

Kurzfassung zur Habilitationsschrift mit dem Thema

“Wärme- und Stofftransportvorgänge bei sicherheitstechnischen Untersuchungsverfahren für Staubbrände und Staubexplosionen”

zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing. habil. an der Fakultät für Maschinenwesen
eingereicht von Ulrich Krause, geb. am 2.1.1959 in Dresden

Tag des Kolloquiums: 29.05.2001

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, Möglichkeiten aufzuzeigen, mit denen der Staubexplosionsschutz aus dem gegenwärtigen Stadium vorwiegend empirischen Arbeitens herausgeführt werden kann. Die erörterten experimentellen und numerischen Methoden wurden speziell unter diesem Gesichtspunkt ausgewählt.

Da es sich bei Staubbränden und Staubexplosionen um heterogene Verbrennungsreaktionen handelt, üben im Gegensatz zu Reaktionen in homogenen Systemen neben chemisch-kinetischen und Wärmetransportvorgängen auch Stofftransportvorgänge einen entscheidenden Einfluß auf den Reaktionsablauf aus.

In Anbetracht dessen werden experimentelle Verfahren zur Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen (STK) vorgeschlagen, bei denen definierte Strömungszustände in der Untersuchungsapparatur eingestellt werden können. Der Einfluß des Strömungsfeldes auf den Explosionsablauf läßt sich damit wesentlich besser als bei herkömmlichen Verfahren herausarbeiten.

Auf diese Weise kann nachgewiesen werden, daß Stäube unterschiedlicher Reaktivität – gemessen an ihren chemisch-kinetischen Parametern – Staubexplosionen mit gleicher Heftigkeit – gemessen an den Flammengeschwindigkeiten – hervorrufen können.

Bei der experimentellen Untersuchung von Staubexplosionen zeigt sich, daß bedingt durch die Vielzahl möglicher Parametervariationen und den notwendigen materiellen Aufwand, die experimentelle Arbeit allein nicht zum Ziel führt. Erst die Verknüpfung experimenteller und numerischer Methoden ermöglicht hinreichend detaillierte Untersuchungen, um Erkenntnisse aus Laboruntersuchungen sicher und maßgeschneidert auf reale Anlagen und Prozesse anwenden zu können.

Staubexplosionen können aufgrund der großen Zahl der sie beeinflussenden Parameter nach mannigfaltigen Szenarien entstehen und ablaufen. Dies führt zu Schwierigkeiten, wenn beabsichtigt ist, eine Staubexplosion deterministisch zu modellieren. Die wesentlichen Einflußgrößen lassen sich nur bedingt mathematisch erfassen, so daß eine Reihe vereinfachender Annahmen bei der Modellbildung getroffen werden muß.

Die Palette bestehender Modelle zur Beschreibung eines oder mehrerer physikalischer Zusammenhänge, die bei Staubexplosionen eine Rolle spielen, reicht dabei von rein empirischen Näherungsbeziehungen für experimentell gefundene Zusammenhänge bis zur mehrdimensionalen Analyse des gekoppelten Massen-, Energie- und Impulstransports. Bei der Anwendung der verschiedenen Modelle zeigt sich jedoch rasch, daß auf die Lösung der Navier-Stokesschen Gleichungen einerseits sowie auf die Berechnung lokaler Verteilungen für Dichte, Temperatur und Spezieskonzentrationen andererseits für eine realistische Modellierung nicht verzichtet werden kann. Mehrzonenmodelle, die auf einer geschlossenen, ungestörten Form der Flammenfront unter Vernachlässigung der Strömungsgeschwindigkeit beruhen, sind ungeeignet für die Simulation von Staubexplosionen.

Die vorliegende Arbeit behandelt zum ersten den Fall der "kalten", partikelbeladenen Strömung bei der Befüllung eines Silos mit Staub. Es kann gezeigt werden, wie durch Analyse von Strömungsfeld und Partikelverteilung Betriebszustände aufgedeckt werden können, die im Falle einer Zündung des Staub/Luft-Gemisches zu besonders gefährlichen Wirkungen führen können.

Zum zweiten wird anhand der Nachrechnung von Laborexperimenten zur Flammenausbreitung die Berechtigung der für die Modellierung der Verbrennung getroffenen Annahmen geprüft. Zum dritten wird als Beispiel der komplette Verlauf einer Staubexplosion in einem Silo während der Befüllung mit Maisstärke berechnet.

Wesentliche Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen sind,

- daß sich mittels der numerischen Simulation die Übertragbarkeit von Labordaten auf technische Anlagen herstellen läßt,
- daß eine erfolgreiche Vorhersage der Flammenausbreitung in strömenden Staub/Luft-Gemischen nur durch die Lösung des kompletten Gleichungssystems für den gekoppelten Massen-, Energie-, Impuls- und Speziestransport möglich ist,
- daß aufgrund der besseren mathematischen Handhabbarkeit eines Modells eingeführte Annahmen und Vereinfachungen den Umstand nicht vernachlässigen dürfen, daß heterogene Reaktionen stets lokale Verteilungen der Bilanzgrößen bedingen,
- daß andererseits genauere Modelle eine Anzahl „freier“ Parameter enthalten, für welche zumindest hinreichende experimentelle Anhaltspunkte erforderlich sind.

Die Genauigkeit einer zeitabhängigen Berechnung von Verbrennungsreaktionen in Staub/Luft-Gemischen hängt nicht unwesentlich von der Güte der experimentellen Bestimmung dieser Parameter ab. Deshalb darf nicht geschlußfolgert werden, daß das ausführlichste mathematische Modell – jenes, welches den umfassendsten Gleichungssatz enthält – auch das zuverlässigste ist.

Aus diesem Grund sind die Ergebnisse der Simulationsrechnungen durchaus kritisch zu bewerten. Nur aus der Kombination von physikalischen und „numerischen“ Experimenten entsteht ein fundiertes Bild der tatsächlich ablaufenden Prozesse.