

# HTC – Neuentwicklungen und Umsetzung

## NARoTEC 2011

---

### Arbeiten zur Hydrothermalen Carbonisierung des Fachgebietes Abfallwirtschaft und Deponietechnik

Professor Dr.-Ing. Hans-Günter Ramke

Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Höxter  
Fachgebiet Abfallwirtschaft und Deponietechnik

**Hochschule Ostwestfalen-Lippe**  
*University of Applied Sciences*



Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NARoTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 1

## Hydrothermale Carbonisierung

### Übersicht

---

- Einführung
- Grundlegende Untersuchungen zur HTC
- Analyse der HTC-Biokohle
- Flüssige und gasförmige Phase
- Stoff- und Energiebilanzen
- Energetische Nutzung der HTC-Biokohle
- Landbauliche Nutzung der HTC-Biokohle
- Fazit

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NARoTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 2

# Einführung

## Entwicklung des HTC-Verfahrens

---

- Friedrich Bergius
  - 1913
  - Beschreibung der **elementaren Prozesse**
- Professor Dr. Markus Antonietti
  - seit 2004
  - **MPI GoIm**, Kolloid- und Grenzflächenforschung
  - „Wiederentdeckung“ und Grundlagenuntersuchungen

# Einführung

## Grundlagen der HTC - Teil 1

---

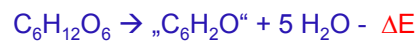
- Hydrothermale Carbonisierung
  - „wässrige Verkohlung bei erhöhter Temperatur“
  - Umwandlung von Kohlehydraten
  - Dehydratisierung (Wasserabspaltung)
  - Druckgefäß mit pflanzlichem Material
  - einige Stunden Erhitzen
  - Produkte: „**humusähnliche**“ Substanzen  
poröse „**Braunkohlekügelchen**“

## Einführung

### Grundlagen der HTC - Teil 2

---

- Reaktionsgleichung



- Prozessparameter

- 180 - 220 °C, in Wasser
- Druck 15 - 35 bar
- für 4 bis 16 Stunden

## Einführung

### Abfallwirtschaftliche Rahmenbedingungen

---

- Veranlassung

- „Paradigmenwechsel“ in der Abfallwirtschaft
- energetische statt stoffliche Verwertung
- Kompostierung relativ teuer, wenig Erlöse
- Vergärung nur mäßig effizient

- Konsequenz

- andere Wege zur energetischen Nutzung von Bioabfall
- effizienter und kostengünstiger

## Einführung

### Ausgangsstoffe und Produkte

---

- Ausgangsstoffe der HTC
  - **Siedlungsabfälle**, Grünabfälle, Strauchschnitt
  - landwirtschaftliche Reststoffe
  - organische Abfälle der Industrie
- Produkte der HTC
  - **Brennstoff** („Biokohle“, ähnlich Braunkohle)
  - **Bodenverbesserungsmittel** („Humus“)
  - „Kohlenstoffspeicher“

## Einführung

### Voraussetzungen des Fachgebietes

---

- Bisherige Arbeiten des Fachgebiets
  - **Abfallprobennahme und -analytik**
  - Untersuchung des **Abbauverhaltens**
  - Optimierung von Biogasanlagen
- Laborausstattung
  - Probenaufbereitung
  - Feststoffanalytik
  - **biologische Testverfahren**
  - Auslaugtests

## Einführung

### Tätigkeiten der Arbeitsgruppe

---

- Arbeiten auf dem Gebiet der HTC
  - seit 2007
  - DBU-Projekt zur Bioabfall-Carbonisierung (2007 – 2009)
  - BMBF-Projekt zur **energetischen Nutzung** von HTC-Biokohle (seit 2009)
  - DBU-Projekt zur **landbaulichen Nutzung** von HTC-Biokohle (seit 2009)
  - Industriekooperation mit der KELAG/TFC (seit 2011)
  - mehrere Kleinprojekte zur Carbonisierung
  - bis 06/2011 **13 Projekt- und Bachelorarbeiten**

## Grundlegende Untersuchungen

### Projektübersicht - Teil 1

---

- Titel  
Machbarkeitsstudie zur Energiegewinnung aus organischen Siedlungsabfällen durch hydrothermale Carbonisierung
- Projektträger  
**Deutsche Bundesstiftung Umwelt**  
AZ: 25604
- Laufzeit  
Juli 2007 - Juni 2009

## Grundlegende Untersuchungen

### Ziele des Vorhaben

---

- Untersuchungen von organischen Abfällen
  - **Bioabfälle** aus der Grünen Tonne und **Grünabfälle**
  - andere **organische Abfälle** (Industrie und Landwirtschaft)
  - Klärschlamm und Gärreste
- Umsetzung der HTC in den technischen Maßstab
  - Erfassung der **Prozessparameter** (p, T °C, Energie)
  - Variation **Versuchsbedingungen** (TS, T °C, Dauer, Prozess)
  - **Massen- und Kohlenstoffbilanzen**
  - Energiebilanzen

## Grundlegende Untersuchungen

### Projektbeteiligte

---

- Federführung, HTC-Versuche und Abfallwirtschaft  
Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke, **HS Ostwestfalen-Lippe**, Höxter
- Grundlagenwissenschaftliche Begleitung  
Prof. Dr. M. Antonietti, Dipl.-Ing. D. Blöhse, **MPI Golm**
- Verfahrenstechnische Fragestellungen  
Dr.-Ing. H.-J. Lehmann, **Beratender Ingenieur**, Berlin
- Abwassertechnische Fragestellungen  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Fettig, **HS Ostwestfalen-Lippe**, Höxter

## Grundlegende Untersuchungen Versuchseinrichtungen - Teil 1



Autoklav, Volumen 25 L,  
mit Steuerung

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 13

## Grundlegende Untersuchungen Versuchseinrichtungen - Teil 2



Autoklav -  
Steuerung und  
Datenanzeige

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 14

## Grundlegende Untersuchungen Versuchseinrichtungen - Teil 3

Feststoffanalytik



Arbeitsplätze zur  
Elementaranalyse und  
Heizwertbestimmung

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 15

## Grundlegende Untersuchungen Versuchseinrichtungen - Teil 4



Bestimmung des Gasbildungspotentials  
und der Atmungsaktivität

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 16



## Grundlegende Untersuchungen

### Untersuchungsprogramm - Teil 1

---

- Übersicht
  - Aufzeichnung der **Prozessparameter**
  - **Massen-, Kohlenstoff-** und Energiebilanzen
  - Carbonisierung ausgewählter Stoffe (> 150 HTC-Versuche)
- Analysen
  - Gasbildungspotential
  - Eigenschaften der „HTC-Biokohle“
  - Untersuchungen der flüssigen Phase
  - Untersuchungen des Gasphase

## Grundlegende Untersuchungen

### Untersuchungsprogramm - Teil 2

---

- Arbeitsphasen
  - qualitative und quantitative Voruntersuchungen
  - **Prozessoptimierung**
  - Untersuchung diverser **Input-Materialien**
- Variation der Versuchsbedingungen
  - Trockensubstanzgehalt
  - **Temperaturen und Versuchsdauer**
  - Katalysatoren
  - Prozessführung

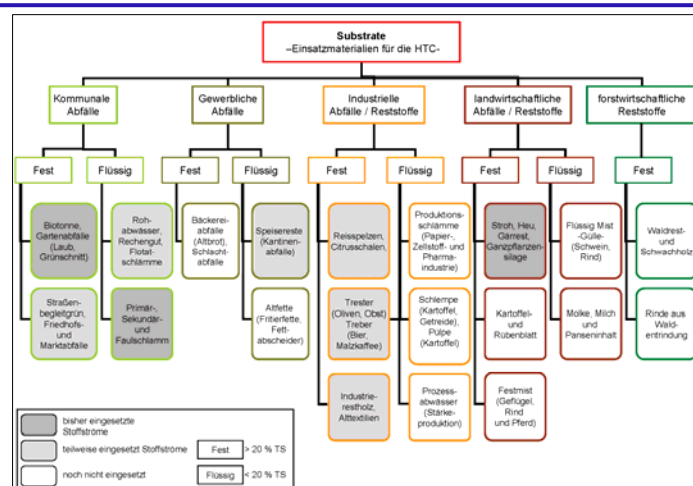
# Grundlegende Untersuchungen

## Input-Materialien - Teil 1

- Einsatzstoffe (organisch)
  - **Standardmaterialien**
    - Maissilage/Rübenschnitzel
    - Rübenschnitzel/Stroh/Gärrest
  - Siedlungsabfälle
    - **Bioabfall** (Grüne Tonne)
    - **Grünabfälle**, Strauchschnitt
  - Industrie, Landwirtschaft
    - Treber, Holzspäne, Stroh
  - Schlämme
    - Gärreste, Klärschlämme

# Grundlegende Untersuchungen

## Input-Materialien - Teil 2



## Grundlegende Untersuchungen Input-Materialien - Teil 3



Bioabfall –  
Input- und Outputmaterial

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 21

## Grundlegende Untersuchungen Input-Materialien - Teil 4



Grünschnitt –  
Input- und Outputmaterial

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 22

## Grundlegende Untersuchungen Input-Materialien - Teil 5



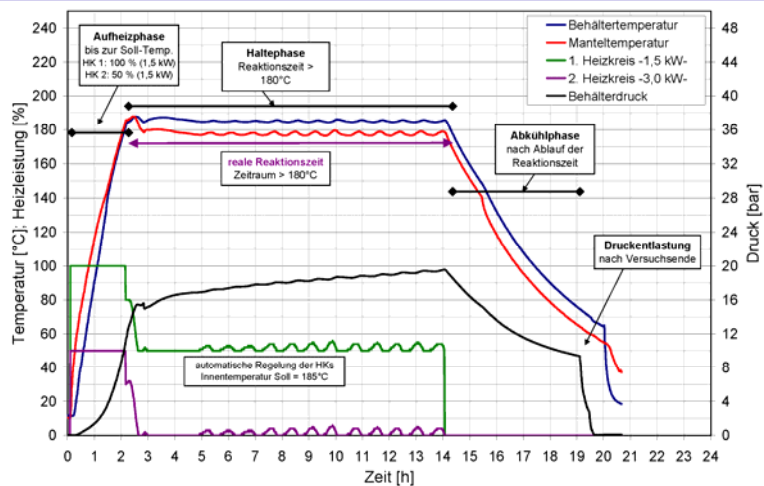
Rasenschnitt –  
Input- und Outputmaterial

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 23

## Grundlegende Untersuchungen Prozessvarianten - Standard 1



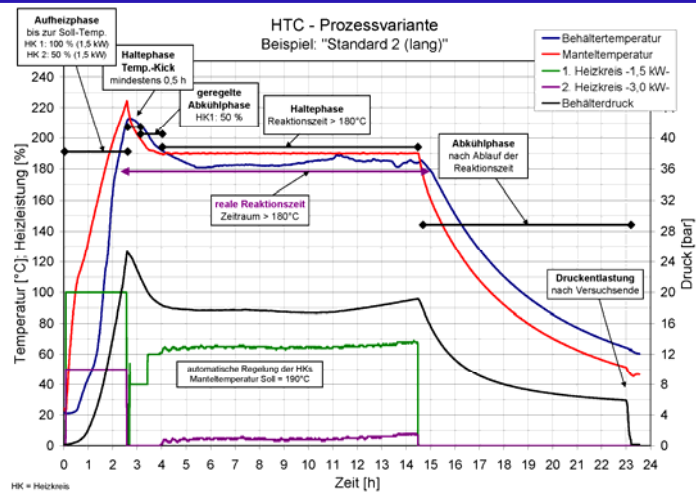
Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 24

# Grundlegende Untersuchungen

## Prozessvarianten - Standard 2



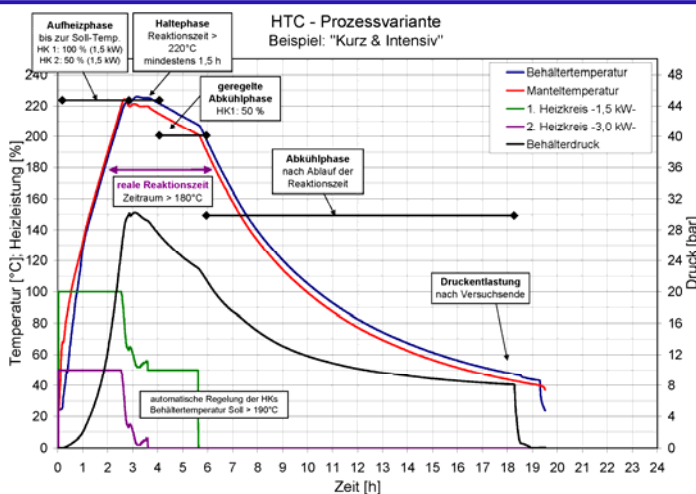
Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 25

# Grundlegende Untersuchungen

## Prozessvarianten - „kurz & intensiv“



Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 26

## Analyse der HTC-Biokohle

### Charakteristika HTC-Biokohle - Teil 1

---

- Output-Material - getrocknet
  - Farbe
    - braun
  - Struktur
    - in Vergrößerung **porös**
    - **Pflanzenstrukturen** erkennbar
  - Schüttdichte
    - niedrig
  - Risiken
    - **Staubexplosionen**
    - **Selbstentzündung**

## Analyse der HTC-Biokohle

### Charakteristika HTC-Biokohle - Teil 2

---



Getrocknete HTC-Biokohle aus dem Standard I (Rübenschrot und Maissilage)

## Analyse der HTC-Biokohle

### Untersuchungsprogramm

---

- Untersuchungsparameter
  - Wassergehalt
  - Trocknung bei 105 °C
  - Glühverlust
  - Glühen bei 550 °C
  - Elementgehalte
    - CHN: **Elementaranalyse**
    - $O = GV - (C_{org} + H + N)$
  - organischer Kohlenstoff
  - TOC = TC – TIC (**SCHEIBLER**)
  - Brennwert
  - adiabatisches **Kalorimeter**
  - Gasbildungspotential
  - GB<sub>21</sub> bzw. **VDI 4630**

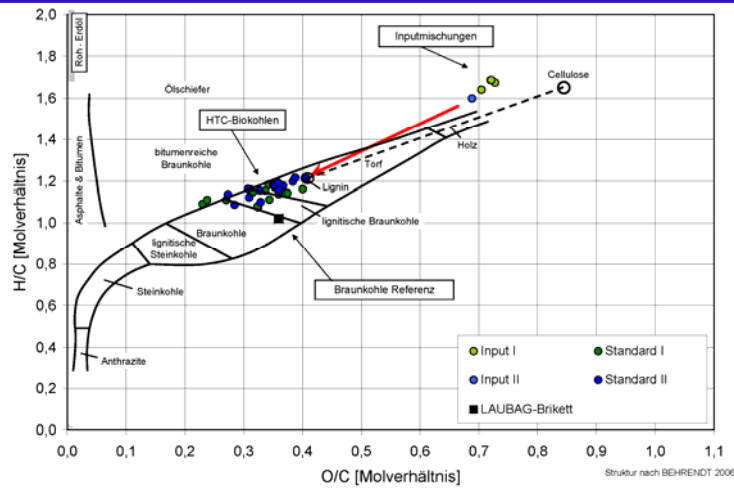
## Analyse der HTC-Biokohle

### Probenaufbereitung

---

- Aufbereitungsschritte für die Feststoffanalytik
  - Trocknung bei 105 °C
  - Zerkleinerung 5000 g **Shredder** < 10 mm
  - Zerkleinerung 500 g **Schneidmühle** < 1 mm
  - Zerkleinerung 50 g **Rotor-Schnellmühle** < 0,1 mm

## Analyse der HTC-Biokohle Ausmaß der Carbonisierung - Inkohlungsdiagramm 1

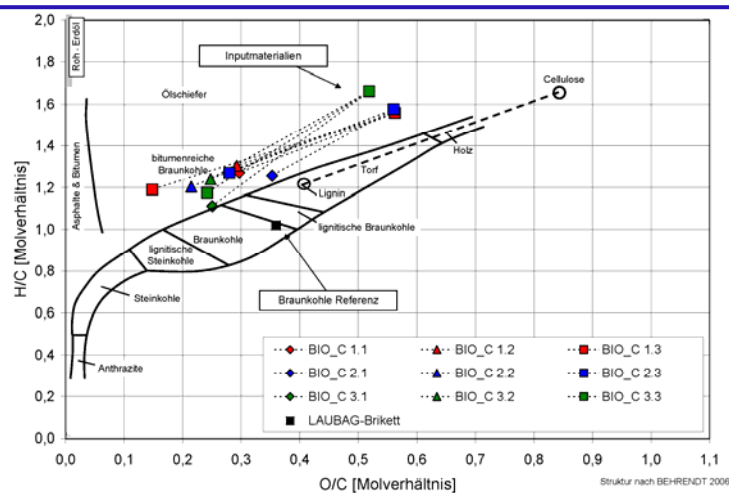


Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 31

## Analyse der HTC-Biokohle Ausmaß der Carbonisierung - Inkohlungsdiagramm 2



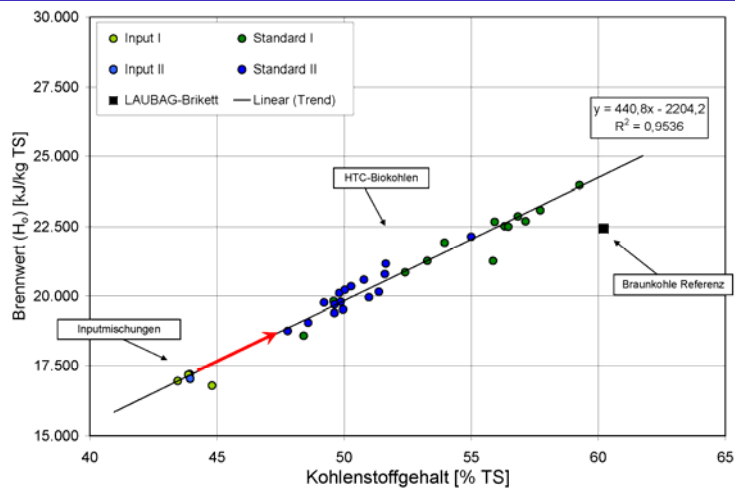
Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 32



## Analyse der HTC-Biokohle Brennstoffeigenschaften - C-H<sub>o</sub>-Diagramm 1

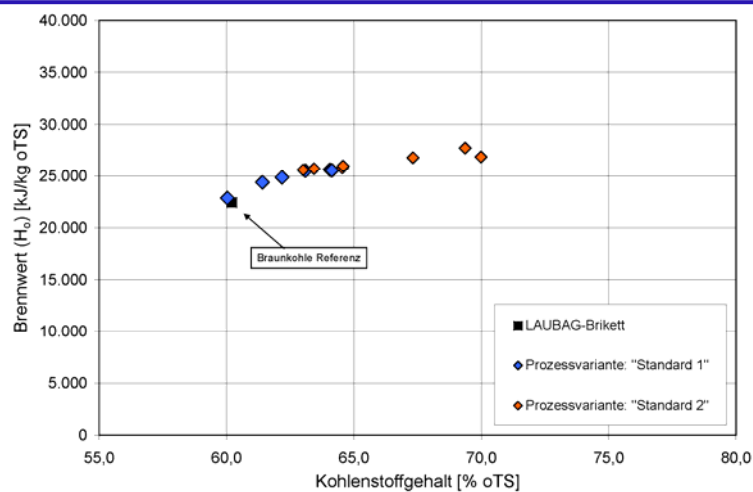


Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NARoTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 33

## Analyse der HTC-Biokohle Brennstoffeigenschaften - C-H<sub>o</sub>-Diagramm 2

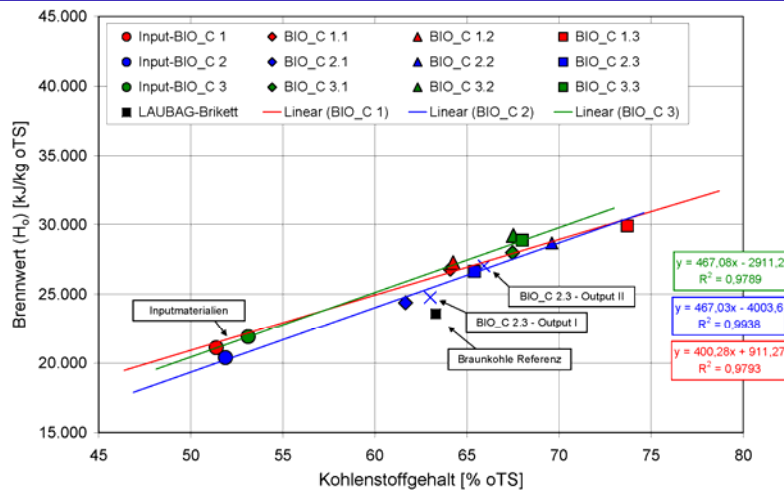


Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NARoTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 34

## Analyse der HTC-Biokohle Brennstoffeigenschaften - C-H<sub>o</sub>-Diagramm 3

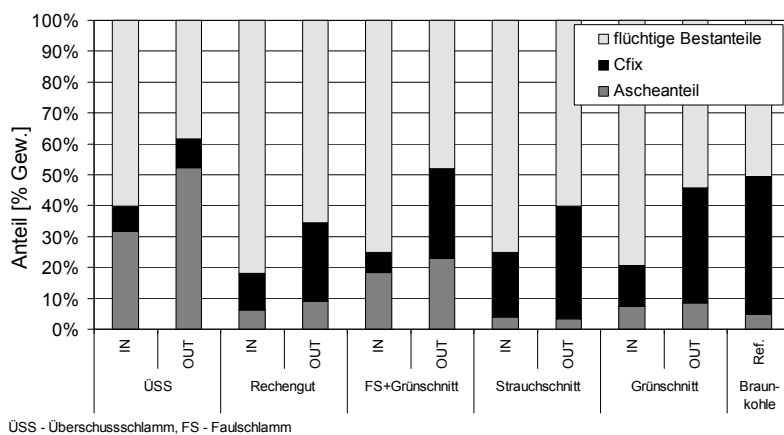


Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 35

## Analyse der HTC-Biokohle Proximatanalyse (wasserfrei)



Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 36

## Analyse der HTC-Biokohle

### Bewertung der „Biokohle“

---

#### - Eigenschaften

Die erzeugten HTC-Produkte („HTC-Biokohlen“) sind in der Regel hinsichtlich ihrer **Hauptbestandteile** und **Brennwerte** als braunkohleartig zu bezeichnen.

#### - Kohlenstoffeffizienz

Die **Kohlenstoffeffizienz** der HTC, also das Ausmaß des Verbleibs des **Kohlenstoffs in der festen Phase** (den HTC-Biokohlen), hängt von den Substraten, den Versuchsbedingungen, den nachfolgenden Entwässerungsverfahren sowie den durch den Einsatzzweck definierten Anforderungen ab.

## Analyse der HTC-Biokohle

### Fest-Flüssig-Separation

---



Methode:

Fest-Flüssig-  
Separation  
mittels  
Saugfiltration

**Wassergehalte**  
HTC-Bioabfälle:

55 – 70 %

## Analyse der HTC-Biokohle Entwässerungsversuch - 1



- Zylinder  $\varnothing$  8,0 cm
- Druck ca. 15 bar
- Füllhöhe 3,1 cm
- Probenmasse ca. 160 g



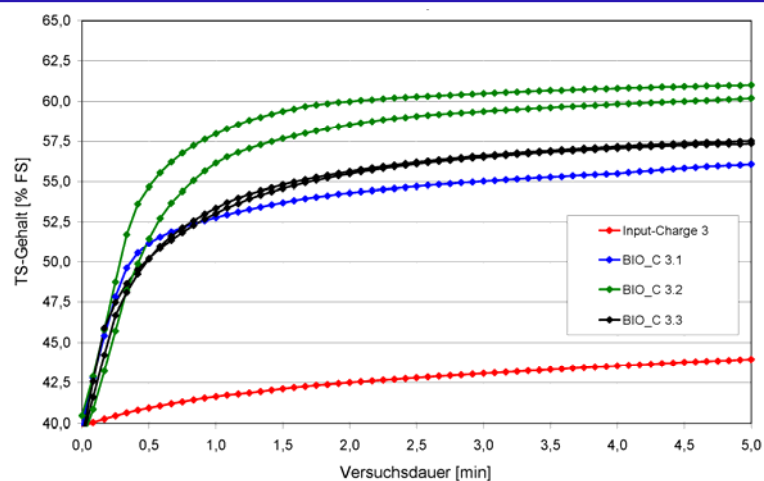
### Versuchsaufbau zur Bestimmung des Entwässerungsverhaltens

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 39

## Analyse der HTC-Biokohle Entwässerungsversuch - 2



Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 40

## Analyse der HTC-Biokohle

### Entwässerungsversuch - 3

---



## Flüssige und gasförmige Phase

### Vorbemerkung

---

Untersuchungen der flüssigen Phase  
Untersuchungen zur aeroben Abbaubarkeit

Professor Dr.-Ing. Joachim Fettig  
Fachgebiet Wassertechnologie  
Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Höxter

## Flüssige und gasförmige Phase

### Analyse der flüssigen Phase - 1

---

#### - Eigenschaften des Filtrats

- pH-Wert:	3,7 – 7,2	(4,05 [-])
- BSB:	10.000 – 42.000 mg/l	(28.500 mg/l)
- TOC:	9.000 – 36.100 mg/l	(16.400 mg/l)
- CSB:	24.200 – 68.500 mg/l	(46.850 mg/l)
- NO <sub>3</sub> -N:	2,9 – 58 mg/l	(16,4 mg/l)
- NH <sub>4</sub> -N:	3,4 – 4,1 mg/l	(3,8 mg/l)
- PO <sub>4</sub> -P:	0,2 – 47 (550) mg/l	(2,4 mg/l)

(Klammerwerte: Median)

## Flüssige und gasförmige Phase

### Analyse der flüssigen Phase - 2

---

#### - Einschätzung der Werte

- Filtrate sind überwiegend **sauer**
- die Salzgehalte sind meist gering
- abfiltrierbare Stoffe überwiegend organisch
- **Abwasserbelastung** vorwiegend **organisch**
- hohes BSB/CSB-Verhältnis zeigt **gute Abbaubarkeit**
- niedrige CSB/TOC-Relation: **hoher O<sub>2</sub>-Gehalt** in den **Molekülen**
- Nährstoffgehalte meistens gering

## Flüssige und gasförmige Phase Analyse der flüssigen Phase - 3

- GC-MS Übersichtsanalyse (Pentan-Extrakt)
  - **Standard-Filtrat** vor und nach biologischer Behandlung
  - Phthalate, Pyrazine, Phenole
  - weitere cyclische sauerstoffhaltige Verbindungen
  - nicht identifizierte aliphatische und aromatische KW
  - nach biologischer Behandlung:  
diese Stoffe sind zu 98 % abgebaut

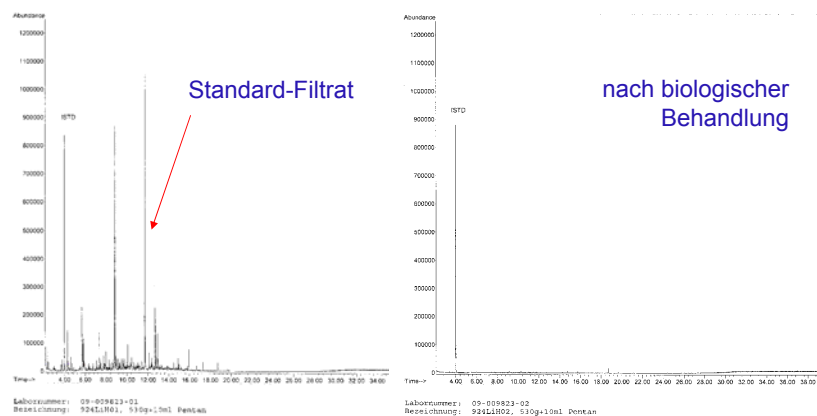
Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 45

## Flüssige und gasförmige Phase Analyse der flüssigen Phase - 4

### GC-MS Übersichtsanalyse

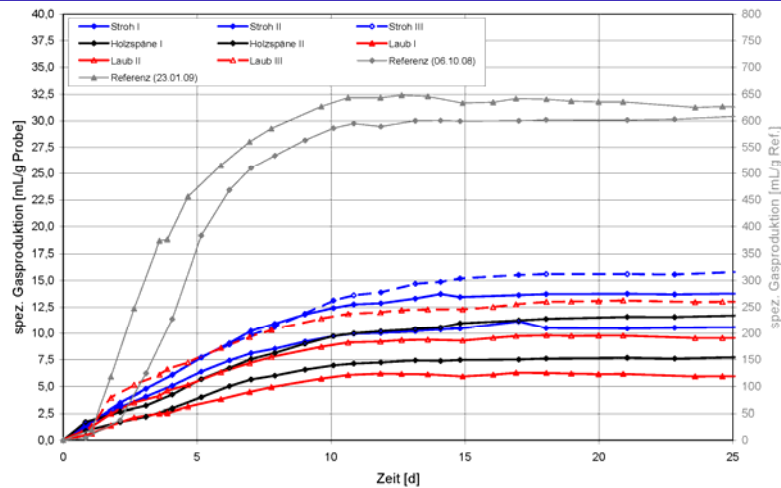


Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 46

## Flüssige und gasförmige Phase Anaerobe Abbaubarkeit der flüssigen Phase



Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 47

## Flüssige und gasförmige Phase Gasbildung und Hauptkomponenten

- Gasvolumen bei Bioabfällen
  - absolut: 90 - 190 NL/Versuch
  - spezifisch: 40 - 50 NL/kg TS Input
- Gaszusammensetzung bei Bioabfällen
  - dominierend CO<sub>2</sub> (ca. 90 %)
  - geringe Gehalte (1 - 4 %) von Kohlenwasserstoffen
  - Restgehalte von N<sub>2</sub> (aus der Luft)

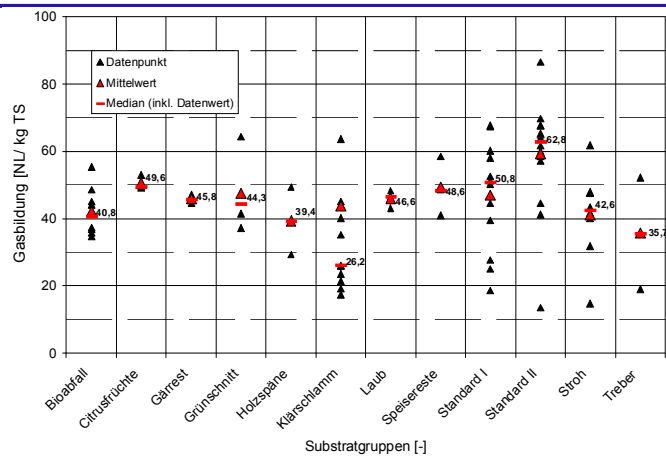
Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 48



## Flüssige und gasförmige Phase Spezifische Gasbildung

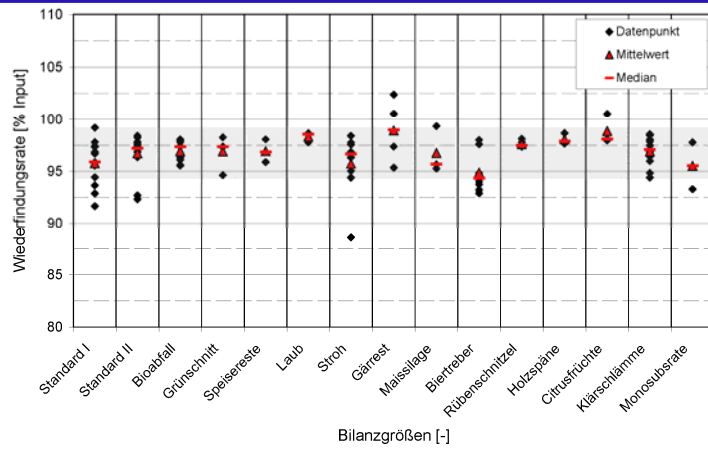


Spezifische Gasbildung verschiedener Substratgruppen

## Stoff- und Energiebilanzen Massenbilanzen - Teil 1

- Methode
  - Bilanzierung Gesamtmasse Input und Output
  - Bestimmung Massen und Wassergehalte
- Resultate
  - **Wiederfindungsrate** ca. 97 %
  - bei 15 – 20 kg Input  $\approx$  450 – 600 g/Versuch
  - Benetzungs-, Verdunstungs-, Kleckerverluste
  - Trockenmasseverluste höher, Zunahme Wassermassen
  - **Dehydratisierung** und **Decarboxylierung**

## Stoff- und Energiebilanzen Massenbilanzen - Teil 2



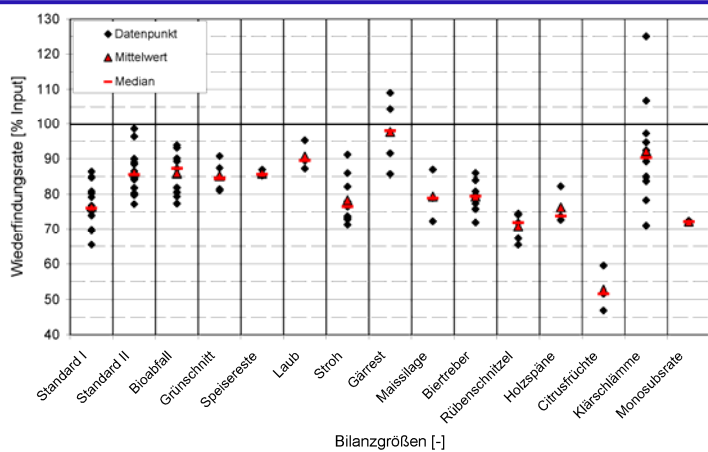
### Massenbilanzen verschiedener Substratgruppen

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 51

## Stoff- und Energiebilanzen Massenbilanzen - Teil 3



### Trockenmassebilanzen verschiedener Substratgruppen

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 52

## Stoff- und Energiebilanzen Kohlenstoffbilanz - Teil 1

---

### - Methode

- Masse  $C_{\text{fest}}$ 
  - **Elementaranalyse** nach Trocknung
  - Carbonatgehalte vernachlässigbar
- Masse  $C_{\text{flüssig}}$ 
  - Bestimmung des **TOC**
  - gelöste Carbonate vernachlässigbar
- Masse  $C_{\text{gas}}$ 
  - Bestimmung **CH<sub>4</sub>** und **CO<sub>2</sub>**
  - Normvolumen des Prozessgases

## Stoff- und Energiebilanzen Kohlenstoffbilanz - Teil 2

---

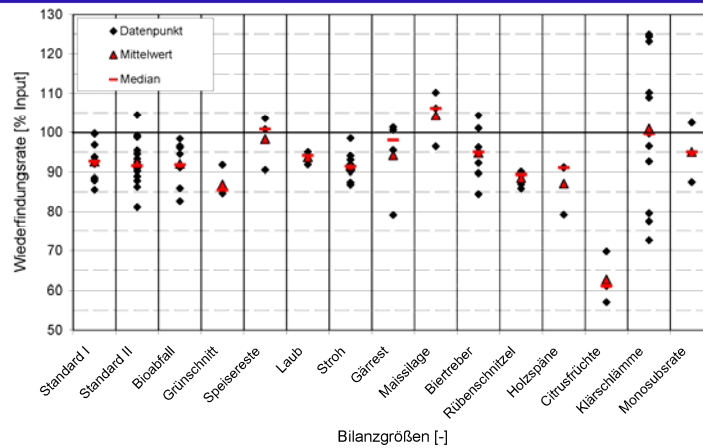
### - Probleme

- **Wiederfindungsraten** Kohlenstoff ca. 93 %
- **Bandbreite** von 88 – 98 %

### - Ursachen

- geringere Kohlenstoffmasse weniger Fehler tolerant
- großer Einfluss nicht repräsentativer Probennahme
- Ablagerung von Kohlenstoff an Autoklavenwandung
- Bestimmung von KW als Methan (rechnerisch: 2 C)

## Stoff- und Energiebilanzen Kohlenstoffbilanz - Teil 3



### Gesamtübersicht der Kohlenstoffmassebilanzen

## Stoff- und Energiebilanzen Kohlenstoffbilanz - Teil 4

### - Bilanzaufstellung

#### - Versuchstechnische Bilanzierung

C-Bestimmung der Feststoffe nach Fest-Flüssig-Separation  
C-Masse in Flüssigphase für **abnutschbare** Anteile

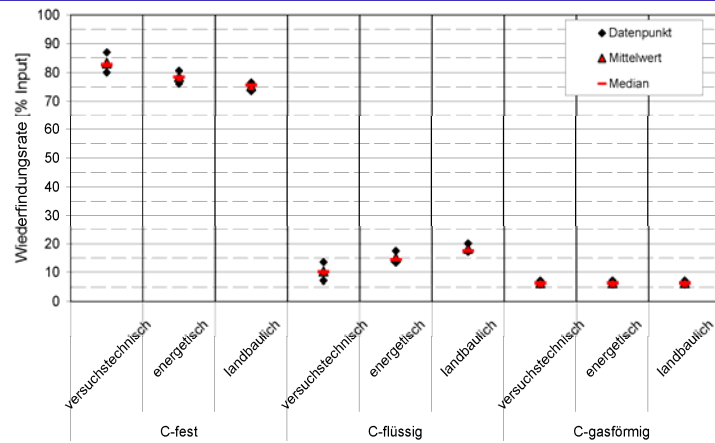
#### - Energetische Bilanzierung

C-Bestimmung der Feststoffe nach Entwässerung  
C-Masse in Flüssigphase für **entwässerbare** Anteile

#### - Landbauliche Bilanzierung

C-Bestimmung der Feststoffe reduziert um  $TOC_{flüssig}$   
C-Gehalte in Flüssigphase „**leicht abbaubare**“ Anteile  
C-Gehalte in Feststoff „**schwer abbaubar**“

## Stoff- und Energiebilanzen Kohlenstoffbilanz - Teil 5



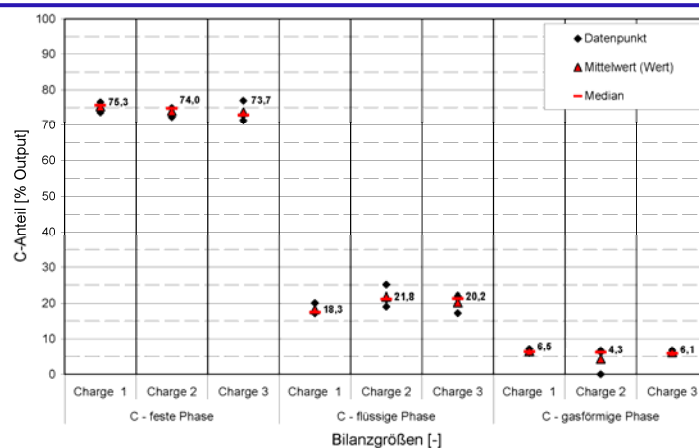
### Resultate der Bilanzierungsansätze bei Bioabfall (Charge 1)

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 57

## Stoff- und Energiebilanzen Kohlenstoffbilanz - Teil 6



### Kohlenstoffverteilung (Landbau) der Versuchsreihe Bioabfall

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 58

## Stoff- und Energiebilanzen Kohlenstoffbilanz - Teil 7

### Tendenzielle Verteilung des Kohlenstoffs im Output (Landbau)

Substrat	C – feste Phase [%]	C – flüssige Phase [%]	C – Gasphase [%]
Bioabfall [n=9]	74,5	19,9	5,5
Grünschnitt [n=4]	70,6	23,0	6,4
Laub [n=3]	77,6	16,8	5,6
Gärrest [n=4]	74,1	17,4	8,5
Primärschlamm [n=1]	39,8	34,7	25,5
Faulschlamm [n=1]	44,5	27,9	27,6
Standard II [n=16]	66,7	24,8	8,5
Stroh [n=9]	77,8	17,7	4,5
Holzspäne [n=3]	77,9	16,7	5,4
Treber [n=2]	74,0	21,6	4,4
Citrusfrüchte [n=3]	62,5	28,1	9,4
Speisereste [n=3]	48,5	46,2	5,3
Biertreber [n=6]	68,8	25,3	5,9
Maissilage [n=3]	65,2	30,7	4,1
Rübenschnitzel [n=6]	61,7	30,8	7,5
Standard I [n=13]	66,6	28,0	5,4

## Stoff- und Energiebilanzen Energiegehaltsbetrachtung - Teil 1

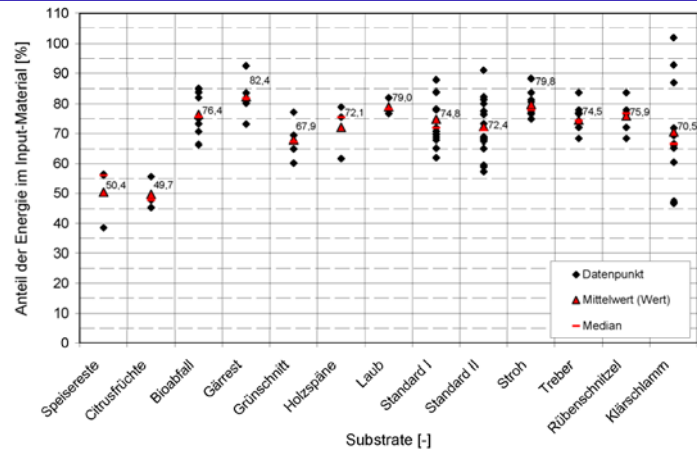
### - Methode

- spezifischer **Brennwert des Inputs** ·  
Trockenmasse des Inputs
- spezifischer **Brennwert des Outputs** ·  
Trockenmasse des Outputs
- **Gesamtbrennwert Output / Gesamtbrennwert des Inputs**

### - Erste Ergebnisse

- **Wiederfindungsrate:** 60 - 90 % (73 % bei n = 97)
- **Energieverluste TS:** 3.200 – 7.600 kJ/kg TS

## Stoff- und Energiebilanzen Energiegehaltsbetrachtung - Teil 2



Wiederfindungsraten der Energiegehalte

## Stoff- und Energiebilanzen Energiegehaltsbetrachtung - Teil 3

- Vorteile
  - Erfassung des Gesamtwerts der im Feststoff nach **Trocknung** verfügbaren Energie
  - geeignet bei **energetischer Nutzung** der HTC-Biokohle
- Probleme
  - **keine Berücksichtigung** der gelösten Stoffe in der flüssigen Phase
  - TOC 30.000 mg/l,  $m_w = 15$  kg:  $m_c = 450$  g
  - vernachlässigter Brennwert: **bis 10.000 kJ**

## Stoff- und Energiebilanzen Energiegehaltsbilanzierung - Teil 1

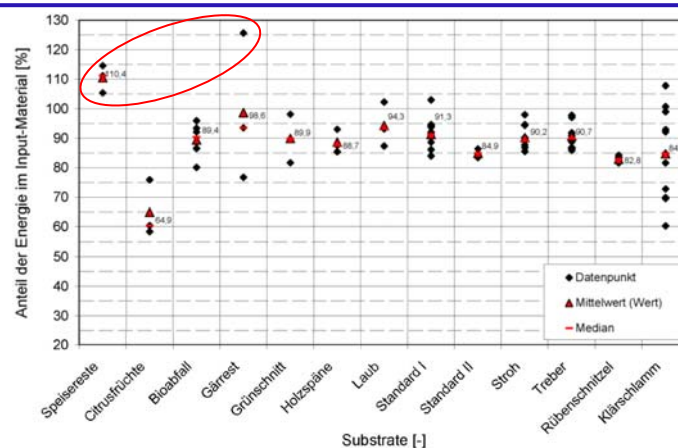
### - Methode

- spezifischer **Brennwert des Inputs** ·  
Trockenmasse des Inputs
- spezifischer **Brennwert der HTC-Biokohle** ·  
Gesamt-trockenmasse des Outputs (feste und **gelöste** Stoffe)
- Gesamtbrennwert Output / Gesamtbrennwert des Inputs

### - Erste Ergebnisse

- **Wiederfindungsrate:** 89 % (n = 97)
- **Reaktionsenthalpie:** 800 – 2.650 kJ/kg TS

## Stoff- und Energiebilanzen Energiegehaltsbilanzierung - Teil 2



### Modifizierte Wiederfindungsraten der Energiegehalte



## Stoff- und Energiebilanzen

### Energiegehaltsbilanzierung - Teil 3

---

- Vorteile
  - theoretisch Erfassung der Reaktionsenthalpie
- Probleme
  - **Brennwert** der gelösten Stoffe vermutlich **überschätzt**
  - gelöste Stoffe mit **hohem Sauerstoffanteil**
  - **anorganische Anteile** im TR vermutlich höher als in Biokohle
  - **Energiefreisetzung** vermutlich deutlich höher als 10 %
  - bessere **Analytik** erforderlich, **Prozessführung** anzupassen

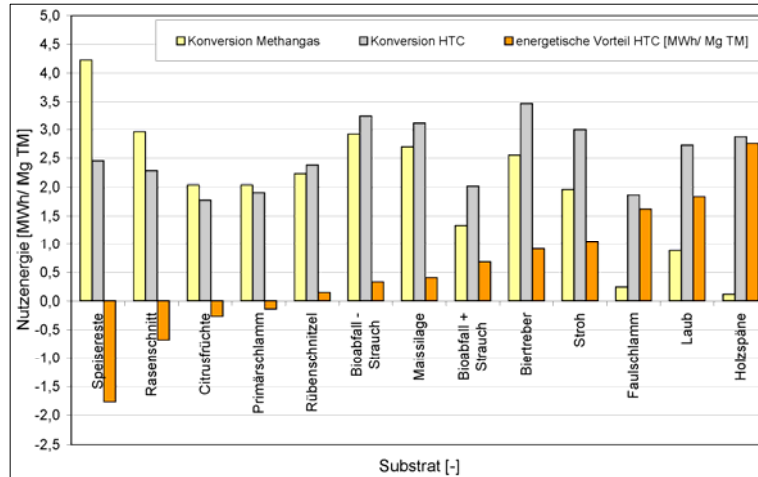
## Stoff- und Energiebilanzen

### Energieeffizienz - Teil 1

---

- Methode
  - Nutzungspfad 1:  
**HTC** - Brennstoffherstellung - **Biomasseheizwerk**
  - Nutzungspfad 2:  
**Biogasgewinnung** - **BHKW** - Verstromung / Wärmegewinnung
- Annahmen
  - energieautarker HTC-Prozess
  - Energiebedarf Entwässerung/Trocknung HTC-Biokohlen  
= Eigenenergie der Biogasanlagen

## Stoff- und Energiebilanzen Energieeffizienz - Teil 2

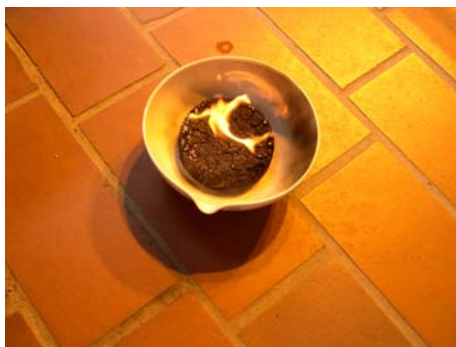


Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 67

## Energetische Nutzung Ausgangssituation



- Ergebnisse DBU-Projekt
- energetische Nutzung grundsätzlich möglich
- kontinuierlicher Betrieb nötig
- zu beachten:
  - Arbeitsschutz
  - Prozessführung

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 68

# Energetische Nutzung

## Projektübersicht - Teil 1

- BMBF-Projekt, Förderlinie FHprofUnd  
Verbesserte **energetische Nutzung** organischer **Industrieabfälle** durch Hydrothermale Carbonisierung
- Laufzeit: 3 Jahre, ab 01.07.2009
- Ansprechpartner: Dipl.-Ing. **Dennis Blöhse**
- Ziel:  
**Gezielte Prozessführung** der HTC organischer Industrieabfälle  
zur **Herstellung von HTC-Biokohle** zur energetischen Nutzung

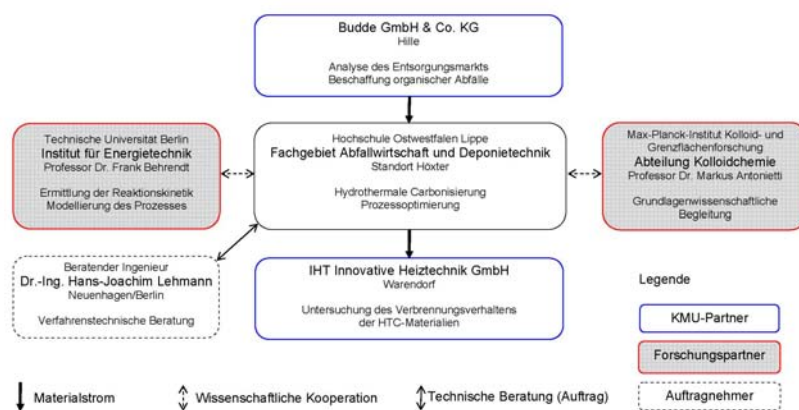
Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 69

# Energetische Nutzung

## Projektübersicht - Teil 2



### Projektstruktur

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 70

# Energetische Nutzung

## Projektübersicht - Teil 3

---

- **Arbeitsprogramm**
  - **Auswahl** organischer **Industrieabfälle**  
(Vorauswahl, Test im 25-L-Reaktor)
  - Bau und Betrieb eines **quasi-kontinuierlichen Reaktors**  
(Nachweis der Energieautarkie, Optimierung des HTC-Prozesses)
  - Ermittlung **verfahrenstechnischer Parameter** für Großanlage  
(Reaktionskinetik, Energieeffizienz, Anlagenparameter)
  - Untersuchung des **Verbrennungsverhaltens**  
(Brennstoffeigenschaften, Verbrennungsverhalten, Abgastests)

# Energetische Nutzung

## Industriekooperation

---

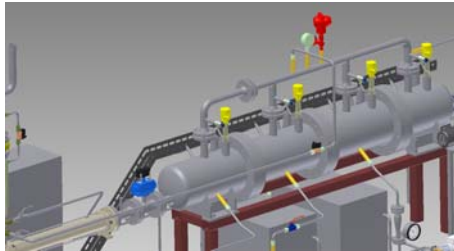
- **Ziele der Industriekooperation**
  - Bau eines **quasi-kontinuierlichen Reaktors**  
für F & E - Zwecke (200 L-Reaktor)
  - Ermittlung von Prozessparametern für Großanlagen

Hochschule Ostwestfalen-Lippe  
University of Applied Sciences



## Energetische Nutzung Reaktorspezifikation - Teil 1

- Reaktorauslegung
  - quasi-kontinuierlich arbeitender Reaktor
  - optimiertes **Wärmemanagement**
  - Volumen Reaktionsbehälter 200 L
  - Temperaturen bis **250 °C**
  - Drücke bis **50 bar**



Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 73

## Energetische Nutzung Reaktorspezifikation - Teil 2



Mobiler  
halbtechnischer  
Versuchsreaktor

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 74

## Landbauliche Nutzung

### Projektübersicht - Teil 1

---

- DBU-Projekt

Rezyklierung organischer Abfälle nach Hydrothermalen  
Carbonisierung (HTC) auf **landwirtschaftlichen Flächen** zur  
**Bodenverbesserung** und C-Sequestrierung

- Laufzeit: 3 Jahre, ab 01.04.2009

- Ansprechpartnerin: Dipl.-Ing. **Anika Hendricks**

- Ziel

Umfassende Prüfung der **agronomisch-ökologischen**  
**Eigenschaften** von **HTC-Biokohle** zur landbaulichen Verwertung.

## Landbauliche Nutzung

### Projektübersicht - Teil 2

---

- Projektpartner

- **Institut für Zuckerrübenforschung**, Uni Göttingen  
Federführung und Feldversuche

- FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik, **HS OWL**  
Carbonisierungsversuche, Produktkennwerte

- **Julius-Kühn-Institut**, Braunschweig  
Gefäß- und Systemversuche

- **Institut für Biologie**, FU Berlin  
Bodenbiologie

- **Willi Schlitt GmbH & Co. KG**, Antriftal  
HTC-Herstellung

## Landbauliche Nutzung Projektübersicht - Teil 3



Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 77

## Landbauliche Nutzung Projektübersicht - Teil 4

- Arbeiten des FG Abfallwirtschaft & Deponietechnik
  - Optimierung der **Prozessführung**
  - Bestimmung von **HTC-Materialkennwerten**
- Bestimmung von HTC-Materialkennwerten
  - orientierende **Pflanzversuche**
  - **Wasserhaltekapazität**
  - Auslagerverhalten und **Nährstoffhaltekapazität**
  - kurzzeitiges **Abbauverhalten**
  - **Schadstoffanalytik**

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 78

## Landbauliche Nutzung Pflanzversuche - Teil 1

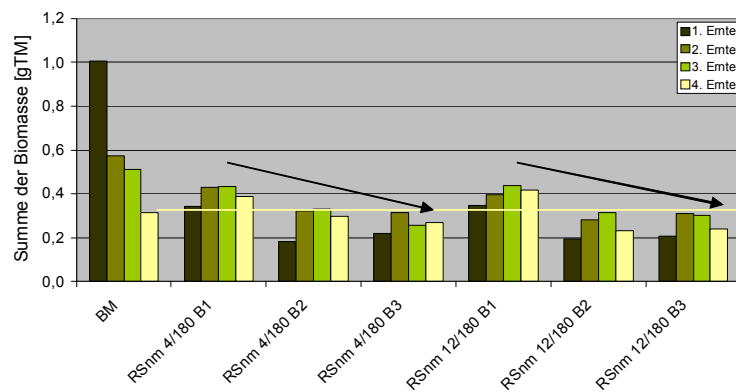
### Orientierende Pflanzversuche



- Methode
  - 1000 cm<sup>3</sup> Pflanztöpfe
  - Ackerboden/Sand-Gemisch
  - Sommergerste, Mais, Weidelgras
  - 3-5 Ernten
  - 3-5 Wiederholungen
  - Biomasseertrag absolut und relativ zur Referenz

## Landbauliche Nutzung Pflanzversuche - Teil 2

### Pflanzversuch Weidelgras-BM



### Auswirkungen verschiedener Anteile von HTC-Biokohle



## Landbauliche Nutzung

### Pflanzversuche - Teil 3

---

- Ergebnisse Pflanzversuche Testreihe 5
  - Biomasseproduktion **sinkt wieder mit steigendem Anteil HTC-Biokohle**, nicht nur bei der ersten Ernte
  - Der negative Effekt durch HTC-Biokohle zu Versuchsbeginn **verringert sich nach mehreren Ernten**
  - Der Effekt von **HTC-Rübenschnitzen** ist auch nach mehreren Ernten **negativ**
  - Wirkung von **HTC-Biertreber** bei der ersten Ernte sehr negativ, ab der zweiten Ernte deutlich **positiv**
  - Referenzsubstrate verhalten sich neutral (Kompost leicht positiv)

## Landbauliche Nutzung

### Wasserhaltekapazität - Teil 1

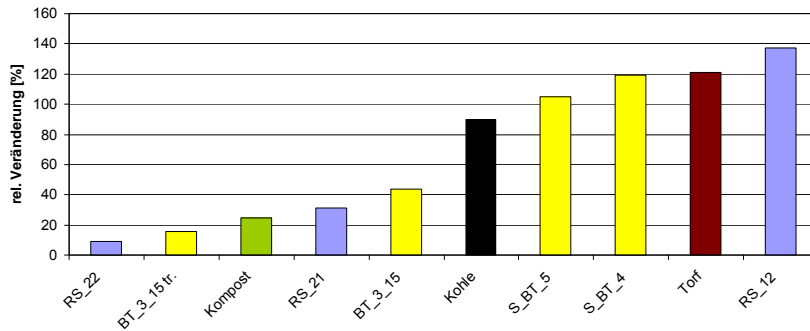
---

#### Wasserhaltekapazität



- Methode
  - nach **BGK**, modifiziert
  - 250ml-Plexiglaszylinder
  - 5-7 Wiederholungen
  - $WK_{max}$  Sand 22 Gew. %
  - $WK_{max}$  Sand 34 Vol. %
- Durchführung
  - Bachelorarbeit  
**Thomas Köhler**

## Landbauliche Nutzung Wasserhaltekapazität - Teil 2



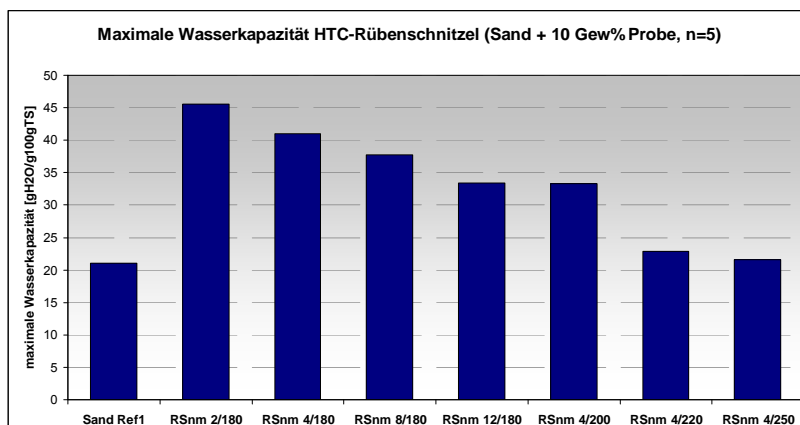
Veränderung der Wasserhaltekapazität von Sand durch Substrate

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 83

## Landbauliche Nutzung Wasserhaltekapazität - Teil 3



Wasserhaltekapazität bei Zugabe von HTC-Biokohle

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NAROTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 84

## Landbauliche Nutzung

### Wasserhaltekapazität - Teil 4

---

- Ergebnisse Tests Wasserhaltekapazität
  - Maximale **Wasserhaltekapazität** von Sand wird durch Applikation von **HTC-Biokohle** **deutlich erhöht**
  - Bei Einmischung der **frischen Kohle** deutlich bessere Ergebnisse
  - Verbesserungen der  $WK_{max}$  besonders durch **mild carbonisierte HTC-Biokohlen**

## Landbauliche Nutzung

### Auslaugverhalten und Nährstoffhaltekapazität - Teil 1

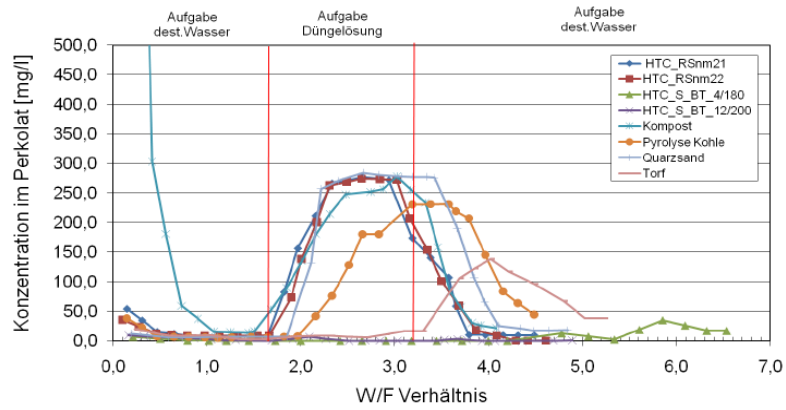
---

#### Auslaugverhalten und Nährstoffhaltekapazität



- Methode
  - Säulenversuche
  - $\varnothing$  120 mm, h = 20 cm
  - Beregnung mit **6 · 60 mm/h**
- Durchführung
  - Bachelorarbeit  
Hermann Regehr

## Landbauliche Nutzung Auslaugverhalten und Nährstoffhaltekapazität - Teil 2



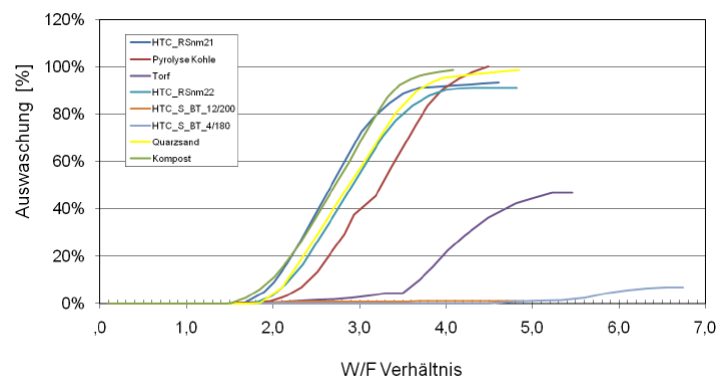
### Gesamtübersicht Auslaugverhalten Nitrat - Durchbruchkurven

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NARoTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 87

## Landbauliche Nutzung Auslaugverhalten und Nährstoffhaltekapazität - Teil 3



### Prozentualer Austrag des Nitrats nach Aufgabe der Düngelösung

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Ramke  
FG Abfallwirtschaft und Deponietechnik

NARoTEC 2011  
HTC - Fachgebiet

Juni 2011  
Folie 88

## Landbauliche Nutzung

### Auslagverhalten und Nährstoffhaltekapazität - Teil 4

---

- Ergebnisse der Tests zum Nitrat-„Rückhalt“:
  - Holzkohle (Soel) 0%
  - Torf ca. 55%
  - **HTC-RS** (TM!) ca. 8%
  - Bei **HTC-BT** (FM) wurde nur 1% im Perkolat gefunden, was darauf hindeutet, dass 99% gespeichert wurden
  - Untersuchung auf **Nitrit** hat „Verschwinden“ des Nitrats nicht geklärt
- Neue Auslagerversuche mit Untersuchung der Festphase

## Landbauliche Nutzung

### Kurzzeitiges Abbauverhalten - Teil 1

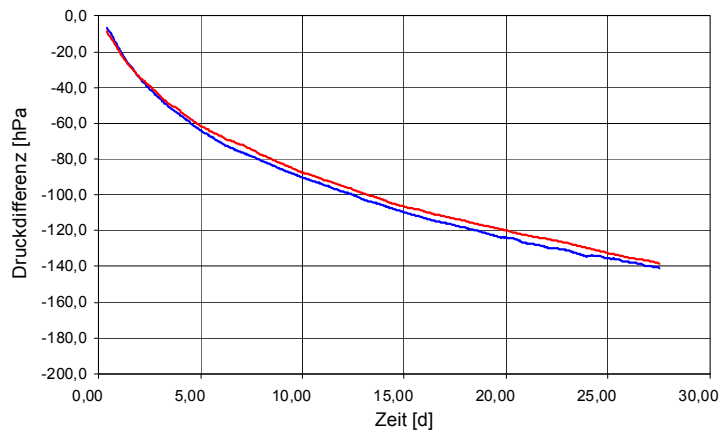
---

#### Kurzzeitiges Abbauverhalten



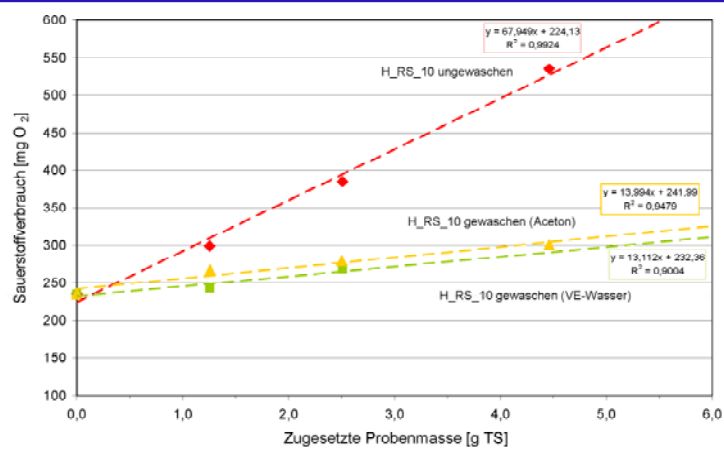
- Methode
  - Bestimmung der **Atmungsaktivität AT<sub>28</sub>**
  - SENSOMAT-System
  - **Animpfung mit Kompost**
  - je 3 Wiederholungen
  - Auswertung in Abhängigkeit von der Probeneinwaage
  - „**Aufstockungsmethode**“

## Landbauliche Nutzung Kurzzeitiges Abbauverhalten - Teil 2



Beispiel für Sauerstoffverbrauchskurven

## Landbauliche Nutzung Kurzzeitiges Abbauverhalten - Teil 3



Aerober Abbautest nach AT<sub>28</sub>-Aufstockungsmethode

## Landbauliche Nutzung Schadstoffanalytik - Teil 1

---

### - Untersuchung der HTC-Suspension

Phenolindex [mg/kg OS]

	RS 4/180	RS 12/180	BT 4/180	BT 4/200	BT 12/180
HydroCarb	150	28	24	-	34
HS-OWL	30	39	59	150	200

### - Untersuchung von fester und flüssiger Phase

Phenolindex [mg/kg OS]

	Input	HTC-Biokohle	HTC-Filtrat
RS 4/180	< 0,1	36	16

## Landbauliche Nutzung Schadstoffanalytik - Teil 2

---

### - Ergebnisse Schadstoffanalytik

- bei der Carbonisierung entstehen verschiedene **Phenolhomologe**
- je heißer und länger die Carbonisierung, desto höher der Phenolindex
- nur ein Teil des **Phenolindex** wird durch das **Phenol** verursacht (Screening ProChem: 7 mg von 36 mg)
- die meisten der Inhaltsstoffe der flüssigen Phase sind gut mikrobiell abbaubar

## Fazit

---

- Arbeitsstand und Ausstattung
  - breites Spektrum an **Untersuchungsmöglichkeiten**
  - einschließlich **halbtechnischem Durchlaufreaktor**
  - über 250 Carbonisierungen
  - zahlreiche Tests der HTC-Biokohle
- Weiteres Vorgehen
  - **energetische Optimierung** des Prozesses
  - Tests der HTC-Biokohlen zur energetischen Nutzung
  - Optimierung der HTC-Biokohlen zur landbaulichen Nutzung

## Adressen

---

Professor Dr.-Ing. Hans-Günter Ramke

Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Höxter  
Fachbereich Umweltingenieurwesen und Angewandte Informatik  
Fachgebiet Abfallwirtschaft und Deponietechnik  
An der Wilhelmshöhe 44, 37671 Höxter  
Tel. 05271/687-130; Telefax 05271/687-200  
E-Mail [hans-guenter.ramke@hs-owl.de](mailto:hans-guenter.ramke@hs-owl.de)  
Web <http://www.hs-owl.de/fb8/fachgebiete/abfallwirtschaft/>