

# Kommission Bodenschutz beim UBA

## Tagung „Schließung von Stoffkreisläufen“ 20.11.2009

---

### Hydrothermale Carbonisierung

Professor Dr.-Ing. Hans-Günter Ramke  
Dipl.-Ing. Dennis Blöhse, Dipl.-Ing. Anika Stab  
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

UBA-Tagung „Stoffkreisläufe“  
Hydrothermale Carbonisierung

November 2009  
Folie 1



# Hydrothermale Carbonisierung

## Übersicht

---

- Einführung
- Projektübersicht
- Versuche zur Carbonisierung
- Eigenschaften der HTC-Biokohle
- Entwässerungsverhalten
- Untersuchungen der flüssigen Phase
- Untersuchungen der gasförmigen Phase
- Aktuelle Arbeiten

# Einführung

## Entwicklung des HTC-Verfahrens

---

- Friedrich Bergius
  - 1913
  - Beschreibung der **elementaren Prozesse**
- Professor Dr. Markus Antonietti
  - seit 2004
  - **MPI Golm**, 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



- Erzeugnisse

- Kolloide und Nanostrukturen

# 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

## DBU-Projekt

---

- Titel

Machbarkeitsstudie zur Energiegewinnung aus organischen Siedlungsabfällen durch hydrothermale Carbonisierung

- Projektträger

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

AZ: 25604

- Laufzeit

Juli 2007 - Juni 2009

# Projektübersicht

## 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

# Projektübersicht

## 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

# Projektübersicht

## Versuchseinrichtungen - Teil 1



Autoklav, Volumen 25 L,  
mit Steuerung

# Projektübersicht

## Versuchseinrichtungen - Teil 2

---



Autoklav -  
Steuerung und  
Datenanzeige

# Projektübersicht

## Durchgeführte Untersuchungen - Teil 1

---

- Übersicht

- Aufzeichnung der Prozessparameter
- Massen-, Kohlenstoff- und Energiebilanzen
- Carbonisierung ausgewählter Stoffe (> 200 HTC-Versuche)

- Analysen

- Gasbildungspotential
- Eigenschaften der „HTC-Biokohle“
- Untersuchungen der flüssigen Phase
- Untersuchungen des Gasphase



# Projektübersicht

## Durchgeführte Untersuchungen - Teil 2

---

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

||

# Projektübersicht

## Durchgeführte Untersuchungen - Teil 3

---

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

# Versuche zur Carbonisierung

## Einsatzstoffe – Teil 1



Bioabfall –  
Input- und Outputmaterial

# Versuche zur Carbonisierung

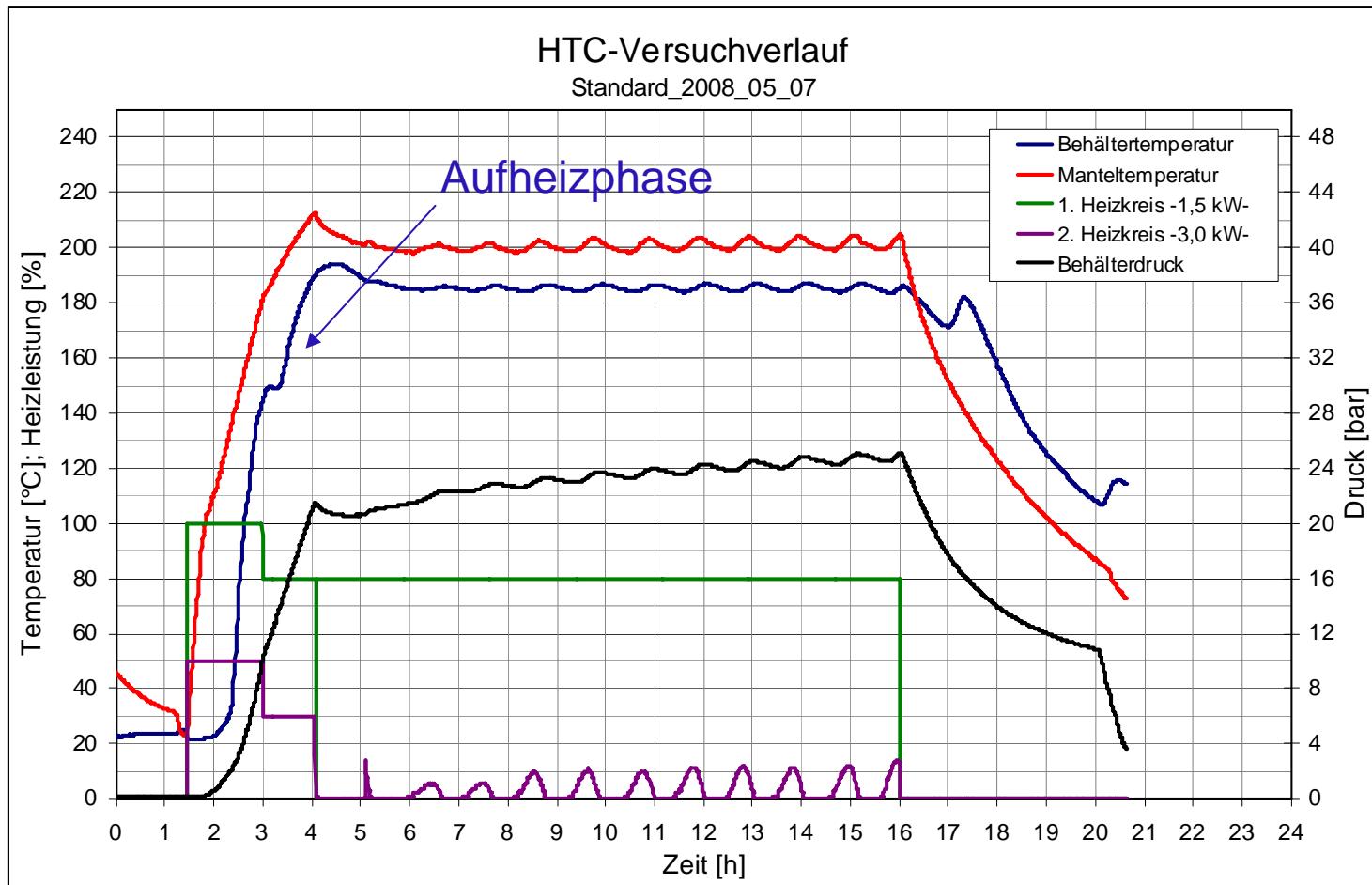
## Einsatzstoffe – Teil 2



Grünschnitt –  
Input- und Outputmaterial

# Versuche zur Carbonisierung

## Prozessparameter



# Versuche zur Carbonisierung

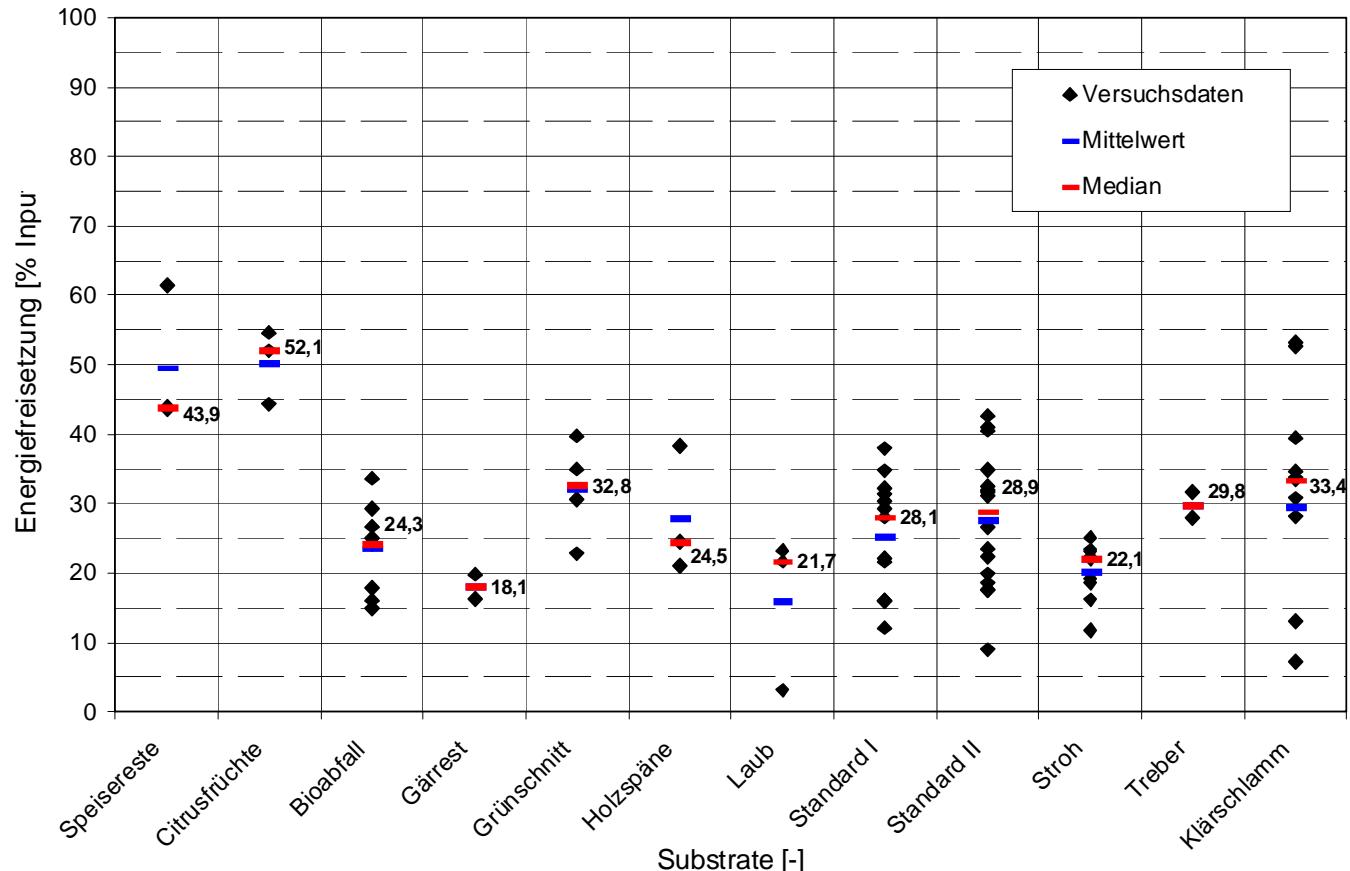
## Energieertrag - Teil 1

---

- Methode
  - spezifischer Brennwert des Inputs · Trockenmasse des Inputs
  - spezifischer Brennwert des Outputs · Trockenmasse des Outputs
  - Gesamtbrennwert Output / Gesamtbrennwert des Inputs
- Erste Ergebnisse
  - Energieertrag: 60 - 90 %
  - Reaktionswärme Standard I: 4.300 - 5.700 kJ/kg TS

# Versuche zur Carbonisierung

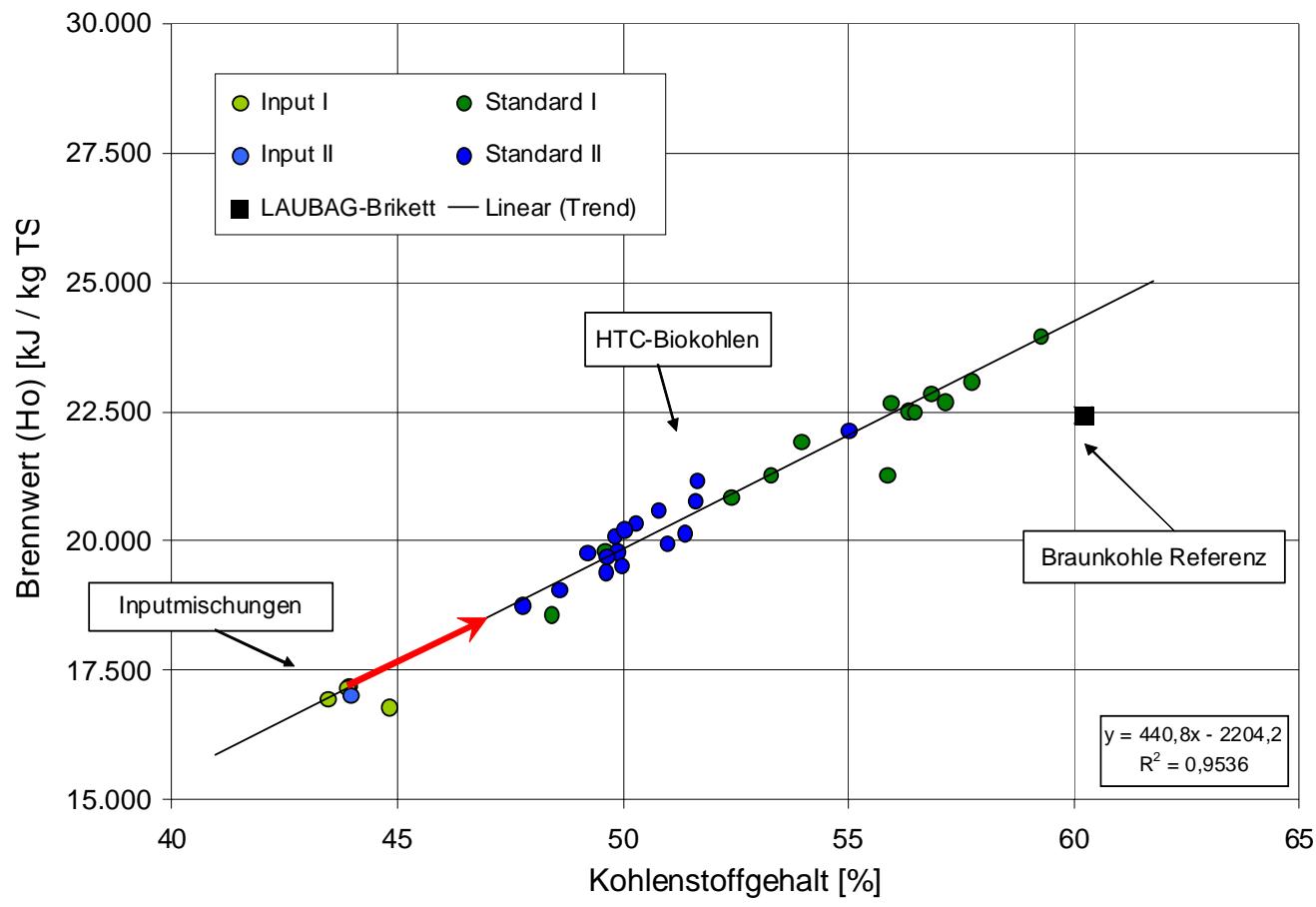
## Energieertrag - Teil 2



Energiefreisetzung verschiedener Substratgruppen

# Versuche zur Carbonisierung

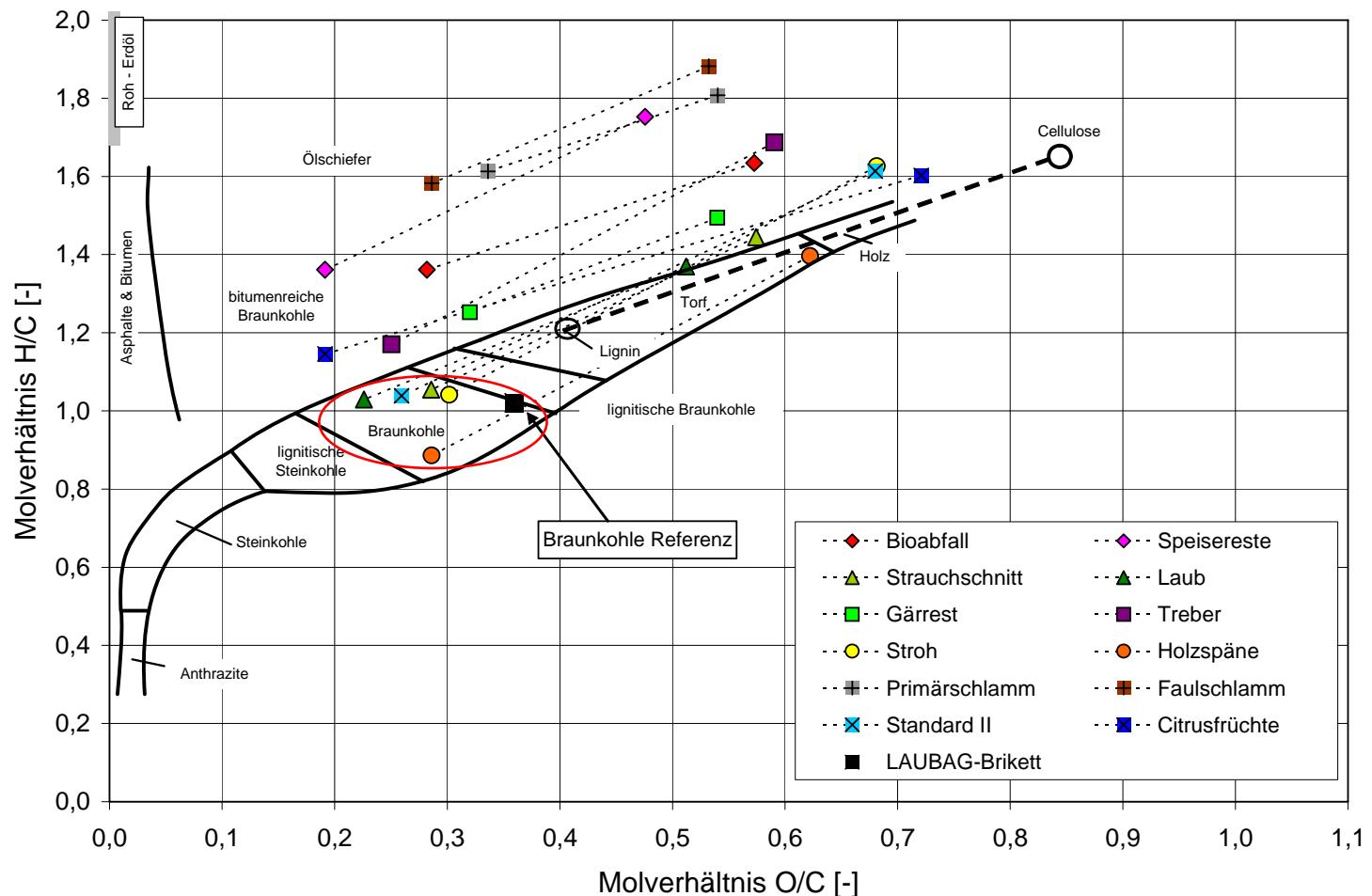
## Energieertrag - Teil 3



Erhöhung der Energiedichte durch die Carbonisierung

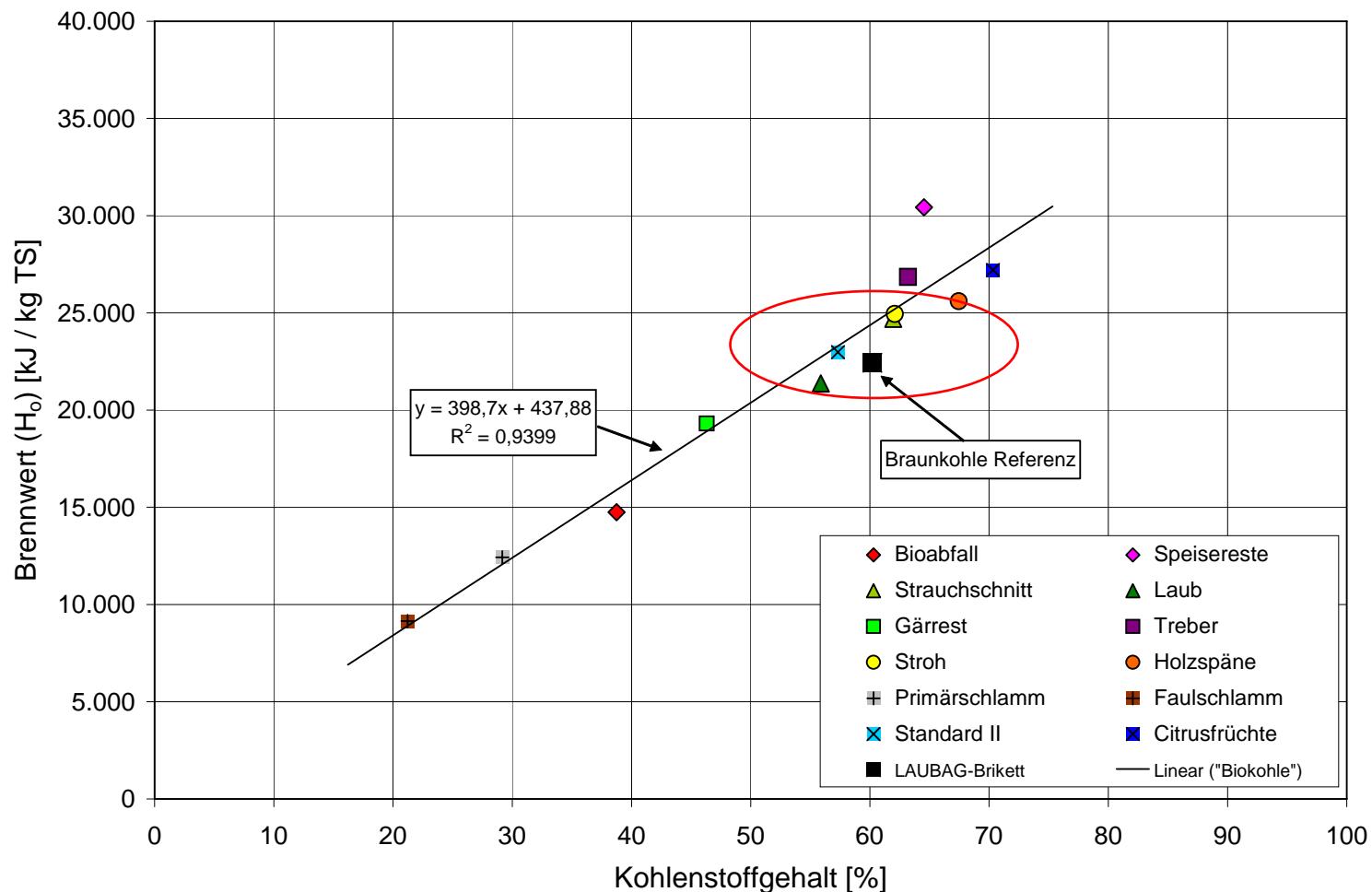
# Eigenschaften der HTC-Biokohle

## Inkohlungsdiagramm



# Eigenschaften der HTC-Biokohle

## Brennstoffeigenschaften



# Eigenschaften der HTC-Biokohle

## Kohlenstoffbilanz

---

### Tendenzielle Verteilung des Kohlenstoffs im Output

Versuch	C im <u>Feststoff</u> [% C]			<u>Gasphase</u> [% C]
Einsatzzweck	versuchstechnisch	energetische Nutzung	landbauliche Nutzung	
	Fest-Flüssig-Separation	Entwässerung	nur schwer abbaubare Stoffe	
Bioabfall, 08/06/26	88,0	82,3	78,4	5,4
Bioabfall, 08/06/27	83,9	79,9	77,3	6,6
Bioabfall, 08/07/31	80,5	76,7	74,1	6,0
Bio + GS, 08/12/01	79,6	76,6	74,6	
Bio + GS, 08/12/03	79,9	75,1	72,6	6,5
Bio + GS, 08/12/04	88,7	79,6	75,0	6,0

# Eigenschaften 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.

# Entwässeungsverhalten

## Fest-Flüssig-Separation



Methode:  
Fest-Flüssig-  
Separation  
mittels  
Saugfiltration

Wassergehalte  
HTC-Bioabfälle:  
55 – 70 %

# Entwässerungsverhalten

## Entwässerungsversuch - 1



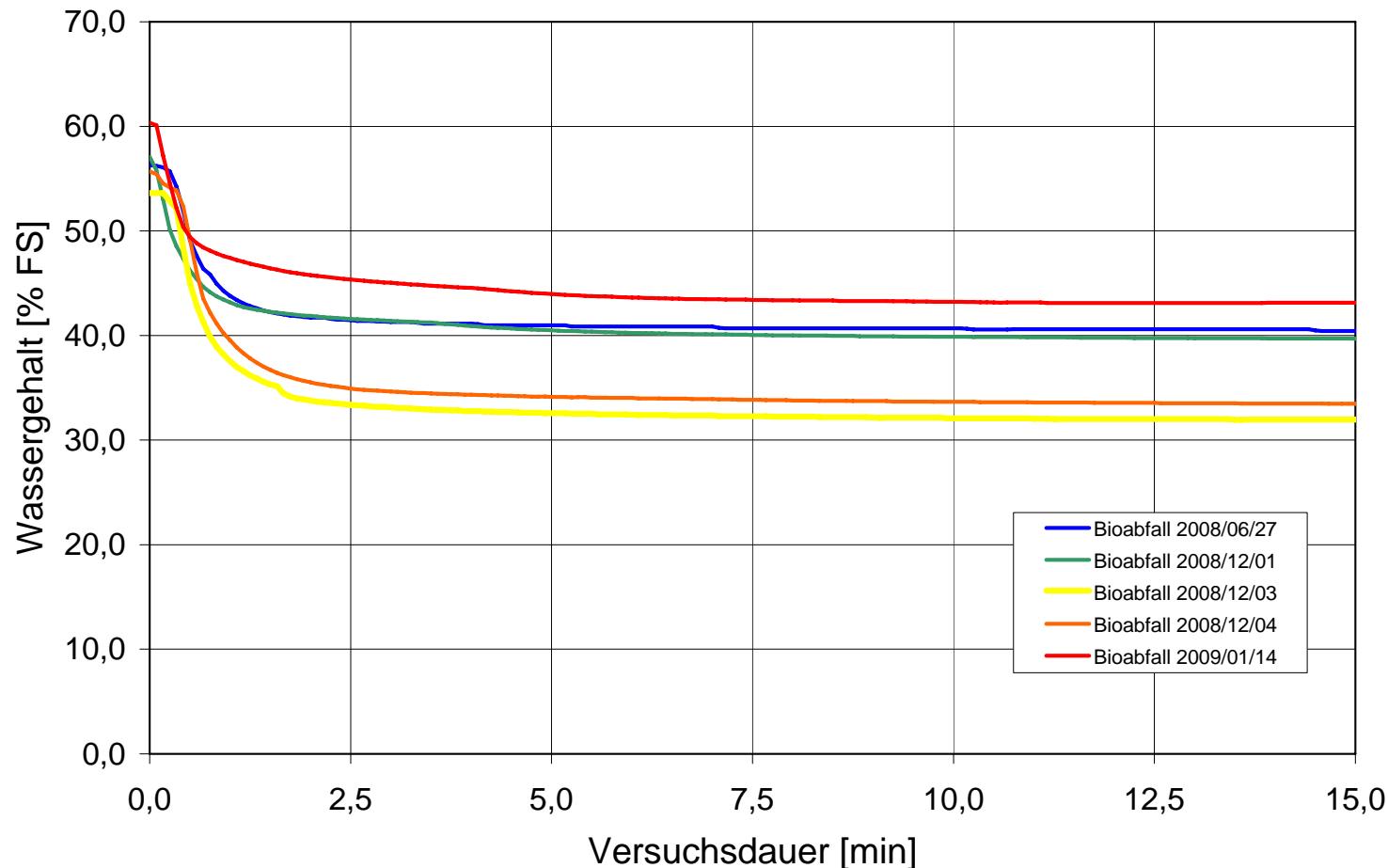
- Zylinder  $\varnothing$  8,0 cm
- Druck ca. 15 bar
- Füllhöhe 3,1 cm
- Probenmasse ca. 160 g



Versuchsaufbau zur Bestimmung  
des Entwässerungsverhaltens

# Entwässeungsverhalten

## Entwässeungsversuch - 2



# Untersuchungen der flüssigen Phase

## Vorbemerkung

---

### Untersuchungen der flüssigen Phase

Professor Dr.-Ing. Joachim Fettig

Fachgebiet Wassertechnologie

Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Höxter

# Untersuchungen der flüssigen 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)
- $\text{NO}_3$ -N:	2,9 – 58 mg/l	(16,4 mg/l)
- $\text{NH}_4$ -N:	3,4 – 4,1 mg/l	(3,8 mg/l)
- $\text{PO}_4$ -P:	0,2 – 47 (550) mg/l	(2,4 mg/l)

(Klammerwerte: Median)

# Untersuchungen der flüssigen Phase

## Dynamischer Abbaustest - 1

---

- Methode
  - kontinuierliche betriebene **aerobe Laborkläranlage**
  - langsame Steigerung der Zugabe von verdünntem Filtrat
  - niedrige **Schlammbelastung** (0,15 - 0,30 g CSB/(g TS · d))
  - Volumen Belebungsstufe 12 l, Versuchsdauer 42 d
- Untersuchtes Material
  - Filtrat des Standardsubstrats II
  - verdünnt auf einen CSB ~ 8.000 mg/l
  - Zugabe von Nährsalzen

# Untersuchungen der flüssigen Phase

## Dynamischer Abbaustest - 2

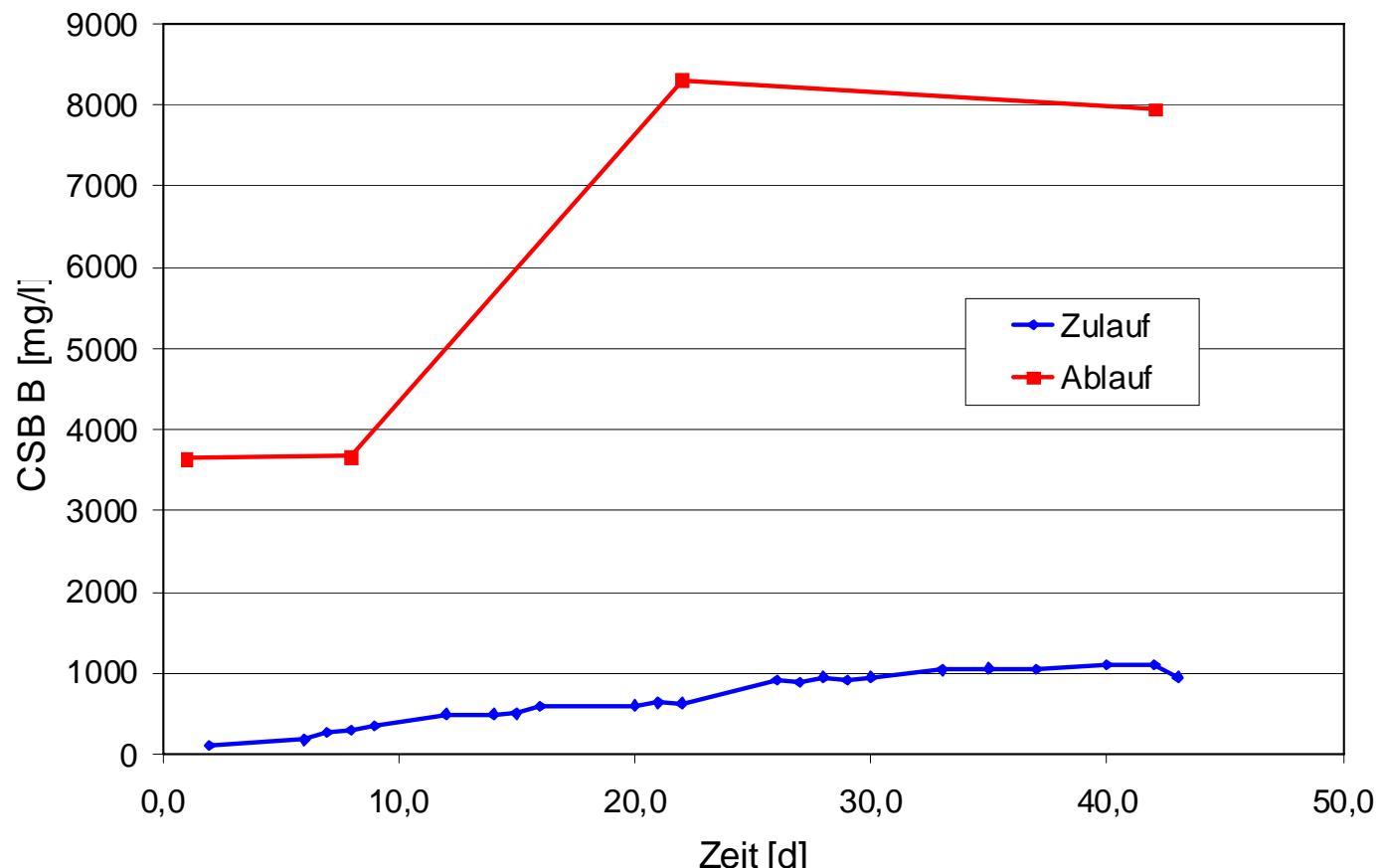
---



Versuchsaufbau der Laborkläranlage

# Untersuchungen der flüssigen Phase

## Dynamischer Abbaustest - 3



CSB-Konzentration im Zu- und Ablauf

# Untersuchungen der flüssigen Phase

## Adsorbierbarkeit an Aktivkohle - 1

---

- Methode

- Aufnahme von **Adsorptionsisothermen**
- Zugabe von Pulveraktivkohle zum Filtrat
- Kontaktzeit 72 h

- Untersuchtes Material

- biologisch behandeltes Filtrat des Standardsubstrats I
- Probenvolumen 0,2 l, zwei Anfangskonzentrationen
- Zugabemenge Aktivkohle 0,04 – 3 g

# Untersuchungen der flüssigen Phase

## Adsorbierbarkeit an Aktivkohle - 2



Versuche zur Adsorption  
mit Pulveraktivkohle

# Untersuchungen der gasförmigen Phase

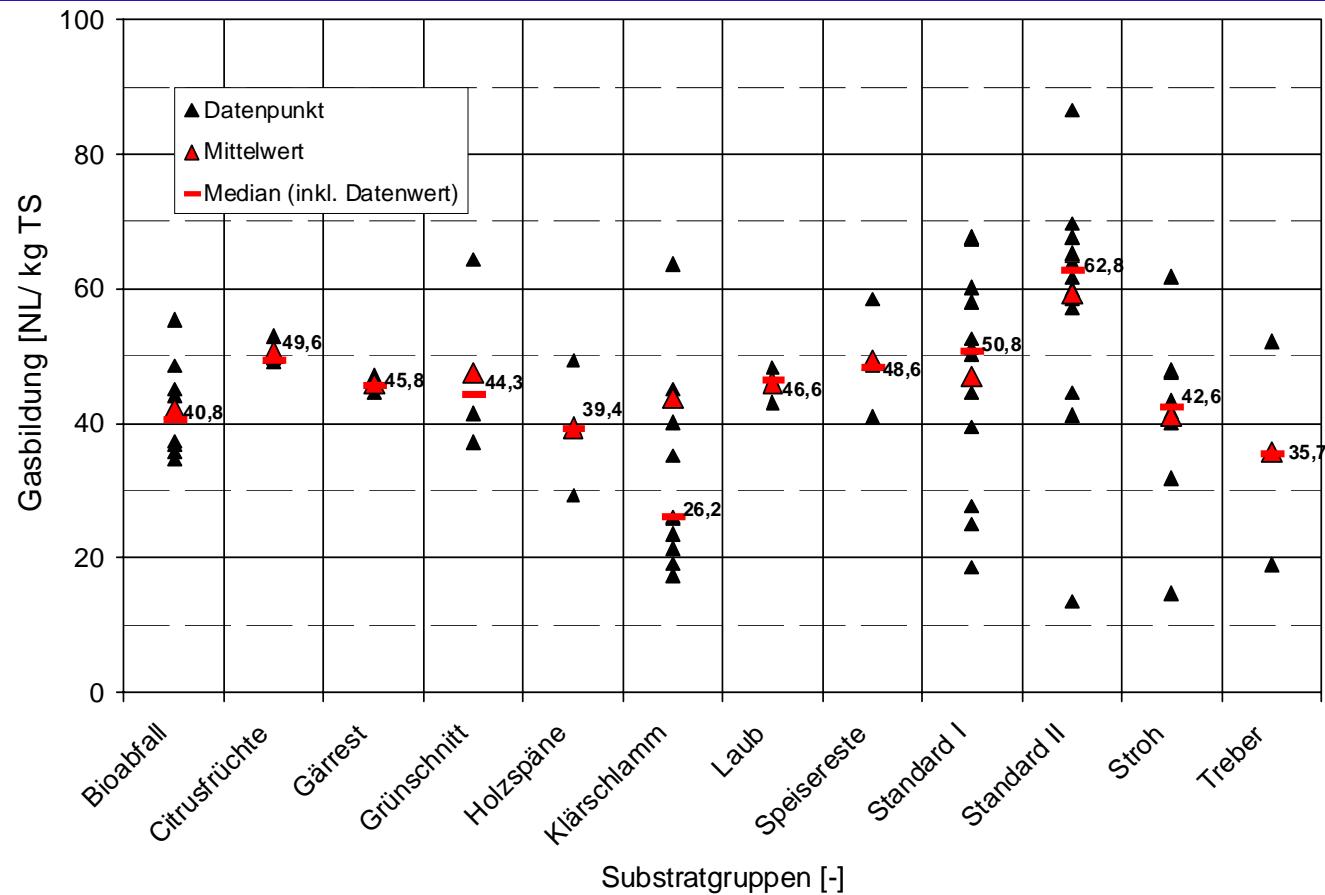
## Gasbildung und Hauptkomponenten

---

- Gasvolumen bei Bioabfällen
  - absolut: 90 - 190 NL/Versuch
  - spezifisch: 35 - 44 NL/kg TS Input
- Gaszusammensetzung bei Bioabfällen
  - dominierend CO<sub>2</sub> (ca. 90 %)
  - geringe Gehalte (2 - 4 %) von Kohlenwasserstoffen
  - Restgehalte von N<sub>2</sub> (aus der Luft)

# Untersuchungen der gasförmigen Phase

## Spezifische Gasbildung



### Spezifische Gasbildung verschiedener Substratgruppen

# Aktuelle Arbeiten

## Energetische Nutzung organischer Abfälle - Teil 1

---

- BMBF-Projekt, Förderlinie FHprofUnd

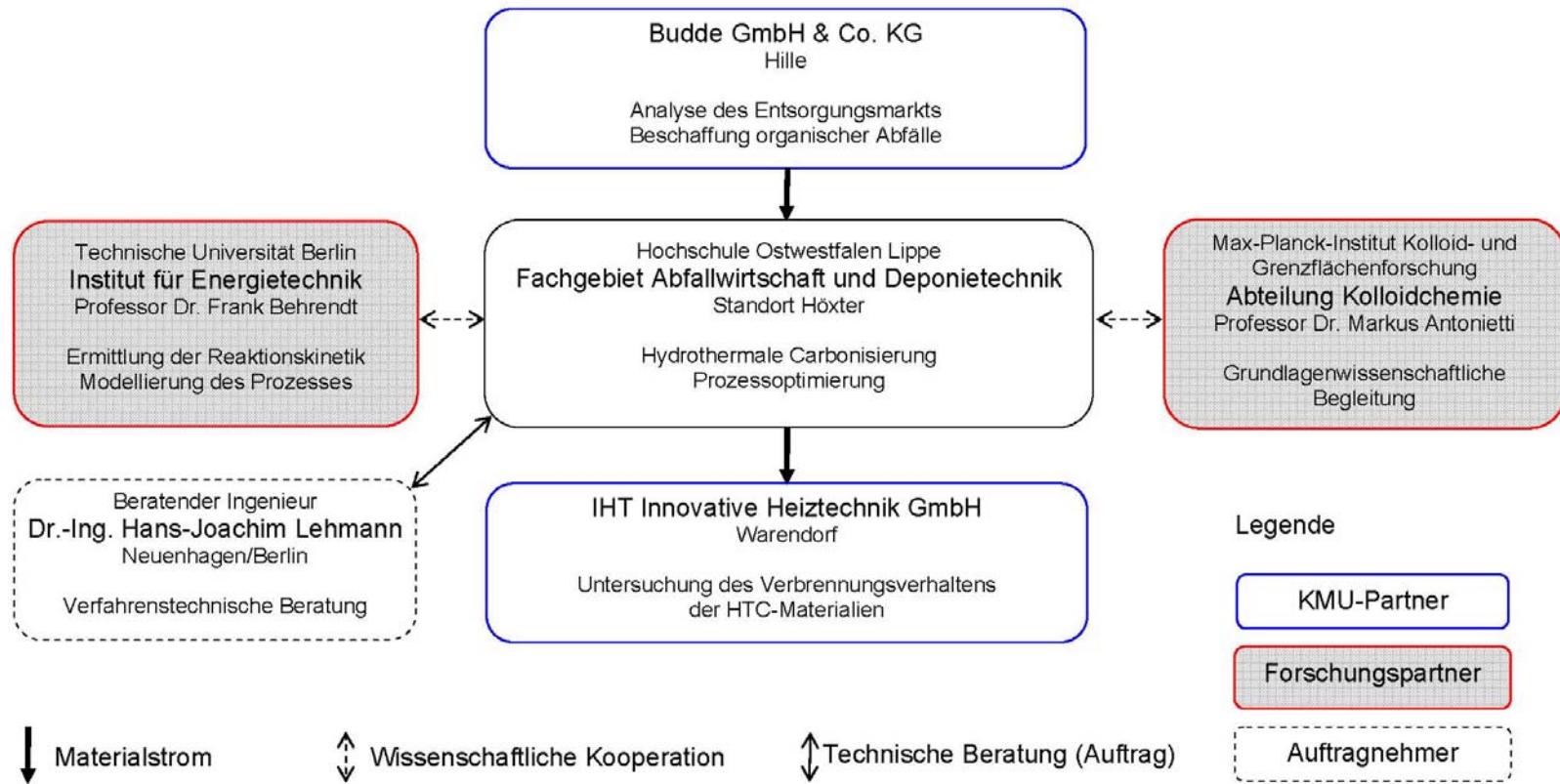
Verbesserte **energetische Nutzung** organischer **Industrieabfälle** durch Hydrothermale Carbonisierung

- 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** ||

# Aktuelle Arbeiten

## Energetische Nutzung organischer Abfälle - Teil 2



## Projektstruktur

# Aktuelle Arbeiten

## Energetische Nutzung organischer Abfälle - Teil 3

---

### Ausgangssituation



- Ergebnisse DBU-Projekt
    - freigesetzte Energie Bioabfall **2,0 – 4,5 MJ/kg TS**
    - sonst bis zu 5,0 MJ/kg TS
  - zu beachten:
    - Arbeitsschutz
    - Prozessführung
- energetische Nutzung grundsätzlich möglich

# Aktuelle Arbeiten

## Energetische Nutzung organischer Abfälle - Teil 4

---

- 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)

# Aktuelle Arbeiten

## Landbauliche Verwertung von HTC-Biokohle - Teil 1

---

- DBU-Projekt

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

- Laufzeit: 3 Jahre, ab 01.04.2009

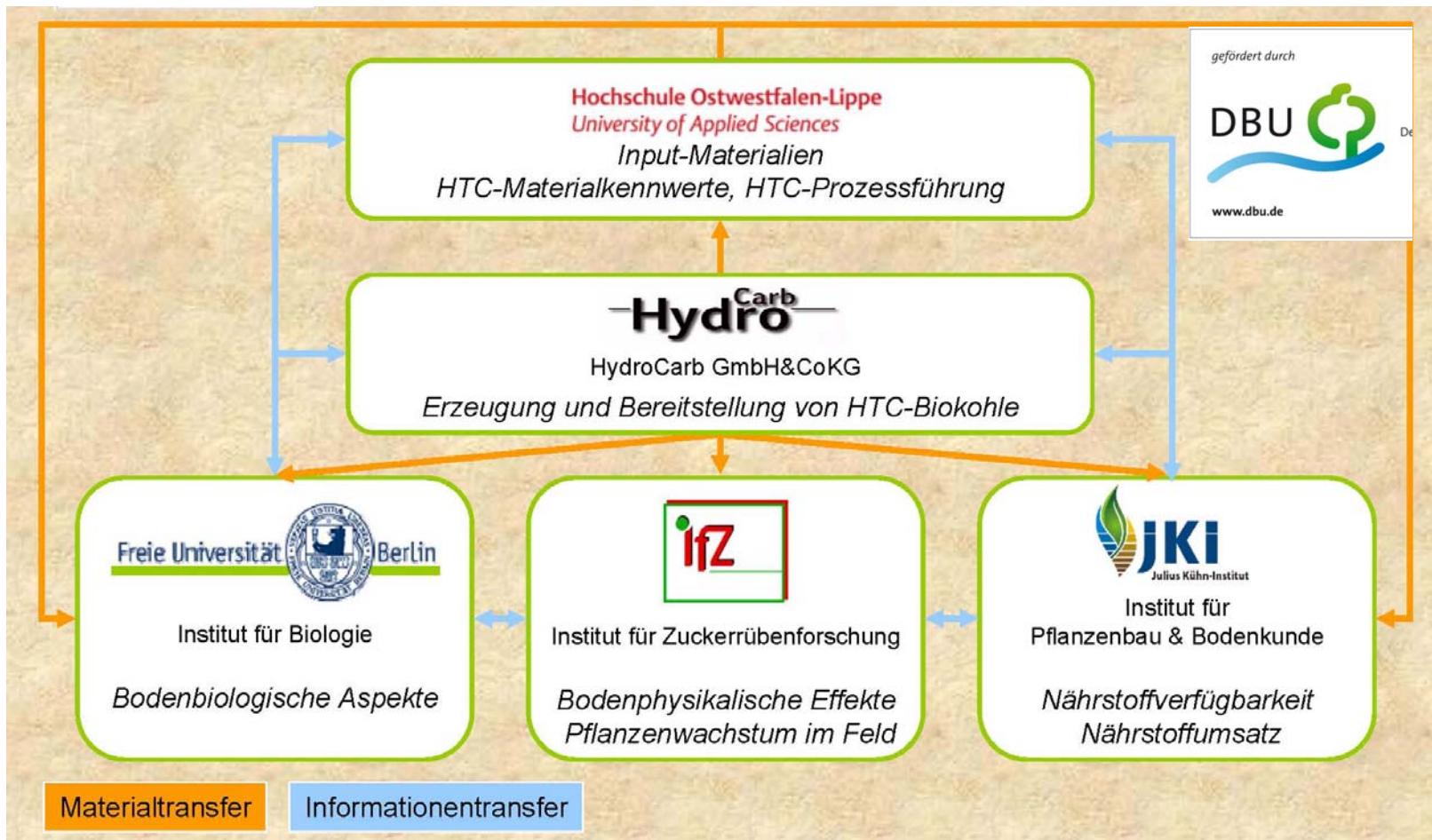
- Ansprechpartnerin: Dipl.-Ing. Anika Stab

- Ziel

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

# Aktuelle Arbeiten

## Landbauliche Verwertung von HTC-Biokohle - Teil 3



# Aktuelle Arbeiten

## Landbauliche Verwertung von HTC-Biokohle - Teil 4

---

- Arbeiten des FG Abfallwirtschaft & Deponietechnik
  - Auswahl der Input-Materialien
  - Optimierung der Prozessführung
  - Bestimmung von HTC-Materialkennwerten
- Bestimmung von HTC-Materialkennwerten
  - orientierende Pflanzversuche
  - Auslaugverhalten und Nährstoffhaltekapazität
  - kurzzeitiges Abbauverhalten
  - Wasserhaltekapazität

# Aktuelle Arbeiten

## Landbauliche Verwertung von HTC-Biokohle - Teil 5

### Orientierende Pflanzversuche

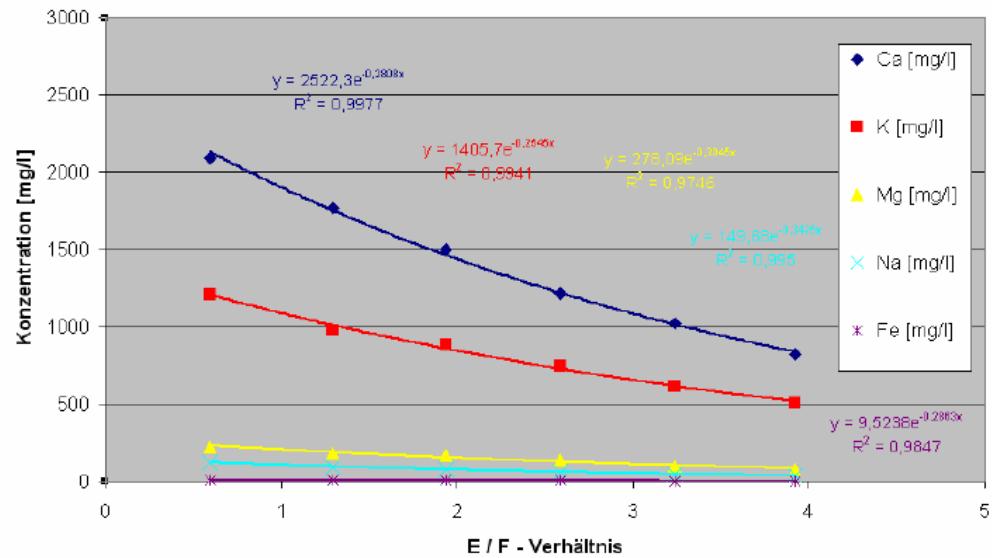


- Methode
  - 1000 cm<sup>3</sup> Pflanztöpfe
  - Ackerboden
  - Sommergerste
  - **25 Samen, 1 cm überdeckt**
  - **5 Wiederholungen**
  - **Dauer 21 d**
  - **2 Ernten**

# Aktuelle Arbeiten

## Landbauliche Verwertung von HTC-Biokohle - Teil 6

### Auslaugverhalten und Nährstoffhaltekapazität



- Methode
  - Säulenversuche
  - $\varnothing 120 \text{ mm}, h = 20 \text{ cm}$
  - Berechnung mit  $6 \cdot 60 \text{ mm/h}$

# Aktuelle Arbeiten

## Landbauliche Verwertung von HTC-Biokohle - Teil 7

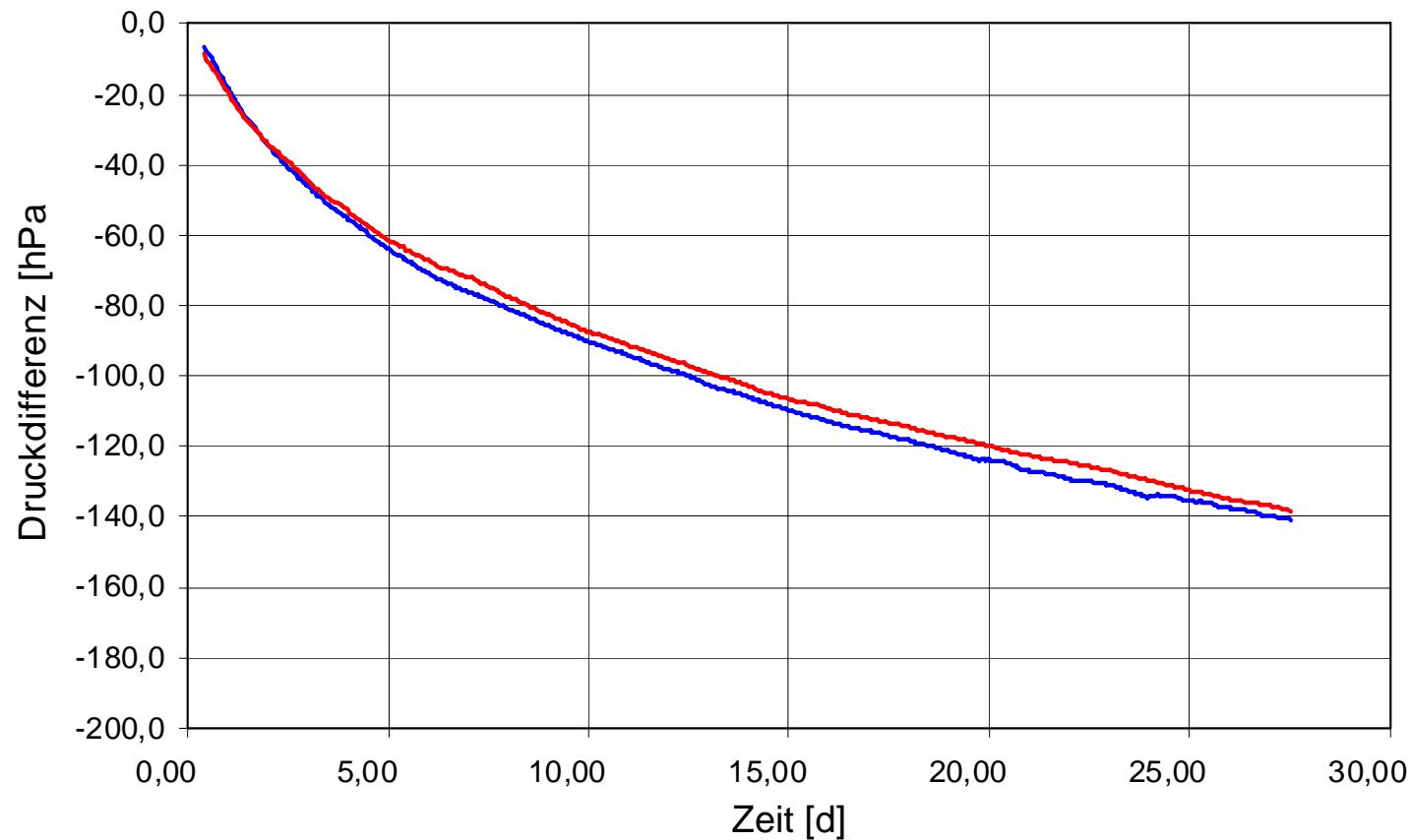
### Kurzzeitiges Abbauverhalten



- Methode
  - Bestimmung der Atmungsaktivität  $AT_{28}$
  - SENSOMAT-System
  - Animpfung mit Kompost
  - je 3 Wiederholungen
  - Auswertung in Abhängigkeit von der Probeneinwaage
  - „Aufstockungsmethode“

# Aktuelle Arbeiten

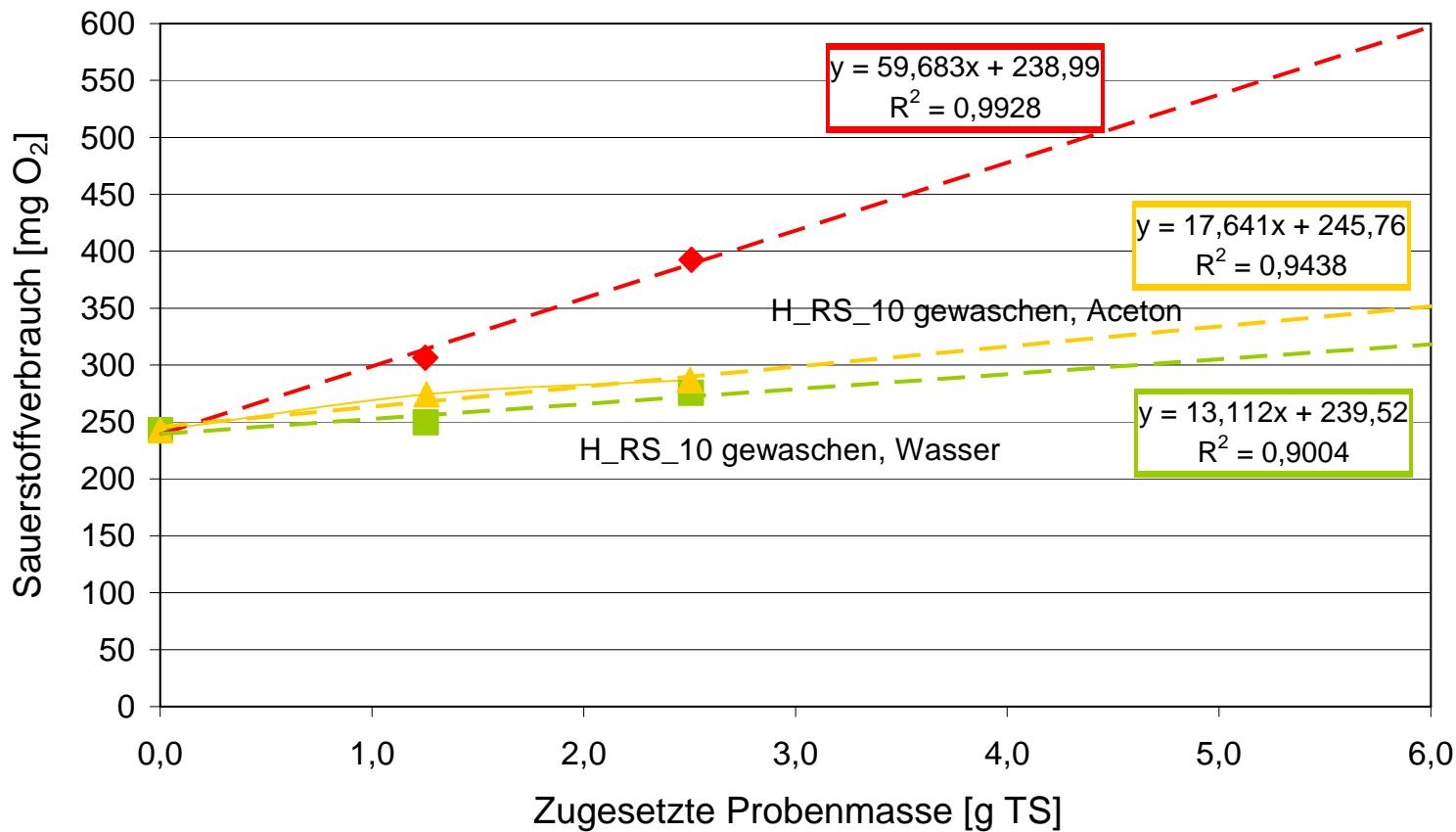
## Landbauliche Verwertung von HTC-Biokohle - Teil 8



Beispiel für Sauerstoffverbrauchskurven

# Aktuelle Arbeiten

## Landbauliche Verwertung von HTC-Biokohle - Teil 9



### Aerober Abbaustest nach AT<sub>28</sub>-Aufstockungsmethode

# 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/>