

Explosionsdruckentlastung durch permeable Werkstoffe

Julia Hornig¹, Detlev Markus¹, Martin Thedens¹, Karl-Heinrich Grote²

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.5 „Zünddurchschlagsprozesse“, Braunschweig

² Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik, Magdeburg

Das bisherige Schutzkonzept der Zündschutzart »Druckfeste Kapselung« beruht auf massiv ausgelegten Gehäusen und hinreichend kleinen Spaltweiten bei großen Spaltlängen, damit sich eine im Gehäuseinneren auftretende Explosion nicht außerhalb des Gehäuses fortsetzen kann. In dieser Arbeit wird ein innovatives Schutzkonzept zur Weiterentwicklung dieser Zündschutzart hin zu schlankeren Gehäusekonstruktionen vorgestellt. Hiermit ist zukünftig eine wirtschaftlichere und individuellere Produktentwicklung explosionsgeschützter Geräte möglich, ohne das Sicherheitsniveau der Zündschutzart zu gefährden. Die Grundlage hierfür bildet die konstruktive Kombination zweier bewährter Schutzprinzipien: In die Wände druckfester Gehäuse werden als Flammensperren fungierende permeable Werkstoffe integriert, die den bei einer Explosion im Inneren des Gehäuses entstehenden Druck zünddurchschlagsicher entlasten. Durch diese Funktionsintegration der Einzelfunktionen »Druckentlastung« und »Verhinderung eines Zünddurchschlags« in einem Konstruktionselement – dem Druckentlastungselement aus einem permeablen Werkstoff – wird hierbei im Unterschied zur herkömmlichen flammenlosen Explosionsdruckentlastung eine kontinuierliche Entlastung ab dem Beginn der Explosion ermöglicht. Die durchgeführten Untersuchungen belegen einen für jeden Werkstoff charakteristischen funktionalen Zusammenhang zwischen der erreichbaren Druckentlastung und der eingebauten Entlastungsfläche, mit dem die Druckentlastungsfähigkeit des Werkstoffs exakt beschrieben werden kann. Dieses neue Schutzkonzept wurde in einer kürzlich abgeschlossenen Dissertation [1] entwickelt und aufgrund der Anwendung im Rahmen der »Druckfesten Kapselung« und zur Abgrenzung von allen bisherigen Arten der Druckentlastung als »Zünddurchschlagsichere Explosionsdruckentlastung« bezeichnet.

1 Einleitung

In vielen industriellen Bereichen können durch den Umgang mit brennbaren Stoffen explosionsfähige Atmosphären entstehen. Zur Gewährleistung der Sicherheit in diesen explosionsgefährdeten Bereichen werden die unterschiedlichsten Maßnahmen ergriffen, um das Risiko einer Explosion bzw. deren Auswirkungen zu minimieren. Unter anderem sind für elektrische Geräte, die in diesen Bereichen grundsätzlich als potentielle Zündquellen anzusehen sind, geeignete konstruktive Maßnahmen zu treffen, die eine Entzündung und damit die Explosion dieser Atmosphären verhindern. Im Hinblick auf die Vielzahl elektrotechnischer Anwendungen und deren Geräte wurden im Zuge der technischen Entwicklung hierfür die unterschiedlichsten Schutzkonzepte entwickelt. Eine dieser sogenannten Zündschutzarten, die der Norm DIN EN 60079-0 [2] zugrunde liegen, ist die Zündschutzart »Druckfeste Kapselung« nach DIN EN 60079-1 [3]. Die nach diesem Konstruktionsprinzip gestalteten Gehäuse zeichnen sich dadurch aus, dass in ihrem Inneren Explosionen auftreten dürfen. Damit diese Explosionen jedoch kein Sicherheitsrisiko darstellen, dürfen sie sich nicht außerhalb des Gehäuses fortsetzen. Um eine solche Explosionsübertragung, den sogenannten Zünddurchschlag, zu verhindern, müssen die Gehäuse im Wesentlichen zwei Eigenschaften besitzen: Sie müssen mit entsprechend großen Wandstärken ausgelegt sein, damit sie dem in ihrem Inneren entstehenden Explosionsdruck standhalten. Und die Gehäusespalte müssen geringe Spaltweiten und große Spaltlängen aufweisen, denn nur in solchen Geometrien verlöscht die Flammenfront und die ausströmenden heißen Abgase werden so stark abgekühlt, dass von ihnen keine Zündgefahr mehr ausgeht. Aufgrund dieser

Bauweise gehören druckfeste Gehäuse zu den aufwendigsten Konstruktionen von Geräten, die für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen vorgesehen sind.

Der bei einer Explosion im Inneren druckfester Gehäuse entstehende maximale Explosionsdruck, der grundsätzlich in standardisierten experimentellen Prüfungen [3] bestimmt werden muss, ist maßgeblich für die Auslegung der Gehäuse. Durch eine Reduzierung dieses als Bezugsdruck bezeichneten maximalen Explosionsdrucks können weniger aufwendige und schlankere Gehäuse konstruiert werden. Für den Konstrukteur druckfester Gehäuse ergeben sich hierdurch flexiblere Gestaltungsmöglichkeiten, sodass wirtschaftlichere und individuellere Produktlösungen entwickelt werden können. Ermöglicht wird diese Explosionsdruckreduzierung, indem permeable Werkstoffe als Gehäuse- bzw. Wandmaterial verwendet werden, die den Druck zünddurchschlagsicher entlasten. Die hierfür notwendige Funktionsintegration der Einzelfunktionen »Druckentlastung« und »Verhinderung eines Zünddurchschlags« in einem Konstruktionselement – dem Druckentlastungselement aus einem permeablen Werkstoff – bewirkt somit im Unterschied zur herkömmlichen flammenlosen Explosionsdruckentlastung eine kontinuierliche Entlastung ab dem Beginn der Explosion. Damit diese Weiterentwicklung der Zündschutzart »Druckfeste Kapselung« nicht zu Lasten der Sicherheit geht, kommen für diese Anwendung nur Werkstoffe in Betracht, die hinreichend kleine Spalte aufweisen, um die Zünddurchschlagsicherheit des Gehäuses weiterhin zu gewährleisten. Darüber hinaus muss zudem sichergestellt sein, dass sich die Druckentlastungselemente durch die ausströmenden heißen Abgase nicht so stark erhitzen, dass sie selbst zu potentiellen Zündquellen für die äußere explosionsfähige Atmosphäre werden.

Die verschiedenen Einflussgrößen, die es innerhalb des hier zu betrachtenden Gesamtsystems der zünddurchschlagsicheren Druckentlastung zu berücksichtigen gilt, sind in Abbildung 1 noch einmal schematisch zusammengefasst. Im Falle einer Explosion breitet sich die Explosionsflamme bei ungehinderter Verbrennung ausgehend vom Zündort konzentrisch mit der Flammengeschwindigkeit aus. Bereits im Moment der Zündung beginnt infolge des Temperaturanstiegs und dem daraus resultierenden Druckanstieg unverbranntes Gasgemisch durch das Druckentlastungselement (DEE) auszuströmen. Neben der zeitlichen Entwicklung von Temperatur und Druck ($T(t)$, $p(t)$) sind hierbei somit zusätzlich sowohl der durch das Element strömende Volumenstrom $\dot{V}$ als auch der hindurch strömende Wärmestrom $\dot{Q}$ und in dessen Folge die Oberflächentemperatur T_o des Druckentlastungselements zu berücksichtigen.

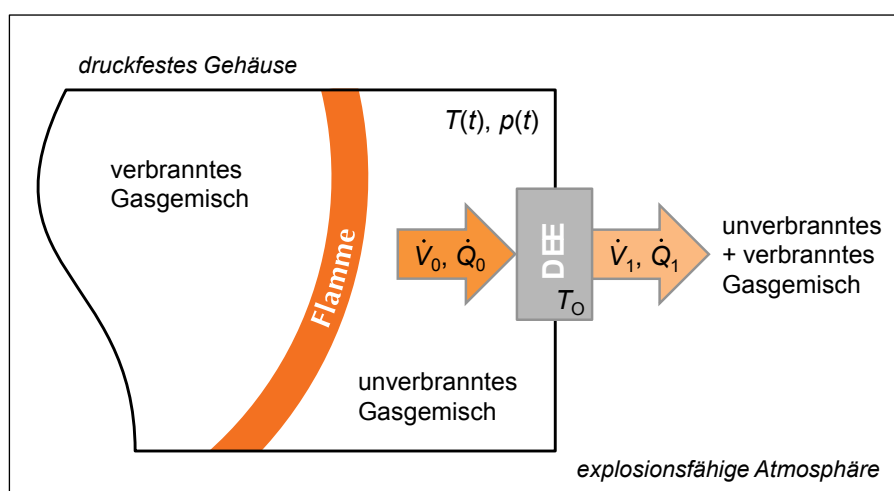


Abbildung 1: Gesamtsystem der zünddurchschlagsicheren Explosionsdruckentlastung: Das Druckentlastungselement (DEE) als integraler Bestandteil eines Gehäuses der Zündschutzart »Druckfeste Kapselung«

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Versuchsaufbau

Aufbauend auf früheren Arbeiten [4-6], in denen permeable Werkstoffe auf ihre Eignung als Flammensperren und damit insbesondere auf ihre Zünddurchschlagsicherheit hin untersucht worden sind, wurden drei unterschiedliche Werkstoffe ausgewählt, die auch für die hier vorgestellte neue Verwendungsweise der zünddurchschlagsicheren Druckentlastung vielversprechend erschienen. Tabelle 1 zeigt jeweils ein Foto dieser Werkstoffe und fasst die sie maßgeblich charakterisierenden Größen Spaltweite bzw. Porosität ε unter Angabe der jeweiligen Elementdicke d zusammen. Neben einer herkömmlichen Flammensperre aus Bandwickeln (Bandsicherung) [7] für die Explosionsgruppe IIC (Spaltweite 150 μm) wurde ein Werkstoff aus einer gesinterten Partikelschüttung (Sinterwerkstoff) [8] – ein in der Verfahrenstechnik übliches Filtermaterial – sowie ein noch recht neuer Werkstoff aus gesinterten Kurzfasern (Faserwerkstoff) [9] in drei unterschiedlichen (nominellen) Porositäten (60 %, 70 %, 80 %)¹ untersucht. Alle drei Werkstoffe sind aus nichtrostendem Edelstahl, wenn auch aus unterschiedlichen Legierungen.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Werkstoffe mit Angaben zu Spaltweite, Porosität (ε) und Elementdicke (d)

Bandsicherung [7]	Sinterwerkstoff [8]	Faserwerkstoff [9]
		
• Spaltweite 0,15 mm (IIC), $d = 10 \text{ mm}$	• $\varepsilon \approx 50 \%$, $d = 5 \text{ mm}$	• $\varepsilon = 60 \%$, $d = 5 \text{ mm}$ • $\varepsilon = 70 \%$, $d = 5 \text{ mm}$ • $\varepsilon = 70 \%$, $d = 10 \text{ mm}$ • $\varepsilon = 80 \%$, $d = 5 \text{ mm}$

Das Ausmaß der Druck- und Temperaturbelastungen, dem die Druckentlastungselemente ausgesetzt sind, ist grundsätzlich abhängig vom Volumen des Gehäuses und dessen innerer Struktur wie beispielsweise Einbauten. Um das Verhalten der Werkstoffe bei der Explosionsdruckentlastung systematisch zu untersuchen und daraus Richtlinien für spätere Praxis-Anwendungen ziehen zu können, ist es daher notwendig, praxisnahe Versuchsbedingungen zu schaffen. Hierfür wurden drei handelsübliche druckfeste Leergehäuse so modifiziert, dass möglichst viele größengleiche Werkstoffproben in deren Gehäusewände integriert werden können. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind diese Versuchsgehäuse alle vom selben Typ und damit von ähnlicher Form (nahezu würfelförmig), unterscheiden sich aber in ihrer Größe. Das kleinste Gehäuse (*kleines Gehäuse*) hat ein Volumen von ca. 2 l

¹Die exakte Porosität einzelner Druckentlastungselemente kann herstellungsbedingt von diesen Werten um bis zu 2 % nach unten bzw. um bis zu 4 % nach oben abweichen. Zur Klassifizierung des Faserwerkstoffs werden hier jedoch grundsätzlich diese drei genannten Werte im Sinne einer nominellen Porosität verwendet.

und bietet die Möglichkeit, bis zu 12 Werkstoffproben in die Gehäusewände einzusetzen. Das nächst größere Gehäuse (*mittleres Gehäuse*) hat ein Volumen von 4 l und kann bis zu 24 Entlastungselemente aufnehmen. Und das größte Gehäuse (*großes Gehäuse*) hat ein Volumen von gut 8 l und weist 48 Öffnungen auf.

Damit die zu untersuchenden Werkstoffproben möglichst platzsparend, aber während der Versuchsreihen dennoch einfach ausgetauscht und in die Versuchsgehäuse ein- und ausgebaut werden können, wurde ein spezieller Probenadapter entwickelt. Er ist als Hohlschraube ausgeführt und wird bis zur Schulter von außen in die entsprechend präparierten Entlastungsöffnungen geschraubt. Die zur Gehäuseinnenseite abgesetzte Durchgangsbohrung mit Innengewinde dient zur Aufnahme der Druckentlastungselemente. Dorthinein wird die Probe eingesetzt und mittels einer Hülse mit Außengewinde gegen den Bohrungsabsatz verspannt und somit auch axial im Adapter fixiert. Im eingebauten Zustand entspricht die effektive Entlastungsfläche eines Druckentlastungselements bei einem durchströmenden Durchmesser von 20 mm (Innendurchmesser der Hülse) $A_{DEE} \approx 314 \text{ mm}^2$.

In der folgenden Abbildung 2 ist der prinzipielle Versuchsaufbau exemplarisch am kleinen Gehäuse dargestellt. Sie zeigt einen Schnitt durch das Gehäuse parallel zu einer Gehäusewand sowie einen Probenadapter mit Druckentlastungselement (DEE) in Explosionsdarstellung. Ebenfalls angedeutet ist der Gaseinlass in der Mitte des Gehäusedeckels, von wo aus das Prüfgasgemisch in das Versuchsgehäuse eingebracht und mit einer Hochspannungszündkerze gezündet wird.

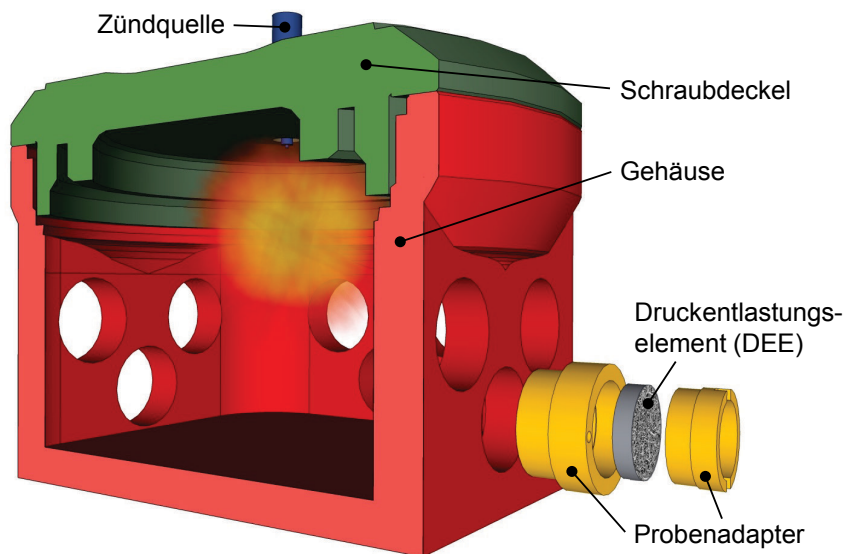


Abbildung 2: Prinzipieller Versuchsaufbau exemplarisch dargestellt am kleinen Gehäuse, einschließlich eines Probenadapters mit Druckentlastungselement (DEE)

2.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn der Untersuchungen lag der Fokus auf der grundlegenden Charakterisierung der Druckentlastungsfähigkeit der permeablen Werkstoffe. Hierfür wurden zunächst nur im kleinen Gehäuse sowohl die Werkstoffe als auch jeweils die Anzahl der verwendeten Druckentlastungselemente und damit die Größe der Entlastungsfläche A_E variiert. Immer ausgehend vom voll bestückten, d. h. dem mit der maximal möglichen Anzahl an Druckentlastungselementen versehenen Versuchsgehäuse wurde hierbei die Entlastungsfläche A_E sukzessive verkleinert, indem Adapter mit Werkstoffproben durch Blindstopfen ersetzt und somit zunehmend mehr Entlastungsöffnungen verschlossen wurden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden in einem zweiten Schritt mit einem der untersuchten Werkstoffe, dem Faserwerkstoff der Porosität 60 %, weitere Versuchsreihen im mittleren und großen Gehäuse durchgeführt, um Rückschlüsse auf den Einfluss des Gehäusevolumens auf die Druckentlastungsfähigkeit ziehen zu können. Hierbei wurde ebenfalls nach vorstehend

beschriebenem Schema die jeweils maximal mögliche Entlastungsfläche so lange von Konfiguration zu Konfiguration verringert, bis das Gehäuse vollständig geschlossen war ($A_E = 0 \text{ mm}^2$). Dieser ohne Druckentlastung im jeweiligen Versuchsgehäuse ermittelte Druck ist bei sonst gleichen Anfangsbedingungen der höchste entstehende Explosionsdruck und stellt somit den Ausgangspunkt aller Betrachtungen zur Reduzierung des Explosionsdrucks dar.

Das grundsätzliche Vorgehen während der Versuchsreihen orientiert sich an den Zulassungsprüfungen für elektrische Geräte der Zündschutzart »Druckfeste Kapselung« für die Gruppe IIC nach DIN EN 60079-1 [3]. Dementsprechend wurden im Sinne der Bezugsdruckbestimmung mit jeder Versuchskonfiguration (Paarung »Werkstoff/Anzahl DEE«) drei Explosionsversuche mit $(14 \pm 1) \text{ Vol.-%}$ Acetylen in Luft sowie drei Explosionsversuche mit $(31 \pm 1) \text{ Vol.-%}$ Wasserstoff in Luft bei atmosphärischem Druck durchgeführt und dabei jeweils der sich entwickelnde maximale Überdruck in Bezug auf den atmosphärischen Druck (Umgebungsdruck) bestimmt. Hierfür wurde mit Hilfe eines piezoelektrischen Quarz-Drucksensors (Kistler, Typ 6031), der im Deckel des Versuchsgehäuses eingebaut war, der zeitliche Überdruckverlauf $\Delta p(t)$ aufgezeichnet und dessen jeweiliger Höchstwert, der in Analogie zum Explosionsdruck als Explosionsüberdruck Δp_{ex} bezeichnet wird, ausgegeben. Begleitend zu diesen Druckentlastungsversuchen wurden die Werkstoffe zudem einer normgerechten Prüfung auf Zünddurchschlagsicherheit unterzogen. Hierbei wurden je fünf Explosionsversuche mit den zünddurchschlagswilligsten Gemischkonzentrationen der beiden Prüfgase ($(27,5 \pm 1,5) \text{ Vol.-%}$ Wasserstoff in Luft und $(7,5 \pm 1,0) \text{ Vol.-%}$ Acetylen in Luft) jeweils beim 1,5-Fachen des atmosphärischen Drucks durchgeführt. Da nicht für jede Konfiguration wieder neue Werkstoffproben verwendet wurden, summiert sich die Anzahl der Explosionsversuche, denen die Elemente ausgesetzt waren, entsprechend bis zu ihrem Ausbau bzw. Versagen oder dem Ende der Messreihe.

3 Ergebnisse

Zur Veranschaulichung des vorstehend beschriebenen Versuchsablaufs zeigt die folgende Abbildung 3 exemplarisch vier der während der Versuchsreihen im kleinen Gehäuse aufgezeichneten Überdruckverläufe $\Delta p(t)$.

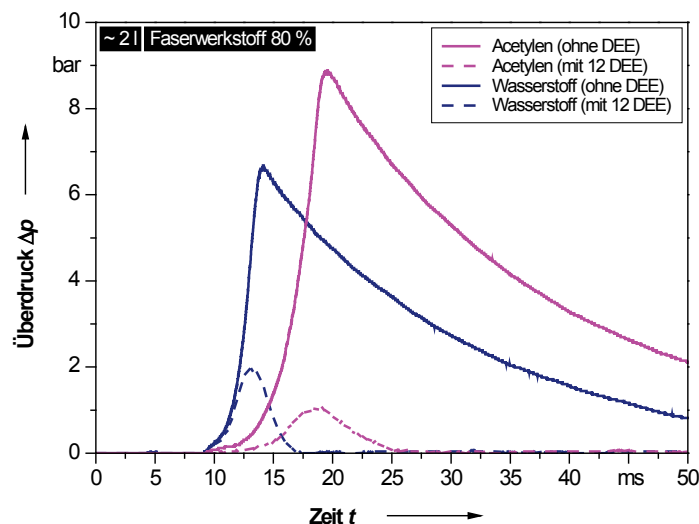


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf des Überdrucks Δp im kleinen Gehäuse für die Explosionsversuche mit $(14 \pm 1) \text{ Vol.-%}$ Acetylen in Luft bzw. $(31 \pm 1) \text{ Vol.-%}$ Wasserstoff in Luft bei geschlossenem Gehäuse (ohne DEE) und bei maximal entlastetem Gehäuse (mit 12 DEE) mit Elementen des Faserwerkstoffs der Porosität 80 %

Dargestellt ist hier jeweils für die beiden oben genannten Gemische zur Bezugsdruckbestimmung zum einen die Entwicklung des Überdrucks im nicht entlasteten, geschlossenen

Gehäuse (ohne DEE) und zum anderen der Überdruckverlauf bei Verwendung der maximal möglichen Anzahl an Druckentlastungselementen (mit 12 DEE) aus dem Faserwerkstoff der Porosität 80 %. Bei geschlossenem Gehäuse ergibt sich hier ein maximaler Überdruck Δp_{ex} von 8,9 bar bei Verwendung des Acetylen/Luft-Gemisches und von 6,7 bar beim Wasserstoff/Luft-Gemisch. Im Gegensatz dazu stellt sich mit 12 eingebauten Druckentlastungselementen beim Acetylen/Luft-Gemisch nur noch ein maximaler Überdruck von $\Delta p_{\text{ex}} = 1,1$ bar ein, während sich beim Wasserstoff/Luft-Gemisch ein maximaler Überdruck von $\Delta p_{\text{ex}} = 2,0$ bar ergibt. Neben dieser signifikanten Reduzierung der Explosionsüberdrücke fällt in Abbildung 3 zudem auf, dass im Gegensatz zum geschlossenen Gehäuse, wo im Vergleich der beiden Gasgemische das Acetylen/Luft-Gemisch den höheren Explosionsüberdruck erzeugt, im entlasteten Gehäuse der höhere Explosionsüberdruck beim Wasserstoff/Luft-Gemisch entsteht.

Für die weitere Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse wird zur Beschreibung des Entlastungsvermögens der unterschiedlichen permeablen Werkstoffe eine andere Darstellungsform als in Abbildung 3 verwendet und damit der Begriff reduzierter Explosionsüberdruck oder kurz reduzierter Überdruck Δp_{red} eingeführt. Er bezeichnet den Mittelwert (arithmetisches Mittel) aus den einzelnen gemessenen Explosionsüberdrücken Δp_{ex} , die aus den drei Explosionsversuchen pro Konfiguration für jedes der beiden Gasgemische bestimmt wurden. Die so aus den Einzelversuchen ermittelten reduzierten Explosionsüberdrücke Δp_{red} sind in der folgenden Abbildung 4 in Abhängigkeit von der Größe der Entlastungsfläche A_E dargestellt. Unterteilt nach dem jeweils verwendeten Gasgemisch sind in ihr die Ergebnisse für alle sechs im kleinen Gehäuse untersuchten Spezifikationen der permeablen Werkstoffe zusammengefasst.

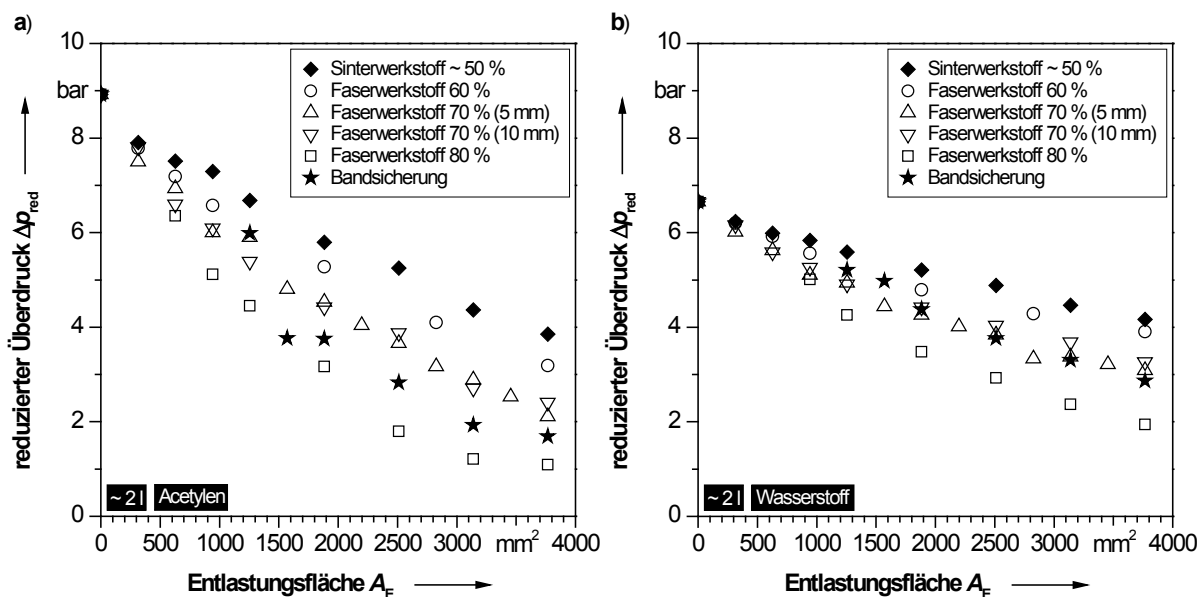


Abbildung 4: Reduzierter Überdruck Δp_{red} im kleinen Gehäuse bezogen auf die absolute Entlastungsfläche A_E . Aufgetragen sind für alle untersuchten permeablen Werkstoffe die Mittelwerte der Explosionsüberdrücke der Versuche mit a) (14 ± 1) Vol.-% Acetylen in Luft und b) (31 ± 1) Vol.-% Wasserstoff in Luft.

Grundsätzlich zeigt sich anhand dieser Versuchsergebnisse sowohl für das Acetylen/Luft-Gemisch (Abbildung 4a) als auch für das Wasserstoff/Luft-Gemisch (Abbildung 4b), dass mit zunehmender Größe der Entlastungsfläche A_E die Druckentlastung erwartungsgemäß zunimmt, sodass der entstehende reduzierte Überdruck Δp_{red} kontinuierlich sinkt. Beim direkten Vergleich der einzelnen Werkstoffe miteinander wird hierbei zudem bei beiden Gasgemischen die Abhängigkeit der Druckentlastungsfähigkeit von der Porosität der Werkstoffe sehr deutlich: Mit steigender Porosität und damit prinzipiell auch geringer werdendem Strömungswiderstand nimmt die Fähigkeit Druck zu entlasten zu. Beispielfhaft

hierfür seien die beiden Extreme genannt, zwischen deren Grenzen die Werte aller anderen untersuchten Werkstoffe liegen. So erreicht der Sinterwerkstoff, der eine Porosität von ungefähr 50 % hat, bei maximal möglicher Entlastungsfläche von $A_E = 3770 \text{ mm}^2$ Druckreduzierungen bezogen auf das geschlossene Gehäuse ($A_E = 0 \text{ mm}^2$) von 56 % beim Acetylen/Luft-Gemisch bzw. 37 % beim Wasserstoff/Luft-Gemisch, während bei Verwendung des Faserwerkstoffs der Porosität 80 % der Druck bei dieser Entlastungsfläche um 88 % (Acetylen) bzw. 72 % (Wasserstoff) sinkt.

Betrachtet man in Abbildung 4 die einzelnen Ergebnisse des Faserwerkstoffs der Porosität 70 %, zeigt sich darüber hinaus bei beiden Gasgemischen ein weiteres bemerkenswertes Detail: Im Gegensatz zur Porosität, die wie vorstehend beschrieben die Druckentlastungsfähigkeit entscheidend beeinflusst, hat die Dicke des Entlastungselements – zumindest bei den hier betrachteten Dicken von 5 mm und 10 mm – nahezu keinen Einfluss auf die Druckentlastungsfähigkeit des Werkstoffs.

Vergleicht man in Abbildung 4 für jeden einzelnen Werkstoff die Ergebnisse der beiden Gasgemische miteinander, zeigt sich bei allen Werkstoffen das bereits im Zusammenhang mit Abbildung 3 beschriebene Phänomen, dass bei maximal möglicher Druckentlastung ($A_E = 3770 \text{ mm}^2$) das Wasserstoff/Luft-Gemisch (Abbildung 4b) den höheren Explosionsüberdruck verursacht, wohingegen im geschlossenen Gehäuse ($A_E = 0 \text{ mm}^2$) das Acetylen/Luft-Gemisch (Abbildung 4a) den höheren Explosionsüberdruck erzeugt. Die folgende Tabelle 2 veranschaulicht dieses Phänomen, indem in Abhängigkeit vom jeweiligen Gasgemisch die reduzierten Explosionsüberdrücke Δp_{red} für alle untersuchten Werkstoffe bei maximal entlastetem Gehäuse zusammengefasst und den entsprechenden Explosionsüberdrücken im geschlossenen Gehäuse gegenübergestellt sind.

Tabelle 2: Reduzierter Explosionsüberdruck Δp_{red} im geschlossenen und maximal entlasteten kleinen Gehäuse für alle untersuchten Werkstoffe bei Verwendung des Acetylen/Luft-Gemisches (C_2H_2) bzw. des Wasserstoff/Luft-Gemisches (H_2)

	geschloss. Gehäuse	maximal entlastetes Gehäuse					
		Sinterw. ca. 50 %	Faserw. 60 % (5 mm)	Faserw. 70 % (10 mm)	Faserw. 70 % (5 mm)	Bands.	Faserw. 80 % (5 mm)
$\Delta p_{\text{red}}(\text{C}_2\text{H}_2)$ in bar	8,9	3,9	3,2	2,4	2,1	1,7	1,1
$\Delta p_{\text{red}}(\text{H}_2)$ in bar	6,7	4,2	3,9	3,2	3,1	2,9	1,9

Die Druckentlastungswirkung ist demnach beim Wasserstoff/Luft-Gemisch grundsätzlich geringer als beim Acetylen/Luft-Gemisch. Zurückzuführen ist dieses Verhalten auf die unterschiedlichen Verbrennungstemperaturen und -geschwindigkeiten der beiden Gasgemische. Da im geschlossenen Gehäuse der Explosionsdruck bei ungehinderter Verbrennung im Wesentlichen von der Flammentemperatur abhängt, ergibt sich hier aufgrund seiner im Vergleich zum Wasserstoff-Gemisch höheren Verbrennungstemperatur [10] der höhere Explosionsdruck beim Acetylen-Gemisch. Da jedoch die laminare Flammgeschwindigkeit des Acetylen-Gemisches kleiner ist als die des Wasserstoff-Gemisches [10, 11], erfolgt der Druckanstieg beim Acetylen-Gemisch etwas später und vor allem langsamer. Diese charakteristische Entwicklung des Drucks in geschlossenen Gehäusen zeigt sich in den beiden entsprechenden zeitlichen Überdruckverläufen (ohne DEE) in Abbildung 3 deutlich. Bei der Verwendung von Druckentlastungselementen kann nun im Gegensatz zum geschlossenen Gehäuse unmittelbar nach der Zündung Gasgemisch aus dem Gehäuse ausströmen, sodass die zeitliche Entwicklung der Verbrennung bzw. des Drucks berücksichtigt werden muss. Das ausgeströmte unverbrannte Gas steht der Verbrennung im Gehäuse nicht mehr zur Verfügung (vgl. Abbildung 1). Für den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck $\Delta p_{\text{red, max}}$, der als Äquivalent zum Bezugsdruck anzusehen ist, ist es daher nun entscheidend, wie viel Gasgemisch im Verhältnis zur ausgeströmten Gasmenge verbrennt. Dies ist insbesondere

im Hinblick auf die Zulassungsprüfungen druckfester Gehäuse zu beachten, bei denen der Bezugsdruck die Grundlage für die Prüfung auf Druckfestigkeit (Überdruckprüfung) ist. Zusammenfassend gilt somit:

- a) Bei kleiner Entlastungsfläche A_E bestimmt der höhere Heizwert bzw. die höhere Standardverbrennungsenthalpie (Brennwert) und damit die höhere volumetrische Energiedichte des Acetylen/Luft-Gemisches den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck $\Delta p_{\text{red, max}}$;
- b) mit größer werdender Entlastungsfläche A_E hingegen gewinnt zunehmend die höhere Verbrennungsgeschwindigkeit des Wasserstoff/Luft-Gemisches an Einfluss und dominiert schließlich ab einer gewissen Entlastungsflächengröße den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck $\Delta p_{\text{red, max}}$.

Neben der Druckentlastungsfähigkeit ist die *Zünddurchschlagsicherheit* der Entlastungselemente ein zwingend zu erfüllendes Sicherheits- und somit Qualifizierungsmerkmal für die Werkstoffe. Bei den begleitend durchgeführten Versuchen zur Überprüfung der Zünddurchschlagsicherheit stellte sich heraus, dass bis auf den Sinterwerkstoff alle Werkstoffe spätestens bei nur einem eingesetzten Entlastungselement einen Zünddurchschlag nicht mehr verhindern können. Insbesondere die beiden am besten entlastenden Werkstoffe, der Faserwerkstoff der Porosität 80 % und die Bandsicherung, versagten hierbei schon bei vergleichsweise großen Entlastungsflächen. Verhindern konnte der Faserwerkstoff mit der Porosität 80 % einen Zünddurchschlag lediglich in der Konfiguration mit 12 Entlastungselementen, also der maximal möglichen Entlastungsfläche. Zu der Art der aufgetretenen Zünddurchschläge lässt sich festhalten, dass es sich in allen Fällen nicht um direkte Flammendurchtritte oder eine Entzündung durch das ausströmende heiße Gas handelte, sondern um in Bezug auf die Zündung im Gehäuse zeitlich leicht verzögerte Explosionen infolge der Entzündung der äußeren Atmosphäre an der heißen Außenoberfläche der Elemente. Zu erklären ist diese Art des Zünddurchschlags mit der zunehmenden thermischen Belastung der Druckentlastungselemente aufgrund des sukzessiven Ausbaus von Elementen und der damit einhergehenden Verringerung der Entlastungsfläche: Die bei den Explosionen frei werdende Wärmemenge strömt durch immer weniger eingebaute Entlastungselemente, sodass diese von Konfiguration zu Konfiguration heißer werden, bis sich das umgebende explosionsfähige Gemisch an ihren Oberflächen entzündet. Angesichts der sinkenden Wärmekapazität der Elemente mit steigender Porosität der Werkstoffe, sind daher bei Werkstoffen mit hohen Porositäten größere Entlastungsflächen notwendig, um die Zünddurchschlagsicherheit zu gewährleisten.

Für den Übergang zum zweiten Schritt der Untersuchungen im mittleren und im großen Gehäuse, bei denen die Druckentlastungsfähigkeit in Bezug auf das zu entlastende Gehäusevolumen untersucht werden sollte, wurde der Faserwerkstoff der Porosität 60 % ausgewählt. Im Hinblick auf die zu erwartende deutlich höhere thermische Belastung der Elemente infolge der größeren Gehäusevolumina war es nach den vorstehend beschriebenen Erkenntnissen über die aufgetretenen Zünddurchschläge notwendig, einen Werkstoff zu verwenden, der auch bei kleinen Entlastungsflächen noch zünddurchschlagsicher ist. Um die einzelnen Ergebnisse aus den Versuchsreihen in den drei unterschiedlichen Gehäusen angemessen miteinander vergleichen zu können, ist die bisherige Darstellung der reduzierten Überdrücke in Abhängigkeit von der absoluten Entlastungsfläche A_E wenig hilfreich. Aus diesem Grund wird als neue Bezugsgröße die relative Entlastungsfläche A_{rel} verwendet. Sie setzt die absolute Entlastungsfläche A_E ins Verhältnis zur jeweiligen Innenoberfläche des Gehäuses A_I . In Abbildung 5 sind die aus den Einzelversuchen ermittelten reduzierten Explosionsüberdrücke Δp_{red} in Abhängigkeit von dieser neuen, normierten Bezugsgröße zusammengefasst. Sie zeigt unterteilt nach dem jeweils verwendeten Gasgemisch neben den entsprechenden Werten des Faserwerkstoffs der Porosität 60 % aus dem kleinen Gehäuse (vgl. Abbildung 4) zusätzlich die reduzierten Überdrücke bei Verwendung dieses Werkstoffs im mittleren und im großen Gehäuse.

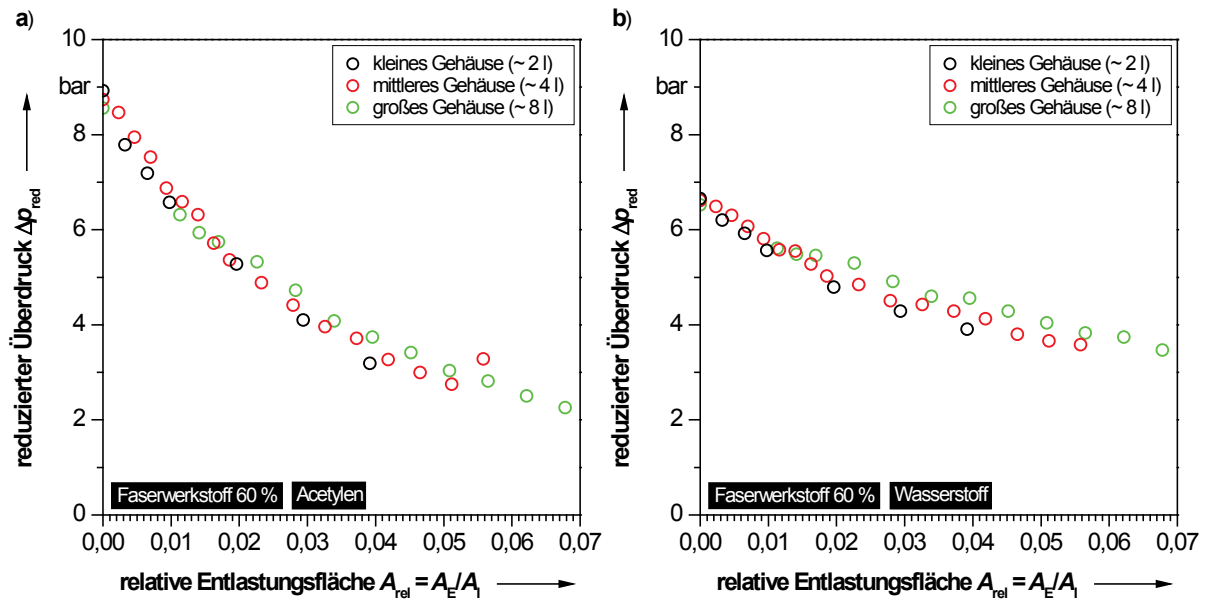


Abbildung 5: Reduzierter Überdruck Δp_{red} im kleinen, mittleren und großen Gehäuse bezogen auf die relative Entlastungsfläche A_{rel} . Aufgetragen sind für den Faserwerkstoff der Porosität 60 % die Mittelwerte der Explosionsüberdrücke der Versuche mit a) (14 ± 1) Vol.-% Acetylen in Luft und b) (31 ± 1) Vol.-% Wasserstoff in Luft.

Die Verläufe dieser Werte für die drei unterschiedlichen Gehäusegrößen in Abbildung 5 zeigen eine überraschende Besonderheit: Sowohl beim Acetylen-Gemisch (Abbildung 5a) als auch beim Wasserstoff-Gemisch (Abbildung 5b) ergeben sich bei ungefähr gleicher Größe der relativen Entlastungsfläche A_{rel} für alle drei Gehäusegrößen nahezu dieselben Werte für den reduzierten Überdruck Δp_{red} . Im hier betrachteten Volumenbereich hat die Gehäusegröße demnach keinen Einfluss auf die Druckentlastung, sodass die Druckentlastungsfähigkeit als volumenunabhängig betrachtet werden kann. Somit besteht ein für jeden Werkstoff charakteristischer funktionaler Zusammenhang zwischen der Größe der relativen Entlastungsfläche A_{rel} und dem sich einstellenden reduzierten Explosionsüberdruck Δp_{red} , mit dem die Druckentlastungsfähigkeit des Werkstoffs exakt beschrieben werden kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass es unter Beachtung gewisser Randbedingungen möglich ist, permeable Werkstoffe zur Explosionsdruckentlastung in die Wände von Gehäusen der Zündschutzart »Druckfeste Kapselung« zu integrieren, ohne das Sicherheitsniveau der Zündschutzart zu gefährden. Dabei besitzt diese neue Art der Explosionsdruckentlastung, die hinsichtlich ihrer Anwendung im Rahmen der »Druckfesten Kapselung« und zur Abgrenzung von allen bisherigen Arten der Druckentlastung als »Zünddurchschlagsichere Explosionsdruckentlastung« bezeichnet wird, das Potential, den Explosionsdruck signifikant zu senken. Wie stark die erzielbare Entlastungswirkung bei gleicher Größe der Entlastungsfläche im Einzelnen ist, hängt jedoch entscheidend vom jeweiligen Werkstoff ab. Grundsätzlich gilt hierbei: je größer die Porosität des Werkstoffs, desto besser dessen Entlastungsfähigkeit.

Durch den Vergleich der Entlastungswirkung in Bezug auf unterschiedliche Gehäusegrößen konnte zudem nachgewiesen werden, dass die Druckentlastungsfähigkeit eines einzelnen Werkstoffs bei gleicher relativer Entlastungsfläche unabhängig von der Größe des zu entlastenden Gehäusevolumens ist. Es besteht somit die Möglichkeit, einen für jeden Werkstoff charakteristischen funktionalen Zusammenhang zwischen der Größe der relativen Entlastungsfläche A_{rel} und dem entstehenden reduzierten Explosionsüberdruck Δp_{red} zu for-

mulieren, mit dem die Druckentlastungsfähigkeit des Werkstoffs exakt beschrieben werden kann. Für die Entwicklung von allgemeinen Gestaltungsrichtlinien zur zünddurchschlag-sicheren Explosionsdruckentlastung mit permeablen Werkstoffen stellt diese Volumenunabhängigkeit ein herausragendes Ergebnis dar. Damit ist es möglich, für jeden Werkstoff die entsprechenden prüfgasabhängigen Verläufe des reduzierten Explosionsüberdrucks Δp_{red} experimentell zu ermitteln und davon jeweils die allgemeine mathematische Beschreibung dieses Zusammenhangs abzuleiten. Für eine konstruktionstechnische Datenbank müsste dann nur noch ein Algorithmus implementiert werden, der im Sinne der Bezugsdruckermittlung durch den Vergleich dieser Verläufe den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck $\Delta p_{\text{red, max}}$ bestimmt, der dann allen weiteren Berechnungen, wie beispielsweise der Festigkeit, zugrunde gelegt werden kann.

Wie die beobachteten Zünddurchschläge offenbaren, ist das sicherheitskritischste Problem die durch die ausströmenden heißen Verbrennungsprodukte verursachte Erwärmung der Entlastungselemente. Für zukünftige Gehäusekonstruktionen nach diesem neuartigen Konzept ist daher zwingend zu beachten, dass sowohl mit zunehmender Porosität der Werkstoffe als auch mit geringer werdender Größe der Entlastungsfläche die Neigung zum Zünddurchschlag stark zunimmt. Eine wirksame Maßnahme zur Begrenzung der Elementtemperaturen wäre die Verwendung entsprechend dickerer Entlastungselemente. Da die Elementdicke im untersuchten Bereich nahezu keinen Einfluss auf die Druckentlastungsfähigkeit des Werkstoffes hat, kann auf diese Weise mit vertretbarem Aufwand die Zünddurchschlagsicherheit gewährleistet werden.

Das hier vorgestellte innovative Schutzkonzept der »Zünddurchschlagsicheren Explosionsdruckentlastung« ermöglicht eine wirtschaftlichere und den Kundenwünschen noch besser angepasste Produktentwicklung von explosionsgeschützten Geräten. Auf seiner Grundlage können die Konstruktionen von druckfesten Gehäusen zukünftig erheblich verbessert werden, sodass sich die Zündschutzart »Druckfeste Kapselung« zu einer neuen Generation druckfester Gehäuse weiterentwickeln lässt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Hornig, J.: *Permeable Werkstoffe zur zünddurchschlagsicheren Explosionsdruckentlastung – Gestaltung und Anwendungsmöglichkeiten*. Aachen: Shaker, 2013 (Fortschritte in der Maschinenkonstruktion, Bd. 3/2013). Zugl.: Magdeburg, Universität, Dissertation, 2012
- [2] Norm DIN EN 60079-0:2013-04. *Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 0: Betriebsmittel – Allgemeine Anforderungen (IEC 60079-0:2011, modifiziert + Cor.: 2012); Deutsche Fassung EN 60079-0:2012*
- [3] Norm DIN EN 60079-1:2008-04. *Explosionsfähige Atmosphäre – Teil 1: Geräteschutz durch druckfeste Kapselung »d« (IEC 60079-1:2007); Deutsche Fassung EN 60079-1:2007*
- [4] Markus, D.; Klausmeyer, U.; Engelmann, F.; Hilliger, A.: Neue Materialien in der Druckfesten Kapselung. In: *Ex-Zeitschrift* 36 (2004), S. 52–56
- [5] Mecke, S.; Markus, D.; Thedens, M.; Engelmann, F.; Hilliger, A.; Klausmeyer, U.: Charakterisierung poröser Strukturen für den Einsatz in explosionsgeschützten elektrischen Geräten. In: *Chemie Ingenieur Technik* 79 (2007), S. 468–472.
- [6] Mecke, S.: *Gestaltung und Dimensionierung von Flammensperren*. Aachen : Shaker, 2009 (Fortschritte in der Maschinenkonstruktion, Bd. 1/2009). Zugl.: Magdeburg, Universität, Dissertation, 2009
- [7] Braunschweiger Flammenfilter GmbH: *Produkte : Technische Grundlagen ; Flammendurchschlagsicherungen*. URL <http://www.protego.de/de/produkte/technische-grundlagen/flammendurchschlagsicherung> (abgerufen am 14.03.2013)
- [8] Tridelta Siperma GmbH: *Produkte : Werkstoffe : Siperma R*. URL <http://www.siperma.com/ger/siperma-r.html> (abgerufen am 14.03.2013)

- [9] Fraunhofer IFAM: Zellulare metallische Werkstoffe: Fasermetallurgie. URL [http://www.ifamdd.fraunhofer.de/de/Zellulare metallische Werkstoffe/Fasermetallurgie.html](http://www.ifamdd.fraunhofer.de/de/Zellulare_metallische_Werkstoffe/Fasermetallurgie.html) (abgerufen am 14.03.2013)
- [10] Warnatz, J.; Maas, U.; Dibble, R. W.: *Verbrennung : Physikalisch-chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung*. 3. Aufl. Berlin: Springer, 2001
- [11] Günther, R.; Janisch, G.: Meßwerte der Flammengeschwindigkeit von Gasen und Gasgemischen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 43 (1971), S. 975–978.

Terms of Use

Any party may pass on this Work by electronic means and make it available for download under the terms and conditions of the Digital Peer Publishing License (DPPL) Version 3.0. The text of the license may be accessed and retrieved via Internet at <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-dppl-v3-en8>.

Beyond the conditions of the DPPL, the data which is contained in this catalog May only be used by any party for signal processing if the data is inserted into the source code of the program together with a reference to the catalog and if the program documentation (if available) also contains a reference to this catalog.

Exclusion of Liability

Deviating from paragraphs 12 and 13 of the DPPL Version 3.0, a comprehensive exclusion of liability applies. This states: This catalog is made available without any special or implied guarantee, which – among others – includes the implicit guarantee of the use of the catalog for a certain purpose. Under no circumstances is PTB responsible for any direct or indirect damage, independent of how it arose, through the use of the catalog. This also applies to damage due to errors of the catalog, which were already known at the occurrence of the damage.