

Brenn- und Explosionskenngrößen von Zuckerstaub

K.-W. Stahmer, M. Gerhold

Zusammenfassung Weißer Kristallzucker wird als Rohstoff weltweit in großen Mengen produziert und vielfältig weiterverarbeitet. Dabei können durch mechanische Beanspruchung der Zuckerkristalle in den verschiedenen industriellen Verfahren feine brennbare Stäube entstehen, die aufgewirbelt in Luft eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre (g. e. A.) bilden. Insbesondere bei der Herstellung des Rohstoffes ist das Risiko der Bildung einer g. e. A. hoch, da hier große Mengen mit explosionsfähigem Feinstaubanteil vorliegen. Die chemische Zusammensetzung ist abgesehen vom Wassergehalt in allen Anlagen konstant, unterschiedlich sind die Verfahrensprozesse und die KorngröÙeneigenschaften. Im Explosionsschutz sind der maximale Explosionsüberdruck und die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit eines Staubes wichtige sicherheitstechnische Kenngrößen (StK) für die Auslegung von Anlagen. Durch systematische Untersuchungen von Zuckerfraktionen unter atmosphärischen Bedingungen konnte eine Korrelation zwischen Kornoberfläche und Brennwert mit den StK ermittelt werden. Dies erlaubt eine vereinfachte Abschätzung der sicherheitstechnischen Kenngrößen.

Combustion and explosion characteristics of sugar dust

Abstract White crystal sugar is produced as a raw material in large quantities worldwide and further-processed in a variety of ways. This is where mechanical stressing of the sugar crystals in the various industrial processes is capable of generating fine combustible dusts that form a hazardous explosive atmosphere when suspended in the air. The risk of the formation of a hazardous explosive atmosphere is particularly acute during the production of the raw material in view of the large quantities with a share of explosive fine dust. Apart from the water content, the chemical composition is the same in all installations, while the processing methods and particle size characteristics differ. In explosion protection, a dust's maximum explosion overpressure and the maximum rate of pressure rise are important safety parameters for installation design. In systematic investigations of the sugar fractions under atmospheric conditions, particle surface area and calorific value have been found to correlate with the safety parameters, thus permitting a simplified estimate of these parameters.

1 Einführung

Die süß schmeckenden Zuckerverbindungen gehören gemeinsam mit den Stärken zur Gruppe der Kohlenhydrate. Innerhalb der Zuckergruppe existieren zahlreiche Variationen, die sich in der molekularen Struktur und Summenformel und somit auch in ihrer chemischen Reaktivität unterscheiden, z. B. Milchzucker, Fruchtzucker, Traubenzucker etc. Die Untersuchungen zu den Explosionskenngrößen in dieser Arbeit wurden ausschließlich mit der Saccharose, dem weißen Kristall- und Haushaltszucker, durchgeführt.

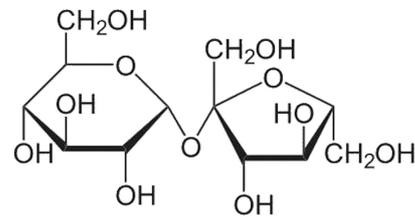


Bild 1. Strukturformel der Saccharose.

Saccharose ist ein Disaccharid, aufgebaut aus den Einfachzuckern α -D-Glucose und β -D-Fruktose (Bild 1). Sie wird durch Extraktion aus Zuckerrohr bzw. Zuckerrüben gewonnen und in weiteren Raffinadeprozessen zum weißen Kristallzucker gereinigt und aufkonzentriert. Weltweit werden jährlich ca. 180 Mio. t hergestellt, davon in Europa ca. 15 Mio. t (Deutschland ca. 4 Mio. t). In Deutschland verteilt sich die Gesamtproduktion nahezu ausschließlich auf drei große namhafte Hersteller mit 20 Zuckerfabriken. Abnehmer des Zuckers sind neben den Endverbrauchern mit 14 % hauptsächlich die weiterverarbeitende Back- und Süßwarenindustrie und Getränkeherstellung.

In der Zuckerverarbeitung werden neben diversen Umfüll-, Transport- und Schüttvorgängen auch Mahlprozesse angewendet, um feinere Fraktionen des Zuckers zu gewinnen. Bei diesen Prozessen kann es innerhalb und außerhalb der Anlagen zur Stauffreisetzung kommen, die nachweislich zur Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre führen kann. So wurde bei Abrissarbeiten eines Zuckersilos in Groß-Gerau im Jahr 2009 eine Explosion durch Freisetzung von Zuckerresten an der Siloinnenwand ausgelöst [1]. In einer Anlage der Imperial Sugar Company in Port Wentworth, Georgia (USA) wurden 2008 durch eine Zuckerstaubexplosion 14 Menschen getötet und 40 Personen schwer verletzt [2]. Die Primärexplosion entwickelte sich in einer Abteilung zum Abfüllen von feineren Zuckerfraktionen und führte durch nachfolgende Sekundärexplosionen zur Katastrophe. Ein schlechtes Reinigungsmanagement mit hohen Staubablagerungen wird für das Schadensausmaß verantwortlich gemacht.

Saccharose ist ein chemisch reines Produkt. Unterschiede in der Reaktivität von Explosionsreaktionen werden somit nicht durch geänderte Stoffeigenschaften verursacht, sondern basieren hauptsächlich auf Partikeleigenschaften und Umgebungsparametern wie Luftströmung, Sauerstoffkonzentration etc. Insofern ist Saccharose eine geeignete Substanz, um systematisch den Einfluss der Partikeleigenschaften auf Explosionsreaktionen zu untersuchen.

Es ist bekannt, dass Staub/Luft-Gemische aus groben brennbaren Stäuben mit einem Durchmesser $> 500 \mu\text{m}$ nicht explosionsfähig sind. Hieraus ergibt sich die Frage, ob es physikalisch leicht bestimmbarer Parameter gibt, wie zum Beispiel Korngrößenverteilung, Oberfläche, Konzentration oder auch Verbrennungswärme, aus denen sich die Explosionskenngrößen maximaler Explosionsüberdruck (p_{max}) und maximaler zeitlicher Druckanstieg (K_{St} -Wert) ohne zusätzliche experimentelle Prüfung hinreichend genau ableiten lassen. Dies würde die explosionstechnische

Dr. rer. nat. Klaus-Werner Stahmer,
M. Sc. Malte Gerhold,
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

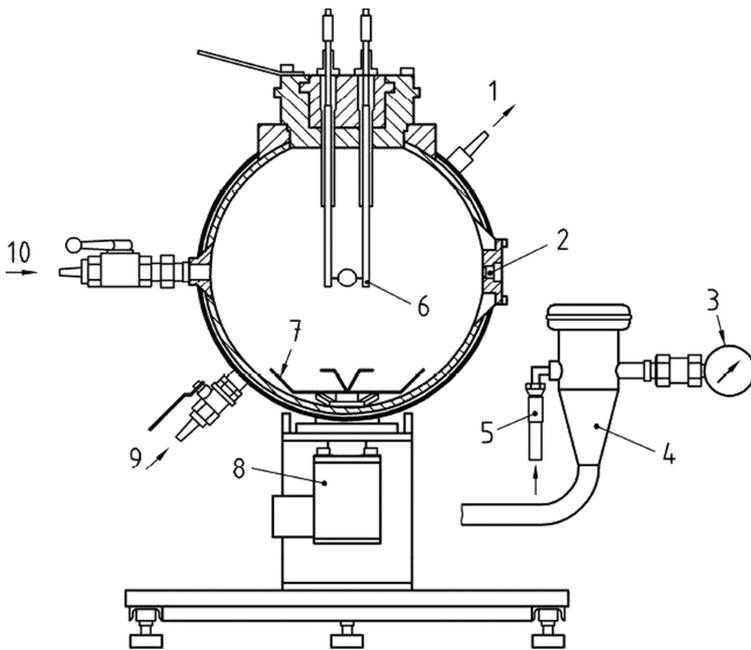


Bild 2. Schematische Darstellung der 20-l-Kugel. 1: Kühlwasserauslass; 2: Druckaufnehmer; 3: Manometer; 4: Staubbehälter; 5: Lufteinlass; 6: Zündquelle; 7: Fächerdüse; 8: Schnellöffnungsventil; 9: Kühlwassereinlass; 10: Auslass [3].

Beurteilung von Anlagen in der Zuckerindustrie erleichtern, da die Korngrößenverteilung bei den verschiedenen Produktionsschritten in der Regel sehr genau bekannt ist. Zu diesem Zweck wurden aus handelsüblichem Kristallzucker unterschiedliche Siebfraktionen im Labor hergestellt, deren physikalisch-chemische Kenngrößen Oberfläche und Verbrennungswärme bestimmt und mit den sicherheitstechnischen Kenngrößen Explosionsüberdruck (p_{ex}) und zeitlicher Druckanstieg (dp/dt) korreliert.

2 Experimentelle Durchführung

2.1 Sicherheitstechnische Kenngrößen im Explosionsschutz

Die Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen maximaler Explosionsüberdruck (p_{max}), maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit (dp/dt) und untere Explosionsgrenze (UEG) erfolgte gemäß den Teilen 1 bis 3 der DIN EN 14034 [3 bis 5] in einer geschlossenen 20-l-Kugel (Bild 2). Der Staub wird dabei mit Druckluft aus einem Vorratsbehälter in den Reaktionsraum dispergiert. Die Zündung erfolgt im Zentrum der Staubwolke mit zwei chemischen 5-kJ-Zündern (UEG-Bestimmung: 2 kJ), was einer sehr starken Zündquelle entspricht. Durch den Dispergiervorgang werden spröde Partikel stark beansprucht und die ermittelte Korngrößenverteilung des Staubes wird in den feineren Bereich verschoben. Um dies zu vermeiden, wurden die Zuckerproben in einer Zerstäuberschale innerhalb der 20-l-Kugel vorgelegt und mit einem Druckluftstoß dispergiert.

Nach DIN EN 14034 sollen drei Untersuchungsserien pro Staubprobe durchgeführt werden. Die Abweichung der p_{ex} -Werte vom Mittelwert soll bei diesem Verfahren unterhalb von 10 % und für die K_{st} -Werte unterhalb von ca. 20 % liegen. Aufgrund der aufwendigen Probenvorbereitung wurde im Rahmen dieser Untersuchung nur eine Untersuchungsserie pro Staubfraktion durchgeführt. Durch das homogene Probenmaterial kann man vom Einhalten der oben genannten Grenzen ausgehen.

2.2 Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche der Stäube (S_m) wurde mit dem Brunauer-Emmett-Teller (BET)-Verfahren bestimmt [6]. Hierbei wird gasförmiger Stickstoff bei tiefen Temperaturen (77 K) auf der inneren und äußeren Oberfläche der Staubprobe adsorbiert. Die adsorbierte Stickstoffmenge wird volumetrisch bestimmt. Das BET-Verfahren erlaubt durch Näherungsrechnung aus der adsorbierten Stickstoffmenge und dem Platzbedarf eines Stickstoffmoleküls auf die Partikeloberfläche zu schließen. Es basiert auf einer Reihe von Annahmen, um die geschlossene Stickstoffschicht mit der Dicke genau einer Moleküllage (Monolage) rechnerisch bestimmen zu können. So geht das Modell u. a. von einer einheitlichen Adsorptionsenergie über die gesamte Kornfläche aus. Dies ist für Zuckerpartikel mit zahlreichen Kanten und Ecken nicht gegeben. Dennoch erfasst dieses Verfahren im Vergleich zu anderen Methoden die reaktive Oberfläche am besten. Die Unsicherheit des Messverfahrens hängt von der Gesamtoberfläche der Probe ab. Sie liegt für die groben Zuckerproben im Bereich von 10 %, für feinere Materialien deutlich niedriger.

2.3 Brennwert

Der Brennwert H_S des Zuckers wurde mit einem Bombenkalorimeter nach DIN 51900-2 bestimmt [7]. Die Probe wird unter Sauerstoffatmosphäre vollständig verbrannt. Aus der Temperaturerhöhung des Kalorimetersystems kann die freigesetzte Wärmemenge ermittelt werden.

Der Brennwert des Zuckers wurde als Mittelwert von zwei Einzelmessungen bestimmt. Die Einzelwerte lagen im Bereich von 0,1 % um den Mittelwert. Bei der Zuckerfraktion $< 20 \mu\text{m}$ gab es größere Abweichungen zwischen den Einzelwerten, da der feine Puderzucker aufgrund seiner hygroskopischen Eigenschaften unterschiedliche Mengen Wasser aus der Umgebungsluft aufnimmt. Für die weiteren Betrachtungen wurde daher der Brennwert des Zuckers im Anlieferungszustand (16 453 J/g) verwendet.

2.4 Gasmessung

Nach jedem Explosionsversuch wurde die Verbrennungsluft aus der 20-l-Kugel auf ihren Gehalt an O_2 , CO_2 und CO untersucht. Für den Sauerstoff wurde ein paramagnetisch arbeitendes Messgerät (Oxygen Analyser 570 A, Fa. Servomex) verwendet, für die Kohlenstoffoxide ein Infrarotmessgerät (NGA 2000, Fa. Rosemount). Da die chemische Struktur und die Stöchiometrie der Verbrennung des Zuckers bekannt sind, kann aus den Konzentrationen der Reaktionsgase der Grad des Umsatzes bestimmt werden. Die CO - und CO_2 -Konzentrationen wurden durch Verdünnung des Rohgases mit Luft dem Messbereich des Messgerätes angepasst.

Die Messgenauigkeiten betragen $\pm 0,1 \%$ für das Sauerstoff- und $\pm 1 \%$ für das CO/CO_2 -Messgerät bezogen auf den Messwert. Durch Restvolumina von Sauerstoff im Probenahmesystem wird der Sauerstoffgehalt um 0,3 Vol.-% erhöht.

2.5 Probenvorbereitung

Das Ausgangsprodukt hatte eine Korngrößenverteilung mit einem massebezogenen Median von $845 \mu\text{m}$ (Bild 3). Die feineren Fraktionen wurden durch Mahlen in einer Schlagrotmühle (Typ SR 3, Fa. Retsch) und anschließende Siebung mit Laborsieben hergestellt (Tabelle).

2.6 Oberfläche der verschiedenen Siebfractionen

Aus den BET-Messungen wurden die spezifischen Oberflächen der verschiedenen Siebfractionen bestimmt. Da innerhalb der Siebfractionen keine weitere Korngrößenverteilung ermittelt werden konnte, wurde als Ersatz für den Medianwert die Intervallmitte der Fractionen verwendet. Aus der BET-Oberfläche lässt sich der Sauterdurchmesser (d_{32}) als Repräsentant der Partikeloberfläche berechnen. Als Sauterdurchmesser wird der Durchmesser von gleich großen Kugeln bezeichnet, die das gleiche Oberflächen- zu Volumenverhältnis haben wie die Staubprobe. Der Sauterdurchmesser jeder Fraction liegt signifikant unter der jeweiligen unteren Intervallgrenze. Dies ist eine direkte Folge der Herstellung der Fractionen durch die Siebung. Feinere Partikel bleiben bei der Siebung an größeren Partikeln agglomeriert und können nicht abgetrennt werden. Das bedeutet, dass die hergestellten Siebfractionen keine sauberen Siebeschnitte darstellen und mit nennenswerten

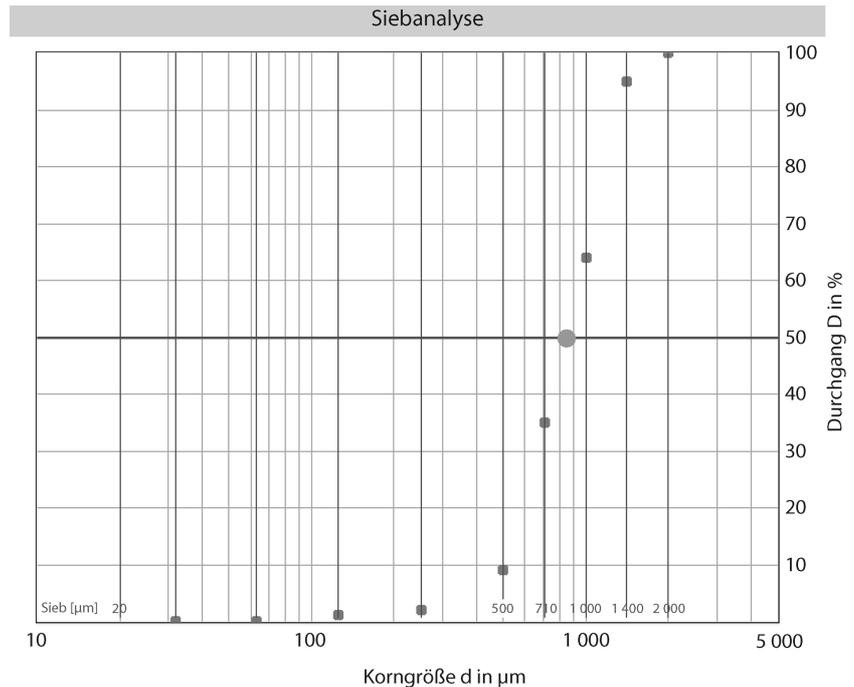


Bild 3. Korngößenverteilung (Summenkurve) des Ausgangsprodukts.

Auswertung der Oberflächenbestimmung für die Zuckerfractionen.

Fraction in µm	< 20	20/32	32/63	63/125	125/250	250/500
Mittelwert Fraction in µm	10	26	47	94	187	375
Spezifische Oberfläche in m ² /g	2,99	0,84	0,40	0,17	0,10	0,03
Sauterdurchmesser (d_{32}) in µm	1,28	4,53	9,54	22,48	38,49	122,10

Massenanteilen an der Feinfraktion versetzt sind. Dennoch sind die hergestellten Fractionen in ihren Partikeleigenschaften deutlich unterschiedlich, sodass Erkenntnisse über den Zusammenhang von Korngrößenverteilung/spezifischer Oberfläche und Reaktivität gewonnen werden konnten.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Maximaler Explosionsüberdruck

Die ermittelten Explosionsüberdrücke für die Zuckerfractionen als Funktion der Staubkonzentration sind in Bild 4 dargestellt. Es ergeben sich die höchsten Explosionsüberdrücke für die feinste Kornfraktion.

Aus der eingesetzten Staubkonzentration und der spezifischen Oberfläche der Fraction lässt sich eine Oberflächenkonzentration in m²/m³ (= 1/m) berechnen. Werden die Explosionsüberdrücke als Funktion der Oberflächenkonzentration aufgetragen (Bild 5), so wird deutlich, dass die verschiedenen Siebfractionen eine fast geschlossene Kurve in Form einer Logarithmusfunktion ergeben. Im Bereich niedriger Oberflächenkonzentrationen nimmt die Zahl reaktiver Oberflächenplätze zu und führt zur erhöhten Freisetzung von Reaktionswärme. Im weiteren Verlauf (ab ca. 1 000 m²/m³) läuft die Kurve flach aus. In diesem Bereich wird die zusätzlich frei werden-

de Wärme durch unverbranntes Staubmaterial (Bild 6) aufgenommen, sodass ein weiterer thermischer Druckanstieg ausbleibt. Die Bildung von gasförmigem Kohlenmonoxid kompensiert den thermisch verursachten Druckabfall.

Für die Stöchiometrie der vollständigen Verbrennung von Saccharose gilt folgende Gleichung:

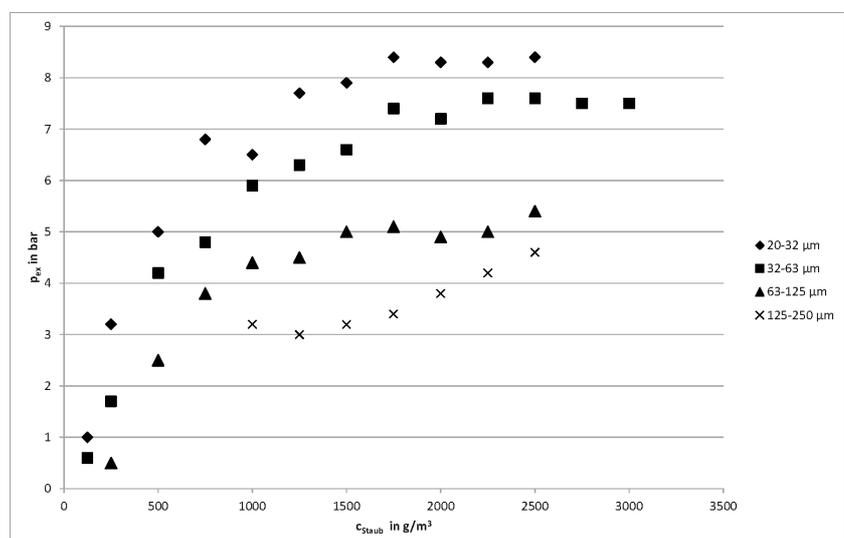
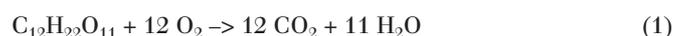


Bild 4. Explosionsüberdruck in Abhängigkeit von der Staubkonzentration für die verschiedenen Fractionen.

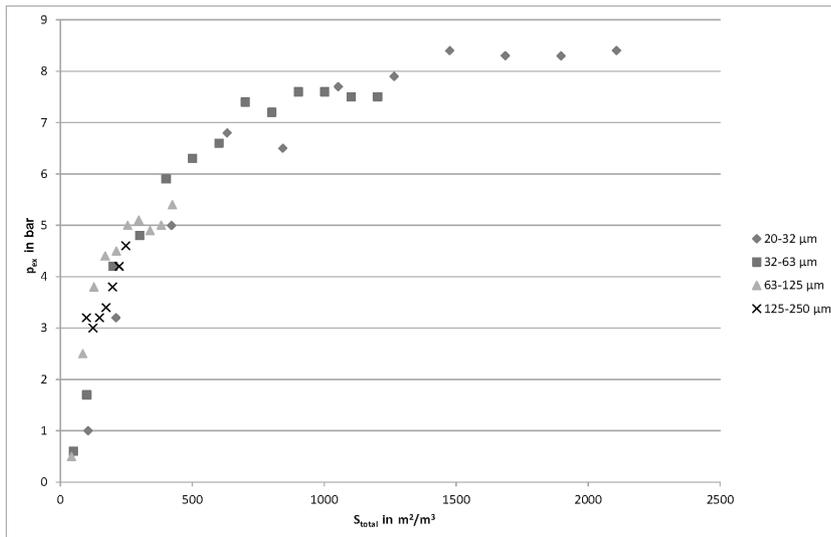


Bild 5. Abhängigkeit zwischen Explosionsüberdruck und Oberflächenkonzentration.

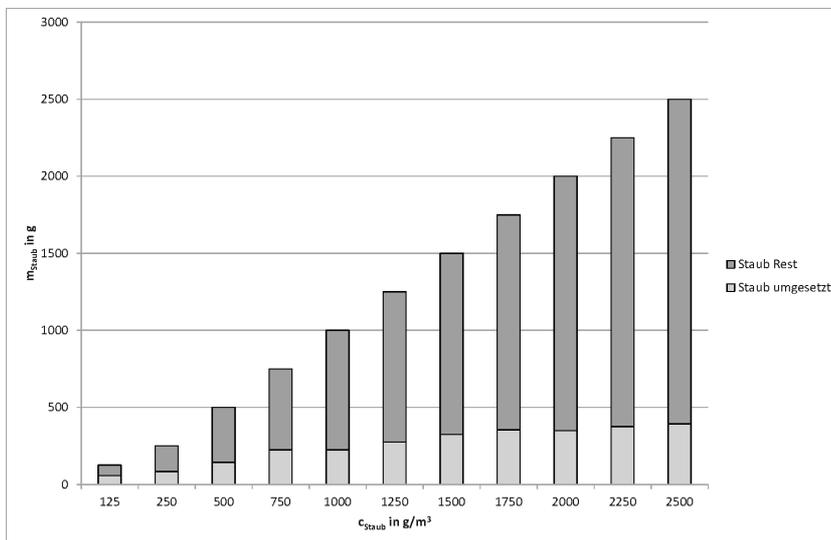


Bild 6. Verhältnis von verbranntem und unverbranntem Staub als Funktion der Staubkonzentration (Fraktion: 20 bis 32 µm).

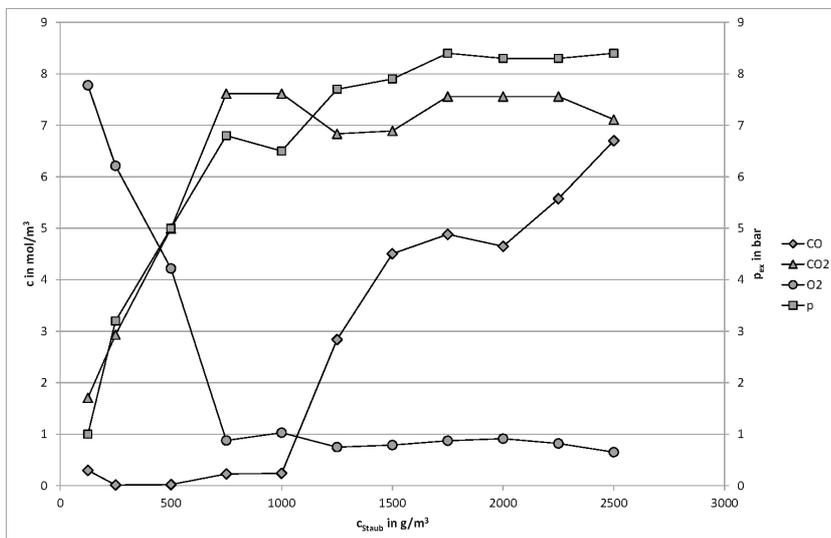
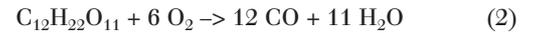


Bild 7. Gaskonzentrationen und Druckverlauf als Funktion der Staubkonzentration (Fraktion: 20 bis 32 µm).

Unter Sauerstoffmangel treten diverse andere Reaktionsabläufe auf, zum Beispiel:



Die Entstehung von zwölf Mol CO oder CO₂ entspricht daher dem Umsatz von 1 mol bzw. 342 g Saccharose. Die Gehalte an CO, CO₂ und O₂ in der Atmosphäre nach dem jeweiligen Versuch sind für die Zuckerfraktion 20 bis 32 µm in Bild 7 dargestellt. Die anderen Fraktionen weisen ähnliche Verläufe auf.

Die Entstehung von CO₂ verläuft umgekehrt proportional zum Verbrauch von O₂. Unter Sauerstoffmangelbedingungen bei hohen Staubkonzentrationen entsteht zusätzlich CO, verbunden mit einer Druckerhöhung.

Aus den Konzentrationen der gasförmigen Kohlenstoffoxide kann die Menge des reagierten Zuckers berechnet werden. Die Massen verbrannten und unverbrannten Staubes sind für die Fraktion 20 bis 32 µm in Bild 6 dargestellt. Bei den anderen Fraktionen ist jeweils der Anteil reagierten Staubes geringer. Der Explosionsüberdruck ist in Bild 8 für alle Fraktionen über der verbrannten Staubmenge aufgetragen.

Unter der Annahme, dass der Druckanstieg im Wesentlichen durch die in der Explosionsreaktion freigesetzte Wärme und die damit verbundene Temperaturänderung verursacht wird, kann aus der Umsatzbilanz die Temperaturerhöhung berechnet werden. Näherungsweise kann man davon ausgehen, dass die freigesetzte Wärmemenge vom unverbrannten Zuckerstaub und dem Restgas aufgenommen wird.

Die Wärmebilanz der Explosionsreaktion stellt sich wie folgt dar:

$$\Delta T = \frac{m_{\text{Staub, reagiert}} \cdot H_S}{m_{\text{Staub, Rest}} \cdot c_{\text{Staub}} + m_{\text{Luft}} \cdot c_{V, \text{Luft}}} \quad (3)$$

- mit:
- ΔT : Temperaturdifferenz
 - $m_{\text{Staub, reagiert}}$: Masse verbrannten Staubes
 - H_S : Brennwert des Staubes
 - $m_{\text{Staub, Rest}}$: Masse unverbrannten Staubes
 - c_{Staub} : spezifische Wärmekapazität Staub (konstantes Volumen)
 - m_{Luft} : Masse Luft
 - $c_{V, \text{Luft}}$: spezifische Wärmekapazität Luft (konstantes Volumen)

Aus dieser Temperaturdifferenz kann in einer weiteren Näherungsrechnung mithilfe des Idealen Gasgesetzes der Explosionsüberdruck berechnet werden:

$$p_{\text{Ex}} = \frac{n \cdot R \cdot (T_1 + \Delta T)}{V} \quad (4)$$

- mit:
 p_{EX} : Explosionsüberdruck
 n : Stoffmenge in der Gasphase (CO, CO₂, N₂, O₂)
 R : allgemeine Gaskonstante
 T_1 : Ausgangstemperatur
 ΔT : Temperaturdifferenz
 V : Behältervolumen

Dabei ist zu beachten, dass die spezifischen Wärmekapazitäten, insbesondere die der Luft, temperaturabhängig sind. Für die Berechnung wurde für Luft eine mittlere spezifische Wärmekapazität $c_{v, Luft} = 804 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (0 bis 1 000 °C) [8] und für Zucker $c_{v, Zucker} = 1 260 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ [9] eingesetzt. Die Veränderung der Zusammensetzung der Luft nach der Reaktion blieb bei den Näherungsrechnungen der Wärmebilanz unberücksichtigt. Die Zunahme der Stoffmenge in der Gasphase ist über n im idealen Gasgesetz enthalten. Auf diese Weise wurde der Explosionsüberdruck für alle Versuche berechnet. Die Ergebnisse sind für die Fraktion 20 bis 32 µm in Bild 9 dargestellt.

Insbesondere bei den hohen Staubkonzentrationen (über 2 000 g/m²) stimmen Versuch und Berechnung sehr gut überein. Die Erklärung der Druckentstehung durch das ideale Gasgesetz kann daher als valide angesehen werden.

3.2 Geschwindigkeit des Explosionsdruckanstiegs

Als Geschwindigkeit des Explosionsdruckanstiegs dp/dt wird die größte Druckänderung mit der Zeit bezeichnet, die bei einem Explosionsversuch auftritt. Sie wird aus der Steigung der Wendetangente an die Druck-Zeit-Kurve ermittelt (Bild 10). Die maximale Explosionsdruckanstiegsgeschwindigkeit dp/dt_{max} ist eine charakteristische Kenngröße eines Staubes. Sie wird aus den dp/dt -Werten mit unterschiedlicher Staubkonzentrationen ermittelt.

Der dp/dt -Wert ist vom Volumen der Prüfapparatur abhängig. In der Praxis wird daher oft der auf ein Volumen von einem Kubikmeter normierte K_{St} -Wert angegeben.

Die Druckanstiegsgeschwindigkeit ist ein Maß für die Reaktionsgeschwindigkeit, sodass für die Explosionsreaktion ein allgemein kinetischer Zusammenhang angenommen werden kann (Gl. (5)). Hierbei sind in der Geschwindigkeitskonstante k die Stoßfrequenz der Partikel untereinander, die Temperatur und die Aktivierungsenergie enthalten. Die Konzentrationen von Oberfläche S und Sauerstoff O₂ zum Zeitpunkt t werden in eckigen Klammern dargestellt, wobei die Werte für x , y der Reaktionsordnung entsprechen.

$$\frac{dp}{dt} = k \cdot [O_2]^x [S]^y \quad (5)$$

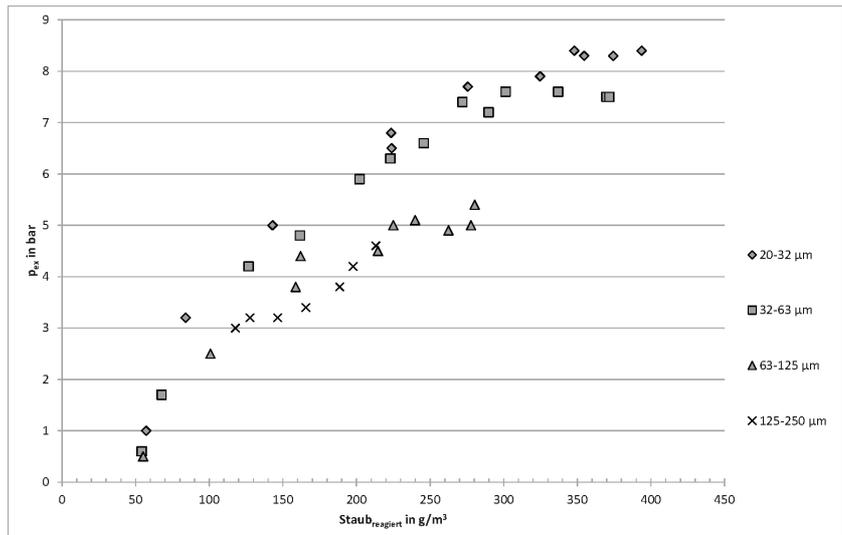


Bild 8. Zusammenhang zwischen Explosionsüberdruck und reagierter Staubmenge.

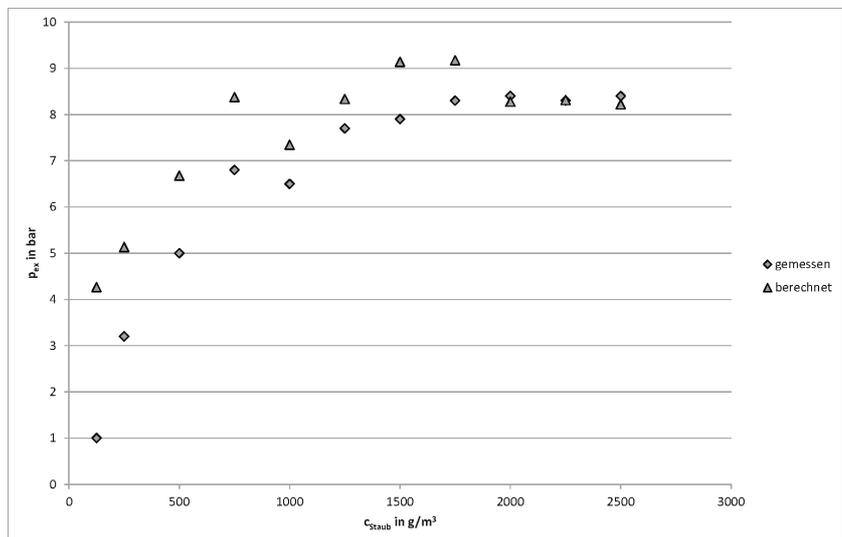


Bild 9. Berechnete und gemessene Explosionsdrücke von Zucker (Fraktion: 20 bis 32 µm).

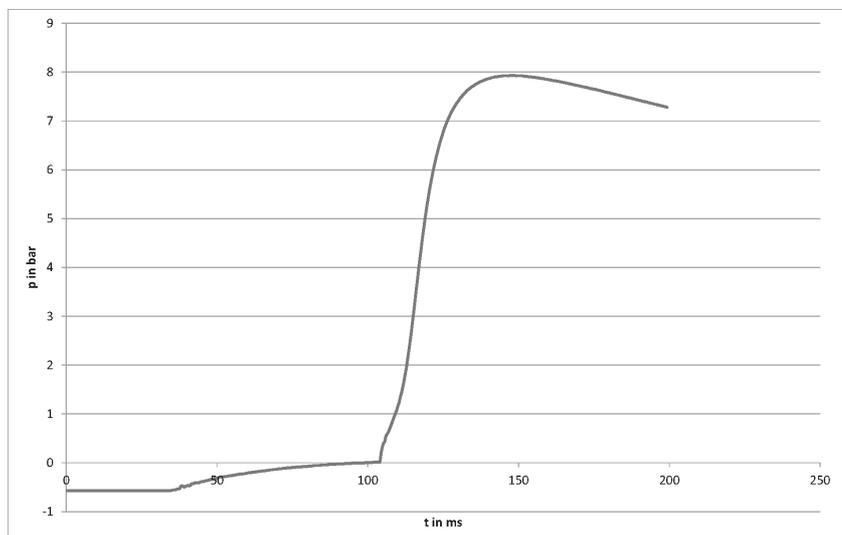


Bild 10. Druck-Zeit-Kurve eines Explosionsversuchs.

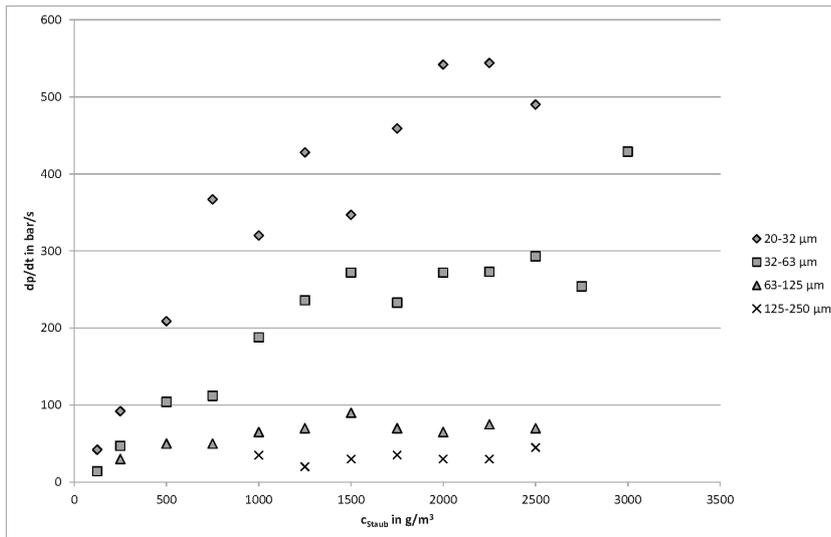


Bild 11. dp/dt der Zuckerfraktionen nach Staubkonzentration.

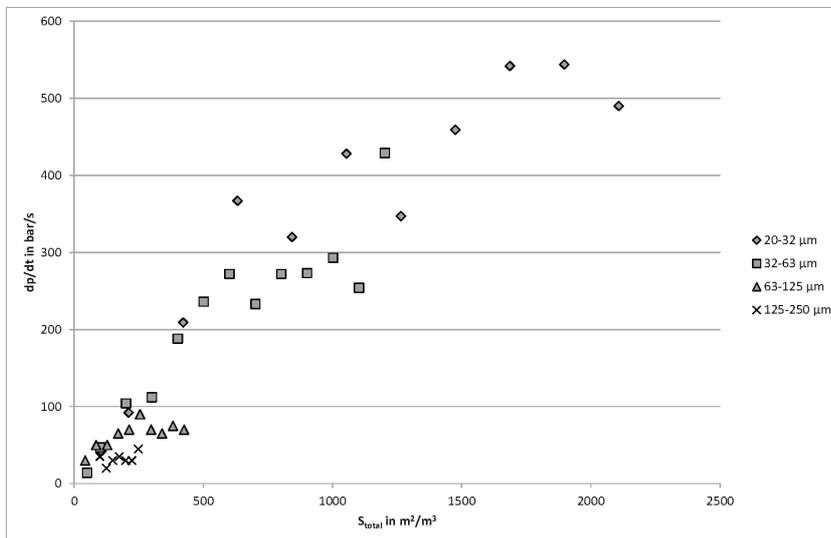


Bild 12. Abhängigkeit zwischen dp/dt und Oberflächenkonzentration.

Die Geschwindigkeit des Explosionsdruckanstiegs steigt für alle Staubkonzentrationen mit zunehmender spezifischer Oberfläche (Bild 11). Die Ergebnisse der beiden groben Fraktionen (63 bis 125 µm und 125 bis 250 µm) werden teilweise durch die chemischen Zünder gestört, hierdurch kommt es in diesem Wertebereich zu größeren Unsicherheiten.

Die dp/dt -Kurven zeigen anders als die Druckkurven keinen Grenzwert bei hohen Konzentrationen für die einzelnen Fraktionen. Zusätzlich nehmen die Abstände der einzelnen Fraktionskurven mit der Konzentration zu. Das weist auf einen nicht linearen Zusammenhang zwischen Oberfläche und Reaktionsgeschwindigkeit hin.

Die Funktion von dp/dt über der Oberflächenkonzentration (Bild 12) zeigt nur bis ca. 250 m²/m³ einen geschlossenen Verlauf über alle Fraktionen. Die Kurve jeder Fraktion geht an einem bestimmten Punkt in einen flachen, aber nicht konstanten Verlauf über. Der kinetische Reaktionsablauf wird also nicht nur von der Anzahl reaktiver Plätze an der Stauboberfläche beeinflusst.

Je größer der Staub ist, desto mehr verschiebt sich das Verhältnis von Oberfläche zu eingesetzter Masse bei gleicher

absoluter Oberfläche zu kleineren Werten; dies führt zu einem erhöhten Anteil von unverbranntem Staub. Dieser Staub nimmt die Reaktionswärme auf und verhindert so eine weitere Beschleunigung der Explosionsreaktion. Der gleiche Effekt tritt ebenfalls im Bereich der hohen Staubkonzentrationen auf. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Aktivierungsenergie in Gl. (5) für die reaktive Oberfläche nicht homogen ist. Die Partikel der Fraktionen weisen unterschiedliche Oberflächen- zu Kantenlängen-Verhältnisse auf. Reaktive Kantenplätze auf den Saccharosepartikeln könnten geringere Aktivierungsenergien im Arrheniusfaktor aufweisen, sodass hierdurch der heftigere Reaktionsverlauf bei den feinen Fraktionen erklärt werden kann.

4 Untere Explosionsgrenze polydisperser Gemische

Belastungen wie Reibung und Prall führen in sprödem Material wie Zucker zu starken Beanspruchungen und zur Entstehung von Feinstaub. In diesem Zusammenhang ist die Frage von Bedeutung, ab welchem Feinstaubanteil ein grober Zucker beginnt, explosionsfähig zu werden.

Die Untersuchungen wurden mit dem modifizierten Hartmann-Rohr nach VDI 2263 Blatt 1 [10] durchgeführt. Die Staubprobe wird innerhalb der Prüfapparatur mit Druckluft aus einem Zerstäuberpils dispergiert, sodass nur eine geringe mechanische Beanspruchung auftritt. Zusätzlich können, anders als in der geschlossenen Apparatur, druckschwache Explosionen anhand der Flammenausbreitung erkannt werden.

Die Staubgemische wurden aus der nicht explosionsfähigen Fraktion 250 bis 500 µm und der sehr feinen Fraktion < 20 µm hergestellt. Als Standardzündquelle wurde in der Hartmann-Apparatur die Funkenstrecke (ca. 10 J) verwendet. Zusätzlich wurde der Nachweis „nicht entzündlich“ für die reine 250- bis-500-µm-Staubfraktion mit der Glühwendel (ca. 100 J) bestätigt. Die Aussage „keine Reaktion“ wurde auf der Grundlage von jeweils zehn Einzelversuchen getroffen. Als UEG wurde für die reine 20-µm-Fraktion ein Wert von 60 g/m³ ermittelt. Bei einer Konzentration von 110 g/m³ waren mit der Feinfraktion alle zehn Zündversuche erfolgreich.

Nach Bartknecht wird ein Gemisch aus Grob- und Feinstaub explosionsfähig, wenn der Feinstaubgehalt für sich die UEG überschreitet und mit 5 bis 10 % im Staubgemisch enthalten ist [11]. Die Zuckergemische wurden so hergestellt, dass die Fraktion < 20 µm immer in einer Konzentration von 110 g/m³ in der Atmosphäre enthalten ist. Ein Feinanteil von 5 Gew.-% hat dabei im Bereich hoher Staubkonzentrationen (> 2000 g/m³) noch gerade zu einer Entzündung geführt, bei 4 Gew.-% wurden keine Entzündungen beobachtet.

Die Ergebnisse bestätigen, dass geringe Feinstaubanteile in einem Gemisch mit grobem nicht explosionsfähigem Staub

eine explosionsfähige Atmosphäre bilden können. Die gleichen Ergebnisse konnten durch Austausch der groben Zuckerfraktion gegen inertes Kochsalz gefunden werden. Hieraus ergibt sich für die Praxis, dass insbesondere bei

stark abrasiven Prozessen, z. B. Mahlen, Transport und Trocknung, mit der Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre durch brennbare Feinstäube zu rechnen ist.

Literatur

- [1] Zuckerfabrik Groß-Gerau: Nach Explosion Siloabriss zunächst gestoppt. Echo-Zeitungen, Darmstadt 2009. www.echo-online.de/region/gross-gerau/ngen-container-ressort/Zuckerfabrik-Gross-Gerau-Nach-Explosion-Siloabriss-zunaechst-gestoppt;art1350,61387 (Zugriff: 26. Juni 2014).
- [2] Investigation Report – Sugar dust explosion and fire. Report No. 2008–05-I-GA. Hrsg.: U. S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Washington DC, USA 2009. www.csb.gov/assets/1/19/imperial_sugar_report_final_updated.pdf
- [3] DIN EN 14034-1: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen – Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes p_{\max} von Staub/Luft-Gemischen. Berlin: Beuth 2011.
- [4] DIN EN 14034-2: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen – Teil 2: Bestimmung des maximalen zeitlichen Druckanstiegs $(dp/dt)_{\max}$ von Staub/Luft-Gemischen. Berlin: Beuth 2011.
- [5] DIN EN 14034-3: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen – Teil 3: Bestimmung der unteren Explosionsgrenze UEG von Staub/Luft-Gemischen. Berlin: Beuth 2011.
- [6] *Brunauer, S.; Emmett, P. H.; Teller, E.*: Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 60 (1938) Nr. 2, S. 309-319.
- [7] DIN 51900-2: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe – Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes – Teil 2: Verfahren mit isoperibolem oder static-jacket Kalorimeter. Berlin: Beuth 2003.
- [8] *Böge, A.* (Hrsg.): *Handbuch Maschinenbau – Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Wiesbaden: Friedrich Vieweg und Sohn 2007.
- [9] *Recknagel, H.*: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. München: Oldenbourg 2007.
- [10] VDI 2263 Blatt 1: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben. Berlin: Beuth 1990.
- [11] *Bartknecht, W.*: *Explosionsschutz – Grundlagen und Anwendung*. Berlin: Springer 1993.