

Dr.-Ing. Fabio Ferrero
Dr. rer. nat. Marcus Malow
Dr.-Ing. Martin Schmidt
Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause

**Leitfaden
zur Brandvermeidung bei der Lagerung
von Biomasse**

Impressum

Forschungsbericht 284:
**Leitfaden zur Brandvermeidung
bei der Lagerung von Biomasse**

2009

Herausgeber:
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8112029
E-Mail: info@bam.de
Internet: www.bam.de

Copyright © 2009 by
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.64

ISSN 0938-5533
ISBN 978-3-9812354-1-8

Vorwort

Die Menge an genutztem, verarbeitetem und gelagertem Holz steigt von Jahr zu Jahr. In der Folge konnte in den letzten fünf Jahren eine deutlich gestiegene Zahl von Bränden in Holzlagern und -halden festgestellt werden. Viele dieser Brände sind durch Selbstentzündung des Materials verursacht worden. Sind die Ursachen der Selbstentzündung bekannt, kann die Brandentstehung durch geeignete Maßnahmen vermieden werden.

Die Fachgruppe II.2 „Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung hat in diesem Leitfaden das Thema aufgegriffen und die derzeit vorliegenden Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt. Ziel des Leitfadens ist es, die Grundlagen der Selbstentzündung von Biomasse am Beispiel von Holz in übersichtlicher Form darzustellen und daraus praktische Hinweise zur Vermeidung der Selbstentzündung von Holzhalde abzuleiten, um so einen Weg für einen sicheren und nachhaltigen Umgang mit diesem Rohstoff zu ebnen.

Dem Leitfaden liegen Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Brandvermeidung bei der Lagerung von biogenen Brennstoffen“ zugrunde. Das Projekt wurde innerhalb der Fördermaßnahme „klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung finanziell gefördert (Förderkennzeichen 01LS05079). Für diese Förderung möchten die Autoren sich bedanken.

Vorwort	III
1. Einleitung	1
2. Grundlagen der Selbstentzündung am Beispiel von Biomasse	2
3. Maßnahmen zur sicheren Lagerung von Biomasse	8
3.1 Lagerungsgeometrien	9
3.2 Lagerungszeiten	10
3.3 Brandschutzmaßnahmen	10
Schlusswort	12
Literatur	13
Anhang	14
A.1 Eigenschaften der untersuchten Holzsorten	14
A.2 Selbstentzündung und Induktionszeit: Experimentelle Ergebnisse und Extrapolation für repräsentative Holzproben	15
A.3 Kritische Schüttguttemperaturen T_{KS}	16
A.4 Induktionszeiten	17
A.5 Flussdiagramm (Beispielwerte für Kiefernholz)	18

1. Einleitung

Die Menge an Biomasse für die thermische Verwertung ist in den letzten Jahren stetig gestiegen und die Leitstudie vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) aus dem Jahr 2007 „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien, Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050“ [1] prognostiziert einen weiteren kurzfristigen Anstieg für die Verwendung von Biomasse als erneuerbarer Energieträger.

Somit wird auch der Lagerbedarf für diesen Rohstoff in den kommenden Jahren weiter wachsen. Die Zwischenlagerung von Biomasse – insbesondere Alt- oder Restholz aus der Holzindustrie – im Großmaßstab von bis zu mehreren Tausend Tonnen ist schon heutzutage gängige Praxis.

Gleichzeitig traten in den letzten Jahren vermehrt Brände in solchen Lagern auf [2-6], die oftmals auf die Selbstentzündung des Materials zurückzuführen sind. Folge dieser Brände sind:

- hohe CO₂-Emissionen,
- Emissionen von giftigen oder schädlichen Gasen durch unvollständige Verbrennung, wie z. B. CO, KW oder PAK [2],
- hohe wirtschaftliche Verluste.

Die Brandlöschung ist extrem langwierig und schwierig, da große Mengen brennbaren Materials involviert sind. Unentdeckt gebliebene Schwel- und Glutnester können auch lange Zeit nach dem ersten Löscheinsatz zum Ausbruch von Folgebränden führen.

Der Vermeidung solcher Brände sollte deshalb unbedingt Vorrang eingeräumt werden. Aber gerade das Abschätzen der vorhandenen Risiken bei der Lagerung ist äußerst schwierig und setzt ein hohes Maß an Erfahrung voraus. Hierbei soll dieser Leitfaden eine Hilfestellung geben und so die energetische Verwertung der Biomasse sicherstellen.

2. Grundlagen der Selbstentzündung am Beispiel von Biomasse

Die Ursachen für die Selbstentzündung liegen in exothermen Prozessen, die selbst bei niedrigen Temperaturen ablaufen. Die Temperatur bestimmt aber die Geschwindigkeit der Reaktionen in der Weise, dass die Reaktionsrate mit steigender Temperatur zunimmt [7].

Feststoffschüttungen sind schlechte Wärmeleiter, wodurch die Wärmeabgabe nach außen begrenzt wird. In Abhängigkeit von Umgebungstemperatur, Größe der Schüttung und Stoffeigenschaften kann daher die zeitliche Rate der Wärmeproduktion im Inneren der Schüttung größer als der über die Schüttungsoberfläche abgeführte Wärmestrom sein. Der auf diese Weise entstehende Überschuss an Wärmeenergie führt zum sogenannten Wärmestau und in dessen Folge zur Beschleunigung der Oxidationsreaktion, da die Reaktionsrate mit wachsender Systemtemperatur näherungsweise exponentiell ansteigt. Schließlich tritt „Selbstentzündung“ der Schüttung ein, das heißt, die Temperatur im Inneren der Schüttung steigt so stark an, dass das Schüttgut zur Entzündung gelangt und in der Folge abbrennt. Dabei hängt es von der Verfügbarkeit des Sauerstoffs ab, ob der Brand als Schwel- oder Glimmbrand oder mit offener Flamme verläuft.

Neben den chemischen Oxidationsreaktionen, die den größten exothermen Anteil zum Gesamtprozess beisteuern, spielen auch physikalische und mikrobiologische Prozesse eine Rolle für den Wärmehaushalt einer Biomasseschüttung. So führt z. B. die Adsorption von Wasser an verhältnismäßig trockenen Feststoffoberflächen ebenfalls zur Temperaturerhöhung, da Adsorptionswärme freigesetzt wird [8]. Mikrobiologische Prozesse können besonders im Temperaturbereich bis ca. 80 °C prozessbeschleunigend wirken und je nach Umweltbedingungen sehr vielfältig ablaufen.

Diese mikrobiologischen Prozesse (mikrobieller Abbau des Holzes) verursachen zum einen eine eigene Wärmefreisetzung und zum anderen die Reduktion der biologisch verfügbaren Elektronenakzeptoren (sog. Atmung). Unter optimalen Bedingungen, z. B. bei einem Massengehalt an Wasser von 50 – 60 % (Feuchtegehalt), können solche Prozesse eine Temperaturerhöhung in der Schüttung auf 70 °C bis 80 °C bewirken [9, 10]. Um sicherheitstechnisch konservative Ergebnisse zu erhalten, muss diese erste Erwärmungsphase durch mikrobiologische Prozesse bei der Ermittlung der Selbstentzündungsgefahr mit berücksichtigt werden.

Die Temperaturerhöhung aufgrund mikrobiologischer Aktivität hat somit einen starken Einfluss auf die chemisch-oxidativen Prozesse, deren Reaktionsgeschwindigkeit exponentiell mit der Temperatur ansteigt. So kann es nach der Erwärmung der Schüttung durch mikrobiologische Prozesse zu einer deutlichen Erhöhung der Brandgefahr durch

beschleunigte Selbstentzündung in biogenen Aufschüttungen, wie z. B. Kiefer-, Pappel- oder Weidenhackschnitzeln kommen.

Die Einflussfaktoren für das Auftreten der Selbstentzündung in Schüttungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

physikalische und chemische Eigenschaften des Materials:

- Porosität, Korngröße und Schüttdichte
- Feuchtegehalt
- Kinetik der exothermen Prozesse

Umgebungsfaktoren:

- Umgebungstemperatur
- Häufigkeit und Intensität von Niederschlägen
- Wind (Abkühlung durch Belüftung, Begünstigung der Sauerstoffzufuhr)

Lagerungsgeometrie:

- Größe und Form der Schüttung

Da die Wärme im Innern der Schüttung proportional zum Volumen produziert wird, diese jedoch nur über die Oberfläche abgeführt werden kann, ergibt sich eine Abhängigkeit der Temperaturverteilung in der Halde vom Volumen/Oberflächen (V/A)-Verhältnis.

Alle diese Faktoren beeinflussen die kritische Umgebungstemperatur, bei der eine Schüttung vom thermisch stabilen, unterkritischen Bereich (keine Selbstentzündung) in den kritischen Bereich (Selbstentzündung) wechselt. Die Temperatur bei der gerade keine Selbstentzündung mehr auftritt, wird als Selbstentzündungstemperatur (T_{SE}) definiert.

Die Versuchsdurchführung für die Bestimmung der T_{SE} kann in der Laborpraxis z. B. in Anlehnung an die DIN EN 15188 [11] erfolgen. **Aufgrund der Abhängigkeit vom V/A-Verhältnis ist die T_{SE} prinzipiell für jede Halde individuell zu bestimmen. Es existiert keine feste T_{SE} für ein bestimmtes Schüttgut.**

Unter der Berücksichtigung aller genannten Faktoren ergibt sich ein idealisierter Temperatur/Zeit-Verlauf für eine Biomassehalde der bis zur Selbstentzündung führt, wie es in Abbildung 1 dargestellt ist.

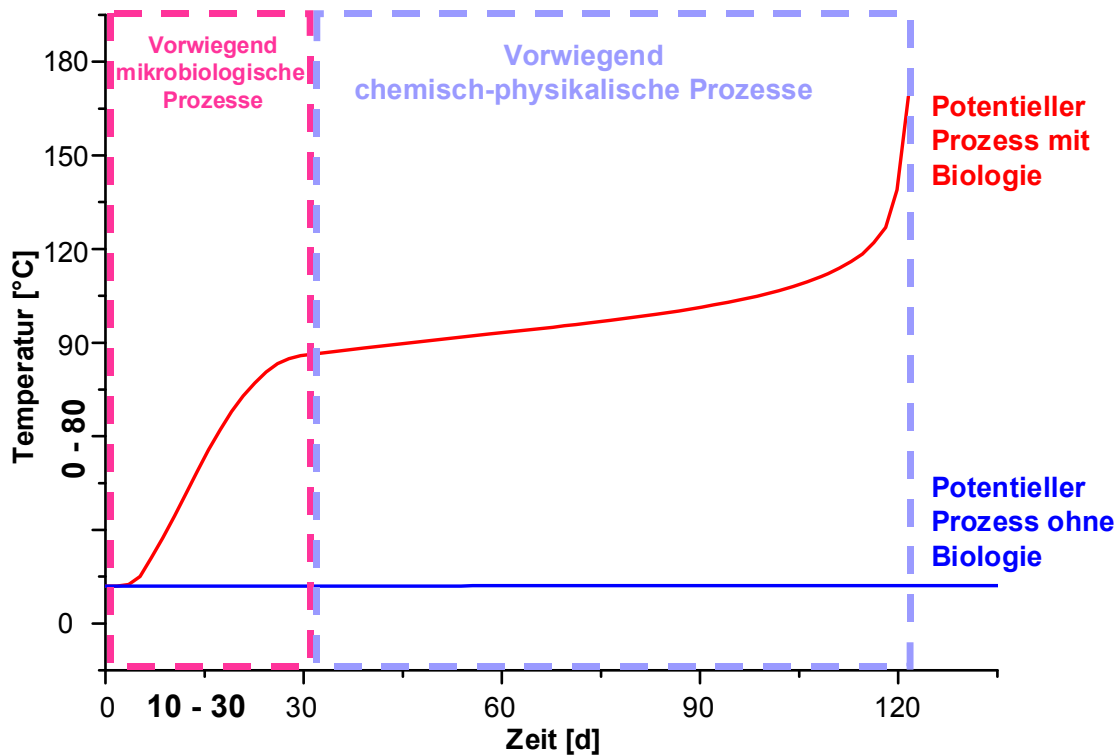


Abbildung 1: Schematischer Verlauf der Selbstentzündung in mikrobiologisch gut abbaubaren Schüttungen.

Für den ersten, schnellen Temperaturanstieg in den ersten 30 Tagen der Lagerung sind vorwiegend mikrobiologische Prozesse verantwortlich. Ab einer Temperatur von ca. 70 °C bis 80 °C nimmt die Aktivität/Wärmeproduktion der Mikroorganismen stark ab. Bei solchen erhöhten Temperaturen tritt bereits ein deutlicher Anstieg der Reaktionsrate der physikalisch-chemischen Prozesse ein, was zu einem weiteren, zunächst langsameren, Temperaturanstieg und schließlich zur Selbstentzündung führen kann.

Abbildung 1 veranschaulicht, dass die mikrobiologischen Prozesse nicht vernachlässigt werden dürfen.

Die größte Abhängigkeit der T_{SE} besteht zu dem V/A -Verhältnis der Schüttung. Erhöht sich das Verhältnis, so sinkt die T_{SE} . Nach DIN EN 15188 [11] macht man sich diesen Effekt zu Nutze, indem man die Selbstentzündungstemperaturen in Abhängigkeit vom Volumen experimentell im Labormaßstab bestimmt. In einem Diagramm kann die reziproke absolute Selbstentzündungstemperatur gegen den Logarithmus des V/A -Verhältnisses aufgetragen werden. Die sich ergebende Gerade kann dann auf technisch interessante Volumina extrapoliert werden. Für zwei untersuchte Korngrößen von Kiefernholz ist das in Abbildung 2 zu sehen.

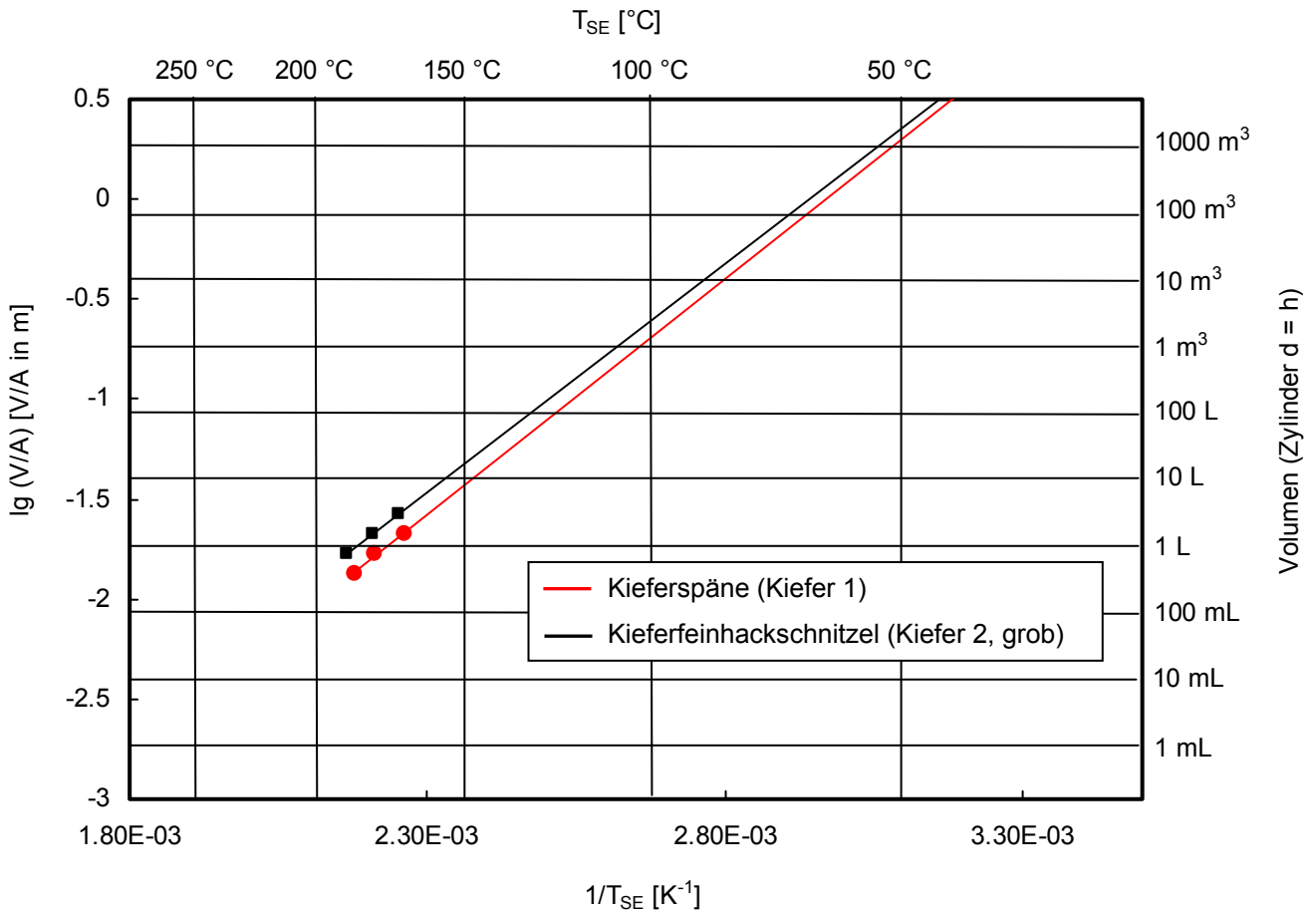


Abbildung 2: Abhängigkeit der T_{SE} für Kieferspäne und Kieferfeinhackschnitzel vom Schüttungsvolumen. Die T_{SE} des feinen Materials ist niedriger als die des gröbereren Materials. Das bedeutet eine höhere Neigung zur Selbstentzündung.

Die Zeit vom Beginn der Lagerung bis zum exponentiellen Anstieg der Temperatur wird als Induktionszeit t_{ind} definiert. Abbildung 3 zeigt, dass auch dieser Parameter von dem V/A-Verhältnis abhängt. Auch für die Induktionszeit lässt sich durch eine entsprechende Auftragung eine Abschätzung für den Großmaßstab durchführen.

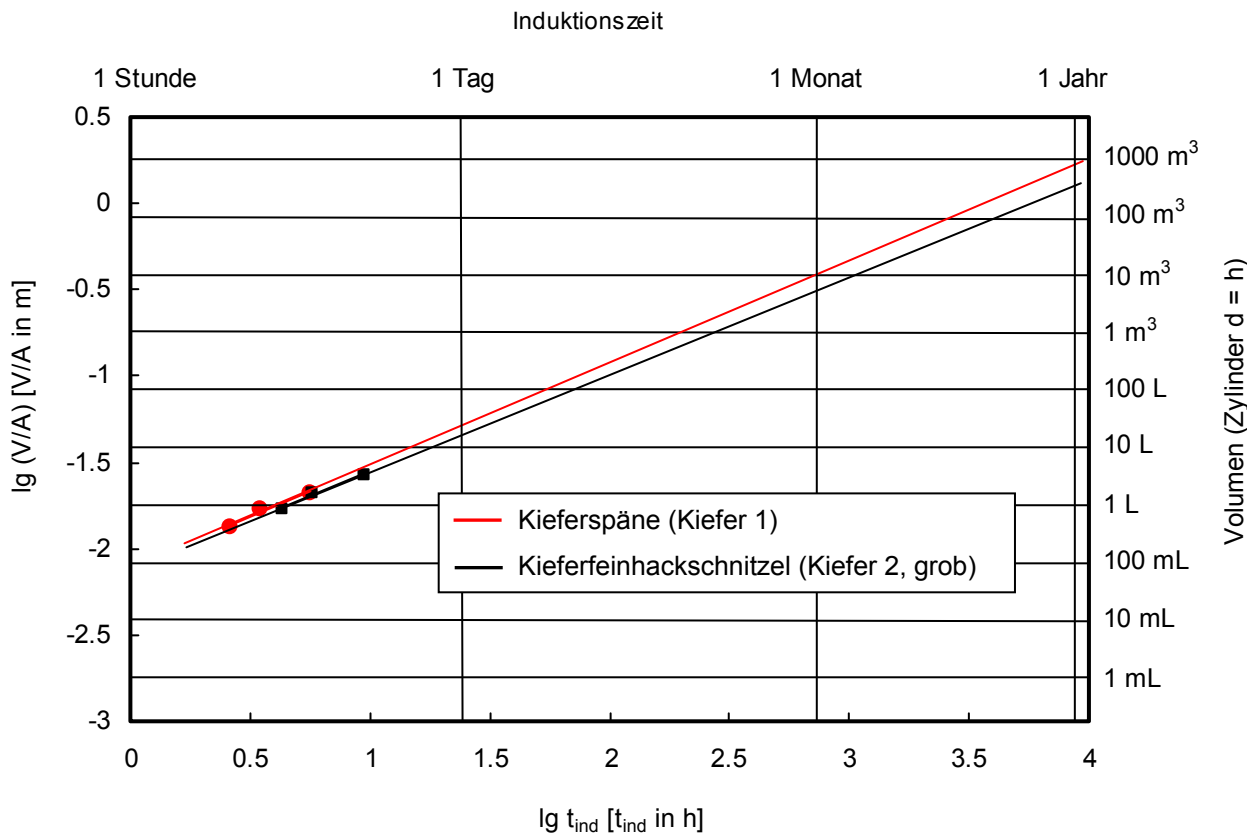


Abbildung 3: Extrapolation der Induktionszeit t_{ind} für Kieferspäne und Kieferfeinhackschnitzel auf große Schüttungsvolumina. Die Induktionszeiten des feinen Materials sind niedriger als die des gröbereren Materials. Das bedeutet, eine Selbstentzündung würde für das feinere Material nach kürzerer Zeit eintreten.

Abbildung 2 als auch Abbildung 3 zeigen am Beispiel vom Kiefernholz, dass das Zerkleinern des Materials zu einer höheren Neigung der Selbstentzündung führt, da sowohl die T_{SE} -Werte als auch die Induktionszeiten kleiner werden. Diese Abhängigkeit von der Partikelgröße ist auch schon für andere brennbare Materialien, wie z.B. Kohle, festgestellt worden [8].

Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit den Ergebnissen für weitere Holzsorten mit den entsprechenden Extrapolationen auf größere Volumina (siehe A.1 für die Eigenschaften der untersuchten Proben und A.2 für die Ergebnisse verschiedener Holzsorten).

Diese einfachen, experimentellen Extrapolationsansätze haben jedoch auch einige gravierende Nachteile:

- Extrapolation gilt nur für kompakte Geometrien, d.h. die Abmessungen in Breite, Höhe und Länge dürfen nicht wesentlich voneinander abweichen,
- der Gültigkeitsbereich der Extrapolation ist nicht sicher bekannt,
- der Einfluss der mikrobiologisch erzeugten Wärme wird nicht erfasst.

Um diese Limitierungen zu umgehen, wurde in der BAM ein mathematisches Modell entwickelt mit dem es möglich ist, den Selbstentzündungs- und Brandausbreitungsprozess von Schüttgütern zu beschreiben [12, 13].

Das vorhandene Modell berücksichtigt allerdings nicht die Wärmeproduktion durch mikrobiologische Prozesse und wird deshalb bei deren Auftreten die Selbstentzündungsgefahr unterschätzen.

Für eine konservative Vorhersage von sicheren Lagerungsbedingungen von Biomasse müssen also die mikrobiologischen Prozesse berücksichtigt werden. Der bisherige Kenntnisstand über den mikrobiellen Befall in Holzhackstücken ist auf Schimmelpilze beschränkt [14] und nur eingeschränkt auf die Modellierung übertragbar. Um die mikrobiologischen Prozesse in den Berechnungen zu berücksichtigen, ist für die Erstellung dieses Leitfadens auf das Konzept der kritischen Schüttguttemperatur zurückgegriffen worden, welches im nächsten Kapitel beschrieben ist.

3. Maßnahmen zur sicheren Lagerung von Biomasse

Die zu ergreifenden Maßnahmen zur Verhinderung der Selbstentzündung lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- Sichere Lagerungsgeometrie
- Begrenzung der Lagerungszeiten
- Brandschutzmaßnahmen

Mit Hilfe der in diesem Leitfaden beschriebenen praktischen Hinweise soll die Brandgefährdung bei der Lagerung von biogenen Feststoffen minimiert werden. Um mikrobiologische Prozesse zu berücksichtigen, ist eine kritische Schüttguttemperatur T_{KS} eingeführt worden, die im Folgenden erläutert wird.

Kritische Schüttguttemperatur T_{KS}

Unter günstigen Bedingungen können mikrobiologische Prozesse zu einer maximalen Temperatur von 70 °C bis 80 °C innerhalb einer Schüttung führen. Um diese Prozesse bei der Ermittlung der Selbstentzündungsgefahr mit einzubeziehen, wurde bei den Simulationen davon ausgegangen, dass das Material mit einer erhöhten Starttemperatur eingelagert wird. Im Gegensatz zu einer Einlagerung mit Umgebungstemperatur liegen für die chemisch-oxidativen Prozesse somit geänderte und kritischere Anfangsbedingungen vor. Es wird nun mit Hilfe der numerischen Simulationsrechnungen geprüft, welche Starttemperatur zu einer Entzündung der Halde führt. Als kritische Temperaturgrenze wurde 80 °C festgelegt, da dies die maximale Temperatur ist, die durch mikrobiologische Prozesse unter normalen Umweltbedingungen erreicht werden kann.

Berechnet sich nun für eine gegebene Geometrie einer Biomassehalde eine Selbstentzündung bei einer Schüttgut-Starttemperatur kleiner als 80 °C, so befindet sich die Halde prinzipiell in einem kritischen Zustand, d. h. eine Selbstentzündung kann nicht ausgeschlossen werden.

Die niedrigste Schüttgut-Starttemperatur, bei welcher eine vorgegebene Halde gerade noch zur Selbstentzündung gelangt, wird im Folgenden als kritische Schüttguttemperatur T_{KS} definiert.

Wird die Halde auf eine Temperatur oberhalb der T_{KS} gebracht, ist nachfolgend eine Zündung zu erwarten. Daher dürfen diese Temperaturen in der Praxis nicht überschritten werden. Die T_{KS} ist abhängig von

- der Lagerungstemperatur (Umgebungstemperatur),
- der Art des eingelagerten Materials und
- der Schüttungsgröße bzw. -geometrie.

Im Anhang A.3 sind die T_{KS} der Proben in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (Lagerungstemperatur) und der Höhe der Halde für zwei verschiedene Holzsorten aufgelistet. Die T_{KS} nehmen mit steigenden Umgebungstemperaturen und Schütthöhen ab.

Falls die berechneten T_{KS} unterhalb der angenommenen Temperaturgrenze von 80 °C liegen, ist eine Zündung durch die Erwärmung aufgrund von mikrobiologischen Prozessen möglich (roter Bereich in den Tabellen A.3.1 und A.3.2).

Die Annahme einer erhöhten Temperaturgrenze der Halde von 80 °C ist konservativ, da in realen Halden Begrenzungen in der Wachstumsrate und damit auch in der Wärmeproduktion von Mikroorganismen auftreten können. Vor allem der Feuchtegehalt im Holz und die Limitierung in der Sauerstoffzufuhr haben einen großen Einfluss auf die Wärmeproduktionsrate. Falls nur wenige Informationen über die Biologie vorhanden sind, ist die oben beschriebene Vorgehensweise sicherheitstechnisch konservativ und als erste Gefahrenabschätzung zu empfehlen.

3.1 Lagerungsgeometrien

Die beschriebene Abhängigkeit der Selbstentzündung von dem V/A-Verhältnis wird ausgenutzt, um sichere Lagerungsgeometrien zu bestimmen. Bei gleichbleibender Geometrie und kleiner werdendem Volumen verringert sich das V/A-Verhältnis. Dadurch wird die Gefahr der Selbstentzündung reduziert, wie in Abbildung 2 und Abbildung 3 gezeigt wurde.

Unter der Annahme, dass die Länge und Breite deutlich größere Ausmaße besitzen als die Höhe der Halde, wird die Höhe der für die Entwicklung des Wärmestaus ausschlaggebende geometrische Parameter. Deswegen sind die Rechnungen mit einer unendlichen Längenausdehnung und Breiten von 15 m, bzw. 30 m durchgeführt worden. Die Lagerhöhe wurde nun solange variiert, bis eine Selbstentzündung der durch mikrobiologische Prozesse auf 80 °C Starttemperatur erwärmten Halde nicht mehr auftrat.

Für die untersuchten Holzsorten lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- Bis zu einer Lagerhöhe von 4 m kann sich eine Holzhalde nicht selbst entzünden. Die Begrenzung der Haldenhöhe auf 4 m für fein zerkleinertes Material (wie z.B. Kiefernspäne) sollte daher beachtet werden.
- Für Material mittlerer Größe (Feinhackschnitzel, Hackschnitzel, usw.) kann das Material höher gelagert werden. Als Grenze für eine sichere Lagerung wird hier eine Höhe von 5 m vorgeschlagen.

- Für Rundholz ist in praxisrelevanten Lagergrößen keine Selbstentzündung zu erwarten.

3.2 Lagerungszeiten

Falls bei einer Lagerung die sichere Grenzhöhe überschritten wird, ist eine potentielle Gefahr der Selbstentzündung vorhanden. Eine sichere Lagerung lässt sich in diesem Fall lediglich über eine Begrenzung der Lagerungsdauer erreichen. Als Induktionszeit wird die Zeit vom Start der Lagerung bis zur Selbstentzündung definiert, das heißt für eine sichere Lagerung muss die Lagerzeit kürzer als die Induktionszeit sein.

Im Anhang A.4 sind die Induktionszeiten für verschiedene untersuchte Holzsorten und Geometrien dargestellt. Diese Zeiten stellen das „Worst Case“ Szenario dar. Das heißt, nach dieser Zeit kommt es frühestens zu einer Selbstentzündung. Um eine sichere Lagerung zu gewährleisten, muss das Material vor Ablauf der angegebenen Induktionszeiten umgelagert werden. Beim Umlagerungsprozess muss das Material auf eine Temperatur unterhalb der T_{KS} abgekühlt werden. Die Induktionszeiten wurden unter der Annahme berechnet, dass sich die Halde durch mikrobiologische Vorgänge auf einer erhöhten Starttemperatur von 80 °C befindet. Die Werte sind daher konservativ, da nur unter optimalen Bedingungen für die mikrobiologische Wärmeproduktion solche Induktionszeiten zu erreichen sind.

Im Gegensatz zu der Bildung von Hot-Spots durch chemisch-oxidative Reaktionen, die häufig lokal begrenzt entstehen, erfolgt die Erwärmung durch mikrobiologische Zersetzung häufig nahezu im gesamten Schüttungsvolumen. Mithilfe einer Temperaturüberwachung der Halde lässt sich somit eine hierdurch verursachte Erwärmung durch wenige Temperaturmessstellen sicher detektieren. Maßnahmen zur Verhinderung von Selbstentzündung, z.B. Umlagerung, können somit frühzeitig geplant und durchgeführt werden.

3.3 Brandschutzmaßnahmen

Die folgenden praktischen Hinweise sollten bei der Lagerung von Biomasse berücksichtigt werden:

- Eine Temperaturkontrolle des Lagergutes wird empfohlen. Die Temperaturmessung sollte auf halber Haldenhöhe im Zentrum der Halde sowie in halben Abstand zur Außenseite erfolgen. Es sind mehrere solcher Messstellen entlang der Längsachse der Halde vorzusehen.
- Die Temperaturkontrolle sollte mit einem Alarmierungssystem verbunden sein, um ein möglichst schnelles Eingreifen zu gewährleisten.

-
- Um den freien Zugang zu den einzelnen Halden zu gewährleisten ist eine Gassenbreite von mindestens 6 m zwischen zwei Halden zu empfehlen. Gleichzeitig wird ein Übergreifen des Brandes auf benachbarte Halden verhindert.
 - Die maximale Breite einer Halde sollte 20 m nicht übersteigen. Für größere Breiten wird das Erreichen und das Auslagern von Glimmnestern schwierig.
 - Es ist für ausreichend Löschmittelvorrat zu sorgen.
 - Glimmnester sollten so schnell wie möglich aus der Halde entfernt werden. Dabei ist zu beachten, dass bei Sauerstoffzufuhr ein Schmelbrand in einen offenen Brand mit Flammengefährdung umschlagen kann. Die Anwesenheit der Feuerwehr bei entsprechenden Arbeiten ist anzuraten.
 - Eine Brandwache sollte auch nach Ende der akuten Löscharbeiten bereitgestellt werden. Wärmebildkameras können helfen die Ausbreitung des Brandes an der Oberfläche zu beobachten.
 - Luftgütemessungen sollten während eines Löscheinsatzes stattfinden. Der Einsatz von Atemmasken ist stark empfohlen.

Schlusswort

Die empfohlenen Lagerbedingungen gelten für die untersuchten Holzsorten, die Brandschutzmaßnahmen sind allgemeingültig. Die in diesem Leitfaden beschriebene Methodik zur Vermeidung der Selbstentzündung von Biomasse beruht auf der Kombination von Labortests und numerischen Simulationsrechnungen zur Bestimmung zulässiger Haldengeometrien und Lagerzeiten. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge der Einflussfaktoren auf die Selbstentzündung müssen die Parameter (Selbstentzündungsverhalten) für jede Substanz neu bestimmt und anschließend die Simulationsrechnungen durchgeführt werden.

Viele Parameter, vor allem der Feuchtegehalt des gelagerten Materials, sind sehr wichtig für das Wachstum und die zugehörige Wärmeproduktion der Mikroorganismen. Besitzt das Material einen nicht optimalen Feuchtegehalt (Optimum ca. 50-60 Massen-%), so reduziert sich die Wärmeproduktion und damit auch Selbstentzündungswahrscheinlichkeit deutlich. Für die Ermittlung der hier vorgestellten Ergebnisse (maximale Temperaturen, sichere Lagergröße und Lagerzeiten) wurde ein optimales Wachstum der Mikroorganismen angenommen. Somit sind die hier getroffenen Aussagen als „Worst Case“ Szenario anzusehen.

Zur Bestimmung der sicheren Lagerung von Biomasse ist in Anhang A.5 ein Flussdiagramm mit Beispielwerten für Kiefernholz dargestellt. Dieses Flussdiagramm lässt sich auf andere Biomassetypen entsprechend der vorliegenden Informationen übertragen.

Literatur¹

1. Nitsch, J., *Ausbaustrategie Erneuerbare Energien, Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050*, Leitstudie, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2007.
2. Holzdeponie Rothenburg, www.faktuell.de/Hintergrund/Background48.shtml, 2000.
3. Altholzlager im Hafen Kerl, http://www.baden-online.de/news/artikel.phtml?page_id=78&db=news_lokales&table=artikel_kehl&id=565 2003.
4. Spänebunker des Biomasse-Heizkraftwerks Traunreut, http://www.ffw-stein.de/Presseberichte/Einsatz_SEC/einsatz_sec.html, 2005
5. Holzdeponie Bergkamen, <http://www.igbu.de/html/2005-2006.html>, 2006.
6. Holzdeponie Duisburg, online Meldung der Rheinischen Post, <http://www.rp-online.de/public/article/regional/niederrheinnord/duisburg/nachrichten/duisburg/432977>, 2007.
7. Hensel, W.; Krause, U.; Löffler, U., *Selbstentzündung fester Stoffe (einschließlich Stäube)*, Handbuch des Explosionsschutzes (Ed: H. Steen), Kap. 2.7, S. 257-289, WILEY-VCH-Verlag GmbH Weinheim, 2000.
8. Lohrer, C.; Schmidt, M.; Krause, U., *A Study on the Influence of Liquid Water and Water Vapour on the Self-Ignition of Lignite Coal-Experiments and Numerical Simulations*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 18 (2005) 167–177.
9. Weppen, P., *Process Calorimetry on Composting of Municipal Organic Wastes*, Biomass and Bioenergy 21 (2001) 289–299.
10. Barrena, R.; Canovas, C.; Sánchez, A., *Prediction of Temperature and Thermal Inertia Effect in the Maturation Stage and Stockpiling of a Large Composting Mass*, Waste Management 26 (2006) 953–959.
11. DIN EN 15188: 2007, *Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Staubschüttungen*, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
12. Krause, U., *Wärme- und Stofftransportvorgänge bei sicherheitstechnischen Untersuchungsverfahren für Staubbrände und Staubexplosionen*, Shaker Verlag, Aachen, 2002.
13. Lohrer, C.; Schmidt, M.; Krause, U., *Brandgefahren bei der Schüttgutlagerung – Einfluss von Inertgasen und Feuchte*, 10. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik, Berlin, 17./18.06.2004, S. 19-23, 2004.
14. Scholz, V.; Idler, C.; Daries, W., *Untersuchungen zur verlustminimierten und humanhygienischen Lagerung von Feldholz*, Endbericht zum FNR-Projekt 99NR136, 2004.

¹ Letzte Überprüfung der Internet Seiten: 27.04.2009

Anhang

A.1 Eigenschaften der untersuchten Holzsorten

A.1.1 Untersuchte Holzsorten

Holz	Eigenschaften
Kiefer 1	Sägespäne, rindenfrei
Kiefer 2, grob	Feinhackschnitzel, rindehaltiges Holz, unzerkleinert
Kiefer 2, zerkleinert	Feinhackschnitzel, rindehaltiges Holz, zerkleinert
Pappel	Feinhackschnitzel, rindehaltiges Holz, unzerkleinert

A.1.2 Eigenschaften der untersuchten Holzsorten

Holz	Korngröße [mm]	λ [W/(K*m)]	c_p [J/(kg*K)]	Dichte (trocken) [kg/m ³]	Aschegehalt [%]	Elementaranalyse [C/H/N in %]	Brennwert [J/kg]
Kiefer 1	Mittelwert ~0,25	0,069	1156	180	0,222	51,77/6,23/0,31	1,87E+07
Kiefer 2, grob	Mittelwert ~10	0,138	1500	150	0,610	50,27/5,98/0,19	2,01E+07
Kiefer 2, zerkleinert	< 2	0,065	1500	260	0,610	50,27/5,98/0,19	2,01E+07
Pappel	Mittelwert ~4	0,131	2100	100	2,102	49,64/5,28/0,53	1,97E+07

λ = Wärmeleitfähigkeit

c_p = Spezifische Wärmekapazität

A.2 Selbstentzündung und Induktionszeit: Experimentelle Ergebnisse und Extrapolation für repräsentative Holzproben

A.2.1 Experimentelle Ergebnisse

Volumen [ml] Zylinder d = h	<u>Kiefer 1</u>		<u>Kiefer 2, grob</u>		<u>Pappel</u>	
	T _{SE} [°C]	Induktionszeit [h]	T _{SE} [°C]	Induktionszeit [h]	T _{SE} [°C]	Induktionszeit [h]
400	186	2,6	-	-	-	-
800	179	3,5	189	4,3	187	8,9
1600	169	5,6	180	5,7	180	17,5
3200	-	-	171	9,5	173	23,2

A.2.2 Extrapolation auf 1000, 10000 und 100000 m³ (gültig für kompakte Schüttungen *)

Volumen [m ³] Zylinder d = h	<u>Kiefer 1</u>		<u>Kiefer 2, grob</u>		<u>Pappel</u>	
	T _{SE} [°C]	Induktionszeit [h]	T _{SE} [°C]	Induktionszeit [h]	T _{SE} [°C]	Induktionszeit [h]
1000	52	451	55	645	82	10618
10000	38	1669	40	2490	69	56774
100000	25	6180	26	9614	57	303579

*) Die extrapolierten Ergebnisse besitzen nur Gültigkeit für kompakte Schüttungen, bei denen die Abmaße in Länge, Breite und Höhe nicht wesentlich voneinander abweichen. Sie stellen demnach den kritischsten Fall dar. Wird z.B. die Haldenhöhe begrenzt, werden die T_{SE} höhere Werte annehmen.

A.3 Kritische Schüttguttemperaturen T_{KS}

A.3.1 Kritische Schüttguttemperaturen T_{KS} bei Begrenzung der Haldenbreite auf 15 m für verschiedene Holzsorten

Höhe [m]	Umgebungstemperatur* [°C]	T_{KS} [°C]			
		Kiefer 1	Kiefer 2, grob	Kiefer 2, zerkleinert	Pappel
5	0	>80	>80	79	>80
	10	>80	>80	78	>80
	20	80	>80	78	>80
	30	80	>80	77	>80
	40	79	>80	76	>80
6	0	78	>80	75	>80
	10	77	>80	75	>80
	20	77	>80	75	>80
	30	76	>80	74	>80
	40	76	80	73	>80
7	0	75	79	73	>80
	10	75	79	73	>80
	20	74	78	72	>80
	30	74	78	72	>80
	40	74	77	71	>80

*Durchschnitt

A.3.2 Kritische Schüttguttemperaturen T_{KS} bei Begrenzung der Haldenbreite auf 30 m für verschiedene Holzsorten

Höhe [m]	Umgebungstemperatur* [°C]	T_{KS} [°C]			
		Kiefer 1	Kiefer 2, grob	Kiefer 2, zerkleinert	Pappel
5	0	80	>80	79	>80
	10	80	>80	78	>80
	20	79	>80	77	>80
	30	79	>80	76	>80
	40	78	>80	76	>80
6	0	76	>80	74	>80
	10	76	80	74	>80
	20	75	80	73	>80
	30	75	79	73	>80
	40	74	78	72	>80
7	0	73	77	71	>80
	10	72	77	71	>80
	20	72	76	70	>80
	30	71	75	69	>80
	40	70	74	68	>80

*Durchschnitt

Legende:

keine Selbstentzündungsgefahr
Selbstentzündung möglich

A.4 Induktionszeiten

A.4.1 Induktionszeiten bei Begrenzung der Haldenbreite auf 15 m für verschiedene Holzsorten

Höhe [m]	Umgebungstemperatur* [°C]	Induktionszeit [Tage]		
		Kiefer 1	Kiefer 2, grob	Kiefer 2, zerkleinert
5	0	-	-	60
	10	-	-	60
	20	99	-	59
	30	90	-	58
	40	82	-	58
6	0	72	-	59
	10	71	-	58
	20	71	-	58
	30	70	-	57
	40	70	69	57
7	0	69	60	54
	10	68	59	54
	20	68	58	53
	30	67	56	53
	40	66	55	53

*Durchschnitt

A.4.2 Induktionszeiten bei Begrenzung der Haldenbreite auf 30 m für verschiedene Holzsorten

Höhe [m]	Umgebungstemperatur* [°C]	Induktionszeit [Tage]		
		Kiefer 1	Kiefer 2, grob	Kiefer 2, zerkleinert
5	0	111	-	61
	10	97	-	60
	20	88	-	59
	30	85	-	59
	40	81	-	58
6	0	71	-	55
	10	70	74	55
	20	70	68	54
	30	69	66	53
	40	69	62	53
7	0	68	55	52
	10	68	55	52
	20	67	55	51
	30	67	54	51
	40	67	54	51

*Durchschnitt

A.5 Flussdiagramm (Beispielwerte für Kiefernholz)

