

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Frank Engelmann / Karl-H. Grote / Daniel Sohn / Ramona Träger

## Weiterentwicklung der Konstruktionsmethodik für elektrische Betriebsmittel im Explosionsschutz

### ABSTRACT

In der chemischen und petrochemischen Industrie ist es häufig notwendig, elektrische Betriebsmittel in explosionsgefährdeten Bereichen einzusetzen, deren Einsatz innerhalb der europäischen Gemeinschaft durch die Richtlinie 94/9/EG [1] geregelt ist.

In diesen Geräten können auch im Normalbetrieb Zündquellen auftreten, die eine Explosion der umgebenen explosionsfähigen Atmosphäre auslösen können. Die *Druckfeste Kapselung* ist eine Lösung dieses Problems. Sie umgibt die Zündquelle und verhindert deren Wirksamwerden auf die äußere explosionsfähige Atmosphäre. Dabei muss die Kapselung dem Explosionsdruck standhalten. Zugleich müssen alle konstruktiv bedingten Gehäuseöffnungen, wie Wellenspalte, zünddurchschlagsicher sein. Das bedeutet, dass der bei der Explosion entstehende Freistrahle nicht das eventuell noch außerhalb des druckfest ausgelegten Gehäuses vorhandene zündfähige Gasgemisch zur Explosion bringt.

Aus diesen Randbedingungen ergibt sich ein hohes Anforderungsprofil an druckfest gekapselte Gehäuse, um Havarien oder die Gefährdung von Menschen zu verhindern. Dementsprechend ist die konstruktive Grundregel *Sicher* der Stufe der unmittelbaren Sicherheitstechnik anzuwenden [2]. Es ist zwingend ein *safe-life*-Verhalten, Prinzip des Sicheren Bestehens, erforderlich [3].

Deshalb sind grobe Richtwerte zur Konstruktion in den geltenden Normen DIN EN 60 079 Teil 0 (VDE 0170/0171 Teil 1) [4] und DIN EN 60 079 Teil 1 (VDE 0170/0171 Teil 5) [5] festgelegt.

Um die Sicherheit von explosionsgeschützten elektrischen Betriebsmitteln gewährleisten zu können, müssen diese einer Baumusterprüfung bei einer in den Richtlinien benannten Prüfstelle, zum Beispiel der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) unterzogen werden. Hier werden die Schwachstellen der Konstruktion sichtbar, die verschiedene Ursachen haben. Zum einen lassen sich die Nichtbeachtung von Konstruktionsgerechtigkeiten und die Unkenntnis über die Probleme und Eigenheiten der betrieblichen Fertigung anführen. Zum anderen gewähren die Richtwerte der Spaltabmessungen aus der DIN nicht in jedem Fall die Sicherheit eines zünddurchschlagsicheren Spaltes, denn die in einer Druckkapselung ablaufenden Prozesse sind nicht berechenbar und deshalb ist es unmöglich exakte Angaben über sichere Spaltweiten etc. zu machen. Die strikte konstruktive Umsetzung der DIN-Richtwerte ist für den spezifischen Anwendungsfall oft nicht richtig, und die Korrektur dann kosten- und zeitintensiv.

Ursache ist das Fehlen einer auf dieses Fachgebiet abgestimmten methodischen Konstruktionsweise unter Nutzung der dazugehörigen Hilfsmittel, wie Konstruktionskataloge, Checklisten und Gestaltungsrichtlinien. Ziel des Forschungsvorhabens ist, diese Hilfsmittel zu entwickeln und dem Ingenieur zur Verfügung zu stellen.

## Einleitung

Im Explosionsschutz, wie auch in vielen anderen technischen Bereichen, ist der technische Standard in den geltenden Normen abgebildet [6], die als Empfehlung für eine technisch optimale und gefahrungsfreie Konstruktion zur Entwicklung einer einwandfreien, technischen Funktion zu verstehen sind.

Die EU-Richtlinie 94/9/EG "Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen" (auch unter den Namen ATEX 100a (95a) bekannt) gilt für die Hersteller [1]. Auf nationaler Ebene ist die europäische Richtlinie 94/4/EG [1] in der 11. Verordnung des Gesetzes über technische Arbeitsmittel und Verbraucherprodukte (11.GPSGV) [7] niedergelegt. Zur Umsetzung von Arbeitsschutzvorrichtungen sind die Explosionsschutz-Regeln EX-RL (BGR 104) der Berufsgenossenschaft [8] zugrunde zulegen.

Die Umsetzung der Forderungen der EU-Richtlinie 94/9/EG [1] für die Hersteller wird durch harmonisierte Normen wieder gegeben. In der DIN EN 1127-1 "Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz" [9] wird auf die Grundlagen und die Methodik eingegangen. Von besonderer Bedeutung für die explosionsschutzgeschützten elektrischen Betriebsmittel ist die Normenreihe DIN EN 60079 (VDE 0170/0171) und hier wiederum die zwei Normen für die *Druckfeste Kapselung* von Betriebsmitteln: Die DIN EN 60079-0 „Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche – Teil 0: Allgemeine Bedingungen“ [4] behandelt die Anforderungen für alle elektrischen Betriebsmittel, die ergänzenden Anforderungen, Prüfungen, die Kennzeichnung und die Betriebsanleitung; die DIN EN 60079-1 „Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche – Teil 1: Druckfeste Kapselung 'd'“ [5] regelt besondere Bauanforderungen, andere Anforderungen und Prüfungen.

Zur Umsetzung des Grundprinzips des Explosionsschutzes, dass gleichzeitige Auftreten von explosivem Medium, Sauerstoff und einer Zündquelle zu verhindern, werden entsprechend den bestehenden Anforderungen an das Betriebsmittel verschiedene Zündschutzarten<sup>1</sup> nach EN 60079-0 [4] eingesetzt. Sicherheitstechnisch sind alle Zündschutzarten als gleichwertig zu betrachten, wobei in die Auswahl zur Konstruktion die Art, Funktion und der Anwendungsfall des Gerätes, aber auch wirtschaftliche Aspekte, eingehen.

---

<sup>1</sup> Zündschutzarten sind "die besonderen Maßnahmen, die bei elektrischen Betriebsmitteln angewendet werden, um die Zündung einer umgebenden explosionsfähigen Atmosphäre zu verhindern". [10]

Eine Zündschutzart ist die *Druckfeste Kapselung* ("d"). Hier wird das physikalische Prinzip des Verhinderns der Entzündung außerhalb des Gehäuses angewandt [10]. Mit Hilfe konstruktiver Maßnahmen soll bei einer Explosion im Gehäuse der Zünddurchschlag verhindert werden. Dabei muss die Forderung erfüllt werden, dass das Gehäuse keinen strukturellen Schaden erfährt, und dass durch Spalte oder Öffnungen keine zündgefährdenden heißen Gase oder Flammen nach außen gelangen (Abbildung 1). Anwendung findet diese Zündschutzart besonders bei Motoren, Schaltkästen und -geräten, Leuchten und Steckvorrichtungen. Durch die Konstruktion des Betriebsmittels muss die Zündschutzart sichergestellt sein. Dazu sind zünddurchschlagsichere Spalte zu verwenden. Das Gehäuse muss dem auftretenden Druck entsprechend dimensioniert sein und die Temperaturgrenze an heißen Oberflächen einhalten. Eine Lösung zu finden, die den Anforderungen an explosionsgeschützte elektrische Geräte gerecht wird, ist zur Zeit oft ein sehr aufwendiger iterativer Prozess.

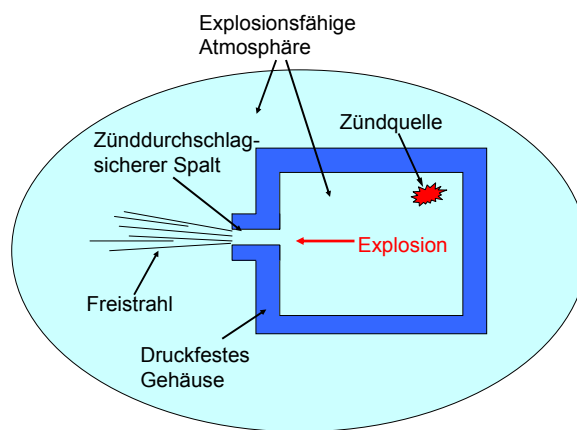


Abbildung 1: Schema einer *Druckfesten Kapselung*

### **Anforderungsprofil an *Druckfeste Kapselung***

Bei der Zündschutzart *Druckfeste Kapselung* wird die Zündquelle durch die Kapselung eingeschlossen, wobei durch die bauartbedingte Spaltöffnungen, wie z. B. dem Wellendurchtritt des elektrischen Motors oder dem Verschraubverschluss einer Gewindeöffnung in einem Gehäuse, explosionsfähige Atmosphäre eindringen kann, wodurch es im Inneren der Kapselung zu einer Explosion kommen kann (Abbildung 1) [11, 12].

Auf drei wesentlichen Forderungen beruht das Prinzip der *Druckfesten Kapselung* [12].

1. Das Gehäuse muss dem Explosionsdruck im Inneren ohne plastische Verformungen standhalten. Das stellt hohe Forderungen an den Werkstoff und die konstruktive Werkstoffgestaltung hinsichtlich Festigkeit und Stabilität. In der DIN EN 60079-1

(VDE0170/0171 Teil 5) [5] werden im Abschnitt 12 die Bedingungen für das Bestehen der Baumusterprüfung<sup>2</sup> angegeben. Sie enthält die zu berücksichtigenden Forderungen und Verweise für die zu bestehenden Prüfungen. Zuerst ist der Explosionsdruck (Bezugsdruck) zu bestimmen, dann die Überdruckprüfung und anschließend die Zünddurchschlagssicherheit zu bestehen. Weitere Prüfungen betreffen unter anderem die Wärme- und Kältebeständigkeit. Auch werkstoffbedingte Prüfungen sind durchzuführen. Nichtmetallische Gehäuse wie z.B. Kunststoffgehäuse sind auf Lichtechtheit, chemische Beständigkeit, der Oberflächenwiderstand, die statische Ladung und das Kriechstromverhalten zu prüfen. Geschweißte Gehäuse sind grundsätzlich einer Stückprüfung<sup>3</sup> zu unterziehen und müssen eine statische oder dynamische Druckprüfung mit dem 1,5fachen des Bezugsdrucks bestehen. Alle Gehäuse müssen einem definierten Schlag von außen und tragbare Betriebsmittel einer Fallprüfung standhalten [4, 5, 13].

2. Der Zünddurchschlag muss sicher verhindert werden. Das heißt, die Explosion darf sich nicht durch die bauartbedingten Spalte nach außen in die umgebende explosionsfähige Atmosphäre ausbreiten. Die DIN EN 60079-1 (VDE0170/0171 Teil 5) [5] definiert, je nach geplantem Einsatzbereich des Betriebsmittels, Mindestanforderungen an die Ausführung der Spalte, die zylindrisch, eben, als zusammengesetzter Spalt oder als Gewinde mit oder ohne Dichtung ausgeführt sein können. Bei Kunststoffen muss die Beständigkeit der Spaltgeometrie gegen Flammenerosion gegeben sein.
3. Alle äußeren Oberflächentemperaturen müssen die vorgeschriebenen Temperaturklassen einhalten [12].

Das Innere eines Gehäuses muss mit einem wirksamen Dichtsystem gegen Schmutz und Feuchte geschützt werden. Der IP-Schutzgrad ist nach DIN EN 60529 [14] bzw. DIN EN 60034-5 [15] auszuführen und zu prüfen.

Zusätzliche Anforderungen, in den Normen DIN EN 60079-0 [4] und DIN EN 60079-1 [5] definiert, sind beim Einsatz von: Lagern, lichtdurchlässigen Teilen, Atmungs- und Entwässerungseinrichtungen, Verschlüssen, Verschraubungen und Einführungen zu erfüllen.

Durch die am Einsatzort vorliegenden Umgebungsbedingungen (Bewitterung, Alterung, Korrosion, Chemikalieneinflüsse) und die Bedienung, Handhabung, Instandhaltung, Wartung, Reparatur, Recycling, Transport müssen zusätzliche Anforderungen an die Gehäuse gestellt werden.

---

<sup>2</sup> Unter einer Baumusterprüfung versteht man, dass "eine benannte Stelle prüft und bestätigt, dass ein für die betreffende Produktion repräsentatives Muster den einschlägigen Vorschriften der Richtlinie entspricht." [1]

<sup>3</sup> Jedes einzelne Produkt ist einer Prüfung zu unterziehen.

## **Defizite der vorhandenen Konstruktionen und deren Ursachen**

Fehler in der Konstruktion zeigen sich häufig erst während der vorgeschriebenen EG-Baumusterprüfungen bei der zugelassenen Zertifizierungsstellen (z.B. der PTB), weil die vorgeschriebenen Tests nicht bestanden werden. Die Behebung der Konstruktionsfehler ist zu diesem späten Zeitpunkt meistens mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden.

Tabelle 1 zeigt Defizite bzw. Schwachstellen, die während der Tests auftreten und beschreibt, worin die Ursachen liegen.

So werden Geräte bei der Stoßprüfung wegen bleibender Schädigungen wie Risse, Brüche und Zerplatzungen bemängelt. Bei Kunststoffgehäusen ist die Schlagempfindlichkeit von Bedeutung, weshalb die Stoßprüfung in Kombination mit einer hohen und einer tiefen Temperaturbeanspruchung durchgeführt wird. Schaugläser reißen auch aufgrund falscher Einbettungen in das Gehäuse, z.B. mit sehr harten bzw. spröden Werkstoff wie Epoxidharz.

Bei der Bezugsdruckermittlung treten selten Schäden an den druckfest gekapselten Betriebsmittel auf. Der ermittelte Bezugsdruck ist Voraussetzung für die Bestimmung des statischen Prüfdrucks, der bei der Stückprüfung das 1,5fache und bei der Typprüfung das 4fache des Bezugsdrucks beträgt. Beim dynamischen Prüfdruck wird das Gas-Luft-Gemisch auf das 1,5fache des Bezugsdrucks vor-komprimiert. Unkenntnis über zu erwartende Bezugsdrücke führt zu einer Unter- bzw. Überdimensionierung der Gehäuse. Eine Unterdimensionierung hat den erwähnten Ausfall des Gehäuses zur Folge. Einfluss auf den Bezugsdruck haben die Größe des Gehäuses sowie das Verhältnis von Gehäusequerschnitt zu Länge, das Luft-Gas-Gemisch, Gehäuseeinbauten und eventuelle Teilungen. Bei den statischen und dynamischen Druckprüfungen kommt es vorwiegend zu den in Tabelle 1 angeführten Mängeln. Falsche Werkstoffwahl aufgrund unzureichender Werkstoffbezeichnung des Kunststoffes sind Ursachen für festigkeitsbedingte Ausfälle. Eine korrekte, vollständige Werkstoffbezeichnung ist notwendig, wenn der Hersteller des Kunststoffes dem Grundstoff ein Recyclat hinzusetzt. Besteht das Recyclat aus Abfällen verschiedener Herkunft und mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen, wie z. B. brandhemmende Additive, können bestimmte Eigenschaften wie z. B. die Reißdehnung oder der Schmelzindex negativ beeinflusst werden [16]. Gehäusekomponenten aus Kunststoff müssen kunststoffgerecht gestaltet werden, um ein Versagen zu verhindern. Beispielsweise sind die Kantenradien oft zu klein, es werden zu wenig Rippen angebracht oder unterschiedliche Wandstärken kommen zum Einsatz. Gewinde an Kunststoffteilen müssen als Trapez- oder Rundgewinde ausgeführt werden und nicht als metrische ISO-Gewinde. Die Gewindesteigung hat Einfluss auf die mechanische Festigkeit. Bei Kunststoffen kann es bei „kleinen“ Gewindesteigungen dazu kommen, dass bei der Prüfung der Deckel aus dem Gehäuse gerissen wird. Ebenso sind man-

gelnde Kenntnisse in der Verbindungstechnik Ursache für Ausfälle bei den statischen Druckprüfungen. Das Verhalten von Dichtungen, Klebstoffen und Dichtmassen unter Druckeinwirkungen wird oft falsch eingeschätzt. Die Klebeflächen werden oftmals zu schmal ausgeführt und die Klebung kann für Serienprodukte nicht wie unter Laborbedingungen erfolgen, was zu Fehlklebstellen führt.

Tabelle 1: Erscheinungen und Ursachen für Ausfälle von druckfest gekapselten Gehäusen bei den Prüfungen der Baumusterprüfung

	Defizite	Ursachen
<b>Zünddurchschlag</b>		
Motoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zünddurchschlag häufig am Spalt Welle-Gehäuse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unzureichend erfassten Vorgänge bei Explosionen</li> <li>• Teilweise noch zu groben Vorgaben in den Normen für Grenzabmessungen von Spalten</li> <li>• Geringe oder nicht vorhandene Erfahrung des Konstrukteurs</li> </ul>
Leuchten der Zündgruppe IIC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zünddurchschlag im Bereich von Kabeinführungen</li> </ul>	
<b>Statische und dynamische Druckprüfung</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberflächen bekommen Risse oder andere Schädigungen wie plastische Verformungen.</li> <li>• An den Gehäusen entstehen Risse in der Nähe der Rippen.</li> <li>• Schaugläser reißen.</li> <li>• Verbindungsstellen reißen auf. Besonders häufig wird dieses Verhalten bei Leuchtstofflampen am Übergang zwischen Glasrohr zum "Fuß" beobachtet.</li> <li>• Dichtungen werden durchlässig.</li> <li>• Gewindeteile reißen aus.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falsche Werkstoffwahl z.B durch unzureichende Werkstoffbezeichnung</li> <li>• Unzureichende Kenntnisse der Werkstoffgestaltung</li> <li>• Mangelnde Kenntnisse der Verbindungstechnik</li> </ul>
<b>Stoßprüfung</b>		
Betriebsmittel mit Kunststoffgehäusen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risse, Zerplatzungen und Brüche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falsche Einbettungen in das Gehäuse</li> <li>• Schlagempfindlichkeit des Werkstoffs</li> </ul>



Bei Explosionsversuchen in der Prüfpraxis treten immer wieder Zünddurchschläge auf, besonders bei Motoren am Spalt Welle-Gehäuse. Die Auswertung von Protokollen der PTB aus den letzten 6 Jahren hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens von Zünddurchschlägen ergab, dass 15 von 72 geprüften Motoren den ersten Test nicht bestanden haben, was einer Quote von ca. 21% entspricht. Bei druckfest gekapselten Gehäusen von Leuchten, Schaltgeräten und -kästen ist der Zünddurchschlag ein geringeres Problem, kommt aber bei Leuchten der Zündgruppe IIC im Bereich von Kabeleinführungen zum Tragen.

Ursachen für den Zünddurchschlag sind die noch unzureichend erfassten Vorgänge bei Explosionen, aber auch die teilweise noch zu ungenauen Vorgaben in den Normen für Grenzabmessungen von Spalten und die geringen oder oftmals nicht vorhandenen Erfahrungen des Konstrukteurs [17].

### **Konstruktionsmethodik**

Nach VDI 2222 [18] wird eine systematische Lösungsfindung durch bewährte Vorgehensmethoden und praktische Hilfsmittel wie zum Beispiel Konstruktionskataloge, Lösungssammlungen und Checklisten sehr verbessert. Zu diesen Hilfsmitteln zählen auch Gestaltungsrichtlinien. Im folgenden Abschnitt sind Gestaltungsrichtlinien für den Explosionsschutz zusammengestellt. Sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da sie lediglich den Zwischenstand der Forschungsarbeiten repräsentieren und demzufolge noch weiter präzisiert und vervollständigt werden.

In der Literatur werden Gestaltungsrichtlinien in drei Bereiche unterteilt [19, 20, 21]: Zunächst den Einleitungsteil mit der Zielsetzung und dem grundsätzlichen Problem, zu dem die jeweilige Gestaltungsrichtlinie eine Aussage trifft. Im zweiten Teil werden Ursachen und Erscheinungen des Problems behandelt und im dritten Teil die anzuwendenden konstruktiven Maßnahmen, die den technischen Entwurf, den Anforderungen entsprechend besser gestalten sollen.

Diese Aufteilung wurde auch bei den hier erarbeiteten Richtlinien berücksichtigt, um eine optimale Verständlichkeit für den Konstrukteur und eine Einheitlichkeit zu erreichen.

Explosionsschutzmittel, die in der Zündschutzart "d" gefertigt sind, werden während ihrer Betriebsdauer von einer unbestimmten Anzahl von Explosionen beaufschlagt, die keinerlei Beschädigungen des Gehäuses verursachen dürfen, damit die Sicherheit dieses Schutzsystems weiterhin gewährleistet werden kann.

Die hohen Anforderungen an die Explosionsschutzgerechtigkeit der Druckkapselung betreffen:

- den Explosionsdruck,
- den Zünddurchschlag und

- die Oberflächentemperatur.

Ziel der Gestaltungsrichtlinien ist es, die Sicherheit der *Druckfesten Kapselung* unter minimalen Konstruktions-, Werkstoff- und Fertigungsaufwand zu gewährleisten, und dies mit minimalem Aufwand. Weiterhin müssen aber alle anderen Gestaltungsrichtlinien beachtet werden. Dazu müssen alle weiteren Einflussgrößen bekannt sein, die eine negative Beeinträchtigung der *Druckfesten Kapselung* zur Folge haben können. Stehen diese Größen fest, kann mit konstruktiven Maßnahmen entgegen gewirkt werden. Diese Einflussgrößen werden im Folgenden detaillierter erläutert.

### **Gestaltungsrichtlinien für die *Druckfeste Kapselung* im sekundären Explosionsschutz**

#### *Richtlinien für eine explosionsdruckgerechte Konstruktion*

Bei einer Explosion kommt es aufgrund der Stoffumsetzung von Brennstoff und Luft innerhalb eines geschlossenen adiabaten Behälters, wie in einem druckfest gekapselten Elektromotorgehäuse, zu einem Druckanstieg. Dabei ist der maximale auftretende Druck bei einem Brennstoff abhängig von:

- der Anfangstemperatur und dem Anfangsdruck,
- dem Sauerstoffanteil im explosionsfähigen Gemisch,
- der Turbulenz des explosionsfähigen Gemisches vor der Entzündung,
- der Größe und der Form des Behälters,
- der Art und der Energie der Zündquelle,
- der Lage der Zündquelle innerhalb des Behälters [22, 23].

Der zeitliche Druckanstieg  $dp/dt$  ist ein Maß für die Flammgeschwindigkeit und somit für die Explosionsheftigkeit. Er ist abhängig von den gleichen Größen wie der maximale Explosionsdruck [22, 23].

Die Größe und Form des Gehäuses, die Lage der Zündquelle und die Art und Energie der Zündquelle kann der Konstrukteur beeinflussen. Die Entscheidung zur Nutzung der Zündschutzart *Druckfeste Kapselung* setzt die druckfeste Bauweise voraus. Das bedeutet, es dürfen keine plastischen Verformen am Gehäuse nach einer Explosion zurückbleiben.

Konstruktiv kann die Anforderung der plastischen Nichtverformbarkeit des Gehäuses durch die Variierung der geometrischen und stofflichen Merkmale (Tabelle 2) erfolgen [19].

Die stofflichen Merkmale können durch die Werkstoffauswahl und etwaiger Nachbehandlungen bestimmt werden. Die geometrischen Merkmale hingegen können auf verschiedene Arten optimiert werden.

Tabelle 2: Beeinflussungsgrößen der stofflichen und geometrischen Merkmale

Stoffliche Merkmale:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hooke'sche Gerade sollte ausgeprägt sein.</li> <li>• Möglichst hoher Elastizitätsmodul um die Dehnung gering zu halten und so im elastischen Bereich der Hooke'schen Geraden zu bleiben.</li> <li>• Möglichst hohe Streckgrenze <math>R_e</math>, um die Gefahr von Rissen zu minimieren.</li> <li>• Niedrige Sprödbriechanfälligkeit (hohe Schlagzähigkeit).</li> </ul>
Geometrische Merkmale:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohes Flächenträgheitsmoment um die Dehnung gering zu halten und so im elastischen Bereich der Hooke'schen Gerade zu bleiben.</li> <li>• Optimierung der Form des Gehäuses, sodass sie druckgerecht ist.</li> </ul>

Abbildung 2a zeigt die Steigerung des Flächenträgheitsmomentes durch Verrippung und Abbildung 2b durch eine Wanddickensteigerung. Es ist auch möglich Sicken zur Vergrößerung des Flächenträgheitsmomentes am Bauteil anzubringen.

Die Druckgerechtigkeit wird durch die Gestalt des Gehäuses bestimmt. So sollten langgestreckte Armaturen das Verhältnis von Länge zu Durchmesser bzw. Breite von  $L/D > 5$  nicht überschreiten. Dadurch wird verhindert, dass es während einer Explosion zu einer Vorkomprimierung des Brennstoff-Luft-Gemisches innerhalb des Gehäuses kommt und dadurch der maximale Explosionsdruck um ein Vielfaches ansteigt [24]. Die Gehäuseform sollte an eine sphärische Geometrie angelehnt sein, so dass die Belastungen auf die Wandungen bei einer Explosion minimiert werden (Abbildung 2c).

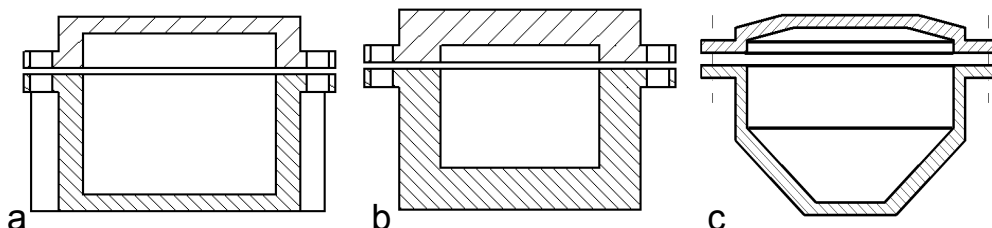
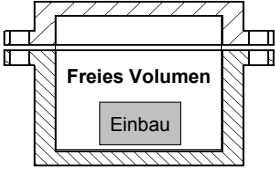
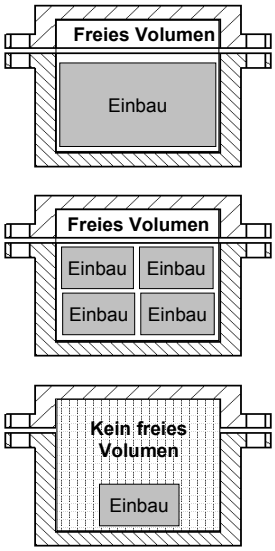


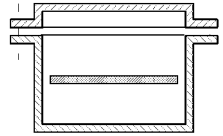
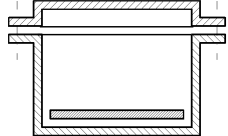
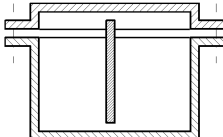
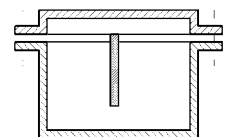
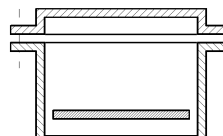
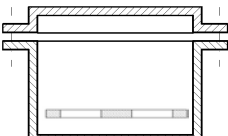
Abbildung 2: Explosionsdruckfeste Gehäusegeometrien

Tabelle 3: Verhältnis vom freien Volumen zum Gesamtvolumen

Gestaltungsrichtlinie	nicht explosionschutzgerecht	explosionsschutzgerecht
Das freie Volumen in Gehäusen minimieren.		

Da das Volumen des explosiven Gases sowohl den Explosionsdruck, als auch die Explosionsgeschwindigkeit mitbestimmt, sollte das freie Volumen innerhalb einer *Druckfesten Kapselung* so gering wie möglich gehalten werden. Tabelle 3 zeigt die falsche und richtige Ausführungen einer Druckkapselung. Wie aus der unteren Darstellung zu entnehmen ist, kann das Volumen durch bestimmte Füllstoffe minimiert werden. Dabei müssen aber eventuelle Temperaturprobleme, zum Beispiel ein Wärmestau durch die Einbauten oder die Überschreitung der maximalen Oberflächentemperatur, beachtet werden.

Tabelle 4: Leitlinie zum Gestalten von Raumunterteilungen

Gestaltungsrichtlinie	nicht explosionschutzgerecht	explosionsschutzgerecht
Das Volumenverhältnis der Unterteilten Räume ist so groß wie möglich zu gestalten. Richtwert: Volumen <10% hinter der Trennung		
Das Verhältnis von Trennwandgröße zu Gehäusequerschnitt ist so zu gestalten, dass eine Flammenausbreitung im Gehäuseinneren nicht behindert, da sonst eine Vorkompression erfolgt. Richtwert: 20% offen und 80% verdeckt		
Das Verhältnis von freier Fläche zu Gehäusequerschnitt ist mit möglichst großen Bohrungen zu erhöhen. Richtwert: 20% offen und 80% verdeckt		

Eine zu vermeidende Vorkomprimierung des Explosionsgemisches wird aber nicht nur durch eine sehr schlanke Geometrie begünstigt. Wenn der Explosionsraum, also die Innengeometrie des Druckgehäuses so beschaffen ist, dass zwei oder mehr Volumina des Gehäuses durch eine verhältnismäßig kleine Öffnung verbunden sind, so kommt es ebenfalls zur Vorkomprimierung [24]. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 4 gezeigten Leitlinien, die in Zusammenarbeit mit der PTB Braunschweig entwickelt wurden.

#### *Richtlinien für eine zünddurchschlaggerechte Konstruktion*

Unter einem Zünddurchschlag ist das Fortschreiten einer Explosion durch enge Spalte in die umgebende explosionsfähige Atmosphäre zu verstehen. Dabei ist die Wechselwirkung von chemischen Reaktionen und turbulenter Strömung von besonderer Bedeutung. Das Verhältnis von Erwärmung und Abkühlung des austretenden heißen Gases aufgrund der Energiefreisetzung durch die chemische Reaktion bzw. Einmischung von unverbranntem Gemisch entscheidet, ob es zu einem Zünddurchschlag kommt [25].

Der Zünddurchschlag wird von den Eigenschaften der explosionsfähigen Atmosphäre, des Gehäuses und der Zündquelle maßgeblich bestimmt [26].

Das Gehäuse und die Zündquelle lassen sich konstruktiv beeinflussen. Die Parameter des Gehäuses sind dabei:

- Gehäuseform (kugel-, quader-, zylinderförmig etc.),
- Strömungshindernisse (Einbauten, Unterteilungen in mehrere Kammern),
- freies Volumen,
- Form, Anzahl und Anordnung von Spalten im Gehäuse.

Die Parameter der Eigenschaften der Zündquelle sind die eingekoppelte Energiemenge, die Lage und die Art der Zündquelle im Gehäuse.

Die zünddurchschlaggerechte Bauweise ist in weiten Teilen mit der explosionsdruckgerechten Bauweise identisch, weil die Vermeidung eines hohen Explosionsdruckes auch das Zünddurchschlagverhalten positiv beeinflusst. So sind die Abhängigkeiten der Gehäuseform (kugel-, quader-, zylinderförmig etc.), der Strömungshindernissen (Einbauten, Unterteilungen in mehrere Kammern) und des freien Volumens auf den Zünddurchschlag im vorigen Unterpunkt „Richtlinien zur explosionsdruckgerechten Konstruktion“ zusammengefasst.

Die Form, Anzahl und Anordnung von Spalten im Gehäuse werden hingegen konstruktiv beeinflusst und zusammen mit den Eigenschaften der Zündquelle in diesem Unterkapitel diskutiert.

Allgemein sollte die Anzahl der Spalte so gering wie möglich gehalten werden, da die Spalte in engen Toleranzen gefertigt werden müssen und somit eine Vielzahl von Spalten hohe

Nachbearbeitungskosten verursachen. Die Anordnung der Spalte zueinander wird weitestgehend durch die Funktion festgelegt und eine Einflussnahme auf den Zünddurchschlag konnte noch nicht nachgewiesen werden.

Die Form der Spalte wird von der Funktion und durch die Norm bestimmt. Die Zünddurchschlagsicherheit steigt mit steigender Spaltlänge. Jedoch ist der Verlauf nicht linear, sondern der Einfluss der Spaltlänge nimmt ab einer zu bestimmenden Spaltlänge wieder ab. Sehr große Spaltlängen sind zu vermeiden.

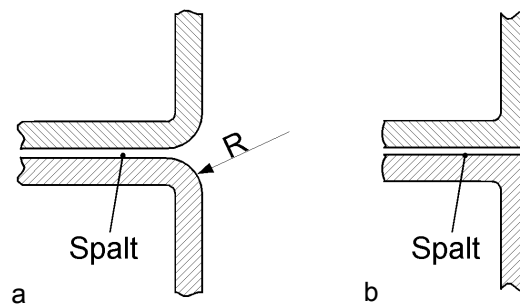


Abbildung 3: Spalteinlaufgeometrien

Um die Spaltlänge zu erhöhen und die Spaltströmung zünddurchschlagsicher zu beeinflussen, sollte die Form des Spaltes allerdings keine Verrundungen am Spalteintritt aufweisen, wie in Abbildung 3a zu sehen ist.

Die Rauheit der Spaltoberfläche beeinflusst den Wärmeübergang vom heißen Explosionsgas auf das Gehäuse. Dadurch besteht ein Einfluss auf den Zünddurchschlag. Die Rauheiten sollten im Bereich der Norm ( $R_a < 6,3 \mu\text{m}$ ) liegen.

Der Ort der Zündung ist für den Zünddurchschlag sehr wichtig, und hängt primär von der Entfernung der Zündquelle zum Spalt ab und nimmt mit kleiner werdender Normspaltweite ab. Dabei muss eine Unterteilung der Zündquellenabstände in horizontale und vertikale Richtung vorgenommen werden. In Abbildung 4a und c sind für Gehäuse mit Länge/Breite (Durchmesser)-Verhältnis kleiner 5 ungünstige Zündquellenpositionen zu sehen.

In horizontaler Richtung sollte für diese Gehäuseart die Zündquelle so weit entfernt wie möglich vom Spalt sein (Abbildung 4b), in vertikaler Richtung hingehen, so nah wie möglich am Spalt (Abbildung 4d). Zusammenfassend gilt, dass die Zündquelle möglichst mittig in der Ebene des Spaltes positioniert werden sollte [26].

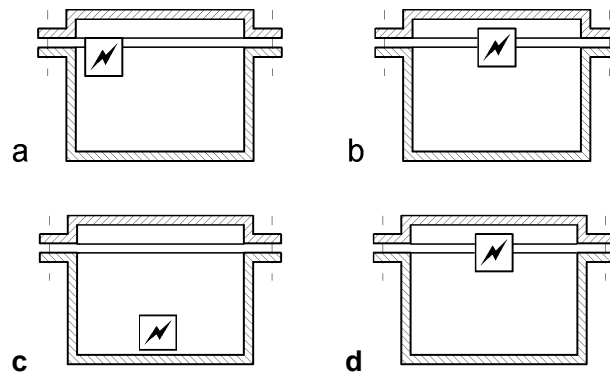


Abbildung 4: Horizontale und vertikale Lage der Zündquelle,  
(a und c ungünstige, b und d günstige Anordnungen)

Mögliche Zündquellen wie Kontakte von Schaltern oder heiße Flächen sind daher möglichst nicht in unmittelbarer Nähe zum zünddurchschlagsicheren Spalt anzuordnen.

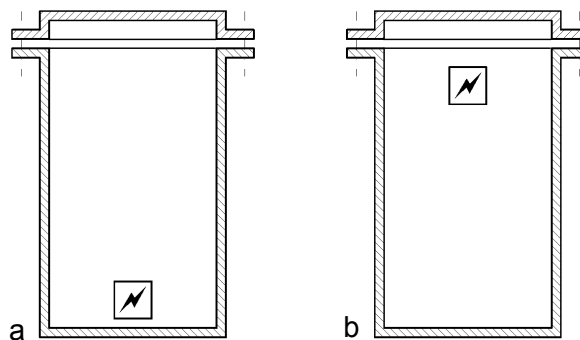


Abbildung 5: Vertikale Lage der Zündquelle bei langgezogenen Gehäusen,  
(b ist die günstige Anordnung)

Bei sehr tiefen Gehäusen (Länge/Breite - Verhältnis größer gleich 5) (Abbildung 5) ist im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Gehäuseformen darauf zu achten, dass die Zündquelle in der Nähe des zünddurchschlagsicheren Spaltes (Abbildung 5a) liegt, weil sonst bei einer Explosion der lange Flammenweg zum Spalt einen erhöhten Druck bewirkt, und es kann zu einem Zünddurchschlag kommen. Eine Anordnung der Zündquelle näher am Spalt, ist für solche Gehäuseformen besonders zu bevorzugen (Abbildung 5b).

#### *Richtlinien für eine oberflächentemperaturgerechte Konstruktion*

Die niedrigste Temperatur, bei der unter vorgegebenen Versuchsbedingungen ein Brennstoff oder Brennstoffgemisch zur Explosion gebracht wird, wird als Entzündungstemperatur bezeichnet [23]. Bei druckfest gekapselten elektrischen Betriebsmitteln wird diese Temperatur hauptsächlich von der

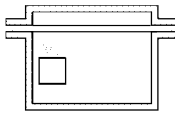
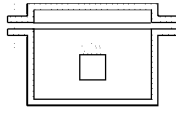
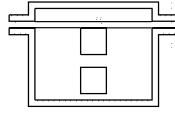
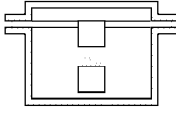


Abwärme der Einbauten bestimmt. Konzentriert sich die Abwärme auf einen bestimmten Punkt an der Gehäuseoberfläche, kann die Zündtemperatur erreicht werden und die umgebende explosionsfähige Atmosphäre entzündet sich. Deshalb muss das Gehäuse diese Wärme zum Beispiel durch Wärmekonvektion oder -leitung abgeben oder die Wärmequelle muss günstiger angeordnet werden.

Sind die zulässigen maximalen Oberflächentemperaturen laut Norm überschritten, müssen zusätzliche Maßnahmen zur Kühlung ergriffen werden. Dabei ist die Oberflächentemperatur des Gehäuses von der Einbaustelle der Komponenten abhängig. Die Konzentration von Einbauten mit hoher Verlustleistung an der Gehäusewand kann zu einer unzulässig hohen Erwärmung an dieser Stelle führen. Deshalb muss versucht werden, trotz des konstanten Wärmestroms, eine möglichst niedrige Oberflächentemperatur zu erreichen. Das bedeutet, dass

- die Wärme auf eine möglichst große Fläche innerhalb des Gehäuses aufgebracht werden muss, um keine Hotspots zu generieren und
- die ins Gehäuse eingebrachte Wärme muss an die Umgebung abgegeben werden.

Der gleichmäßige Wärmeeintrag in das Gehäuse kann durch die Lage der Einbauten so gestaltet werden, dass kein direkter Wärmestrom auf die Wandung gerichtet wird. Tabelle 5 zeigt in den Zeilen 1 und 2 Möglichkeiten der Gestaltung. Eine große Oberfläche kann zum Beispiel durch Kühlrippen, wie in Tabelle 5 Zeile 3 zu sehen ist, erreicht werden.

Tabelle 5: Richtlinien für eine oberflächentemperaturgerechte Konstruktion

	Gestaltungsrichtlinien	nicht explosions- schutzgerecht	explosionsschutz- gerecht
1	Wärmequellen nicht an einer Gehäusewand konzentrieren.		
2	Werden mehrere Komponenten eingebaut, sollten diese mit höherer Verlustleistung unten eingebaut werden.		
3	Senken der Oberflächentemperatur durch konstruktive Maßnahmen wie Kühlrippen.		



## **Konstruktionskataloge für Bauelemente der *Druckfesten Kapselung***

Allgemein werden die Konstruktionskataloge in die Gruppe der diskursiv betonten Methoden eingeordnet, die das Finden von Lösungen durch ein schrittweises Vorgehen ermöglichen [2]. In den Katalogen wird vorhandenes Wissen in geordneter Form gespeichert. Gerade bei Neukonstruktionen wird diese Möglichkeit der Lösungsraumvergrößerung genutzt. In den Katalogen sind physikalische Effekte, Wirkprinzipien oder prinzipielle Teillösungen in aufbereiteter Form und leicht kombinierbar abgelegt. Durch diese drei verschiedenen Konkretisierungsgrade wird ein breites Einsatzfeld geschaffen und die Festlegung auf eine bestimmte Konstruktionsphase entfällt [27]. Im Unterschied zu Konstruktionskatalogen beinhalten Operationskataloge Verfahrensschritte oder -folgen und Anwendungsbedingungen (z.B. Gestaltungsrichtlinien, Verfahren zur Lösungswahl).

Zur Anwendung soll die Kategorie der Operationskataloge für die Lösungsvarianz bei Bauelementen der *Druckfesten Kapselung* kommen. Hier erfolgt bei eindimensionaler Anordnung eine Einteilung in drei Gruppen: Gliederungsteil, Hauptteil und Zugriffsteil. Der Gliederungsteil ermöglicht einen schnellen Überblick und kann Zugriffsmerkmale aufweisen. Der Hauptteil enthält Grafiken, Skizzen o.ä., die durch eine hohe Informationsdichte geprägt sind. Der Zugriffsteil dient der Ergänzung des Hauptteils [28].

### *Gestaltung von zünddurchschlagsicheren Spalten*

In Erweiterung der aufgestellten Gestaltungsrichtlinien zur zünddurchschlaggerechten Konstruktion zeigt Tabelle 7 zünddurchschlagsichere Spalte wie sie an explosionsgeschützten Geräten verwendet werden können. Der Konstruktionskatalog für die Gestaltung von zünddurchschlagsicheren Spalten basiert auf den Forderungen der DIN EN 60079-1 [5]. Es wird sich in erster Linie auf praxisrelevante Formen bezogen, obwohl in der Norm weitere Spaltformen unterschieden werden. Die Gliederung des Katalogs erfolgt nach der Spaltform, dem Winkel und einer eventuell vorhandenen Verklebung. Der Zugriffsteil ermöglicht eine Auswahl nach der höchsten zulässigen Zündgruppe, den aufgrund des Spalts zusätzlich durchzuführenden Typprüfungen und der Zulässigkeit einer konstruktiven Spaltweite<sup>4</sup>. Die konstruktive Spaltweite ist für bewegte Teile wie Achsen und Wellen erforderlich, daher sind einige Spalte nicht dafür einsetzbar.

---

<sup>4</sup> Die konstruktive Spaltweite ist "der Abstand zwischen gegenüberliegenden Oberflächen eines zünddurchschlagsicheren Spaltes, wenn das Gehäuse des elektrischen Betriebsmittels zusammengebaut ist" [5].

Tabelle 6 Zünddurchschlagsichere Spalte an explosionsgeschützten Geräten

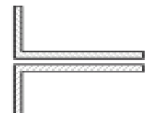

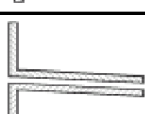
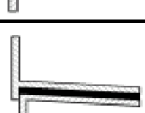
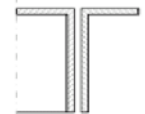
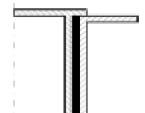
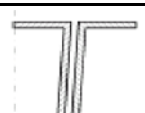
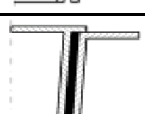
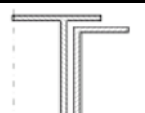
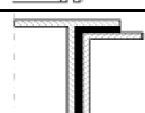
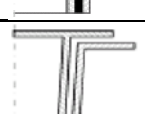
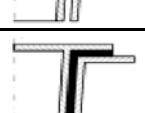

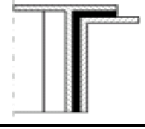
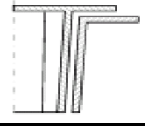
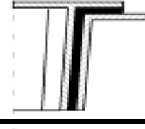
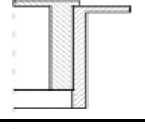
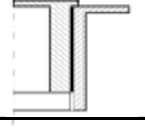
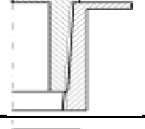
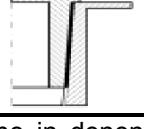
Gliederungsteil			Hauptteil		Zugriffsteil		
Spaltform	Winkel	Verklebung	Spalt	Nr.	maximale Zündgruppe	Typprüfung	Konstruktive Spaltweite
1	2	3	1		1	2	3
ebener Spalt	ohne Winkel	nicht verklebt		1	IIB, IIC <sup>*)</sup>		nicht zulässig
		verklebt		2	IIB, IIC <sup>*)</sup>	26.8 und 26.9 <sup>**)</sup>	
	mit Winkel	nicht verklebt		3	IIB		
		verklebt		4	IIB	26.8 und 26.9 <sup>**)</sup>	
Zylinderspalt	nicht konisch	nicht verklebt		5	IIC		zulässig
		verklebt		6	IIC	26.8 und 26.9 <sup>**)</sup>	
	konisch	nicht verklebt		7	IIB, IIC <sup>***)</sup>		
		verklebt		8	IIB, IIC <sup>***)</sup>	26.8 und 26.9 <sup>**)</sup>	
ebener Zylinderspalt	nicht konisch	nicht verklebt		9	IIC		zulässig
		verklebt		10	IIC	26.8 und 26.9 <sup>**)</sup>	
	konisch	nicht verklebt		11	IIB, IIC <sup>***)</sup>		
		verklebt		12	IIB, IIC <sup>***)</sup>	26.8 und 26.9 <sup>**)</sup>	

Tabelle 6 Zünddurchschlagsichere Spalte an explosionsgeschützten Geräten (Fortsetzung)

Gliederungsteil			Hauptteil		Zugriffsteil		
Spaltform	Winkel	Verklebung	Spalt	Nr.	maximale Zündgruppe	Typprüfung	Konstruktive Spaltweite
1	2	3	1		1	2	3
Spalt mit teilweise zylindrischen Oberflächen	nicht konisch	nicht verklebt		13	IIB		nicht zulässig
		verklebt		14	IIB	26.8 und 26.9**)	
	konisch	nicht verklebt		15	IIB		
		verklebt		16	IIB	26.8 und 26.9**)	
Gewinde	nicht konisch	nicht verklebt		17	IIC		-
		verklebt		18	IIC	26.8 und 26.9**)	
	konisch	nicht verklebt		19	IIC		
		verklebt		20	IIC	26.8 und 26.9**)	

\*) nicht zulässig für Bereiche in denen Acetylen enthalten ist, wenn das freie Gehäusevolumen >500 cm<sup>3</sup> überschreitet

\*\*) Wenn ein verklebter Spalt die Anforderungen an einen Spalt ohne Verklebung nicht erfüllt, muss dieser nach DIN EN 60079-0 Abschnitt 26.8 und 26.9 unterworfen werden.

\*\*\*) nicht zulässig, wenn der Konuswinkel 5° überschreitet

#### Auslegung von Bauelementen - Einbau von Schauscheiben

In explosionsgeschützten Geräten ist es aufgrund einer notwendigen Beobachtung des Gehäuseinneren, z.B. Ablesen von Daten an integrierten Messgeräten, erforderlich, eine transparente Beobachtungsöffnung vorzusehen. Hier kommen dann Schauscheiben zum Einsatz.

Tabelle 7 Spannungsfreier Einbau von Schauscheiben

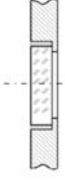
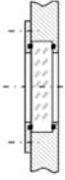
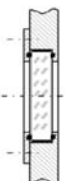
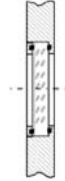
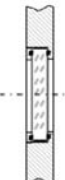
Gliederungsteil			Hauptteil		Zugriffsteil					
Form	Spannungsfreier Einbau	Befestigung	Verklebung des Spalts	Eingebaute Schauscheibe	Nr.	Einbaulage	Stoßfestigkeit	Spannungsfreier Einbau	Spaltlänge / Schauscheibendicke	Gehäusematerial
1	2	3	4	1	Nr.	1	2	3	4	5
Rund	Verguss	ohne	-		1	waagrecht	mäßig	sehr gut *)	beliebig	beliebig
		Flansch	ohne		2	waagrecht oder senkrecht	gut	mäßig	Die Schauscheibendicke hängt von der erforderlichen Spaltlänge ab. **)	beliebig
	mit			3	waagrecht oder senkrecht	sehr gut	gut	beliebig ****)	beliebig	
	Einschraubung		ohne		4	waagrecht oder senkrecht	gut	mäßig	Die Schauscheibendicke hängt von der erforderlichen Spaltlänge ab. **)	beliebig
			mit		5	waagrecht oder senkrecht	sehr gut	gut	beliebig ****)	beliebig

Tabelle 7 Spannungsfreier Einbau von Schauscheiben (Fortsetzung)

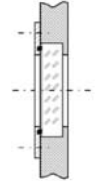
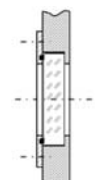
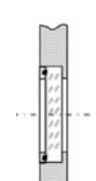
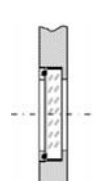
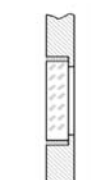




Gliederungsteil			Hauptteil		Zugriffsteil					
Form	Spannungsfreier Einbau	Befestigung	Verklebung des Spalts	Eingebaute Schauscheibe	Nr.	Einbaulage	Stoßfestigkeit	Spannungsfreier Einbau	Spaltlänge / Schauscheibendicke	Gehäusematerial
1	2	3	4	1	Nr.	1	2	3	4	5
Rechteckig	Zwischen zwei Dichtringen	Flansch	ohne		6	waagrecht oder senkrecht	gut	mäßig	Die Schauscheibendicke hängt von der erforderlichen Spaltlänge ab. **)	Kunststoff
			mit		7	waagrecht oder senkrecht	sehr gut	gut	beliebig ***)	Kunststoff
	Zwischen Dichtung und Kunststoffwand	Flansch	ohne		8	waagrecht oder senkrecht	gut	mäßig	Die Schauscheibendicke hängt von der erforderlichen Spaltlänge ab. **)	Kunststoff
			mit		9	waagrecht oder senkrecht	sehr gut	gut	beliebig ***)	Kunststoff
Rechteckig	Verguss	Ohne	-		10	waagrecht	mäßig	sehr gut *)	beliebig	beliebig

Tabelle 7 Spannungsfreier Einbau von Schauscheiben (Fortsetzung)

Gliederungsteil				Hauptteil		Zugriffsteil				
Form	Spannungsfreier Einbau	Befestigung	Verklebung des Spalts	Eingebaute Schauscheibe	Nr.	Einbaulage	Stoßfestigkeit	Spannungsfreier Einbau	Spaltlänge / Schauscheibendicke	Gehäusematerial
1	2	3	4	1	Nr.	1	2	3	4	5
Rund	Zwischen Dichtung und Kunststoffwand	Flansch	ohne		11	waagrecht oder senkrecht	gut	mäßig	Die Schauscheibendicke hängt von der erforderlichen Spaltlänge ab. **)	beliebig
			mit		12	waagrecht oder senkrecht	sehr gut	gut	beliebig ***)	beliebig
		Einschraubung	ohne		13	waagrecht oder senkrecht	gut	mäßig	Die Schauscheibendicke hängt von der erforderlichen Spaltlänge ab. **)	Kunststoff
			mit		14	waagrecht oder senkrecht	sehr gut	gut	beliebig ***)	Kunststoff

\*) abhängig von der Vergussmasse

\*\*) Der Spalt wird zwischen der Schauscheibe und der Wand gebildet.

\*\*\*) wenn die Schauscheibe die DIN EN 60079-0 Abschnitt 26.8 und 26.9 erfüllt.

Der Einbau von Schauscheiben ist spannungsfrei in ein Zwischenstück bzw. direkt in das Gehäuse auszuführen. Schauscheiben variieren in der Form und können verschiedenartig spannungsfrei eingebaut und befestigt werden. Auch eine Verklebung kann zusätzlich genutzt werden. Über die Kriterien Einbaulage, Stoßfestigkeit, Güte des spannungsfreien Einbaus, erforderliches Gehäusematerial und Spaltlänge bzw. Schauscheibendicke, die in Tabelle 7 als Gliederung genutzt werden, erfolgt der Zugriff auf die Informationen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Grundlagen für die Anpassung der Konstruktionsmethodik auf das Fachgebiet des sekundären Explosionsschutzes ist mit den erläuterten Gestaltungsrichtlinien erarbeitet wurden. Es soll an erster Stelle dem Konstrukteur ein leistungsfähiges Werkzeug in die Hand gegeben werden, mit dem er die größten und häufigsten Fehler beim Entwickeln eines explosionsgeschützten elektrischen Gerätes vermeiden kann.

Dazu wurden kurz auf die Grundlagen der Explosionsdruckgerechtigkeit bei der *Druckfesten Kapselung* eingegangen und konstruktive Maßnahmen erläutert, um diese Gerechtigkeit zu garantieren. Eine Unterteilung in explosionsdruckgerechte, zünddurchschlaggerechte und oberflächentemperaturgerechte Konstruktion hilft, um die einzelnen Einflussgrößen den verschiedenen Gerechtigkeiten oder Gestaltungsrichtlinien zuordnen zu können. Aus diesen Einflussgrößen wurden dann konstruktive Maßnahmen abgeleitet, ergänzt durch Ausführungen zu entsprechenden Konstruktionskatalogen.

Diese entwickelten Gestaltungsrichtlinien müssen weiter verfeinert und erweitert werden. Auch andere, den Explosionsschutz tangierende Wissensgebiete, müssen mitbetrachtet werden. Die Abbildung der Gestaltungsrichtlinien zum kunststoffgerechten Konstruieren kann z.B. auf den sekundären Explosionsschutz erfolgen. Dazu müssen weitere Bauelemente untersucht werden, die häufig im sekundären Explosionsschutz eingesetzt werden.

### Literatur- und Quellenhinweise:

- [1] Richtlinie 94/9/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen.
- [2] DIN 31000 Sicherheitstechnisches Gestalten technischer Erzeugnisse. Allgemeine Leitsätze. Berlin: Beuth.  
Teilweise ersetzt durch DIN EN 292 Teil 1 und 2: Sicherheit von Maschinen, Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze 1991.
- [3] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.H.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2005.
- [4] DIN EN 60079-0: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche-Teil 0: Allgemeine Anforderungen (IEC 60079-0:2004); Deutsche Fassung EN 60079-0:2004.
- [5] DIN EN 60079-1: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche – Teil 1: Druckfeste Kapselung „d“ (IEC 60079-1:2003); Deutsche Fassung EN 60079-1:2004.
- [6] Niedziella, W.: Wie funktioniert Normung? Eine Einführung in die nationale (DIN/DKE) europäische (CENELEC) und internationale (IEC) Elektronische Normung, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 2000.
- [7] Elfte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz. (Explosionsschutzverordnung – 11. GPSGV), vom 12. Dezember 1996 (BGBl. I S. 1914).
- [8] BGR 104 (bisher ZH1/10): Explosionsschutz-Regeln: Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften. Fachausschuss Chemie, Dezember 2002.
- [9] DIN EN 1127-1: Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Teil 1: Grundlagen und Methodik; Deutsche Fassung EN 1127-1:1997, Ausgabe:1997-10.
- [10] Pester, Johannes: Explosionsschutz elektrischer Anlagen: Fragen und Antworten. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin: HUSS-MEDIEN GmbH Verlag Technik, 2005.
- [11] Beyer, M.; Klausmeyer, U.; Markus, D. und Wehinger, H.: Phänomen "Zünddurchschlag". In: Stahl Ex-Zeitschrift. 33 (2001), S.29-33.
- [12] Klausmeyer, U.; Markus, D.; Engelmann, F.; Beyer, C.: Methodisches Konstruieren explosionsdruckfester Gehäuse der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“. In: 6. Magdeburger Maschinenbautage. Magdeburg, September 2003, B10, S. 285-291.
- [13] Klausmeyer, U.; Krämer, M.; Wehinger, H.: Grundsatzuntersuchungen für explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel zum Einsatz in Zone 2. PTB-Bericht W-49. Braunschweig/Berlin: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1992.
- [14] DIN EN 60529: Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code) (IEC 60529:1989 + A1:1999); Deutsche Fassung EN 60529:1991 + A1:2000; 2000-09.
- [15] DIN EN 60034-5: Drehende elektrische Maschinen - Teil 5: Schutzarten aufgrund der Gesamtkonstruktion von drehenden elektri-

- schen Maschinen (IP-Code) - Einteilung (IEC 60034-5:2000); Deutsche Fassung EN 60034-5:2001; 2001-12.
- [16] Weis, Bruno: Industriebeleuchtung: Grundlagen, Berechnungen, Werkstoffe, Normen, Vorschriften. München/Bad Kissingen/Berlin/Düsseldorf/Heidelberg: Richard Pflaum Verlag GmbH & Co.KG, 2000.
- [17] Engelmann, F.; Klausmeyer, U.; Markus, D.; Hilliger, A. : Neue Materialien in der Druckfesten Kapselung - Der Einsatz poröser Materialien zur sicheren Vermeidung von Zünddurchschlägen. In: Stahl Ex Zeitschrift, 2004.
- [18] VDI 2222 Blatt 1, Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Ausgabe 1997-06.
- [19] Pahl, G., Beitz, W; Feldhusen, J., Grote, K.H., Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2005.
- [20] Koller, R., Konstruktionslehre für den Maschinenbau, Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 4. Auflage, 1998.
- [21] Roth, K., Konstruieren mit Konstruktionskatalogen Band 1: Konstruktionslehre, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2. Auflage, 1994.
- [22] Stehen, H., Herg., Handbuch des Explosionsschutzes, WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000.
- [23] Bartknecht, W., Explosionsschutz: Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1993.
- [24] Ludwig, J., Forschungsbericht 255: Experimentelle Untersuchungen und Empfehlungen zur Belastbarkeit von Transporttanks für gefährliche Stoffe durch Explosionsdruck und andere Beanspruchungen, 2003.
- [25] Markus, D., Sadanandan, R., Schiessl, R., Maas, U.: Experimentelle und numerische Untersuchung von Zünddurchschlägen, In: 10. BAM-PTB-Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik (2004) S. 29-33
- [26] Beyer, M. Hillerse: Über den Zünddurchschlag explodierender Gasgemische an Gehäusen der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“, VDI-Fortschrittsberichte, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1997.
- [27] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 1: Konstruktionslehre. 2.Auflage. Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag, 1994.
- [28] VDI 2222 Blatt 2: Konstruktionsmethodik; Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen. Ausgabe:1982-02.

**Autorenangaben:**

Dr.-Ing. Frank Engelmann  
 Prof. Dr.- Ing. Karl-H. Grote  
 Dipl.-Ing. Daniel Sohn  
 Dipl.-Ing. Ramona Träger  
 Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
 Fakultät Maschinenbau  
 Institut Maschinenkonstruktion  
 Lehrstuhl Konstruktionstechnik  
 Universitätsplatz 2  
 39106, Magdeburg  
 Tel.: 0391 / 67 18 522  
 Fax: 0391 / 67 12 595  
 E-mail: Frank.Engelmann@mb.uni-magdeburg.de