Permeable Werkstoffe zur zünddurchschlagsicheren Explosionsdruckentlastung

Gestaltung und Anwendungsmöglichkeiten

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieurin (Dr.-Ing.)

von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Julia Katharina Hornig geb. am 13.02.1979 in Braunschweig

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karl-H. Grote Dir. und Prof. Dr.-Ing. Uwe Klausmeyer Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Brökel

Promotionskolloquium am 27.11.2012

Fortschritte in der Maschinenkonstruktion

Band 3/2013

Julia Hornig

Permeable Werkstoffe zur zünddurchschlagsicheren Explosionsdruckentlastung – Gestaltung und Anwendungsmöglichkeiten

> Shaker Verlag Aachen 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013 Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1835-6 ISSN 1615-7192

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9 Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Geleitwort des Lehrstuhlinhabers

Die Forschungsarbeiten an den Hochschulen müssen sich heute mehr denn je den Anforderungen aus der Industrie stellen. Der wirtschaftliche Erfolg des Unternehmens wird besonders an einer schnellen Produkt- und Prozessinnovation gemessen. Der internationale Wettbewerb ist dabei durch die umfassende Nutzung des technologischen Fortschritts gekennzeichnet. Unternehmen integrieren oft auch externe Potentiale und Ressourcen, um dem Kostendruck für Forschungsund Entwicklungsleistungen zu begegnen. Besonders die aufstrebenden Industrieunternehmen in den neuen Bundesländern greifen die anwendungsorientierten Ergebnisse der Hochschulen als Technologietransfer auf. Dabei führen theoretische Ergebnisse zu effizienteren Vorgehensweisen in der Entwicklung und praktische Resultate zu einer Umsetzung in Serienprodukte.

Die Schriftenreihe »Fortschritte in der Maschinenkonstruktion« berichtet über abgeschlossene Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Instituts, die als Abschlussberichte der aus unterschiedlichen Finanzierungsquellen geförderten Vorhaben oder als Dissertationen erarbeitet wurden.

Der hier vorliegende Band kommt aus dem Lehrstuhl »Konstruktionstechnik« und berichtet über permeable Werkstoffe zur zünddurchschlagsicheren Explosionsdruckentlastung – deren Gestaltung und Anwendungsmöglichkeiten. Die Forschungsarbeiten wurden in enger Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig (PTB), Prof. Dr.-Ing. Uwe Klausmeyer, durchgeführt. Die Ergebnisse sind für die Praxis wichtig, um Möglichkeiten zur Druckentlastung im Ex-Schutz anzuwenden.

Magdeburg, im Februar 2013

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote Leiter des Lehrstuhles Konstruktionstechnik im Institut für Maschinenkonstruktion

We are all in the gutter, but some of us are looking at the stars.

(Oscar Wilde)

dem Sternenstaub

Vorwort

Nun ist sie also doch noch angekommen, diese Arbeit, zwischen zwei Buchdeckeln. Und da dieser Weg bis hierhin ein langer, weil nicht immer direkter, und oftmals auch steiniger war, möchte ich diese ersten Zeilen denjenigen Menschen widmen, die mich währenddessen begleitet und unterstützt haben.

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2008 bis 2012 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachbereich 3.5 »Zünddurchschlagsprozesse« der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Gefördert wurde sie im Rahmen eines F&E-Kooperationsprojektes zwischen der R. Stahl Schaltgeräte GmbH und der PTB. Für das Zustandekommen dieses Projekts und somit dieser Arbeit möchte ich mich daher zum einen bei Dr.-Ing. Uwe Klausmeyer, dem Leiter des Fachbereichs 3.5 »Zünddurchschlagsprozesse«, bedanken, der mit der ihm eigenen Dynamik die Dinge erst ins Rollen brachte. Und zum anderen danke ich allen an unserem Projekt beteiligten Mitarbeitern der Fa. Stahl.

Wissenschaftlich begleitet wurde ich von universitärer Seite vom Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Für die Förderung und fortwährende freundliche Ermutigung danke ich Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote, dem Leiter dieses Lehrstuhls und Dekan der Fakultät für Maschinenbau, sowie seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ganz herzlich. Während der täglichen Arbeit waren diesbezüglich mein Chef Dr.-Ing. Uwe Klausmeyer, dem ich zugleich für die Übernahme der Mitberichterstattung und die gewährten dienstlichen Freiheiten danke, sowie insbesondere meine Kollegen Dr.-Ing. Detlev Markus und Dr.-Ing. Martin Thedens verlässliche Ansprechpartner. Vielen Dank für Eure unermüdliche Diskussions- und Hilfsbereitschaft. Unsere Gespräche waren mir immer wieder Inspiration und Motivation.

Für seine engagierte Mitberichterstattung gebührt mein Dank zudem Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Brökel, dem Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik/CAD der Universität Rostock. Und Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Jens Strackeljan, dem Rektor der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Leiter des Lehrstuhls für Technische Dynamik, danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission und die so sympathische Leitung des Promotionskolloquiums. Zu großem Dank verpflichtet bin ich darüber hinaus allen Kolleginnen und Kollegen der Fachbereiche 3.5 »Zünddurchschlagsprozesse« und 3.4 »Grundlagen des Explosionsschutzes« sowie der Arbeitsgruppe 1.42 »Gasmessgeräte«, bei denen ich stets ein offenes Ohr fand und die mit ihrer Hilfsbereitschaft nie gegeizt haben. Insbesondere hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang Michael Paul, Joachim Kühne, Rüdiger Strutz, Marc Shields und Dennis Dube für ihre Unterstützung bei der Durchführung der Versuchsreihen und die Überwindung so mancher technischer Schwierigkeiten, Dr. Elisabeth Brandes für das Recherchieren diverser Zahlenwerte und die freundlichen Diskussionen über diese, sowie Dr.-Ing. Rainer Kramer, Alexandra Herrmann und Alexander Wolf für ihr Engagement und die Bereitstellung ihres Equipments bei der Durchführung der Durchströmungsversuche. Für ihre engagierte Mitarbeit an dieser Arbeit im Rahmen ihrer Diplom-, Master- oder Studienarbeiten danke ich zudem meinen ehemaligen Studis Jochen Gaßmann, Jan Giesche, Jan Brokate und Wilko Onken – ich hatte viel Glück mit Euch!

Neben all der fachlichen Unterstützung habe ich überdies vielfach von der Hilfe auf anderen Feldern profitiert. Daher möchte ich gern noch einigen weiteren Kolleginnen und Kollegen danken, ohne die diese Arbeit ebenfalls so nicht möglich gewesen wäre. Allen voran seien hier die Mitarbeiterinnen von Q.11, unserer Braunschweiger Bibliothek, genannt – insbesondere mein »Literatur-Joker« in allen möglichen und beinahe allen unmöglichen Fällen: Brigitte Chot; aber auch die nicht minder engagierten Katharina Heldt, Karin Fangmeier und Ulrike Jaekel –, Sie sind wirklich großartig! Nicht vergessen möchte ich an dieser Stelle außerdem die Kolleginnen und Kollegen unseres Justitiariats (Z.13), vor allem Barbara Tafel und Manfred Gahrens, sowie unseres Technologietransfers (Q.33), hier insbesondere Andreas Barthel, die uns in allen Patent- und Verwertungsfragen unterstützt und ermutigt haben.

Für das Immer-wieder-Lesen einzelner Zeilen oder ganzer Kapitel und all die damit verbundenen Gefechte sowie für die unzähligen Diskussionen über Layout und Typografie danke ich ganz besonders Dr.² Jens Simon. Mein größter Dank, J.e.n.s, gilt Dir jedoch für all die Gedankenexperimente und Einblicke in die Untiefen der Physik sowie unsere murmeltierartigen Diskussionen »zur Schärfung der Argumentation« – frei nach dem Motto »Ich weiß schon, was Du mir sagen willst!« oder: Warum George Bernard Shaw doch recht gehabt hat, indem er sagte *The single biggest problem in communication is the illusion that it has taken place.* Dennoch: Nichts von all dem möchte ich jemals missen!

Jenseits des Anstaltszaunes haben zum Gelingen dieser Arbeit ebenfalls noch zahlreiche Menschen auf unterschiedlichste Arten und Weisen beigetragen. Stellvertretend für alle seien hier nur die wichtigsten direkt angesprochen: Marco, Birgit, Silke, Timo, danke für all Eure kleinen und großen Hilfen – und für alles jenseits der Wissenschaft!

Abschließend möchte ich meine große Dankbarkeit gegenüber meinen Eltern Irmtraud und Jürgen sowie meinem Schwesterchen Isabell ausdrücken. Allen voran meine Eltern waren es, die mir diesen Weg ermöglicht haben und die den Keimling setzten für die Suche nach Antworten auf die immer wiederkehrenden Fragen nach dem Wie und dem Warum und ihm Nahrung gaben mit jedem Gang zum Bücherregal und den Worten »Das finden wir jetzt raus!«. Ich danke Euch für Euren immerwährenden Rückhalt und für all Euer Vertrauen.

Dank all dieser kollegialen, freundlichen und oftmals freundschaftlichen Unterstützung, dank der vielen lieben Aufmunterungen und willkommenen Ablenkungen kann ich nun endlich sagen:

»Es ist vollbracht!« ... Weiter geht's ...

Wendezelle, im Februar 2013

Julia Hornig

Kurzfassung

Aus porösen Materialien aufgebaute permeable Werkstoffe können im Explosionsschutz die Zündschutzart »Druckfeste Kapselung« um ein neues Konstruktionsprinzip erweitern, sodass ein neuartiges Schutzkonzept entsteht. Beruht das bisherige Schutzkonzept der »Druckfesten Kapselung« auf massiv ausgelegten Gehäusen und hinreichend kleinen Spaltweiten, damit sich eine im Gehäuseinneren auftretende Explosion nicht außerhalb des Gehäuses fortsetzen kann, können demgegenüber mit permeablen Werkstoffen, die als druckentlastende Elemente in die Gehäusewände integriert werden, deutlich schlankere Gehäusekonstruktionen entwickelt werden. Durch die Verwendung dieser Werkstoffe als Funktionswerkstoff ist es möglich, den Druck einer auftretenden Explosion ohne Zeitverzögerung zu entlasten und gleichzeitig einen Zünddurchschlag sicher zu verhindern. Dieses aus der Funktionsintegration der beiden Einzelfunktionen *Druckentlastung* und *Flammenlöschen* resultierende Schutzkonzept kann daher als *zünddurchschlagsichere Explosionsdruckentlastung* bezeichnet werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen konnten die Tragfähigkeit dieses neuartigen Schutzkonzepts hinsichtlich der sicherheitstechnischen Randbedingungen eindeutig belegen. Auf Basis der erzielten Ergebnisse ist es möglich, erstmals Aussagen über die Entlastungsfähigkeit und das thermische und mechanische Verhalten unterschiedlicher permeabler Werkstoffe bei Explosionen zu treffen sowie deren grundsätzliches Durchströmungsverhalten zu beschreiben. So ergaben die mit unterschiedlichen Gehäusegrößen durchgeführten Explosionsversuche 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. Druckreduzierungen von 50 % und mehr waren bereits mit wenigen Prozent relativer Entlastungsfläche zu erreichen. Zugleich konnte durch Temperaturmessungen an den Außenoberflächen der Elemente gezeigt werden, dass eine Einordnung innerhalb der Temperaturklasse T4 $(T_{O max} \leq 135 \,^{\circ}\text{C})$ mit vertretbarem Aufwand gut erreichbar ist. Insgesamt führen die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit zu sicherheitstechnisch validierten Gestaltungsrichtlinien, wie sich durch die Verwendung von permeablen Werkstoffen eine neue Generation von druckfesten Gehäusen konstruieren und somit die Zündschutzart »Druckfeste Kapselung« weiterentwickeln lässt.

Abstract

In explosion protection, permeable construction materials made of porous structures can extend the type of protection »flameproof enclosure« to a new construction principle, thus leading to a novel protection concept. Whereas the current protection concept of flameproof enclosures is based on solidly built enclosures and gap widths so small that an explosion occurring inside the enclosure cannot spread to the outside, considerably slimmer enclosure designs can be developed by means of permeable construction materials which are integrated into the enclosure walls acting as pressure relief elements. When used as functional material, these construction materials can relieve the pressure of an occurring explosion without time delay and, at the same time, safely avoid flame transmission. This protection concept, which results from the functional integration of the two individual functions *pressure relief* and *quenching*, can therefore be referred to as *flameproof explosion pressure relief*.

The test series carried out within the scope of this work clearly proved the suitability of this novel protection concept with regard to the safety-related marginal conditions. On the basis of the results achieved it is possible for the first time to make statements on the relief capability and the thermal and mechanical behaviour of different permeable construction materials during explosions and to describe their fundamental flow behaviour. Thus, the explosion tests carried out with enclosures of different sizes reveal a functional correlation between the attainable pressure relief and the integrated relief area which is characteristic to each material and can therefore be used to exactly describe the pressure relief capability of the material. Pressure reductions of 50% and more were already attainable with only a few percents of relative relief area. At the same time, temperature measurements carried out on the external surfaces of the elements have shown that a classification within the temperature class T₄ ($T_{O, max} \leq 135 \,^{\circ}\text{C}$) can be well achieved with a reasonable effort. All in all, the experimental results of this work lead to safety-related, validated guidelines on how a new generation of flameproof enclosures can be designed by using permeable materials and the type of protection »flameproof enclosure« can thus be further developed.

Inhaltsverzeichnis

A	Abbildungsverzeichnis			III	
Ta	Tabellenverzeichnis				
S	ymbo	lverzei	chnis	IX	
1	Einl	eitung		1	
2	Kor	strukti	ionsmethodik	5	
3	Exp	losions	sschutz	11	
	3.1	Zünd	schutzarten als Konstruktionsprinzip	12	
		3.1.1	Prinzip der »Druckfesten Kapselung«	13	
		3.1.2	Prüfung druckfester Gehäuse	15	
	3.2	Explo	sionsdynamik im geschlossenen Gehäuse	18	
		3.2.1	Explosionsgeschwindigkeit	19	
		3.2.2	Druck und Temperatur	21	
	3.3	Konst	ruktiver Explosionsschutz	26	
		3.3.1	Druckentlastung – Status quo	27	
		3.3.2	Druckentlastung – potentielle Anwendungen	31	

4	Permeable Werkstoffe 35				
	4.1	Dimensionelle Charakterisierung poröser Systeme	37		
		4.1.1 Porosität	37		
		4.1.2 Partikelgeometrie	39		
		4.1.3 Porengröße	40		
		4.1.4 Flammenlöschvermögen	43		
	4.2	Transporteigenschaften poröser Systeme	44		
		4.2.1 Durchströmung	44		
		4.2.2 Wärmeübertragung	48		
	4.3	Anwendungsgebiete	52		
5	Syst	emanalyse Druckentlastungselement	57		
	5.1	Anforderungen und Funktionsweise	58		
	5.2	Werkstoffe und Adaption	64		
	5.3	Druckentlastung	68		
	5.4	Durchströmbarkeit	86		
	5.5	Oberflächentemperatur	94		
	5.6	Druckentlastung vor einer Wand	104		
6	Rick	ntlinien für Gestaltung und Anwendung	107		
	6.1	6.1 Gestaltung integraler Druckentlastungselemente aus permeablen			
	Werkstoffen				
	6.2	Anwendungen einer zünddurchschlagsicheren Explosionsdruck-			
		entlastung	113		
7	Zus	ammenfassung und Ausblick	117		
A	nhai	ng 1	23		
A	Tech	nnische Zeichnungen – Probenadapter	125		
	A.1	Einzelteilzeichnung Probenadapter außen	126		
	A.2	Einzelteilzeichnung Probenadapter innen	127		
	A.3	ZSB-Zeichnung Probenadapter	128		
B	Vers	suchsergebnisse kleines Gehäuse – Druckentlastung und Zünddurch	l-		
	schlagsicherheit 129				
Li	Literaturverzeichnis 133				

Abbildungsverzeichnis

2.1	Generelles Vorgehen während des Konstruktionsprozesses nach	
	VDI 2221	9
3.1	Prinzipieller Aufbau eines nach der Zündschutzart »Druckfeste	
2.2	Kapselung« konstruierten Gehauses	14
3.2	der Gemischkonzentration φ für die Prüfgase der Explosions-	
	gruppe II Acetylen und Wasserstoff, Etnylen und Propan bei den Anfangsbedingungen T_{0} =293 K und n_{0} =1 bar	20
2 2	Bestimmung des Explosionsdrucks $n_{\rm ev}$ und des zeitlichen Druck-	20
5.5	anstiegs $(dr/dt)_{ex}$ aus dem zeitlichen Druckverlauf der Explosion	
	eines explosionsfähigen Gasgemisches nach DIN EN 15967	21
3.4	Explosionsdruck p_{ex} in Abhängigkeit von der Gemischkonzentrati-	
	on φ für Wasserstoff bei den Anfangsbedingungen T_0 =293 K und	
	$p_0 = 1013 \mathrm{mbar}$	22
3.5	Adiabate Verbrennungstemperatur <i>T</i> _{ad} in Abhängigkeit von der	
	Gemischkonzentration φ für die Prüfgase der Explosionsgruppe II	
	Acetylen und Wasserstoff, Ethylen und Propan bei den Anfangs-	
	bedingungen T_0 =293 K und p_0 =1 bar	25
3.6	Beispiele für Flammenlöschelemente von Einrichtungen zur flam-	
	menlosen Explosionsdruckentlastung nach DIN EN 16009	29

5.1	Systemanalyse: Das Druckentlastungselement (DEE) als integraler	
	Bestandteil eines Gehäuses der Zündschutzart »Druckfeste Kapse-	
	lung«	60
5.2	Anforderungsliste für das zu entwickelnde integrale Druckentlas-	
	tungselement	62
5.3	Funktionsstruktur zur Abbildung der Gesamtfunktion des Druck-	
	entlastungselements (DEE)	63
5.4	Versuchsgehäuse für die Druckentlastungsversuche	66
5.5	Entwurfsskizze des Probenadapters	67
5.6	Prinzipieller Versuchsaufbau für die Druckentlastungsversuche,	
-	exemplarisch dargestellt am kleinen Gehäuse	68
5.7	Zeitlicher Verlauf des Überdrucks Δp im kleinen Gehäuse bei ge-	
	schlossenem und bei maximal entlastetem Gehäuse mit Elementen	
	des Faserwerkstoffs der Porosität 80 %	71
5.8	Reduzierter Überdruck Δp_{red} im kleinen Gehäuse bezogen auf die	
	Entlastungsfläche $A_{\rm E}$ für unterschiedliche permeable Werkstoffe	73
5.9	Reduzierter Überdruck Δp_{red} im kleinen Gehäuse bezogen auf die	
	Entlastungsfläche $A_{\rm E}$ für die Faserwerkstoffe der Porositäten 60 %,	
	70% (10mm) und 80%	77
5.10	Reduzierter Überdruck Δp_{red} im kleinen, mittleren und großen	
	Gehäuse bezogen auf die relative Entlastungsfläche A _{rel} für den	
	Faserwerkstoff der Porosität 60%	81
5.11	Entwicklung der Anlauffarben und Oberflächenschäden auf den	
	Innenseiten von Entlastungselementen aus dem Faserwerkstoff der	
	Porosität 80% infolge zunehmender thermischer Belastungen	84
5.12	Beschädigungen infolge der thermischen Belastungen an der In-	
	nenoberfläche eines Elements aus dem Faserwerkstoff der Porosität	
	70 % (5 mm)	85
5.13	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Durchströmbarkeit	87
5.14	Darstellung der Messwerte der Durchströmungsversuche für zehn	
	Elemente des Faserwerkstoffs mit der nominellen Porosität 70%	
	(5 mm) im Bereich kleiner Differenzdrücke	88
5.15	Darstellung der Messwerte der Durchströmungsversuche nach	
	DIN EN ISO 4022 für das Element mit der Porosität 69,7 % in den	
	drei unterschiedlichen Druckbereichen	90
5.16	Darstellung der Messwerte der Durchströmungsversuche nach	
	DIN EN ISO 4022 für jeweils zwei Elemente aller untersuchten	
	Werkstoffe im Bereich der kleinen Differenzdrücke	92

Wärmebilder von einem in das kleine Versuchsgehäuse eingebau-	
ten Druckentlastungselement aus dem Faserwerkstoff der Porosität	
70 % (5 mm) während einer Explosion und nach der Explosion bei	
maximaler Erwärmung der Elementoberfläche	95
Versuchsaufbau zur Messung der Oberflächentemperatur der Druck-	
entlastungselemente	97
Prinzipieller Verlauf der Oberflächentemperatur eines Druckent-	
lastungselements in Bezug auf den Druckverlauf im Gehäuse	98
Temperaturverlauf an der Oberfläche eines Entlastungselements	
aus dem Faserwerkstoff der Porosität 70 % (5 mm) während einer	
Prüfung auf Zünddurchschlagsicherheit nach DIN EN 60079-1, bei	
der ein Zünddurchschlag auftrat	103
Versuchsaufbau für die Druckentlastung vor einer Wand	105
	Wärmebilder von einem in das kleine Versuchsgehäuse eingebau- ten Druckentlastungselement aus dem Faserwerkstoff der Porosität 70 % (5 mm) während einer Explosion und nach der Explosion bei maximaler Erwärmung der Elementoberfläche Versuchsaufbau zur Messung der Oberflächentemperatur der Druck- entlastungselemente

Tabellenverzeichnis

3.1	Temperaturklasseneinteilung bei elektrischen Geräten der Grup- pe II nach DIN EN 60070-0	16
3.2	Maximaler Explosionsdruck p_{max} der Prüfgase der Explosions- gruppe II Acetylen und Wasserstoff, Ethylen und Propan und die	10
	zugehörigen Gemischkonzentrationen φ in Luft	23
5.1	Übersicht der untersuchten Werkstoffe	65
5.2	Technische Daten der Versuchsgehäuse	66
5.3	Reduzierter Explosionsüberdruck Δp_{red} im geschlossenen und ma-	
	ximal entlasteten kleinen Gehäuse für alle untersuchten Werkstoffe	74
5.4	Auswertung der Funktionen $\Delta p_{red}(A_E)$; Schnittpunkte der Kurven	
	für die beiden Prüfgasgemische für alle gesinterten Werkstoffe	76
5.5	Grenzen der Zünddurchschlagsicherheit	79
5.6	Durchströmungskoeffizienten Permeabilität K_1 und Passabilität K_2	
	aller untersuchten Werkstoffe, ermittelt nach DIN EN ISO 4022 für	
	den Bereich der kleinen Differenzdrücke	93
5.7	Mittelwerte der maximalen Oberflächentemperatur $T_{O, max}$ in °C	
	eines Druckentlastungselements des Faserwerkstoffs der angege-	
	benen Porosität (und Dicke) bzw. des Sinterwerkstoffs in Abhän-	
	gigkeit von der Anzahl der eingesetzten Druckentlastungselemente	
	während der thermischen Prüfung nach DIN EN 60079-1	100

5.8	Reduzierter Explosionsüberdruck Δp_{red} im kleinen Gehäuse für den Faserwerkstoff der Porosität 70 % (10 mm) bei der Druckent- lastung vor einer Wand in unterschiedlichen Abständen 105
6.1	Übersicht der für eine zünddurchschlagsichere Reduzierung des Bezugsdrucks um 50 % erforderlichen Gesamtgröße der absoluten bzw. relativen Entlastungsflächen $A_{\rm E}$ und $A_{\rm rel}$ in Abhängigkeit vom ieweiligen Werkstoff für Gehäusevolumina von bis zu 1.71
6.2	Übersicht der für die Klassifizierung nach Temperaturklasse T4 erforderlichen Gesamtgröße der absoluten bzw. relativen Entlas- tungsflächen A_E und A_{rel} in Abhängigkeit vom jeweiligen Werk- stoff für Gehäusevolumina von bis zu 1,71
B.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckentlastungsversu- che und der Prüfungen auf Zünddurchschlagsicherheit im klei- nen Gehäuse bei Verwendung des entsprechenden Acetylen/Luft- Gemisches nach DIN EN 60079-1
B.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckentlastungsversuche und der Prüfungen auf Zünddurchschlagsicherheit im kleinen Gehäuse bei Verwendung des entsprechenden Wasserstoff/Luft- Gemisches nach DIN EN 60079-1

Symbolverzeichnis

Alle in dieser Arbeit verwendeten physikalischen Größen werden in den gesetzlichen Einheiten auf der Basis des Internationalen Einheitensystems (SI) angegeben. Ist die Einheit willkürlich gewählt oder in dem betrachteten Zusammenhang nicht entscheidend, wird zumindest die jeweilige Dimension unter Verwendung von Großbuchstaben (M für Masse, L für Länge) kenntlich gemacht. Grundsätzlich werden die nachstehenden Zeichen verwendet, etwaige Abweichungen und Ergänzungen sind andernfalls bei den jeweiligen Gleichungen oder Bildern genannt. Nach Möglichkeit entsprechen sie den in den einschlägigen Normen und der Grundlagenliteratur bereits eingeführten Zeichen.

Lateinische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
А	Querschnitt, Fläche	L ²
$A_{\rm E}$	effektive Entlastungsfläche	mm ²
$A_{\rm E,DEE}$	effektive Entlastungsfläche eines Druckentlastungs- elements (DEE)	mm ²

$A_{\rm E,max}$	maximal mögliche effektive Entlastungsfläche eines Gehäuses	mm ²
A_{I}	Gehäuseinnenoberfläche	mm ²
$A_{\rm P}$	Porenoberfläche	L ²
A _{Partikel}	Partikeloberfläche	L ²
A _{rel}	relative Entlastungsfläche – Verhältnis von Entlastungsfläche $A_{\rm E}$ zu Gehäuseinnen oberfläche $A_{\rm I}$	mm ² /mm ²
A_V	volumenbezogene spezifische Oberfläche eines Partikels – Verhältnis von A_{Partikel} zu V_{Partikel}	L^{-1}
d	Dicke des Entlastungselements	mm
<i>d</i> ₃₂	Sauterdurchmesser – Äquivalentdurchmesser als Maß für die mittlere Größe der Partikel eines porö- sen Systems	L
d _{aeq}	maximale Porengröße nach Bestimmung durch den Gasblasentest – Äquivalentdurchmesser der dem Durchmesser der Kugel entspricht, die eine idea- lisierte Struktur mit zylindrischen Kapillaren ho- mogenen Querschnitts gerade noch durchdringen kann	L
d _h	hydraulischer Durchmesser – Äquivalentdurchmes- ser als Maß für die mittlere Porengröße eines porö- sen Systems	L
K_1	Permeabilität (auch Viskositäts-Permeabilität)	m ²
<i>K</i> ₂	Passabilität (auch Trägheits-Permeabilität)	m
1	Länge	L
т	Masse	g
$m_{\rm M}$	Masse der festen Matrix eines porösen Systems	М

<i>n</i> ₀	Stoffmenge vor der Reaktion	mol
$n_{\rm v}$	Stoffmenge nach der Reaktion (Verbrennung)	mol
р	Druck (absolut)	bar
Δp	Überdruck (in Bezug auf den atmosphärischen Druck)	bar
p_0	Anfangsdruck	bar
$\Delta p_{\rm BD}$	Bezugsdruck – Höchstwert der gemessenen Explosi- onsüberdrücke Δp_{ex} beim Vergleich der Messwerte der Versuche aller für die jeweilige Explosionsgrup- pe vorgeschriebenen Prüfgasgemische zur Ermitt- lung des Bezugsdrucks	bar
p _{ex}	Explosionsdruck (absolut) – höchster auftretender Druck im geschlossenen Behälter bei Explosion ei- nes explosionsfähigen Gemisches bestimmter Kon- zentration unter festgelegten Testbedingungen	bar
$\Delta p_{\rm ex}$	Explosionsüberdruck	bar
$\Delta p_{\rm gl}$	Differenzdruck bei der Bestimmung der maximalen Porengröße mit Hilfe des Gasblasentests – Kapillar- druck in der größten Pore	Pa
$p_{\rm max}$	maximaler Explosionsdruck (absolut) (sicherheitstechnische Kenngröße) – Höchstwert aller bei Variation der Gemischkonzentration gemessenen Explosionsdrücke $p_{\rm ex}$	bar
$p_{\rm red}$	reduzierter Explosionsdruck infolge Druckentlas- tung	bar
$\Delta p_{\rm red}$	reduzierter (Explosions-)Überdruck infolge Druck- entlastung – Mittelwert der gemessenen Explosi- onsüberdrücke Δp_{ex} der Versuche des jeweiligen Prüfgases für die jeweils untersuchte Konfiguration	bar

$\Delta p_{\rm red, max}$	maximaler reduzierter (Explosions-)Überdruck in- folge Druckentlastung – Höchstwert der reduzier- ten Explosionsüberdrücke Δp_{red} beim Vergleich der Werte der Versuche aller verwendeten Prüfgasgemi- sche für eine bestimmte Entlastungsfläche A_E	bar
ġ	Wärmestromdichte – \dot{Q}/A	W/L^2
ġw	Wärmestromdichte an der Wand	W/L ²
Q	Wärmemenge	J
Ż	Wärmestrom	W
S	sichere Spaltweite – die für ein Gasgemisch maximale Spaltweite, bei der gerade kein Zünd- durchschlag mehr auftritt	mm
s _{aeq}	äquivalente Spaltweite	mm
s _{min}	Grenzspaltweite (auch Normspaltweite oder MESG-Wert) (sicherheitstechnische Kenngröße) – Minimum der konzentrationsabhängigen sicheren Spaltweiten <i>s</i> eines Gases	mm
t	Zeit	s
Т	thermodynamische Temperatur	К
T_0	Anfangstemperatur	K
T _{ad}	adiabate Flammentemperatur	Κ
T _O	Oberflächentemperatur	°C
T _{O, max}	maximale Oberflächentemperatur	°C
и	Messunsicherheit	
$v_{\rm A}$	Anströmgeschwindigkeit	m/s
$v_{ m L}$	laminare Flammengeschwindigkeit	m/s

V	Volumen	l
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
V _M	Volumen der festen Matrix eines porösen Systems	L ³
$V_{\rm P}$	Hohlraum- bzw. Porenvolumen eines porösen Systems	L ³
V _{Partikel}	Partikelvolumen	L ³
Vs	Gesamtvolumen eines porösen Systems (Schüttungsvolumen) – Summe aus Matrixvolumen $V_{\rm M}$ und Porenvolumen $V_{\rm P}$	L ³

Griechische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2K)$
γ	Oberflächenspannung der Prüfflüssigkeit beim Gas- blasentest	N/m
ε	Porosität	%
$\varepsilon_{\rm eff}$	effektive (oder offene) Porosität eines porösen Systems	%
e	Emissionsgrad eines realen Strahlers	
η	Dynamische Viskosität	kg/(ms)
θ	Temperatur	°C

$\vartheta_{\rm F}$	Fluidtemperatur	°C
ϑ_{W}	Wandtemperatur	°C
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
ę	Dichte	kg/m ³
Qм	Dichte des Matrixwerkstoffs eines porösen Systems	M/L^3
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante (= $5,67 \cdot 10^{-18} W/(m^2 K^4))$	
φ	Konzentration eines Gases in Luft	Vol%