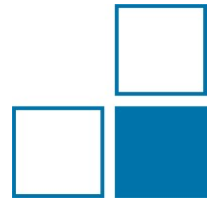


# Ringvergleiche im Explosionsschutz

Herausforderungen bei der Bestimmung von Explosionsdrücken im Bereich der druckfesten Kapselung

Tim Krause, 26. August 2025,  
19. Seminar für Ex-Sachverständige, thuba AG, Basel



Hintergrund

## IECEX

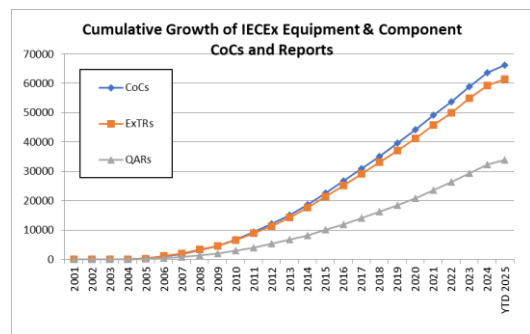


International Electrotechnical Commission System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Explosive Atmospheres (IECEX System)

- 36 Mitgliedsländer
- 69 Zertifizierungsstellen (ExCBs)
- 92 IECEX-Prüflaboratorien (ExTLs + ATFs)



Ziel des IECEX-Systems ist es, den internationalen Handel mit Geräten und Dienstleistungen zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen zu erleichtern und dabei das erforderliche Sicherheitsniveau zu gewährleisten



Quelle: IECEX System Report Card - 2025

Hintergrund

## IECEX / PTB Ex PTS



- Insgesamt 143 teilnehmende Ex-Prüflaboratorien aus 36 Ländern
- 14 Programme / Testrunden seit 2010

➔ Leistungsbewertung

➔ Training/Ausbildung

➔ Vergleichbarkeit

➔ Internationale Vernetzung

➔ Normung und Standardisierung

➔ Forschungsthemen

26. August 2025

3

Hintergrund

## Obligatorische Teilnahme für IECEX Laboratorien



### Auszug aus OD 202

[...]

*In accordance with IECEX ExMC Decision 2014/53 and IECEX 02, participation in the IECEX PTS is mandatory for all the IECEX test laboratories, as defined in Clause 4 of this operational document. Laboratory participation is according to their scope of application and/or of their scope of acceptance in the IECEX System and is a condition for continued acceptance.*

[...]

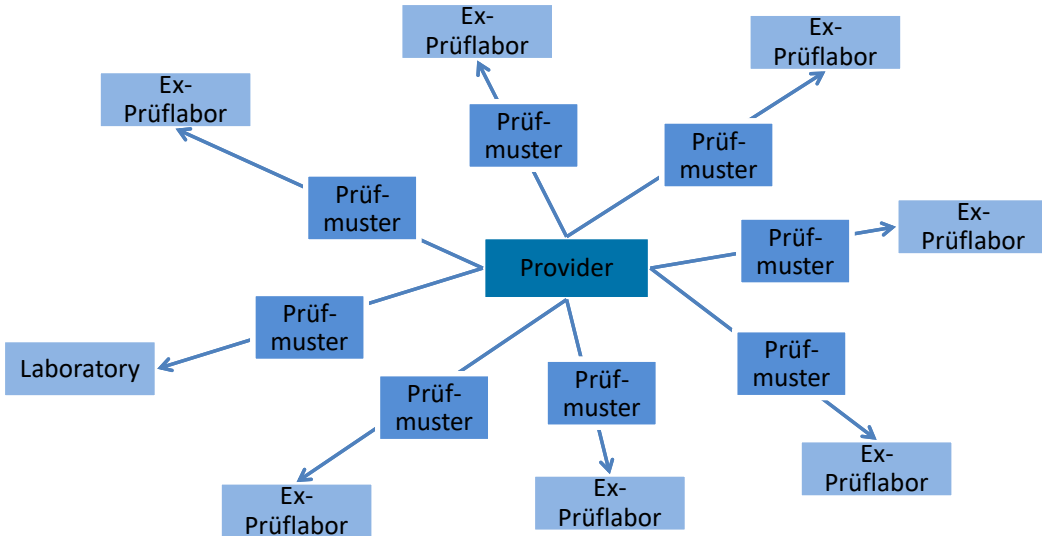


26. August 2025

4

Hintergrund

# Simultanes System



26. August 2025

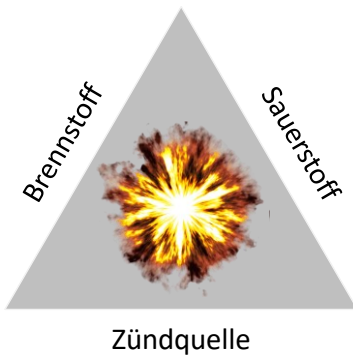
5

Einleitung

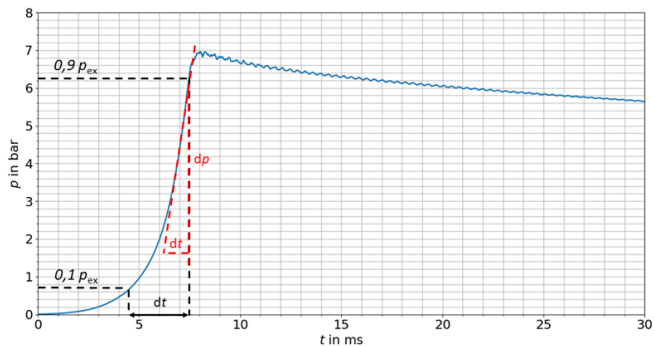
# Explosionsdruck



Eine Explosion ist eine exotherme Reaktion einhergehend mit einem schnellen Anstieg von Temperatur und Druck.



„Explosionsdreieck“ zur Veranschaulichung der notwendigen Bedingungen



Zeitlicher Explosionsdruckverlauf (einfache Gehäuseform)

26. August 2025

6

Einleitung

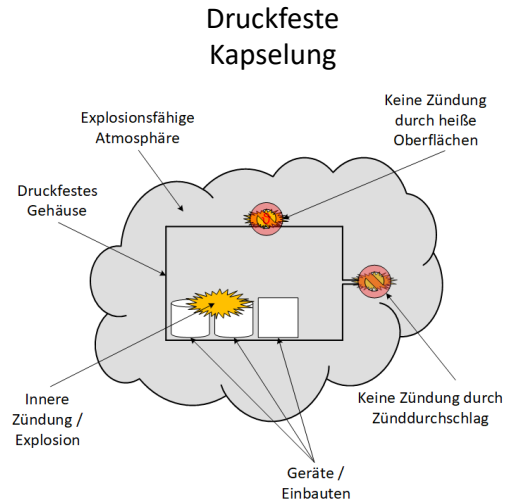
# Druckfeste Kapselung



## Sicherheitstechnisch relevante Explosionsdrücke im Bereich Explosionsschutz:



Quelle: www.abb.bonnew.com



26. August 2025

7

Einleitung

# Status Quo „Druckfeste Kapselung“



Anforderungen an die Bauart und für die Prüfung elektrischer Betriebsmittel

Quelle: IEC 60079-1

ca. 92 Prüflabore in 36 Ländern

Quelle: www.4freepotos.com

Bewährte Prüfverfahren (ca. 65 Jahre) und Technik (ca. 40 Jahre)

Quelle: www.kistler.com  
Quelle: www.pinclipart.com

26. August 2025

8

# Fragestellung



Ist die Vergleichbarkeit bei der Bestimmung von sicherheitstechnisch relevanten Explosionsdrücken im Bereich der druckfesten Kapselung gegeben?

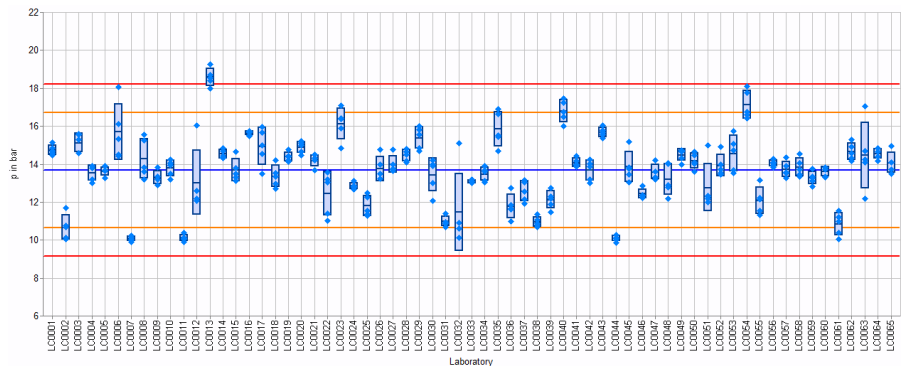
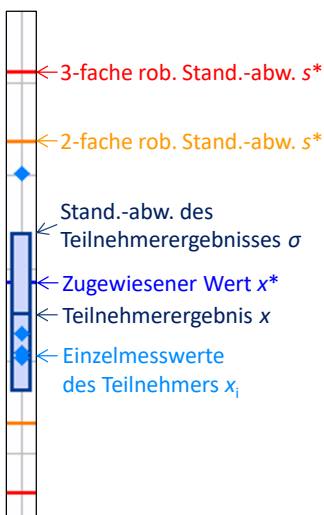
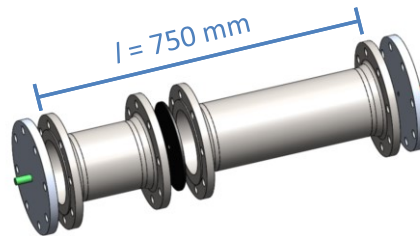
- > Keine rückgeführte Messgröße
- > Keine Messunsicherheitsbetrachtung nach GUM
- > Kein objektiver Nachweis Explosionsdrücke „korrekt“ bestimmen zu können
- > Technischer Standard (IEC 60079-1) als Grundlage
- > Technische Standards basieren oftmals auf Konsensbildung ohne fundierte wissenschaftlich-technische Basis

26. August 2025

9

Ist-Zustand / Ringvergleichsprogramm

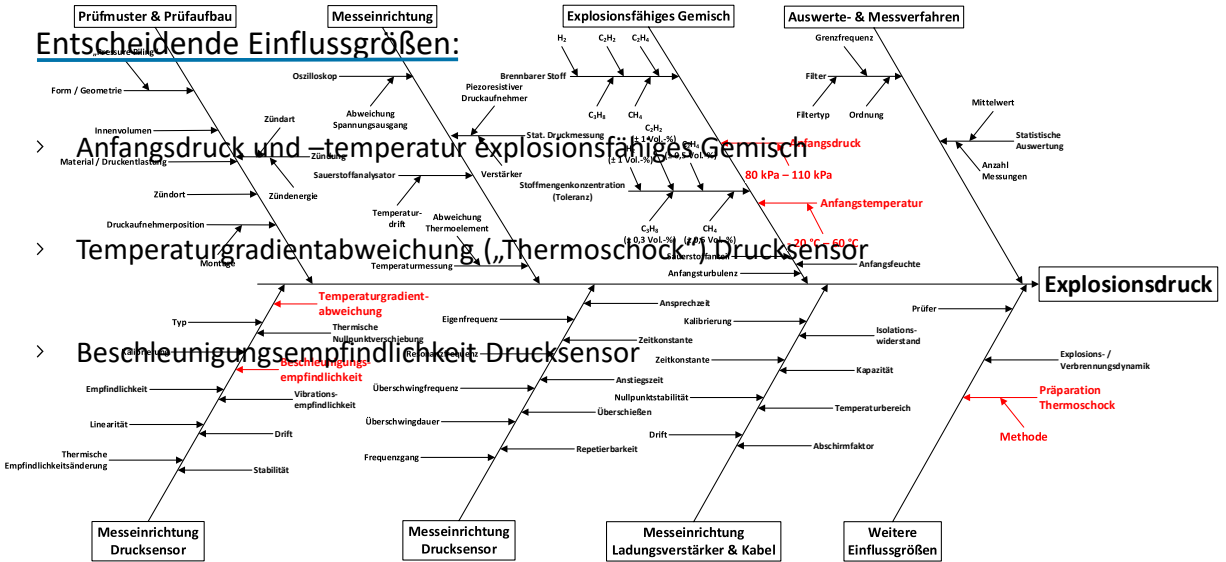
# Vergleichbarkeit



26. August 2025

10

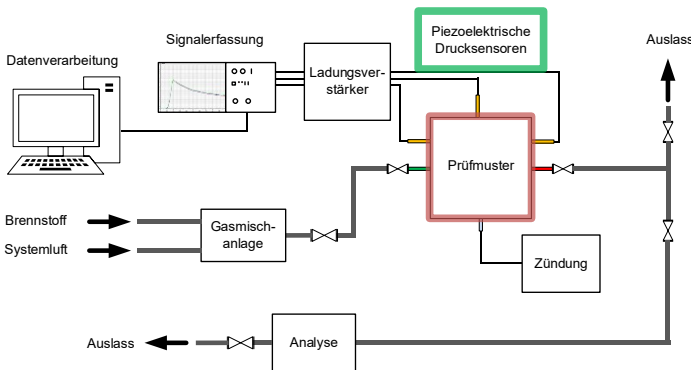
# Einflussfaktoren



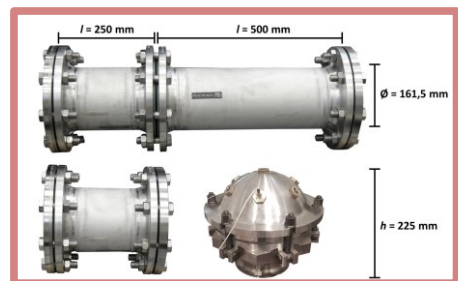
26. August 2025

11

# Struktur Prüfaufbau & Prüfmuster



Sensor (Kistler)	Druckmessbereich in bar	Empfindlichkeit (typ.) in pC/bar	Eigenfrequenz in kHz
601CAA	0 ... 250	-37	>215
603B1	0 ... 250	-14	≈160
603B1	0 ... 1000	-5	≈500
601H	0 ... 1000	-16	≈150
603B	0 ... 200	-5	≈400
603CAA	0 ... 1000	-5	>500



26. August 2025

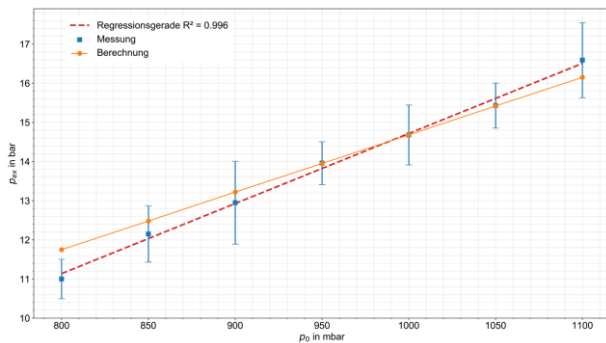
12

## Anfangsdruck und –temperatur

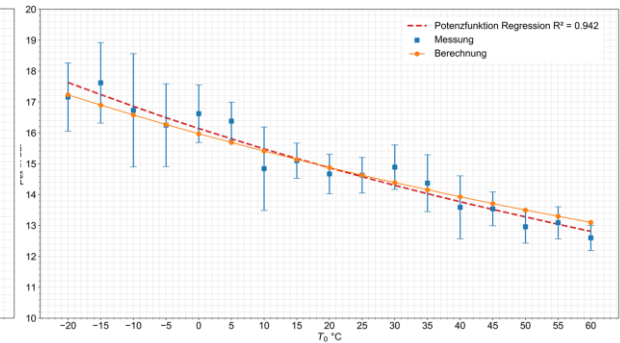


### Nach IEC 60079-0:

- › Temperaturbereich -20 °C bis +60 °C
- › Druckbereich 80 kPa bis 110 kPa
- › Explosionsdruck folgt idealem Gasgesetz
- › Gilt auch bei komplexer Geometrie
- › **Beitrag zur Messunsicherheit: 40 %**



26. August 2025



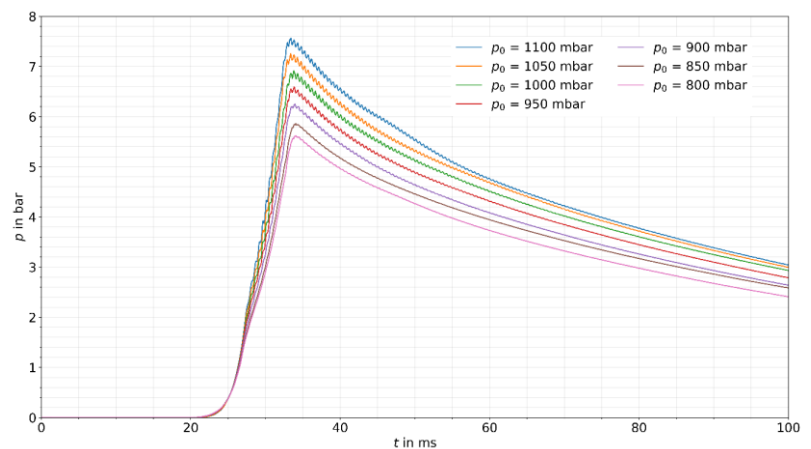
13

## Anfangsdruck und –temperatur



### Variation von $p_0$ & $T_0$ und Einfluss auf die Kurvenform:

- › Keine Veränderungen im Kurvenverlauf (im Beispiel Variation  $p_0$ )



26. August 2025

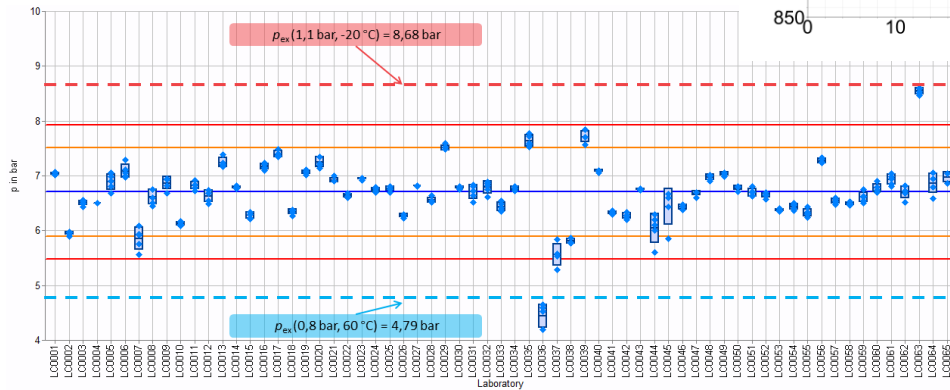
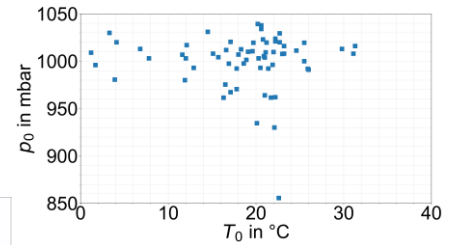
14

# Anfangsdruck und -temperatur



## Auswirkung in Praxis:

- › Zulässiger Bereich nach IEC ist deutlich größer als Akzeptanzbereich im Ringvergleich



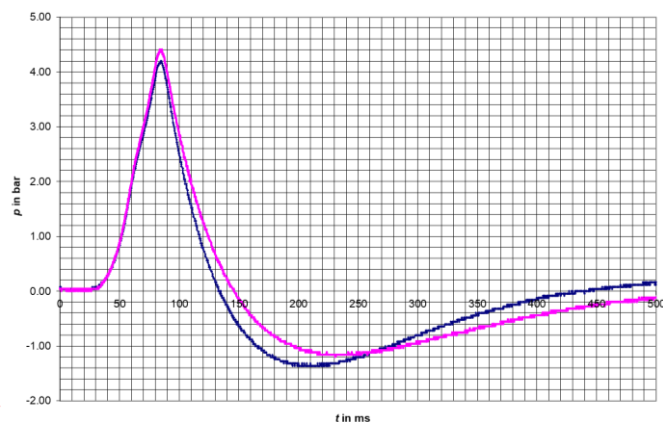
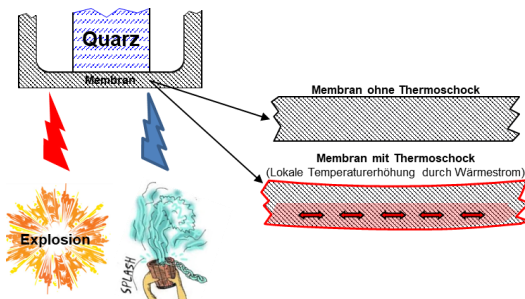
26. August 2025

15

# Thermoschock



- › Explosionswärme erhitzt Drucksensormembran
- › Lokale Verformungen am Sensorkristall (Thermoschock)



Originaldaten für Druckverläufe von Ringvergleichsteilnehmer

26. August 2025

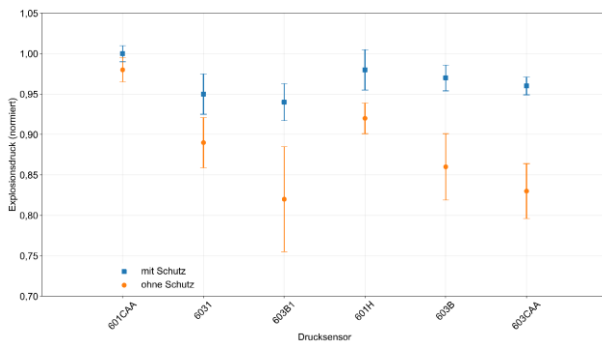
16

# Thermoschock



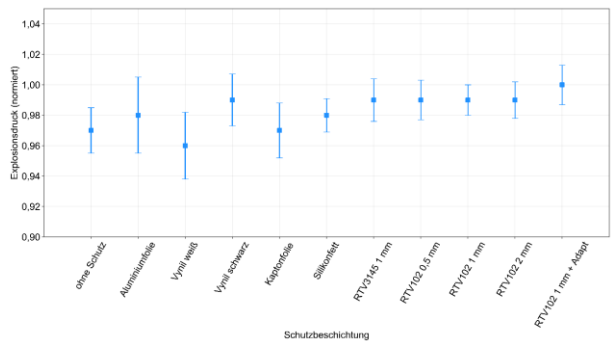
## Einfluss auf Explosionsdruckbestimmung:

- > Abhängig von Gehäuse- und Membrandesign
  - > Abhängig von Art der Schutzbeschichtung
- > **Beitrag zur Messunsicherheit: 18 %**



26. August 2025

17

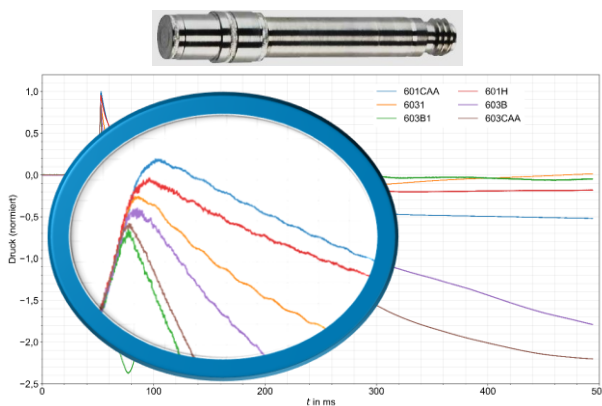


# Thermoschock



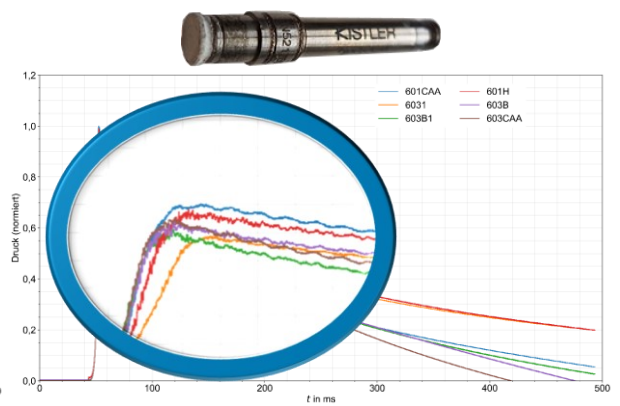
## Einfluss auf Druckverlaufskurven:

- > Deutliche Unterschiede bei Kurvenformen mit / ohne Schutzbeschichtung



26. August 2025

18

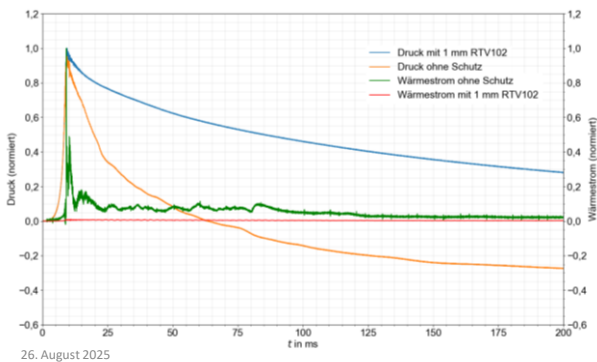


# Thermoschock



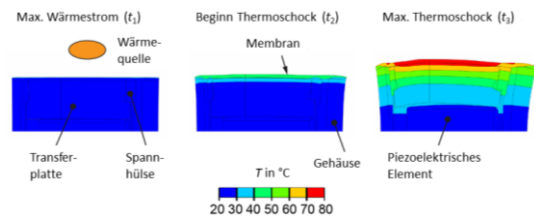
## Temperatureinwirkung auf Sensormembran:

- › Kein Temperatureinwirkung mit Schutzbeschichtung
- › Deutliche Temperatureinwirkung mit erkennbarer Verformung der Sensormembran ohne Schutzbeschichtung (max. 80 °C)



26. August 2025

19

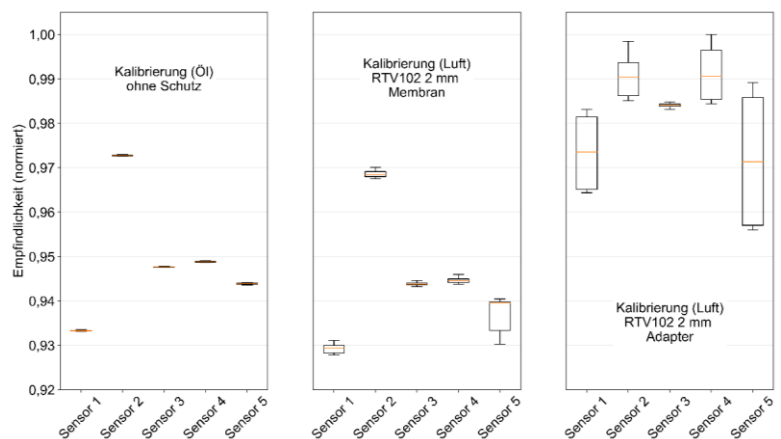
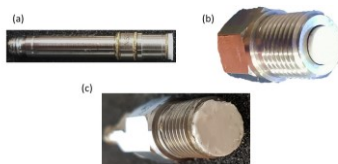


# Thermoschock



## Einfluss der Schutzbeschichtung auf Empfindlichkeit:

- › Kein Einfluss bei Membran
- › Empfindlichkeitserhöhung & Streuungszunahme bei Membran + Adapter



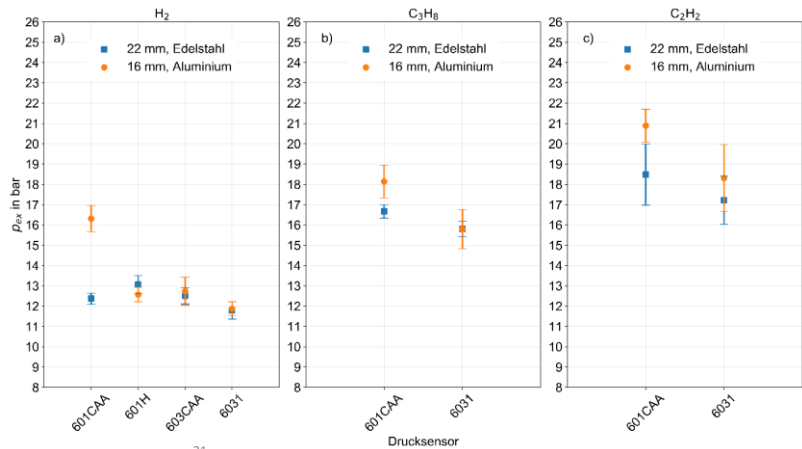
26. August 2025

20

## Beschleunigung



- › Erhöhung des Explosionsdruckes in Abhängigkeit von Flanschdicke unplausibel
- › **Beitrag zur Messunsicherheit: 32 %**



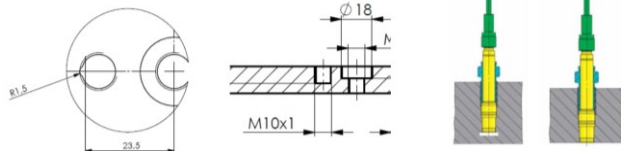
26. August 2025

21

## Beschleunigung



- › Explosion führt zu Gehäusewandschwingungen
- › Übertragung auf Drucksensor verursacht Trägheitskräfte am piezoelektrischen Element
- › Abhängig von Gehäuse- und Membrandesign
- › Verwendung von Sacklöchern zur Trennung von Beschleunigungs- und Drucksignal



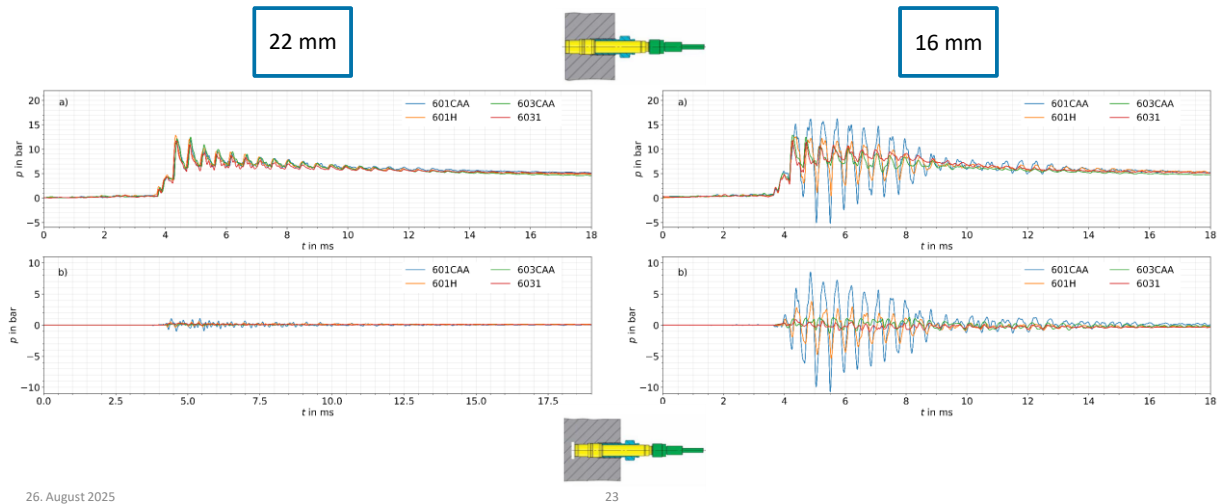
26. August 2025

22

# Beschleunigung



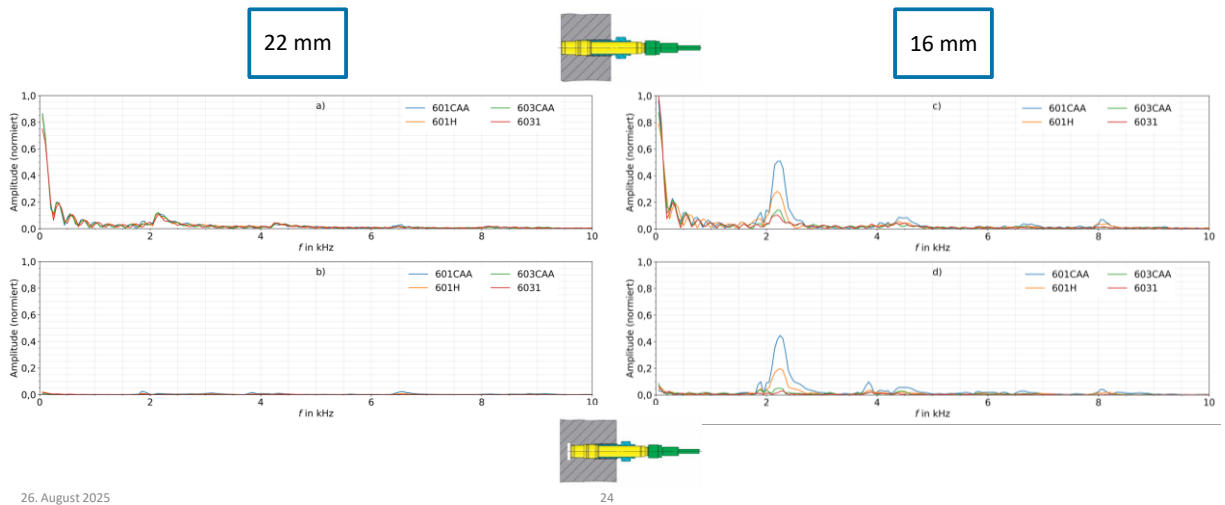
- › Signifikante Verfälschung des Drucksignals durch Beschleunigungseinflüsse



# Beschleunigung



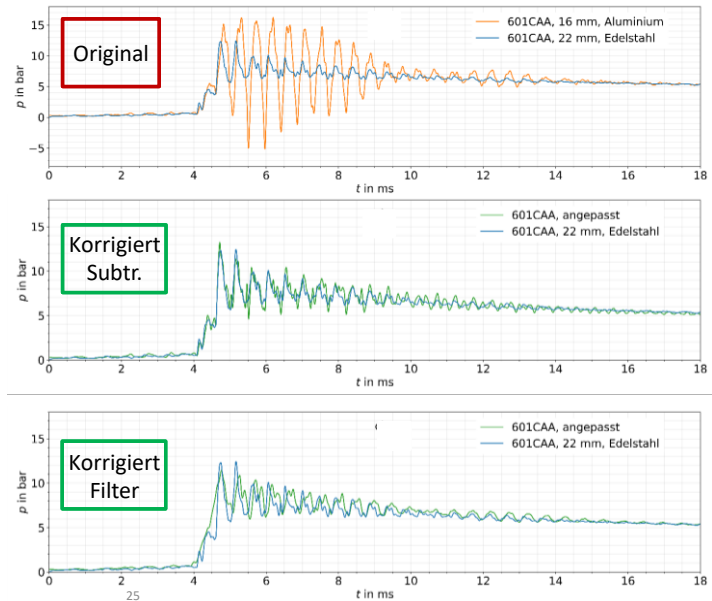
- › Verfälschung der Frequenzspektren durch Beschleunigungseinflüsse



## Beschleunigung

### Beschleunigungskompensation:

- › Beschleunigungskompensierte Drucksensoren
- › Subtraktionsverfahren der Frequenzspektren
- › Filteranpassung



26. August 2025

## Status Quo



### Messunsicherheit vs. Sicherheitsfaktoren:

- › Messunsicherheiten der Messtechnik liegen innerhalb vordefinierter Grenzen
- › Prüfparameter in definierten Grenzen (spezifiziert durch die relevanten IEC Prüfnormen)
- › Routineprüfungen
- › Quellen von Messunsicherheitseinflüssen auf ein Minimum reduziert
- › Dokumentierte Laborverfahren und kompetentes Messpersonal
- › Verwendung von Sicherheitsfaktoren

26. August 2025

26

## Messunsicherheit der Messkette



$$U = k_U \sqrt{\sum_{i=1}^n G_i (c_i u_i)^2}$$

### Gaußsche Fehlerfortpflanzung

- › Reihenbetrachtung / Messreihe  $\delta_p$  (Typ A)
- › Linearität Drucksensor  $\delta_{\text{Sen},1}$  (Typ B)
- › Drift Ladungseingang Ladungsverstärkers  $\delta_{\text{Verst.},2}$  (Typ B)
- › Verstärkungsabweichung Ladungseingang Ladungsverstärkers  $\delta_{\text{Verst.},3}$  (Typ B)
- › Nullpunktabweichung Spannungsausgang Ladungsverstärkers  $\delta_{\text{Verst.},4}$  (Typ B)
- › Verstärkungsabweichung Spannungsausgang Ladungsverstärkers  $\delta_{\text{Verst.},5}$  (Typ B)
- › Abweichung Spannungseingang Oszilloskops  $\delta_{\text{Osz.},6}$  (Typ B)

## Messunsicherheit der Messkette



$$p_{ex} = p + \delta_p + \delta_{\text{Sen},1} + \delta_{\text{Verst.},2} + \delta_{\text{Verst.},3} + \delta_{\text{Verst.},4} + \delta_{\text{Verst.},5} + \delta_{\text{Osz.},6}$$

### Modellgleichung

$$U_{0,95} = \pm 2 \sqrt{12^2 + \frac{1}{3}20^2 + \frac{1}{3}0,24^2 + \frac{1}{3}0,4^2 + \frac{1}{3}0,11^2 + \frac{1}{3}0,2^2 + \frac{1}{3}50^2} \text{ mbar}$$

Parameter	Wert / bar	Bewertungstyp	Standardmessunsicherheit / mbar	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Index / %
$p$	7,02	Typ A	12	Normal	1	12,9
$\delta_{\text{Sen},1}$	-	Typ B	11,5	Rechteck	1	12,0
$\delta_{\text{Verst.},2}$	-	Typ B	0,14	Rechteck	1	0,0
$\delta_{\text{Verst.},3}$	-	Typ B	0,23	Rechteck	1	0,0
$\delta_{\text{Verst.},4}$	-	Typ B	0,06	Rechteck	1	0,0
$\delta_{\text{Verst.},5}$	-	Typ B	0,12	Rechteck	1	0,0
$\delta_{\text{Osz.},6}$	-	Typ B	28,87	Rechteck	1	75,1

Das vollständiges Ergebnis des Messwertes für den Explosionsdruck  $p_{ex}$  lautet  $(7,02 \pm 0,07)$  bar.

## Zusammenfassung



- › Analyse von Ringvergleichsprogrammen zeigt große Abweichungen bei der Bestimmung von Explosionsdrücken
- › Die wesentlichen Einflussfaktoren bei der Bestimmung von Explosionsdrücken sind:
  - › *Einfluss von Anfangsdruck und -temperatur des explosionsfähigen Gemisches*
  - › *Einfluss des Thermoschockes*
  - › *Einfluss der Beschleunigung*
- › MU der Messkette ( $\approx 1\%$ )  $\ll$  MU der behandelten Einflussfaktoren ( $\Sigma \approx 90\%$ )
- › Alle Einflussfaktoren lassen sich durch technische Maßnahmen und Korrekturmethode deutlich reduzieren

## Ergebnis



- › Erstmalig eingeführter Anhang („Annex I: Recommendation to improve the effectiveness of the determination of explosion pressure“) für neue Edition der IEC 60079-1
- › Wesentlicher Beitrag zur:
  - › *Sensibilisierung der Anwender für Einflussgrößen bei Bestimmung von Explosionsdrücken,*
  - › *Verbesserung der globalen Vergleichbarkeit von Messdaten,*
  - › *Stärkung des Vertrauens für die Bestimmung von Explosionsdrücken.*

# Harmonisierung des Wissens



## PT Workshops 2024



26. August 2025

31

Ende

## Möchten Sie mehr wissen...?



<https://www.ex-proficiency-testing.ptb.de>

**Ex PTS**  
In Proficiency Testing Science

General Programs Registration PT Scheme Cycle 2025 / 2026 How To Participate Participating Laboratories Workshops Best Practice Papers / GM Contact Help

You are currently logged out.  
[Login](#)

**About Physikalisch-Technische Bundesanstalt**

The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) is the national metrology institute providing scientific and technical services. PTB measures with the highest accuracy and reliability – metrology as the core competence.

PTB performs fundamental research and development work in the field of metrology as a basis for all the tasks entrusted to it in the areas concerning the determination of fundamental and natural constants, the realization, maintenance and dissemination of the legal units of the SI, safety engineering, services and metrology for the areas regulated by law and for industry, as well as technology transfer. Only fundamental research work performed by PTB itself using latest technologies will enable it to ensure on a long-term basis its metrological competence recognized on the international level, and to extend it further.

The application of modern management tools enables PTB to perform the tasks entrusted to it efficiently and thoroughly. For the long term, PTB's work program has been adapted to the requirements of its clients - trade and industry, science and society - also within the European framework. The initiation of project work guarantees flexibility when problems are to be solved on a short-term basis.

As a result of its close cooperation with universities, other research institutes and industry, PTB has become a member of the community of all those pursuing research in Germany, and it makes use of these links for the benefit of all those involved. The comparison with the national metrology institutes of other countries ensures constant critical assessment at the highest level of metrology. Together with our partners in the projects implemented within the scope of international cooperation, PTB ensures the comparability and reliability of measurement results everywhere in the world on a long-term basis.

**Latest Information**

**PTB Ex PTS - Small reminder for the registration of program cycle 2025/2026**  
By: Jia Wu 04/22/2025

Dear colleagues and participants,  
I would like to briefly inform you that online registration for program cycle 2025/2026 will end on 25th of April 2025.  
Until today we have received a high number of registrations for the new...

[Read more](#)

**PTB Ex PTS - Roll-out of the new PT programs "Maximum Surface Temperature for Dust (MSTD) & Spark Test Apparatus Sensitivity - Test Round 2025"**  
By: Jia Wu 03/19/2025

Dear colleagues,  
We are glad to inform you about the roll-out of our two new programs "Maximum Surface Temperature for Dust (MSTD) & Spark Test Apparatus Sensitivity (STAS) - Test Round 2025" of the PTB Ex Proficiency Testing.

[Read more](#)

**PTB Ex PTS - Registration for the PT Scheme Cycle 2025/2026 will start on March 19, 2025**  
By: Jia Wu 03/11/2025

Dear participants,  
We would like to inform you that the registration period for the new programs "Maximum Surface Temperature for Dust (MSTD) - Test Round 2025" and "Spark Test Apparatus Sensitivity (STAS) - Test Round 2025"...

26. August 2025

32

16