

peraturen und irreparablen Schäden des Gebäudes zu rechnen.

Die allgemeine Schlußfolgerung für die Praxis kann daher nur lauten: Wenn starre GFK-Dachelemente eingebaut werden, muß unbedingt eine Kombination mit steuerbaren oder automatisch sich öffnenden Wärme- und Rauchabzugselementen oder mechanischen Rauchentlüftungsanlagen vorgesehen werden.

Literatur

1. Saechtling, Hj.
Bauen mit Kunststoffen
Carl Hanser Verlag, München 1973
2. N. N.
HT-Schaumstoff, Eigenschaften und Anwendung als Dämmstoff für feuerwiderstandsfähige Bauteile
Druckschrift der BASF

Anmerkung

Die sehr interessanten Ergebnisse der in dem Bericht von Dalhoff, Spitzlei und Johannson geschilderten Brandversuche bedürfen einer kurzen, aber wichtigen Anmerkung.

Die Redaktion dieser Zeitschrift hat diesen Bericht gern zur Veröffentlichung angenommen, weil solche Versuche im Maßstab 1:1 am deutlichsten die Erkenntnisse über das Brandverhalten von Bauteilen erweitern. Die Ergebnisse zeigen, daß fest eingebaute Kunststoffoberlichter aus Acrylglas im Brandfall nach einer gewissen Zeitspanne einen Weg für das Abfließen von Brandwärme und Rauch freigeben und dann als Rauch- und Wärmeabzüge funktionieren. Das sehr negative Verhalten von glasfaserverstärktem Polyester bestärkt die leider nur z. T. bestehende Ablehnung gegen dieses Material zur Verwendung als Sollbrucheindeckung unter dem Gesichtspunkt: „Die preiswerte Rauch- und Wärmeabzugsanlage“.

3. Becker, W.
Brandverhalten
aus: G. Schreyer
Konstruieren mit Kunststoffen,
Teil 2
Carl Hanser Verlag, München 1972
4. Fischer, K.
Brandverhalten — Richtlinien für die Verwendung brennbarer Baustoffe im Hochbau
VDI-Bericht Nr. 213 (1973), S. 25—32
5. N. N.
Richtlinien für Planung und Einbau von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) für den Brandfall in gewerblichen und industriellen Hallenbauten
Verband der Sachversicherer (VdS) e. V.
Köln, 1973

6. Gefährlicher Brandrauch
esser's kleine Handbuch-Reihe,
1972
7. Thomas, P. H., Hinkley, P. L.
Investigations into the flow of hot gases in roof venting
Five Research Technical Paper
Nr. 7, London: Her Majesty's Stationery Office, 1963
8. Kempe, K.
Rauch- und Wärmeabzugsanlagen
schadenprisma Nr. 3/72

Die Versuche wurden gemeinsam von der Klaus Esser KG, Düsseldorf, und der Firma Röhm GmbH, Chemische Fabrik, Darmstadt, durchgeführt. Für die Versuchsdurchführung möchten wir uns ganz besonders bei den Herren Jacobsen und Backhaus bedanken.

Festzuhalten ist jedoch, daß in allen drei Versuchen erst nach ca. 4 Minuten Reaktionen an den Lichtkuppeln festgestellt wurden und zu diesem Zeitpunkt die Temperaturen unterhalb der Kuppel bereits bei ca. 250 °C, ca. 300 °C und ca. 550 °C lagen. Erst nach ca. 6,5 Minuten, 10,5 Minuten und 12 Minuten bildeten sich Abzugsöffnungen. Es bestanden jedoch zu diesem Zeitpunkt Temperaturen von ca. 700 °C über eine Dauer von ca. 1 Minute, ca. 700—800 °C über eine Dauer von ca. 4 Minuten und ca. 800—900 °C über eine Dauer von ca. 5 Minuten.

Aufgabe einer Rauch- und Wärmeabzugsanlage ist es jedoch, die gefährlichen Temperaturen von über 500 °C (flash over) zu verhindern, auch im Hinblick darauf, daß z. B. Stahl bereits bei 500—550 °C seine ursprüngliche Festigkeit um 30—40 % verliert.

Die Brandversuche wurden mit der relativ geringen Brandbelastung von

120 Mcal/qm durchgeführt. Diese Brandbelastung entspricht Gebäuden der Brandgefahrenklasse B nach DIN 18230 E. Bei höheren Brandbelastungen, wie sie im Industriebau in der Regel vorhanden sind, wird der Temperatur/Zeitverlauf schneller sein, aber auch die kritische Temperatur von 500 °C schneller erreicht werden. Ungelöst bleibt auch das Problem einer möglichst schnellen Rauchableitung bei einer z. B. sehr stark rauchentwickelnden Brandbelastung (Schwelbrand).

Es ist daher sehr richtig, daß die Feuerversicherer als Rauch- und Wärmeabzugsanlagen nur solche als wirksam beurteilen, die automatisch bei einer Auslösetemperatur von 70 bis 90 °C oder bei Rauch sofort öffnen und/oder von Hand offenbar sind. Nur solche Anlagen geben bereits im ersten Stadium eines Brandes den Weg für die Ableitung von Rauch- und Brandgasen frei. Dipl.-Ing. Kempe.

Grenzen der Anwendung der Explosionsdruckentlastung

H. J. Heinrich

Problemstellung

Unter dem Begriff „Explosionsdruckentlastung“ werden alle Maßnahmen zusammengefaßt, die dazu dienen, beim Entstehen oder nach einer ge-

wissen Ausweitung einer Explosion die ursprünglich abgeschlossene Apparatur, in der sich der Explosionsablauf vollzieht, entweder sofort oder erst nach Erreichen eines bestimmten Druckes kurzfristig oder bleibend in ungefährlicher Richtung zu öffnen. Die Entlastungseinrichtung soll bewirken, daß die Apparatur nicht über ihre Druck- oder Druckstoßfestigkeit hinaus beansprucht wird. Durch Druckent-

lastung wird also die Explosion selbst nicht vermieden, ihre Auswirkung jedoch auf ein unbedenkliches Maß beschränkt.

Im Juni 1975 ist die VDI-Richtlinie 3673 „Druckentlastung von Staubexplosionen“ als Gründruck erschienen. Die Richtlinie wird einem sehr großen Kreis von Betreibern von Anlagen, in denen ständig oder zuweilen explosible Staub/Luft-Gemische

Dr. rer. nat. H. J. Heinrich, Direktor und Professor, Bundesanstalt für Materialprüfung, 1 Berlin 45

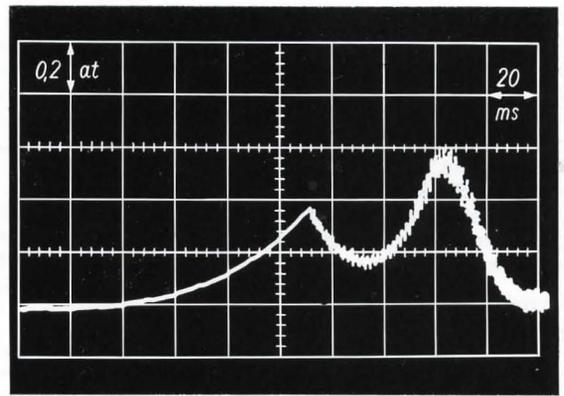
vorhanden sind, die Möglichkeit eröffnen, ihre Anlagen und die in ihnen befindlichen Menschen durch Anwendung des Schutzprinzips „Druckentlastung“ vor schädlichen Auswirkungen von Staubexplosionen wirksam zu schützen. Kernstück der Richtlinie sind Nomogramme, mit deren Hilfe unter Berücksichtigung von Volumen und Druckfestigkeit des Behälters sowie der Explosionseigenschaften des Speichergutes richtig bemessene Druckentlastungsöffnungen bestimmt werden können. An die Stelle mehr oder minder unbestimmter oder pauschaler Formulierungen früherer Vorschriften treten nun konkrete Angaben.

Die Nomogramme zur Bestimmung von Druckentlastungsöffnungen fußen auf Explosionsversuchen unter festgelegten Bedingungen. Wirksamer Schutz vor den Auswirkungen von Explosionen kann bei Anwendung der Nomogramme daher nur in den Fällen erwartet werden, in denen in der Praxis die Explosion ähnlich abläuft wie im Experiment. Durch passende Wahl der Versuchsbedingungen bei den Experimenten kann diese Forderung für kubische Behälter als erfüllt gelten. Darüber hinaus können die Nomogramme auch in anderen Fällen hilfreich herangezogen werden, wenn ausreichendes Wissen über ihr Zustandekommen und die Grenzen ihrer Anwendbarkeit besteht. Die folgenden Ausführungen werden sich zunächst mit Problemen der Druckentlastung verschiedener Behältertypen in Zusammenhang mit der Flammenausbreitung in diesen Behältern befassen. Weiterhin wird erörtert, was Explosionen mit Druckentlastung in der Umgebung der Behälter bewirken.

Ablauf der Druckentlastung bei kubischen Behältern.

Die Abläufe von Gas- und Staubexplosionen ähneln sich sehr stark, vorwiegend deshalb, weil die meisten Staubexplosionen eigentlich Schwelgas-Explosionen sind. Bei Annäherung organischer Staubpartikel an die Reaktionszone der Flamme wird die Substanz pyrolytisch zersetzt. Die hierzu erforderliche Energie wird vorwiegend durch Strahlung übertragen. In der Reaktionszone selbst findet dann eine homogene Gasreaktion der Schwelgase mit dem Sauerstoff der Luft statt. Nur bei einigen wenigen Stoffen, meistens Metallstäuben, ist die geschwindigkeitsbestimmende Verbrennungsreaktion eine Heterogenreaktion. Die weitgehende Übereinstimmung des Reaktionsablaufs in Gasflammen und Staubflammen macht es statthaft, die an den experimentell leichter zugänglichen und deshalb gründlicher untersuchten Gasen gewonnenen Erkenntnisse sinngemäß auf Stäube zu übertragen.

Bild 1.
Druck/Zeit-Verlauf bei Druckentlastung



Im folgenden soll daher bei der phänomenologischen Behandlung zunächst kein Unterschied gemacht werden.

Auf die notwendigen Einschränkungen solcher Festsetzungen kommen wir noch zurück.

In kubischen Gefäßen breiten sich Gasexplosionen zumeist kugelförmig aus. Da sich die chemische Umsetzung einer Verbrennungsreaktion in der Flammenfront vollzieht, ist die Bruttoumsatzgeschwindigkeit – und damit die Geschwindigkeit des Druckanstiegs – der Ausdehnung der Brennfläche direkt proportional. Der durch das Fortschreiten der chemischen Reaktion bedingten Fortpflanzung der Brennfläche in das unverbrannte Gemisch überlagert sich in geschlossenen Behältern eine auf dem Expansionsbestreben der heißen Schwaden beruhende, kugelsymmetrische Strömung. Diese verschiebt die Brennfläche mit sehr viel größerer Geschwindigkeit als allein durch die chemische Reaktion bedingt in das Unverbrannte. Bei ruhendem Gemisch und Zündung im geometrischen Mittelpunkt des Behälters erhält man eine sphärische Flamme, deren Radius r linear mit der Zeit zunimmt.

Da die Flammenoberfläche mit r^2 wächst, nimmt die Geschwindigkeit des Druckanstiegs stetig zu. Der Höchstwert – auch als maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit bezeichnet – wird bei kugelförmigem Explosionsgefäß dann erreicht, wenn die Flammenfront die Behälterwand erreicht hat und die Verbrennung abgeschlossen ist.

Bei der Druckentlastung solcher Explosionen erhält man nur bei sehr großen Öffnungen eine plötzliche und bleibende Druckerniedrigung nach Ansprechen der Öffnung. In vielen Fällen findet man dagegen einen Druckverlauf, wie ihn Bild 1 aufweist. Nach einem verhältnismäßig langsamen Druckanstieg platzt (im Bild bei einem Überdruck von etwas weniger als 0,4 bar) die Membran. Der Druck fällt schnell auf einen Minimalwert und

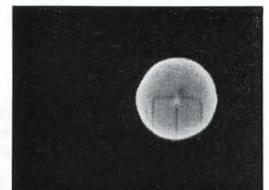
steigt dann sehr viel rascher an als vor Ansprechen der Druckentlastungsvorrichtung. Der Ansprechdruck wird dabei erheblich übertroffen. Die Schwingungen im zweiten Teil der Druck/Zeit-Kurve deuten schon an, daß hier Strömungsvorgänge, induziert durch die Druckentlastung selbst, den Verbrennungsablauf empfindlich stören und beschleunigen.

Wir haben diesen Vorgang mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt und dabei gefunden, daß sich nach Eintreten der Druckentlastung die bis dahin glatte, sphärische Flammenfront zunehmend auffaltet (Bilder 2 a bis 2 c). Bekanntlich hat die spezifische Oberfläche F/V bei einer Kugel unter allen geometrischen Körpern ein Minimum; so trägt jede Verzerrung der zunächst kugelförmigen Flammenfront zu einer Oberflächenvergrößerung und damit zu einer beschleunigten Verbrennung bzw. zu einer Erhöhung der Druckanstiegsgeschwindigkeit bei.

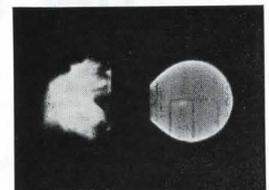
Solche Verzerrungen entstehen beispielsweise bei der Beugung der Flamme um in den Brennraum ein-

Bild 2.
Flammenausbreitung bei Druckentlastung

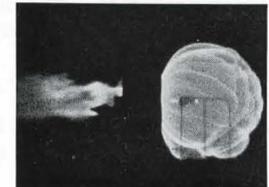
a) 28 ms nach Zündung



b) 30 ms nach Zündung



c) 58 ms nach Zündung



gebrachte Hindernisse. Tritt insbesondere die Flamme bei ihrem Fortschreiten in Raumabschnitte mit verringertem Querschnitt ein – wie z. B. Rohrleitungen –, so kann sich dort die Strömungsgeschwindigkeit der expandierenden Schwaden so stark erhöhen, daß die kritische Reynoldszahl überschritten wird und Turbulenz einsetzt. Dabei wird die zunächst geschlossene Flammenfront unter enormer Vergrößerung der Brennfläche aufgerissen und als Folge die Flammengeschwindigkeit beträchtlich heraufgesetzt. Ähnliche Aufstellungen des zeitlichen Druckanstiegs treten auch bei der Einwirkung großflächiger oder schnell bewegter Zündquellen auf ein ruhendes explosives Gemisch auf, wenn nämlich die Explosion von vielen Punkten innerhalb des Gemisches eingeleitet wird.

Ablauf der Druckentlastung bei Querschnittsverengungen der Anlage

Für kubische Behälter – als solche sind nach der VDI-Richtlinie 3673 alle Behälter mit einem Verhältnis von Länge zu Durchmesser mit höchstens 5 : 1 zu betrachten – ist die bei Druck-

Bild 4. Flammenausbreitung bei Druckentlastung der Doppelkammer (Blende mit Randspalten)

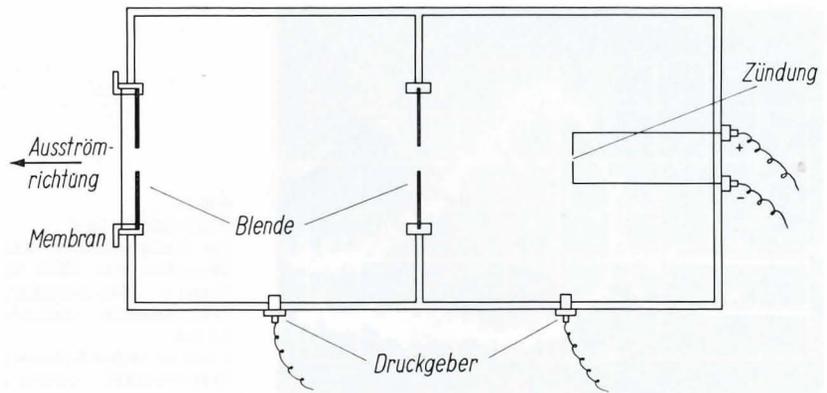
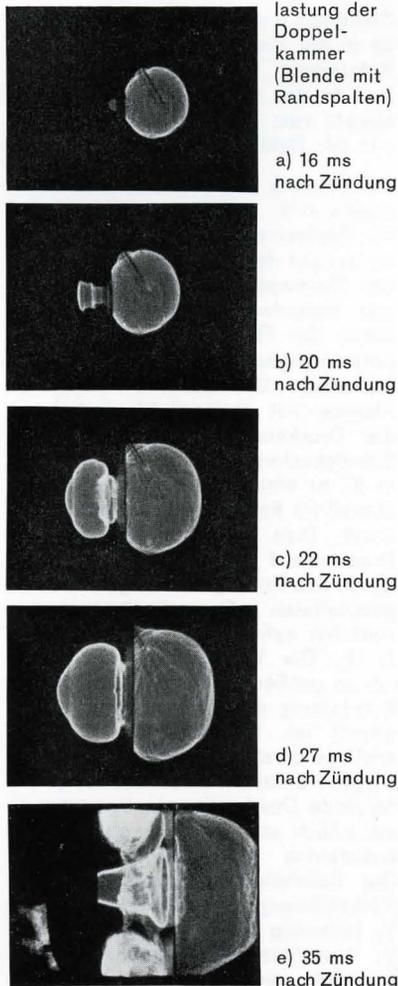


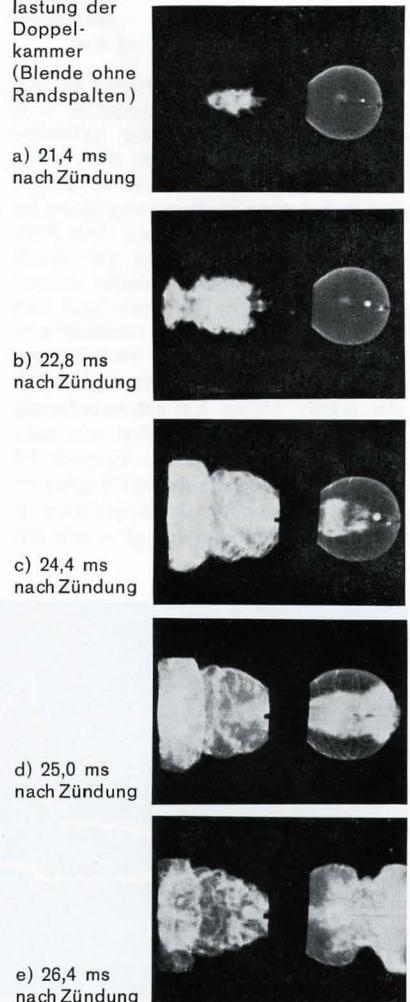
Bild 3. Doppelkammer mit Blende

entlastung unvermeidliche induzierte Turbulenz durch die Versuche miterfaßt und in den Nomogrammen bzw. der Berechnungsformel mit berücksichtigt. Bei allen Behältern, die von diesen Abmessungen stark abweichen oder die durch innere Einbauten eine Turbulenzentstehung begünstigen, sind allerdings zusätzliche oder weitergehende Maßnahmen zu ergreifen. Die folgenden Bilder mögen dies erläutern. Sie zeigen Ausschnitte aus Filmen von solchen Vorgängen, die mit der Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen wurden. Bild 3 zeigt die Versuchsanordnung. In ein kastenförmiges Versuchsgefäß, dessen eine Seite aus Plexiglas bestand, wurde eine Trennwand eingezogen, die mit einer zentralen Öffnung versehen war. Die Trennwand lag dabei nicht ganz dicht an den Gefäßwänden an; ein Druckausgleich durch die vorhandenen Randspalten war also ermöglicht. Die Bilder 4 a bis 4 e zeigen die Flammenausbreitung in der Kammer. Zunächst pflanzt sich die Flamme kugelförmig fort. Beim Durchgang durch die Öffnung stülpt sich die Flamme um, bleibt aber auch beim Weiterwachsen laminar. Erst beim Einsetzen der Druckentlastung wird die Flammenfront aufgerissen unter beträchtlicher Heraufsetzung der Druckanstiegsgeschwindigkeit. Der reduzierte Maximaldruck betrug bei einem solchen Versuch etwa 3,5 bar gegenüber nur 1,2 bar bei Abwesenheit der Trennwand.

Sicherheitstechnisch noch ungünstigere Verhältnisse ergeben sich, wenn man die Trennwand abdichtet, so daß der Druckausgleich nur durch die Öffnung in der Trennwand erfolgen kann. Dann nämlich muß die Druckausgleichsströmung den gleichen Weg nehmen wie die Flamme. Die Bilder 5 a bis 5 e zeigen den Flammenverlauf. Zunächst breitet sich die Flamme – wie im vorigen Versuch – kugelförmig und laminar aus. Schon beim Durchgang durch die verhältnismäßig kleine Öffnung in der gemeinsamen

Mittelwand ($F = 10 \text{ cm}^2$) wird das Gas beschleunigt und tritt turbulent mit hoher Geschwindigkeit in die linke Kammer ein (Bild 5 a). An der noch geschlossenen Entlastungsfläche wird der Flammenstrahl aufgestaut und nach allen Seiten abgelenkt (Bild 5 b). Die hierdurch bedingte Vergrößerung der Brennfläche läßt die Brutto-Reaktionsgeschwindigkeit in der linken

Bild 5. Flammenausbreitung bei Druckentlastung der Doppelkammer (Blende ohne Randspalten)



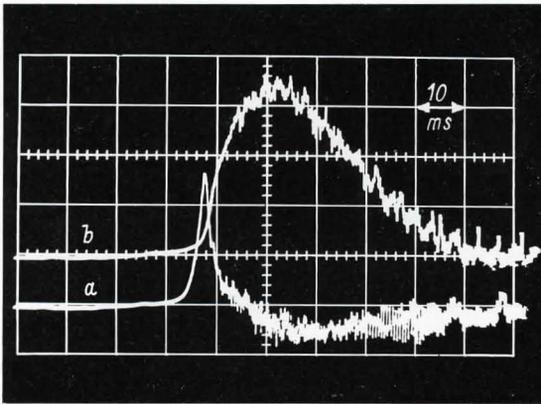


Bild 6.
Druck/Zeit-Verlauf
bei Druckentlastung der
Doppelkammer (Bild 5)
Kurve a: linke Kammer;
Rasterabstand vertikal:
0,8 bar
Kurve b: rechte Kammer;
Rasterabstand vertikal:
0,4 bar

Kammer stark ansteigen. Als Folge des sich dabei aufbauenden Überdrucks werden die brennenden Schwaden mit sehr großer Geschwindigkeit in die rechte Kammer zurückgetrieben (Bild 5 c). Bild 5 d wurde unmittelbar nach dem Platzen der Entlastungsmembrane aufgenommen. In der rechten Kammer kehrt der Flammenstrahl nach Erreichen der rechten Kammerwand und unter dem Einfluß des wieder entgegengesetzten Druckgefälles seine Richtung erneut um. Schließlich findet auch in der rechten Kammer eine turbulente Verbrennung auf breiter Front statt (Bild 5 e).

Im entsprechenden Druck-Zeit-Diagramm (Bild 6) steigt zunächst – in Übereinstimmung mit dem gefilmten Verlauf – der Druck in der linken Kammer wegen der dort herrschenden turbulenten Verbrennung schneller an als in der rechten. Nach dem Platzen der Membran nimmt der Druck in der linken Kammer wieder schnell ab. In der rechten Kammer baut sich dagegen wegen der dort verstärkt einsetzenden turbulenten Verbrennung (vgl. Bild 5 d) und begünstigt durch die relativ kleine Entlastungsöffnung in der Mittelwand zunächst ein sehr hoher Druck (bei diesem Versuch 3,8 bar) auf. Das im Laufe der Explosion erreichte sekundäre Druckmaximum in der rechten Kammer hängt – wie die

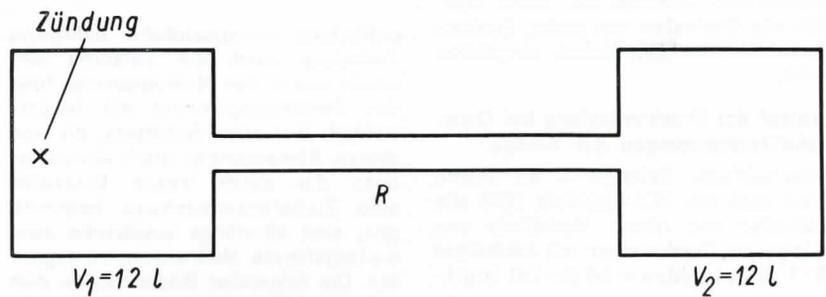


Bild 7. Versuchsanordnung

Versuche zeigen – empfindlich vom Querschnitt der Blendenöffnung in der Mittelwand ab; es verschwindet vollständig, wenn Mittelöffnung und Entlastungsöffnung gleich groß gemacht werden.

Die Versuche lassen deutlich erkennen, wie sehr Querschnittsverengungen die Flammenausbreitung beschleunigen können. Dieses Verhalten gewinnt große Bedeutung, wenn Behälter durch Rohrleitungen miteinander verbunden werden. Ein sehr anschaulicher Versuch möge das belegen.

Bild 7 zeigt die Versuchsanordnung. Zwei Behälter mit je 12 l Inhalt – gefüllt mit 10 % CH₄ in Luft – sind durch eine 50 cm lange Rohrleitung verbunden. Gezündet wird außermittig im linken Behälter. Bild 8 zeigt den

Druck/Zeit-Verlauf in beiden Behältern. Die Auswertung ergibt für den Maximaldruck im rechten Behälter (V₂) einen um 30 % höheren Wert als sich nach thermodynamischer Rechnung und Experimenten unter idealen Bedingungen im Kugelgefäß ergibt. Die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit beträgt sogar das Fünffache des Wertes im Kugelgefäß. Wie ist dieses Ergebnis zu deuten?

Die starke Erhöhung der maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeit in V₂ können wir zwanglos anhand der gezeigten Filmaufnahmen von den Doppelkammerversuchen erklären. An die

Stelle der turbulenz erzeugenden Blende in der Zwischenwand tritt hier die Rohrleitung. Das Ausmaß der Turbulenz in der Rohrleitung hängt dabei sowohl vom Rohrquerschnitt als auch von der Rohrlänge ab.

Zur Deutung des überhöhten Maximaldrucks in V₂ sei zunächst noch einmal der Explosionsablauf in V₁ betrachtet. Im Verlauf der Explosion wird das vor der Flammenfront befindliche Frischgas komprimiert, während sich die hinter der Flamme befindlichen Verbrennungsgase ausdehnen. Da sich in kubischen Behältern die laminare Flamme mit einigen m/s fortpflanzt, die Druckausbreitung hingegen mit Schallgeschwindigkeit erfolgt, herrscht in V₁ zu einem gegebenen Zeitpunkt überall im Raum praktisch der gleiche Druck. Dies gilt nicht mehr für den Druckverlauf in V₂. Dort steigt der Druck des Frischgases wegen der vorgeschalteten Querschnittsverengung zunächst sehr viel langsamer an als in V₁. Die Verzögerung wird dabei um so größer ausfallen, je länger die Rohrleitung und je kleiner ihr Querschnitt ist. Die Phase des Druckanstiegs durch bloße Kompression endet mit Eintritt der Flamme in V₂. Der folgende Druckaufbau in V₂ wird ausschließlich von der hier ablaufenden turbulenten Verbrennung gespeist. Die Rohrleitung drosselt dabei die Rückströmung und läßt den Druck in V₂ zeitweilig beträchtlich über den in V₁ ansteigen. Dies tritt besonders dann ein, wenn der Rohrquerschnitt

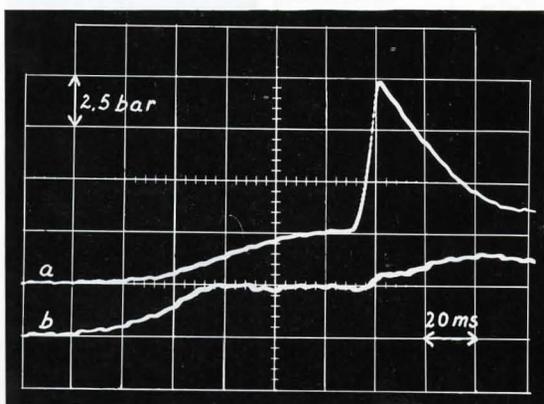


Bild 8.
Druck/Zeit-Verlauf bei
Explosion in Versuchsan-
ordnung gem. Bild 7
Kurve a: Verlauf in V₂
Kurve b: Verlauf in V₁

klein, die Verbrennung in V_2 schnell und der Grad der Vorkompression in V_2 vor Eintritt der Zündflamme hoch war. Eine hohe Vorkompression ergibt sich dann, wenn der Flammenübertritt erst spät erfolgt, z. B. wenn der Ort der Primärzündung in V_1 von der Rohrmündung weg in Richtung auf die gegenüberliegende Behälterwand verlegt und damit die Wegstrecke für die Flamme verlängert wird.

Wir haben diese Versuche etwas ausführlicher geschildert, um einen Einblick in die Komplexität derartiger Vorgänge zu geben und gleichzeitig deutlich zu machen, daß eine unkritische Anwendung der anhand von Versuchen in kubischen Behältern abgeleiteten Nomogramme auf solche zusammengesetzten Systeme keine Sicherheit mehr bietet.

Ein weiteres Beispiel möge dies vertiefen. Abbildung 9 zeigt schematisch die Ergebnisse von Druckentlastungsversuchen bei Explosionen in mit Rohrleitung verbundenen Behältern. Die in den einzelnen Behältern aufgetretenen Maximaldrücke sind dort jeweils in absoluten Einheiten vermerkt.

In einem einzeln stehenden Behälter von 12 l Inhalt (Bild 9 a), gefüllt mit einem Gemisch von 10 % Methan in Luft, tritt bei einer Entlastungsfläche von etwa 10 cm^2 ein reduzierter Maximaldruck von 1,6 bar auf, wenn in Gefäßmitte gezündet wird. Bei Zündung in Wandnähe liegt der reduzierte Druck niedriger.

Verbindet man zwei derartig mit Entlastungsöffnungen versehene Behälter durch eine Rohrleitung (Bild 9 b) und zündet in der Mitte eines der beiden Behälter, so liegen in beiden Behältern die reduzierten Maximaldrücke etwa doppelt so hoch wie im einzeln stehenden Behälter.

Verlegt man die Zündung an die der Rohrmündung abgewandte Seite (Bild 9 c), so sinkt zwar der Maximaldruck im Zündgefäß, im anderen Gefäß steigt der Druck aber auf über das 3fache des Wertes in einem allein stehenden Gefäß.

Verdoppelt man die Entlastungsfläche im Zündgefäß bei geschlossenem anderen Gefäß (Bild 9 d), so steigt dort der Druck auf das $4\frac{1}{2}$ fache – bezieht man es nur auf den Überdruck über Atmosphärendruck sogar auf das 10fache – des Wertes im allein stehenden Behälter.

Der günstigste Fall ergibt sich – wie die Abbildung 9 e ausweist – wenn die Zündung bei einseitiger Entlastung im geschlossenen Gefäß stattfindet. Indessen kann man den Ort der Zündung nie vorhersagen. So muß man bei einseitig entlasteten Behälterkombinationen immer Verhältnisse wie in Bild 9 d unterstellen.

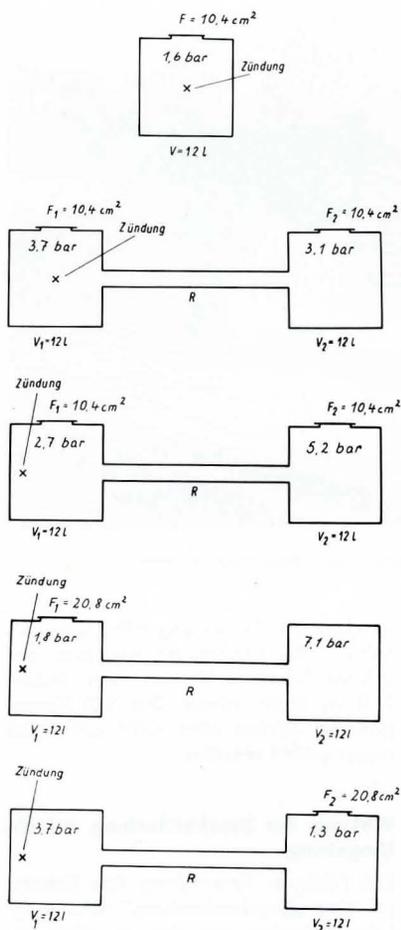


Bild 9. Maximaldrücke bei Druckentlastung von Einzelbehältern und durch Rohrleitung verbundenen Behältern unter Variation der Lage der Entlastungsöffnungen.

Abhilfe schafft hier nur eine Vergrößerung der Öffnungen. Entlastet man jeden Behälter getrennt (Bild 9 b und 9 c) und verdoppelt dabei die Entlastungsöffnungen auf jeweils $20,8 \text{ cm}^2$, erhält man Drücke, die in der Größenordnung des Wertes für den allein stehenden Behälter liegen.

Die gezeigten Beispiele haben nur Modellcharakter. Quantitative Aussagen über die Druckentlastung von Behälterkombinationen lassen sich aus ihnen nicht ableiten. Allerdings zeigen sie die Tendenzen auf. Wir können den Beispielen entnehmen, daß die niedrigsten Drücke dann auftreten, wenn jeder Behälter gesondert entlastet wird. Seine Entlastungsöffnung soll dabei größer sein als sie nötig ist, wenn der Behälter allein steht. Ferner sollte der Ansprechdruck so niedrig wie möglich sein; die verbindenden Rohrleitungen müssen kurz sein und einen möglichst großen Querschnitt aufweisen.

Sind lange Rohrleitungen unvermeidlich, kann unsachgemäße Druckentlastung den Explosionsablauf sogar ver-

schlimmern. Bringt man nämlich die Entlastungsöffnungen nur an den Rohrenden an – etwa kurz vor dem Eintritt in den Behälter –, bewirkt die mit Ansprechen der Entlastungsöffnung einsetzende axiale Gasströmung eine beträchtliche Beschleunigung der Flamme, u. U. sogar das Anlaufen zur Detonation. Dies geschieht um so eher, je niedriger der Ansprechdruck der Entlastungsöffnung ist. Dieser sollte daher bei Rohrleitungen unter Berücksichtigung der Festigkeit von Rohrleitung und Behälter so hoch wie möglich gewählt werden. Eine bessere Lösung ist es indessen, die Rohrleitung in Abständen von 1 bis 2 m mit Entlastungsöffnungen zu versehen, um das Entstehen schneller Flammen schon im Ansatz zu verhindern. Als weiterer und in den meisten Fällen bester Schutz sei bei langen Rohrleitungen die Explosionsunterdrückung mit Hilfe von Löschmittelsperren genannt.

Aus baulichen Gründen ist es nicht immer möglich, explosionsgefährdete Behälter direkt ins Freie zu entlasten. Da Entlastung in den Arbeitsraum verboten ist, wird die Entlastung oft über zwischengeschaltete Rohrleitungen vorgenommen. Um nach Möglichkeit zu verhindern, daß sich in solchen Rohrleitungen schnelle Flammen oder Detonationen ausbilden, muß sich die Entlastungsvorrichtung (Membran, Klappe o. ä.) unmittelbar an der Apparatur befinden, also am Anfang der Rohrleitung. Damit wird eine betriebsmäßige Ansammlung brennbarer Gase oder Stäube in der Entlastungsleitung vermieden. Allerdings lassen sich Rohrexlosionen mit einer solchen Maßnahme auch nicht mit Sicherheit ausschließen, denn es ist immer damit zu rechnen, daß bei der Druckentlastung zunächst unverbranntes Produkt in die Rohrleitung gefördert wird, das dann dort von der nachfolgenden Flamme gezündet wird. Schon aus diesem Grunde sollten Entlastungsschlote die Ausnahme bilden. Sie wirken sich aber auch noch aus einem anderen Grunde ungünstig aus. Bekanntlich verringert sich der Durchsatz strömender Gase durch Rohre bei vorgegebenem Druckgefälle, wenn der Rohrdurchmesser ab- und die Rohrlänge zunimmt. Druckentlastung über Rohrleitungen muß daher gegenüber direkter Druckentlastung zwangsläufig zu einer Erhöhung des reduzierten Explosionsdrucks in der zu schützenden Apparatur führen. Zu einem gewissen Teil kann man diesen Effekt neutralisieren, indem man dem Rohr einen größeren Querschnitt gibt als der Entlastungsöffnung. Die VDI-Richtlinie gibt ergänzende nützliche Richtwerte. Als Faustformel für die Anwendung von Entlastungsschlotten sollte man sich jedoch merken: So selten wie

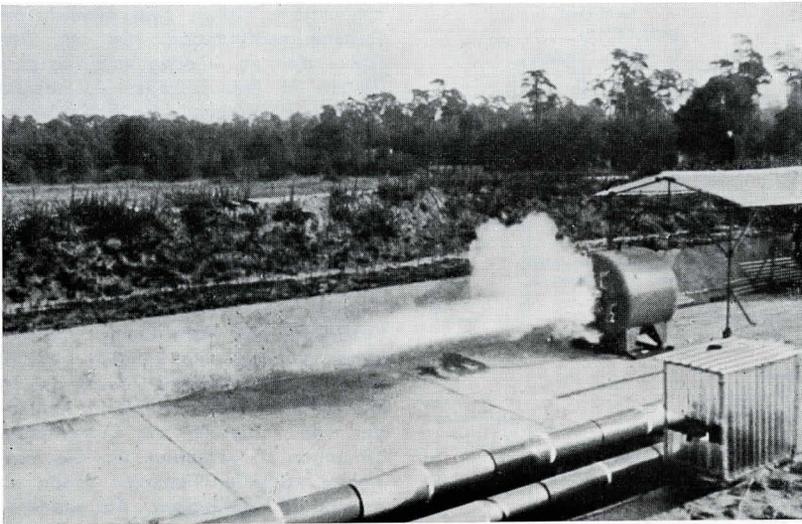


Bild 10. Flammenausbreitung bei Druckentlastung von Staubexplosionen.

möglich, so kurz wie möglich, so umfangreich wie möglich.

Als wir einleitend die Gleichbehandlung des Ablaufs von Gas- und Staubexplosionen rechtfertigten, merkten wir eine Einschränkung an, die an dieser Stelle aufgegriffen werden soll. Bekanntlich muß zur Ausführung von Staubexplosionsversuchen der Staub vor Auslösung der Zündung aufgewirbelt und möglichst homogen im Reaktionsraum verteilt werden. Bei den Versuchen zur Bemessung von Druckentlastungsöffnungen geschah dies in den beteiligten Versuchsanstalten durch Ausblasen des Staubes aus Vorratsflaschen, die unter erhöhtem Druck (20–60 bar) standen. Verteilungsdüsen im Versuchsgefäß bewirkten homogene Verteilung. Bei diesem Verfahren befindet sich die mit Schallgeschwindigkeit einströmende Luft – und damit auch der geförderte Staub – zunächst in heftiger Turbulenz, die auch nach Abbau des Druckgefälles – solange wird bis zur Auslösung der Zündung gewartet (400–600 ms) – wenigstens zum Teil erhalten bleibt. Es setzt also zwangsläufig von Beginn an eine turbulente Verbrennung im Staub/Luft-Gemisch ein. Zusätzlich hierzu tritt nach Wirksamwerden der Druckentlastung die oben geschilderte induzierte Turbulenz. Sie wirkt sich hier nur wegen der schon vorhandenen Turbulenz bei weitem nicht so stark aus wie bei Gasen, die sich vor Eintreten der Zündung in Ruhe befinden. In den in der VDI-Richtlinie angegebenen Nomogrammen ist die an turbulent abbrennenden Staub/Luft-Gemischen gemessene maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit als staubspezifischer Eingangsparameter enthalten. Wollte man die Nomogramme auf Gase anwenden, deren entsprechende Kenngröße normalerweise in ruhendem Zustand bestimmt wird,

würde man Entlastungsöffnungen erhalten, die gegenüber den praktisch erforderlichen u.U. um den Faktor 2–3 zu klein wären. Die VDI-Nomogramme dürfen also nicht auf Gase angewendet werden.

Wirkung der Druckentlastung auf die Umgebung

Bei richtiger Anwendung des Schutzprinzips „Druckentlastung“ sind mögliche Schäden von der zu schützenden Anlage abgewendet. Man darf allerdings nicht übersehen, daß damit die Explosion selbst nicht beseitigt, sondern nur ihre zerstörende Wirkung in eine für die Anlage unschädliche Richtung abgeleitet wird. Wir müssen uns daher auch die Frage vorlegen,

mit welchen Wirkungen auf die Umgebung zu rechnen ist. Wir haben dabei zu unterscheiden zwischen den Gefahren durch die Druckwelle und den mit dem Materialauswurf verbundenen Gefahren.

Beim Ansprechen der Druckentlastungsöffnung treten die Gase, wenn der Ansprechdruck größer als der Lavaldruck ist, mit Schallgeschwindigkeit aus; für Luft und Atmosphärendruck vor der Öffnung liegt dieser Druck bei etwa 0,9 bar Überdruck. Doch schon bei einem reduzierten Explosionsdruck von nur 1,2 bar – also einem Überdruck von 0,2 bar – werden Ausströmungsgeschwindigkeiten von 180 m/s erreicht. Dabei treten erhebliche Rückstoßkräfte auf, die u.U. zum Umstürzen des Behälters bzw. zur Zerstörung der Anlage führen können. Um dies zu vermeiden und auch um eine Gefährdung von Personen zu verhindern, sollten Druckentlastungseinrichtungen möglichst nach oben gerichtet auf der Oberseite des Behälters angebracht werden. Bei langgestreckten, stehenden Behältern (Silos) mit einem Länge/Durchmesser-Verhältnis größer als 5 ist die gesamte Dachfläche als Entlastungsöffnung vorzusehen. Diese Forderung führt unter Berücksichtigung der Explosionskennzahl des Staubes und der Behälterfestigkeit sowie der Bedingung, daß bei Anwendung der VDI-Richtlinie das Behältervolumen nicht mehr als 1000 m³ betragen soll, zu bestimmten Abhängigkeiten zwischen dem Durchmesser des Behälters und seiner maximalen Bauhöhe. Hierauf ist bereits bei der Planung zu achten.

Neben der Gefährdung durch die Druckwelle müssen auch die mit dem



Bild 11. Flammenausbreitung bei Druckentlastung von Staubexplosion und Nachverbrennung von ausgeworfenem Staub (nach Versuchen von M. Hattwig).

Materialauswurf verbundenen Gefahren beachtet werden. So dürfen toxische oder die Umgebung erheblich schädigende Stoffe nicht druckentlastet werden. In solchen Fällen muß das Schutzziel auf anderem Wege, z. B. durch Inertisierung, druckstoßfeste Bauweise oder Explosionsunterdrückung erreicht werden. Aber auch bei Auswurf nicht toxischer Stäube kann eine Gefährdung beispielsweise dadurch entstehen, daß große Mengen brennenden Staubes ausgestoßen werden. Bild 10 zeigt das Flammenbild vor der Druckentlastungsöffnung

im Falle einer Staubexplosion, bei der 1,5 kg Polyacrylnitrilstaub im aufgewirbelten Zustand in einem Gefäß von 5 m³-Inhalt gezündet worden waren. Zum Vergleich hierzu sei mit Bild 11 ein Versuch vorgestellt, bei dem zusätzlich 10 kg Polyacrylnitrilstaub in das Innere des Gefäßes unmittelbar vor die Druckentlastungsöffnung geschüttet worden waren. Die Flammenausdehnung betrug bei diesem Versuch etwa 20 m; sie ist um so größer, je niedriger der statische Ansprechdruck und je größer das Gasvolumen im Behälter ist.

Flammenlängen bis zu 50 m erscheinen in der Praxis nicht unrealistisch. Schließlich sei erinnert, daß auch beim Auswurf nicht brennenden Staubes – z. B. bei ungewolltem Ansprechen nach betriebsmäßig auftretenden Druckstößen – Gefahren für die Umgebung vorhanden sind, wenn sich im näheren Umkreis der Entlastungsöffnung Zündquellen befinden. Bei ausreichend hoher Staubkonzentration kann nämlich auch im Freien eine allerdings weitgehend drucklos ablaufende Abflammung der Staubwolke stattfinden.

Brandschutz für elektrische Tauchheizgeräte (Tauchsieder)*)

Alle Jahre ereignen sich Brände durch den „vergessenen“ Tauchsieder. Entgegen den Erfahrungen der Feuerversicherer vertrat das zuständige VDE-Komitee bisher die Auffassung, Tauchsieder gehören zu den Elektrogeräten, die unter Aufsicht zu benutzen sind.

Seit 1964 sind die Feuerversicherer in dem Komitee „Elektrowärmegeräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke“ vertreten. Sie nutzten jede Gelegenheit im Komitee, auf den in der Praxis immer wieder beobachteten sogenannten unsachgemäßen Gebrauch zu verweisen und zusätzliche Sicherheitseinrichtungen, wie Schutztemperaturbegrenzer, für diese Geräte zu fordern. Vereinzelt Hersteller haben Geräte mit einem sogenannten Trockengehschutz ausgerüstet. Bedingt durch die damit verbundene wesentliche Preiserhöhung blieb jedoch der Absatz unbedeutend. Erst im Jahre 1972 gelang es, die Forderung von Schutztemperaturbegrenzern für Tauchheizgeräte zur Wasser- und Milcherwärmung in der Landwirtschaft, insbesondere bei der Verwendung in feuergefährdeten Betriebsstätten, durchzusetzen. Die im Juli 1972 in Kraft gesetzte Bestimmung lautet:

VDE 0720 Teil 2 C/7. 72 in § 22, zm)
Tauchheizgeräte zur Wasser- oder Milcherwärmung bei der Tieraufzucht müssen einen Schutztemperaturbegrenzer haben.

Im Zusammenhang mit dem Maschinenschutzgesetz nahm 1973 das Bayerische Staatsministerium für Arbeit

*) Aus Informationsblätter zur Schadenverhütung Nr. 1/75, Herausgeber Schleswig-Holsteinische Landesbrandkasse

und Sozialordnung hierzu Stellung. Es veranlaßte den Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung in einem Schreiben an die Deutsche Elektrotechnische Kommission die Auffassung zu vertreten, daß die

sicherheitstechnisch relevante Festlegung, Temperaturbegrenzer seien nur unter Aufsicht zu betreiben, nicht akzeptiert werden kann, da sie dem bekannten Verhalten der Benutzer keineswegs entspricht. Wie Schadenfälle in der Vergangenheit gezeigt haben, werden Tauchheizgeräte nicht beaufsichtigt betrieben; das vom Normengeber gewünschte Verhalten hat sich in der Praxis nicht eingestellt.

Um die Gefahren, die beim unbeaufsichtigten Betrieb entstehen können, sicher zu benerrschen, müssen Tauchheizgeräte mit Schutztemperaturbegrenzern ausgerüstet werden. Die jetzt in § 22 zm) enthaltene Forderung für Tauchheizgeräte zur Wasser- oder Milcherwärmung bei der Tieraufzucht sollte auf alle Tauchheizgeräte ausgedehnt werden.

Am 1. November 1974 trat dann die neue VDE-Bestimmung in Kraft. Sie lautet:

VDE 0720

Teil 2 Ca/11.74

§ 19 Unsachgemäßer Gebrauch

a) Aquarien-Tauchheizkörper und Tauchheizgeräte mit Temperaturregler gelten als Geräte, die zum unbeaufsichtigten Betrieb bestimmt sind.

§ 22 Aufbau

Tauchheizgeräte, außer Aquarien-Tauchheizkörpern, müssen eine tem-

peraturbegrenzende Einrichtung haben, die unzulässige Erwärmung im Falle des unsachgemäßen Betriebes verhindert, z. B. einen Schutztemperaturbegrenzer.

Ing. R. Keller, Obmann des UK 511.2.1 – Tauchheizgeräte – erläutert hierzu:

Die vorliegenden Bestimmungen enthalten gegenüber den bisherigen Fassungen als wesentlich Neues eine Erhöhung der Sicherheit für die Umgebung gegen Brandgefahr im Falle der unachtsamen Benutzung. Dieses Schutzziel wird erreicht durch die Prüfung aller Tauchheizgeräte in der „Schwarzen Ecke“ ohne nutzbaren Wärmeabzug, d. h. im trockenen Zustand, wobei die Übertemperatur der Fläche, die das Gerät berührt, 150 Grad nicht überschreiten darf. Eine für die Umgebung ungefährliche Temperaturspitze von 200 Grad auf die Dauer von 3 Minuten wird den Tauchheizkörpern zugestanden, da die Heizkörper dieser Geräte, anders als bei sonstigen Wärmeenergiegeräten, nur auf Kosten des Gebrauchswertes mit Gehäusen, Gittern usw. umgeben werden können.

Die vorliegende Bestimmung bedeutet einen weiteren Schritt in der Harmonisierung der deutschen Bestimmungen mit den international anerkannten CEE-Sonderanforderungen, Teil II C, der Publikation 11, allerdings mit der Abweichung, daß die deutsche Prüfvorschrift auch für Tauchheizgeräte unter 750 Watt Leistungsaufnahme gilt, weil die Brandgefahr für die Umgebung von der Temperatur des Tauchheizgerätes im Trockengang abhängig ist und nicht von der Leistungsaufnahme.