

UNTERSUCHUNG AN RAPID-PROTOTYPING-MODELLEN ZUR ANWENDUNG FÜR KLEINSERIEN IM EXPLOSIONSSCHUTZ

In diesem Beitrag sollen die Ergebnisse aus den Gehäuse-Untersuchungen aus dem DFG-geförderten Projekt „Untersuchung zur Verwendung der Rapid-Prototyping-Technologie für Kleinserien im Explosionsschutz“ (Projektlaufzeit: 01.01.2009 – 31.12.2010) in Kooperation von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Physikalisch-technischen Bundesanstalt Braunschweig vorgestellt werden. Ziel dieses Projektes war die grundlegende Untersuchung des Verhaltens druckfest gekapselter Kunststoffgehäuse, die durch generative Fertigungsverfahren (Rapid-Prototyping) hergestellt wurden. In diesem Rahmen sollten einerseits die Anwendbarkeit dieser Fertigungsverfahren im Explosionsschutz analysiert und bewertet werden, andererseits sollten Gestaltungsrichtlinien für die Konstruktion derartiger Gehäuse erarbeitet werden.

In this paper, the results from the case studies from the DFG-funded project “Investigation into the rapid prototyping technology for small series for explosion protection” (Project Duration: 01.01.2009 – 31.12.2010) in cooperation between the Otto-von-Guericke university Magdeburg and the institution Physikalisch-technische Bundesanstalt Braunschweig are presented. The aim of this project is the basic study of the behavior of plastic housings in the type of protection pressure-proof encapsulation, which were produced by additive process (rapid prototyping). In this framework, on the one hand, the applicability of the production process in the explosion are analyzed and evaluated, and on the other hand, should design guidelines for the construction of such housing will be developed.

Einleitung

Generative Fertigungsverfahren ermöglichen durch deren neue Technologien, neben dem herkömmlichen Prototypenbau, die Herstellung serienfertiger Produkte (Rapid Manufacturing) bzw. Werkzeuge (Rapid Tooling), mit denen Serienprodukte hergestellt werden können. Auch für die Branche der Hersteller explosionsgeschützter Betriebsmittel stellt die Nutzung dieser Technologien ein Entwicklungspotential dar, denn für derartige Anwendungen sind häufig nur kleine Fertigungschargen zu verzeichnen (Kleinst- und Kleinserienfertigungen). Der Hauptgrund hierfür liegt in der individuellen Anpassung der Produkte an die Kundenwünsche. Die bisherigen für derartige Produkte genutzten Fertigungstechnologien sind das Fräsen und der Spritzguss. Der Spritzguss erfordert einen hohen Aufwand bei der Fertigung des Werkzeugs und ist daher sehr kostenintensiv.

Das Hauptkonstruktionselement der elektrischen Geräte ist i.d.R. das Gehäuse über den der Schutz beim Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen erreicht wird. Dieser Schutz für elektrische bzw. auch nicht-electrische Geräte im

Gasexplosionsschutz wird durch die Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ (d) definiert. Für die Konstruktion eines Gehäuses der druckfesten Kapselung müssen zwei Normen beachtet werden: die DIN EN 60079-0 [1], in der die allgemeinen Anforderungen an elektrische Betriebsmittel in explosionsgefährdeten Bereichen beschrieben werden und die DIN EN 60079-1 [2], die die speziellen Anforderungen an die „Druckfeste Kapselung“ enthält. Die Anwendung normativer Empfehlungen soll technisch einwandfreies Verhalten gewährleisten, die somit eine Grundlage für technisch optimale und gefahrungsfreie Konstruktionen liefern [3].

Das Anforderungsprofil druckfest gekapselte Gehäuse kann durch Bild 1 [4] in kurzer Form wiedergegeben werden und im konkreten stellen sich folgende Anforderungen [3]:

- Die druckfeste Kapselung muss dem Druck einer inneren Explosion standhalten. Plastische Verformungen sind unzulässig. Dies ist durch

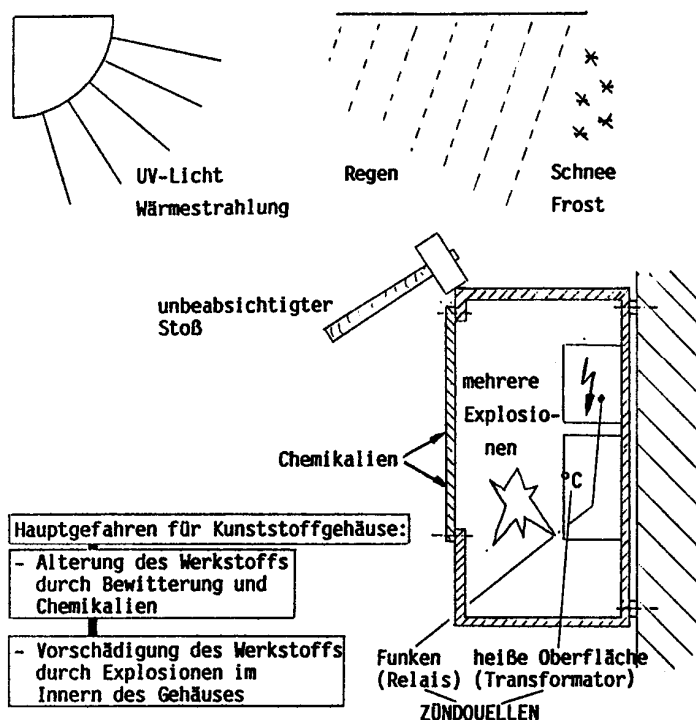


Bild 1: Belastungsarten eines Gehäuses der Zündschutzart [4]

Überdruckprüfung gemäß Absatz 15.1.3 laut [2] zu testen.

- Der Zünddurchschlag muss verhindert werden. Eine Prüfung auf Zünddurchschlagsicherheit erfolgt gemäß Absatz 15.2 laut [2]).

- Die Oberflächentemperaturen der Betriebsmittel müssen entsprechend der Temperaturklassen ausgelegt sein, um eine Zündung durch heiße Oberflächen zu vermeiden. Die thermische Prüfung erfolgt gemäß Absatz 26.5 laut [1] mit dem Zusatz des Absatzes 14 Tabelle 5 laut [2].

- Hieraus lassen sich die Hauptanforderungen an den Werkstoff ableiten [3]: hoher Elastizitätsmodul E , um möglichst kleine Dehnungen im elastischen Bereich der Hooke'schen Gerade zu erhalten; hohe Streckgrenze R_e , σ_y um Rissbildung zu minimieren und hohe Schlagzähigkeit, um Sprödbbruch zu vermeiden.

- An nichtmetallische Gehäuse und nichtmetallische Teile von Gehäusen werden ergänzende Anforderungen für Typprüfungen laut Absatz 19.3 [2] gestellt. Speziell für Gehäuse bzw. -teile aus Polymerwerkstoffen gilt in diesem Zusammenhang, dass in Übereinstimmung mit [5] eine Entflammbarkeitsprüfung durchzuführen ist.

Der vorhandene Maschinenpark am Lehrstuhl Konstruktionstechnik bestimmte das einzusetzende generative Fertigungsverfahren und die mit dieser Technik verarbeitbaren Werkstoffe. Die PolyJet-Technologie konnte nicht direkt zur Fertigung von geeigneten Prüfkörpern verwendet werden, da die bei dieser Technologie eingesetzten Materialien dem Anforderungsprofil druckfest gekapselter Kunststoffgehäuse nicht entsprechen. Damit konnte nur auf das indirekte generative Fertigungsverfahren des Vakuumgießens zurückgegriffen werden, für das eine Form zum Abgießen der Prüfkörper notwendig ist. Das PolyJet-Verfahren wurde als generatives Fertigungsverfahren zur Fertigung der Urmodelle für den Formenbau genutzt und davon die Gussform aus Silikon abgenommen.

Die Anzahl der einsetzbaren Werkstoffe reduzierte sich dadurch, dass die Formfüllung ohne Einspritzdruck nur infolge der Schwerkraft und des Vakuums erfolgt. Hierfür sind entsprechend viskose Kunststoffe notwendig und Werkstoffe mit Füllmaterialien ungeeignet. Die auf der Vakuumanlage vergießbaren Polymerwerkstoffe beschränkten sich somit auf die Klasse der Polyurethane. Für die Fertigung der Prüfkörper sind sowohl Kunststoffe, die nur im RP-Bereich genutzt werden, als auch herkömmliche, industriell eingesetzte Kunststoffe zur Anwendung gelangt.

Hierzu wurden Grundlagenuntersuchungen mit Erosionsversuchen an Spaltgeometrien aus Polymerwerkstoffen durchgeführt [6]. Die verwendeten Werkstoffe wurden aus der Palette der modernen Polymerwerkstoffe hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in generativen Fertigungsverfahren ausgesucht. Bei den Versuchsreihen der Spaltuntersuchungen erwiesen sich vier Materialien als grundsätzlich geeignet für den Einsatz im Rahmen der druckfesten Kapselung. Aus diesen Materialien wurden je zwei Gehäuse für die Versuche gefertigt, ein drittes Gehäuse diente als Rückstellmuster für Vergleichszwecke [7].

Gehäusevorbereitung

Eine Recherche über die grundlegenden konstruktiven Merkmale (Form, Größe, Gehäuseverbindungen) kommerziell erhältlicher druckfest gekapselter Gehäuse ergab, dass die meisten Gehäuse eine zylindrische oder kubische Form aufweisen. Die dabei vorherrschenden Spaltarten sind zylindrische und ebene Spalte sowie Gewindespalte. Auf Grundlage dieser Recherche wurde festgelegt, zwei Gehäusegrundformen – zylindrisch und kubisch – zu konstruieren. Aufgrund der mechanischen Materialeigenschaften der vorliegenden Kunststoffe wird das Gehäusevolumen auf max. 100 cm^3 beschränkt. Das Gehäuse besteht aus zwei Teilen – Gehäusedeckel und Gehäusegrundkörper. Die Verbindung der Gehäuseteile erfolgt über umlaufende Flanschflächen (ebener Spalt), die mit Durchgangverschraubungen verbunden werden. Zudem sind zwei Anschlüsse für den Gasein- und Gasaustritt sowie jeweils ein Anschluss für die Zündkerze und den Druckaufnehmer vorzusehen. Diese Anschlüsse werden aus Metall vorgefertigt und als Einlegeteile im Gehäuse eingegossen. Im Bild 2 und Bild 3 sind die beiden Gehäusetypen zeichnerisch und deren Objektmodelle als Grundlage für den Formenbau abgebildet.

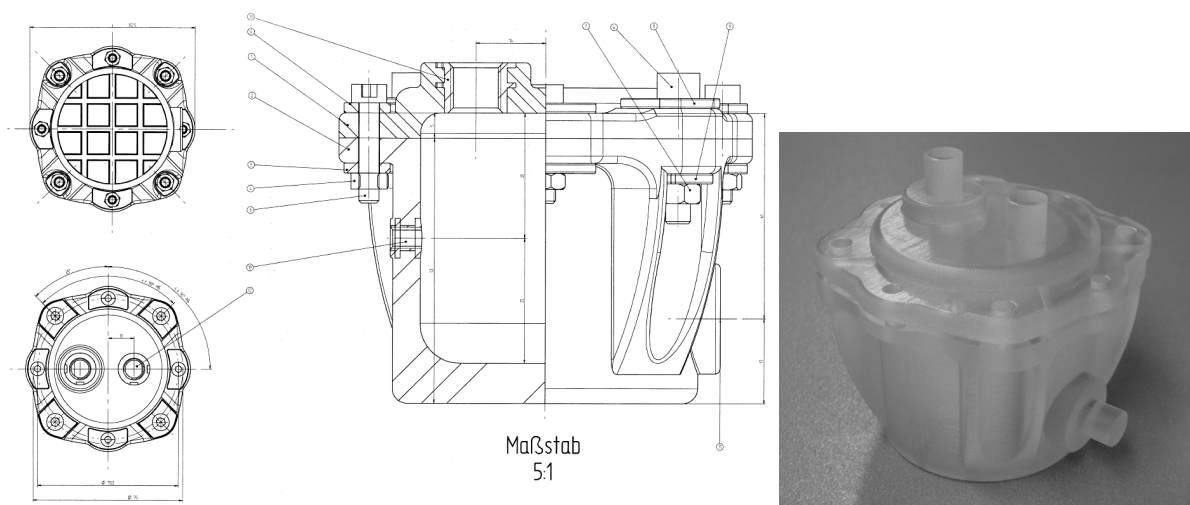


Bild 2: Zylindrisches Gehäuse: links: Ausschnitt aus der Zusammenstellungszeichnung, rechts: Objekt-Urmodell

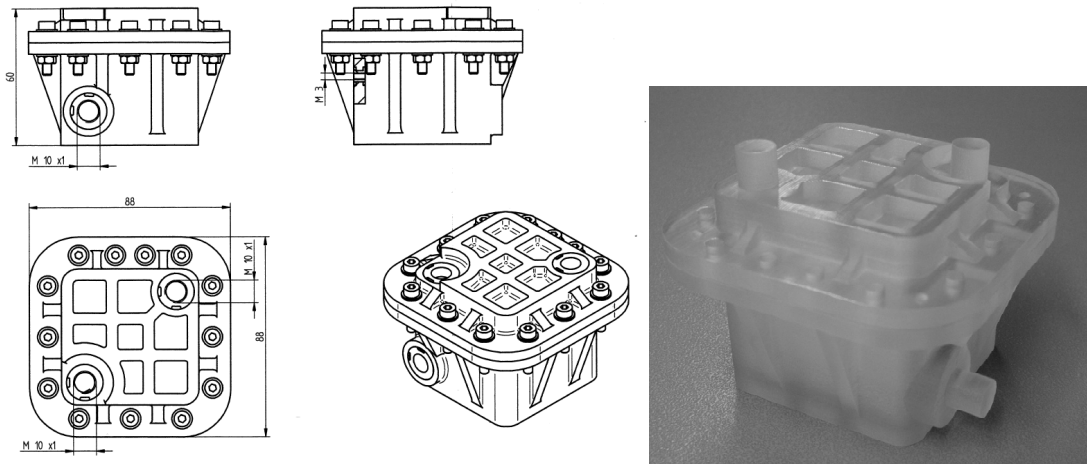


Bild 3: Kubisches Gehäuse links: Ausschnitt aus der Zusammenstellungszeichnung, rechts: Objekt-Modell

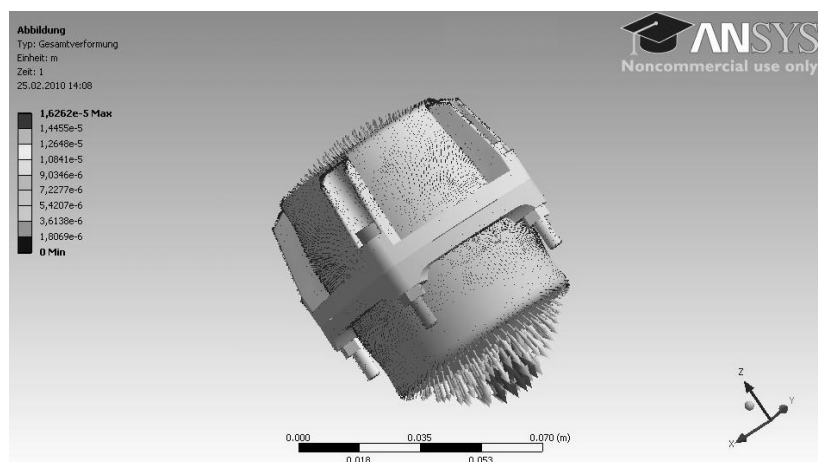


Bild 4: FEM-Betrachtung am zylindrischen Gehäuse

Die Auslegung der Gehäuse erfolgte nach dem zu erwartenden Explosionsdruck von max. 12 bar mit einem Sicherheitsbeiwert von 5. Dieser Sicherheitsbeiwert berücksichtigt z. B. Fertigungs- und Temperatureinflüsse. Mit Hilfe einer FEM-Betrachtung wurden die Konstruktionen überprüft. In Bild 4 sind die hierbei errechneten Verformungen unter der Annahme einer statischen Belastung durch den Explosionsdruck für die zylindrische Grundversion des Gehäuses abgebildet. Infolge der FEM-Betrachtung mussten Änderungen an den Anschlüssen vorgenommen werden: eine Trennebene wurde aus der Mitte herausgenommen und Deckel und Boden wurden versteift. Die so entwickelten Modelle für den Formenbau wurden über das Polyjet-Verfahren auf der Objet-Eden-Anlage des Lehrstuhls Konstruktionstechnik gefertigt (siehe Bild 4).

Tabelle 1

Zusammenstellung der Gehäuseuntersuchungen

Material	Stobicast L777.01	PU7210FL	RAKU-PUR 21-2205	Stobicast M598.86
Gehäusegestalt	Zylindrisch, Kubisch	Zylindrisch, Kubisch	Zylindrisch, Kubisch	Zylindrisch, Kubisch
Klimalagerung	Gelagert	Gelagert	Gelagert	Gelagert und ungelagert
Schlagprüfung	Bestanden	Bestanden	Nicht bestanden (Rißbildung)	3 von 4 bestanden,
Stat. Überdruckprüfung	Versagen an Flanschdichtungen	Versagen, (Rißbildungen)	Versagen an den Rissen	Bestanden
Zünddurchschlagprüfung	Nicht ausgeführt	Zylindr. G.: kein Kubisches G.: Zünddurchschlag am Bodenriss	IIB: bestanden IIC: 3 von 4 bestanden	IIB: bestanden, IIC: nur ungelagertes kubisches G. getestet - bestanden
Anmerkung	Zu weiches Material, Flansch lässt sich nicht abdichten.	Grundsätzlich als Gehäusewerkstoff möglich, sofern die notwendige Schlagfestigkeit konstruktiv gewährleistet werden kann	Viel versprechen-der Gehäusewerkstoff, durch Erhöhung der Schlagfestigkeit	Geeigneter Gehäusewerkstoff bei Anpassung der Konstruktion, auch für die Explosionsgruppe IIC

Versuchsdurchführung

Im Rahmen der üblichen Prüfungen für druckfest gekapselte Gehäuse nach DIN EN 60079-1 [2] wurden der maximale Explosionsdruck (Bezugsdruck) an einem Gehäuse ohne Klimalagerung bestimmt, die Prüfung auf Zünddurchschlagsicherheit an gelagerten und ungelagerten Gehäusen für die Explosionsgruppen IIB bzw. IIC durchgeführt und an den gelagerten Gehäusen nach erfolgter Schlagprüfung an zwei Stellen mit jeweils 7 J eine statische Überdruckprüfung mit dem 1,5-Fachen des Bezugsdruck-Wertes durchgeführt.

Versuchsergebnisse

Auf die erforderliche Flammenerosionsprüfung wurde verzichtet, da die Vorversuche an den Spaltgeometrien gezeigt haben, dass diese Prüfung die Spalte durch Materialumlagerungen verengte und somit zünddurchschlagsicherer machte [7].

Bei allen Versuchen stellte sich heraus, dass Zünddurchschläge bei den ungelagerten Gehäusen häufiger auftraten. Ein Grund für das sicherere Verhalten der klimagelagerten Gehäuse ist, dass sich die Flanschflächen der zusammengebauten Gehäuse bei der Klimalagerung aneinander anpassen und somit besser abdichten.

Zusammenfassung und Ausblick

Das in diesem Projekt untersuchte indirekte Fertigungsverfahren des Vakuumgießens von druckfest gekapselten Gehäusen aus Polymerwerkstoffen kann für Hersteller derartiger Gehäuse für die Fertigung von Kleinst- und Kleinserien aus wirtschaftlichen Gründen interessant sein. Im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse gilt es jeweils zu klären, ob sich die Anschaffung eigener erforderlicher Anlagen (Rapid-Prototyping-Anlage für das PolyJet-Verfahren mit Dosier- und Vakuumgießeinrichtung) lohnt oder die fertigen Gehäuse von Zulieferern gekauft werden.

Generative Fertigungsverfahren, speziell das untersuchte indirekte Verfahren des Vakuumgießens, sind prinzipiell für die Herstellung druckfest gekapselter Gehäuse aus Polymerwerkstoffen geeignet. Für Angüsse und eingegossene Teile ist zu beachten, dass sie nicht im Bereich von Spaltflächen liegen und zudem keine Schwächung der Gehäusestabilität von ihnen ausgeht. Insbesondere sollte bei der Konstruktion darauf geachtet werden, dass diese Stellen im Rahmen der Schlagprüfung nicht getroffen werden können. Besondere Aufmerksamkeit sind den Fertigungsgenauigkeiten der verwendeten Verfahren entgegenzubringen. In der Konstruktion sind entsprechende Aufmaße zu berücksichtigen.

Die betrachteten Gehäusekonstruktionen erfüllen die Anforderungen der DIN EN 60079-1 [2] für einen Einsatz in der Explosionsgruppe IIC. Die Versuchsreihen haben jedoch gezeigt, dass nicht alle für die Gehäuse verwendeten Werkstoffe auch für diese Gruppe geeignet sind. Der Werkstoff Stobicast M598.86, der im elektrischen Explosionsschutz als Vergussmasse eingesetzt wird, hat seine Eignung auch als Werkstoff für komplette Gehäuse bis Explosionsgruppe IIC bewiesen. Als weiteres bereits industriell eingesetztes Material ist RAKU-PUR 21-2205 in Bezug auf die Zünddurchschlagsicherheit geeignet, sofern die notwendige Schlagfestigkeit erreicht werden kann. Ähnliches gilt für das RP-Material PU7210FL in Bezug auf die Stabilität, hinsichtlich der Explosionsgruppe ist jedoch nur ein Einsatz bis Explosionsgruppe IIB möglich. Eine Erweiterung des Einsatzbereiches dieses Materials auf die Explosionsgruppe IIC wäre durch eine spaltfreie Konstruktion des Gehäuses möglich, was durch Verkleben oder Verschweißen der Spalte erreicht werden kann.

Es hat sich herausgestellt, dass nicht klimagelagerte Gehäuse zünddurchschlagskritischer sind, wird für zukünftige Bauartprüfungen bei Gehäusen aus diesen Werkstoffen empfohlen, die Prüfung auf Zünddurchschlagsicherheit an nicht klimagelagerten Gehäusen durchzuführen. Diese Prüfung sollte an bis dato ungeprüften Gehäusen vorgenommen werden, da jeder Explosionsversuch bei den hier betrachteten Werkstoff/Spalt-Kombinationen den Spalt verengt kann und diese somit sicherer macht.

Quellenverzeichnis

1. DIN EN 60079 Teil 0 05.07: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche - Teil 0: Allgemeine Anforderungen.
2. DIN EN 60079 Teil 1 04.08: Explosionsfähige Atmosphäre - Teil 1: Geräteschutz durch druckfeste Kapselung "d".
3. Engelmann, F.; Sohn, D.; Träger, R.: Konstruktionsmethodik als Hilfe bei der Konstruktion von Gehäusen der Zündschutzart „druckfeste Kapselung“. In: Grote, K.-H. (Hrsg.); Brökel, K. (Hrsg.); Stelzer, R. (Hrsg.): 3. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2005. Aachen: Shaker Verlag, 2005, S. 85-100. - ISBN: 3-8322-3971-5, ISSN 0945-0831
4. Klausmeyer, U.; Wehinger, H.: Kunststoffgehäuse in der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“ für explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel. PTB-Bericht, 1989.
5. IEC 60695 Teil 11-10 03.99: Prüfungen zur Beurteilung der Brandgefahr - Teil 11-10: Prüfflammen; Prüfverfahren mit 50-W-Prüfflamme horizontal und vertikal.
6. Träger, R.; Grote, K.-H.; Klausmeyer, U.; Engelmann, F.: Anwendung der Rapid-Prototyping-Technologie für Kleinserien im Explosionsschutz. In: Brökel, K. (Hrsg.); Feldhusen, J. (Hrsg.); Grote, K.-H. (Hrsg.); Rieg, F. (Hrsg.); Stelzer, R. (Hrsg.): Vernetzte Produktentwicklung: Methoden und Werkzeugkopplung. KT2009. 7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Bayreuth: Universität, 2009, S.32-39. – ISBN 978-3-00-028222-5
7. Träger, R.; Hornig, J.; Grote, K.-H.; Klausmeyer, U.: Untersuchungen an vakuumgegossenen Kunststoff-Prüfkörpern unter Berücksichtigung der Anforderungen des Explosionsschutzes. In: Brökel, K. (Hrsg.); Feldhusen, J. (Hrsg.); Grote, K.-H. (Hrsg.); Rieg, F. (Hrsg.); Stelzer, R. (Hrsg.): 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Barleben: Docupoint Verlag, 2010, S. 255-260. – ISBN 978-3-86912-040-0