

Brandvermeidung bei der Lagerung von biogenen Brennstoffen am Beispiel von Kiefernholz

Fabio Ferrero

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Fachgruppe II.2 „Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme“
AG „Brennbare Schüttgüter und Stäube, feste Brennstoffe“
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

ATB Workshop

Potsdam-Bornim, 18 Juni 2008

GEFÖRDERT VON:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Biomasse als Energieträger:

- ca. 100 Biomasse-Kraftwerke in Deutschland;
- Leistungseinheiten bis zu 100 MW (thermisch) und 20 MW (elektrisch);
- Brennstoff: Alt- oder Restholz aus der Holzindustrie.

Obwohl die Energieherstellung kontinuierlich gewährleistet werden muss, werden die Energieträger diskontinuierlich geliefert.

→ Lagerung (bis zu mehreren Tausend Tonnen)

Problem: **Selbstentzündung**

Häufig bei großer Lagermenge (nach langen Zeiten)

Vorfälle:

Holzdeponie Rothenburg, 2000

www.faktuell.de/Hintergrund/Background48.shtml

Spänebunker des Biomasse-Heizkraftwerks Traunreut, 2005

<http://www.kreisfeuerwehrverband-traunstein.de/17.09.05.html>



Folgen unerwünschter Brände:

- Emission von CO₂ (durch Ersatz mit fossilen Energieträgern)
- Emission von toxischen Stoffen
- Wirtschaftliche und menschliche Verluste

→ **Ziel:** Brandvermeidung (Löschung ist zeit- und geldaufwendig)

Ursachen der Selbstentzündung:

- in den Halden treten biologische Prozesse und langsame Oxidationen auf;
- diese Reaktionen verlaufen exotherm;
- Feststoffschüttungen sind schlechte Wärmeleiter;
- die Wärmeproduktion kann größer als die Wärmeabgabe sein.

→ **Wärmestau** → **Selbstentzündung**

Faktoren, die die Selbstentzündung beeinflussen:

- physikalische und chemische Eigenschaften
 - Porosität (Schüttdichte);
 - Kinetik/Stöchiometrie/Wärmeproduktion der Reaktion;
 - Feuchtegehalt.
- Umgebungsfaktoren
 - Umgebungstemperatur;
 - Niederschlag;
 - Wind.
- Lagerungsgeometrie.

Geometrie:

- Volumen durch Oberflächen-Verhältnis **V/A**:
 - Wärmeproduktion: proportional zu V (m³)
 - Wärmeabfuhr: proportional zu A (m²)

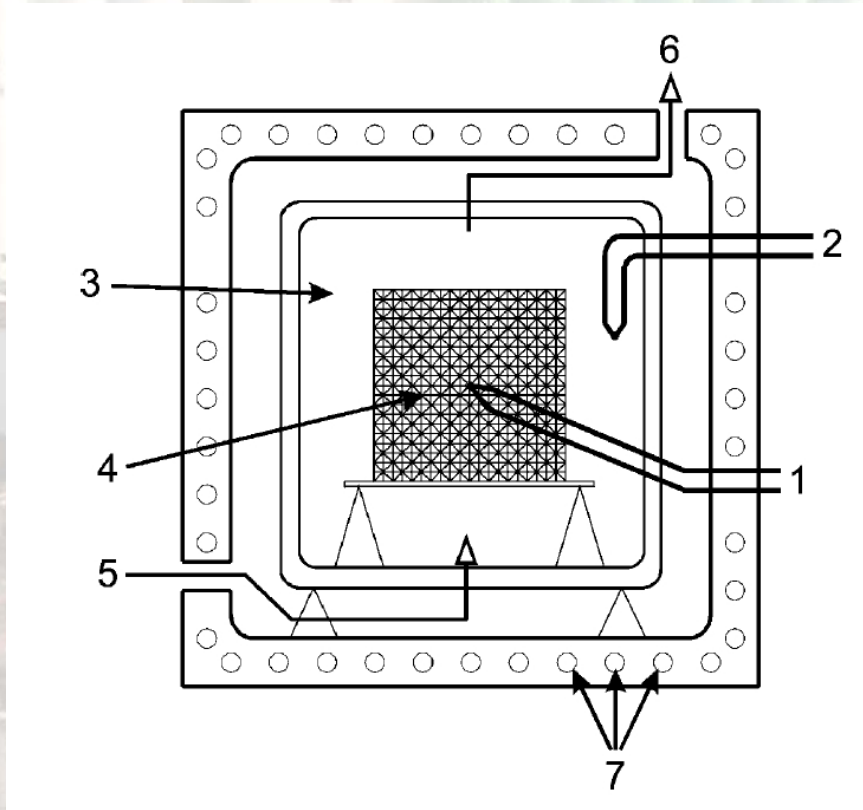


je größer V/A desto kleiner die **SET**

SET: niedrigste Umgebungstemperatur, bei der das Material ohne externe Wärmequelle sich entzünden kann

→ in großen Lagern, Selbstentzündung kann bei normalen Umgebungstemperaturen auftreten

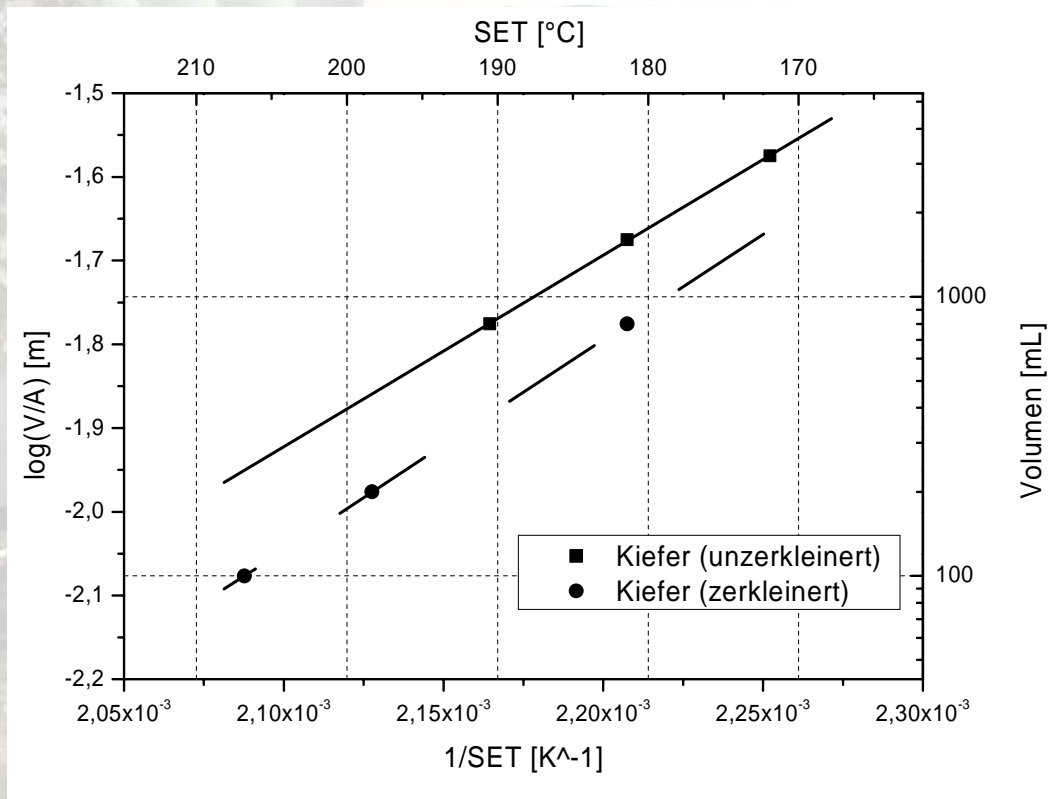
Standard-Untersuchung der Selbstentzündung: **isoperibole Warmlagerung** nach VDI 2263 und Extrapolierung auf große Volumina.



- 1 Thermoelement (Probe)
- 2 Thermoelement (Ofen)
- 3 Interne Kammer
- 4 Probe
- 5 Spülgaszufuhr
- 6 Spülgasauslass
- 7 Heizstäbe

1. Schmidt, M.; Lohrer, C.; Krause, U., *Self-ignition of Dust at Reduced Volume Fractions of Ambient Oxygen*.
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2003. **16**(2): pp. 141-147.

SET Extrapolation (V/A Abhängigkeit):



Material: Kiefer

Unzerkleinert: $\varnothing_{\text{median}} = 10 \text{ mm}$

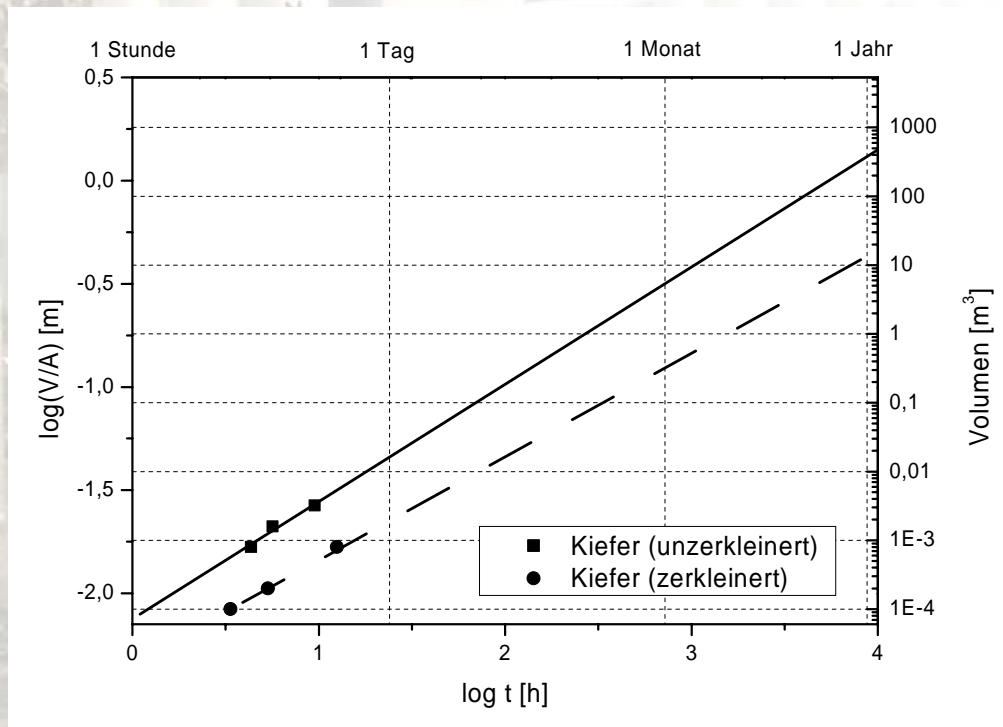
Zerkleinert: $\varnothing < 2 \text{ mm}$

$SIT_{\text{unzerkleinert}} > SIT_{\text{zerkleinert}}$

Extrapolation der *Induktionszeit*

Induktionszeit:

Zeit vom Anfang der Lagerung bis zum exponentiellen Anstieg der Temperatur



$t_{\text{unzerkleinert}} > t_{\text{zerkleinert}}$



Zerkleinern des Materials führt zur höheren Neigung zur SET

Warmlagerung (SET Extrapolation)

Vorteile: - einfacher Aufbau;
- einfache Versuchsdurchführung.

Nachteile: - nur auf einfache Geometrien anwendbar;
- Grenze der Zulässigkeit der Extrapolation ungewiss.

Alternative: **Numerische Simulation**

Vorteile: - keine Begrenzung hinsichtlich Geometrie und Volumen.

Nachteile: - rechenintensiv.

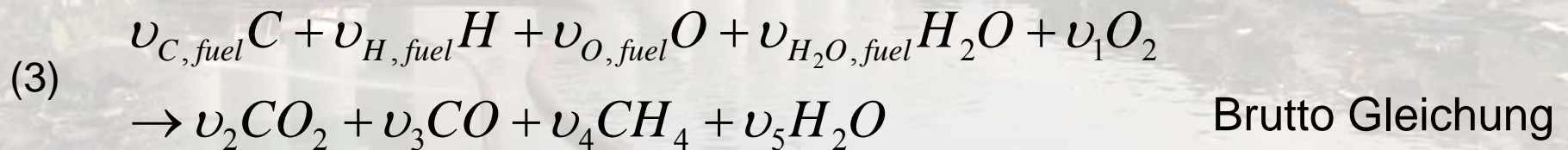
→ Ein mathematisches **Modells** wird benötigt, das den gekoppelten Wärme- und Stofftransport in Schüttungen beinhaltet.

BAM-Selbstzündungsmodell:

- nur molekulare Transportsvorgänge;
- erhöhte Diffusionskoeffizienten;
- die Stoffeigenschaften sind keine Funktion der Zeit und des Ortes;
- keine Mikrobiologie.

$$(1) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \text{div grad } T + S_T \quad \text{energetische Bilanz}$$

$$(2) \quad \frac{\partial C_k}{\partial t} = D_k \cdot \text{div grad } C_k + S_{c,k} \quad \text{Massenbilanz Spezies k}$$



BAM-Selbstzündungsmodell (Fortsetzung):

(4) $S_{c,f} = -C_f k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ Reaktionsgeschwindigkeit Brennstoff

(5) $S_{c,k} = \frac{\nu_k}{\nu_f} \cdot \frac{M_k}{M_f} \cdot S_{c,f}$ andere Reaktionsgeschwindigkeiten

(6) $S_T = \frac{1}{\rho \cdot c_p} \cdot \Delta H_R \cdot S_{c,f}$ Wärmequelle (chemisch)

(7) $S_w = -EV \cdot C_w \cdot \exp\left(\frac{E}{R \cdot T}\right) + CD \cdot C_v$ Wärme (Verdampfung/Kondensation)

Das System von n differenziellen Gleichungen

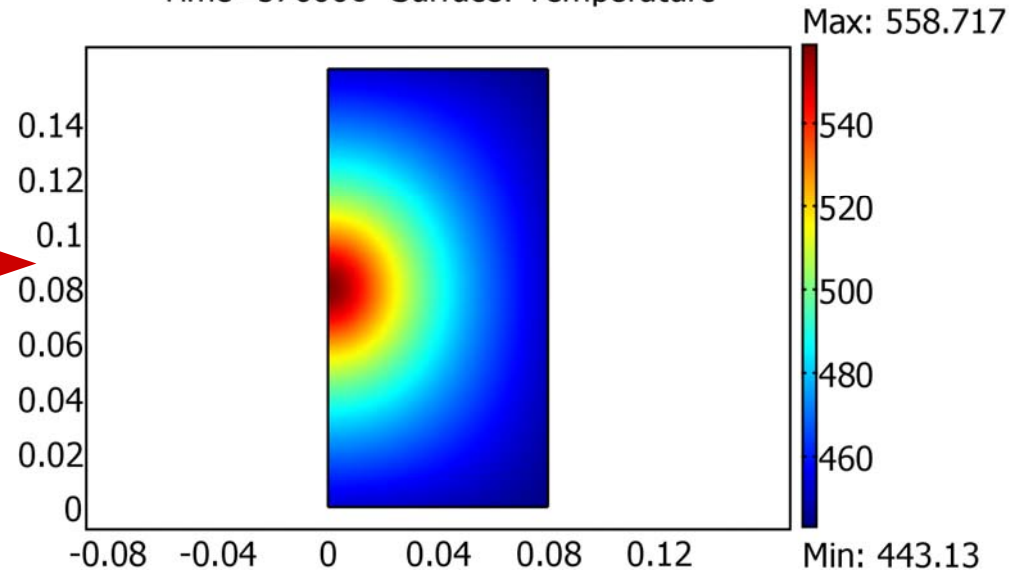


$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \times \text{div grad } T + S_T$$

COMSOL

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = D_k \times \text{div grad } C_k + S_{c,k}$$

Time=57600s Surface: Temperature

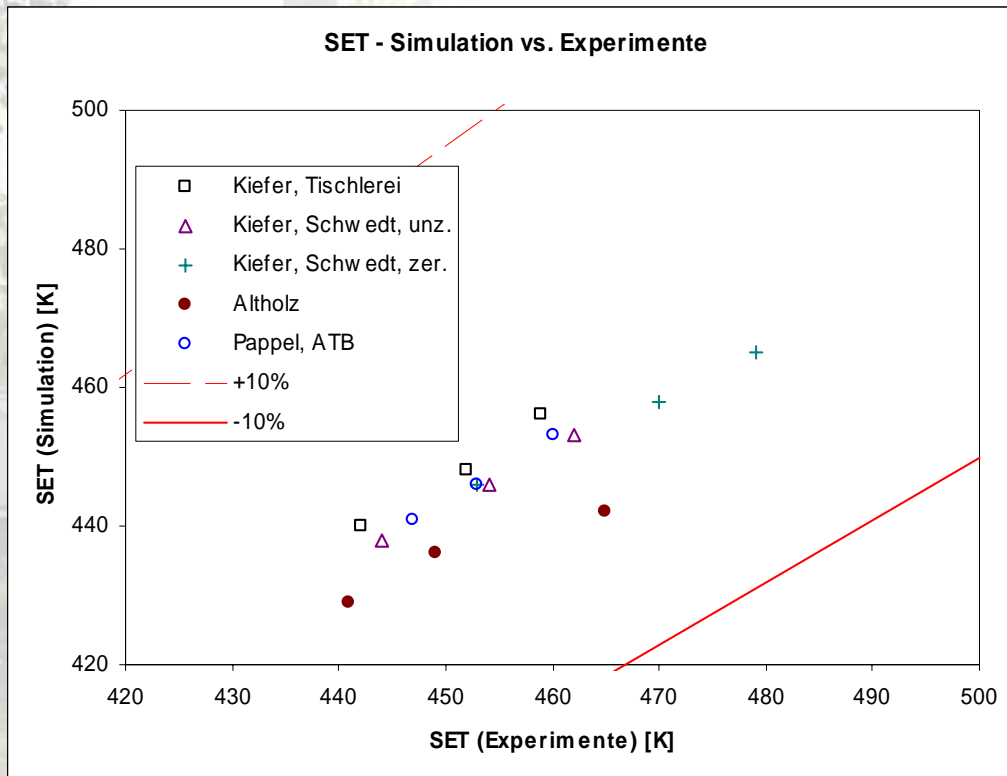


Kiefer, unzerkleinert

$V = 3200 \text{ cm}^3$, $T_a = 441 \text{ K}$

Induktionszeit: 16 h

Selbstentzündung Holz: Simulation vs. Experimente



Versuchsaufbau:

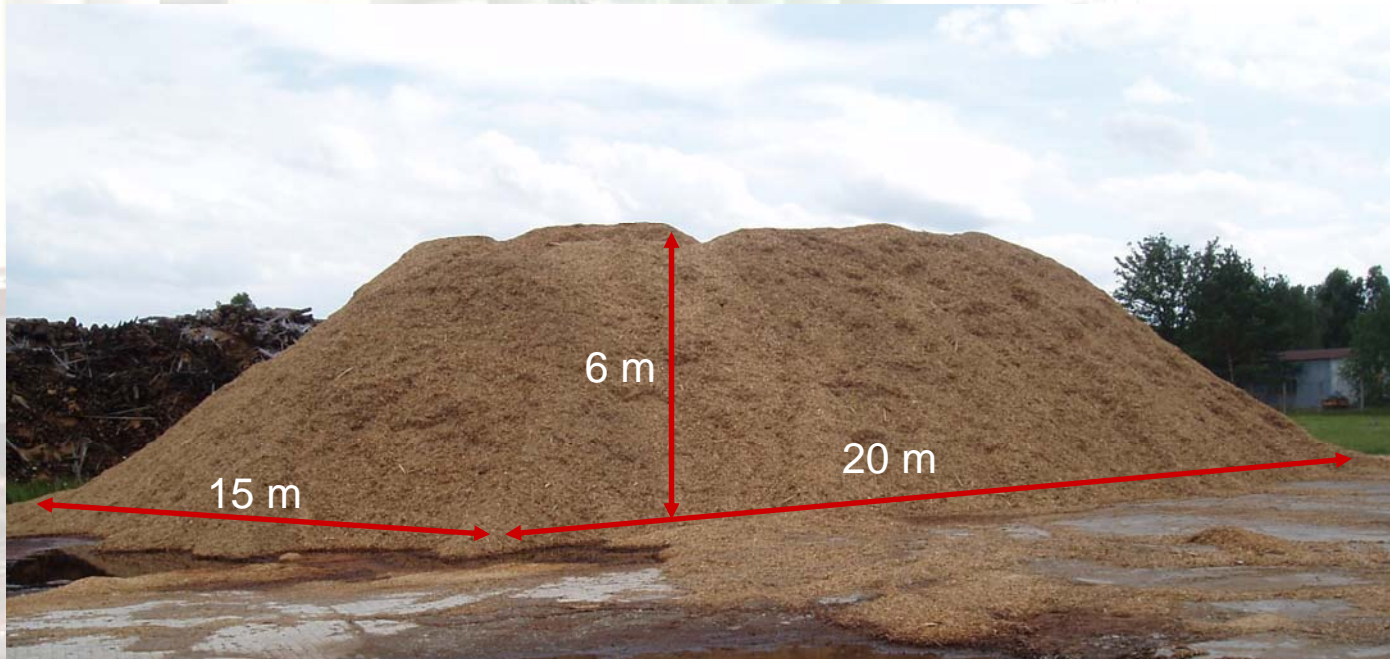
- kleine Volumina
- hohe Temperaturen

➔ keine Mikrobiologie

Untersuchung auf Großmaßstab

Kieferhackschnitzel (400 Tonnen)

$\varnothing_{\text{median}} = 10 \text{ mm}$

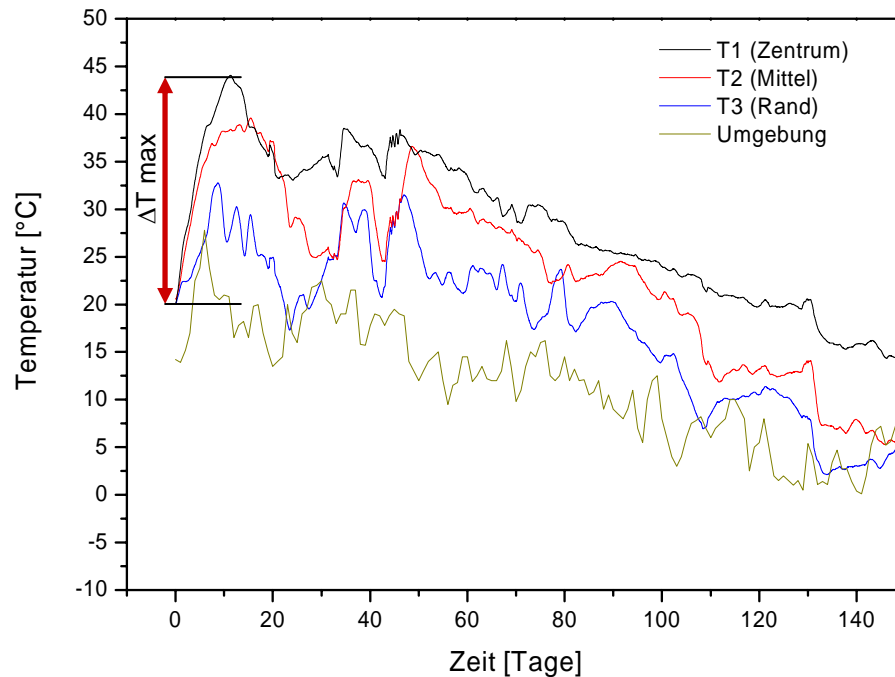


Messungen:

- Temperatur (Thermoelemente + Datenlogger)
- Gaskonzentrationen (FTIR Spektrometer)

Untersuchung auf Großmaßstab

Temperatur



$$T_{\max} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

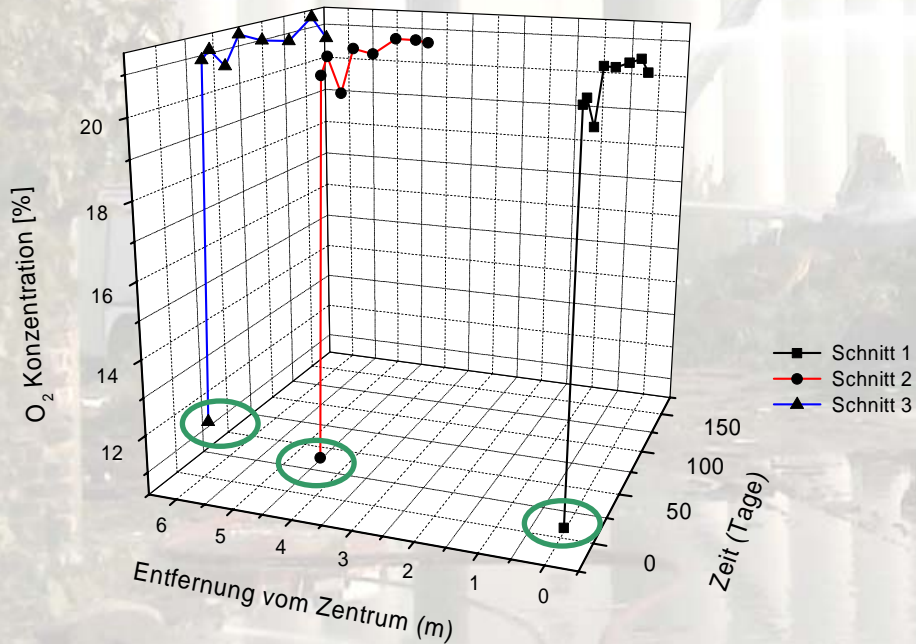
$$\Delta T_{\text{umgebung-kern}} = 15\text{-}20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Diese Erwärmung kann nicht nur durch Chemie/Physik kommen.

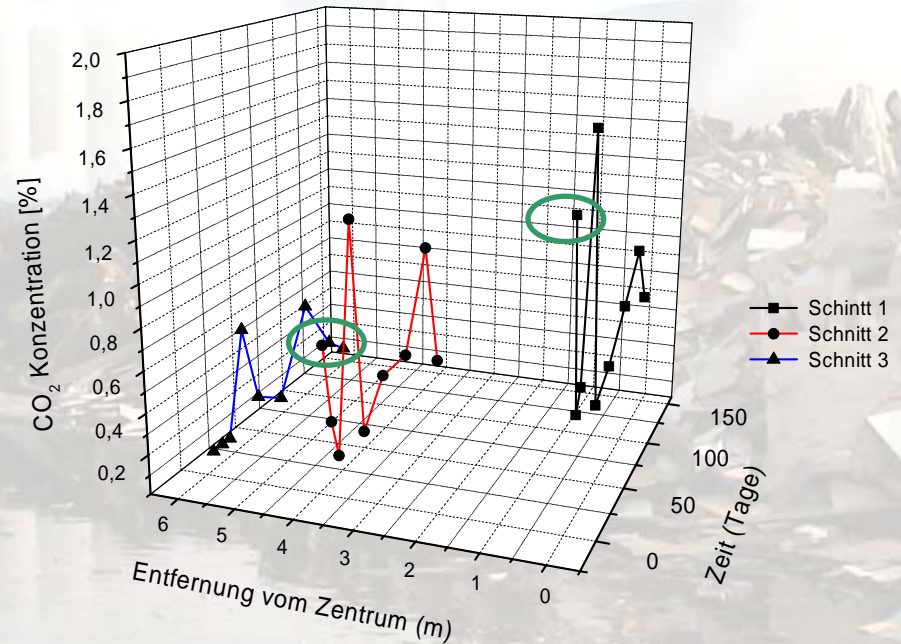
Untersuchung auf Großmaßstab

Gaskonzentrationen

Sauerstoff

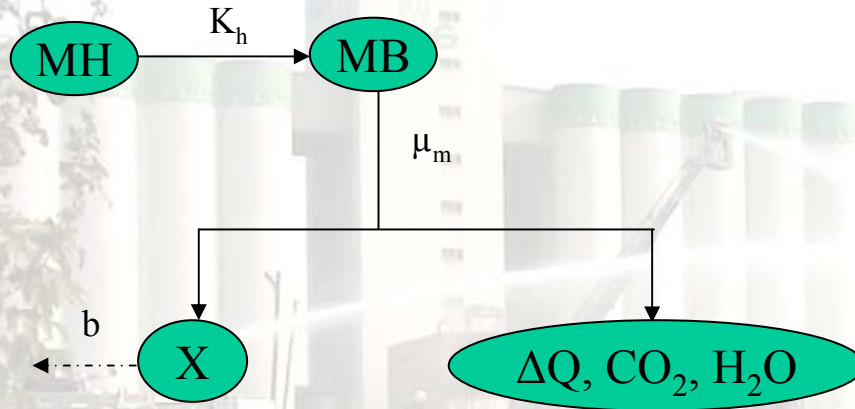


Kohlendioxid



→ Aerobische Prozesse

Modellierung Aerobischer Prozesse



$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} X(t) - bX(t) \quad (1)$$

$$\frac{dMH}{dt} = -K_h \frac{\frac{MH(t)}{X(t)}}{\frac{MH(t)}{X(t)} + K_{MH}} X(t) \quad (2)$$

3 Spezies:

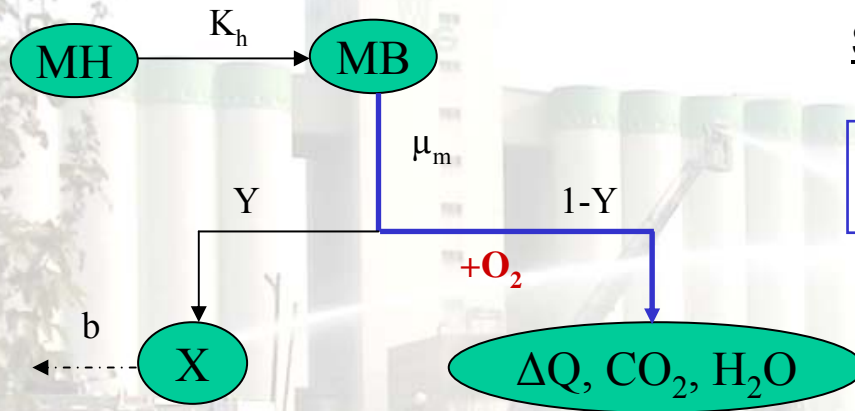
- Mikroorganismen (X)
- leicht abbaubare Fraktion (MB)
- schwer abbaubare Fraktion (MH)

$$\frac{dMB}{dt} = -\frac{1}{Y} \mu_m \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} X(t) - \frac{dMH}{dt} \quad (3)$$

$$r_{O_2} = \frac{(1-Y)}{Y} \mu_m \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} X(t) + b(1-f)X(t) \quad (4)$$

2. Tremier, A; de Guardia, A.; Massiani, C.; Paul, E; Martel, J.L., *A Respirometric Method for Characterising the Organic Composition and Biodegradation Kinetics and the Temperature Influence on the Biodegradation Kinetics, for a Mixture of Sludge and Bulking Agent to be Co-Composted*. *Bioresource Technology*, 2005. **96**: pp. 169–180.

Modellierung Aerobischer Prozesse



Sauerstoffverbrauch:

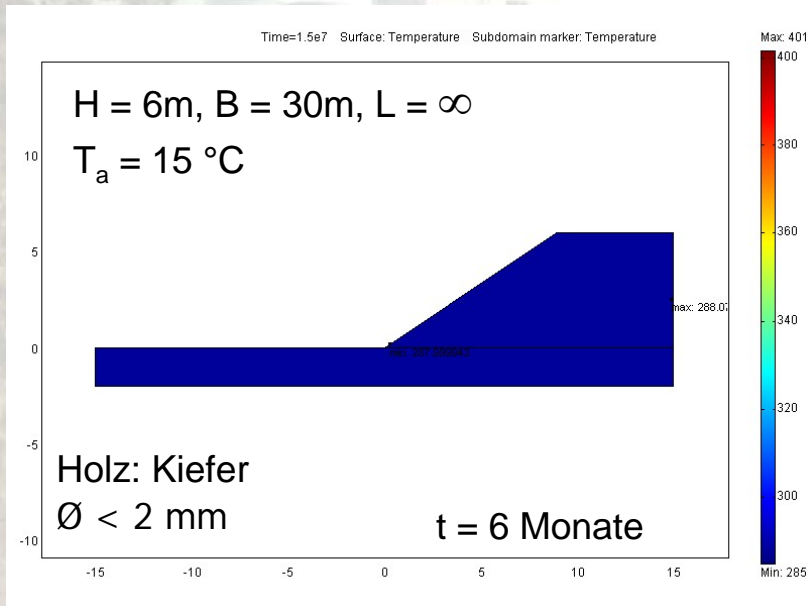
$$r_{O_2} = \frac{(1-Y)}{Y} \mu_m \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} X(t) + b(1-f)X(t) \quad (4)$$

Zirka 450 kJ/mol O_2 werden gebildet in aerobischen Prozessen.

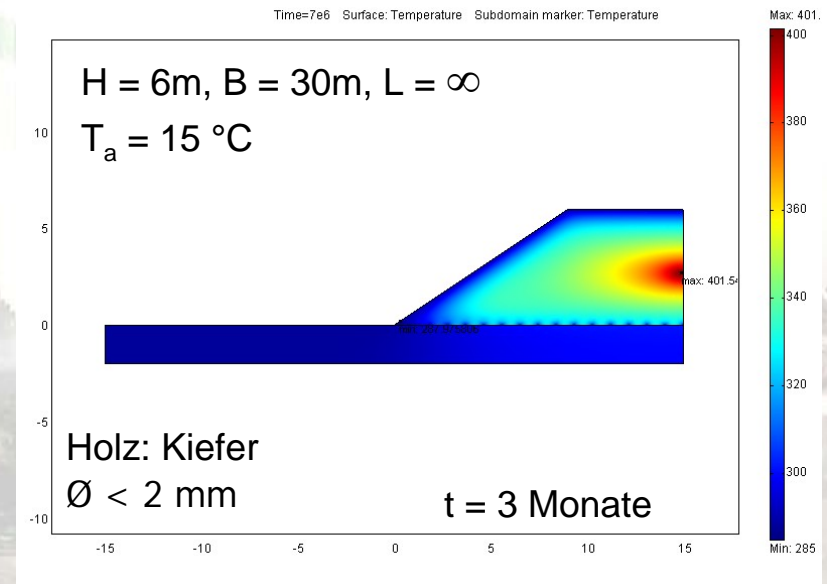
→ die Wärmeproduktion durch Mikrobiologie könnte berechnet werden.

Vereinfachung: erhöhte **Starttemperatur** (80 °C)

Rechnung einer Kieferhalde auf Großmaßstäb



↑ keine Mikrobiologie
(keine Erwärmung)



↑ Mikrobiologie/ $T_{\text{start}} = 80\text{ °C}$
(Selbstentzündung)

→ Wärmeproduktion durch Mikrobiologie kann die Wahrscheinlichkeit der Selbstentzündung erhöhen

PRAKTISCHE ANWENDUNGEN

Erstellung eines Leitfadens

Sichere Lagerung von Holz

- **V/A**-Reduzierung (d. h. Erhöhung der SET);
- **Lagerdauer** (kleiner als die Induktionszeit zur SET).



Leitfaden

zur Brandvermeidung bei der Lagerung
von biogenen Brennstoffen

Mitglieder:

Dr.-Ing. Fabio Ferrero

Dr. rer. nat. Marcus Malow

Dr.-Ing. Martin Schmidt

Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Fachgruppe II.2 „Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme“

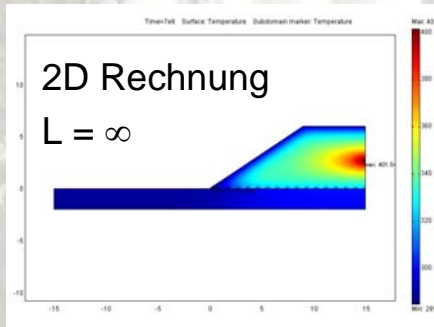
AG „Brennbare Schüttgüter und Stäube, feste Brennstoffe“

Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

PRAKTISCHE ANWENDUNGEN

Tabelle 1: kritische Temperatur [°C]

$T_{\text{umgebung}} \downarrow$	$h = 3 \text{ m}$	$h = 4 \text{ m}$	$h = 5 \text{ m}$	$h = 6 \text{ m}$
0	> 80	> 80	79	76
10	> 80	> 80	78	75
20	> 80	> 80	77	75
30	> 80	> 80	77	74



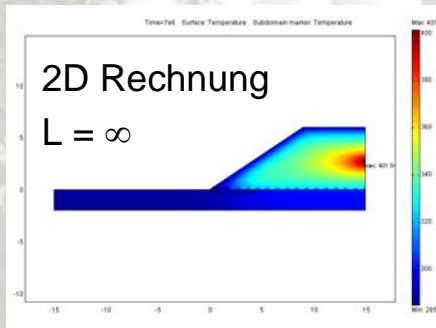
Holz: Kiefer
 $\varnothing < 2 \text{ mm}$

Grenze: $T_{\text{kritisch}} < 80 \text{ °C}$ könnten zur SET führen

PRAKTISCHE ANWENDUNGEN

Tabelle 2: Induktionszeit zur SET [Tage]

$T_{\text{umgebung}} \downarrow$	$h = 3 \text{ m}$	$h = 4 \text{ m}$	$h = 5 \text{ m}$	$h = 6 \text{ m}$
0	-	-	48	40
10	-	-	46	40
20	-	-	45	40
30	-	-	45	40



Holz: Kiefer
 $\varnothing < 2 \text{ mm}$

Grenze: t_{lager} muss kleiner als die Induktionszeit

Brandvermeidung bei der Lagerung von biogenen Brennstoffen am Beispiel von Kiefernholz

Fabio Ferrero

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Fachgruppe II.2 „Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme“
AG „Brennbare Schüttgüter und Stäube, feste Brennstoffe“
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

ATB Workshop

Potsdam-Bornim, 18 Juni 2008

GEFÖRDERT VON:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

