



LAND  
BRANDENBURG

Ministerium für Umwelt, Gesundheit  
und Verbraucherschutz



## Leitfaden

zur Brandvermeidung durch Selbstentzündung bei der  
Lagerung von Recycling- und Deponiestoffen

## **Leitfaden**

zur Brandvermeidung durch Selbstentzündung  
bei der Lagerung von Recycling- und Deponiestoffen

Autoren:

Dr. rer.nat. **Anka Berger**<sup>a</sup>

ORR Dr. –Ing. **Martin Schmidt**<sup>a</sup>

Dr. –Ing. **Fabio Ferrero**<sup>a</sup>

Dir. u. Prof. Dr. –Ing. habil. **Ulrich Krause**<sup>b</sup>

Titelfoto: FBW Flächenbewirtschaftungs GmbH & Co. KG

**BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung**

<sup>a</sup> Fachgruppe II.2 „Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme“

<sup>b</sup> Fachgruppe VII.3 „Brandingenieurwesen“

Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

## Vorwort

Wertstoffe aus dem Recycling sowie zur Deponierung vorgesehene Stoffe fallen in der Volkswirtschaft in großen Mengen an und müssen zwischen- oder endgelagert werden. In solchen Lagern liegen in der Regel Stoffgemische vor, die häufig brennbar sind oder brennbare Anteile enthalten.

Die Lagerung erfolgt entweder in loser Haldenschüttung, als Einbau in spezielle Deponiebauwerke oder in Form von Haufwerken, die aus Pressballen errichtet werden. Geraten die auf diese Weise gelagerten Stoffe in Brand, entstehen neben einer extremen Wärme-freisetzung exzessive Emissionen von Rauch und Brandgasen, die möglicherweise zur gesundheitlichen Gefährdung der in der Umgebung ansässigen Bevölkerung sowie zu Gefahren für die Umwelt führen.

Das Löschen dieser Brände ist wegen der großen Mengen in den Brand involvierten Materials außerordentlich schwierig und aufwändig. Es sind Brände bekannt, bei denen die Löscharbeiten mehrere Wochen, die Nachsorge bis zu zwei Jahren in Anspruch nahmen. Außerdem führt die Kontamination der üblicherweise notwendigen großen Mengen von Löschwasser zur Gefährdung des Grundwassers.

Brandstiftung muss mit Mitteln des Objektschutzes begegnet werden. Darauf bezieht sich dieser Leitfaden nicht. Viele Brände sind jedoch durch Selbstentzündung des Materials verursacht worden. Selbstentzündung von Haufwerken kann durch vorbeugende technische Maßnahmen vermieden werden.

Ziel des Leitfadens ist, die Grundlagen der Selbstentzündung von Haufwerken in knapper Form darzustellen und daraus praktische Hinweise zur Vermeidung der Selbstentzündung in Lagern für Recyclingmaterialien abzuleiten.

Dem Leitfaden liegen Ergebnisse eines Forschungsvorhabens „Vermeidung von Selbstentzündung und Brandgasemissionen bei der Lagerung von Massenschüttgütern, Recycling- und Deponiestoffen“ zugrunde. Dieses Vorhaben wurde gemeinsam von der Martin-Luther-Universität Halle/Wittenberg und der Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung bearbeitet und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) „Otto von Guericke“ finanziell gefördert (Förderkennzeichen BG 14261). Für diese Förderung möchten die Autoren sich bedanken.

Die Forschungsergebnisse waren Gegenstand des Workshops „Brandvermeidung in Recycling-Zwischenlagern“, der am 22. Januar 2009 in Potsdam im Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg durchgeführt wurde. Den dort vertretenen regionalen Abfallwirtschaftsverbänden sowie Landes- und Kommunalbehörden konnten bereits Schlussfolgerungen und Empfehlungen für den Vollzug, umweltgerechtes Lagermanagement und effektive Brandschutzkonzepte vorgestellt werden.

Berlin, März 2010

# Inhalt

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>Grundlagen der Selbstentzündung</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>Ermittlung der Selbstentzündungsgefährdung</b>	<b>10</b>
3.1	Experimentelle Ermittlung der für die Selbstentzündung relevanten stofflichen Eigenschaften	10
3.2	Experimentelle Ermittlung der reaktionskinetischen Größen	10
3.3	Auswertung der experimentellen Ergebnisse und Übertragung in den technischen Maßstab	10
<b>4.</b>	<b>Maßnahmen zur sicheren Lagerung von Recycling- und Deponiestoffen</b>	<b>14</b>
4.1	Lagerungsgeometrie	14
4.2	Lagerungszeiten	14
4.3	Numerische Simulationen	14
4.4	Weitere empfohlene Brandschutzmaßnahmen	15
	<b>Literatur</b>	<b>16</b>

# 1 Einleitung

Zwischenlager von einigen zehntausend Tonnen sind für Schüttgüter, Recyclingstoffe und feste Brennstoffe üblich. Brände in solchen Zwischenlagern verursachen Emissionen von Rauch und Brandgasen, die sich oft über Entfernungen von mehreren Kilometern ausbreiten und neben Rauch- und Geruchsbelästigung der in der Umgebung ansässigen Bevölkerung möglicherweise auch zu Gesundheitsgefährdungen führen können.

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

Die Zusammensetzung der Brandgase kann je nach Zusammensetzung des Schüttgutes sehr stark variieren, d. h. neben den typischen Verbrennungsprodukten wie CO, CO<sub>2</sub>, HCN, HCl und H<sub>2</sub>O können auch Produkte einer unvollständigen Verbrennung (KW, PAH, FCKW, Dioxine) freigesetzt werden.

Der Vermeidung solcher Brände sollte deshalb unbedingt Vorrang eingeräumt werden, ohne Maßnahmen des abwehrenden Brandschutzes außer acht zu lassen.

Ob in einem Haufwerk aus brennbaren Stoffen oder mit brennbaren Anteilen mit Selbstentzündung zu rechnen ist, kann auf folgende Weise ermittelt werden:

- die relevanten Materialeigenschaften (s. Abschnitt 3) müssen experimentell bestimmt werden,
- die Geometrie des Haufwerks muss festgelegt werden (der Selbstentzündungsvorgang ist skalenabhängig),
- aus den experimentellen Daten muss eine Vorhersage für das Selbstentzündungsverhalten des realen Haufwerks abgeleitet werden.

Die Ursachen für die Selbstentzündung liegen in exothermen Prozessen, die im Prinzip bei beliebigen Temperaturen ablaufen. Die Temperatur bestimmt aber die Geschwindigkeit der Reaktionen in der Weise, dass die Reaktionsrate mit steigender Temperatur zunimmt.

In einer Ablagerung (Haufwerk, Schüttung, Halde) brennbaren Feststoffs lagert sich im Lückenvolumen vorhandener Sauerstoff an den reaktiven Oberflächen des Feststoffes an. Diese Oxidation verläuft exotherm. Die bei der Reaktion freigesetzte Wärme wird durch Wärmeleitung – bei ausreichender Permeabilität auch durch Konvektion – durch die Schüttung transportiert und über die Außenfläche an die Umgebung abgegeben. Gleichzeitig dringt durch Konvektion oder Diffusion frischer (Luft-)Sauerstoff in die Ablagerung ein und steht für das Fortschreiten der Oxidation zur Verfügung.

Feststoffschüttungen sind schlechte Wärmeleiter, wodurch die Wärmeabgabe begrenzt wird. In Abhängigkeit von Umgebungstemperatur, Geometrie der Schüttung und Stoffeigenschaften kann daher die zeitliche Rate der Wärmeproduktion (integriert über das Schüttungsvolumen) größer sein als der abgeführte Wärmestrom (integriert über die Oberfläche der Schüttung).

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 abbrennt. Dabei hängt es von der Verfügbarkeit des Sauerstoffs ab, ob der Brand als Schwel- oder Glimmbrand oder mit offener Flamme verläuft.

Überlagert werden die chemischen Reaktionen unter Umständen von physikalischen und mikrobiologischen Vorgängen, die Einfluss auf die Temperaturentwicklung nehmen.

So führt z.B. die Adsorption von Wasser an verhältnismäßig trockenen Feststoffoberflächen ebenfalls zur Temperaturerhöhung, da Adsorptionswärme freigesetzt wird. Praktisch äußert sich dieses Phänomen darin, dass nach Phasen längerer Trockenheit bei einsetzenden Niederschlägen in Halden mit brennbaren Abfallstoffen verstärkt Brände auftreten [5].

Verlaufen in Ablagerungen brennbarer Stoffe mikrobiologische Prozesse (Gärung, Faulen, Kompostierung), leisten diese ebenfalls einen zusätzlichen Beitrag zur Wärmefreisetzung. Dies vollzieht sich vor allem im Temperaturbereich von Umgebungstemperatur bis etwa 70 - 80 °C. Oberhalb dieser Temperatur nimmt die mikrobiologische Aktivität ab. Die Temperaturerhöhung im Haufwerk auf 70 - 80 °C durch mikrobiologische Vorgänge begünstigt die chemische Umsetzung und kann damit als Vorläufer-Reaktion für die Selbstentzündung angesehen werden. Voraussetzung für mikrobiologische Aktivität ist ein ausreichend hoher Feuchtegehalt im abgelagerten Material.

Schematisch ist der Verlauf eines durch Selbstentzündung verursachten Brandes in einem Haufwerk in Abbildung 1 dargestellt.

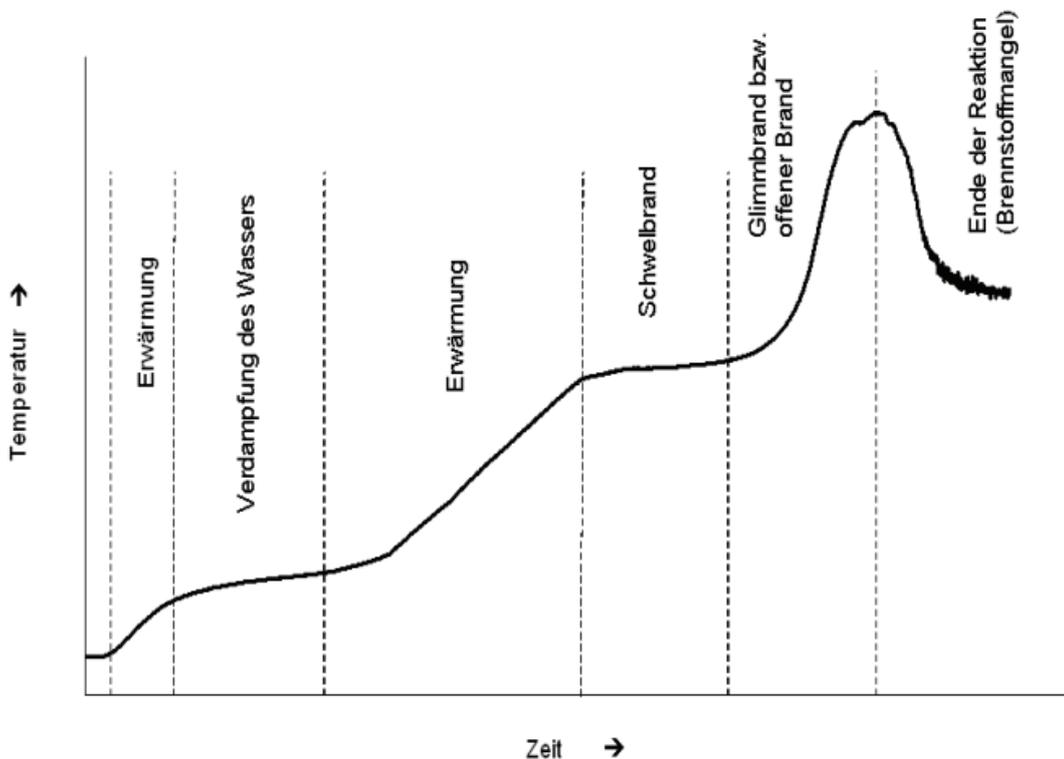


Abbildung 1: Schematischer Verlauf der Selbstentzündung in einer Ablagerung von brennbaren Stoffen bzw. Stoffen mit brennbaren Anteilen.

Das Auftreten der Selbstentzündung wird von folgenden Faktoren maßgeblich beeinflusst:

- *physikalische und chemische Eigenschaften des Materials:*
  - Porosität, Korngröße und Schüttdichte: diese drei Parameter sind stark miteinander verbunden und beeinflussen den Transport von Sauerstoff bzw. Brandgasen innerhalb des Haldenkörpers,
  - Feuchtegehalt der Halde,
  - Kinetik der chemischen Reaktionen,
  - Massenanteil der brennbaren Komponenten,
  - Brennwert der brennbaren Komponenten,
- *Umgebungsfaktoren:*
  - Umgebungstemperatur,
  - Häufigkeit und Intensität von Niederschlägen,
  - Wind (Begünstigung der Sauerstoffzufuhr),
- *Lagerungsgeometrie:*
  - Größe und Form des Haufwerks.

Da einerseits die Wärmeproduktion proportional zum Volumen ist und andererseits die Wärme über die Oberfläche abgeleitet wird, ergibt sich eine Abhängigkeit der Temperaturverteilung in der Halde vom Volumen/Oberflächen-Verhältnis der Schüttung (charakteristische Abmessung).

Die Selbstentzündungstemperatur (TSE) einer Schüttung (eines Haufwerks, einer Halde) ist die Grenztemperatur der Umgebung der Schüttung (nicht die Temperatur in der Schüttung selbst!) unterhalb welcher die Schüttung thermisch stabil bleibt bzw. oberhalb welcher Selbstentzündung eintritt.

Wegen der Abhängigkeit der TSE von der charakteristischen Länge (Volumen/Oberflächen-Verhältnis) ist die TSE für jede Schüttung (jedes Haufwerk, jede Halde) individuell zu bestimmen.

Die Selbstentzündung großer Haufwerke (Schüttungen, Halden) tritt in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur erst einige Zeit nach Beginn der Lagerung ein. Diese Zeit nennt man Induktionszeit (gelegentlich auch Inkubationszeit).

Ist die Temperatur des Lagergutes zu Beginn der Lagerung gegenüber der Umgebungstemperatur erhöht, verkürzt sich die Induktionszeit.

Grundsätzlich kann **Selbstentzündung** von Feststoffschüttungen nur dann eintreten, wenn

- die **Lagerungstemperatur** (Umgebungstemperatur) ausreicht, die Schüttung beim vorhandenen **Volumen/Oberflächen-Verhältnis** zu zünden bzw. umgekehrt, das Volumen/Oberflächen-Verhältnis groß genug ist, um bei der vorhandenen Lagerungstemperatur die Schüttung zu zünden,
- die **Lagerungsdauer** bei der gegebenen Temperatur größer ist als die **Induktionszeit**,
- die **Abfuhr von Verbrennungsgasen** und die **Nachführung von Sauerstoff** in die Reaktionszone ausreichend ist.

## 3 Ermittlung der Selbstentzündungsgefährdung

Für die Ermittlung der Selbstentzündungsgefährdung eines Haufwerkes (Schüttung, Halde) sind drei Schritte erforderlich:

### 3.1 Experimentelle Ermittlung der für die Selbstentzündung relevanten stofflichen Eigenschaften

Hierzu zählen Partikelgrößenverteilung, Schüttdichte, Feuchtegehalt (Massenanteil des physisorbierten Wassers), Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, oberer Heizwert (Brennwert) und Permeabilität. Diese Größen müssen durch Labormessungen bestimmt werden. Einzulagerndes Schüttgut sollte auf eine mögliche Neigung zur Freisetzung von Wärme aufgrund von Adsorptionsvorgängen (Befeuchtung) sowie mikrobiologischen Zersetzungsprozessen untersucht werden.

### 3.2 Experimentelle Ermittlung der reaktionskinetischen Größen

Hierzu zählen die scheinbare Aktivierungsenergie und der sogenannte präexponentielle Faktor. Diese Größen charakterisieren die Abhängigkeit der zeitlichen Rate der chemischen Umsetzung des Ausgangsmaterials (Reaktionsrate) von der Temperatur. Bekannte Verfahren zur Bestimmung dieser Größen sind Warmlagerung (adiabatische oder isoperibole Reaktionsführung), thermogravimetrische Analyse (TGA) oder „Differential Scanning Calorimetry“ (DSC). W

### 3.3 Auswertung der experimentellen Ergebnisse und Übertragung in den technischen Maßstab

Der Zweck der Übertragung der experimentellen Ergebnisse in den technischen Maßstab besteht in der Ableitung von sicheren Lagerungsbedingungen für das untersuchte Lagergut im Hinblick auf die Form und Größe des Lagers (Volumen/Oberflächen-Verhältnis) und die zulässige Lagerungsdauer. Die Auswertemethode richtet sich nach der Art der experimentellen Analyseverfahren.

In Tabelle 1 werden die experimentellen Analyseverfahren und die daraus hervorgehenden Ergebnisse genannt.

Es ist erforderlich, die unter den Punkten 3.1 bis 3.3 genannten Schritte in einem für diese Zwecke ausgerüsteten und befähigten Prüflaboratorium ausführen zu lassen.

Recycling- und Deponiestoffe weisen oft eine sehr inhomogene Zusammensetzung auf. Aus diesem Grund sind Warmlagerungsversuche, bei denen Probenvolumina bis zu einigen Litern zur Untersuchung kommen, thermoanalytischen Untersuchungsmethoden (DSC, TGA) vorzuziehen. Auf die Bestimmung und Auswertung der am häufigsten angewendeten isoperibolen Warmlagerung wird hier kurz eingegangen.

Zur Bestimmung der Selbstentzündungstemperaturen  $T_{SE}$  werden Proben in äquidistanten Drahtnetzzyllindern (Durchmesser = Höhe) bei konstanter Ofentemperatur gelagert und durch Messung der Temperatur im Zentrum der Probe festgestellt, ob Selbstentzündung eintritt. Die Selbstentzündungstemperatur ist definitionsgemäß die höchste Temperatur der die Probe umgebenden Atmosphäre (Lagerungstemperatur, im Versuch Ofentemperatur),

Tab. 1 Ergebnisgrößen der experimentellen Analysemethoden für die thermische Stabilität brennbarer Schüttgüter, Recycling- und Deponiestoffe

Methode	Ergebnis
Adiabate Warmlagerung	Adiabate Induktionszeit <sup>1</sup> , scheinbare Aktivierungsenergie, präexponentieller Faktor
Isoperibole Warmlagerung	Selbstentzündungstemperatur als Funktion vom Volumen/Oberflächen-Verhältnis, scheinbare Aktivierungsenergie, präexponentieller Faktor
Thermogravimetrische Analyse (TGA)	Masseverlustrate, „Onset“-Temperatur <sup>2</sup> , scheinbare Aktivierungsenergie, präexponentieller Faktor
Differential Scanning Calorimetry (DSC)	Wärmefreisetzungsrate, „Onset“-Temperatur <sup>2</sup> , scheinbare Aktivierungsenergie, präexponentieller Faktor

<sup>1</sup> Zeitspanne zwischen Beginn der Warmlagerung und Zündung unter adiabatischen Versuchsbedingungen

<sup>2</sup> Temperatur, bei der ein signifikanter Masseverlust (TGA) bzw. eine signifikante Wärmefreisetzung (DSC) der Probe messbar ist.

bei der gerade keine Entzündung der Probe mehr eintritt. In einem iterativen Prozess werden die Versuche bei veränderten Ofentemperaturen so lange wiederholt, bis das Intervall zwischen einem Versuch mit Zündung und einem Versuch ohne Zündung maximal 2 K beträgt. Die  $T_{SE}$  wird für mindestens vier Probenvolumina bestimmt.

Die Extrapolation der im Labormaßstab gewonnenen Ergebnisse in den Bereich technisch interessanter Volumina erfolgt üblicherweise durch ein sogenanntes Arrhenius-Diagramm<sup>1</sup>.

In diesem wird der Term  $\ln\left(\frac{\delta_c \cdot T_{SE}^2}{r^2}\right)$  über der reziproken  $T_{SE}$  [1] (Quasi-Arrhenius Diagramm) aufgetragen, vgl. Abbildung 2.

Hierin ist  $\delta_c$  der sog. kritische Frank-Kamenetzki<sup>2</sup>-Parameter, der für äquidistante Zylinder 2,76 beträgt.  $T_{SE}$  ist die Selbstentzündungstemperatur in Kelvin und  $r$  der Radius des Haufwerks in m.

Die Beurteilung der Selbstentzündungsgefahr realer Schüttungen über den Weg der beschriebenen Extrapolation und somit eine sichere Einschätzung der Selbstentzündungsgefahren ist häufig nur eingeschränkt möglich. Folgende Bedingungen können bei dieser Extrapolation nicht berücksichtigt werden:

- Schüttungsgeometrie weicht von einer kompakten Form ab (z.B. langgestreckte Silos oder Halden),
- Einlagerung von Schüttgut mit erhöhter Anfangstemperatur,

<sup>1</sup> Svante Arrhenius (1859-1927), schwedischer Physiker und Chemiker, Nobelpreisträger für Chemie 1903

<sup>2</sup> David Frank-Kamenetzki (1910-1970), russischer Physiker

- Lagerung bei erhöhtem oder vermindertem Sauerstoff - Volumenanteil,
- Zutritt von Feuchtigkeit, Änderung der Schüttgutfeuchte,
- Wind,
- Auftreten exothermer, biologischer Zersetzungsprozesse.

Jeder der vorab genannten Punkte beeinflusst das Selbstentzündungsverhalten maßgeblich. Geänderte Randbedingungen können sowohl zu einer Erhöhung oder Absenkung der Selbstentzündungstemperatur als auch zur Verlängerung bzw. Verkürzung der Induktionszeit (Zeit bis zur Entzündung) führen. In diesen Fällen sind numerische Simulationen ein Weg, das Selbstentzündungsverhalten einzuschätzen, siehe Abschnitt 4.3.

Für Einzelheiten der Auswertung der weiteren in Tabelle 1 aufgeführten Methoden wird auf einschlägige Literatur verwiesen [1-4].

In Abbildung 3 ist als Beispiel für zwei Recyclingmaterialien der Zusammenhang zwischen dem Verhältnis Volumen zu Oberfläche eines Haufwerkes und Induktionszeit in doppelt logarithmischer Darstellung abgebildet. Aufgrund gemessener Induktionszeiten für die Selbstentzündung an Laborproben kann die Induktionszeit eines realen Haufwerkes bei bekannten Volumen/Oberflächen-Verhältnis extrapoliert werden.

Hinweis:

Es wird hier nur die Methodik der Ermittlung von Selbstentzündungstemperaturen und Induktionszeiten beschrieben. Die Geradenverläufe in den Abbn. 2 und 3 gelten nur für die darin abgebildeten Stoffe. Für andere Stoffe sind diese Verläufe neu zu bestimmen.

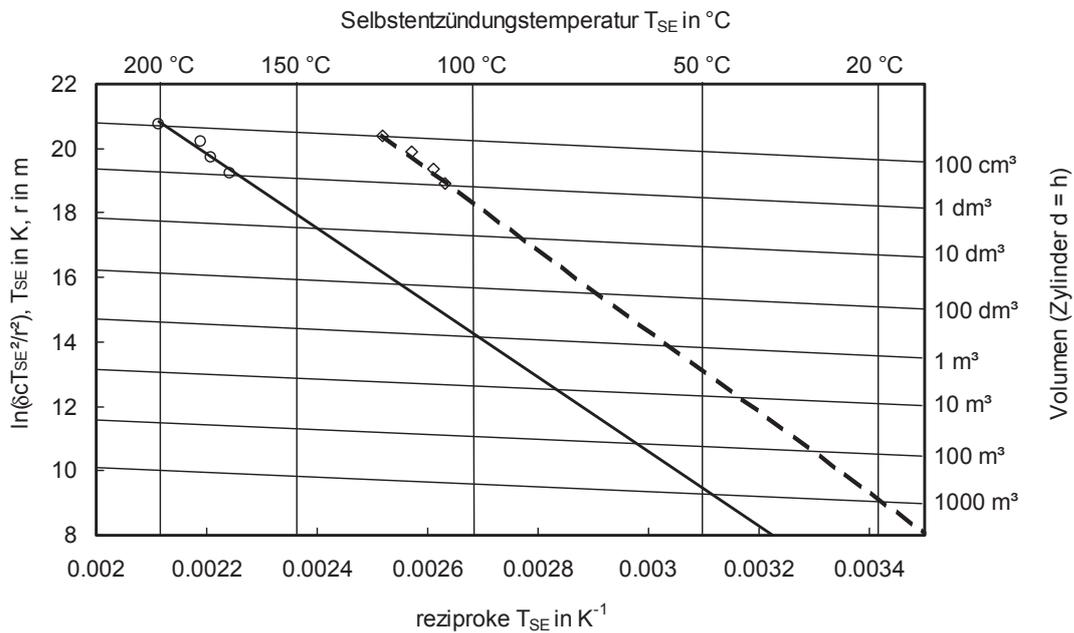


Abbildung 2: Arrhenius-Diagramm, Ersatzbrennstoff, zerkleinert, 20 % Inertmaterial (gestrichelte Linie); Papier, zerkleinert (durchgezogene Linie)

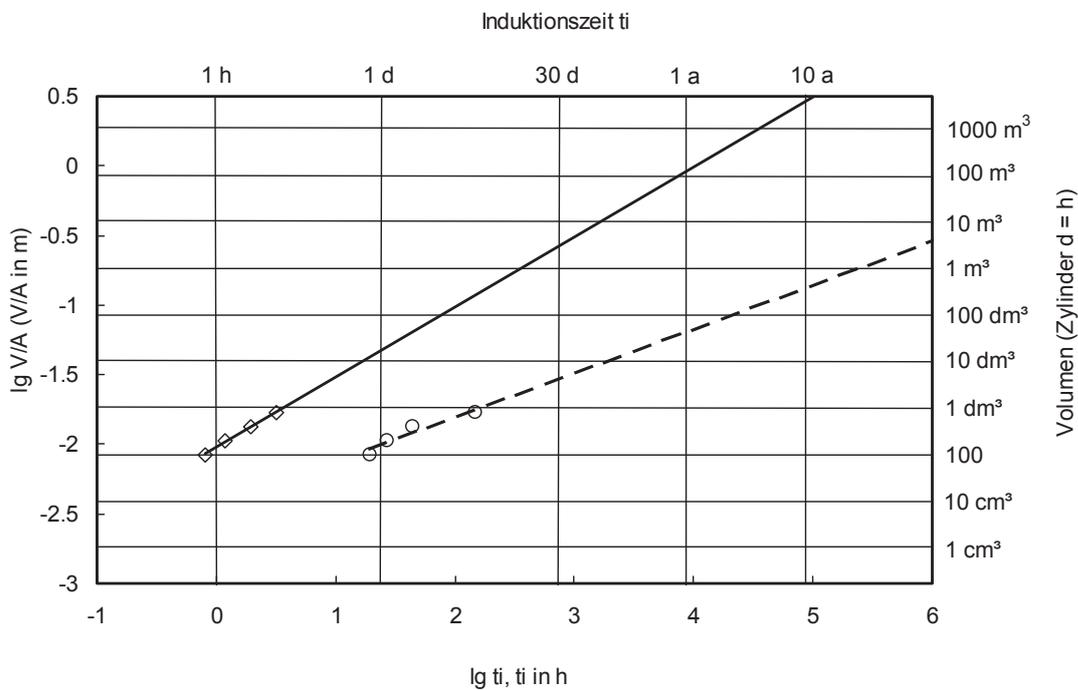


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Schüttungsvolumen und Induktionszeit, Ersatzbrennstoff, zerkleinert, 20 % Inertmaterial (gestrichelte Linie); Papier, zerkleinert (durchgezogene Linie)

## 4 Maßnahmen zur sicheren Lagerung von Recycling- und Deponiestoffen

Die zu ergreifende Maßnahmen zur Verhinderung der Selbstentzündung werden in drei Kategorien eingestuft:

- Sichere Lagerungsgeometrie;
- Sichere Lagerungszeiten;
- Zusätzliche Brandschutzmaßnahmen.

### 4.1. Lagerungsgeometrie

Zunächst ist die Jahresmitteltemperatur des Standortes zu ermitteln bzw. sind entsprechende Informationen einzuholen. Diese, aufgerundet auf den vollen Einerwert, wird als Selbstentzündungstemperatur angesetzt, d.h. als die Umgebungstemperatur, für welche im nächsten Schritt das „kritische“ Volumen/Oberflächen-Verhältnis der Halde gesucht wird.

Die Ermittlung des kritischen Volumen/Oberflächen-Verhältnisses erfolgt anhand der durch die thermische Analyse nach Abschnitt 3.2 ermittelten Daten durch eine sachkundige Stelle. Vorgaben des Betreibers bezüglich Grundfläche des Lagers oder maximaler Lagerhöhe, z.B. aufgrund baulicher Gegebenheiten, können dabei berücksichtigt werden, sofern dies sicheren Lagerungsbedingungen nicht entgegensteht.

Ist z.B. die Grundfläche des Lagers vorgegeben, geht es für die sachkundige Stelle nur noch darum, geometrische Form und Höhe des Lagers zu bestimmen.

Entspricht die vorgesehene Lagergeometrie im wesentlichen den in [1] genannten Geometrien (Würfel, Zylinder mit Durchmesser = Höhe) reicht eine Bestimmung des „kritischen“ Volumen/Oberflächen-Verhältnisses nach [1] aus.

Weicht die Form des Lagers stark von den in [1] genannten Geometrien ab, sollte eine numerische Simulationsrechnung zur Ermittlung der optimalen Lagergeometrie von einer sachkundigen Stelle vorgenommen werden (s. Abschnitt 4.3).

Als Eingangsdaten für die Simulation werden die unter den Punkten 3.1 und 3.2 genannten Größen sowie gegebenenfalls weitere, von der sachkundigen Stelle zu ermittelnde Daten verwendet.

### 4.2. Lagerungszeiten

Falls bei einer Lagerung das für die zugrunde liegende Umgebungstemperatur kritische Volumen/Oberflächen-Verhältnis überschritten wird, ist eine potentielle Gefahr der Selbstentzündung vorhanden. Eine sichere Lagerung lässt sich in diesem Fall noch über eine Begrenzung der Lagerungsdauer erreichen. Die Lagerungsdauer muss kürzer als die Induktionszeit zur Selbstentzündung sein. Als Induktionszeit wird die Zeit vom Start der Lagerung bis zum Einsetzen der Selbstentzündung definiert (siehe Abschnitt 2).

### 4.3. Numerische Simulationen

Numerische Simulationen erlauben es, das Entzündungs- und Brandverhalten von Halden beliebiger Geometrien sowie bei beliebigen Rand- und Anfangsbedingungen (Umgebungs-faktoren) zu bestimmen. Auf diese Weise lässt sich das Selbstentzündungsverhalten jeder beliebigen Schüttung individuell vorhersagen.

Numerische Simulationen zur Vorhersage der Selbstentzündung von Schüttungen mit beliebiger Geometrie müssen folgende Mindestanforderungen erfüllen:

- dreidimensionale, instationäre Lösung der Differentialgleichung des Temperaturfeldes unter beliebigen Rand- und Anfangsbedingungen,
- Berechnung eines Quellterms für die Wärmeproduktion durch chemische Reaktionen im Innern der Schüttung,
- Erzeugung einer von der Feinheit des Berechnungsgitters unabhängigen Lösung der Differentialgleichung(en).

Bei Vorliegen von Symmetrie kann eine zwei- bzw. eindimensionale Lösung der Differentialgleichung des Temperaturfeldes ausreichend sein.

#### **4.4. Weitere empfohlene Brandschutzmaßnahmen**

Die folgenden praktischen Hinweise sollten während der Lagerung von Recycling- und Deponiestoffen berücksichtigt werden:

Temperaturmessung im Kern der Halde sowie in regelmäßigen Abständen (max. 2 m) vom Kern in Richtung Außenseiten,

- Verbindung der Temperaturmessung mit einem Alarmierungssystem, um so schnell wie möglich Gegenmaßnahmen einleiten zu können (Alarmierungsschwelle 80 °C),
- Einbeziehung der Vorgaben der Kunststofflager-Richtlinie [6] hinsichtlich des abwehrenden Brandschutzes (Aufbau der Brandabschnitte, Gassenbreite, Löschwasservorrat).

## Literatur

1. DIN EN 15188: 2007: Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Staubschüttungen, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
2. Steen, H., ed., *Handbuch des Explosionsschutzes*, Wiley-VCH Verlag GmbH: Weinheim, 2000.
3. Malow, M.; Krause, U., The overall activation energy of the exothermic reactions of thermally unstable materials, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 17 (2004) 51–58.
4. Krause, U., Zündgefahren lagernder Staubschüttungen und -schichten - Berechnungsmethoden und Diagramme für die Praxis, VDI-Fortschrittbericht, Reihe 3, Nr. 422, Düsseldorf, 1996.
5. 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.
6. KLR - Kunststofflager-Richtlinie: Richtlinie über den Brandschutz bei der Lagerung von Sekundärstoffen aus Kunststoff - Nordrhein-Westfalen - (MBl. NRW. 1998 S. 384).

**Ministerium für Umwelt,  
Gesundheit und Verbraucherschutz  
des Landes Brandenburg**

Referat Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Heinrich-Mann-Allee 103

14473 Potsdam

Tel: (0331) 866-7017

Fax: (0331) 866-7018

E-Mail: [pressestelle@mugv.brandenburg.de](mailto:pressestelle@mugv.brandenburg.de)

[www.mugv.brandenburg.de](http://www.mugv.brandenburg.de)

**Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft  
und Flurneuordnung**

Müllroser Chaussee 50

15236 Frankfurt (Oder)

E-Mail: [poststelle@lvlf.brandenburg.de](mailto:poststelle@lvlf.brandenburg.de)