

Brandgefahren bei der Schüttgutlagerung – Einfluss von Inertgasen und Feuchte

Ch. Lohrer, M. Schmidt, U. Krause
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
Fachgruppe II.2

Kurzfassung

Seit langer Zeit ist bekannt, dass ungünstige Lagerungsbedingungen bei brennbaren Schüttgütern und Stäuben zur Selbstentzündung führen können. Die meisten Studien zu diesem Thema beziehen sich allerdings auf Umgebungsbedingungen (d. h. mit einem Sauerstoff-Volumenanteil von 21 % in der Schüttungsumgebung). In einigen technischen Anwendungen jedoch wird brennbares Schüttgut oder Staub unter einer Gasatmosphäre mit reduziertem Sauerstoff-Volumenanteil gelagert und verarbeitet (Inertisierung). Dabei ist zunächst nicht klar, bis zu welchem Ausmaß der Sauerstoff-Volumenanteil reduziert werden muss, um bei einer vorgegebenen Lagerungstemperatur Selbstentzündung auszuschließen. Neben dem Sauerstoffvolumenanteil können auch der Feuchtegehalt der Schüttung sowie die relative Luftfeuchtigkeit in der Schüttungsumgebung den Vorgang der Selbstentzündung beeinflussen.

Die hier vorgestellten experimentellen Untersuchungen beschreiben zum einen den Einfluss des Sauerstoff-Volumenanteils auf die Selbstentzündungstemperatur (SET) von Schüttgütern und Stäuben. Es wurde beobachtet, dass die SET mit abnehmendem Sauerstoff-Volumenanteil in der Schüttungsumgebung anstieg. Jedoch traten auch bei sehr kleinem Sauerstoff-Volumenanteil noch signifikante Temperaturerhöhungen in den untersuchten Proben auf.

Zum zweiten wurde der Einfluss der Feuchte auf die SET untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass unterkritisch gelagerte Schüttungen durch Kondensation von Wasserdampf oder Zugabe von Wasser auf die Oberfläche der Schüttung in einen überkritischen Zustand gebracht werden konnten.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurde ein numerisches Modell entwickelt, mit dessen Hilfe sich der Selbsterwärmungsprozess bis hin zur Zündung von Schüttgütern berechnen lässt. Anwendungen findet dieses Modell für die Lagerung von Schüttgütern, Stäuben, Feststoffen sowie Abfällen.

Einleitung

Selbstentzündung von Schüttgütern, Stäuben oder porösen Feststoffen tritt ein, wenn ausreichende Mengen dieser Stoffe über längere Zeit bei ausreichend hohen Temperaturen gelagert werden. Man geht davon aus, dass die Oxidation des Feststoffes in den Poren bzw. Lückenvolumina prinzipiell bei beliebigen Temperaturen abläuft, die Temperatur jedoch die Geschwindigkeit der Oxidation beeinflusst. Weiterhin weisen poröse Stoffe oder Schüttungen ein schlechtes Wärmeleitvermögen auf, so dass die durch die Oxidation freiwerdende Wärme nur schlecht an die Umgebung abgeleitet werden kann. Es hängt nun vom Verhältnis der in der Schüttung produzierten Reaktionswärme zur nach außen abge-

leiteten Wärme ab, ob eine solche Schüttung unterkritisch bleibt (Wärmeproduktion übersteigt die Wärmeabgabe nicht), im kritischen Grenzzustand verhartet (Wärmeproduktion ist genau gleich der Wärmeabgabe) oder in einen überkritischen Zustand gerät (Wärmeproduktion übersteigt die Wärmeabgabe). Im letzteren Fall spricht man von Selbstentzündung.

Zu den Faktoren, die das Eintreten von Selbstentzündung beeinflussen, zählen unter anderem: Partikelgröße und -verteilung bzw. Porengröße und -verteilung, Volumen/Oberflächenverhältnis (V/A), thermische Leitfähigkeit, (Schütt-) Dichte, spezifische Wärmekapazität und die Umströmungsbedingungen der Schüttung. Trotz zahlreicher Arbeiten zu diesem Thema [1, 2], sind wichtige Effekte noch nicht hinreichend untersucht. Die vorliegende Arbeit präsentiert die experimentellen Ergebnisse zum Einfluss

- des Sauerstoff-Volumenanteils in der Schüttungsumgebung,
- der Wärmefreisetzung aufgrund des Eintrages von flüssigem Wasser („heat of wetting“),
- der Kondensation und Verdampfung von Wasser in der Schüttung

auf die SET von brennbaren Schüttgütern und Stäuben.

Zur Minderung der Brand- und Explosionsgefahr werden in der Industrie Feststoffe, vor allem solche mit hohem Staubanteil, bei vermindertem Sauerstoff-Volumenanteil gelagert oder verarbeitet. Man spricht hier von Schutzgasbetrieb oder Inertisierung. Um die damit verbundenen Kosten minimieren zu können, müssen Angaben über den Einfluss des Sauerstoffvolumenanteils in der Schüttungsumgebung auf das Selbstentzündungsverhalten für diesen Stoff bekannt sein.

Neben dem Sauerstoffvolumenanteil beeinflusst das Vorhandensein von Wasser die Selbstentzündung von Schüttgütern entscheidend. Aus vorherigen Studien ist bekannt, dass die Temperatur im Schüttgut stark ansteigen kann, sobald das Material bewässert oder Umgebungsluft mit einer erhöhten Feuchte ausgesetzt wird [3]. Die Einleitung von flüssigem Wasser in das poröse Material bzw. die Schüttung führt zur einer Freisetzung der „heat of wetting“, im wesentlichen Adsorptionswärme, während bei einer plötzlichen Erhöhung der Feuchte in der Umgebungsluft zunächst die Kondensationswärme und anschließend die „heat of wetting“ zu einer deutlichen Temperaturerhöhung in der Probe führt. Diese Effekte können einen Umschlag im thermischen Verhalten auslösen und somit eine Selbstentzündung einer ursprünglich unterkritischen Schüttung herbeiführen.

Versuchsaufbau und -durchführung

Alle Experimente wurden mit Braunkohle aus einem europäischen Abbaugbiet, bestehend aus zwei Fraktionen (siehe *Tabelle 1*) durchgeführt.

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung der SET für reduzierte Sauerstoffvolumenanteile in der Schüttungsumgebung ist in *Abb. 1* illustriert. In einen handelsüblichen Labortrockenschrank wurde eine weitere (innere) Kammer eingebaut. Diese Kammer wurde mit einem voreingestellten Luft/Stick-

Tabelle 1
Partikelgrößenverteilung der untersuchten Braunkohle

Partikelgröße in µm	Fraktion A in %	Fraktion B in %
< 20	25,3	-
20 – 40	20,7	-
40 – 63	18	-
63 – 125	20	-
125 – 200	11	9,8
200 – 315	5	4,3
315 – 500	-	2,4
500 – 1000	-	10,1
1000 – 2000	-	60

stoff-Gemisch mit der gewünschten Sauerstoffkonzentration gespült. Der Spülgasvolumenstrom (100 l/h) wurde mit einem Schwebekörper-Durchflussmesser kontinuierlich gemessen und mit Hilfe einer im Ofen befindlichen Kupferrohrschlange vorgeheizt in die Kammer geleitet. Der optimale Volumenstrom wurde in Vorversuchen in der Weise ermittelt, dass der Sauerstoff-Volumenanteil in der inneren Kammer während des Versuches konstant blieb, jedoch die durch den Spülgasstrom abgeführte Wärme so klein wie möglich gehalten werden konnte.

Die zu untersuchenden Schüttgutproben wurden vor einem Versuch im Vakuumtrockner evakuiert und anschließend mit dem Gasgemisch mit der gewünschten Sauerstoffkonzentration gespült.

Der Sauerstoffvolumenanteil in der inneren Kammer wurde mit einem Sauerstoffanalysator während des Versuches kontinuierlich gemessen. Hierfür war es erforderlich, das Messgas zu kühlen und zu reinigen.

Durch jeweils ein Thermoelement im Schwerpunkt der Probe sowie im freien Gasraum in der inneren Kammer wurden die Probentemperatur und die Umgebungstemperatur der Probe gemessen.

Die Versuche erfolgten mit beiden Fraktionen A und B der Braunkohle. In Anlehnung an [4] wurden dazu äquidistante Drahtnetzzyylinder der Größen 31 ml, 100 ml, 400 ml, 800 ml, 3200 ml, 6400 ml und 12800 ml verwendet. Die

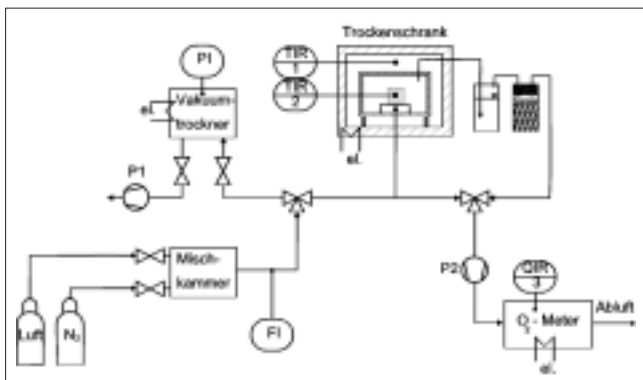


Abb. 1
Versuchsaufbau zur Bestimmung der SET bei vermindertem Sauerstoffvolumenanteil in der Schüttungsumgebung

Sauerstoffvolumenanteile der durchgeführten Versuche lagen bei 21 %, 16 %, 12 %, 6 %, 3 % und 1,3 %.

Die Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Zufuhr von Wasser auf die SET wurden für Braunkohle der Fraktion B vorgenommen, mit äquidistanten Zylindern der Größe 3200 ml und 6400 ml bei 21 % Sauerstoffvolumenanteil in der Schüttungsumgebung. Dazu wurden die Proben in einem handelsüblichen Trockenschrank zunächst bei unterkritischen Bedingungen gelagert. Sobald die Temperatur in der Probenmitte das Maximum erreicht hatte, wurde der Trockenschrank geöffnet und Wasser (ca. 1000 ml) auf die Schüttung gegeben. Die Temperatur des Wassers war in allen Versuchen gleich der jeweiligen Ofentemperatur. Die Versuche wurden für verschiedene Ofentemperaturen durchgeführt.

In Voruntersuchungen wurden für Fraktion A die durch Bewässerung freigesetzte Wärme quantifiziert. Für diese Versuche wurden der Einfluss der Anfangsgutfeuchte und die zugegebene Menge an Wasser auf die freigesetzte Wärme untersucht. Dazu wurden Kohleproben (0,1 kg) bei Umgebungstemperatur in einem Dewar-Gefäß bewässert. Nach der Durchmischung des Kohlenstaubs mit dem zugeführten Wasser wurde der Temperaturanstieg in der Mitte der Probe mit Hilfe von Thermoelementen gemessen. Nachdem die Temperatur in der Probe einen Maximalwert erreicht hatte, konnte die „heat of wetting“ nach Gl. (1) berechnet werden:

$$Q = ([m \cdot c_p]_{Kohle} + [m \cdot c_p]_{Wasser}) \cdot \Delta T \quad (1)$$

Die Experimente wurden für verschiedene Anfangsfeuchten und unterschiedliche Mengen an zugegebenem Wasser durchgeführt.

Des Weiteren wurde der Einfluss der Kondensationswärme auf die SET für Braunkohle der Fraktion B untersucht. Hierzu wurden ebenfalls äquidistante Drahtnetzzyylinder der Größe 3200 ml verwendet. Die Proben wurden in einem Trockenschrank unterhalb ihrer SET gelagert (hier 98 °C). Sobald die Temperatur in der Probenmitte die Ofentemperatur erreicht hatte, wurde der Ofen mit Wasserdampf 28 min lang gespült. Ein externer Verdampfer sorgte für die Bereitstellung von Wasserdampf, der direkt auf die Probenoberfläche geleitet wurde. Der Massenstrom des Wasserdampfes betrug 0,00016 kg/s.

Versuchsergebnisse

Der Einfluss des Sauerstoffvolumenanteils in der Schüttungsumgebung auf die SET ist in Abb. 2 dargestellt.

Wie erwartet sinkt die SET für alle untersuchten Stäube mit größer werdendem V/A-Verhältnis. Dieser Sachverhalt wurde bereits hinreichend an anderer Stelle untersucht, siehe [1]. Die Abhängigkeit der SET vom V/A-Verhältnis der Schüttung blieb allerdings auch für alle Versuche mit reduziertem Sauerstoffvolumenanteil erhalten, wobei die SET für jeweils konstante Volumina mit sinkendem Sauerstoffanteil in der Umgebung deutlich anstieg.

Des Weiteren konnte für jeden Sauerstoffvolumenanteil eine Ausgleichsgerade im Diagramm log(V/A) vs. 1/SET gefunden werden, siehe Abb. 2. Diese Abhängigkeit ermöglicht folglich auch bei stark reduziertem Sauerstoffvolumenanteil in der Schüttungsumgebung eine Extrapolation der SET zu größeren V/A-Verhältnissen.

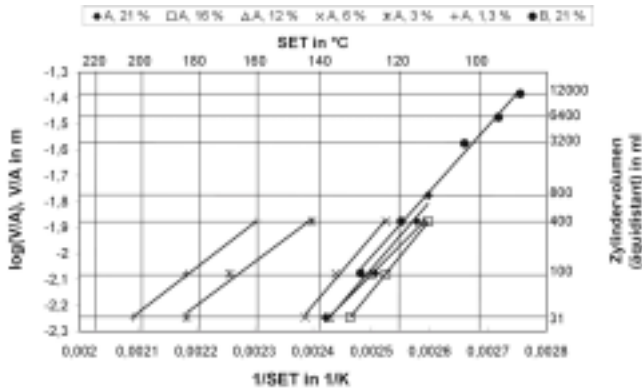


Abb. 2
Selbstentzündungstemperaturen (SET) für Braunkohle (Fraktion A und B) in Abhängigkeit vom Volumen/Oberflächenverhältnis (V/A)

Für alle untersuchten Proben wurde keine Sauerstoffkonzentration gefunden, bei der eine Selbstentzündung verhindert werden konnte. Selbst bei einem stark reduzierten Sauerstoffvolumenanteil von 1,3 % wurden deutliche Oxidationseffekte, verbunden mit einem signifikanten Massenverlust der Probe beobachtet. Eine starke Reduzierung des Sauerstoffvolumenanteils in der Schüttungsumgebung führte jedoch zu einer deutlich erhöhten Reaktionszeit und einer verminderten Reaktionstemperatur. Aufgrund dieser Tatsache konnte bei Versuchen mit einem Sauerstoffvolumenanteil von < 6 % nicht mehr anhand eines Temperaturkriteriums allein eindeutig zwischen „Zündung“ und „Nicht-Zündung“ nach dem Warmlagerungsversuch unterschieden werden. Vielmehr musste der Massenverlust der Probe als zusätzlicher Indikator einbezogen werden.

Der Einfluss der Zufuhr von Wasser in die Probe auf das Selbstentzündungsverhalten geht aus Abb. 3 hervor. Hierbei sind die Temperatur-Zeit-Verläufe von 3200-ml-Schüttungen (Braunkohlenstaub Fraktion B) bei verschiedenen Ofentemperaturen dargestellt. Ohne Zufuhr von Wasser trat Selbstentzündung in der Schüttung bei einer Ofentemperatur von 104 °C ein, während eine Reduzierung der Ofentemperatur auf 103 °C bei einer weiteren Probe gleichen Volumens nicht mehr zur Selbstentzündung führte. Die SET für die 3200-ml-Schüttung liegt demnach bei 103 °C und Schüttungen dieser Größe, die bei Temperaturen von weniger als 103 °C gelagert werden, befinden sich folglich in einem unterkritischen Zustand.



Abb. 3
Temperatur-Zeit-Verläufe von 3200-ml-Braunkohlenstaub-Schüttungen (Fraktion B) bei verschiedenen Ofentemperaturen, mit und ohne Bewässerung

In einem weiteren Versuch wurde nun eine Probe bei 95 °C gelagert und zunächst die Angleichung der Proben temperatur an die Lagerungstemperatur abgewartet. Anschließend wurde der Probe flüssiges Wasser mit einer Temperatur von 95 °C zugegeben. Wie der Temperaturverlauf in Abb. 3 zeigt, wurde dadurch ein Übergang zu überkritischem Verhalten hervor gerufen.

Bei einer weiteren Reduktion der Ofentemperatur auf 93 °C konnte bei einem erneuten Versuch mit gleichem Proben volumen schließlich keine Selbstentzündung mehr erreicht werden. Folglich wurde für dieses Volumen der Schüttung die SET durch Zugabe einer begrenzten Menge Wasser um 10 K auf 93 °C gesenkt.

Versuche mit einem größeren Proben volumen (6 400 ml) führten zu ähnlichen Ergebnissen und sind dargestellt in Abb. 4. Die experimentell bestimmte SET ohne Zugabe von Wasser für dieses Volumen bei 21 % Sauerstoffanteil in der Schüttungsumgebung lag bei 95 °C. Aufgrund der Zugabe von Wasser sank die SET um 6 K auf 89 °C.

Der Einfluss der Kondensation von Wasserdampf auf das Selbstentzündungsverhalten von Staubschüttungen ist dargestellt in Abb. 5. Hierbei konnte eine unterkritisch gelagerte 3200-ml-Schüttung in einen kritischen Zustand überführt werden, nachdem gesättigter Wasserdampf auf der Oberfläche der Partikel kondensierte. Folglich sinkt die SET von Schüttungen, sobald infolge von Kondensation des Wasserdampfes und anschließender Anlagerung des flüssigen Wassers an die Partikel („heat of wetting“) zusätzliche Wärme in die Schüttung eingebracht wird.

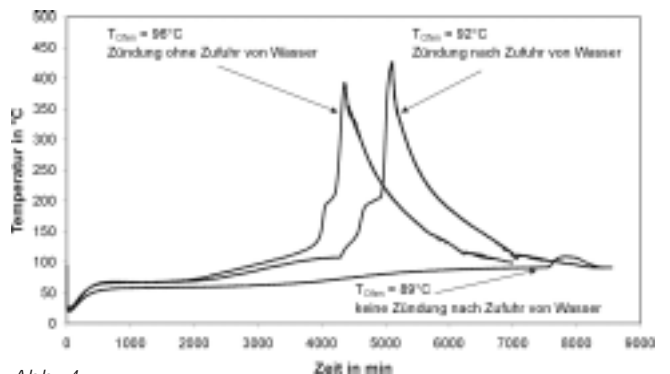


Abb. 4
Temperatur-Zeit-Verläufe von 6400-ml-Braunkohlenstaub-Schüttungen (Fraktion B) bei verschiedenen Ofentemperaturen, mit und ohne Bewässerung



Abb. 5
Temperatur-Zeit-Verläufe von 3200-ml-Braunkohlenstaub-Schüttungen (Fraktion B) bei einer Ofentemperatur von 98 °C, mit und ohne Kondensation von Wasserdampf

Numerische Modellierung

Numerische Simulationen werden eingesetzt, um kosten- und zeitintensive Experimente zu ergänzen sowie Erkenntnisse aus Laborversuchen auf den technischen Maßstab zu übertragen. Besonders bei der Extrapolation auf andere V/A-Verhältnisse und Geometrien liefern sie wertvolle Hinweise über die SET. In dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell präsentiert, mit dessen Hilfe sich der Selbsterwärmungsprozess bis hin zur Zündung des Schüttgutes unter Einbeziehung der Verdampfung und Kondensation des Wassers beschreiben lässt. Die folgenden vereinfachenden Annahmen sollen gelten:

- nur molekulare Transportvorgänge in der Schüttung (d. h. Wärmeleitung und Diffusion der gasförmigen Spezies) werden berücksichtigt,
- die Stoffeigenschaften sind keine Funktion der Zeit und des Ortes.

Den Simulationen liegt das folgende einstufige Reaktionsmodell zugrunde, Gl. (2):



Der Wärme- bzw. Stofftransport wird durch analoge zeitabhängige Differentialgleichungen vom Typ der Gl. (3) beschrieben:

$$\frac{\partial \Phi_k}{\partial t} = \Gamma_k \operatorname{div}(\operatorname{grad} \Phi_k) + S_{\Phi_k} \quad (3)$$

Insgesamt ergeben sich acht Differentialgleichungen, wobei Φ_k für jeweils eine der unbekanntenen Größen Temperatur bzw. Spezieskonzentration (der sieben Spezies k: Brennstoff, Sauerstoff, unverbrannter fester Rückstand, gasförmige Produkte, Stickstoff, Wasser und Wasserdampf) steht.

Für die Berechnung der Reaktionsraten der beteiligten Spezies wurde der Brennstoff als Leitkomponente gewählt. Der Quellterm hierfür wird dargestellt durch einen modifizierten Arrhenius-Ansatz zweiter Ordnung, Gl. (4):

$$S_{Br} = - \left(\frac{C_{Br}}{C_{Br,0}} \right)^A \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,0} + C_{gP}} \right)^B \cdot \rho_s \cdot k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right) \quad (4)$$

Die Kopplung mit den Quelltermen der Spezies Sauerstoff, unverbrannter fester Rückstand und gasförmige Produkte erfolgt jeweils mit Hilfe von Gl. (5), wobei der Quellterm für den an der Reaktion nicht teilnehmenden Stickstoff zu Null gesetzt wird:

$$S_k = \left(\frac{v_k}{v_{Br}} \right) \cdot \left(\frac{M_k}{M_{Br}} \right) \cdot S_{Br} \quad (5)$$

Die stöchiometrischen Koeffizienten n sind negativ für die Edukte und positiv für die bei der Reaktion entstehenden Produkte. Die Quellterme für flüssiges und dampfförmiges Wasser sind dargestellt durch die Gleichungen (6) und (7):

$$S_w = -VD \cdot C_w \cdot \exp\left(-\frac{E_w}{R \cdot T}\right) + KD \cdot C_D \quad (6)$$

$$S_D = -S_w \quad (7)$$

Der erste Summand in Gl. (6) repräsentiert die Verdampfung des in der Schüttung enthaltenen flüssigen Wassers, während der zweite die Kondensation des Wasserdampfes in der Schüttung beschreibt. Hierbei ist zu beachten, dass Kondensation von Dampf an den Partikeln nur dann auftritt, wenn die örtliche Konzentration des Wasserdampfes gleich der Sättigungsdampfkonzentration an dieser Stelle ist (d. h. rel. Luftfeuchte $\phi = 1$).

Zur Berechnung des Temperaturfeldes, geht Gl. (3) in die Fourier-Gleichung über, mit dem Quellterm gemäß Gl. (8):

$$S_T = \frac{1}{\rho_s \cdot c_{p_s} + C_w \cdot c_{p_w}} \cdot \left[-S_{Br} \cdot \Delta H_{Br} - S_{fP} \cdot \Delta H_{fP} - S_{gP} \cdot \Delta H_{gP} + S_w \cdot \Delta H_D \right] \quad (8)$$

Die Schüttdichte des Materials ρ_s ergibt sich aus der Summe der Konzentrationen aller Spezies k.

Berechnungsbeispiel

Der Selbstentzündungsvorgang einer Braunkohlenstaub-Schüttung (Fraktion A) mit einem Volumen von 400 ml wurde mit Hilfe des oben erläuterten Modells berechnet. Für diesen Fall wurde eine zweidimensionale Geometrie gewählt, die eine vertikale Querschnittsfläche der äquidistanten Schüttung repräsentiert. Die experimentell bestimmte SET für diese Schüttung lag bei 125 °C.

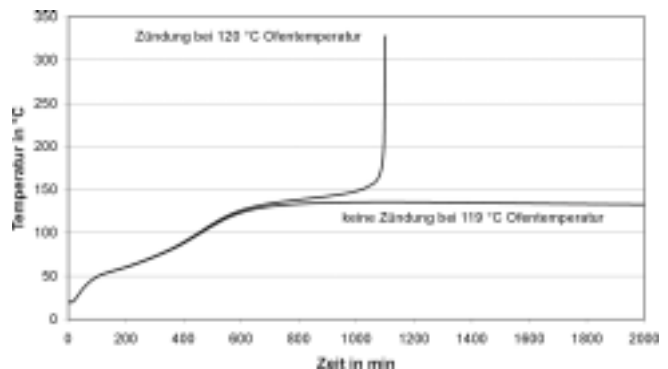


Abb. 6
Numerisch berechnete Temperaturverläufe in der Mitte einer 400-ml-Braunkohlenstaub-Schüttung (Fraktion A) für zwei Ofentemperaturen

In Abb. 6 sind die numerisch berechneten Temperatur-Zeit-Verläufe der 400-ml-Braunkohlenstaub-Schüttung dargestellt. Eine Zündung der Schüttung trat bei einer Ofentemperatur von 120 °C auf, während eine Reduzierung der Ofentemperatur auf 119 °C einen unterkritischen Zustand lieferte. Die errechnete SET von 119 °C weicht somit nur um 6 K von dem experimentell nachgewiesenen Wert ab.

Schlussfolgerungen

Der Vorgang der Selbstentzündung spielt in der Industrie und Prozesssicherheit eine erhebliche Rolle, wobei eine Reihe von Einflüssen auf die SET noch nicht hinreichend untersucht sind. In Rahmen dieser Arbeit wurden die Einflüsse des Sauerstoffvolumenanteils in der Schüttungsumgebung,

der Zugabe von Wasser auf das Schüttgut und der Kondensation von gesättigtem Wasserdampf in der Schüttung auf die SET von Braunkohlenstaub experimentell untersucht. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass die SET für ein konstantes V/A-Verhältnis mit abnehmendem Sauerstoffvolumenanteil in der Schüttungsumgebung deutlich ansteigt. Des Weiteren konnte für diese Proben kein Sauerstoffanteil gefunden werden, bei dem eine Selbstentzündung ausgeschlossen werden kann. Selbst für Sauerstoffanteile von nur 1,3 % bis 3 % in der Schüttungsumgebung wurden signifikante exotherme Effekte, verbunden mit hohen Massenverlusten, beobachtet. Sobald der Sauerstoffanteil in der Umgebung unter 6 % fiel, stellt sich ein Wechsel im Reaktionstyp ein, was zu deutlich höheren Reaktionszeiten und niedrigeren Reaktionstemperaturen führte. Als Folge davon stellte sich nach dem Warmlagerungsversuch die Unterscheidung zwischen „Zündung“ und „Nicht-Zündung“ als schwieriger heraus, da nicht das gesamte Material durch Reaktionen umgesetzt wurde.

Neben dem Sauerstoffvolumenanteil in der Umgebung beeinflusst Wasser die SET. In Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass die Zufuhr einer begrenzten Menge Wasser auf das Schüttgut zu einem Umschlag im thermischen Verhalten führen kann. Aufgrund der freiwerdenden „heat of wetting“ wurden unterkritisch gelagerte Schüttungen in einen überkritischen Zustand überführt und brannten anschließend ab. Die SET für ein konstantes V/A-Verhältnis konnte somit für Braunkohlenschüttungen von 3200 ml und 6400 ml um 10 K bzw. 6 K gesenkt werden. Ferner konnte experimentell gezeigt werden, dass am Schüttgut kondensierender Wasserdampf ebenfalls die SET einer Schüttung erheblich absenken kann.

Zusätzlich zu den Experimenten wurde ein numerisches Modell entwickelt, mit dessen Hilfe sich der Selbstentzündungsvorgang, sowie die Verdampfung und Kondensation des Wassers in dem Schüttgut berechnen lässt. Die numerisch errechnete SET für eine 400-ml-Braunkohlenstaub-Schüttung lag in guter Übereinstimmung mit dem experimentell ermittelten Wert.

Literatur

- [1] Hensel, W.; Krause, U.; Löffler, U.: Selbstentzündung fester Stoffe (einschließlich Stäube), Handbuch des Explosionsschutzes (Ed: H. Steen), WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2.7 (2000), 257-289
- [2] Krishnaswamy, S.; Gunn, R. D.; Agarwal, P. K.: Lowtemperature oxidation of coal. 3. Modelling spontaneous combustion in coal stockpiles, *Fuel*, Elsevier Science Ltd., 75 (1996), 353-362
- [3] Gray, B. F.; Sexton, M. J.; Halliburton, B.; Macaskill, C.: Wetting-induced ignition in cellulosic materials, *Fire Safety Journal*, Elsevier Science Ltd., 37 (2002), 465-479
- [4] Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben, VDI-Richtlinie 2263, Beuth-Verlag, Berlin, Blatt 1 (1990), 7-9

Formelzeichen

C	kg/m ³	Konzentration
c _p	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
E	J/mol	Aktivierungsenergie
KD	1/s	Faktor der Kondensation
k ₀	1/s	pre-exponentieller Faktor
m	kg	Masse
M	kg/kmol	Molulargewicht
Q	J	heat of wetting
R	J/(mol·K)	universelle Gaskonstante
S	kg/(m ³ ·s)	Quellterm für Temperaturfeld und Konzentrationsfelder
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
VD	1/s	Faktor der Verdampfung
ΔH	J/kg	Brennwert bzw. Verdampfungsenthalpie
ΔT	K	Temperaturdifferenz
φ	-	relative Luftfeuchtigkeit
Φ	K; kg/m ³	Temperatur- und Konzentrationsparameter
v	-	stöchiometrischer Koeffizient
Γ	m ² /s	Transportkoeffizient (Temperatur und Konzentration)
r	kg/m ³	Dichte

Indizes

O	Beginn
A	erster Koeffizient im Quellterm für Brennstoff
B	zweiter Koeffizient im Quellterm für Brennstoff
Br	Brennstoff
D	Dampf
fP	feste Produkte
gP	gasförmige Produkte
k	Spezies
O ₂	Sauerstoff
S	Schüttung
T	Temperatur
W	Wasser