

# Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben

## Kann man das Verhalten außerhalb atmosphärischer Bedingungen abschätzen?

Ute Hesener und Matthias Beck, Bochum

Bei der Auslegung explosionstechnischer Schutzmaßnahmen in der staubverarbeitenden Industrie sind genaue Kenntnisse der Eigenschaften der verarbeiteten brennbaren Stäube erforderlich. Brenn- und Explosionskenngrößen werden benötigt, um potenzielle Zündquellen zu bewerten oder konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen auslegen zu können. Auch um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Stäuben zu erreichen, werden sog. sicherheitstechnische Kenngrößen verwendet. Diese sollten in Laboratorien unter normierten Randbedingungen ermittelt werden. Bei der Anwendung der ermittelten Kenngrößen auf die konkrete verfahrenstechnische Anlage ist immer zu beachten, dass die Kenngrößen von verschiedenen Randbedingungen abhängen. Neben der Korngröße beeinflussen andere Umgebungstemperaturen oder Drücke sowie abweichende Sauerstoffvolumenanteile die Kenngrößen. Im Rahmen eines von der BG RCI geförderten Forschungsvorhabens hat die DEKRA EXAM GmbH die vorhandenen veröffentlichten Erkenntnisse zu diesem Thema zusammengefasst. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse hieraus vorgestellt.

Die sichere Handhabung brennbarer Stäube in staubverarbeitenden verfahrenstechnischen Anlagen setzt eine genaue Kenntnis der Staubeigenschaften voraus. Für die Charakterisierung dieser Eigenschaften werden sicherheitstechnische Kenngrößen verwendet. Dabei wird zwischen abgelagerten und aufgewirbelten Stäuben unterschieden. Wesentliche Kenngrößen brennbarer Stäube sind die

- Brennzahl,
- Glimmtemperatur,
- Selbstentzündungstemperatur durch Warmlagerung,
- Zündtemperatur,
- Mindestzündenergie,
- Untere Explosionsgrenze,
- Sauerstoffgrenzkonzentration sowie der
- maximale Explosionsdruck und der  $K_{St}$ -Wert.

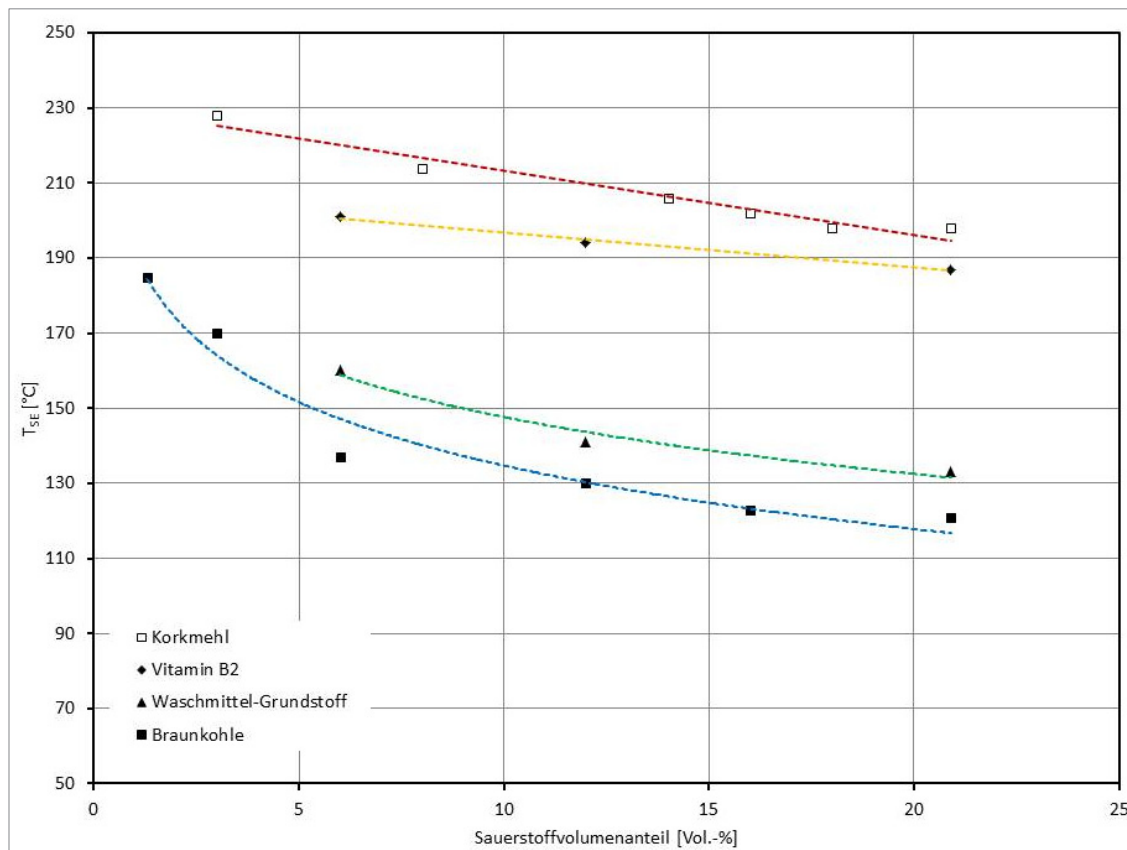
Ermittelt werden diese Kenngrößen unter apparativen und versuchstechnischen Randbedingungen, die größtenteils in europäischen Normen beschrieben sind. Diese sind unter der Richtlinie 94/9/EG harmonisiert (z. B. DIN EN 14034-1 bis -4). Bei der Anwendung der im Labor ermittelten Kenngrößen im Rahmen von Risikobeurteilungen verfahrenstechnischer Prozesse oder bei Geräten, ist immer zu prüfen, ob die Laborrandbedingungen mit den Randbedingungen in der Praxis übereinstimmen. Im ATEX-Leitfaden zur Richtlinie 94/9/EG wird dazu ein Geltungsbereich der Kenngrößen festgelegt. Hierunter fällt ein Temperaturbereich von -20 bis +60 °C und ein Druckbereich von 800 bis 1 100 mbar. Doch schon innerhalb dieses Bereichs können die Einflussfaktoren Temperatur, Druck oder Sauerstoffvolumenanteil relevant werden, so z. B. beim Temperatureinfluss auf die Mindestzündenergie. Weiterhin werden verfahrenstechnische Anlagen und Prozesse häufig außerhalb dieser sog. atmosphärischen Bedingungen betrieben. Im Auftrag der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) hat DEKRA EXAM GmbH ein Forschungsprojekt durchgeführt, mit dem Ziel, mithilfe einer ausgedehnten Lite-

raturrecherche einen Überblick über den Stand des Wissens in diesem Bereich zu erlangen. Weiterhin wurden Empfehlungen für mögliche Abschätzmethoden der Einflussfaktoren Temperatur, Druck und Sauerstoffvolumenanteil erarbeitet. Neben dieser Literaturrecherche floss vor allem die Erfahrung von Experten aus Prüflaboren benannter Stellen, Betreiberlaboren, berufsgenossenschaftlichen Laboren und Forschungsinstitutionen wie der BAM und der PTB in die Empfehlungen ein.

### Verhalten sicherheitstechnischer Kenngrößen abgelagerter Stäube

Wie bekannt, ändert sich die Brennzahl eines Staubes bei erhöhter Staubtemperatur häufig zu kritischen Werten. Der Versuchsaufbau hierzu ist in der Richtlinie VDI 2263 Blatt 1 grundsätzlich beschrieben. Die Untersuchungen dazu zeigen, dass die Brennzahl eines aufgeheizten organischen Staubs deutlich oberhalb der bei atmosphärischen Bedingungen bestimmten Brennzahl liegen kann. Bei höheren Staubtemperaturen befindet sich ein höherer Anteil an leicht flüchtigen Bestandteilen an der Phasengrenzfläche. Da Sauerstoff im Überschuss vorhanden ist, wird der höhere Anteil flüchtiger Bestandteile umgehend umgesetzt. Das Brennverhalten wird kritischer. Eine quantitative Abschätzungsmöglichkeit, wie sich die Brennzahl mit der Temperatur entwickelt, liegt bislang nicht vor. Zur Einschätzung wird empfohlen, den Laborversuch unter erhöhter Temperatur durchzuführen. Auch ist zu berücksichtigen, dass die ermittelte Brennzahl stark von der Durchführung des Tests abhängt (Art der Zündquelle, Einwirkdauer der Zündquelle, Art und Stärke der Überströmung, durch die die Sauerstoffzufuhr maßgeblich beeinflusst wird).

Grundsätzlich kann eine Temperaturabhängigkeit auch bei der Glimmtemperatur nicht ausgeschlossen werden. Die Glimmtemperatur eines Staubs entspricht der Temperatur einer Oberfläche, auf der eine 5 mm dicke Staubschicht gerade anfängt zu glimmen. Anders als bei der Brennzahl, bei der es nur



**Bild 1** Ausgewählte Versuchsergebnisse von Schmidt und Lohrer.

eine punktförmige Zündquelle gibt, erfolgt bei der Glimmtemperatur die Energiezufuhr über eine Fläche. Es findet ein kontinuierlicher Wärmetransport in die darauf abgelagerte Staubschicht statt. Zudem wird innerhalb der Staubschicht durch die Oxidation der flüchtigen Bestandteile Reaktionswärme freigesetzt. Solange diese Wärme über die Oberfläche der Staubschicht abgeführt werden kann, also die Wärmeabgabe größer als die Wärmezufuhr ist, entzündet sich die Staubschicht nicht. Erst wenn die heiße Oberfläche eine kritische Temperatur überschreitet, sodass die Wärmezufuhr größer wird als die Wärmeabgabe, beginnt die Staubschicht zu glimmen. Durch eine erhöhte Umgebungstemperatur wird die pro Zeit abgeführte Wärmemenge der Staubschicht reduziert. Hierdurch liegt u. U. die Glimmtemperatur eines Staubs bei erhöhten Umgebungstemperaturen unterhalb der im Labor bei atmosphärischen Bedingungen ermittelten Glimmtemperatur. Bislang liegen hierzu jedoch keine veröffentlichten Versuchsergebnisse vor, die zu einer Abschätzung herangezogen werden könnten.

Bezüglich der Druckabhängigkeit liegen für Brennzahl und Glimmtemperatur keine Untersuchungen vor. Für reduzierte Drücke können die bei atmosphärischen Bedingungen bestimmten Kenngrößen für die Brennzahl und die Glimmtemperatur herangezogen werden, da ein eher unkritischeres Verhalten zu erwarten ist. Bei erhöhten Drücken sind unterschiedliche Effekte zu berücksichtigen. Eine Erhöhung des Anfangsdrucks führt zu einer Erhöhung des Sauerstoffpartialdrucks. Dem Reaktionssystem steht mehr Oxidationsmittel zur Verfügung. Gleichzeitig führt die Erhöhung der Stoffmenge zu einer Erhöhung der volumenspezifischen Wärmekapazität. Zusätzlich erschwert ein höherer Anfangsdruck die Ausgasung flüchtiger Bestandteile aus dem Staubkorn. Welcher dieser einzelnen Faktoren ausschlaggebend für das Verhalten der Kenngrößen bei erhöhtem Druck ist, kann im Einzelnen zurzeit nicht abgeschätzt werden.

Auch zur Abschätzung des Einflusses der Sauerstoffkonzentration liegen keine Untersuchungen vor. Es ist jedoch zu er-

warten, dass bei Reduzierung der Sauerstoffkonzentration prinzipiell ein unkritischeres Verhalten der Brennzahl und der Glimmtemperatur vorliegt. Als Anhaltspunkte können die Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstentzündungsverhalten herangezogen werden. Bei erhöhten Sauerstoffkonzentrationen ist von einem deutlich kritischeren Verhalten auszugehen. Falls im Einzelfall eine Bewertung erforderlich ist, wird empfohlen, Laborversuche durchzuführen.

Zum Verhalten der Selbstentzündungstemperatur unter variierenden Sauerstoffvolumenanteilen liegen einige Veröffentlichungen vor. Zum Beispiel wurde von Schmidt und Lohrer (siehe u.a. [1; 2]) die Selbstentzündungstemperatur diverser organischer Stäube innerhalb sauerstoffreduzierter Atmosphären durch isoperibole Warmlagerung bestimmt. Hierzu sind in Bild 1 ausgewählte Versuchsergebnisse der Autoren aufgeführt.

Diese Versuchsergebnisse zeigen, dass die Selbstentzündungstemperaturen der betrachteten Stäube bei abnehmenden Sauerstoffvolumenanteilen zunehmen. Durch den geringeren Anteil an Sauerstoff in der Atmosphäre sinkt die Oxidationsrate des Staubs an dessen freier Oberfläche. Dies führt zu einer geringeren freigesetzten Reaktionswärme. Allerdings ist erst bei geringen Sauerstoffvolumenanteilen mit einem signifikanten Anstieg zu rechnen. Es ist auch zu beachten, dass in der Schüttung selbst noch Sauerstoff vorhanden ist bzw. bei manchen Produkten auch chemisch gebundener Sauerstoff bei erhöhten Temperaturen freigesetzt werden kann. Beispielsweise wird bei der Warmlagerung von Erbsenmehl bei erhöhten Temperaturen Sauerstoff freigesetzt, sodass selbst bei Sauerstoffvolumenanteilen von 0 % in der Umgebung Selbstentzündung stattfinden kann. Liegen keine konkreten Daten vor, empfiehlt sich, die bei atmosphärischen Bedingungen ermittelten Werte heranzuziehen. Weiterhin ist zu beachten, dass bei Stäuben, die unter inertierten Bedingungen und erhöhter Temperatur gehandhabt werden, zwar im inertisierten Anlagenbereich bei sehr niedrigen Sauerstoffvolumenanteilen Selbstentzündung vermieden



**Bild 2** Bestimmung der MZE mit einem MIKE 3.

werden kann, dazu aber deutlich niedrigere Werte der Sauerstoffkonzentration erforderlich sind als sie sich z. B. durch die Sauerstoffgrenzkonzentration ergeben würden. Zusätzlich ist zu beachten, dass bei erneutem Kontakt mit atmosphärischen Bedingungen (im nachgeschalteten nicht inertisierten Anlagenbereich) eine Entzündung sehr schnell eintreten kann.

## Verhalten sicherheitstechnischer Kenngrößen aufgewirbelter Stäube

### Zündtemperatur ( $T_z$ )

Die Abhängigkeit der Zündtemperatur von den Umgebungseinflüssen wurde nicht systematisch untersucht. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die aktuelle Prüfapparatur nicht zur Veränderung der Umgebungstemperatur, des Drucks und des Sauerstoffvolumenanteils geeignet ist. Daher kann die Abschätzung des tendenziellen Verhaltens der Zündtemperatur bislang nur über Analogieschlüsse aus dem Verhalten der abgelagerten Stäube erfolgen. Daraus könnte man ableiten, dass die Zündtemperatur bei Zunahme der Umgebungstemperatur sinkt. Die Reduzierung des Sauerstoffvolumenanteils bedingt vermutlich eine Zunahme der Zündtemperatur. Wie bei allen Kenngrößen ist bei Erhöhung des Sauerstoffvolumenanteils mit einer deutlichen Abnahme zu rechnen, und die Auslegung sollte auf der Basis praktischer Versuche erfolgen.

### Mindestzündenergie (MZE)

Die MZE eines aufgewirbelten Staubs gibt die minimale in einem Kondensator gespeicherte Energie an, die gerade eben ausreicht, den Staub zu entzünden. Bestimmt wird diese entweder mit einer modifizierten Hartmann Apparatur oder einem MIKE 3 (s. Bild 2). Mit einigem apparativen Aufwand lassen sich in beiden Versuchsapparaturen höhere Temperaturen bzw. veränderte Sauerstoffvolumenanteile einstellen. Nicht möglich ist jedoch die Einstellung veränderter Drücke.

In einem MIKE 3 wurden von *Glor* und *Schwenzfeuer* [3] die Abhängigkeit der MZE vom Sauerstoffvolumenanteil untersucht. Hierbei konnten sie beobachten, dass die MZE für Sauerstoffvolumenanteile kleiner 21 Vol.-% ansteigt. Demgegenüber sinkt die MZE bei einer Erhöhung des Sauerstoffvolumenanteils nur geringfügig. Ihre Beobachtungen fassten die beiden Autoren in einer empirischen Gleichung zusammen:

$$MZE(y_{O_2}) = MZE_{\text{Fakt}} \cdot \exp\left\{23,2 - \frac{23,2}{21} \cdot y_{O_2}\right\}$$

Der produktspezifische Faktor  $MZE_{\text{Fakt}}$  muss dabei im Labor ermittelt werden. Die Gleichung kann genutzt werden, um die Größenordnung der MZE in Systemen mit reduzierten Sauerstoffvolumenanteilen abzuschätzen. Eine endgültige Aussage kann aber nur auf der Basis von Versuchen getroffen werden.

Maßgebliche Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der MZE, die auch heute noch angeführt werden, stammen von *Glärner* [4]. Dieser untersuchte in den 1980er-Jahren die MZE verschiedener Stäube bei Temperaturen bis zu 200 °C in einer 20-l-Laborapparatur. Er erkannte, dass bei doppellogarithmischer Auftragung die Werte der MZE durch lineare Gleichungen wiedergegeben werden können. Durch eine Regressionsrechnung postulierte *Glärner*, dass organische Stäube bei einer Temperatur von 1000 °C eine MZE von 0,088 mJ aufweisen. Mithilfe dieser Untersuchungen ist eine qualitative Abschätzung der Größenordnung der MZE, zumindest bis 200 °C, über die lineare Interpolation möglich. Die Abschätzung konkreter Werte, insbesondere im zündkritischen Bereich, wird ausdrücklich nicht empfohlen.

### Untere Explosionsgrenze (UEG)

Die Untersuchung der Sauerstoffkonzentrationsabhängigkeit der UEG kann im Rahmen der Ermittlung der Sauerstoffgrenzkonzentration erfolgen. Im Rahmen dieser Untersuchungen beobachtete z. B. *Wiemann* [5] einen leichten Anstieg der UEG. Weiterhin führte er Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der UEG durch. Er stellte bei Versuchen bis 200 °C fest, dass die UEG linear abnimmt. Diesen Zusammenhang formulierte *Wiemann* in folgender empirischen Gleichung.

$$UEG(T) = UEG(T_0) \cdot [1 - 0,0027 \cdot (T - T_0)]$$

Der Faktor 0,0027 ist das arithmetische Mittel der Untersuchungen von *Wiemann*. Ebenfalls durch Nutzung linearer Gleichungen kann das Verhalten der UEG gegenüber einer Druckveränderung beschrieben werden. Durch eine Druckerhöhung nimmt die UEG linear zu. Dies ermöglicht bei Kenntnis zweier Messwerte die Berechnung der UEG bei beliebigen Drücken.

### Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK)

Die SGK eines Staubs hängt maßgeblich von dem bei der Ermittlung verwendeten Inertgas ab. Häufig wird dazu Stickstoff verwendet. Die unten aufgeführten Ergebnisse können ebenfalls für CO<sub>2</sub> und Wasserdampf verwendet werden, da die inertisierende Wirkung bei diesen Inertisierungsmitteln in den meisten Fällen besser ist. Trotzdem ist natürlich im Einzelfall zu bewerten, ob das verwendete Gas in Bezug auf das zu inertisierende Gemisch inert ist. Wie zu erwarten, sinkt die Sauerstoffgrenzkonzentration eines Staubs bei steigenden Umgebungstemperaturen. Laut *Wiemann* [5] kann dieses Verhalten ebenfalls durch eine lineare Gleichung wiedergegeben werden:

$$SGK(T) = SGK(T_0) - 13,2 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_0)$$

Nach Diskussion der Ergebnisse im Forschungsbeirat wird empfohlen, die mit der Gleichung ermittelten Ergebnisse mit einem 10%igen Sicherheitszuschlag zu versehen. Sie kann bis zu Temperaturen von 300 °C angewandt werden.

Die Druckabhängigkeit der SGK wurde bisher nur von wenigen Autoren untersucht. Aus den veröffentlichten Messungen lassen sich bislang keine eindeutigen Tendenzen ermitteln.

## Maximaler Explosionsdruck ( $p_{\max}$ ) und $K_{St}$ -Wert

Der maximale Explosionsdruck steigt mit steigendem Systemdruck proportional. Dies wurde in der Literatur von verschiedenen Autoren (u.a. [9; 10]) bestätigt. Folglich kann bei Kenntnis des maximalen Explosionsdrucks bei atmosphärischen Drücken der maximale Explosionsdruck für beliebige Anfangsdrücke ermittelt werden.

$$p_{\max}(p) = p_{\max}(p_0) \cdot \frac{p}{p_0}$$

Für steigende Temperaturen beobachteten verschiedene Autoren (u. a. [4; 8]), dass der maximale Explosionsdruck sinkt.

Der  $K_{St}$ -Wert ist, analog zu  $p_{\max}$ , proportional abhängig vom Systemdruck. Eine Abschätzung ist daher mit folgender Gleichung möglich:

$$K_{St}(p) = K_{St}(p_0) \cdot \frac{p}{p_0}$$

Die Abhängigkeit des  $K_{St}$ -Werts von der Umgebungstemperatur untersuchte *Glärner* [4] für verschiedene ST1-Stäube bei Temperaturen bis zu 200 °C. Dabei zeigte sich folgendes tendenzielles Verhalten:

- $K_{St}$ -Werte < 100 bar·m/s unterliegen tendenziell einer Zunahme der Explosionsheftigkeit.
- $K_{St}$ -Werte zwischen 100 und 150 bar·m/s besitzen keine Temperaturabhängigkeit.
- $K_{St}$ -Werte > 150 bar·m/s unterliegen tendenziell einer Abnahme der Explosionsheftigkeit.

Eine Aussage über das Verhalten von ST2- und ST3-Stäuben kann jedoch anhand der obigen Ausführungen nicht erfolgen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Für die Auslegung von Explosionsschutzmaßnahmen und den sicheren Umgang mit brennbaren Stäuben muss der Anwender die

Symbol bzw. Abkürzung	Bedeutung	Einheit
$T_z$	Zündtemperatur	°C
MZE	Mindestzündenergie	mJ
UEG	untere Explosionsgrenze	g/m <sup>3</sup>
SGK	Sauerstoffgrenzkonzentration	Vol.-%
$p_{\max}$	maximaler Explosionsdruck	bar
$T$	Temperatur	°C oder K
$T_0$	Ausgangstemperatur	°C oder K
$p_0$	Ausgangsdruck	bar
$p$	Druck	bar
MZE <sub>Faktor</sub>	Im Labor ermittelter Faktor zur Berechnung der MZE nach <i>Glor</i> und <i>Schwenzfeuer</i>	mJ
$y_{O_2}$	Sauerstoffvolumenanteil	Vol.-%

sicherheitstechnischen Kenngrößen des gehandhabten Staubs genau kennen bzw. abschätzen. Die vorliegenden Erkenntnisse zeigen, dass das Verhalten der Kenngrößen bereits im definierten Geltungsbereich nicht als konstant anzusehen ist. Leider liegen aus der Vergangenheit nur für die wenigsten Kenngrößen konkrete Werte außerhalb der atmosphärischen Bedingungen vor. Weiterhin beschränkt sich die Literatur nur auf wenige untersuchte Stäube. Metallstäube wurden bislang nicht systematisch untersucht, sodass die o. g. Abschätzformeln nicht generell auf Metallstäube übertragen werden können. Weiterhin müssen grundsätzlich Informationen zu Reaktionsmechanismen vorliegen, um ausschließen zu können, dass es sich um andere Reaktionen als die zwischen Luftsauerstoff und Staub handelt. Es besteht also nach wie vor Forschungsbedarf und die Anwendung der Kenngrößen im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung erfordert ausreichendes Hintergrundwissen.

TS 462

## Literaturverzeichnis

- [1] *Lohrer, C.; Schmidt, M.; Krause, U.*: Self-ignition of dust at reduced volume fractions of ambient oxygen. J. Loss Prev. Proc. Ind. 16 (2003), S. 141-147, 2003.
- [2] *Schmidt, M.; Malow, M.; Lohrer, C.; Krause, U.*: Selbstzündung von Stäuben bei vermindertem Sauerstoffgehalt. Chem. Ing. Tech. 74 (2002), S. 1735-1737.
- [3] *Glor, M.; Schwenzfeuer, K.*: Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Mindestzündenergie von Stäuben. VDI-Berichte, Nr. 1272, S. 119-134. Düsseldorf: VDI 1996.
- [4] *Glärner, T.*: Temperatureinfluss auf das Explosions- und Zündverhalten brennbarer Stäube. Dissertation ETH Zürich 1983.
- [5] *Wiemann, W.*: Inertisierung von Gasen und Stäuben gegen Explosionen in Behältern und Rohrleitungen. Moderne Unfallverhütung (1985) Nr. 29, S. 29-37.
- [6] *Wiemann, W.*: Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air and dust/air/inert gas mixture. In: *Cashdollar, K. L.; Hertzberg, M.* (Hrsg.): Industrial dust explosion, S. 10-13. Pittsburgh 1986.
- [7] *Lazaro, E. C.; Torrent, J. G.*: Experimental research on explosibility at high initial pressures of combustible dusts. J. Loss Prevent. Proc. Indust. 13 (2000), S. 221-228.
- [8] *Wiemann, W.*: Einfluss der Temperatur auf Explosionskenngrößen und Sauerstoffkonzentrationen. VDI Berichte, Nr. 494, S. 89-97. Düsseldorf: VDI 1984.

### Autoren



Dr.-Ing. **Ute Hesener**, Dipl.-Ing. **Matthias Beck**,  
Dekra Exam GmbH, Bochum.