

# Ringversuche im Bereich des Explosionsschutzes - Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Programm "Explosion Pressure"

Tim Krause<sup>1</sup>, Jia Wu<sup>1</sup>, Detlev Markus<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.5 „Explosionsschutz in der Energietechnik“, Braunschweig

*Die Teilnahme an Ringvergleichsprogrammen ist eine Anforderung der ISO/IEC 17025 und IECEx für Prüflaboratorien im Bereich des Explosionsschutzes hinsichtlich der Notwendigkeit, ihre Kompetenz nachzuweisen. Es ermöglicht eine Leistungsbewertung der Prüflaboratorien für spezifische Prüfungen oder Messungen und hilft, Unterschiede zwischen den Laboren zu identifizieren. Darüber hinaus ist es ein wirksames Instrument, um die Vergleichbarkeit von Prüf- und Messverfahren zu untersuchen.*

*Die Bestimmung des Explosionsdruckes ist eine wesentliche Messgröße für die Prüfung und Beurteilung elektrischer Betriebsmittel in der Zündschutzart druckfeste Kapselung. Aufgrund dessen wurde zwischen 2017 und 2018 das Ringvergleichsprogramm "Explosion Pressure – Test Round 2017" entwickelt und umgesetzt. Während dieses Programms führten 65 internationale Prüflaboratorien Explosionsdruckmessungen an vordefinierten Prüfmusterkonfigurationen nach der IEC 60079-1 durch. Die Analyse und Auswertung der Ergebnisse hat ergeben, dass obwohl die Prüflaboratorien die gleichen technischen Standards verwenden und die Prüfungen nach einer vorgegebenen Verfahrensanweisung durchführten, die resultierenden Explosionsdrücke gewissen Schwankungen unterliegen. Die Gründe dafür sind mannigfaltig und werden in dieser Arbeit betrachtet. Abschließend werden notwendige Konsequenzen diskutiert, um die Vergleichbarkeit der Prüflaboratorien bei der Bestimmung von Explosionsdrücken in Zukunft zu verbessern.*

## 1 Einleitung

Die innerhalb des IECEx-Systems und im Geltungsbereich der ATEX-Richtlinie operierenden Prüflaboratorien und Zertifizierungsstellen arbeiten in Übereinstimmung mit der ISO/IEC 17025 [ISO/IEC 2005], welche die Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien definiert. Für die Sicherung der Qualität von Prüfergebnissen wird hier die Teilnahme an Programmen von Vergleichen zwischen Laboratorien oder von Eignungsprüfungen gefordert. Die technischen Regelwerke, welche die Prüfungen im Bereich des Explosionsschutzes beschreiben, werden durch die IEC Normen 60079-0 ff. [IEC 2017] abgebildet. Diese Normen bilden die Grundlage, um eine möglichst vergleichbare und ortsunabhängige Qualität bei den Prüfungen zu gewährleisten. Sie beschreiben die allgemeinen Routineverfahren der im Bereich des Explosionsschutzes definierten Zündschutzarten. Das bedeutet, dass bei der Auswahl, der in den Ringvergleichsprogrammen zu vergleichenden Mess- oder Kenngrößen, auch die Norm der jeweiligen Zündschutzart zugrunde gelegt werden muss. Für das hier betrachtete Ringvergleichsprogramm zum Thema "Explosion Pressure" sind die Prüfverfahren für die Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ in der IEC 60079-1 [IEC 2014] beschrieben. Eine der entscheidenden Anforderungen an Gehäuse dieser Zündschutzart ist der Nachweis der Druckfestigkeit. Diese Eigenschaft wird mittels einer Überdruckprüfung, deren Druckhöhe abhängig ist vom gemessenen Explosionsdruck (Bezugsdruck), abgeprüft. Daraus folgt, dass die Zulassung von elektrischen Betriebsmitteln ausgeführt in der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ direkt von der Bestimmung des Explosionsdruckes abhängig ist. Aus diesem Grund wurde für das Ringvergleichsprogramm "Explosion Pressure" die Messgröße Explosionsdruck als Vergleichsgröße ausgewählt.

Bei dem Vergleich der von den Teilnehmern gelieferten Ergebnissen hat sich herausgestellt, dass es trotz einheitlicher Anwendung der Prüfanforderungen der IEC 60079-1 und definierter Vorgaben seitens des Organisers eine Streuung der gemessenen Explosionsdrücke gibt. Gerade im Hinblick auf Vergleichbarkeit und gegenseitige Anerkennung ist man bestrebt, diese vorhandenen Streuungen stetig zu minimieren, wobei die Erkenntnisse aus dem Ringvergleichsprogramm von direktem Nutzen sein können.

## 2 Programmbeschreibung "Explosion Pressure"

Das Programm "Explosion Pressure" besteht aus mittlerweile zwei Testrunden. Die erste Testrunde umfasste 45 teilnehmende Ex-Laboratorien und wurde im Jahr 2012 beendet. Die zweite Testrunde wurde von 65 Teilnehmern im Jahr 2018 abgeschlossen und hat eine in Teilen veränderte Programmstruktur. Der Schwerpunkt dieses Berichts liegt in der Analyse der zweiten aktuelleren Testrunde.

Die Konzeptentwicklung, Durchführung und Auswertung des Programms erfolgt in Übereinstimmung mit den Vorgaben der ISO/IEC 17043 [ISO/IEC 2010], welche die allgemeinen Anforderungen an Eignungsprüfungen definiert. Die Analyse- und Bewertungsmethoden entsprechen den Anforderungen der ISO 13528 [ISO 2015], welche die statistischen Verfahren für Eignungsprüfungen durch Ringversuche beschreibt.

### 2.1 Explosionsdruck

Der bei der Zündung eines ruhenden explosionsfähigen Gemischs bestimmter Zusammensetzung in einem geschlossenen Gehäuse nach festgelegten Testbedingungen maximal auftretende relative Druck wird Explosionsdruck genannt. [Steen 2000]. Da dieser Wert als Bezugswert für eine Überdruckprüfung zur Prüfung der Druckfestigkeit von Gehäusen der druckfesten Kapselung gilt, wird er entsprechend als Bezugsdruck definiert. In der IEC 60079-1 heißt es dazu: „Der Bezugsdruck ist der höchste Wert der geglätteten höchsten Drücke, relativ zum Atmosphärendruck, die bei diesen Prüfungen festgestellt worden sind. Für die Glättung muss ein Tiefpassfilter mit einem 3-dB-Punkt bei  $5 \text{ kHz} \pm 0,5 \text{ kHz}$  verwendet werden.“ Weiter ist beschrieben, dass die Positionierung zwischen Zündquelle und Druckaufnehmer im Ermessen des Prüflabors liegt. Es wird angestrebt, die Kombination zu finden, die den höchsten Druck ergibt [IEC 2014]. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen, sind die Positionen der Zündquelle und der Druckaufnehmer in dem Programm vorgegeben.

### 2.2 Programmumfang

Die Bestimmung des Explosionsdruckes wird an einem Prüfmuster für zwei Konfigurationen (Konfiguration A: Einzelkammer; Konfiguration B: Kombination zweier Kammern mit Blende), zwei Umgebungstemperaturen (Normaltemperatur und Umgebungstemperatur von  $-40 \text{ °C}$ ) und zwei explosionsfähigen Gemischen (Ethen und Wasserstoff) durchgeführt. Jede Kombination wird fünfmal gezündet was einer Gesamtanzahl von 40 Explosionstests entspricht (siehe Abbildung 1). Die im Programm verwendeten explosionsfähigen Gemische besitzen eine Volumenkonzentration für Wasserstoff von  $31 \pm 1 \text{ Vol.-% H}_2$  und für Ethen von  $8 \pm 0,5 \text{ Vol.-% C}_2\text{H}_4$ . Die Bestimmung des Explosionsdruckes bei einer Umgebungstemperatur von  $-40 \text{ °C}$  kann in Übereinstimmung mit der IEC 60079-1 je nach der Beschaffenheit des Prüfmusters nach vier unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden. Bezogen auf das im Programm verwendete Prüfmuster sind zwei der Verfahren anwendbar. Bei dem einen Verfahren wird der Explosionsdruck direkt bei einer Temperatur von  $-40 \text{ °C}$  bestimmt, was das Herunterkühlen des Prüfmusters notwendig macht. Bei dem anderen Verfahren wird der Explosionsdruck bei normaler Umgebungstemperatur unter Verwendung des definierten explosionsfähigen Gemischs, aber bei erhöhtem Druck, bestimmt.

Bei der Verwendung des letzteren Verfahrens wird der zu verwendende Absolutdruck des explosionsfähigen Gemischs innerhalb des Prüfmusters unter Verwendung von  $T_{a,min}$  in °C wie folgt berechnet [IEC 2014]

$$P = 100 \times \left[ \frac{293}{(T_{a,min} + 273)} \right] \text{kPa}. \quad (1)$$

Der daraus resultierende Absolutdruck des explosionsfähigen Gemischs für  $T_{a,min} = -40 \text{ °C}$  beträgt demnach  $P = 125,8 \text{ kPa}$ . Für die Durchführung des Programms ist es den teilnehmenden Prüflaboratorien freigestellt für welches Verfahren Sie sich entscheiden.

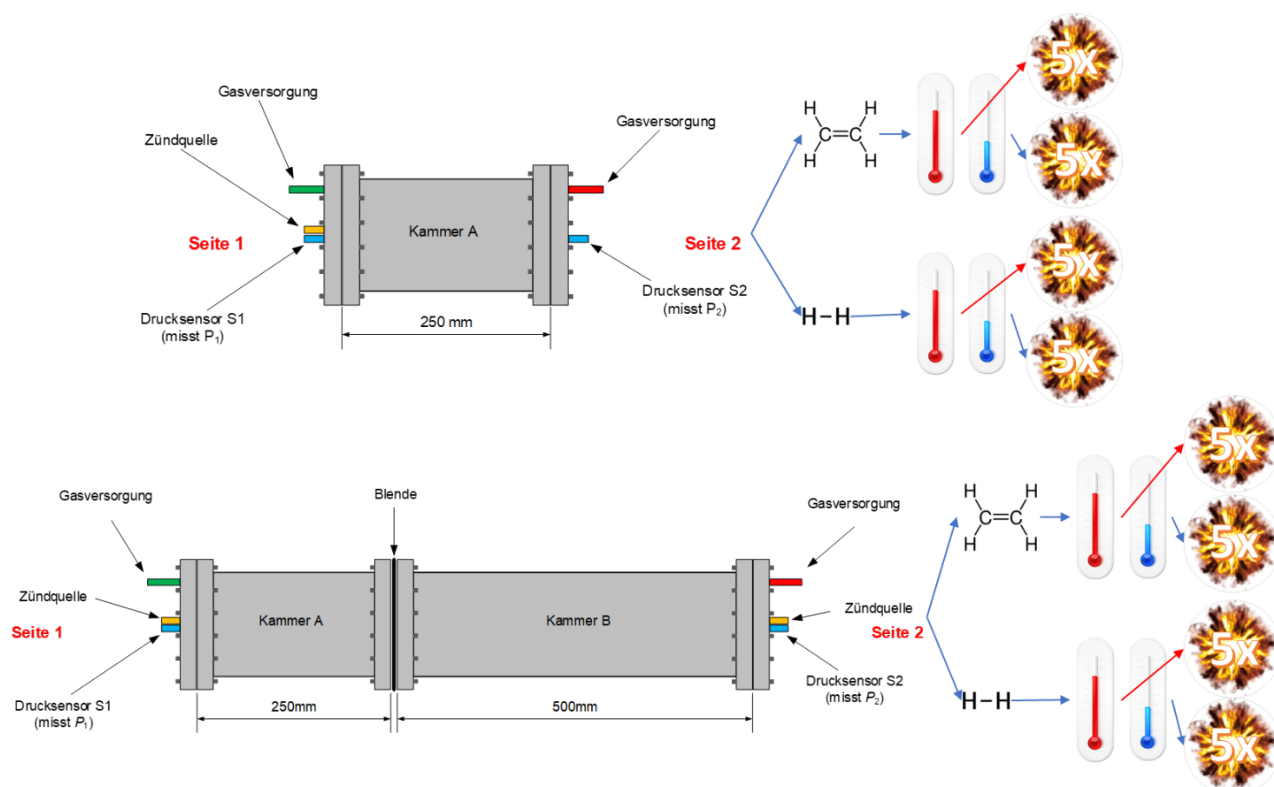


Abbildung 1: Schema des Prüfungsumfanges für die Konfigurationen a) (oben) und b) (unten)

### 2.3 Prüfmuster

Das Prüfmuster besteht aus zwei zylinderförmigen Edelstahlkammern in den Längen 250 mm und 500 mm. Der Innendurchmesser beträgt jeweils 161,5 mm. Die Kammern werden mit vorpräparierten Flanschen versehen. Diese sind ausgestattet mit unterschiedlichen Anschlussbohrungen für die Installation der Druckaufnehmer, Zündung und Gasversorgung durch das Prüflaboratorium. Um verschieden Gehäusegeometrien abzubilden, ist das Prüfmuster modular aufgebaut. Je nach Konfiguration wird die kurze Kammer mit der langen Kammer unter Verwendung einer Blende mit einer 15 mm Lochbohrung kombiniert.

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten werden die Prüfmuster einzeln gemäß ISO/IEC 17043 [ISO/IEC 2010] auf Homogenität und Stabilität überprüft.

## 2.4 Prüfablauf

Der Prüfablauf zur Bestimmung des Explosionsdruckes des Prüfmusters besteht im Wesentlichen aus vier Bereichen:

- Erstellung und Analyse eines explosionsfähigen Gemischs,
- Zündung des explosionsfähigen Gemischs,
- Druckerfassung und Signalverstärkung bzw. Signalumwandlung,
- Signalverarbeitung und Darstellung.

Der vereinfachte prinzipielle Prüfaufbau ist anhand folgender Abbildung dargestellt:

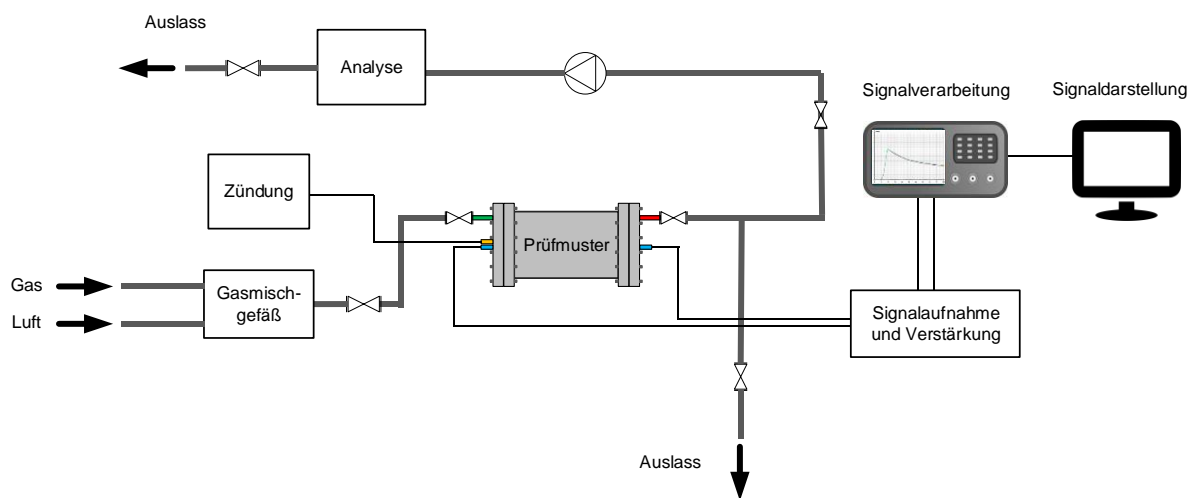


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines Prüfstands zur Bezugsdruckmessung

Für die Messung von Bezugsdrücken werden im Bereich des Explosionsschutzes üblicherweise piezoelektrische Druckaufnehmer in Kombination mit Ladungsverstärkern genutzt. Der auftretende Druck als Folge der Explosion des explosionsfähigen Gemischs innerhalb des Prüflings nach Zündung mittels Zündkerze oder Glühdraht erzeugt im Druckaufnehmer ein proportionales Ladungssignal hoher Impedanz. Dieses Ladungssignal wird dann über spezielle rauscharme und hochisolierende Verbindungsleitungen an den Ladungsverstärker übertragen, der es in eine Spannung niedriger Impedanz umwandelt. Das Spannungssignal kann mittels Oszilloskops oder geeigneter Software in Kombination mit einem A/D Wandler erfasst und ausgewertet werden.

## 2.5 Zugewiesener Wert und Standardabweichung

Der zugewiesene Wert stellt den Referenzwert dar, mit dem die Ergebnisse der Teilnehmer verglichen werden. Die Standardabweichung ist dem Referenzwert zugeordnet und bildet die Basis für die Eignungsbeurteilung. Sowohl Referenzwert  $x^*$  als auch Standardabweichung  $s^*$  werden als Konsenswert aus den Ergebnissen aller Teilnehmer als Schätzwerte der Grundgesamtheit unter Anwendung eines robusten Algorithmus nach ISO 13528 [ISO 2015] berechnet. Robust meint in diesem Zusammenhang einen iterativen Algorithmus, der den Einfluss von Ausreißern auf den Referenzwert begrenzt. Bei der Berechnung werden die Werte von  $x^*$  und  $s^*$  mehrfach aktualisiert, bis der Prozess konvergiert. Konvergenz darf angenommen werden, wenn von einer Iteration zur nächsten in der dritten signifikanten Dezimalstelle der robusten

Standardabweichung und der gleichwertigen Dezimalstelle des robusten Mittelwerts keine Änderung mehr eintritt.

Der robuste Mittelwert  $x^*$  ist der Median der aufsteigend sortierten Einzeldaten  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) aus  $n$  Messungen. Die robuste Standardabweichung  $s^*$  berechnet sich aus dem Median von  $|x_i - x^*|$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) multipliziert mit dem Faktor 1,483. Anschließend werden die Werte von  $x^*$  und  $s^*$  aktualisiert (siehe Gleichung 2). Dafür wird zuerst  $\delta = 1,5 s^*$  berechnet und anschließend für alle  $x_i$  folgende Formel angewendet

$$x_i^* = \begin{cases} x^* - \delta, & \text{wenn } x_i < x^* - \delta \\ x^* + \delta, & \text{wenn } x_i > x^* + \delta \\ x_i, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (2)$$

Die neuen Werte von  $x^*$  und  $s^*$  werden anschließend berechnet nach

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3)$$

$$s^* = 1,134 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x^*)^2}{(n-1)}}. \quad (4)$$

## 2.6 Ergebnisdarstellung und Leistungsbewertung

Das Ergebnis eines Teilnehmers  $x$ , welches mit dem zugewiesenen Wert verglichen wird, ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der fünf Einzelmessung. Das Maß der Streuung wird entsprechend als Standardabweichung berechnet. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für die Ergebnisdarstellung mit einer Erläuterung der für die Leistungsbewertung relevanten Parameter.

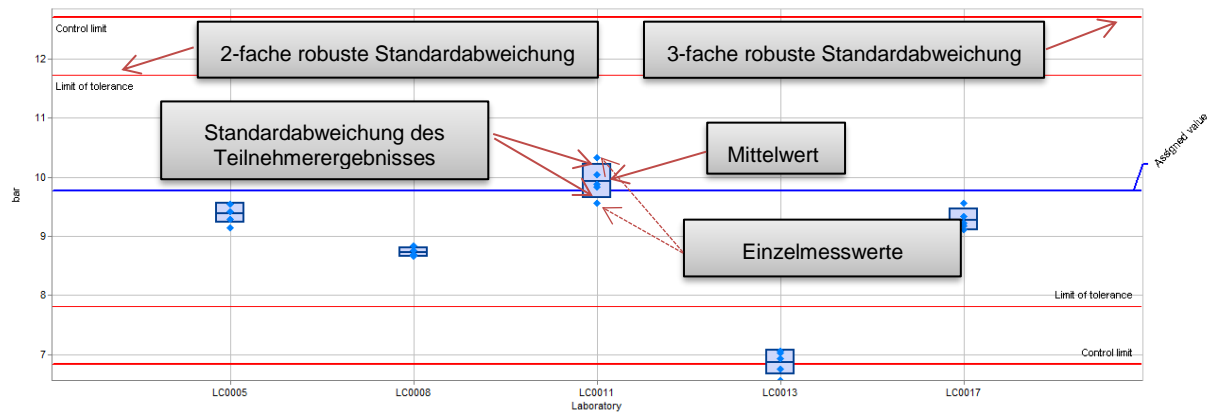


Abbildung 3: Beispiel für Darstellung der Teilnehmerergebnisse

Für die Leistungsbewertung wird der z-Wert in Übereinstimmung mit der ISO 13528 [ISO 2015] nach folgender Gleichung bestimmt

$$z = \frac{(x - x^*)}{s^*} \quad (5)$$

Wenn ein Teilnehmer ein Ergebnis  $x$  liefert, das oberhalb von  $3,0 s^*$  oder unterhalb von  $-3,0 s^*$  liegt, wird dies als Eingriffssignal betrachtet. Gleichmaßen ist ein Ergebnis oberhalb von  $2,0 s^*$  oder unterhalb von  $-2,0 s^*$  als Warnsignal zu bewerten. Ein Eingriffssignal ist als Beweis dafür zu sehen, dass eine Anomalie aufgetreten ist, die eine weiterführenden Untersuchung des Prüfvorgang erforderlich macht, der zu dem Ergebnis geführt hat. Ein Warnsignal ist als Hinweis für das Labor zu verstehen, um den Prüfprozess intern zu hinterfragen. Dieses Kriterium ist für z-Werte in dem Sinne äquivalent, dass es die gleichen Eingriffs- und Warnsignale liefert. Bei der Leistungsbewertung ist zu beachten, dass die Eingriffs- und Warnsignale nicht als Sicherheitsgrenzen interpretiert werden dürfen. Die Sicherheitsgrenzwerte liegen aufgrund von in der IEC 60079-1 implementierten Sicherheitsfaktoren (stöchiometrische Brennstoff-Luft-Gemische, Sicherheitsfaktor 1,5, etc.) in der Regel weit über den in dem Programm verwendeten statistischen Grenzen.

### 3 Ergebnisse

Im Folgenden sind beispielhaft die Ergebnisse für die Konfiguration a) (Einzelkammer) bei normaler Umgebungstemperatur mit einem explosionsfähigen Wasserstoff Luft-Gemisch bei einem Volumenanteil von  $31 \pm 1 \%$   $H_2$  dargestellt. Es handelt sich um die Messergebnisse des Druckaufnehmers, der gegenüber der Zündseite installiert ist (Seite 2). Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus dieser Konfiguration lassen sich auf die weiteren Konfigurationen übertragen.

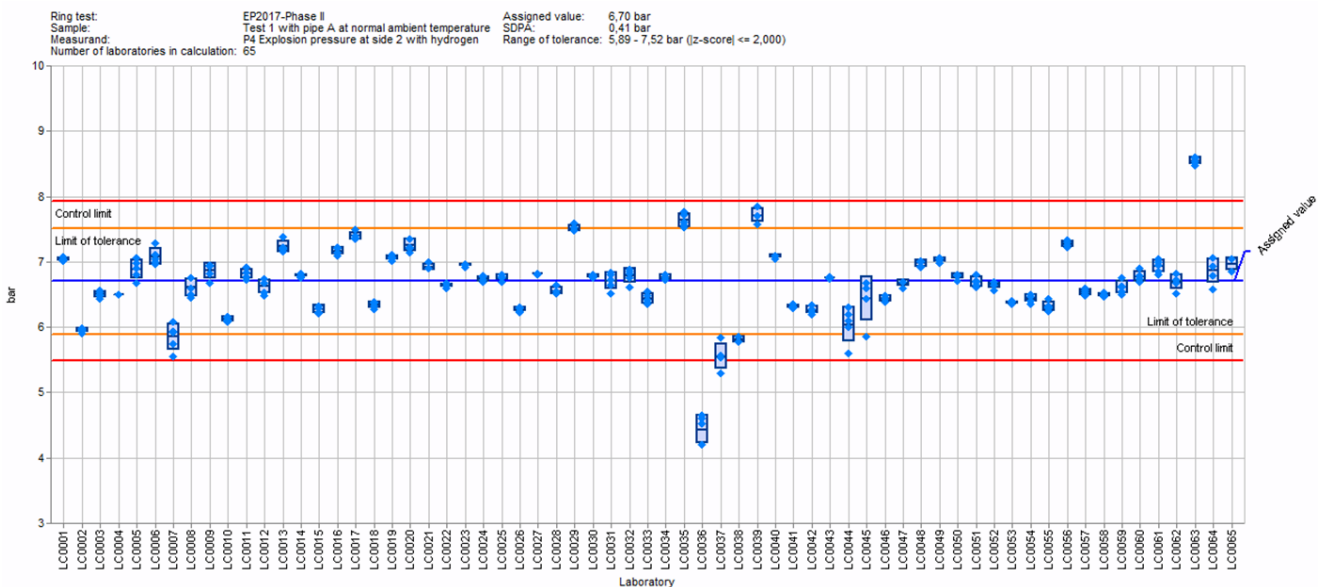


Abbildung 4: Teilnehmerergebnisse in anonymisierter Form für die kurze Kammer

Das Diagramm in Abbildung 4 zeigt die Teilnehmerergebnisse in anonymisierter Form. Der zugewiesene Wert für diese Konfiguration beträgt  $x^* = 6,70$  bar. Die Eingriffsgrenzen liegen im Bereich von  $P_{Ein, min} = 5,47$  bar bis  $P_{Ein, ma} = 7,93$  bar. Fünf Teilnehmer liegen mit Ihrem Ergebnis außerhalb von  $\pm 2,0 s^*$ , was ein Warnsignal zur Folge hat. Zwei Labore liegen außerhalb der Eingriffsgrenzen  $\pm 3,0 s^*$  und haben ein Eingriffssignal. Die Streuungen der

Einzelwerte innerhalb der Teilnehmerergebnisse sind für den Großteil der Ex-Prüflaboratorien sehr gering. Dies lässt sich mit der einfachen Geometrie des Prüfmusters erklären, welche eine laminare Flammenausbreitung zur Folge hat und eine Vorkompression des explosionsfähigen Gemischs verhindert. Dies wiederum ermöglicht eine hohe Präzision bei der Bestimmung des Bezugsdrucks.

Vergleicht man den zugewiesenen Wert mit einem Vergleichswert aus der DIN EN 15967 [DIN EN 2011], welche die Verfahren zur Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges für Gase und Dämpfe beschreibt, fällt auf, dass der in der Norm angegebene Referenzwert für die Bestimmung des Explosionsdruckes für eine ähnliche Geometrie (Kugel) und gleichem explosionsfähigem Gemisch vergleichbare Werte liefert. Der maximale Explosionsdruck aus der Norm liegt mit  $P_{ex} = 6,9$  bar nur geringfügig über dem zugewiesenen Wert der diskutierten Konfiguration ( $\Delta P = 0,2$  bar). Die Differenz kann unter anderem mit dem in dem Programm angewendeten Tiefpassfilter (3-dB-Punkt bei  $5 \text{ kHz} \pm 0,5 \text{ kHz}$ ) begründet werden, der die Druckamplituden leicht reduziert. Vergleicht man aber die in der gleichen Norm als akzeptabel definierte Bandbreite von  $P_{Band} = \pm 0,3$  bar mit der Warngrenze der verwendeten Konfiguration von  $P_{Warn} = \pm 2,0 \text{ s}^* = \pm 0,82$  bar, ist eine Abweichung deutlich zu erkennen.

## 4 Diskussion der Einflussgrößen

Um die Gründe für die erhöhte Streuung in den Programmerngebnissen zu verstehen, hilft neben der Analyse der reinen Messdaten zusätzlich eine genauere Betrachtung weiterer Parameter wie Druckverlaufskurven, Messequipment sowie Randbedingungen während der Versuchsdurchführung. Diese Daten wurden ebenfalls von den Teilnehmern zur Verfügung gestellt. Eine detaillierte Betrachtung dieser Informationen und die Diskussionen mit den Prüflaboratorien, deren Ergebnisse außerhalb der Warn- und Eingriffsgrenzen liegen, hat zu einer Liste von Einflussfaktoren geführt, die neben anderen Faktoren, die erhöhten Streuungen im Programm "Explosion Pressure" mit verursacht haben:

- Fehlende kritische Analyse und Plausibilitätsprüfung aller Messergebnisse (einschließlich Druckverläufe).
- Fehlender Schutz gegen Temperatureinflüsse (Thermoschock) auf die Membran des Druckaufnehmers: Das Auftreffen von Hitze (oder Kälte) auf die Membran eines Drucksensors führt zu dessen lokaler Verformung und entlastet den Sensorkristall, wodurch das eigentliche Drucksignal (Nutzsignal) von einem Thermoschocksignal (ungewolltes Signal) überlagert wird. Da thermoschockoptimierte Sensoren unerwünschte Thermoschocksignale nur reduzieren aber nicht vollständig eliminieren können, hat es sich bewährt, die Aufnehmermembran mit einer dünnen Schicht Silikongummi (1 mm) zu schützen. Durch diese Schutzmaßnahme wird der negative Einfluss des Thermoschocks verzögert, so dass er dem Nutzsinal nicht mehr überlagert ist.
- Falsche Auswahl der Messbereiche bei Datenerfassung und -verarbeitung: Es sind individuelle Messbereiche (für Zeitbasis und Amplitude) in Abhängigkeit vom Prüfling und dem Brennstoff-Luft-Gemisch zu verwenden. Vordefinierte Einstellungen sind zu vermeiden. Der Schwerpunkt sollte auf der Erfassung der Anstiegszeit und der maximalen Amplitude liegen. Die Genauigkeit der Messung hängt von der Abtastrate, der Speichertiefe und dem Messbereich des Datenerfassungssystems ab. Zu große Messbereiche können zu einer geringeren Genauigkeit und einem niedrigen Detailgrad des Messergebnisses führen. Daraus kann folgen, dass das Datenerfassungssystem nicht den höchsten Messwert erfasst und wichtige Druckspitzen verpasst werden.
- Zu geringe Abtastrate bei der Datenerfassung: Das Datenerfassungssystem sollte eine Abtastrate von min. 50 ksps aufweisen. Da der Frequenzbereich der Drucksignale

durch die Anforderung der IEC 60079-1 einen 5 kHz Tiefpassfilter zu verwenden begrenzt ist, kann dieser Wert als die höchste Frequenz im System angenähert werden. Für eine angemessene Auflösung wird mindestens der Faktor 10 als Abtastrate empfohlen d. h. bei  $\leq 5$  kHz Signal ...  $\geq 50$  ksp/s Abtastrate.

- Zu geringe Zeitkonstante der Messkette: Bei Verwendung von IEPE-Sensoren (piezoelektrische Sensoren mit integriertem Verstärker) ist darauf zu achten, dass ein IEPE-Kuppler mit einer größeren Zeitkonstante als die des IEPE-Sensors verwendet wird:  $\tau_{\text{IEPE Kuppler}} > \tau_{\text{IEPE Sensor}}$ . Die Zeitkonstante bestimmt die Grenzfrequenz der Hochpasscharakteristik der piezoelektrischen Messkette. Die Gesamtzeitkonstante der Messkette liegt nahe an der kleineren Zeitkonstante von IEPE-Sensor und IEPE-Kuppler. Eine kleine Zeitkonstante hat Einfluss auf statische Teile des Drucksignals. Es filtert im Wesentlichen den niederfrequenten Inhalt des Drucksignals heraus, der einen wesentlichen Einfluss auf den gemessenen Spitzendruck haben kann. Bei Verwendung von piezoelektrischen Druckaufnehmern mit Ladungsverstärker sollte die Zeitkonstante "long" am Ladungsverstärker ausgewählt werden (falls wählbar).
- Falsche Konfiguration der Messgeräte / Datenerfassung: Bei der Verwendung von Digitaloszilloskopen oder anderen Messgeräten sollte immer die DC-Kopplung gewählt werden. Die AC-Kopplung schaltet einen Koppelkondensator in Reihe zum Messeingang des Messsystems wodurch niederfrequente Signalteile und Gleichspannungsteile herausgefiltert werden. Dieses kann zu niedrigeren gemessenen Explosionsdrücken führen.
- Fehlerhafter Prüfaufbau: Die Absperrventile der Prüfeinrichtung sollten sich in der unmittelbaren Nähe des Prüflings befinden. Ansonsten kann das Volumen der Gasanschlussleitungen das Volumen des Prüflings beeinflussen, was wiederum zu fehlerhaften Bezugsdrücken führen kann.
- Fehlerhafte Montage der Druckaufnehmer: Druckaufnehmer sollten mit dem vom Hersteller empfohlenen Drehmoment angezogen werden. Ein falsches Drehmoment kann zu einer seitlichen Belastung der Membran des Aufnehmers führen, was wiederum Verzerrungen des Ausgangssignals zur Folge haben kann. Die Druckaufnehmermembran sollten bündig zu der Innenwand des Gehäuses montiert werden, um akustische Schwingungen, Vorkompressionen und Turbulenzen durch das Volumen vor der Membran zu vermeiden.
- Übermäßige Gehäuseerwärmung: Es sind Maßnahmen zu ergreifen, um eine übermäßige Erwärmung (signifikante Überschreitung der Umgebungstemperatur) des Brennstoff Luft-Gemisches innerhalb des Prüfmusters während einer Prüfserie zu vermeiden. Dies kann z.B. eine ausreichende Spüldauer zwischen den Zündungen oder die Überwachung der Gemischtemperatur sein. Die Dichte des Brennstoff Luft-Gemisches ist temperaturabhängig. Der gemessene Explosionsdruck ist abhängig von der Dichte des Brennstoff-Luft-Gemisches und damit von der Temperatur.
- Vordruck im explosionsfähigen Gemisch innerhalb des Prüflings: Um einen Vordruck im Inneren des Prüfmusters zu vermeiden, sollte eine Verzögerungszeit für die Absperrventile nach dem Spülen mit dem Brennstoff Luft-Gemisch verwendet werden. Werden die Absperrventile unmittelbar nach dem Spülen mit dem Brennstoff Luft-Gemisch geschlossen, kann der Druck im Inneren des Prüfmusters höher sein als der Atmosphärendruck, was zu höheren Explosionsdrücken führen kann.



Die hier aufgeführten Faktoren und deren Einfluss auf die Bestimmung des Bezugsdruckes liegen alle im Verantwortungsbereich des einzelnen Ex-Prüflabors und betreffen die korrekte Verwendung von Prüfmuster, Prüfaufbau und Messequipment. Neben diesen individuellen Faktoren hat sich jedoch eine weitere globale Einflussgröße in Form von unterschiedlichen Prüfbedingungen hinsichtlich Temperatur und Vordruck als Ursache für die Streuung ergeben. Die IEC 60079-1 macht keine explizite Angabe, bei welcher Umgebungstemperatur bzw. bei welchem Umgebungsdruck die Bestimmung des Bezugsdruckes zu erfolgen hat. Implizit ergibt sich aus der Formulierung des Normtextes aber ein Temperaturbereich von - 20 °C bis + 60 °C und ein Druckbereich von 80 kPa bis 110 kPa, bei dem die Prüfungen durchgeführt werden können. Berücksichtigt man in diesem Zusammenhang das Verhalten des Explosionsdruckes in Abhängigkeit von Temperatur- und Druck des explosionsfähigen Gemisches nach folgender Gleichung

$$P_{Ex}(T, p) = P_{Ex}(T_0, p_0) \cdot \frac{p \cdot T_0}{T \cdot p_0} \quad (6)$$

mit

$T$  = Temperatur des explosionsfähigen Gemisches vor der Zündung

$T_0$  = Bezugstemperatur des explosionsfähigen Gemisches

$p$  = Druck des explosionsfähigen Gemisches vor der Zündung

$p_0$  = Bezugsdruck des explosionsfähigen Gemisches

$P_{max}(T, p)$  = Explosionsdruck bezogen auf Temperatur und Druck des explosionsfähigen Gemisches vor der Zündung

$P_{max}(T_0, p_0)$  = Explosionsdruck bezogen auf Bezugstemperatur und -druck

wird deutlich, dass die Gesamtstreuung der Teilnehmerergebnisse nicht nur von den oben genannten individuellen Einflussfaktoren abhängig ist, sondern dass die Freiheitsgrade in den Normvorgaben zu den Randbedingungen bei der Prüfungsdurchführung ebenfalls einen erheblichen Beitrag dazu leisten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschreibt einen Auszug der Analyse der Teilnehmerdaten des Ringvergleichsprogramms "Explosion Pressure". Es wird dargestellt, dass es trotz der Anwendung einheitlicher technischer Anforderungen in Form von Standards zu Streuungen bei den Ergebnissen bei der Bestimmung des Explosionsdruckes kommen kann. Ein Teil der Einflussfaktoren ergibt sich aus der möglicherweise fehlerhaften Anwendung des Messequipments sowie durch Fehler beim Prüfaufbau und der Prüfmusterpräparation. Die Minimierung dieser Einflussfaktoren ist durch Aufklärung und Trainings für die jeweiligen Prüflaboratorien gut möglich. Die Auswertung zeigt aber ebenfalls deutlich, dass die momentanen Randbedingungen in den technischen Standards zu einer Streuung der Ergebnisse beitragen.

Das in diesem Beitrag beschriebene Ringvergleichsprogramm wurde mit dem Ziel entwickelt, die Vergleichbarkeit zwischen den Ex-Prüflaboratorien weltweit zu erhöhen und die täglich angewendeten Prüfverfahren kritisch zu hinterfragen. Dass das Programm für die Verbesserung der Vergleichbarkeit einen Beitrag leisten kann, zeigen die Ergebnisse von Wiederholungsmessungen innerhalb des Programms nach vorheriger Diskussion der Einflussfaktoren. Die Streuungen konnten dadurch reduziert und Ausreißer minimiert werden. Vorschläge zur Verbesserung der Prüfmethode wie beispielsweise Korrekturrechnungen bei der Bestimmung des Explosionsdruckes werden mit Hilfe der Erkenntnisse aus dem Programm aktiv in das entsprechende Normungsgremium mit eingebracht. Eine weitere Maßnahme als Ergebnis des Programms ist ein "Best Practice Paper" welches als offizielles Dokument (Decision Sheet) innerhalb des IECEx - Systems veröffentlicht wird, um technische Anforderungen ergänzend

zur Norm zu liefern und den Prüflaboratorien Hilfestellung bei der korrekten Durchführung der Prüfung bietet.

## Literaturverzeichnis

- [ISO/IEC 2005] ISO / IEC 17025 (2005). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- [IEC 2017] IEC 60079-0 (2017). Explosive atmospheres – Part 0: Equipment – General requirements, Edition 7.0.
- [IEC 2014] IEC 60079-1 (2014). Explosive atmospheres – Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures „d“, Edition 7.0.
- [ISO/IEC 2010] ISO/IEC 17043 (2010) Conformity assessment — General requirements for proficiency testing, Edition 1.0.
- [ISO 2015] ISO 13528 (2015). Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons, Edition 2.0.
- [Steen 2000] H. Steen (2000). Handbuch des Explosionsschutzes, 1. Auflage, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [DIN EN 2011] DIN EN 15967 (2011) Verfahren zur Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges für Gase und Dämpfe.