

**Untersuchungen zum Einfluß der Strömung auf  
Flammenausbreitungsvorgänge in  
Staub/Luft-Gemischen**

**Kurzreferat**

zur

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen-Technischen Fakultät

(Ingenieurwissenschaftlicher Bereich)

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Herrn Dipl.-Ing. Thomas Kasch

geb. am 12.10.1968 in Berlin

Halle (Saale), den 01.11.1999

genehmigt durch die

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät

(Ingenieurwissenschaftlicher Bereich)

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Dekan der Fakultät: Prof. Dr. rer. nat. habil. Grecksch

Halle (Saale), den 14.03.2000

Gutachter:

Prof. Dr. rer. nat. B. Reimer (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg)

Prof. Dr.-Ing. M. Sommerfeld (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg)

Prof. Dr. techn. R. K. Eckhoff (Universität von Bergen, Norwegen)

Sicherheitstechnische Schutzmaßnahmen gegen Staubbrände und -explosionen werden nach VDI-Richtlinie 2263 [1] auf der Basis von sicherheitstechnischen Kenngrößen (STK) ergriffen, wobei beabsichtigt ist, die zu befürchtenden Wirkungen von Staubexplosionen auch quantitativ vorherzusagen. Aufgrund der großen Abweichungen der Bedingungen in Laborapparaturen hinsichtlich Geometrie, Strömungsverhältnissen und Gemischerzeugung von denen in technischen Großanlagen ist die Übertragbarkeit quantitativer Größen vom Labor- in den Anlagenmaßstab aber stark begrenzt. Wesentlich für die Bewertung der STK ist auch das gedankliche Konzept, welches ihr zugrunde liegt. In diesem Sinne erscheint der bisher übliche  $K_{St}$ - Wert zur Klassifizierung von Substanzen hinsichtlich ihrer Reaktionsfähigkeit als nur bedingt geeignet, da er keine Trennung der Einflüsse von Stoffeigenschaften, Strömungszustand und Geometrie auf den Explosionsablauf erlaubt. Es ist daher nicht möglich, Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten, den zeitlichen Verlauf des Explosionsdruckes sowie den maximalen Druck eventueller Explosionsereignisse vorherzusagen. Die Auslegung beispielsweise von Druckentlastungseinrichtungen nach VDI-Richtlinie 3673 [2] muß aus diesem Grund zur Zeit im wesentlichen auf der Basis von Erfahrungswerten erfolgen.

Ein Weg zur Erzielung übertragbarer Resultate für komplexe Vorgänge wie Staubexplosionen ist die in der Arbeit verwendete Kombination aus Laborversuchen und numerischen Berechnungsmethoden. Die Verknüpfung experimenteller Untersuchungen mit mathematischen Modellen ist eine in der Sicherheitstechnik von Kernkraftwerken seit langem erfolgreich angewandte Methode zur Risikoanalyse. Es ist naheliegend, diese Methode stärker als bisher in der chemischen Sicherheitstechnik anzuwenden. Das Ziel der Arbeit ist die Vorhersage des Einflusses von Strömungsparametern auf Explosionskenngrößen. Die Ergebnisse sollen einen Fortschritt beim Explosionsschutz durchströmter Anlagen ermöglichen. Dabei hat sich die in Abbildung 1 als Fließschema dargestellte Vorgehensweise bewährt.

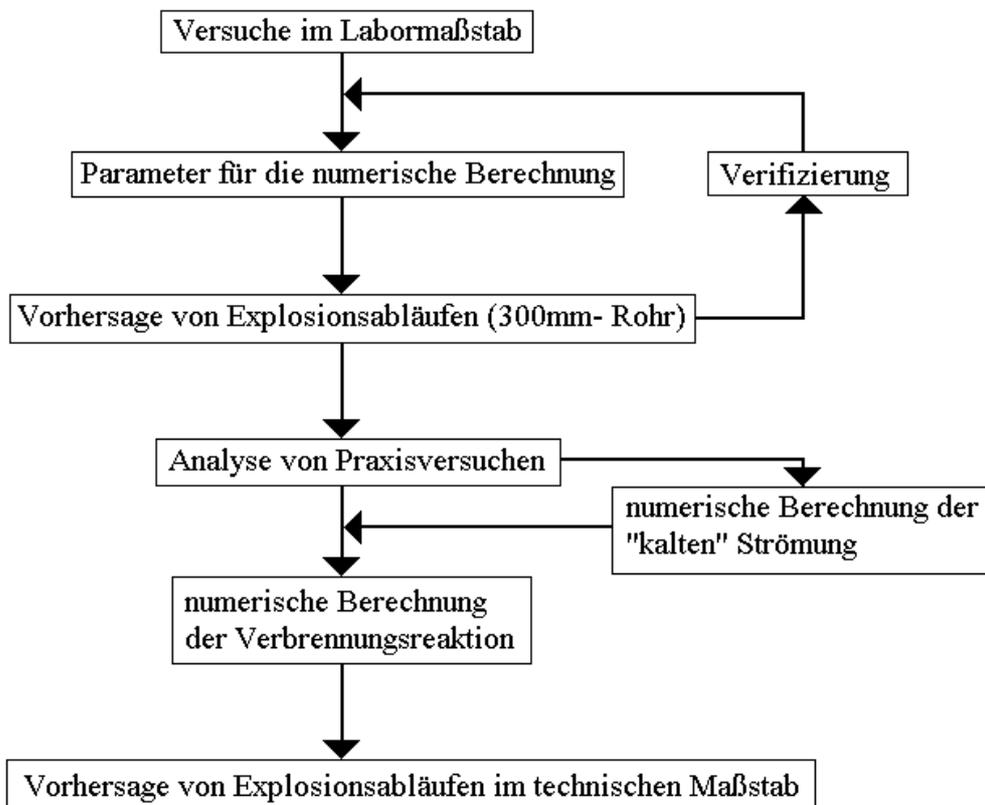


Abbildung 1: Fließschema zur Verwendung von Computermodellen zur Übertragung von Explosionskenngrößen aus dem Labormaßstab auf technische Anlagen

## Versuche im Labormaßstab:

Zunächst wurden Laborversuche durchgeführt, damit herausgefunden wird, welche Einflußgrößen für die Flammenausbreitung in durchströmten Anlagen von wesentlicher Bedeutung sind. Um die Zusammenhänge zwischen Strömungsverhalten und Explosionsheftigkeit genauer zu untersuchen, wurden Experimente bei laminarer und bei turbulenter Strömung vorgenommen.

Für alle untersuchten Substanzen konnte eine deutliche Abhängigkeit der Flammengeschwindigkeit von der Staubkonzentration und der Reynoldszahl schon bei laminarer Strömung festgestellt werden. Der tendenzielle Verlauf der einhüllenden Kurven, die diese Abhängigkeiten wiedergeben, wird nicht vom Rohrdurchmesser beeinflusst. Eine Wertigkeit, ob nun die Staubkonzentration oder die Reynoldszahl einen stärkeren Einfluß ausüben, ist nicht möglich.

Die Staubkonzentration bestimmt die Zusammensetzung der Reaktionsgemische brennstoffseitig. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft (bzw. die daraus berechnete Reynoldszahl) beeinflusst das Sauerstoff- und Brennstoffangebot und zusätzlich ist sie für den Durchmischungsvorgang von brennbaren Gasen und Luftsauerstoff von größter Bedeutung. Nur die Kombination aus „optimaler“ Reynoldszahl und „optimaler“ Staubkonzentration liefert den aus sicherheitstechnischer Sicht interessantesten Fall der maximalen Explosionswirkung. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zu vorgemischten Brenngas/Luft-Gemischen dar.

Die maximale Flammengeschwindigkeit stellt sich als kein stoffspezifisches Maß einer Substanz dar. Vielmehr können Substanzen mit unterschiedlicher Reaktionsfreudigkeit durchaus Explosionen zeigen, die sich mit der gleichen Flammengeschwindigkeit ausbreiten. Die maximal gemessenen Werte von ca. 11m/s in der 100mm-Rohrapparatur wurden sowohl für Lycopodium als auch für Maisstärke bei jeweils dem 1.75- bis 2.25fachen der rechnerischen stöchiometrischen Konzentration erreicht. Die maximale laminare Flammengeschwindigkeit kann zur Beschreibung der erwarteten Explosionsheftigkeit verwendet werden, wenn die diesbezüglichen Randbedingungen bekannt sind.

Im Gegensatz zur Flammengeschwindigkeit ist die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit als ein stoffspezifischer Parameter anzusehen, wenn berücksichtigt wird, daß für die experimentelle Bestimmung das Vorliegen „optimaler“ Bedingungen notwendig ist. Die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit klassifiziert die untersuchten Stäube in einer Reihenfolge, die genau ihre Reaktionsfreudigkeit wiedergibt. Die nach der Rohrmethode bestimmte maximale laminare Verbrennungsgeschwindigkeit für Lycopodium von 0.47 bis 0.55m/s ist mit den Literaturwerten anderer Autoren gut vergleichbar.

Turbulente Strömungsbedingungen führen zu höheren Flammen- und Verbrennungsgeschwindigkeiten. Die Wirbelbewegungen im Strömungsfeld sorgen für eine intensivere Durchmischung des Staub/Luft-Gemisches, Wärme- und Stofftransport werden verbessert. Die Flammengeschwindigkeit steigt im Anschluß an das Übergangsgebiet von laminarer zu turbulenter Strömung ( $Re = 2.000$  bis  $3.000$ ) linear mit zunehmender Reynoldszahl bis zum unter den Versuchsbedingungen maximal erreichbaren Wert an. Für Lycopodium ergaben sich im 100mm-Rohr bei Vorliegen turbulenter Strömungsverhältnisse maximale Werte der Flammengeschwindigkeit von ca. 12m/s. Der maximale Wert der turbulenten Verbrennungsgeschwindigkeit für Lycopodium im 100mm-Rohr wurde nach der Methode von Karlovitz [3] mit 0.64m/s berechnet.

### Festlegung geeigneter Eingabeparameter für die numerische Berechnung:

Das für die numerische Berechnung verwendete CFD- (Computational Fluid Dynamics) Programm FLUENT 4.5 ist kommerziell erhältlich und dient zur Berechnung von Strömungsvorgängen. Die für das Berechnungsmodell benötigten Eingabeparameter wurden an die Laborversuche in der 100mm-Rohrapparatur angepaßt. Die Validierung des Modells und des verwendeten Parametersatzes fand zunächst wieder für die Laborversuche statt. Dabei wurde gleichzeitig eine Einschätzung vorgenommen, ob die in den Berechnungsmodellen verwendeten vereinfachten Annahmen vertretbar sind.

Der gefundene Parametersatz inklusive den vorgenommenen Annahmen und Vereinfachungen erwies sich als geeignet, die Verbrennungsvorgänge von Staub/Luft-Gemischen numerisch zu berechnen. Für die 100mm-Rohrapparatur ergab sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Dies gilt sowohl für laminare wie auch für turbulente Strömungszustände.

### Vorhersage von Explosionsabläufen:

Im nächsten Schritt wurden mit diesem Parametersatz Versuchsergebnisse in einer bis dahin noch nicht untersuchten Rohrstrecke berechnet und anschließend durch gezielt durchgeführte Experimente bestätigt. Die bei der Modellierung getroffenen Annahmen sind geometrieunabhängig und sollten, wie später bestätigt wurde, auf die Untersuchungen von Flammenausbreitungsvorgängen in technischen Anlagen übertragbar sein.

Als Fernziel wurde angestrebt, dieses numerische Berechnungsmodell zur Vorhersage von Explosionsabläufen in technischen Anlagen, z.B. im Hinblick auf die Vermeidung gefährlicher Betriebszustände (Entstehung explosionsfähiger Atmosphäre) oder die Wirksamkeit konstruktiver Schutzmaßnahmen (Auslegung und Positionierung von Druckentlastungseinrichtungen), zu verwenden.

### Analyse von Praxisversuchen:

Um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dem Labor- in den technischen Maßstab zu überprüfen, wurde eine Datenauswertung von Versuchen in Siloanlagen mit rechteckigem Querschnitt und Volumina von 45m<sup>3</sup> und 85m<sup>3</sup> vorgenommen. Diese Untersuchungen wurden von Gerhold u.a. [4] in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben des TÜV Nord und der BAM durchgeführt.

Der Vergleich mit den Großversuchen im Silo zeigt, daß die prinzipielle Abhängigkeit der Flammengeschwindigkeit von der Staubkonzentration bei den Laborversuchen gut in den technischen Maßstab übertragbar ist. Außerdem gilt auch bei den Großversuchen, daß nur die Kombination aus „optimaler“ Beladung und „optimalem“ Förderstrom die kritischsten Versuchsbedingungen ergeben.

Im nächsten Schritt wurden die Versuchsergebnisse des Rechtecksilos mit den Resultaten der numerischen Berechnung verglichen. Dabei wird noch immer der durch Laborversuche validierte Parametersatz verwendet. Damit sollen die korrekte Anwendung dieses numerischen Berechnungsmodell mit seinen Vereinfachungen und Annahmen bestätigt und die Möglichkeiten der Maßstabsübertragung aufgezeigt werden.

### Numerische Berechnung der „kalten“ Strömung:

Bei der numerischen Berechnung der „kalten“ Strömung werden die Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilungen bestimmt. Doch schon diese numerische Simulation von betriebsbedingten Strömungsvorgängen ohne Verbrennungsreaktion kann wesentliche Hinweise auf ein mögliches Gefährdungspotential und auf die zu erwartende Heftigkeit einer Staubexplosion geben.

Anhand der lokalen Konzentrationsverteilungen lassen sich im Silo für den Befüllungsvorgang oder andere Betriebszustände Bereiche identifizieren, in denen mit explosionsfähigem Staub/Luft-Gemisch zu rechnen ist. Außerdem kann die Homogenität der Staubwolke beurteilt werden. Beim Vorliegen einer näherungsweise gleichmäßigen „optimalen“ Staubkonzentration in der Nähe der Zündquelle muß eine wesentlich heftigere Explosionswirkung befürchtet werden als bei ungleichmäßiger Verteilung. Veränderungen der Betriebsparameter Beladung oder Volumenstrom der Förderluft sollten so gewählt werden, daß große Gebiete mit optimaler Staubkonzentration im Silo vermieden werden.

Die lokalen Verteilungen der Dissipationsrate  $\epsilon$  und der kinetischen Wirbelenergie  $k$  bzw. der daraus berechenbaren turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit  $u'$  geben Aufschluß über den turbulenten Impulstransport. Stark turbulente Befüllungsvorgänge oder Betriebszustände können erkannt und durch Veränderung der Betriebsbedingungen vermieden werden. Ebenso lassen sich turbulenzfördernde Geometrien oder Einbauten erkennen; Detailinformationen über die Lage von Rezirkulations- und Totzonen können gewonnen werden.

Die Auswirkungen einer veränderten Betriebsführung oder einer konstruktiven Maßnahme auf die Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilungen im Silo können mittels numerischer Berechnung der „kalten“ Strömung schnell und kostengünstig bestimmt werden. So bietet sich die Möglichkeit, schon bei der Anlagenplanung Kenntnisse über mögliche Schwierigkeiten aufgrund der Konstruktion oder der Betriebsführung zu erhalten.

### Numerische Berechnung der Verbrennungsreaktion:

Die Verbrennungsreaktion und der Explosionsablauf werden auf der Basis der berechneten Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilungen der „kalten“ Strömung betrachtet. Der Zündzeitpunkt und der statische Ansprechdruck der Druckentlastungsflächen wurden den experimentellen Untersuchungen nachempfunden.

Der anhand der Versuche im Labormaßstab gefundene Parametersatz erweist sich auch für die Berechnung von Explosionsvorgängen in Anlagen im technischen Maßstab als geeignet, auch die veränderte Anlagengeometrie zeigt keine Einschränkungen bei dessen Anwendung auf. Die Werte der Flammengeschwindigkeit, des maximalen reduzierten Drucks und des maximalen reduzierten Druckanstiegs werden mit guter Genauigkeit berechnet.

Mittels numerischer Berechnung des Explosionsablaufs und der Explosionskenngrößen lassen sich mögliche konstruktive oder durch die Betriebsführung bedingte Probleme erkennen. Beim betrachteten Rechtecksilo sind z.B. die kreuzweise angeordneten Zugstangen im Siloinnern stark turbulenzfördernd und für die Flammenentwicklung mitverantwortlich. Schutzmaßnahmen, wie z.B. die Auslegung, der statische Ansprechdruck und die Positionierung von Druckentlastungseinrichtungen, können individuell angepaßt werden.

### Vorhersage von Staubexplosionen im technischen Maßstab:

Durch numerische Berechnungen von Explosionsabläufen können schon bei der Anlagenplanung kritische Betriebsparameter entdeckt und vermieden werden. Auswirkungen geometrischer Veränderungen können schnell berechnet und eine Vielzahl von Möglichkeiten z.B. der Betriebsführung in relativ kurzer Zeit überprüft werden.

Viele Untersuchungen zur Maßstabsübertragung von Explosionsvorgängen lassen sich nur auf diesem Wege durchführen. Der in Laborversuchen bestimmte Satz von Eingabeparametern erweist sich auch zur Berechnung von Anlagen im technischen Maßstab als geeignet. Die im Labormaßstab untersuchten Abhängigkeiten der Flammengeschwindigkeit von der Staubkonzentration und vom Strömungszustand lassen sich mit guter Genauigkeit in den technischen Maßstab übertragen.

Die Vorgehensweise, experimentelle Untersuchungen mit numerischen Berechnungen zur Vorhersage von Explosionskenngrößen und der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen für Anlagen im technischen Maßstab zu kombinieren, hat sich bewährt. Die Verknüpfung von wenigen, gezielt durchgeführten experimentellen Untersuchungen und numerischer Berechnung ist kostensparend und auch sicherheitstechnisch erfolgversprechend. Dies stellt einen deutlichen Fortschritt beim Explosionsschutz durchströmter Anlagen dar.

- [1] VDI-Richtlinie 2263:  
„Staubbrände und -explosionen“, Beuth-Verlag, Berlin, 1992
- [2] VDI-Richtlinie 3673:  
„Druckentlastung von Staubexplosionen“, Beuth-Verlag, Berlin, 1995
- [3] Karlovitz, B.; Denniston, D.W.; Wells, F.E.; J. Chem. Phys. 19, 541, 1951
- [4] Gerhold, E.; Hattwig, M.; Hieronymus, H.;  
Schlußbericht zum Forschungsvorhaben „Verhütung von Staubexplosionen“,  
Bd. 1 - 3, unveröffentlicht