

DIN EN 15967

ICS 13.230

Entwurf

Einsprüche bis 2020-09-30
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 15967:2011-10

**Verfahren zur Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges für Gase und Dämpfe;
Deutsche und Englische Fassung prEN 15967:2020**

Determination of maximum explosion pressure and the maximum rate of pressure rise of gases and vapours;
German and English version prEN 15967:2020

Détermination de la pression maximale d'explosion et de la vitesse maximale de montée en pression des gaz et des vapeurs;
Version allemande et anglaise prEN 15967:2020

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-07-31 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nasg@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG), 10772 Berlin oder Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 84 Seiten

DIN-Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 15967:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 305 „Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 095-02-09 AA „Kenngrößen für Stäube, Gase und Dämpfe“ im DIN-Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 15967:2011-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die normativen Verweisungen wurden aktualisiert;
- b) in 4.4.2.1 wurden die Anforderungen für die Reduzierung der Prüfungen modifiziert;
- c) ein informativer Anhang über die Abhängigkeit des Druckverhältnisses von der Temperatur wurde hinzugefügt.

<i>Titel de:</i>	Verfahren zur Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges für Gase und Dämpfe
<i>Titel en:</i>	Determination of maximum explosion pressure and the maximum rate of pressure rise of gases and vapours
<i>Titel fr:</i>	Détermination de la pression maximale d'explosion et de la vitesse maximale de montée en pression des gaz et des vapeurs

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Prüfverfahren	7
4.1 Kurzbeschreibung	7
4.2 Prüfgerät	8
4.2.1 Allgemeines	8
4.2.2 Explosionsgefäß	8
4.2.3 Vorrichtung zur Herstellung des Prüfgemisches	8
4.2.4 Zündsystem	9
4.2.5 Druckmesseinrichtung	10
4.2.6 Temperaturmessgerät	11
4.2.7 Sicherheitsaspekte	11
4.3 Probenvorbereitung und -lagerung	12
4.4 Durchführung	12
4.4.1 Herstellen des Prüfgemisches	12
4.4.2 Bestimmung des Explosionsdruckes p_{ex} , des maximalen Explosionsdruckes p_{max} , des zeitlichen Explosionsdruckanstieges $(dp/dt)_{ex}$ und des zeitlicher Explosionsdruckanstieges $(dp/dt)_{max}$	13
4.5 Auswertung	16
4.5.1 Allgemeine Aspekte	16
4.5.2 Explosionsdruck und maximaler Explosionsdruck	16
4.5.3 Zeitlicher Druckanstieg und maximaler zeitlicher Druckanstieg	17
4.6 Prüfbericht	19
Anhang A (normativ) Verifizierung der Werte für den maximalen Explosionsdruck	20
Anhang B (normativ) Verifizierung der Werte für den maximalen zeitlichen Druckanstieg	21
Anhang C (normativ) Glätten von Druck-Zeit-Kurven	24
Anhang D (informativ) Umrechnung der Werte für den Brennstoffanteil	28
D.1 Abkürzungen und Symbole	28
D.2 Stoffkenngrößen von Luft	29
D.3 Definitionen	29
D.4 Herstellen des Prüfgemisches	29
Anhang E (informativ) Beispiel einer Verdampfereinrichtung für Flüssigbrennstoffe	32
Anhang F (informativ) Beispiel eines Prüfberichtformblattes	34
Anhang G (informativ) Wesentliche technische Änderungen zwischen dieser Europäischen Norm und den früheren Ausgaben	37
Anhang H (informativ) Ungefähre Temperaturabhängigkeit des Explosionsdruckverhältnisses	38
H.1 Definition der Parameter	38
H.2 Ableitung einer Gleichung zur Näherung der Temperaturabhängigkeit des Explosionsdruckverhältnisses	38

Anhang ZA (informativ) Verhältnis zwischen dieser Europäischen Norm und den zu erfüllenden grundlegenden Anforderungen von Richtlinie 2014/34/EU	40
Anhang ZB (informativ) Verhältnis zwischen dieser Europäischen Norm und den zu erfüllenden grundlegenden Anforderungen von Richtlinie 2006/42/EG	41
Literaturhinweise.....	42

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 15967:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 305 „Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 15967:2011 ersetzen.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Mandats erarbeitet, den die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EU-Richtlinien siehe informativen Anhang ZA und Anhang ZB, die Bestandteil dieses Dokuments sind.

Einleitung

Dieses Dokument beschreibt Prüfverfahren zur Bestimmung:

- des Explosionsdruckes und des maximalen Explosionsdruckes; und
- des zeitlichen Explosionsdruckanstieges und des maximalen zeitlichen Explosionsdruckanstieges; eines ruhenden Gemisches aus brennbarem Gas, Luft und Inertgas bei Umgebungstemperatur und -druck.

Der maximale Explosionsdruck und der maximale zeitliche Druckanstieg dienen als Grundlage für die Auslegung von Explosionsschutzmaßnahmen, wie explosionsdruckfeste oder explosionsdruckstoßfeste Bauweise, Explosionsdruckentlastung und Explosionsunterdrückung. Diese Eigenschaften werden besonders beeinflusst durch:

- die Größe und Form des Explosionsbehälters;
- die Art und Energie der Zündquelle;
- die Temperatur und den Druck;
- die Turbulenzen.

Daher ist es erforderlich, die Bedingungen bei der Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges in einer Norm festzulegen.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt ein Verfahren zur Bestimmung des Explosionsdrucks und des maximalen Explosionsdrucks sowie des zeitlichen Explosionsdruckanstieges und des maximalen zeitlichen Explosionsdruckanstieges eines ruhenden Gemischs aus brennbarem Gas (Brennstoff), Luft und Inertgas bei Umgebungsbedingungen in geschlossenen Behältern ohne Einbauten fest. In diesem Dokument schließt der Begriff „Gas“ auch Dämpfe, jedoch keine Nebel, ein. Diese Europäische Norm gilt nicht für Bedingungen, unter denen Detonations- und Zersetzungsphänomene auftreten können.

Die nach den in diesem Dokument festgelegten Verfahren gemessenen Drücke und zeitlichen Druckanstiege sind für die Auslegung von druckfesten Kapselungen, das sind Umschließungen, die konstruktiv so ausgelegt sind, dass sie einer im Innern stattfindenden Explosion standhalten und diese nicht in eine äußere explosionsfähige Atmosphäre übertragen, oder anderen geschlossenen Behältern, deren innere Geometrie zu einer Drucküberhöhung führen kann, nicht anwendbar. Selbst in einer Umschließung von relativ einfacher Geometrie können Einbauten zu wesentlich höheren Explosionsdrücken als den nach diesem Dokument gemessenen führen. Dieses Dokument gilt nicht für die Konstruktion und Prüfung von druckfesten Kapselungen nach den Anforderungen von EN 13463-6 (für nicht elektrische Betriebsmittel) und EN 60079-1 (für elektrische Betriebsmittel).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 13237:2012, *Explosionsgefährdete Bereiche — Begriffe für Geräte und Schutzsysteme zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 13237:2012 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1 Explosionsdruck

p_{ex}
höchster unter festgelegten Prüfbedingungen bestimmter Druck, der in einem geschlossenen Behälter bei der Explosion eines bestimmten Gemisches von brennbaren Stoffen mit Luft oder Luft und Inertgasen auftritt

Anmerkung 1 zum Begriff: p_{ex} wird bei Gasen und Dämpfen als absoluter Druck und bei Stäuben als Überdruck angegeben.

3.2

maximaler Explosionsdruck

$p_{\max}$

Höchstwert des Explosionsdruckes, der bei den Prüfungen des Explosionsdruckes gemessen wird, wenn der Anteil an brennbaren Stoffen in dem Gemisch variiert wird

Anmerkung 1 zum Begriff: $p_{\max}$ wird bei Gasen und Dämpfen als absoluter Druck und bei Stäuben als Überdruck angegeben.

3.3

zeitlicher Explosionsdruckanstieg

$(dp/dt)_{\text{ex}}$

höchster unter festgelegten Prüfbedingungen bestimmter Wert der Steigung (erste Ableitung) der Druck-Zeit-Kurve (falls erforderlich geglättet), der in einem geschlossenen Behälter bei der Explosion eines bestimmten Gemisches von brennbaren Stoffen mit Luft oder Luft und Inertgasen auftritt

3.4

maximaler zeitlicher Explosionsdruckanstieg

$(dp/dt)_{\max}$

höchster Wert des bei den Prüfungen gemessenen zeitlichen Explosionsdruckanstieges, der sich durch Variieren des Anteils an brennbaren Stoffen im Gemisch ergibt

Anmerkung 1 zum Begriff: Für die Anwendung dieses Dokuments werden alle Drücke in bar absolut und der zeitliche Explosionsdruckanstieg in bar/s angegeben.

4 Prüfverfahren

4.1 Kurzbeschreibung

Ein explosionsfähiges Prüfgemisch wird durch eine festgelegte Zündquelle entzündet, die in der Mitte eines Gefäßes zur Prüfung der Explosion (Explosionsgefäß) positioniert ist. Die sich nach der Entzündung des Prüfgemisches entwickelnde Druck-Zeit-Kurve wird unter Verwendung einer Druckmesseinrichtung aufgezeichnet.

Aus der Druck-Zeit-Kurve wird der Höchstwert des zeitlichen Explosionsdruckanstieges $(dp/dt)_{\text{ex}}$ berechnet und der Höchstwert des Druckes p_{ex} bestimmt.

Wiederholungsmessungen werden mit stufenweisen Änderungen des Anteils an brennbarem Gas im Gemisch durchgeführt:

- a) Der maximale Explosionsdruck $p_{\max}$ wird als der höchste beobachtete Wert für p_{ex} bestimmt.
- b) Der maximale zeitliche Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{\max}$ wird als der höchste beobachtete Wert für $(dp/dt)_{\text{ex}}$ bestimmt.

4.2 Prüfgerät

4.2.1 Allgemeines

Das Prüfgerät besteht aus:

- einem Explosionsgefäß;
- einer Vorrichtung zur Herstellung des Prüfgemisches;
- einem Zündsystem;
- einer Druckmesseinrichtung;
- einem Temperaturmessgerät;
- Sicherheitsvorrichtungen.

4.2.2 Explosionsgefäß

Das Explosionsgefäß muss eine Kugel- oder Zylinderform aufweisen. Das Innenvolumen des Explosionsgefäßes muss $\geq 0,005 \text{ m}^3$ sein. Bei Anwendung eines zylindrischen Gefäßes muss das Verhältnis von Länge zu Durchmesser 1 sein.

Das Explosionsgefäß und sämtliche daran angebrachten technischen Einrichtungen (Armaturen, Zündquelle, Druckaufnehmer usw.) müssen für eine maximale Druckbeständigkeit von 20 bar ausgelegt sein.

ANMERKUNG Anleitungen für die Auslegung des Explosionsgefäßes sind EN 14460, EN 13445-3 und EN 13480-3 zu entnehmen.

Das Explosionsgefäß muss aus nicht rostendem Stahl oder einem anderen Werkstoff ohne jegliche katalytische Wirkung hergestellt sowie gegen die vom Ausgangsgasgemisch und den Verbrennungsprodukten ausgehende Korrosionswirkung beständig sein.

Das Explosionsgefäß muss mit genügend Ein- und Auslässen versehen sein, um das Füllen, Evakuieren und Spülen zu ermöglichen.

4.2.3 Vorrichtung zur Herstellung des Prüfgemisches

Das Prüfgemisch kann in einem Partialdruckverfahren oder durch Vermischen von Gasströmen hergestellt werden. Das kann innerhalb oder außerhalb des Explosionsgefäßes erfolgen.

Wird das Prüfgemisch im Partialdruckverfahren hergestellt, muss der dafür verwendete Behälter ausgestattet sein mit:

- a) einer Vakuumpumpe und einem Vakuummessgerät;
- b) Druckmessgeräten oder Manometern;
- c) einem Mittel zur Herstellung eines homogenen Prüfgemisches (z. B. Rührvorrichtung).

Wird das Prüfgemisch durch das Vermischen von Gasströmen hergestellt, sind die erforderlichen Bauteile:

- a) Durchflussmessgeräte (Massen- oder Volumenstrommessgerät);
- b) ein Mittel zur Herstellung eines homogenen Prüfgemisches (z. B. Mischkammer);
- c) ein Verdampfer, sofern flüssige Proben verwendet werden (ein Beispiel ist Anhang E zu entnehmen).

Die Vorrichtung für die Herstellung des Prüfgemisches muss so ausgelegt sein, dass der Anteil an brennbarem Gas mit einer maximalen Messunsicherheit von $\pm 10\%$, relativ, bei einem Anteil an brennbarem Gas bis 2 % je Mol oder $\pm 0,2\%$, absolut, bei einem Anteil an brennbarem Gas bis 2 % je Mol gemessen wird.

4.2.4 Zündsystem

4.2.4.1 Allgemeines

Die Zündquelle muss in der Mitte eines Explosionsgefäßes positioniert sein. Empfohlene Zündsysteme sind Induktionsfunke und Schmelzdraht. Der Prüfbericht muss die verwendete Zündquelle angeben.

Für die Entzündung einiger spezieller Gemische kann die Verwendung eines anderen Zündsystems erforderlich sein. Bei Verwendung einer alternativen Zündquelle muss diese umfassend im Prüfbericht beschrieben sein. Darüber hinaus wird empfohlen, für die Auswertung der Ergebnisse fachmännischen Rat einzuholen.

4.2.4.2 Induktionsfunke

Als Zündquelle dient eine Folge von Induktionsfunken zwischen zwei Elektroden.

Ein geeigneter Elektrodenwerkstoff ist nichtrostender Stahl. Die Elektroden müssen in der Mitte des Explosionsgefäßes angeordnet werden. Sie müssen zugespitzt sein, und deren Durchmesser darf höchstens 4 mm betragen. Der Spitzenwinkel muss 60° betragen. Der Abstand zwischen den Spitzen muss $(5 \pm 0,1)$ mm betragen. Die Elektroden müssen im Explosionsgefäß so angebracht sein, dass sie auch bei den höchsten während der Prüfung auftretenden Explosionsdrücken gasdicht bleiben. Die Befestigung muss hitzebeständig und beständig gegen das Prüfgemisch sein und eine angemessene elektrische Isolierung gegenüber dem Körper des Explosionsgefäßes bieten.

Für die Erzeugung der Induktionsfunken ist ein Hochspannungstransformator mit einer Effektivspannung von 13 kV bis 16 kV (Wechselspannung) und einem Kurzschlussstrom von 20 mA bis 30 mA zu verwenden. Die Primärwicklung des Hochspannungstransformators muss über einen Zeitschalter an das Netz angeschlossen sein, der auf die erforderliche Funkenentladungsdauer eingestellt ist.

Die Funkenentladungsdauer ist auf 0,2 s einzustellen. Falls eine Funkenentladungsdauer von 0,2 s nicht zur Entzündung des Prüfgemisches führt, darf der Versuch mit einer Funkenentladungsdauer bis zu 0,5 s wiederholt werden.

ANMERKUNG Die vom Funken freigesetzte Energie hängt vom Gasgemisch und dessen Druck ab. In Luft ergibt nach kalorimetrischen und elektrischen Messungen unter atmosphärischen Bedingungen eine derartige Energiequelle einen Funken mit einer Leistung von etwa 10 W.

4.2.4.3 Schmelzdraht

Diese Zündquelle erzeugt einen elektrischen Bogen, indem elektrischer Strom durch den zwischen zwei Haltestifte aus Metall gespannten, geraden Schmelzdraht geleitet wird.

Die elektrische Leistung zum Schmelzen des Drahtes und damit zum Erzeugen des elektrischen Bogens wird über einen Trenntransformator geliefert. Die durch den Bogen freigesetzte Zündenergie hängt von der Funkenentladungsdauer und von der Leistungsabgabe des Trenntransformators ab. Die zugeführte Energie muss zwischen 10 J und 20 J liegen, da innerhalb dieses Bereiches die Zündenergie keinen nennenswerten Einfluss auf den Explosionsdruck hat. Das wird durch Begrenzen der Leistungsabgabe des Trenntransformators auf 0,7 kVA bis 3,5 kVA und durch Phasenanschnitttechniken erreicht. Letzteres ist eine Unterbrechertechnik, durch die nur ein Teil der sekundärseitig vom Trenntransformator abgegebenen Wechselstromhalbwellen dazu verwendet wird, um den Draht zu schmelzen.

Als Werkstoff für die Haltestifte eignen sich Messing und nicht rostender Stahl. Die Haltestifte müssen parallel angeordnet sein und einen Abstand von (5 ± 1) mm haben. Als Schmelzdraht dient ein Stück gerader Chrom-Nickel-Draht (Durchmesser 0,05 mm bis 0,2 mm), der an die Spitzen der Metallstifte hart angelötet sein muss. Die Stifte müssen so im Explosionsgefäß positioniert sein, dass sich der Schmelzdraht in der Mitte des Explosionsgefäßes befindet. Die Elektroden müssen so im Explosionsgefäß angebracht sein, dass sie auch bei den höchsten während der Prüfung auftretenden Explosionsdrücken gasdicht bleiben. Die Befestigung muss hitzebeständig und beständig gegen das Prüfgemisch sein und eine angemessene elektrische Isolierung gegenüber dem Körper des Explosionsgefäßes bieten.

Um den erforderlichen Zeitaufwand für das Auswechseln des Schmelzdrahtes nach einem Zündversuch zu verringern, dürfen die Haltestifte in einen Adapter montiert werden, der in die Wandung des Explosionsgefäßes geschraubt wird.

Die Kabel/Leitungen, die den Trenntransformator mit den Haltestiften verbinden, müssen einen Querschnitt zwischen 2,5 mm² und 7 mm² haben. Die Kabel/Leitungen dürfen nicht länger als 5 m sein. Die Haltestifte müssen einen Durchmesser von 1,5 mm bis 5 mm haben.

Wenn der Durchmesser der Haltestifte aus praktischen Gründen kleiner als 3 mm sein muss, kann eine zusätzliche mechanische Abstützung notwendig sein.

4.2.5 Druckmesseinrichtung

Die Druckmesseinrichtung besteht aus:

- a) einem Druckaufnehmer;
 - 1) Der/die Druckaufnehmer müssen in das Explosionsgefäß eingebaut sein, wobei der Messkopf mit der Innenwand bündig sein muss.
 - 2) Der/die Druckaufnehmer müssen in der Lage sein, Drücke bis 20 bar zu messen. Wenn geringere Explosionsdrücke erwartet werden, dürfen Druckaufnehmer des unteren Druckbereiches eingesetzt werden.
- b) einem Verstärker;
- c) einem Datenaufzeichnungssystem;
 - 1) Das Datenaufzeichnungssystem muss eine Auflösung von mindestens 12 bit und eine Abtastfrequenz von 20 kHz oder eine Abtastfrequenz von $500/t_{\text{ex}}$ Abtastungen je Sekunde haben.
 - 2) t_{ex} ist die Zeitdauer von der Zündung bis zur Erreichung des maximalen Explosionsdruckes (siehe Bild C.1 und Bild C.2).
- d) Die Druckmesseinrichtung muss eine Bandbreite von mindestens 10 kHz haben.

Um die Zuverlässigkeit sicherzustellen, dürfen zwei Druckmesseinrichtungen benutzt werden.

Die gesamte Druckmesseinrichtung muss das Messen der Ausgangs- und Explosionsdrücke mit einer Unsicherheit von $\pm 0,05$ bar oder besser ermöglichen.

Die Druckmesseinrichtung muss eine zeitliche Auflösung von mindestens 1 ms haben.

4.2.6 Temperaturmessgerät

Zum Aufzeichnen dieses Wertes darf jedes passende Thermoelement mit entsprechendem Aufzeichnungsgerät angewendet werden. Die Aufzeichnung der Temperatur ist notwendig, weil besonders p_{ex} und p_{max} temperaturabhängig sind.

4.2.7 Sicherheitsaspekte

Sicherzustellen ist, dass sämtliche Arbeiten im Rahmen der örtlichen und nationalen Bestimmungen durchgeführt werden. Damit die Gesundheit der Personen, die die Messungen durchführen, vor den unterschiedlichen Gefahren geschützt wird, die während der Prüfung auftreten können, müssen Vorkehrungen getroffen werden, z. B.:

- a) um ein Austreten des Gemisches oder von Verbrennungsgasen nach außen zu verhindern, muss die Gasdichtheit des Behälters überprüft werden;
- b) um ein Bersten des Explosionsgefäßes zu verhindern, muss dieses so ausgelegt sein, dass es einem maximalen Druck von 20 bar widersteht (siehe 4.2.2), wobei davon ausgegangen werden kann, dass dieser Wert größer ist als der maximale Explosionsdruck, der während einer Prüfung auftreten kann;
- c) wenn das Prüfgemisch in einem gesonderten Behälter hergestellt wird, müssen dieser Behälter und die Verbindungsleitung so ausgeführt sein, dass sie dem maximalen Explosionsdruck standhalten;
- d) um die Verletzung von Bedienpersonen durch herausgeschleuderte Bruchstücke zu verhindern, müssen alle Teile des Prüfgerätes, die ein explosionsfähiges Gemisch enthalten können, in angemessener Weise abgeschirmt sein;
- e) muss eine ausreichende Be- und Entlüftung sichergestellt sein, um in dem Labor die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre als Folge:
 - 1) des Spülens des Prüfgerätes;
 - 2) der Abluft der Vakuumpumpe; oder
 - 3) von Undichtigkeiten am Gerät zu verhindern.
- f) müssen alle elektrischen Anschlüsse ausreichend isoliert sein, um tödliche elektrische Schläge oder Elektroschocks zu verhindern;
- g) müssen vor dem Herstellen des Gemisches entsprechende Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden, damit sichergestellt ist, dass die Stoffe risikolos gemischt werden können;
- h) sind Sicherheitsmaßnahmen zu treffen, um Gefährdungen zu verhindern, die beim Umgang mit toxischen brennbaren Gasen und deren Verbrennungsprodukten auftreten können;
- i) müssen bei der Handhabung von brennbaren Flüssigkeiten Sicherheitsmaßnahmen eingeleitet werden, um die Brandgefahr zu minimieren;
- j) müssen bei der Handhabung von Gasflaschen Sicherheitsmaßnahmen eingeleitet werden, um die Explosionsgefahr zu minimieren;
- k) muss bei Versagen des Zündsystems das noch am Ende der Prüfung im Explosionsgefäß befindliche explosionsfähige Gemisch herausgespült und verdünnt werden, um es unentzündbar zu machen.

4.3 Probenvorbereitung und -lagerung

Die Bestandteile des Prüfgemisches müssen die folgenden Anforderungen erfüllen:

- a) Luft: Die Luft muss öl- und wasserfrei sein. Bei Verwendung von synthetischer Luft muss das im Prüfbericht angegeben werden.
- b) Inertgas: Die Reinheit des Inertgases oder des Inertgasgemisches muss mindestens 99,8 % je Mol betragen. Bei Verwendung eines Inertgasgemisches muss dessen Zusammensetzung im Prüfbericht angegeben werden.
- c) Brennbares Gas: Das brennbare Gas kann:
 - 1) ein reiner Stoff sein oder von einem Stoffgemisch stammen,
 - 2) eine technische Probe sein (von bekannter oder unbekannter Zusammensetzung).

Wenn ein einzelner Stoff oder ein bestimmtes Stoffgemisch eingesetzt wird, muss die Reinheit jedes Stoffes mindestens 99,8 % je Mol betragen. Bei Stoffgemischen oder technischen Proben müssen die Messunsicherheiten der Zusammensetzung im Prüfbericht angegeben werden. Bei technischen Proben unbekannter Zusammensetzung ist die Probe möglichst genau zu beschreiben (z. B. Prozessbedingungen, untere Explosionsgrenze).

Stammt das brennbare Gas aus einer Flüssigkeit mit mehr als einem Bestandteil, kann die Zusammensetzung der Gasphase von der der flüssigen Phase abweichen, und bei der Entnahme großer Gasmengen kann sich die Zusammensetzung sowohl der Flüssig- als auch der Gasphase mit der Zeit ändern. Daher muss die Prüfprobe ausschließlich aus der Flüssigphase entnommen werden.

4.4 Durchführung

4.4.1 Herstellen des Prüfgemisches

4.4.1.1 Allgemeines

Bei Verwendung von Flüssiggasen oder Flüssigkeiten muss sichergestellt sein, dass keine Kondensation auftritt.

ANMERKUNG Kondensation lässt sich vermeiden, indem die Dampfdrücke der Stoffe überprüft werden und indem partiell geheizt wird, um das Abkühlen bestimmter Teile des Prüfgerätes (z. B. Armaturen) zu verhindern.

Das Prüfgemisch darf nach dem Partialdruckverfahren oder durch das Vermischen von Gasströmen entweder innerhalb oder außerhalb des Explosionsgefäßes hergestellt werden.

4.4.1.2 Herstellen des Prüfgemisches nach dem Partialdruckverfahren

Wird das Explosionsgefäß beim Herstellen des Prüfgemisches evakuiert, muss der Anteil der im Gefäß verbleibenden Luft bei der Berechnung der entsprechenden Anteile an Luft und brennbaren Stoffen berücksichtigt werden. Beim Herstellen des Prüfgemisches kann es notwendig sein, Kondensation zu verhindern.

Die Gemischkomponenten sind nacheinander so in das Explosionsgefäß einzuleiten, dass der erforderliche Partialdruck erreicht wird. Die Messeinrichtung für den Partialdruck muss eine Genauigkeit von mindestens $\pm 0,005$ bar aufweisen. Dabei ist sicherzustellen, dass das Gemisch im Explosionsgefäß während des Einleitens jeder Komponente gründlich durchmischt wird. Ist das Volumen der Zu- und Ableitungen im Vergleich zum Gefäßvolumen nicht vernachlässigbar, müssen diese Leitungen ebenfalls gespült oder evakuiert werden.

ANMERKUNG Aus praktischen Erwägungen wird Luft oftmals als letzte Komponente zugegeben, besonders bei Verwendung von Umgebungsluft.

4.4.1.3 Herstellen des Prüfgemisches durch Vermischen von Gasströmen

Das Prüfgemisch wird durch gründliches Vermischen der dosierten Ströme gasförmiger Komponenten hergestellt.

Werden flüssige Komponenten eingesetzt, müssen diese vor dem Vermischen vollständig verdampft werden.

Empfohlen wird, die Zusammensetzung des Prüfgemisches ebenfalls zu bestimmen, um zu überprüfen, ob die Dosiereinrichtungen korrekt arbeiten und ob in der Mischvorrichtung keine Undichtheiten vorliegen.

4.4.2 Bestimmung des Explosionsdruckes p_{ex} , des maximalen Explosionsdruckes p_{max} , des zeitlichen Explosionsdruckanstieges $(dp/dt)_{\text{ex}}$ und des zeitlicher Explosionsdruckanstieges $(dp/dt)_{\text{max}}$

4.4.2.1 Durchführung

Für die Bestimmung des Explosionsdruckes und des zeitlichen Druckanstieges werden die gleichen Datensätze verwendet, die gleichzeitig im gleichen Verfahren ermittelt wurden.

Wird das Prüfgemisch nicht im Explosionsgefäß hergestellt, ist dieses entweder durch vorheriges Evakuieren oder durch Spülen mit dem Gemisch zu füllen.

Das Explosionsgefäß und die Zuleitungen müssen vor dem Befüllen bis auf einen Druck von ≤ 5 mbar evakuiert werden. Das Spülen muss so vorgenommen werden, dass die Atmosphäre des Explosionsgefäßes vollständig ersetzt wird. Das wird durch Spülen mit einem Volumen erreicht, das mindestens dem 10-fachen des Gefäßvolumens entspricht.

Nachdem das Explosionsgefäß mit Prüfgemisch gefüllt ist, sind die Ein- und Auslassventile zu schließen. Um sicherzustellen, dass das Gemisch den Ruhezustand erreicht, ist eine Beruhigungsphase von mindestens zwei Minuten abzuwarten. Anschließend wird das ruhende Prüfgemisch gezündet und die Druck-Zeit-Kurve der Explosion aufgezeichnet.

Im Verlauf einer Reihe von Prüfungen darf die Temperaturerhöhung des Gefäßes (hervorgerufen durch die Verbrennung nach der Zündung) 15 K nicht überschreiten (siehe 4.5.2).

Nach der Prüfung muss eine Druckentlastung des Prüfgefäßes vom verbliebenen Überdruck erfolgen. Danach ist das Explosionsgefäß mit Luft zu spülen, um die Verbrennungsprodukte zu entfernen. Die Verbrennungsprodukte und das Spülgas müssen gefahrlos abgeführt werden.

Der zeitliche Druckanstieg kann durch die Feuchte des Gasgemisches beeinflusst werden, daher ist es wichtig, sicherzustellen, dass das Explosionsgefäß und die Zuleitungen vor Beginn der nächsten Prüfung gespült werden, um sämtliche Feuchtigkeit zu entfernen.

Wenn sich während der Prüfung Ruß gebildet hat, sind Explosionsgefäß und Zündquelle zu reinigen.

Der gesamte Ablauf des Prüfverfahrens ist für jede Zusammensetzung des Prüfgemisches fünfmal durchzuführen.

- Bei der Bestimmung von p_{ex} darf die Anzahl der Bestimmungen auf drei verringert werden, vorausgesetzt, die relative Schwankungsbreite der ersten drei Prüfergebnisse beträgt höchstens 7 %.
- Bei der Bestimmung von $(dp/dt)_{\text{ex}}$ darf die Anzahl der Bestimmungen auf drei verringert werden, vorausgesetzt, die relative Schwankungsbreite der ersten drei Prüfergebnisse beträgt höchstens 20 %.

ANMERKUNG Schwankungsbreite ist definiert als Modul der Differenz zwischen dem einzelnen Messwert und dem Mittelwert der drei gemessenen Werte; die relative Schwankungsbreite ergibt sich aus der Division der Schwankungsbreite durch den Mittelwert der drei gemessenen Werte.

4.4.2.2 Bestimmung des Explosionsdruckes p_{ex}

Der höchste Druck aus jeder der nach 4.4.2.1 für eine bestimmte Zusammensetzung gemessenen Druck-Zeit-Kurven ist mit einem der folgenden Verfahren zu ermitteln.

a) Graphisches Verfahren

Aus einer graphischen Darstellung der Druck-Zeit-Kurve, die auch ein analoger Ausdruck eines Aufzeichnungsgerätes sein kann, ist der höchste Druck zu ermitteln. Die Präzision der Daten, die für die graphische Darstellung verwendet werden, sowie die Skalierung der Achsen, muss es ermöglichen, den Druck auf 0,1 bar zu bestimmen.

b) Berechnungsverfahren

Für die Auswertung der Druck-Zeit-Daten kann ein Computerprogramm angewendet werden, um den Höchstwert des Druckes zu bestimmen. Die Präzision der Daten muss es ermöglichen, den Druck auf 0,1 bar zu bestimmen.

Der Explosionsdruck p_{ex} ist der bei diesen Bestimmungen gemessene Höchstwert.

Bei Gemischen mit hoher Verbrennungsgeschwindigkeit können die Druck-Zeit-Kurven Hochfrequenzschwingungen aufweisen. Diese sind bei der Bestimmung von p_{ex} zu vernachlässigen.

4.4.2.3 Bestimmung von $(dp/dt)_{\text{ex}}$

Der Höchstwert von $(dp/dt)_{\text{ex}}$ bei jeder Druck-Zeit-Kurve für die festgelegte Zusammensetzung wird nach folgendem Verfahren bestimmt.

Das Druck-Zeit-Diagramm von jeder Prüfung wird differenziert, um den Höchstwert der Steigung (erste Ableitung) für jede Prüfung zu ermitteln. In vielen Fällen kann es zunächst notwendig sein, die Rohdaten der Druck-Zeit-Kurve zu glätten, andernfalls können die berechneten Steigungswerte fehlerhaft sein. Ist die Anwendung von Glättungsverfahren erforderlich, müssen diese den Anforderungen von Anhang C entsprechen.

Der zeitliche Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{\text{ex}}$ ist der bei diesen Prüfungen ermittelte Höchstwert der Steigung.

4.4.2.4 Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes p_{max} und des maximalen zeitlichen Druckanstieges $(dp/dt)_{\text{max}}$

Sowohl der maximale Explosionsdruck p_{max} als auch der maximale zeitliche Druckanstieg $(dp/dt)_{\text{max}}$ werden bestimmt, indem der Anteil des brennbaren Gases in einem brennbaren Gas/Luft-Gemisch stufenweise so lange verändert wird, bis der jeweilige Höchstwert p_{ex} und $(dp/dt)_{\text{ex}}$ erreicht ist.

p_{max} und $(dp/dt)_{\text{max}}$ ergeben sich gewöhnlich bei Gemischzusammensetzungen in Nähe des stöchiometrischen Verhältnisses, obwohl sie nicht notwendigerweise übereinstimmen. Für die Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges mit ausreichender Genauigkeit und mit einer Mindestanzahl an Messungen ist das folgende iterative Verfahren anzuwenden. Nach der Bestimmung eines Wertes kann die Durchführung weiterer Messungen für die Bestimmung des anderen Wertes erforderlich sein.

Schritt 1

Ausgehend von Erfahrung, Berechnung oder Abschätzung wird der Anteil an brennbarem Gas gewählt, bei dem das Auftreten von $p_{\max}$ und/oder $(dp/dt)_{\max}$ zu erwarten ist. Dieser gewählte Anteil an brennbarem Gas gilt als Referenzwert. Wenn das stöchiometrische Verhältnis bei der Reaktion des brennbaren Gases mit Sauerstoff berechnet werden kann, dann darf das 1,1-fache des stöchiometrischen Verhältnisses als Referenzwert eingesetzt werden. Andernfalls muss der Referenzwert abgeschätzt werden, z. B. durch Analogieschluss zu anderen brennbaren Gasen vergleichbarer Zusammensetzung oder innerhalb derselben homologen Reihe. Bei technischen Proben unbekannter Zusammensetzung wird empfohlen, als Abschätzung für die stöchiometrische Zusammensetzung das Zweifache der unteren Explosionsgrenze zu wählen.

Schritt 2

Bei den vier Gemischen mit einem Anteil an brennbarem Gas vom 0,8-, 1,0-, 1,2- und 1,4-fachen des Referenzwertes ist entsprechend dem Verfahren nach 4.4.2.1, 4.4.2.2 und 4.4.2.3 vorzugehen. In den Fällen, in denen mit hoher Wahrscheinlichkeit $p_{\max}$ und/oder $(dp/dt)_{\max}$ in der Nähe des Referenzwertes liegen, darf die Anzahl der Gemische auf drei und der Inkrementalwert auf weniger als das 0,2-fache des Referenzwertes verringert werden.

Schritt 3

Für jeden Anteil an brennbarem Gas ist der Mittelwert der für p_{ex} und/oder $(dp/dt)_{\text{ex}}$ erhaltenen Werte der drei oder fünf Messreihen zu berechnen. Dann wird der höchste dieser bereits bestimmten Mittelwerte ermittelt.

Schritt 3.1

Wenn der nach Schritt 3 ermittelte Höchstwert beim höchsten oder niedrigsten Wert des Anteils an verwendetem brennbarem Gas liegt, dann ist der Bereich des Anteils an verwendetem brennbarem Gas zu erweitern. Es sind, wie jeweils anwendbar, zwei weitere Gemische mit Anteilen an brennbarem Gas entweder am oberen oder unteren Ende des ursprünglichen Bereiches mit Inkrementalwerten des 0,2-fachen vom Referenzwert auszuwählen. Andernfalls ist nach Schritt 3.2 fortzufahren.

Schritt 3.2

Liegt der nach Schritt 3 ermittelte Höchstwert im Bereich des Anteils an verwendetem brennbarem Gas, sind zwei weitere Anteilswerte an brennbarem Gas an den Mittelpunkten der Intervalle zur Linken und zur Rechten des Punktes auszuwählen, der den höchsten Mittelwert ergibt.

Schritt 3.3

Gibt es mehr als einen höchsten Mittelwert, muss jeder dieser Höchstwerte gesondert nach 3.1 oder Schritt 3.2 behandelt werden.

Schritt 4

Für die neuen, nach Schritt 3.1 oder 3.2 berechneten Anteilswerte an brennbarem Gas ist mit den in 4.4.2.1, 4.4.2.2 und 4.4.2.3 angegebenen Verfahren fortzufahren.

Schritt 5

Die Schritte 3 bis 4 sind zu wiederholen bis:

- entweder bei $p_{\max}$ die Änderung der gemessenen Explosionsdrücke geringer ist als die Genauigkeit der Druckmesseinrichtung (0,05 bar oder kleiner, siehe 4.2.5); oder

— bei $(dp/dt)_{\max}$ die Änderung des Mittelwertes geringer ist als 10 %;

oder bei jeder Messung:

— das Inkrement des Anteils an brennbarem Gas kleiner ist als die Genauigkeit der Einrichtung zum Herstellen des Prüfgemisches (± 10 % relativ bei einem Anteil an brennbarem Gas bis 2 % je Mol und $\pm 0,2$ % absolut bei einem Anteil an brennbarem Gas größer als 2 % je Mol, siehe 4.2.3).

Schritt 6

Als maximaler Explosionsdruck $p_{\max}$ gilt der höchste gemessene Wert des Explosionsdrucks.

Der höchste gemessene Wert des zeitlichen Druckanstieges gilt als der maximale zeitliche Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$.

4.5 Auswertung

4.5.1 Allgemeine Aspekte

Bei der Auswertung der nach diesem Verfahren ermittelten Ergebnisse müssen alle in 4.6 festgelegten Angaben enthalten sein.

Der Anteil an brennbarem Gas ist entweder als Stoffmengenanteil, Volumenanteil oder Massenanteil anzugeben. Weitere Einzelheiten sind Anhang D zu entnehmen. Für die maximale Abweichung des Anteils an brennbarem Gas ist der Höchstwert von $\pm 0,2$ % absolut anzugeben oder der entsprechende Wert, der aus der relativen Abweichung von ± 10 % berechnet wird (siehe 4.2.3). Eine geringere Abweichung kann angegeben werden, wenn (entweder durch das angewandte Verfahren oder durch Analyse des Gemisches) nachgewiesen werden kann, dass das Gemisch mit einer höheren Genauigkeit hergestellt wurde.

ANMERKUNG Die spezifischen Bedingungen und das in der vorliegenden Norm beschriebene Ziel des Verfahrens lassen die Bewertung der Ergebnisse durch konventionelle statistische Verfahren nicht zu. Diese sind in diesem Fall nicht anwendbar, da die Bedingungen für die Verteilungen der zufälligen Abweichungen nicht erfüllt sind und die systematischen Abweichungen — verursacht durch die Einflüsse der Messbedingungen — nicht von den zufälligen Abweichungen zu unterscheiden sind. Aus diesem Grund ist die Angabe im Prüfbericht erforderlich (siehe 4.6).

4.5.2 Explosionsdruck und maximaler Explosionsdruck

Bei der Auswertung der nach diesem Verfahren ermittelten Ergebnisse müssen alle in 4.6 festgelegten Angaben enthalten sein.

Grundlage für die Angabe des Explosionsdruckes p_{ex} ist der höchste Druck aus fünf Prüfungen, die mit dem jeweiligen Prüfgemisch durchgeführt wurden. Um alle Messunsicherheiten zu berücksichtigen (Druckmessung, Anteil an brennbarem Gas, Kalibrierung, Messverfahren mit einer begrenzten Anzahl an Prüfungen), wird als Ergebnis dieser Wert auf die nächsten 0,1 bar aufgerundet. Darüber hinaus ist der Anteil an brennbarem Gas im jeweiligen Prüfgemisch anzugeben.

Bei der Angabe des maximalen Explosionsdruckes $p_{\max}$ beruht die Auswertung auf dem Prüfgemisch, das den höchsten gemessenen Explosionsdruck ergibt. Um alle Messunsicherheiten zu berücksichtigen (Druckmessung, Anteil an brennbarem Gas, Kalibrierung), wird als Ergebnis der Höchstwert auf die nächsten 0,1 bar aufgerundet. Darüber hinaus sind der Anteil an brennbarem Gas im Prüfgemisch, das den höchsten Druck ergibt, und das letzte Inkrement für die Änderung des Anteils an brennbarem Gas als Hinweis auf die Genauigkeit dieser Bestimmung anzugeben.

ANMERKUNG 1 Die meisten normalen brennbaren Stoffe (wie Kohlenwasserstoffe und Wasserstoff, nicht aber Halogenverbindungen oder ungesättigte Kohlenwasserstoffe) zeigen in Gemischen mit Luft oder mit Luft und Inertgas bei Temperaturen bis 200 °C und Drücken bis 2 bar die folgende Temperatur- und Druckabhängigkeit bei $p_{\max}$:

$$p_{\max}(T,p) = p \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) + \frac{p_{\max}(T_1,p_1) \cdot T_1 \cdot p}{T \cdot p_1}$$

Dabei ist:

T, p	Ausgangstemperatur und Ausgangsdruck des Gemisches, für das $p_{\max}$ zu berechnen ist; Einheiten sind K und bar abs;
T_1, p_1	Ausgangstemperatur und Ausgangsdruck des Gemisches mit derselben Zusammensetzung in der Prüfung, durch das $p_{\max}$ ermittelt wurde; Einheiten sind K und bar abs;
$p_{\max}(T,p)$	$p_{\max}$, zu berechnen bei T und p ; Einheit ist bar abs;
$p_{\max}(T_1,p_1)$	$p_{\max}$, gemessen bei T_1 und p_1 ; Einheit ist bar abs.

Ähnliche Abhängigkeiten sind für p_{ex} zu erwarten. Die Gleichung kann auch für Temperaturen über 200 °C und Drücke über 2 bar angewendet werden, wenn sichergestellt ist, dass die zu prüfenden Stoffe keine Vorreaktionen zeigen.

Ähnliche Abhängigkeiten sind für p_{ex} zu erwarten, ausgenommen nahe der Explosionsgrenzen.

ANMERKUNG 2 Anstelle der Festlegung des Explosionsdrucks p_{ex} oder des maximalen Explosionsdrucks $p_{\max}$ empfiehlt es sich häufig, das Explosionsdruckverhältnis r_{ex} und das maximale Explosionsdruckverhältnis $r_{\max}$ anzugeben, die durch $p_{\text{ex}}/p_{\text{initial}}$ bzw. $p_{\max}/p_{\text{initial}}$ gegeben sind. Hierbei bezeichnet p_{initial} den Druck des Gemisches vor der Entzündung. Im Allgemeinen ist das Explosionsdruckverhältnis r unabhängig vom Ausgangsdruck (r steht für entweder r_{ex} oder $r_{\max}$).

Bei den meisten normalen brennbaren Stoffen (wie Kohlenwasserstoffen und Wasserstoff, nicht aber Halogenverbindungen oder ungesättigten Kohlenwasserstoffen) ist die Abhängigkeit von r von der Temperatur gegeben durch

$$r(T) = 1 + (r(T_1) - 1) \frac{T_1}{T}$$

Dabei ist

r	der Ausgangsdruck und
T	die Ausgangstemperatur

ANMERKUNG 3 Da aus Sicherheitsgründen diese Werte gelten, werden die Höchstwerte des Druckes anstelle der Mittelwerte verwendet.

Die Verifizierung der Prüfeinrichtung und des Verfahrens muss nach Anhang A erfolgen.

4.5.3 Zeitlicher Druckanstieg und maximaler zeitlicher Druckanstieg

Bei der Auswertung der nach diesem Verfahren ermittelten Ergebnisse müssen alle in 4.6 festgelegten Angaben enthalten sein.

ANMERKUNG Die Werte für $(dp/dt)_{\text{ex}}$ und $(dp/dt)_{\max}$ sind vom Volumen und von der Form des bei der Bestimmung benutzten Explosionsgefäßes abhängig. So sinkt z. B. $(dp/dt)_{\max}$ mit zunehmendem Volumen des Explosionsgefäßes. Daher ist es üblich, eine auf ein Volumen von 1 m³ normierten zeitlichen Druckanstieg (KG) unter Anwendung folgender Gleichung (1) anzugeben:

$$K_G = (dp/dt)_{\max} V^{(1/3)} \tag{1}$$

Dabei ist:

V das Volumen des Explosionsgefäßes.

Die oben stehende Gleichung, auch als „Kubisches Gesetz“ bezeichnet, beruht auf einem idealisierten Verhalten der Explosion unter der Annahme, dass K_G unabhängig vom Volumen ist. Nachgewiesen wurde jedoch, dass das nicht der Fall ist (6) und dass K_G mit zunehmendem Volumen des Explosionsgefäßes steigt.

Die Ableitung dieser oben stehenden Gleichung impliziert außerdem, dass $(dp/dt)_{\max}$ in einem kugelförmigen Gefäß mit Zündung in der Mitte gemessen wurde. Demzufolge müssen für gültige Vergleiche der Werte von $(dp/dt)_{\max}$ oder K_G für verschiedene brennbare Gase die Bestimmungen unter vergleichbaren Bedingungen in Gefäßen mit identischer Form und identischem Volumen durchgeführt werden.

Grundlage für die Angabe des zeitlichen Druckanstieges $(dp/dt)_{\text{ex}}$ ist der höchste zeitliche Druckanstieg aus fünf Prüfungen, die mit dem jeweiligen Prüfgemisch durchgeführt wurden. Um alle Messunsicherheiten zu berücksichtigen (Druckmessungen, Anteil an brennbarem Gas, Kalibrierung der Messgeräte, Verifizierung des Prüfgerätes, Bestimmungsverfahren mit einer begrenzten Anzahl an Messungen und das Glättungsverfahren), wird als Ergebnis dieser Wert entsprechend den Angaben in Tabelle 1 aufgerundet. Darüber hinaus ist der Anteil an brennbarem Gas im untersuchten Prüfgemisch anzugeben.

Grundlage für die Angabe des maximalen zeitlichen Druckanstieges $(dp/dt)_{\max}$ ist das Prüfgemisch, das den höchsten zeitlichen Druckanstieg ergibt. Um alle Messunsicherheiten zu berücksichtigen (Druckmessung, Anteil an brennbarem Gas, Kalibrierung, Glätten), wird als Ergebnis dieser höchste Wert entsprechend den Angaben in Tabelle 1 aufgerundet werden. Darüber hinaus sind der Anteil an brennbarem Gas im Prüfgemisch, das den höchsten Wert ergibt, und das letzte Inkrement für die Änderung des Anteils an brennbarem Gas als Hinweis auf die Messunsicherheiten der Bestimmung anzugeben.

Tabelle 1 — Regeln zum Aufrunden von Werten für $(dp/dt)_{\text{ex}}$ und $(dp/dt)_{\max}$

Bereich von $(dp/dt)_{\text{ex}}$ oder $(dp/dt)_{\max}$ in bar/s	< 10	10 bis 100	100 bis 1 000	> 1 000
Aufrunden auf die nächsten in bar/s	0,1	1	10	100

Die entscheidenden Faktoren für die Gesamtmessunsicherheit des zeitlichen Anstieges des Explosionsdruckes $(dp/dt)_{\text{ex}}$ für einen vorgegebenen Anteil an brennbarem Gas sind die Unsicherheit der Druckmessungen, der Werte für den Anteil an brennbaren Gasen und des angewendeten Glättungsverfahrens. Zur groben Abschätzung der Schwankungsbreite der Messergebnisse sind der höchste und der niedrigste Messwert für den Druckanstieg anzugeben. Ein weiterer entscheidender Faktor für die Gesamtmessunsicherheit des maximalen zeitlichen Druckanstieges $(dp/dt)_{\max}$ ist das angewendete Inkrement des Anteils an brennbarem Gas.

Da die Werte für sicherheitstechnische Zwecke bestimmt sind, ist für $(dp/dt)_{\max}$ anstelle der Mittelwerte der Höchstwert des zeitlichen Druckanstieges zu verwenden.

Wenn das Glättungsverfahren nach den in Anhang C aufgeführten Kriterien durchgeführt wird, sollte es keinen signifikanten Einfluss auf den berechneten Wert für $(dp/dt)_{\text{ex}}$ haben.

Die Verifizierung der Prüfeinrichtung muss nach dem in Anhang B angegebenen Verfahren erfolgen.

4.6 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss die folgenden Angaben enthalten:

- a) Name des Labors, des Prüfers und Datum;
- b) Verweis auf die angewendete Norm;
- c) Prüfbedingungen:
 - 1) Umgebungstemperatur und -druck des Prüfgemisches vor der Entzündung;
- d) Beschreibung der Probe:
 - 1) Quelle und Zusammensetzung des brennbaren Gases sowie Reinheit;
- e) Bezeichnung des Oxidationsmittels:
 - 1) Umgebungsluft oder synthetische Luft;
 - 2) Zusammensetzung, Reinheit und Anteil des zugesetzten Inertgases;
- f) Explosionsgefäß:
 - 1) Form des Explosionsgefäßes;
 - 2) Volumen des Explosionsgefäßes;
- g) Zündsystem;
- h) Herstellung des Prüfgemisches; angewendetes Verfahren (einschließlich der Angabe, ob das Prüfgemisch innerhalb oder außerhalb des Explosionsgefäßes hergestellt wurde) und die Messunsicherheiten;
- i) zu bestimmende Messgrößen ($p_{\max}$, p_{ex} ; $(dp/dt)_{\max}$, $(dp/dt)_{\text{ex}}$);
- j) Ergebnisse:
 - 1) im Falle von p_{ex} oder $(dp/dt)_{\text{ex}}$:
 - i) anzugebender Explosionsdruck oder maximaler zeitlicher Druckanstieg;
 - ii) Anteil des brennbaren Gases und Messunsicherheit;
 - iii) höchster und niedrigster Wert sowie Mittelwerte.
 - 2) im Falle von $p_{\max}$ oder $(dp/dt)_{\max}$:
 - i) anzugebender maximaler Explosionsdruck oder maximaler zeitlicher Druckanstieg;
 - ii) Anteil des brennbaren Gases und Messunsicherheit;
 - iii) kleinstes Inkrement des Anteils an brennbarem Gas;
- k) alle sonstigen wichtigen Angaben, einschließlich des Glättungsverfahrens.

Ein Beispiel eines sich zur Angabe der Ergebnisse eignenden Formblattes ist Anhang F zu entnehmen.

Anhang A (normativ)

Verifizierung der Werte für den maximalen Explosionsdruck

Dieses Verifizierungsverfahren muss sowohl bei jeder neuen Prüfeinrichtung als auch bei bereits eingesetzten Prüfeinrichtungen angewendet werden, um deren Funktion und Arbeitsweise zu überprüfen. Das muss mindestens einmal in 12 Monaten oder immer dann erfolgen, wenn Teile der Prüfeinrichtung verändert oder erneuert wurden.

Die Verifizierung ist nach den Verfahren in 4.3 und 4.4 mit den in Tabelle A.1 aufgeführten Stoffen durchzuführen. Bei neuen Prüfeinrichtungen müssen die vier in Tabelle A.1 aufgeführten Stoffe eingesetzt werden, bei bereits in Gebrauch befindlichen Prüfeinrichtungen genügt lediglich einer dieser Stoffe.

Die Verifizierung gilt als bestätigt, wenn die dabei erzielten Ergebnisse für die maximalen Explosionsdrücke und die Anteile an brennbarem Gas bei maximalem Explosionsdruck innerhalb der in Tabelle A.1 angegebenen Bandbreiten liegen.

Tabelle A.1 — Werte^a für die Verifizierung der Prüfeinrichtung

Brennbares Gas	Anteil des brennbaren Gases bei maximalem Explosionsdruck	Maximaler Explosionsdruck
	Molprozent	bar
Ammoniak	$23,0 \pm 1,0$	$5,0 \pm 1,0$
Methan	$10,5 \pm 0,5$	$8,3 \pm 0,3$
Wasserstoff	$31,0 \pm 1,0$	$7,9 \pm 0,3$
Methanol	$15,0 \pm 0,5$	$8,8 \pm 0,2$
^a Diese Werte wurden bei 25 °C und 1 bar in Gemischen aus brennbarem Gas und Luft erzielt.		

ANMERKUNG 1 Die in Tabelle A.1 angegebenen Werte spiegeln die Bandbreite der aus den Untersuchungen der Laboratorien erzielten Ergebnisse wider, die an der Erarbeitung des Verfahrens mitwirkten. Aus den in 4.5 dargelegten Gründen konnten die Ergebnisse dieser Untersuchungen jedoch nicht entsprechend den Regeln für Ringversuche ausgewertet werden.

ANMERKUNG 2 Die in Tabelle A.1 angegebenen Werte können unter Anwendung der in Anhang D angegebenen Gleichungen in andere Einheiten umgerechnet werden.

ANMERKUNG 3 Für bestimmte Bereiche des Explosionsdruckes oder Anteile an brennbarem Gas können für die Überprüfung der Leistungsmerkmale einer Prüfeinrichtung besondere zusätzliche Datensätze verwendet werden, die mit einer zuvor verifizierten Prüfeinrichtung erzielt wurden.

ANMERKUNG 4 Wird die Verifizierung bei anderen Temperaturen als 25 °C und anderen Drücken als 1 bar durchgeführt, ist es wichtig, die Messwerte des maximalen Explosionsdruckes unter Verwendung der Gleichung in 4.5.2, Anmerkung 1, auf diese Bedingungen umzurechnen, bevor die Ergebnisse mit den in Tabelle A.1 angegebenen Werten verglichen werden.

Anhang B (normativ)

Verifizierung der Werte für den maximalen zeitlichen Druckanstieg

Dieses Verifizierungsverfahren muss sowohl bei jeder neuen Prüfeinrichtung als auch bei bereits eingesetzten Prüfeinrichtungen angewendet werden, um deren Funktion und Arbeitsweise zu überprüfen. Das muss mindestens einmal in 12 Monaten oder immer dann erfolgen, wenn Teile der Prüfeinrichtung verändert oder erneuert wurden. Messungen für die Verifizierung sind nach den Verfahren in 4.3 bis 4.4 mit Gemischen aus Luft und einer der in Tabelle B.1 aufgeführten Stoffe mit mindestens 99,5 % Reinheit durchzuführen. Die Zusammensetzung des Gemisches muss in dem in Tabelle B.1 angegebenen Bereich liegen. Bei neuen Prüfeinrichtungen müssen die drei in Tabelle B.1 angegebenen Stoffe verwendet werden, doch bei bereits in Gebrauch befindlichen Prüfeinrichtungen genügt lediglich einer dieser Stoffe. Anhand der in Tabelle B.1 angegebenen Werte zeigen Bild B.1, Bild B.2 und Bild B.3 graphische Darstellungen des zeitlichen Explosionsdruckanstiegs $(dp/dt)_{ex}$ als Funktion des Explosionsgefäßvolumens V . Die Verifizierung gilt als bestätigt, wenn für einen gegebenen Wert von V zwischen 0,005 m³ und 2 m³ der entsprechende Wert des zeitlichen Explosionsdruckanstiegs $(dp/dt)_{ex}$, der in den Verifizierungsprüfungen bestimmt wurde, im Bereich zwischen den beiden Kurven der jeweiligen graphischen Darstellung liegt.

Tabelle B.1 — Werte^a für die Verifizierung der Prüfeinrichtung^b

Stoff	Volumen des Explosionsgefäßes							
	0,005 m ³ -Kugel		0,014 m ³ -Kugel		0,020 m ³ -Kugel		2 m ³ -Kugel	
	x ^c	$(dp/dt)_{ex}$	x ^c	$(dp/dt)_{ex}$	x ^c	$(dp/dt)_{ex}$	x ^c	$(dp/dt)_{ex}$
	%	bar/s	%	bar/s	%	bar/s	%	bar/s
Wasserstoff	35 ± 0,3	4 883 ± 47	35 ± 0,2	3 321 ± 102	35 ± 0,3	2 965 ± 202	35 ± 2	1 193 ± 86
Methan	10 ± 0,2	362 ± 11	10 ± 0,1	217 ± 15	10 ± 0,1	235 ± 7,4	10 ± 1	78 ± 2
Ammoniak	23 ± 0,5	28,3 ± 4,5	23 ± 0,2	19,2 ± 3	23 ± 0,2	21,8 ± 1,4	23 ± 2	3 ± 0,5
ANMERKUNG 1 Diese Werte spiegeln die Bandbreite der Messergebnisse einiger Laboratorien wider, die an der Erarbeitung des Verfahrens mitwirkten. Aus den in 4.5 dargelegten Gründen konnten die Ergebnisse dieser Bestimmungen jedoch nicht entsprechend den Regeln für Ringversuche ausgewertet werden. ANMERKUNG 2 Diese Werte dürfen unter Anwendung der Gleichungen in Anhang D in andere Einheiten umgerechnet werden. ANMERKUNG 3 Für bestimmte Bereiche von zeitlichen Explosionsdruckanstiegen oder Anteilen an brennbarem Gas können für die Überprüfung der Leistungsmerkmale der Prüfeinrichtung weitere Datensätze verwendet werden, die mit einer zuvor verifizierten Prüfeinrichtung erzielt wurden.								
^a Diese Werte wurden bei 25 °C und 1 bar in Gemischen aus brennbarem Gas und Luft erzielt. ^b Die $(dp/dt)_{ex}$-Werte nach Tabelle 1 in 4.5 sind nicht gerundet. ^c Stoffmengenanteil des brennbaren Stoffes im brennbaren Stoff/Luft-Gemisch.								

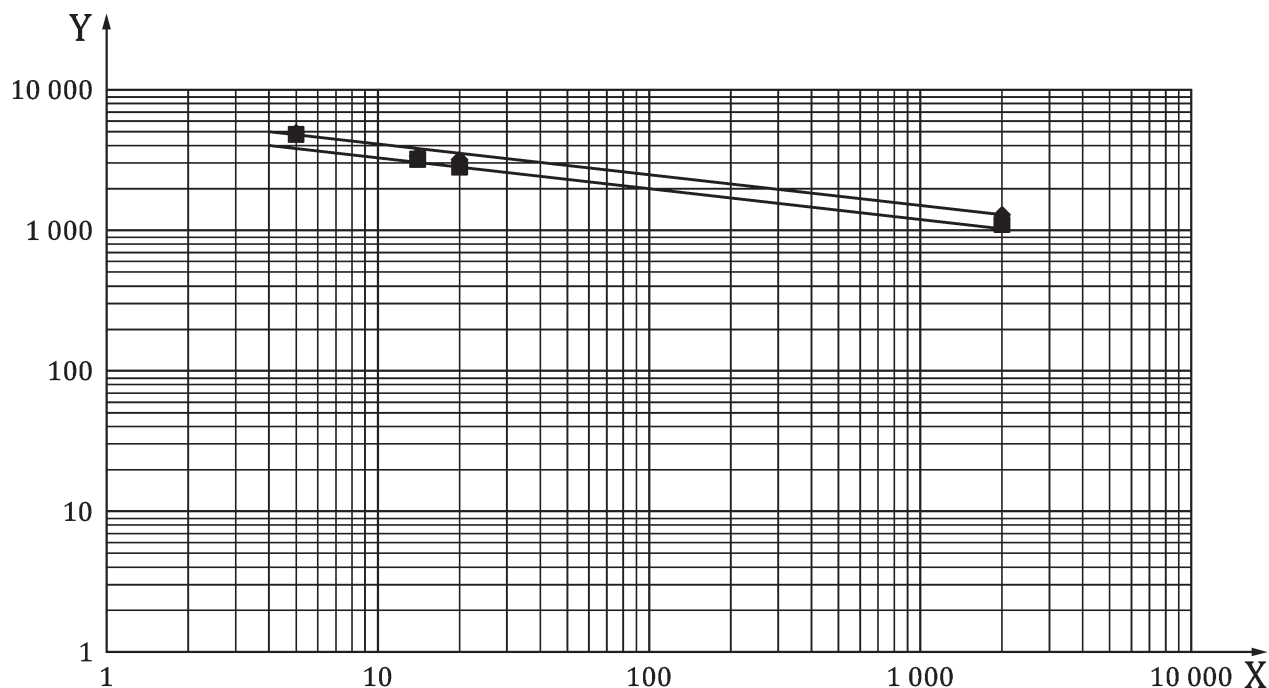


Bild B.1 — Graphische Darstellung des zeitlichen Druckanstieges $(dp/dt)_{ex}$ als Funktion des Explosionsgefäßvolumens V für H_2 -Luft-Gemische ($x_{H_2} \cong 35$ Molprozent)

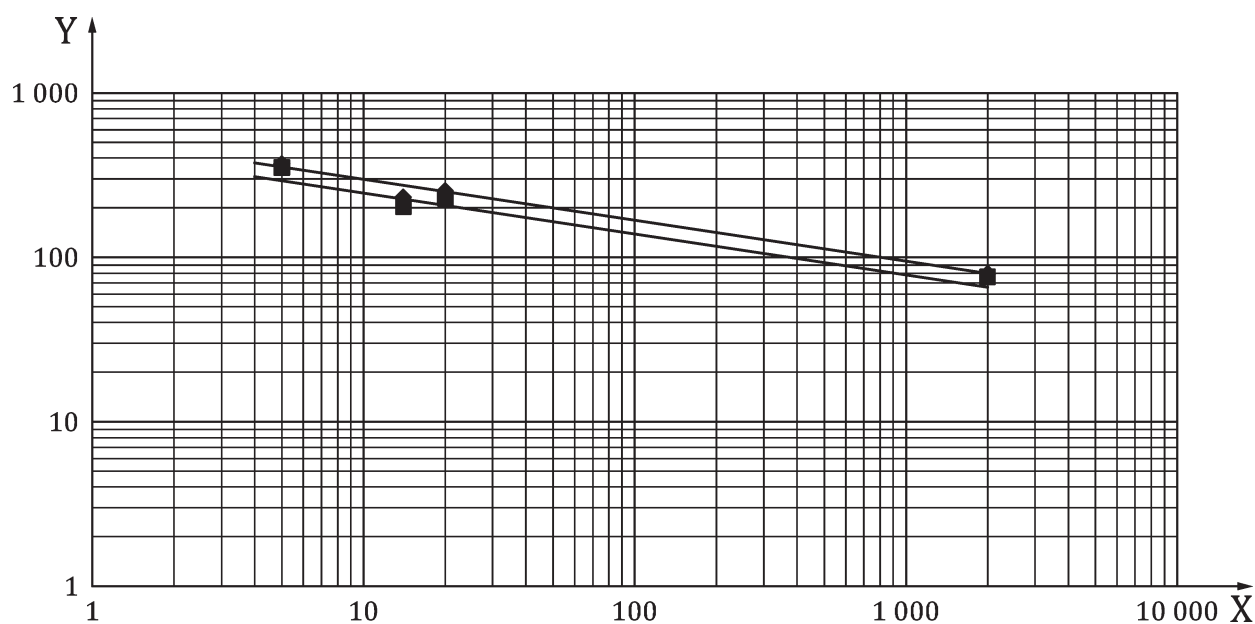


Bild B.2 — Graphische Darstellung des zeitlichen Druckanstieges $(dp/dt)_{ex}$ als Funktion des Explosionsgefäßvolumens V für CH_4 -Luft-Gemische ($x_{CH_4} \cong 10$ Molprozent)

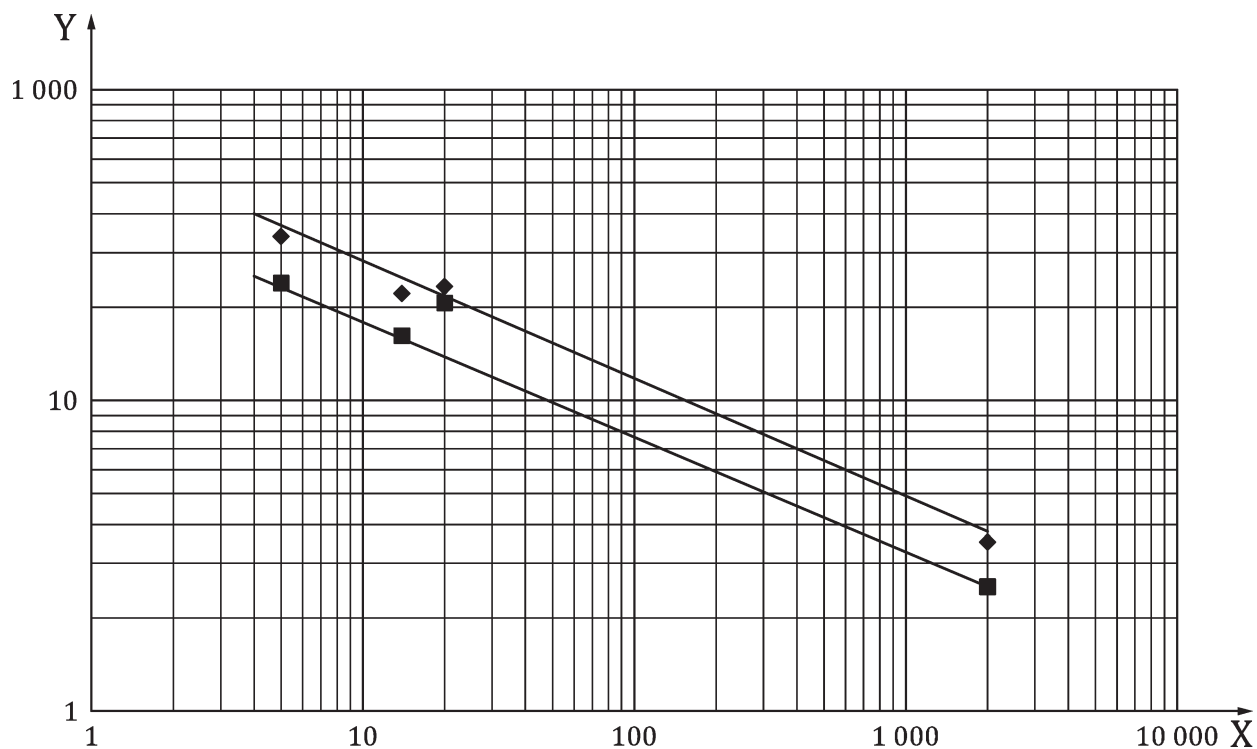


Bild B.3 — Graphische Darstellung des zeitlichen Druckanstieges $(dp/dt)_{ex}$ als Funktion des Explosionsgefäßvolumens V für NH_3 -Luft-Gemische ($x_{NH_3} \cong 23$ Molprozent)

Anhang C (normativ)

Glätten von Druck-Zeit-Kurven

Glätten ist notwendigerweise erforderlich, wenn die Druck-Zeit-Kurve Oszillationen im Bereich des maximalen zeitlichen Druckanstieges aufweist oder wenn die aufgezeichnete Kurve ein Rauschen aufweist. Bild C.1 und Bild C.2 zeigen Beispiele für Druck-Zeit-Kurven, bei denen die Daten zur Rauschreduktion geglättet werden müssen. Die Hochdruckoszillationen sind echte Signale der Druckwirkung, die durch die Explosion im Explosionsgefäß hervorgerufen werden, und nicht durch Resonanz des Druckaufnehmers bedingt. Die Amplitude der Oszillationen nimmt normalerweise mit dem Volumen des Explosionsgefäßes zu.

Glätten der Druck-Zeit-Kurve kann durch Verwendung von Frequenzfiltern im Datenaufzeichnungssystem erfolgen, um bestimmte Frequenzbereiche des aufgezeichneten Signals herauszufiltern, oder durch mathematische Bearbeitung der aufgezeichneten Daten. Empfohlen wird eine mathematische Bearbeitung, da hierbei die Rohdaten für eine eventuell erforderliche spätere Auswertung erhalten bleiben. Der Einsatz von Filtern im Aufzeichnungssystem führt dazu, dass bereits geglättete Daten aufgezeichnet werden und die Rohdaten verloren sind.

Es gibt eine Anzahl an mathematischen Verfahren, die zum Glätten der Daten eingesetzt werden können, z. B.:

- Mittelwertbildung;
- lineare Regression;
- Filtern (z. B. Fourier-Transformation);
- Polynomannpassung.

Prüfstellen dürfen eigene mathematische Glättungsverfahren entwickeln, heute ist es jedoch wahrscheinlich bequemer, eines der vielen handelsüblichen Softwarepakete für die Datenanalyse zu benutzen, die mit den Datenaufzeichnungsgeräten geliefert werden.

Unabhängig vom angewendeten Verfahren ist es erforderlich, mindestens einen der Parameter, z. B. die Anzahl der Datenpunkte für die Mittelwertbildung oder den Grad des angewendeten Polynoms, sorgfältig auszuwählen, um ein korrektes Ergebnis durch das Glätten zu erzielen. Bild C.3 zeigt schematisch den Einfluss, den die Änderung des entsprechenden Parameters auf den berechneten höchsten zeitlichen Druckanstieg hat. Ist die Kurve nicht ausreichend geglättet, ergibt sich ein zu hoher berechneter Wert für den höchsten zeitlichen Druckanstieg, wohingegen sich ein zu niedriger Wert ergibt, wenn die Kurve zu stark geglättet wird. Es gibt eine Bandbreite des jeweiligen Parameters, bei der die Kurve des zeitlichen Druckanstieges ein Plateau zeigt. Um einen korrekten Wert für den höchsten zeitlichen Druckanstieg zu erzielen, ist es notwendig, einen Wert des jeweiligen Parameters zu verwenden, der innerhalb dieser Bandbreite liegt. In einigen Fällen kann es erforderlich sein, das Glättungsverfahren mehrfach anzuwenden, um eine ausreichende Glättung zu erreichen.

Prüfstellen müssen nachweisen können, dass das Glättungsverfahren, sofern es angewendet wurde, korrekt ist, indem sie in der Lage sind, Vergleiche zwischen den Rohdaten und den geglätteten Druck-Zeit-Kurven anzustellen.