

LiFE
SS2021

Kreislaufführung von organischen Abfällen durch Pyrolyse

Dirk Weichgrebe
PD Dr.-Ing. habil.

Leibniz University Hannover
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (ISAH)

Welfengarten 1a, 30167 Hannover, Germany
+49 511 762 2898
weichgrebe@isah.uni-hannover.de



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021



Gliederung



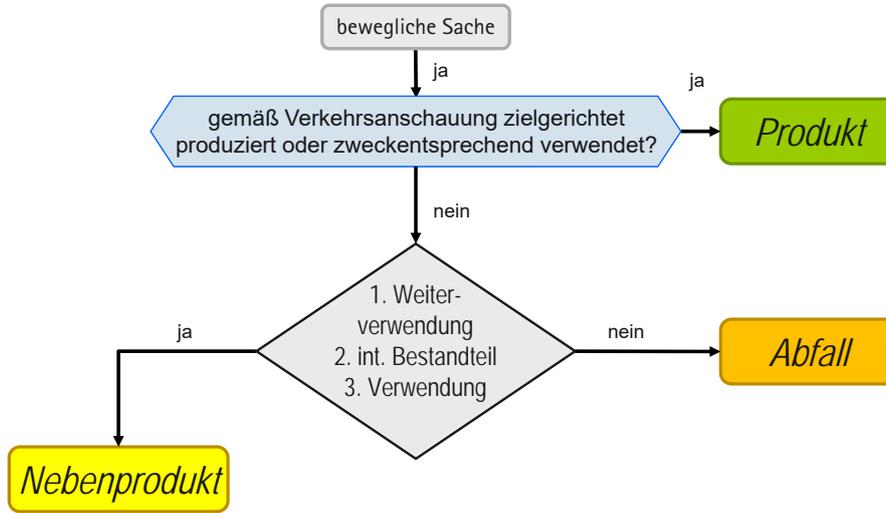
- I. Definitionen und Begriffe
- II. Randbedingungen
- III. Fallbeispiel aus der eigenen Forschung
 - PYRASOL Projekt
- IV. Anwendungspotential in der Abfallwirtschaft



Abfallbegriff nach §§ 3, 4 KrWG

KrWG, 2012 zul. geändert 2020

- Abgrenzung des Abfallbegriffs-



- subjektiver Begriff-

Definitionen



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

Abfallhierarchie nach §6 KrWG

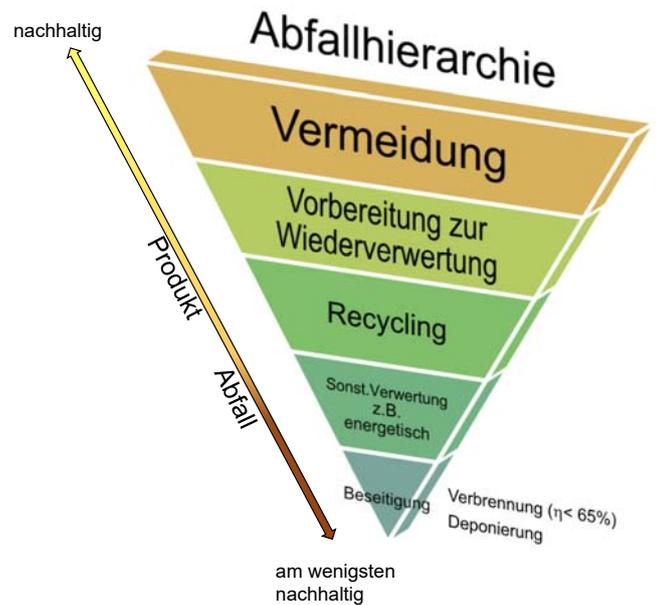
KrWG, 2012 zul. geändert 2020

In Deutschland wird unterschieden in

- Abfall zur Beseitigung (andienungspflichtig)
- Abfall zur Verwertung (handelbar)

Anlage 1 Beseitigungsverfahren (D1 – D15)

Anlage 2 Verwertungsverfahren (R1 – R13)



Definitionen



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

Die **Abfalleigenschaft** eines Stoffes oder Gegenstandes **endet, wenn** dieser ein **Recycling** oder ein anderes **Verwertungsverfahren durchlaufen** hat und so beschaffen ist, dass

1. er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
3. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
4. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

Organische Abfälle

Zuordnung über Abfallschlüsselnummern (Europäische Abfallverzeichnis) AVV

- Bezeichnung sowie Einstufung nach der Überwachungsbedürftigkeit.

02	Abfälle aus Landwirtschaft, Gartenbau, Teichwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd und Fischerei sowie der Herstellung und Verarbeitung von Nahrungsmitteln
02 01	Abfälle aus Landwirtschaft, Gartenbau, Teichwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd und Fischerei
02 01 03	Abfälle aus pflanzlichem Gewebe
02 01 07	Abfälle aus der Forstwirtschaft
03	Abfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten, Möbeln, Zellstoffen, Papier und Pappe
03 03 01	Rinden- und Holzabfälle
17	Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten)
17 02 01	Holz
19	Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke
19 01	Abfälle aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen
19 08 05	Schlämme aus der Behandlung von kommunalem Abwasser
20	Siedlungsabfälle (Haushaltsabfälle und ähnliche gewerbliche und industrielle Abfälle sowie Abfälle aus Einrichtungen), einschließlich getrennt gesammelter Fraktionen
20 01 38	Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 20 01 37 fällt
20 02 01	biologisch abbaubare Abfälle
20 03 02	Marktabfälle

Primäre Nebenprodukte:

Rückstände und Abfälle stammen aus dem ersten Schritt einer Prozesskette, also der Ernte der Rohstoffe (z. B. Waldrestholz, Stroh, Landschaftspflegematerial).

Sekundäre Nebenprodukte:

Die in weiteren Verarbeitungsschritten anfallenden Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle (z.B. Sägespäne, Gülle).

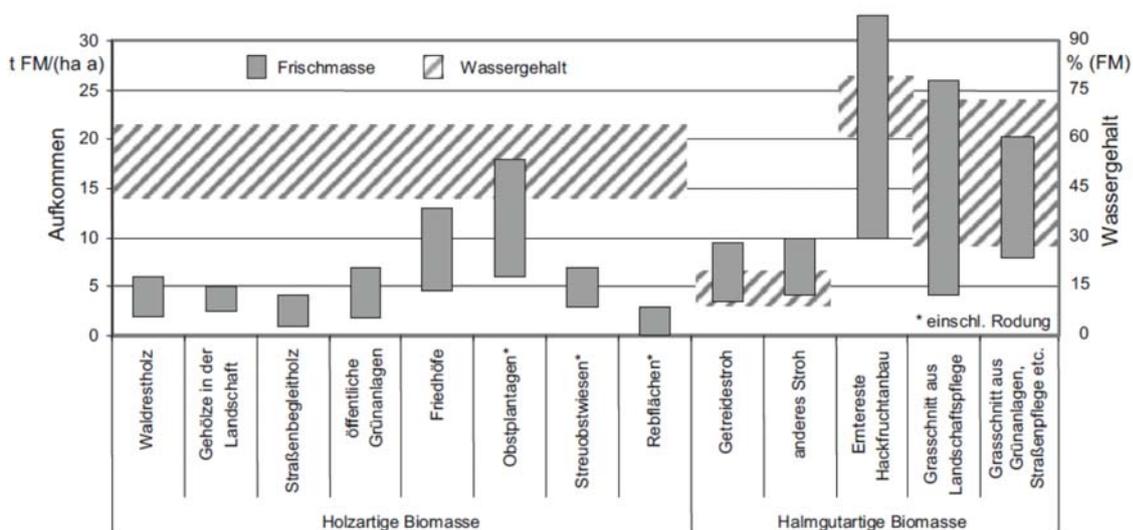
Tertiäre Nebenprodukte:

Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle die nach einem (teilweisen) Endkonsum anfallenden Stoffströme (z.B. Nahrungsmittelreste, Altholz)

Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und –klassen s. DIN EN ISO 17225

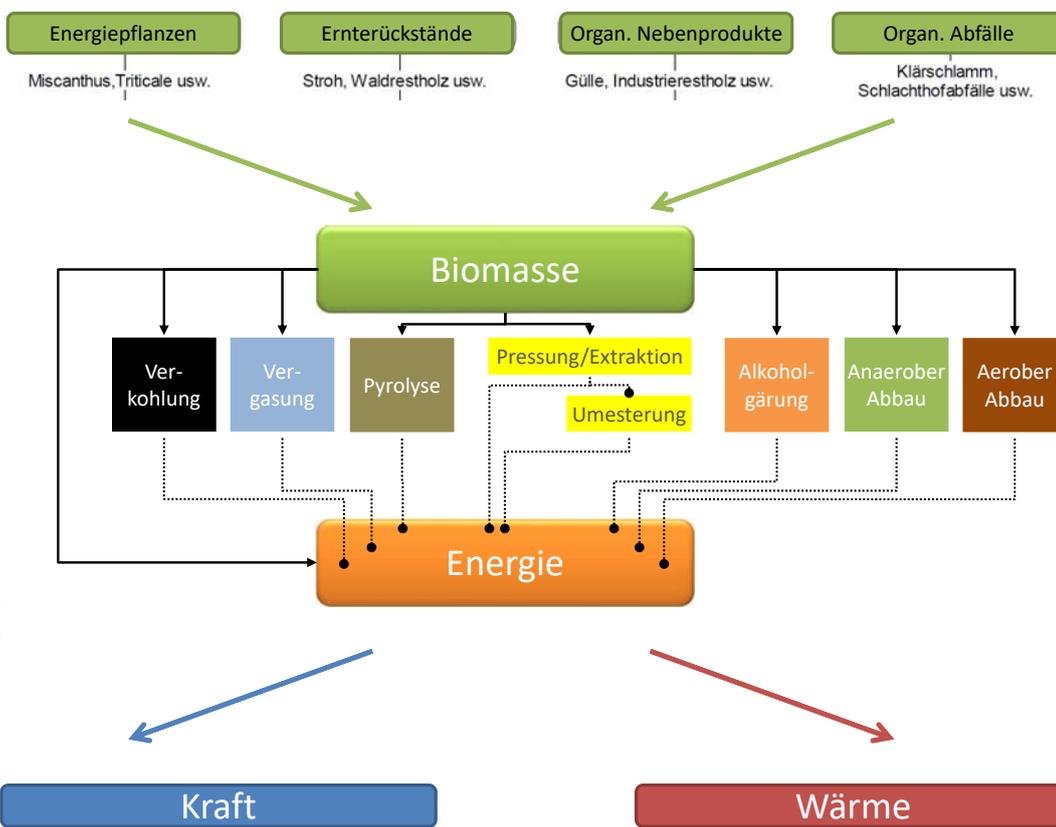
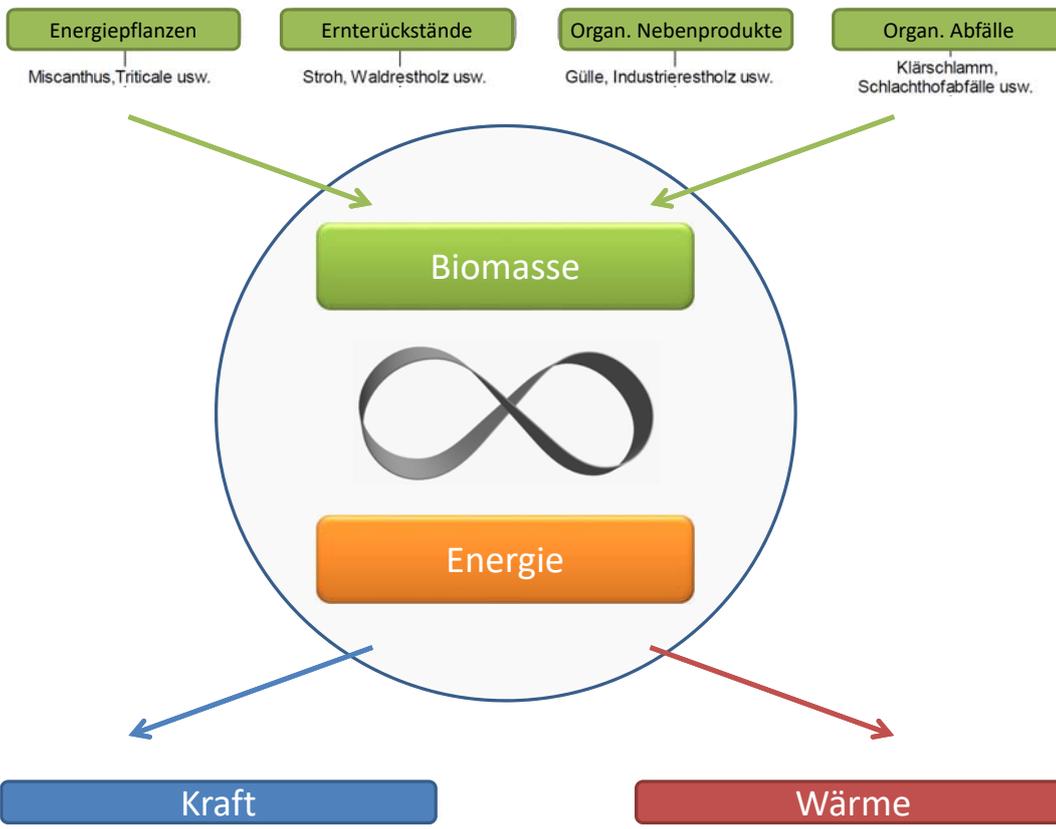


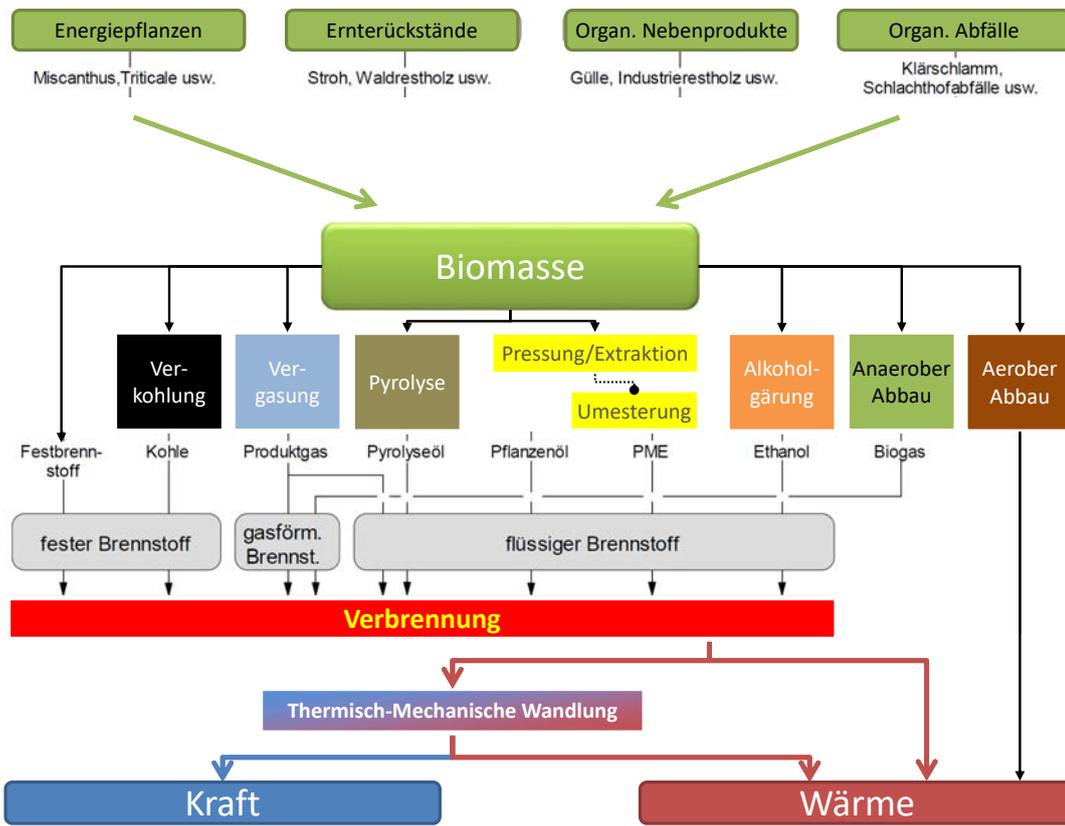
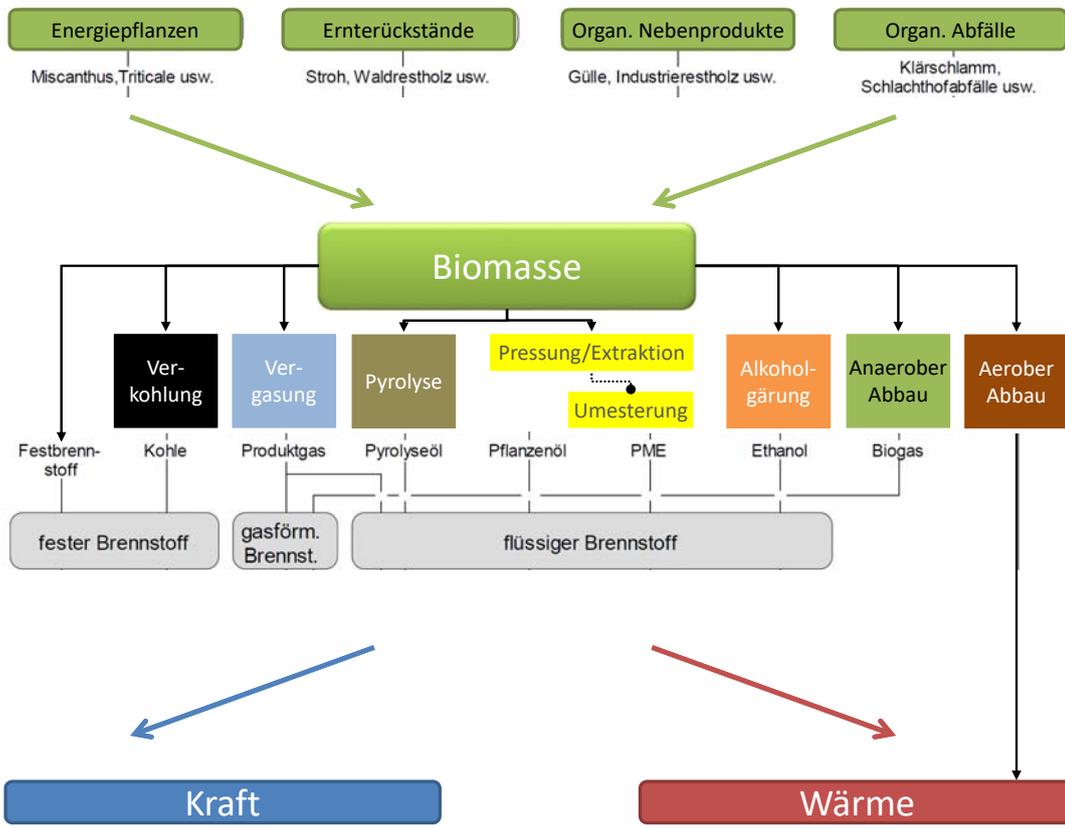
Biomassencharakterisierung für die Energiebereitstellung

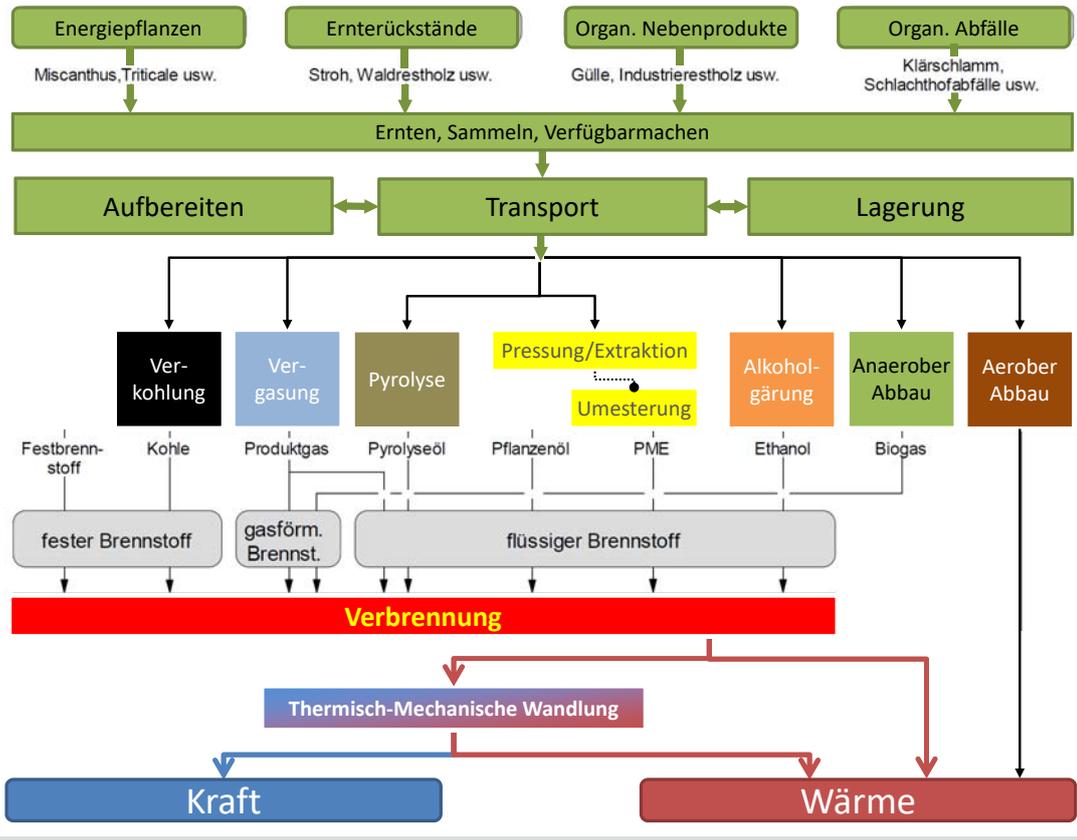


Quelle: Kaltschmitt et al. 2016, Energie aus Biomasse, Springer Verlag

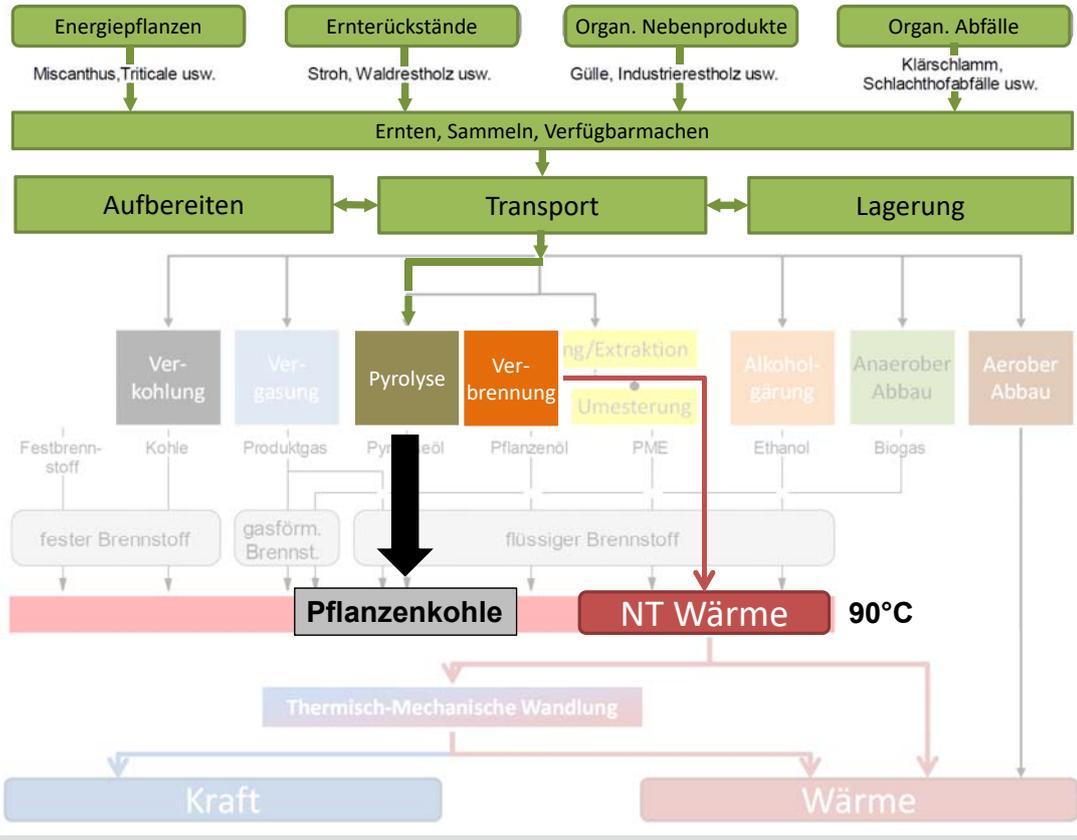






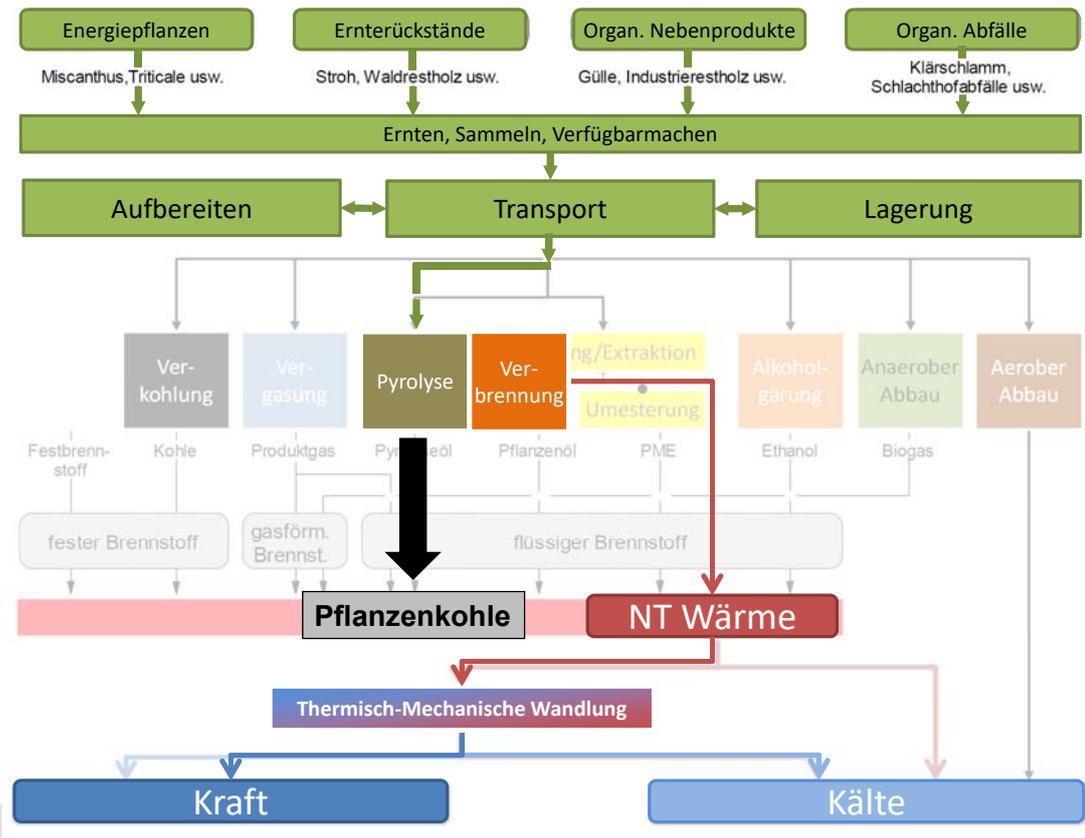


Einleitung



Einleitung

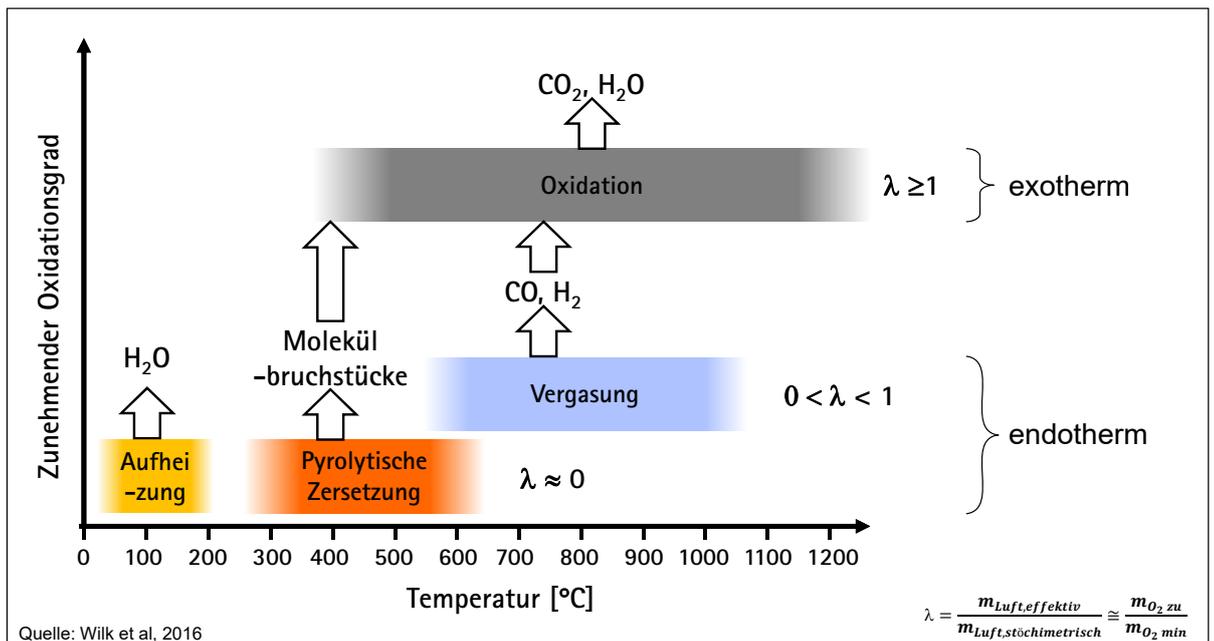




Thermo-chemische Umwandlung in Luftatmosphäre

Pyrolyse
griech.
pyr: Feuer,
lysis: (Auf)lösung

Thermische Spaltung chem. Verbindungen in Abwesenheit von Sauerstoff bzw. Sauerstoff-Mangel.



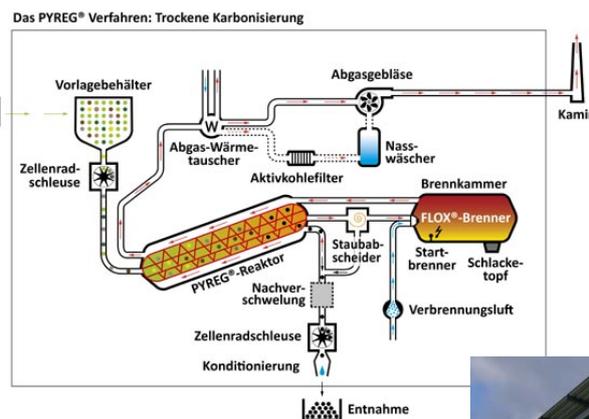
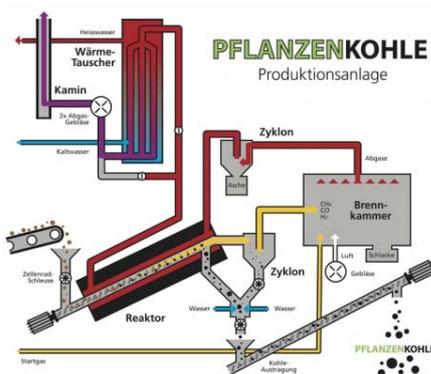
1. Gleichmäßige Erwärmung des zu pyrolysierenden Gutes bei definierter Heizrate- Wärmezufuhr
2. Abtransport der sich bildenden Dämpfe und Gase und Nachbehandlung
3. Nutzung der Energie der Nebenprodukte für den Pyrolyseprozess
4. Stoffliche ggf. energetische Nutzung des Produktes – Wirtschaftlichkeit!!

abgeändert, nach Neubauer, 2016



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

Pyrolyseverfahren (Auswahl nach Anlagenprinzip)



Quelle: <https://www.sonnenerde.at/de/pflanzenkohle/produktion/>

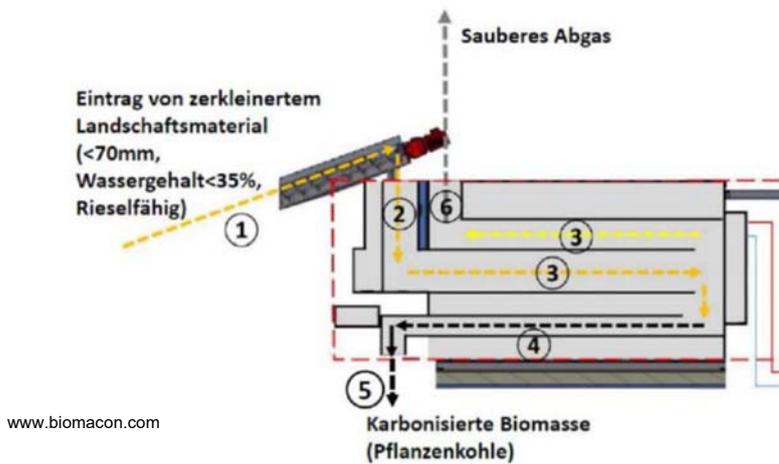
Quelle: <https://energyawards.handelsblatt.com/allgemein/pyreg-d1/>

Pyrolysereaktor mit anschließendem Prozessen für die Verwertung der Gase/Zwischenprodukte

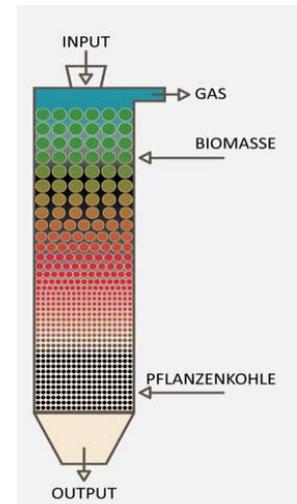
Quelle Foto: <http://www.ithaka-journal.net/wpForschung1/uploads/2018/06/107-PYREG-system.jpg>



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021



Horizontaler Pyrolysereaktor mit integrierter Verbrennung der Gase/Zwischenprodukte „Einkammer-Pyrolyse“



Vertikaler Pyrolysereaktor mit anschließendem Prozess für die Verwertung der Gase/Zwischenprodukte



Integrierte Energieversorgung, Kohlenstoffsequestrierung und Behandlung kommunaler organischer Abfälle durch kombinierte solare Trocknung und Pyrolyse

Problem: Lignozellulosehaltige Organische Abfälle

Herkunft

- Landschaftspflegematerial
- Straßenbegleitgrün
- Strauch- und Grünschnitt
- Waldrestholz / Schwachholz

Eigenschaften

- Hoher Aschegehalt & niedriger Heizwert im Vergleich zu Laub-/Nadelwaldholz
- Langsame biologische Abbaubarkeit / geringe Eignung zu anaeroben Vergärung

Indisch – Deutsches Konsortium

**Institut für Siedlungswasser-
wirtschaft und Abfalltechnik**
Leibniz Universität Hannover

**Central Leather Research
Institute (CLRI)**
Council of Scientific & Industrial
Research (CSIR), Chennai, Indien



**Ramky Enviro
Engineers Ltd.**
Hyderabad, Indien

Biomacon GmbH
Rehburg, Deutschland

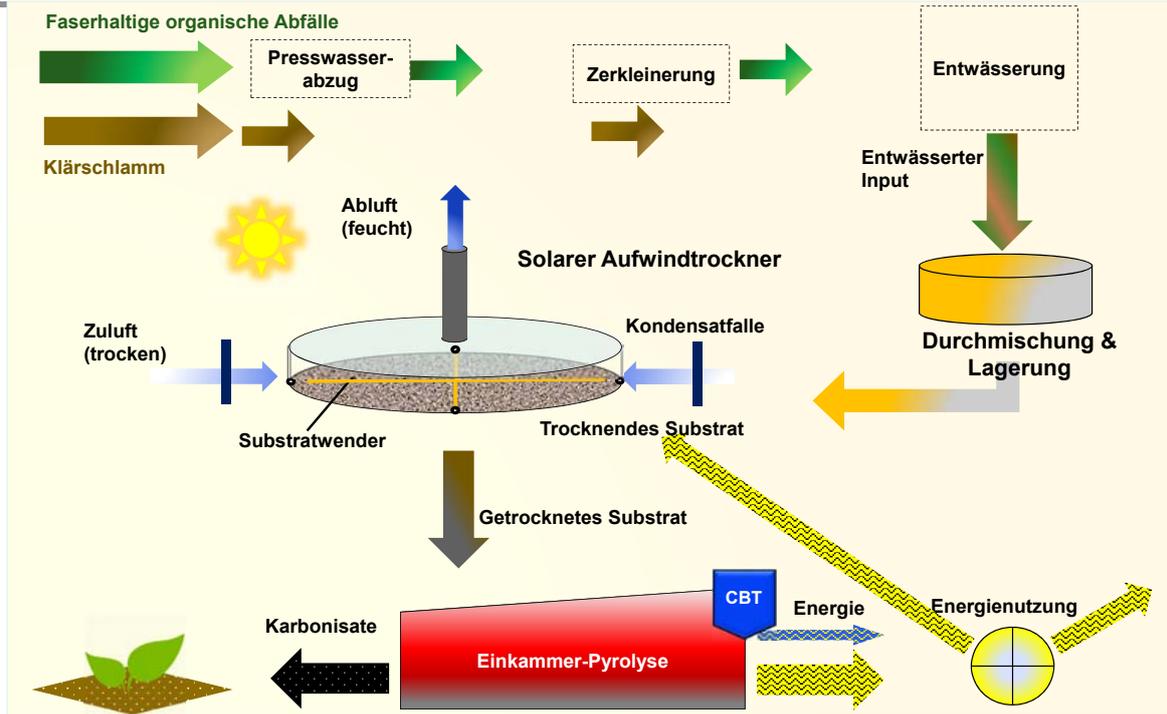


Current Status of Waste „Handling“ in India



Problem Statement

PYRASOL: Prozessdarstellung



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021



Solar Trocknung in Indien



© Foto: D.Weichgrebe

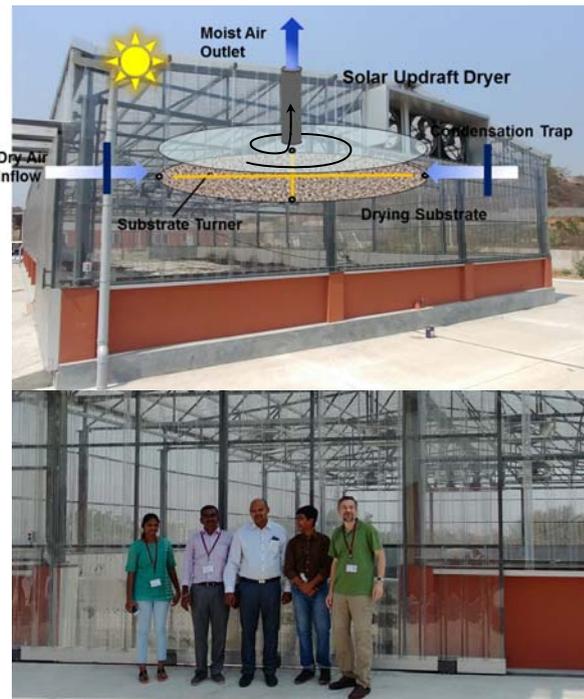
© Foto: D.Weichgrebe

Project Approach



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

- Natürliche Belüftung und Luftdurchmischung durch Wirbelschornsteineffekt
 - Keine mechanischen Lüftungssysteme erforderlich
- Trocknung und Entkeimung mit Sonnenenergie
 - Reduktion der Energiekosten
- Co-Trocknung von gemischten faserigen organischen Abfällen und Klärschlamm inkl. Nutzung der Pyrolyse-Abwärme und Kondensatfalle für Zuluft
 - Minimierung des Flächenverbrauchs und Erhöhung der Trocknungseffizienz



© Foto: D.Weichgrebe



Solar Aufwindtrockner Modellierung

Strahlung – Biol. Trocknung – Konvektion

Trocknungsrate

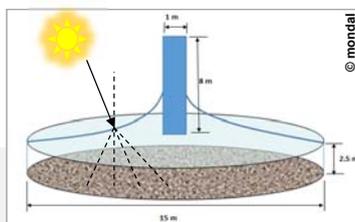
$$\Gamma_{ev} = \rho_{air} \cdot q_v \cdot (\varphi_{out} - \varphi_{in}) = \rho_{air} \cdot q_v \cdot \Delta\varphi \quad \left[\frac{\text{kg (water)}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$$

$$\Delta\varphi = \alpha \prod_{j=1}^p (P_j + \beta_j)^{Y_j}$$

$$= 1.96 \cdot 10^{-11} \cdot [(R_{amb} + 1100)^{2.322} \cdot (T_{amb} + 13.0)^{1.292} \cdot (q_v)^{-0.577} \cdot (q_m + 0.0001)^{0.013} \cdot (DSC_{in} + 0.26)^{-0.353}]$$

Trocknungsfläche

$$A_d = \frac{1}{\bar{E}} \cdot m_{wet} \cdot \left(1 - \frac{DSC_{in}}{DSC_{out}}\right) \quad [\text{m}^2]$$



© mondial

Luftgeschwindigkeit im Kamin

$$v_{chim} = \left(\frac{1}{6} \cdot \frac{A_1 - \sqrt{3} \cdot \sqrt{A_2}}{c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot T_{amb} \cdot D_{chim}^2 (1 + \xi)} \right)$$

$$A_1 = 3 \cdot \beta \cdot D_{coll}^2 \cdot T_{amb} \cdot (1 + \xi)$$

$$A_2 = D_{coll}^2 \cdot T_{amb} \cdot (1 + \xi) \cdot \left((T_{amb} \cdot (1 + \xi) \cdot g \cdot h_{chim} \cdot \alpha \cdot G \cdot \beta) \cdot \beta \right) / \left(+4 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{A_1} \cdot c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot D_{chim}^2 \right)$$

Durchmesser des Solar Trockners $D_{coll} = 2 \cdot \sqrt{(A_d + A_{chim})/\pi}$

with,

ρ_{air} - air density in [kg/m³]

$\Delta\varphi$ - humidity ratio difference [%]

R_{amb} - amb. solar radiation [W/m²]

T_{amb} - amb. temperature [K],

q_v - exhaust ventilation rate [m³/m²·h]

q_m - air mixing rate [m³/m²·h],

\bar{E} - avg. evaporation rate [kg (water)/m²·a],

m_{wet} - wet substrate input [kg/a]

DSC_{in} - dry solid content at the beginning of drying period [%]

DSC_{out} - dry solid content at the end of drying period in [%].

v_{chim} - max. vertical air velocity in the chimney inlet [m/s],

c_{air} - specific heat capacity of air [1,005 J/kg·K],

D_{chim} - diameter of the chimney [m],

ξ - friction loss coefficient [-],

α - effective solar absorptivity of the material in the collector [-],

β - thermal loss coefficient [W/m²·K],

g - gravitational acceleration [m/s²],

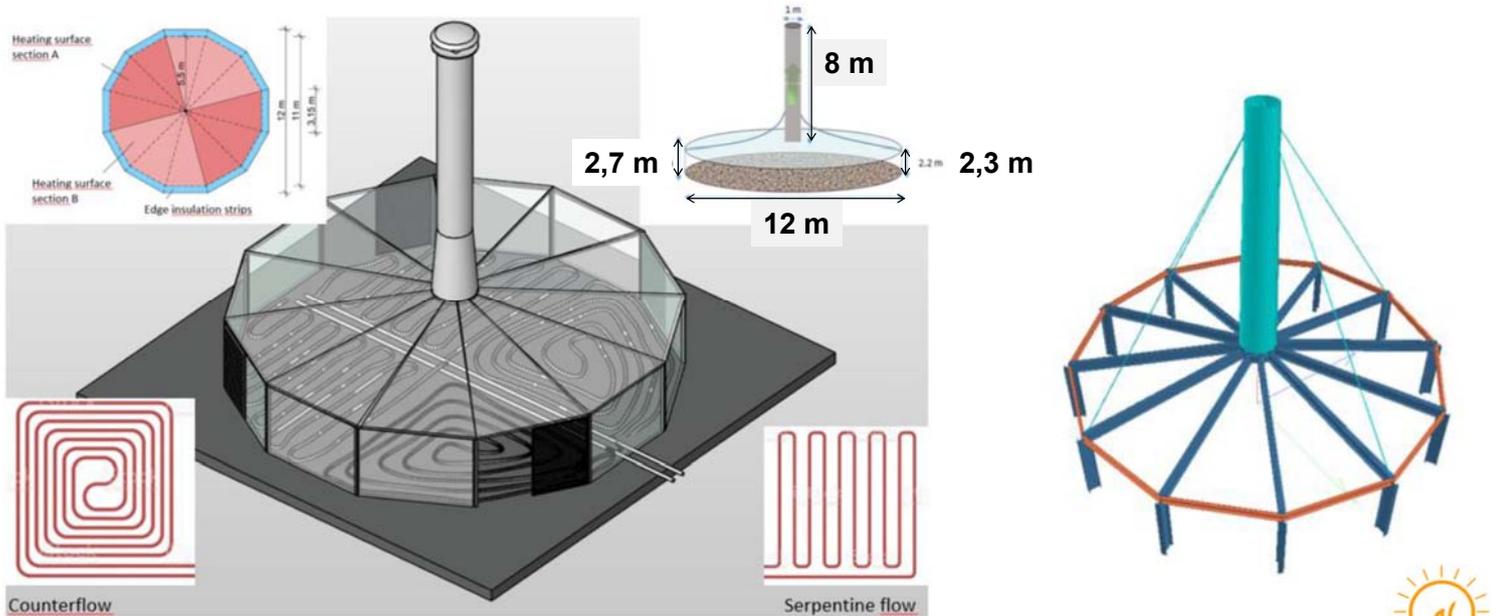
h_{chim} - height of the chimney [m]

D_{coll} - diameter of the collector [m],

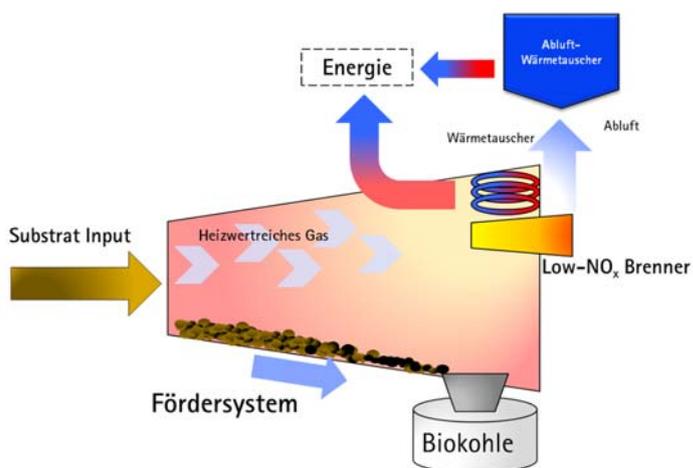
A_{chim} - cross section area of the chimney [m²], and

G - global solar radiation [W/m²].

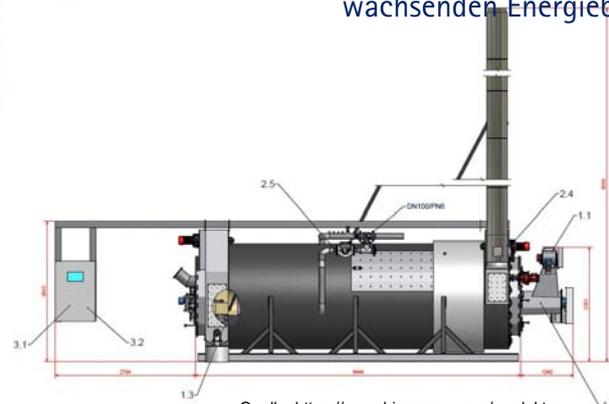




Einkammer-Pyrolyse mit Brennwerttechnik



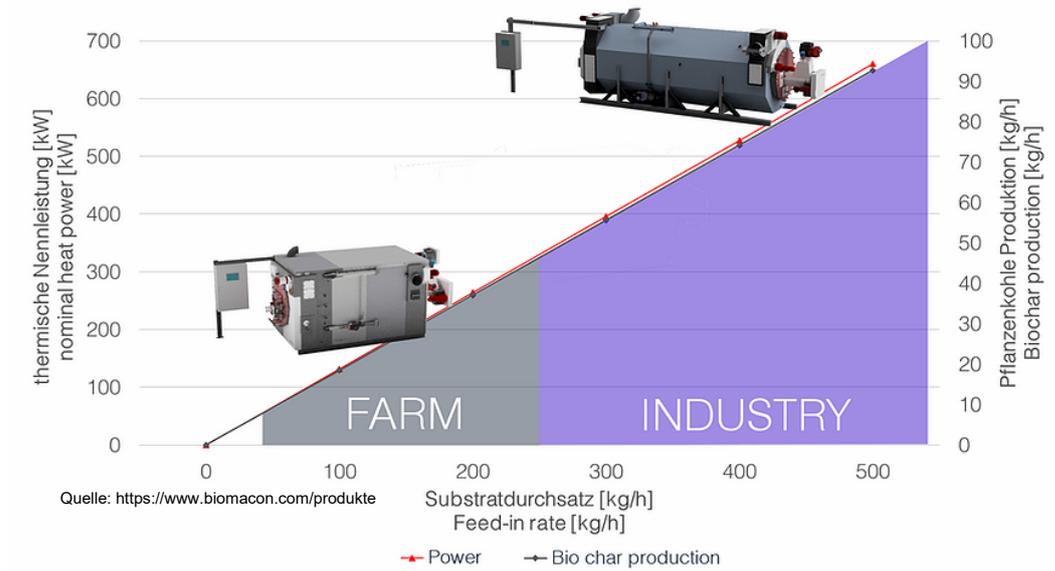
- Rückgewinnung von Kondensationsenergie (Brennwertkesseltechnik)
 - Steigerung der Energieeffizienz und Wettbewerbsfähigkeit des Marktes für den Pyrolyseprozess
 - Höhere Energieausbeute zur Deckung des wachsenden Energiebedarfs



Quelle: <https://www.biomacon.com/produkte>

Pyrolyseanlage von BIOMACON (C63-F 35-63kW)

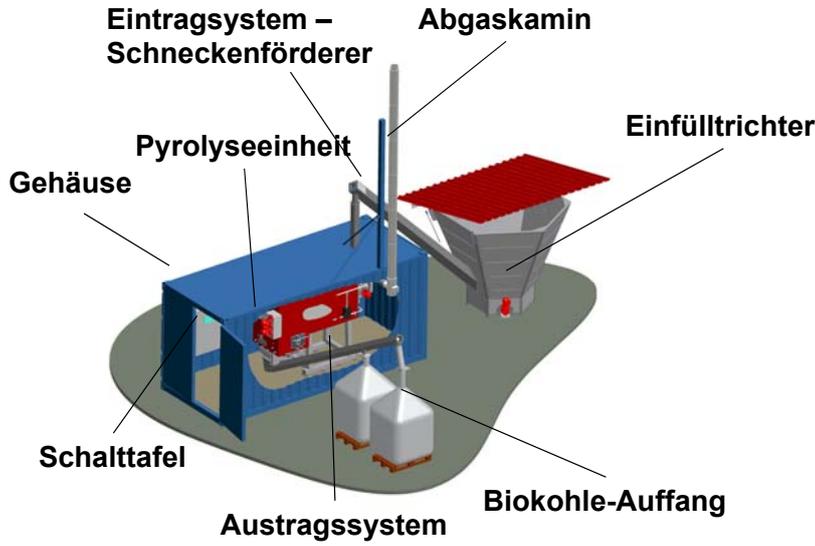
Anlagenauslegung System dimensioning



Pyrolyseanlage von BIOMACON (C63-F 35-63kW)

Anlagenbezeichnung/ System Description	Grundfläche/ Space	Biomasse Eintrag/ Biomass intake	Pflanzenkohle/ Biochar	Thermische Leistung/ Thermal Power
C40-F	1900 x 4600	32 kg/h	7 kg/h	25-40kW
C63-F	1900 x 5100	45 kg/h	10 kg/h	35-63kW
C100-F	1900 x 5400	75 kg/h	16 kg/h	50-100kW
C160-F	2500 x 6100	120 kg/h	26 kg/h	80-160kW
C250-I	2500x 8700	188 kg/h	40 kg/h	125-250kW
C400-I	2500x 10200	300 kg/h	63 kg/h	250-400kW
C500-I	2500x 11700	318 kg/h	68 kg/h	300-500KW

Pyrolyseanlage von BIOMACON (60 kW)



Quelle Foto: U. Stuer



Quelle Foto: S.V. Srinivasan

Inauguration 24.04.2021

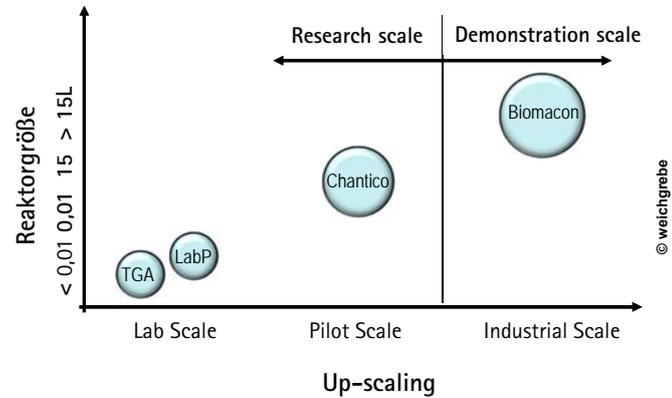
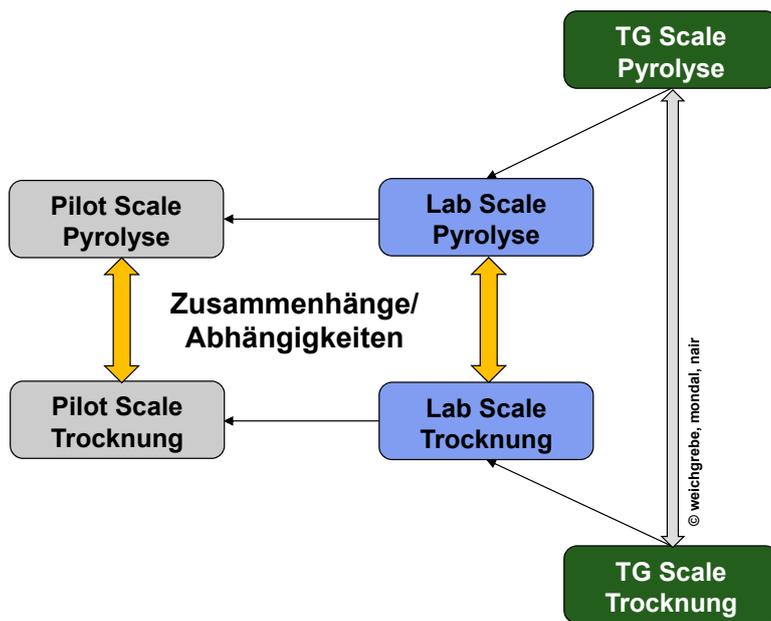


Quelle: <https://www.biomacon.com/produkte>



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

Scaling Effekte / Parameterermittlung



Project Status



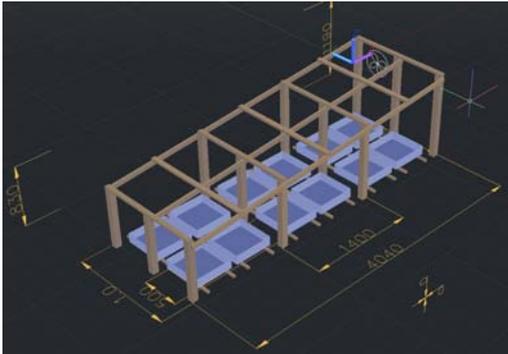
PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021



Lab Scale Solar Dryer



© Foto, R. Nair



© weichgrebe, montdal, nair

Konstruktion des Trockners im Labormaßstab

- UV-geschützte 6-mm-Doppelstegplatten aus PC
- Bodenbelag aus 25mm Steinwolle in Sandwichbauweise
- Automatischer Betrieb mit T-, Feuchte- und Strahlungssensoren

Messparameter

- Feuchtigkeitsverlust über die Trocknungszeit (dm/dt)
- Temperaturprofile des Substrats
- Verweilzeit (Trocknungsdauer) im Trockner
- Wassergehalt (WG), Glühverlust (GV) und Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTM) des getrockneten Produkts
- pH-Wert und Leitfähigkeit des Kondensats
- Brennwert des getrockneten Substrats



Lab Scale Versuche

TGA vs. Labor Pyrolysereaktor



© Fotos M. Velusamy

Materialien

- Ofengetrockneter Klärschlamm, Bananenstauden und Gärrest aus der Biogasanlage

Methode

- Pyrolyse bei linearen Heizraten von 10 und 15K/min auf 500 °C mit Haltezeiten von 45 und 90 Minuten.
- Stickstoffpülung von 150 ml/min
- Verwiegung vor und nach der Pyrolyse
- Kondensation des Bioöls durch Kühleinheit und Entfernung mit Aceton
- Lagerung der Biokohle

TGA Thermogravimetrie Analysator



Semi Labscale Pyrolyse (Chantico)

<https://www.chantico-terrassenofen.de/>



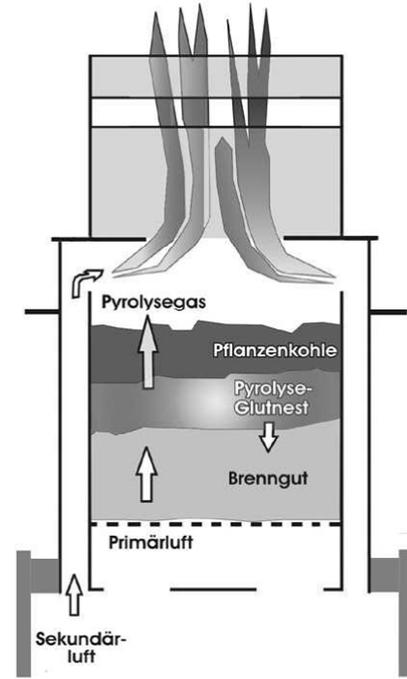
© foto: weichgrebe



© foto: weichgrebe



© foto: weichgrebe



manuelle von chantico terrace oven" s manual <https://www.chantico-terrassenofen.de/>



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

Vergleich

Chantico



© foto: weichgrebe



© foto: weichgrebe

Biomaccon



© foto: weichgrebe

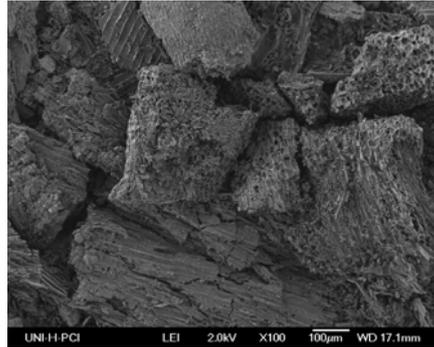
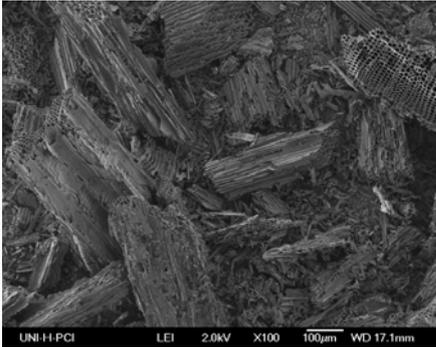
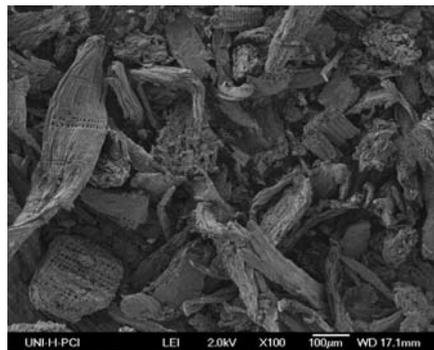
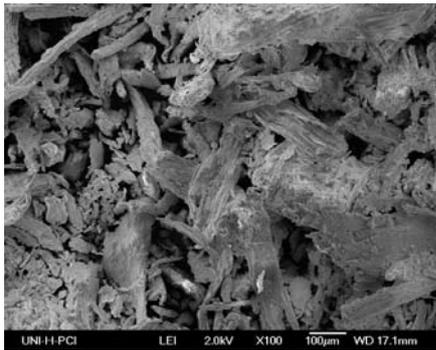


© foto: weichgrebe



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

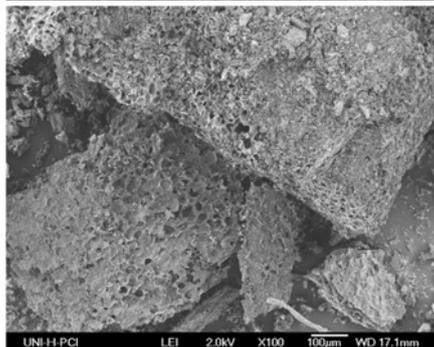
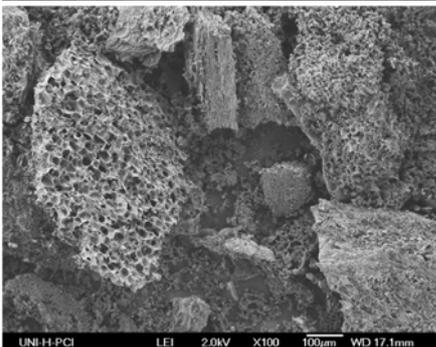
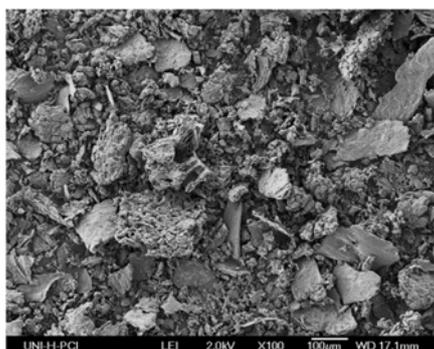
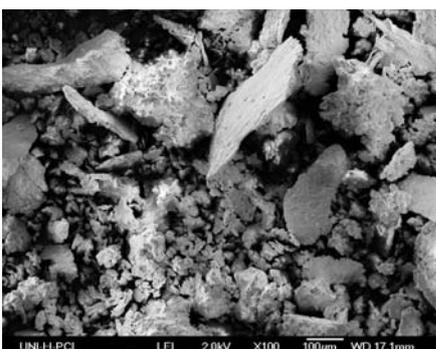




Holzkohle

- Faserartige, ungleichmäßige Strukturen
- Keine unverkohlten Anteile
- Porenbildung

© foto: Prof. Behrens



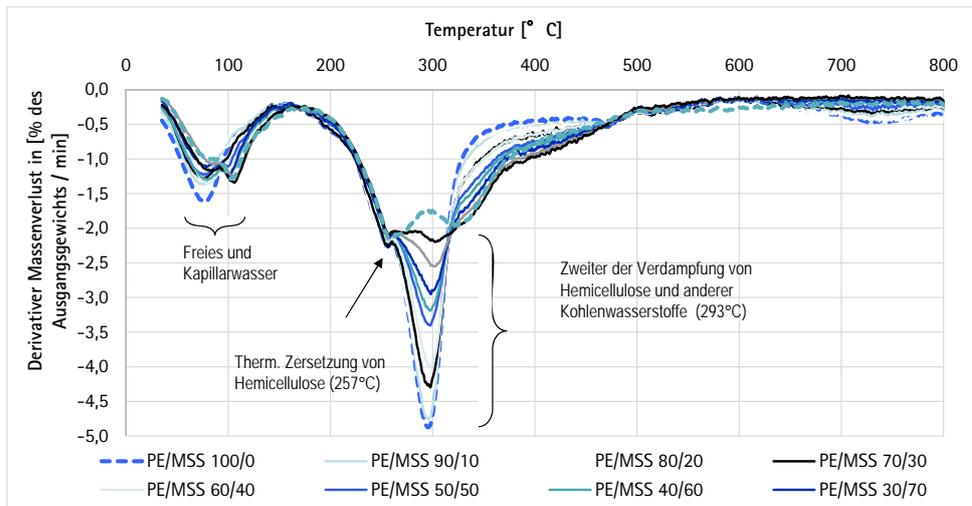
Kohle aus Walnussschalen

- plättchenartige, ungleichmäßige Strukturen
- Porenbildung

© foto: Prof. Behrens



Thermogravimetrische Eigenschaften von Mischung aus Bananen-Peduncle und Klärschlamm



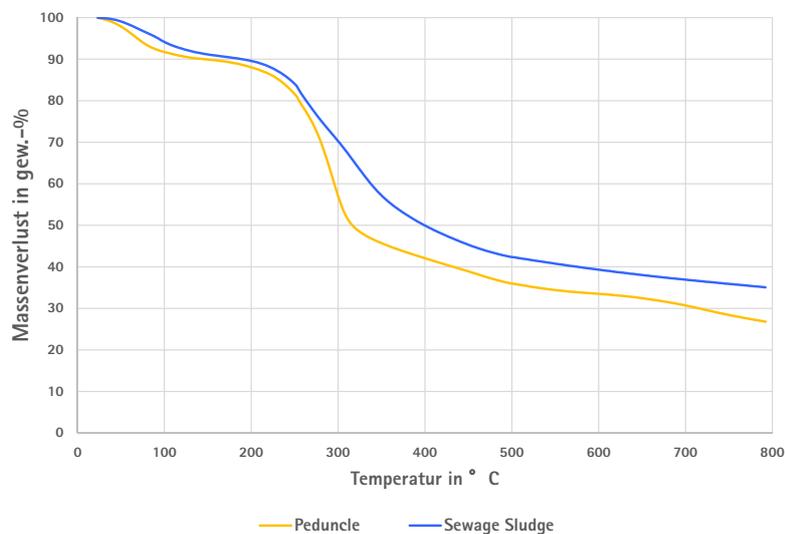
PE Banana peduncle
MSS Municipal Sewage sludge



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

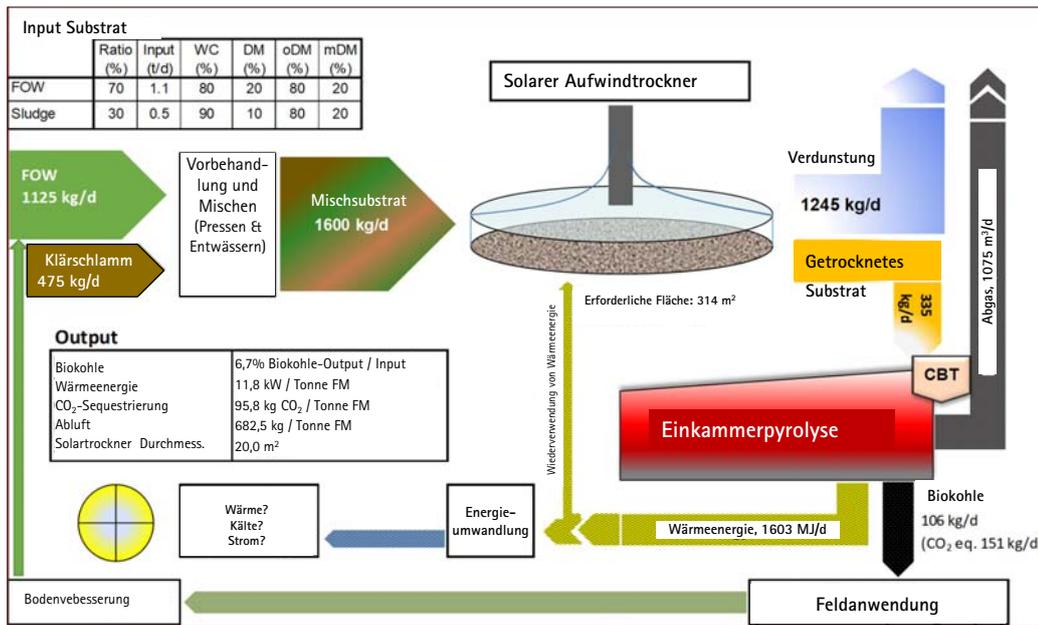


Thermogravimetrische Eigenschaften von Bananen-Peduncle und Klärschlamm



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021



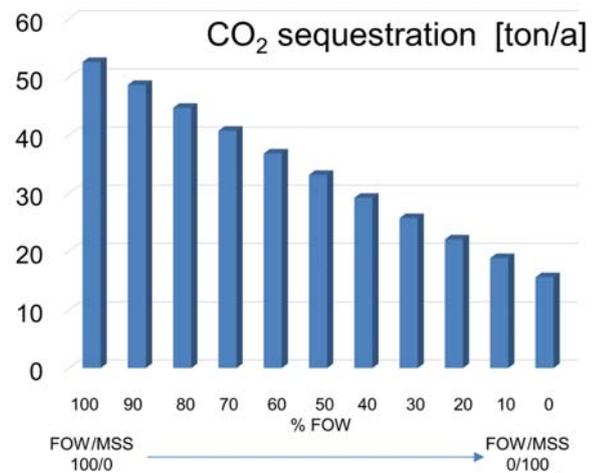
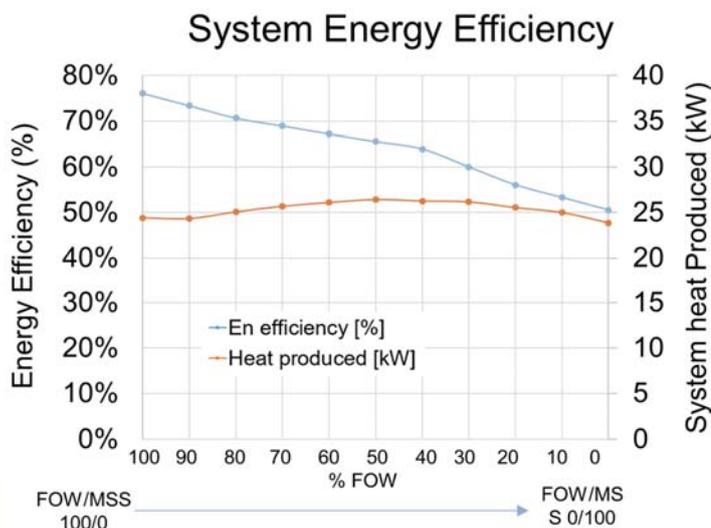


Frischmasse (FM)	1600 kg/d
Trockenmasse (TM)	335 kg/d
Biokohle	106 kg/d
Energieertrag	1603 MJ/d
	280 kWh/d
	=
	11.8 kW/t TM
CO ₂ Seq. (Biokohle)	151 kg/d



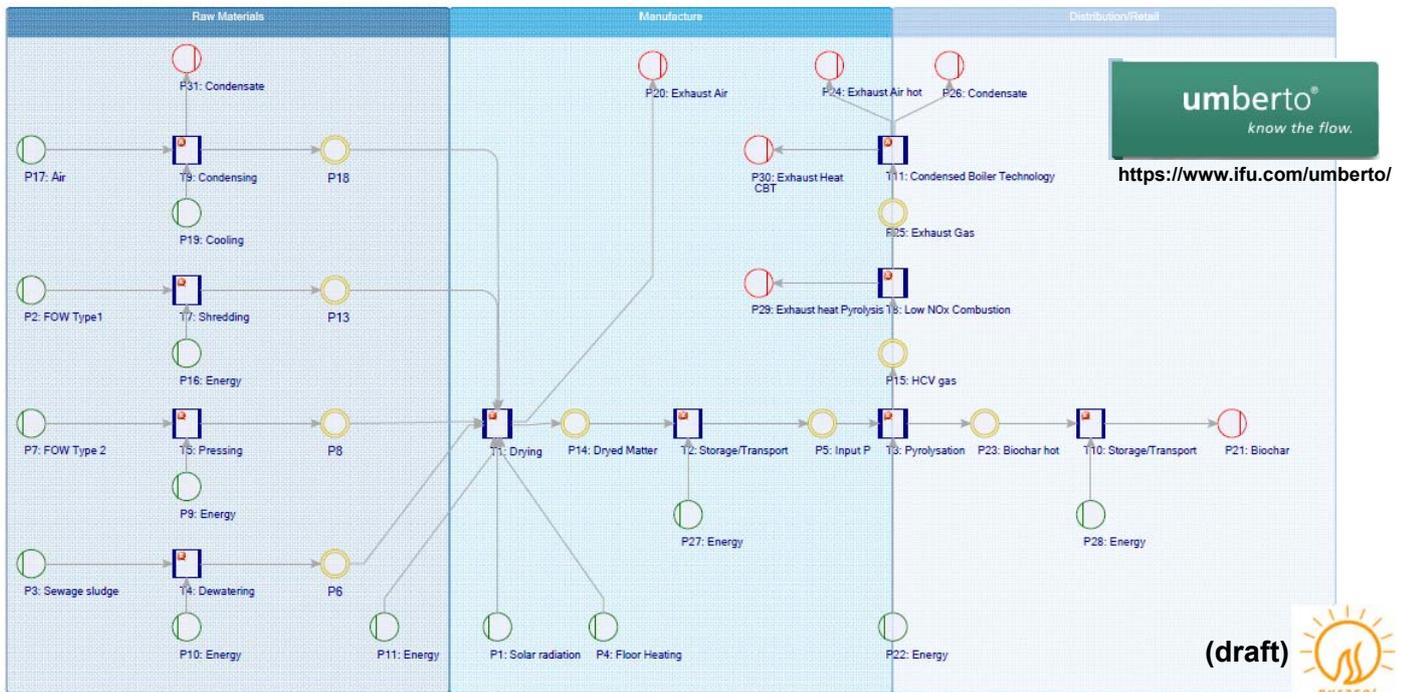
System Analyse

Systemeffizienz and CO₂ Sequestrierung



Project Outcomes





PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

Wertschöpfung

Energienutzung (95°C NT)

Fußbodenheizung des Solartrockners -> Tag und Nachtausgleich des Trocknungsprozesses

Adsorptionskälte -> Bereitstellung von Kälte / Kühlraum für den Gemüsemarkt -> Reduzierung von Abfällen

Stirling Motor

Thermoelektrischer Generator

Organic Rankine Cycle (ORC)

Bereitstellung von Strom für den Eigenbedarf der Anlage

Biokohle

Aktivierung mit Gärrest/Kompost -> Einsatz in der Landwirtschaft (Humusaufbau / Wasserhaltevermögen)

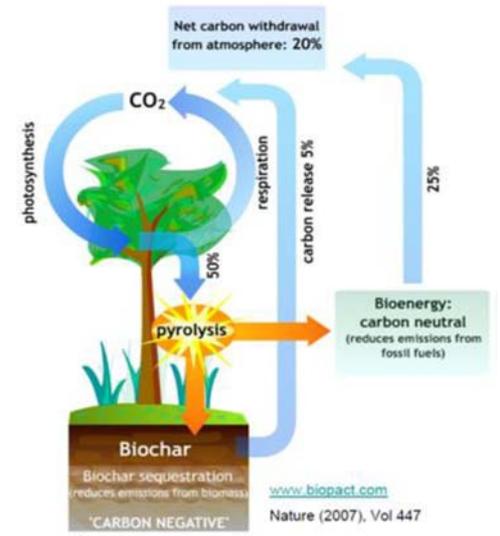
Zuschlagsstoff für die Sanierung belasteter Böden (insbesondere durch Gerbereien)



PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, 11. Ringvorlesung LiFE_2050, 9.6.2021

Nachhaltiges organisches Kreislaufwirtschaftskonzept

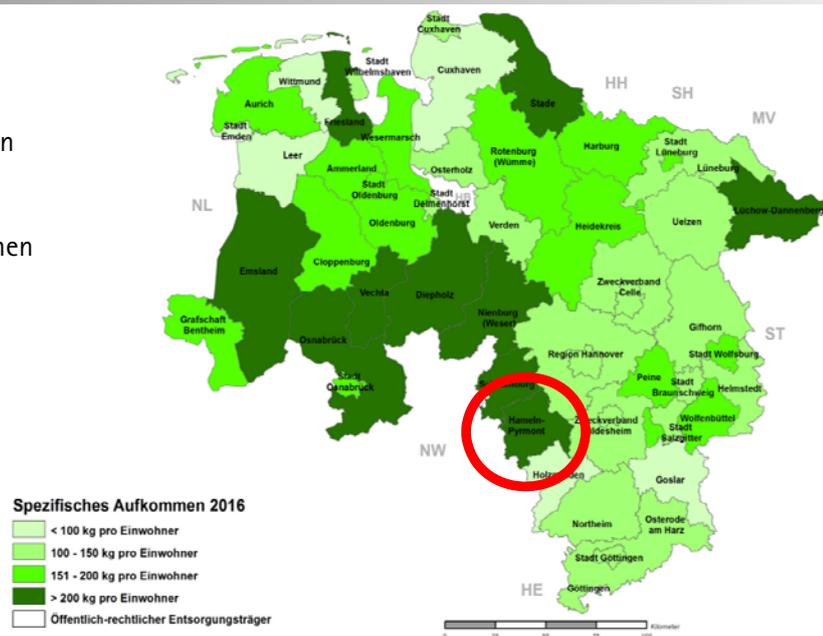
- Keine Prozessabfälle
- Negative CO₂ Bilanz
- Energieautarkes Anlagensystem
- Landgewinnung / Bodenverbesserung
- Vollständige Entfernung von Pathogenen
- Stabile Bedienung und Handhabung



Anwendung in der Abfallwirtschaft (Abschätzung)

Niedersachsen

- Bioabfallaufkommen
60 kg/Ew*a
- Grünabfallaufkommen
64.4 kg/Ew*a



Quelle: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (2017) Abfallbilanz 2016.

Jahr	2011	2014	2015	2016	2017
Ew	152682	147813	148281	148265	148296
[Mg/a]	28226	35509	34860	36162	41266
[Mg/(Ew*a)]	185	240	235	244	278

Grünschnittaufkommen Landkreis Hameln Pymont 2017¹⁾
 278 kg/Ew*a (41.266 Mg/a)¹⁾

 20-23.000 Mg/ Kompost²⁾
 8.750 Mg/a Energieholz²⁾

Straßenbegleitgrün		1.198 Mg/a Trockenmasse	275 Mg/a CO ₂ Seq.
Waldrestholz		16.144 Mg/a Trockenmasse	4.644 Mg/a CO ₂ Seq.
Schwachholz		12.506 Mg/a Trockenmasse	3.599 Mg/a CO ₂ Seq.

1) Abfallbilanz 2017 des Landkreises Hameln-Pyrmont, KAW Hameln

2) Verteilung gerechnet nach Rausen T (2013) Organisches Stoffstrommanagement auf der Grundlage von Kompostierung und Vergärung. Witzenhausen-Institut

CO₂ Emissionen Wirtschaft Landkreis Hameln-Pyrmont 2010

8,9 Mg/a CO₂ pro Einwohner²⁾  1.360.000 Mg/a CO₂

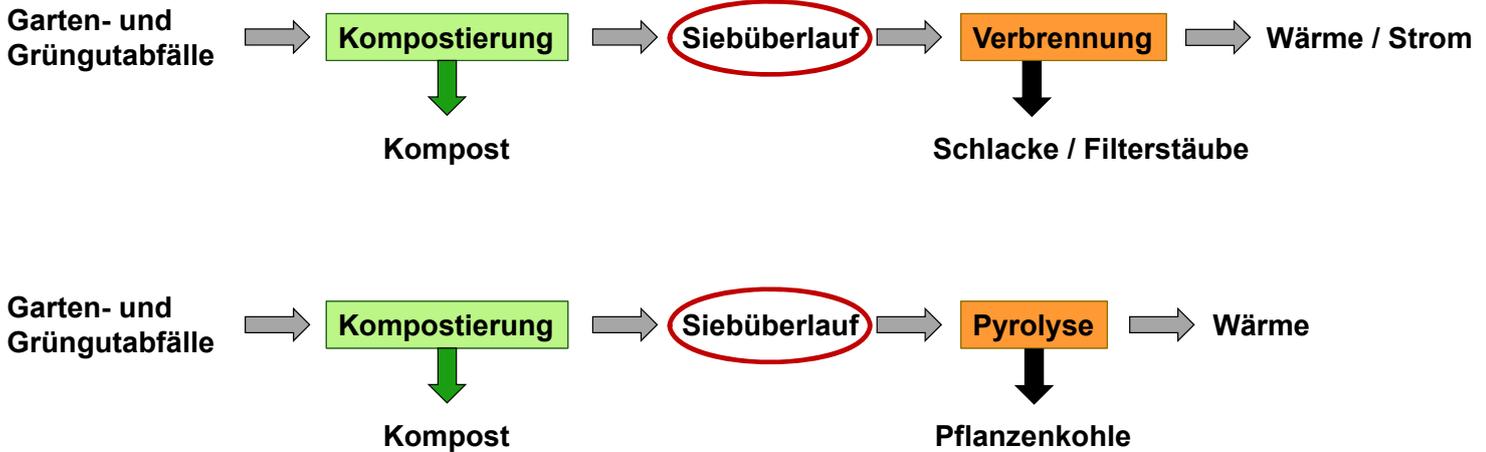
Einsparung: 2,5 % durch Herstellung von Karbonisaten aus organische Biomasse

Zusätzlicher Nutzen:

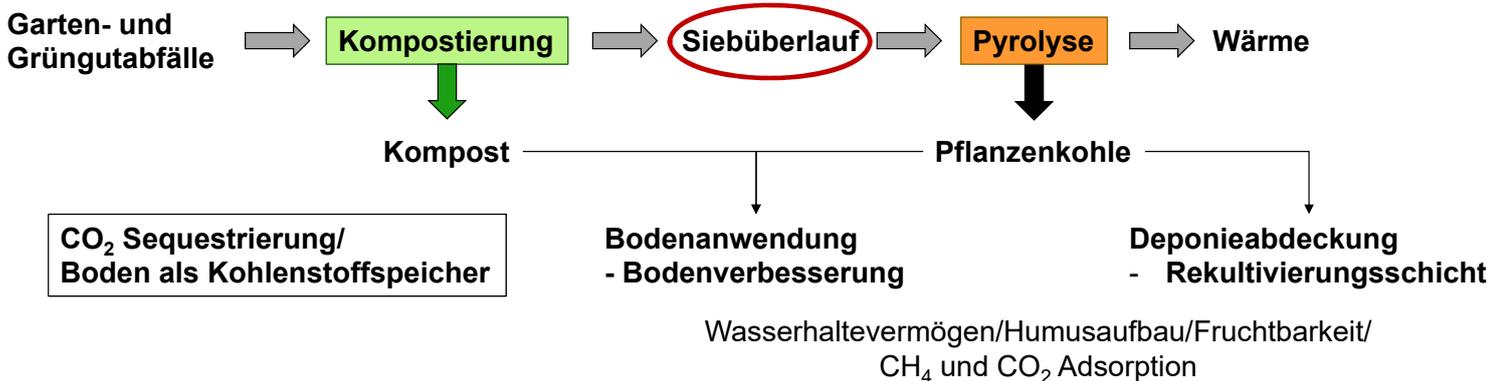
- Bodenverbesserung/Verbesserung Pflanzenwachstum
- Aufbau Humusschicht
- Wasserspeicherfähigkeit

2) Landkreis Hameln-Pyrmont (2010) Integriertes Klimaschutzkonzept für den Landkreis Hameln-Pyrmont und seine Städte und Gemeinden

Anwendung der Pyrolyse direkt in der Abfallwirtschaft



Anwendung der Pyrolyse direkt in der Abfallwirtschaft



Anhang 5 DepV:

Die Materialien für die Rekultivierungsschicht dürfen die langfristige Funktionsfähigkeit der Entwässerungsschicht nicht beeinträchtigen.

Sie sollen über eine hohe nutzbare Feldkapazität (nFK) sowie über ausreichende Luftkapazität zur Sicherstellung eines hohen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrates verfügen.

nFK beschreibt den Anteil des Haftwassers, den die Wurzeln mit ihren Saugkräften dem Boden entreißen können.

Alles, was den Humusaufbau und die Durchwurzelung verbessert, erhöht die nFK.

Wirtschaftlich tragfähige Umsetzung?

- Robuste Anlagen mit kalkulierbarer Lebensdauer
- Brennstoffverfügbarkeit und –preis (Nebenprodukte /Reststoffe/ „Abfall“-Biomassen)
- Verwertungspfad der Pflanzenkohle sichern (Eigenverbrauch (Kaskadennutzung), Verkauf)
- Anlagenauslastung und Nutzungsgrad der (Ab)wärme
- Synergieeffekte mit anderen Biomassenutzungstechnologien (Gärreste, Holzverarbeitung, Obst- Weinbau)
- Synergetische kommunale Lösungswege

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Leibniz Universität Hannover
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (ISAH)

PD Dr.-Ing. habil. Dirk Weichgrebe, Moni Mondal, M.Sc., Rahul Ramesh Nair

Co-authors



Rahul Ramesh
M.Eng.



Moni Mondal
M.Sc.



Dirk Weichgrebe
PD Dr.-Ing. habil.

Welfengarten 1,
30167 Hannover
+49 (0) 511 762 2899
+49 (0) 511 762 2881
weichgrebe@isah.uni-hannover.de
www.isah.uni-hannover.de