denkbar.

In Auswertung der Untersuchungen erfolgte die Entwicklung eines Biogasgüllerechners (Quelle: [www.tll.de/ainfo](http://www.tll.de/ainfo)), welcher ausgehend von den Substratmengen wesentliche Parameter der Gärreste bereitstellt. Im Einzelnen sind das:

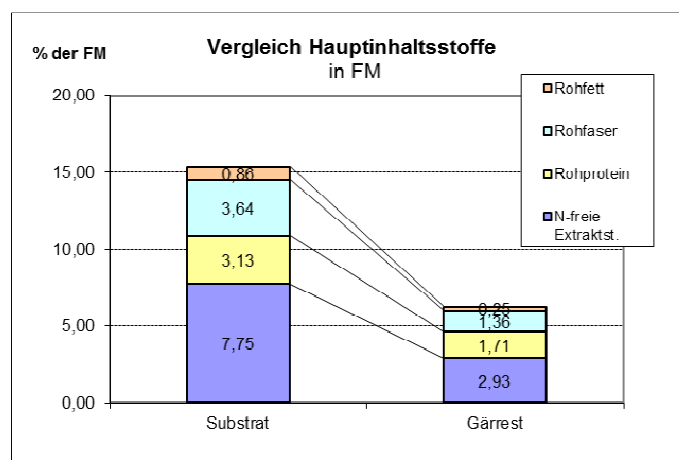
- Abschätzung des Masseabbaus und des Lagerraumbedarfs,
- Ermittlung der Nährstoffgehalte für Düngungsempfehlungen,
- Abschätzung des Humus-C-Gehaltes der Biogasgülle,
- Bestimmung ökonomischer Grundwerte.

**Tabelle 1:** Nährstoffgehalte von Mischsubstrat und Gärrest (n = 171 )

| Para-meter         | Einheit           | Mischsubstrat      |       | Gärrest |       |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------|---------|-------|
|                    |                   | Mittel             | s (%) | Mittel  | s (%) |
| TM                 | %                 | 14,27              | 40    | 6,00    | 31    |
| oTS                | % d. TS           | 81,93              | 6     | 72,34   | 7     |
| pH                 | -                 | 6,42 <sup>1)</sup> | 19    | 7,74    | 4     |
| Nt                 | % d. FM           | 0,51               | 30    | 0,45    | 23    |
| NH <sub>4</sub> -N | % d. Nt           | 41,1               | 37    | 66,8    | 21    |
| Corg.              | % d. TS           | 44,7               | 10    | 40,3    | 16    |
| C/N                | -                 | 12,3               | 33    | 5,5     | 29    |
| P                  | % d. TM           | 0,78               | 51    | 1,42    | 31    |
| K                  | % d. TM           | 2,44               | 31    | 5,39    | 31    |
| Mg                 | % d. FM           | 0,075              | 30    | 0,062   | 42    |
| S                  | mg/kg TM          | 5.429              | 33    | 7.267   | 61    |
| S                  | kg/m <sup>3</sup> | 0,55               | 31    | 0,42    | 70    |
| Zn                 | mg/kg TM          | 284                | 211   | 561     | 113   |
| Cu                 | mg/kg TM          | 158                | 209   | 393     | 92    |

<sup>1)</sup> nur Wirtschaftsdünger

Bei der Beurteilung des Abbaus der Inhaltsstoffe bzw. der Quellen der Gasbildung zeigt sich, dass Rohfett auf 29 % und N-freie Extraktstoffe und Raufaser auf jeweils ca. 38 % des Ausgangsgehaltes verringert werden. Rohprotein wird auf nur 55 % abgebaut. Der oTS Anteil an der TS sinkt von 82 % durch die Fermentation auf 72 % (Abb. 1).



**Abbildung 1:** Vergleich der Inhaltsstoffe von Mischsubstrat und Gärrest (n= 49)

Die Biogasproduktion greift in den Kohlenstoffkreislauf durch die Änderung der Fruchtfolge und die Rückführung der Biogasgülle als Wirtschaftsdüngeranteil ein. In der oftmals polemisch geführten Diskussion wird die Rückführung der Biogasgülle oft vernachlässigt bzw. es wird vernachlässigt, dass im Gegensatz zur Marktfrucht bei der Biogaserzeugung die wesentlichen Pflanzennährstoffe im internen Kreislauf des Landwirtes verbleiben und nur Kohlenstoff verkauft wird. Die Steigerung des Ammoniumanteils ist positiv zu bewerten. Die Vergärung bewirkt den Anstieg des pH-Wertes im Substrat und erhöht die Gefahr höherer gasförmiger Stickstoffverluste. Zur Minimierung der Verluste sind emissionsarme Applikationstechniken einzusetzen. Die Zusammensetzung der Trockenmasse der Gärreste entspricht im Wesentlichen der von Gülle.

Im Gegensatz zur Produktion von nachwachsenden Rohstoffen, bei der eine vollständige Abfuhr der Biomasse aus dem Betrieb erfolgt (z.B. Verbrennung, BTL), führt Biogas durch die Kohlenstoff- und Nährstoffrückführung mit den Gärresten zur Verbesserung der Nachhaltigkeit der Produktion.

# Einfluss der Fermentation auf den Abbau der Inhaltsstoffe im Substrat

Dr. Gerd Reinhold

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Naumburger Str. 98, 07743 Jena

Tel. (49)3641 683-167 Fax-239

[gerd.reinhold@tll.thueringen.de](mailto:gerd.reinhold@tll.thueringen.de)

[www.thueringen.de/de/tll/](http://www.thueringen.de/de/tll/)

## Erhebung an Thüringer BGA 2004, 2006, 2008, 2012

- technisch-technologische Parameter
- Investition (€/m<sup>3</sup> Faulraum; €/kW)
- Produktionsergebnisse (m<sup>3</sup>/d, kW)
- Betriebszweiganalyse
- Schwachstellen
- **Probenahme aller Eingangssubstrate und der Gärreste (Ablauf des Nachgärbehälters)**
  - Nasschemische Nährstoffanalyse
  - Hygienischer Status (2004, 2010, 2012)



TLL Jena 2013, Reinhold

# Gärrestanfall in Thüringen

(226 Biogasanlagen mit 102 MW)

## Substrateinsatz:

- 2,57 Mio. m<sup>3</sup> flüssiger WD (= 55 % d. Anfalls)
- 0,31 Mio. t feste WD (= 20 % d. Anfalls),
- Feldfrüchte von 40 Tha (= % d. LF bzw. 0,95 Mio. t/a)
  - Mais 20 Tha,
  - Getreide 12,8 Tha,
  - AWS 6,6 Tha,
- 0,165 Mio. t/a Bioabfälle

## Biogasgülleanfall:

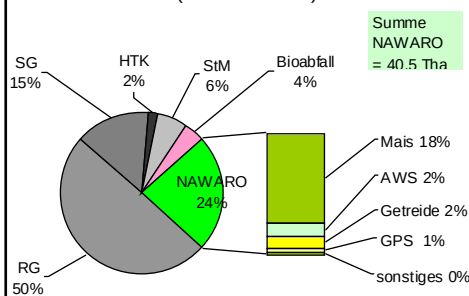
- 3,5 Mio. m<sup>3</sup>/a Biogasgülle = 48 % des WD (7,2 Mio. m<sup>3</sup>)
- WD -Anfall durch Biogas um 750.000 m<sup>3</sup>/a erhöht (=12%)

TLL Jena 2013, Reinhold

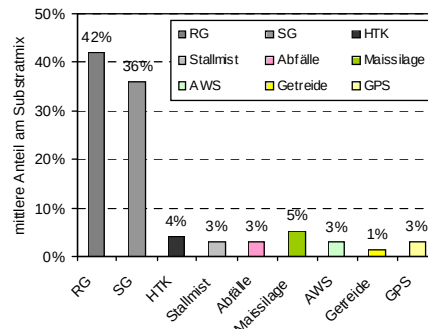
# Substrateinsatz

(massebezogen)

Substrateinsatz in 226 Thüringer BGA  
(Stand 1.1.2012)



Substrateinsatz in den  
125 untersuchten Thüringer BGA

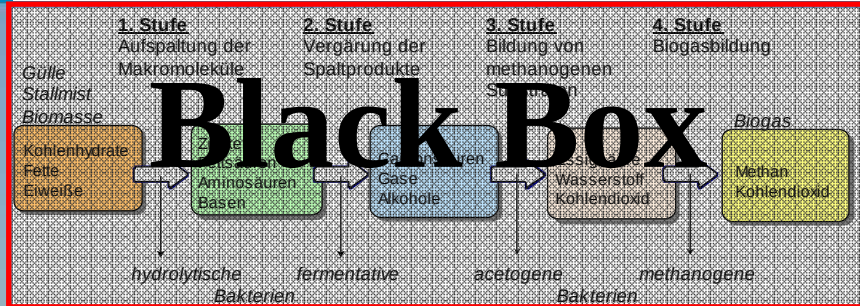


## Substrateinsatz Deutschland Mittelwerte 2010

- 46 % Wirtschaftsdünger
- 45 % NAWARO
- 2 % lw. Reststoffe
- 7 % Bioabfall

TLL Jena 2013, Reinhold

## Beschreibung der Biogasgewinnung (4-Stufen Modell)



### Biologisches System

- kaum direkter Einfluss auf Mikrobiologie möglich
- C-Abbau in Abhängigkeit von Substrat, Verweilzeit und Belastung
- **Stoffeigenschaften Gärrest**
  - aus Gasbildung (C-Abbau) sind TS-Gehalte errechenbar
  - aus dem Substratmix Nährstoffgehalte abschätzen
  - N-Verluste in das Gas und N-Bindungsformen beachten
  - Hygienischer Status der Gärreste prüfen

## Massebilanz einer BGA

| Substrat     | Substrateinsatz       | CH <sub>4</sub> - Ausbeute | Biogas-Ertrag     |
|--------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|
| Einheit      | t/d; TS; oTS          | l/kg oTS % CH <sub>4</sub> | m <sup>3</sup> /d |
| Rindergülle  | 20; 8 %; 80 %         | 209; 55 %                  | 486               |
| Maissilage   | 5; 32 %; 95 %         | 340; 52 %                  | 994               |
| Trockenkot   | 2; 45%; 70%           | 280; 55 %                  | 321               |
| <b>Summe</b> | <b>27; 15 %; 82 %</b> | <b>280; 53,3 %</b>         | <b>1800</b>       |

**Biogas** 53 % CH<sub>4</sub> → 1,30 kg/m<sup>3</sup> \* 1800 m<sup>3</sup>/d = 2,34 t/d

### Substrateinsatz

27 t/d  
(15 % TS, 82 % oTS)



### Gärrestanfall

27-2,34 = 24,7 t/d

$\frac{(0,15 \cdot 27) - 2,34}{24,7} = 7 \text{ \% TS}$

$\frac{(0,15 \cdot 82 \cdot 27) - 2,34}{24,7} = 3,9 \text{ \% oTS}$



Thüringer Landesanstalt  
für Landwirtschaft



## Rechner Biogasgülle

### Anfall, Inhaltsstoffe, Kosten und Wert der Biogasgülle

Kalkulationstabellen "Substrat" und "Kalkulation" ermöglichen eine Ermittlung des Anfalls und der Inhaltsstoffe der in landwirtschaftlichen Biogasanlagen anfallenden Biogasgülle auf Basis der TLL-Richtwerten bei freier Auswahl der Inhaltsstoffe der Substrate und den KTBL Gaserträgen

Hinweise zur Kalkulation

M E N U

Substrat Kalkulation

Bearbeiter: Dr. G. Reinhold

E-Mail: [g.reinhold@jena.tll.de](mailto:g.reinhold@jena.tll.de)

Tele: (0 36 41) 68 31 67

Variante: BGA Musterdorf  
(selbst gewählter Begriff zur Unterscheidung der Varianten)

Versionedatum: 1.9.2012

TLL Jena 2013, Reinhold

## Substratveränderungen Wirkung der Biogaserzeugung

- **TS-Abbau durch die C-Konvertierung**
  - Org. geb. C → Biogas ( $\text{CH}_4$  u.  $\text{CO}_2$ ), Konvertierung NAWARO 80 % WD 30..50%
- **pH-Wert steigt** von 6,5...7 auf 7,0...8,3
- **Ammoniumanteil am Gesamt-N steigt deutlich**
  - WD von 30..50% → 60...80 %,
- **Stickstoff** kann als Ammoniak in das Gas gehen
  - in Abhängigkeit von pH-Wert u. Temp. bis 10 % des  $\text{N}_t$
- Pflanzennährstoffe **P** u. **K** werden nicht beeinflusst
- **Volumenreduzierung**
  - Gülle 1%, Silage 20 %, Getreide 70 %,
- **Geruchsabbau, Hygenisierung**

TLL Jena 2013, Reinhold



## Vergleich der Eigenschaften von Mischsubstrat und Gärrest

| Parameter          | Einheit             | Mischsubstrat      |       | Gärrest |       |
|--------------------|---------------------|--------------------|-------|---------|-------|
|                    |                     | Mittel             | s (%) | Mittel  | s (%) |
| TM                 | %                   | 14,27              | 40    | 6,00    | 31    |
| oTS                | % d. TS             | 81,93              | 6     | 72,34   | 7     |
| pH                 | -                   | 6,42 <sup>1)</sup> | 19    | 7,74    | 4     |
| N <sub>t</sub>     | % d. FM             | 0,51               | 30    | 0,45    | 23    |
| NH <sub>4</sub> -N | % d. N <sub>t</sub> | 41,1               | 37    | 66,8    | 21    |
| C <sub>org</sub>   | % d. TS             | 44,7               | 10    | 40,3    | 16    |
| C/N                | -                   | 1 : 12,3           | 33    | 1 : 5,5 | 29    |

TLL Jena 2013, Reinhold

## Mögliche Ursache für N-Verluste

- Wandlung von NH<sub>4</sub>-N zu NH<sub>3</sub>
- NH<sub>4</sub>-N Übergang in die Gasphase
- Verluste bei Probenahme und Transport ??

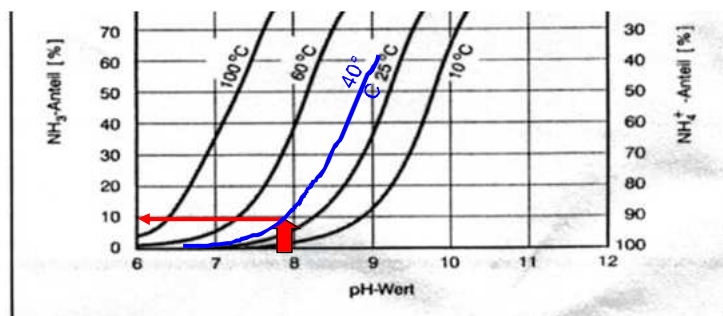


Abbildung 10: Ammonium- Ammoniak- Gleichgewicht von Wasser in Abhängigkeit von pH- Wert und Temperatur<sup>1</sup> MEYER, M 1995

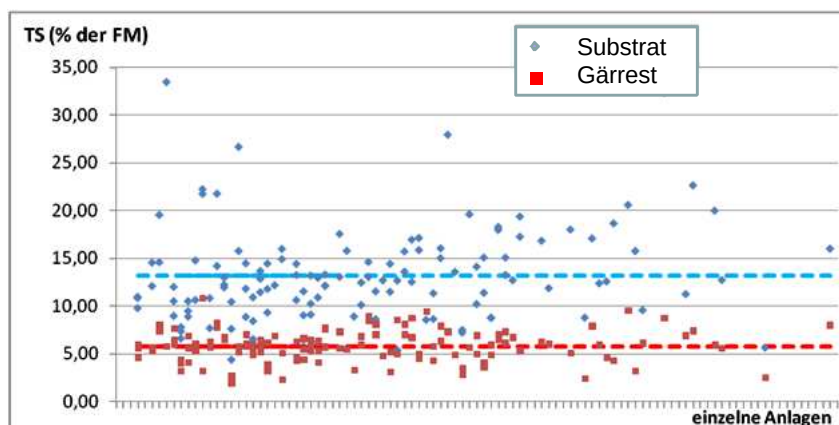
TLL Jena 2013, Reinhold

## Vergleich der Eigenschaften von Mischsubstrat und Gärrest

| Parameter | Einheit           | Mischsubstrat |       | Gärrest      |       |
|-----------|-------------------|---------------|-------|--------------|-------|
|           |                   | Mittel        | s (%) | Mittel       | s (%) |
| P         | % d. TM           | <b>0,78</b>   | 51    | <b>1,42</b>  | 31    |
| K         | % d. TM           | <b>2,44</b>   | 31    | <b>5,39</b>  | 31    |
| S         | mg/kg TM          | <b>5.429</b>  | 33    | <b>7.267</b> | 61    |
| S         | kg/m <sup>3</sup> | <b>0,55</b>   | 31    | <b>0,42</b>  | 70    |
| Zn        | mg/kg TM          | <b>284</b>    | 211   | <b>561</b>   | 113   |
| Cu        | mg/kg TM          | <b>158</b>    | 209   | <b>393</b>   | 92    |

TLL Jena 2013, Reinhold

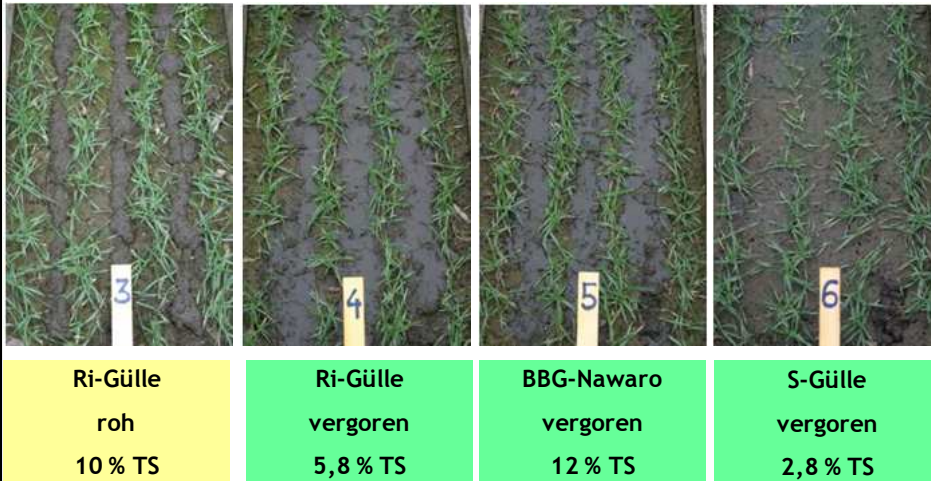
## Wirkung der Fermentation TS - Abbau



Gülle wird dünner und sickert schneller ein  
→ geringere N-Verluste

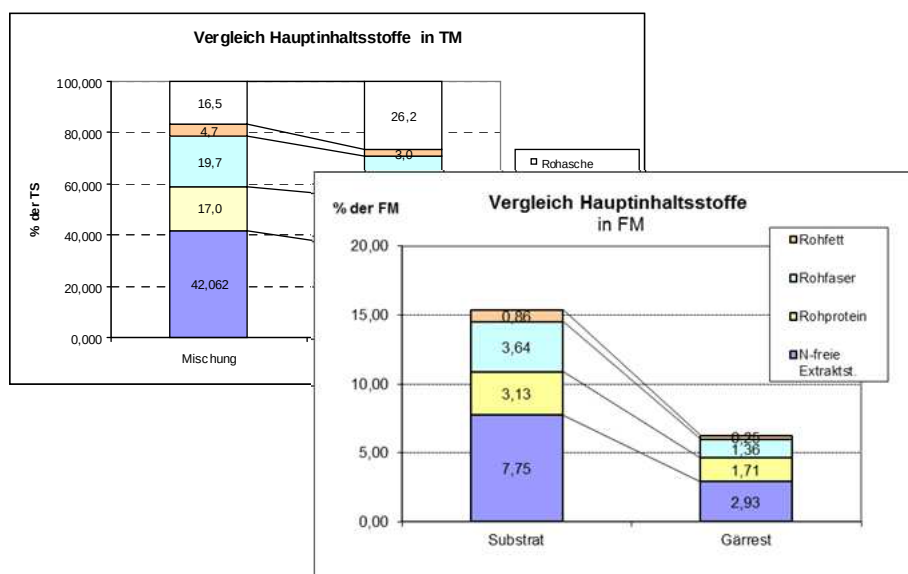
TLL Jena 2013, Reinhold

## Gülle- und Gärrestdüngung im Mikroparzellen-Versuch Jena-Zwätzen, 16.03.2009 Schröder 2012



13

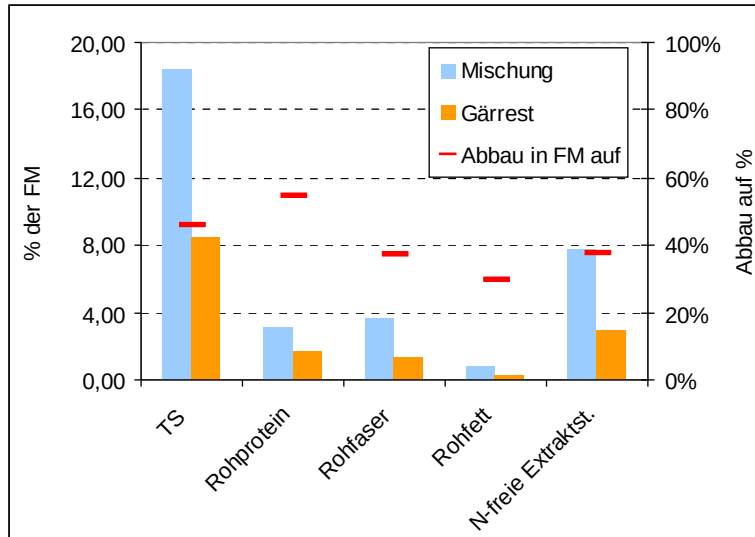
## Verhältnis der Hauptbestandteile



TLL Jena 2013, Reinhold

## Abbau der Inhaltsstoffe (% FM)

Monitoring 2012, n=46



TLL Jena 2013. Reinhold

## Humuswirkung

### These: Biogas = Raubbau am Boden

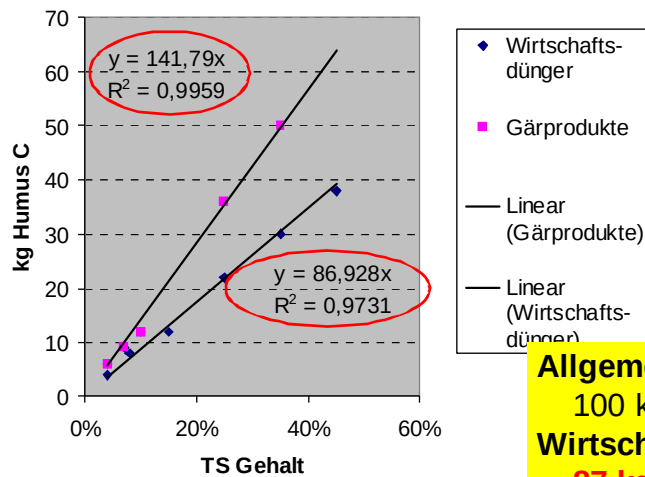
- Anbau von starken Humuszehrn (Mais)
  - der aber nicht mehr gehackt wird
- Reduzierung des TS-Gehaltes der Gülle
  - aber nur der leicht abbaubaren oTS-Anteile
- Verringerung der Kohlenstoffrückführung in den Boden
  - aber Teile mit der höheren Humuswirksamkeit
  - BGA = Stallmistrotte bzw. Kompostierung

### •Weitere Kritiken an der Gärrestverwertung

- Förderung der Bodenversauerung
- „Innere Bodenerosion“, Disharmonien am Sorptionskomplex
- P-Festlegung im Boden nach Fe-Einsatz in Biogasanlage

TLL Jena 2013. Reinhold

## VDLUFA Standpunkt (2004)



### Allgemein:

100 kg Humus-C / t TS

### Wirtschaftsdünger:

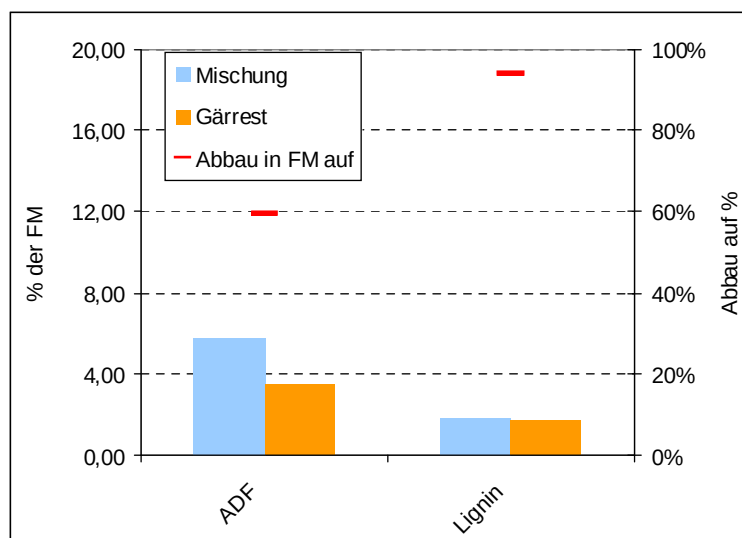
87 kg Humus-C / t TS

### Gärprodukte:

142 kg Humus-C / t TS

TLL Jena 2013, Reinhold

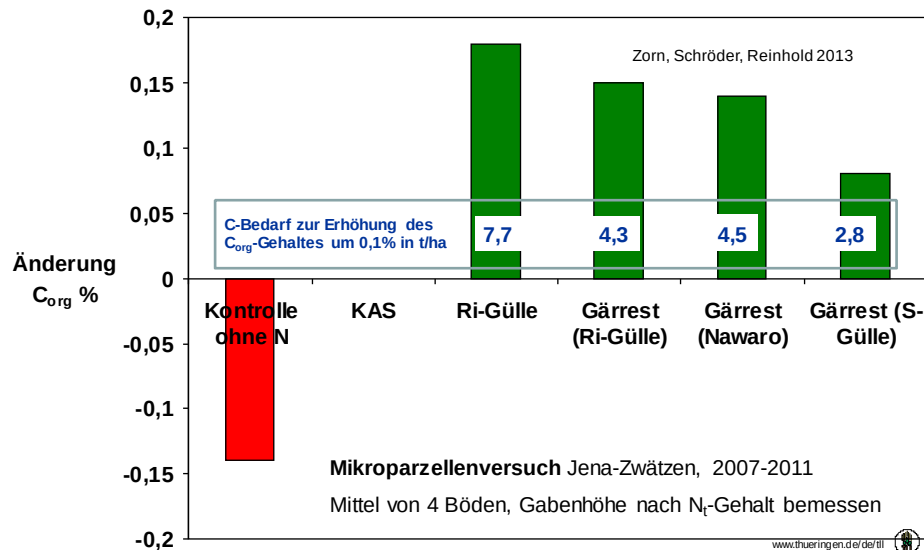
## Humuswirksame Inhaltsstoffe



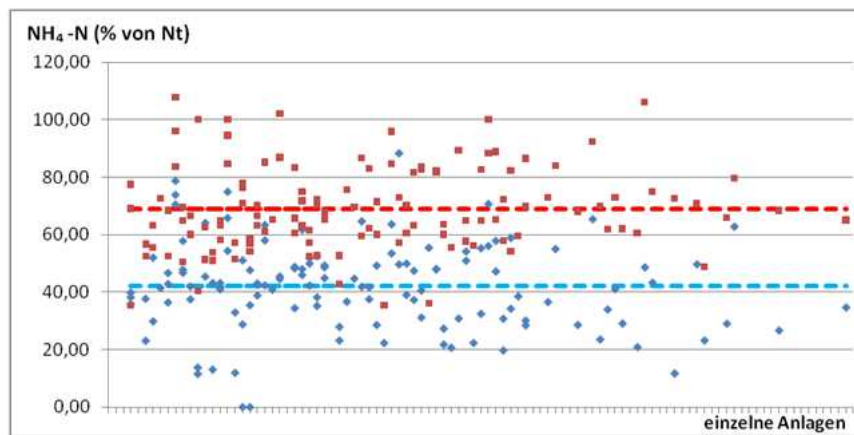
TLL Jena 2013, Reinhold

## Änderung des $C_{org}$ -Gehaltes durch

differenzierte Düngung 2007 – 2011 (Mikroparzellenversuch Jena-Zwätzen, Mittel von 4 Böden)



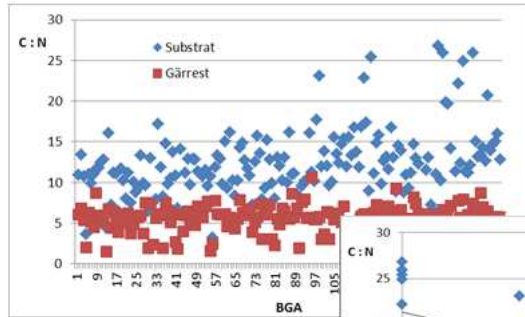
## Stickstoffbindungsformen



$NH_4$ -N Anteil steigt → Gülle wirkt schneller  
→ aber Verluste möglich

TLL Jena 2013, Reinhold

# Wirkung der Fermentation C:N - Verhältnis

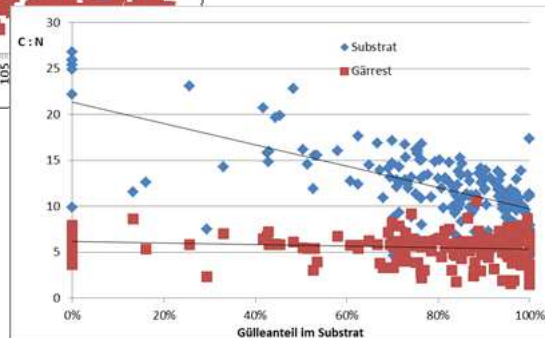


Substrat

C: N = 5 ... 25 : 1

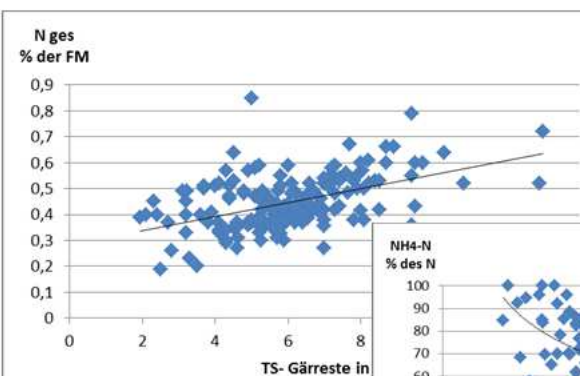
Gärrest

C: N = 3 ... 8 : 1



TLL Jena 2013, Reinhold

# Stickstoffgehalte und N-Bindungs- formen im Gärrest

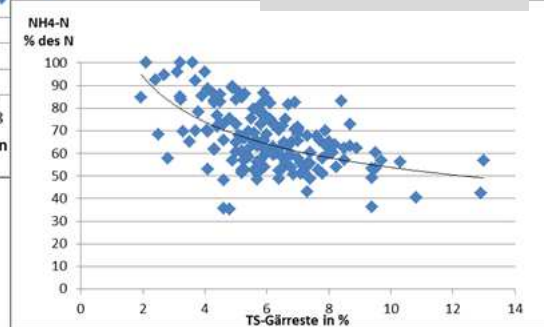


Stickstoffgehalt

TS ↑ → N<sub>ges</sub> ↑

Ammoniumanteil

TS ↑ → NH<sub>4</sub>-N ↓



TLL Jena 2013, Reinhold

## Hygienische Aspekte

### Biogasanlagen

→ Vermehrung von Krankheitskeimen, da:

- Temperatur 38 ...42 °C
- Lange Verweilzeit → ungehindertes Wachstum

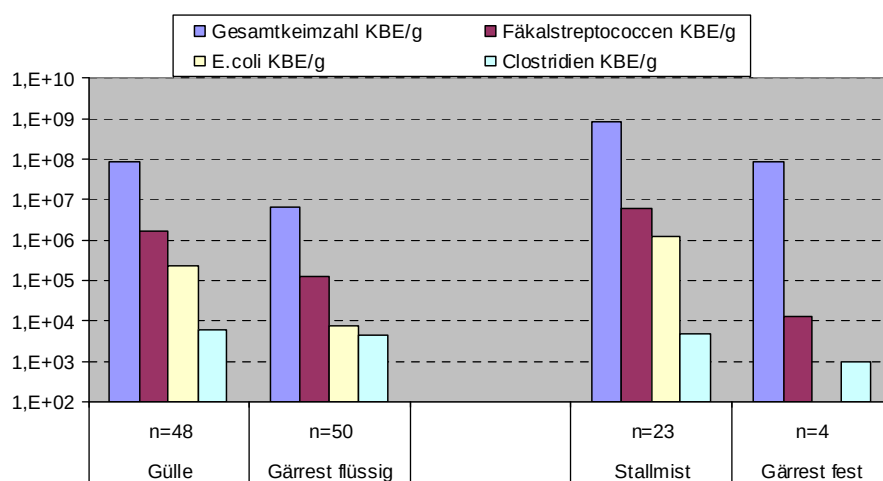
→ Hygienisches Risiko, da:

- optimale Vermehrungsbedingungen ?

aber alle MO kämpfen um das gleiche Futter

TLL Jena 2013, Reinhold

## Hygienische Wirkungen (Erhebung 2012)



TLL Jena 2013, Reinhold



# Hygienische Wirkungen

Erhebung 2012

Nachweishäufigkeit der Clostridienarten

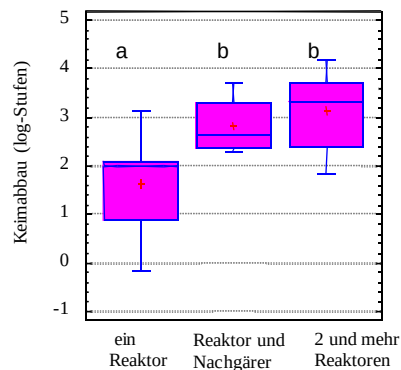
| Substratart                    | Wirtschafts-<br>dünger | Gärrest |
|--------------------------------|------------------------|---------|
| n =                            | 78                     | 55      |
| <i>Costridium baratii</i>      | 3                      | 2       |
| <i>Costridium butyricum</i>    | 5                      | 3       |
| <i>Costridium difficile</i>    | 2                      | 4       |
| <i>Costridium glycolicum</i>   | 1                      | -       |
| <i>Costridium hastiforme</i>   | 1                      | -       |
| <i>Costridium histolyticum</i> | -                      | 1       |
| <i>Costridium innocuum</i>     | 1                      | -       |
| <i>Costridium perfringens</i>  | 49                     | 28      |
| <i>Costridium ramosum</i>      | -                      | 1       |
| <i>Costridium sporogenes</i>   | 1                      | -       |
| <i>Costridium subterminale</i> | -                      | 1       |
| <i>Costridium tertium</i>      | 15                     | 15      |

Typische Zusammensetzung  
Kein Botulismus nachweisbar

TLL Jena 2013, Reinhold

Erhebung 2004

Gesamtcoliforme

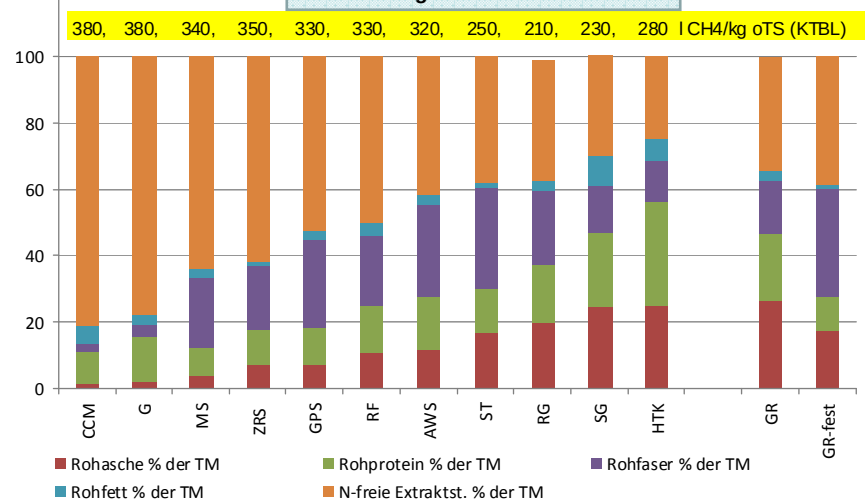


Mehrstufigkeit führt signifikant zu  
stärkerer Keimreduktion

# Inhaltsstoffverteilung und Gasertrag

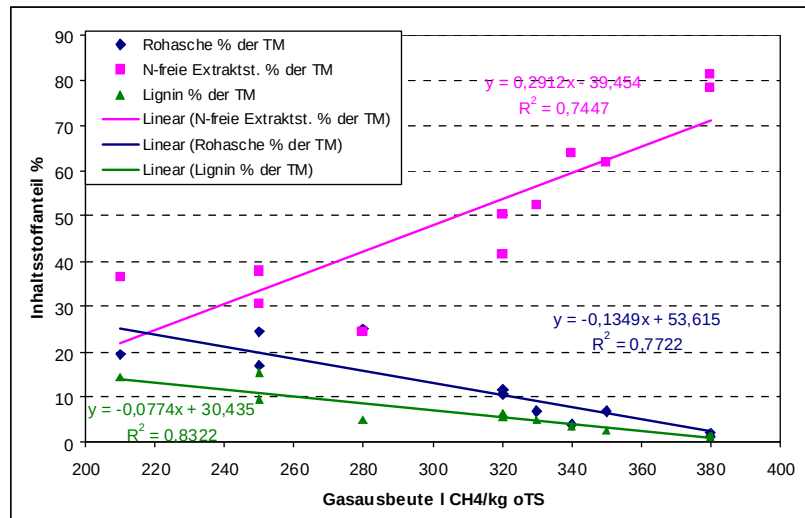
% der TM

Gaserträge nach KTBL Heft 88



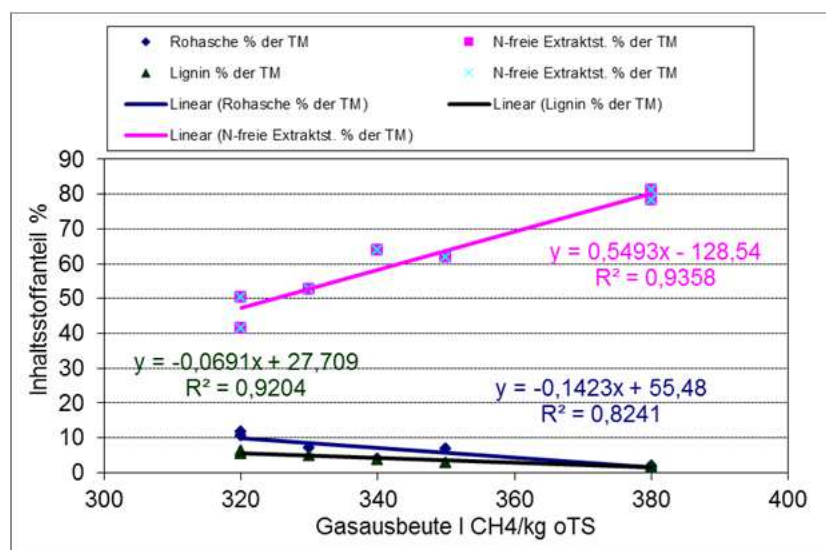
TLL Jena 2013, Reinhold

## Inhaltsstoffe und Gasausbeute - alle Substrate



TLL Jena 2013, Reinhold

## Inhaltsstoffe und Gasausbeute - nur NAWARO



TLL Jena 2013, Reinhold

# Fazit

- Biogaserzeugung führt zu steigenden WD-Anfall
- Nachgewiesene N-Verluste können durch Ammoniakübergang ins Biogas verursacht sein
- Steigende  $\text{NH}_4$ -N-Anteil der Gärreste können zu Mehrerträgen, aber auch zu N-Verlusten führen
- Steigende TS-Gehalte im Gärrest führen tendenziell zu steigenden Nt-Gehalten und sinkenden  $\text{NH}_4$ -N-Anteil
- Die organische Substanz wird auf 40 bis 60 % abgebaut, ohne das Lignin angegriffen wird, was auf eine verbesserte Humuswirkung schließen lässt
- Gärrest (mesophil) sind hygienisch wie Gülle einzustufen, auch wenn eine Verbesserung des hygienischen Status messbar ist
- Der spezifische Gasertrag von NAWARO`s korreliert mit steigenden NfE, sinkenden Asche- und Ligninanteil.