

Explosionsschutz bei nicht-atmosphärischen Bedingungen

Dr.rer.nat. Frank Stolpe
Physikalisch–Technische Bundesanstalt

28. September 2023

Erfahrungsaustausch betrieblicher Explosionsschutz, BGHM Hannover

- **Ein Überblick**

- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

- Atmosphärische und nicht-atmosphärische Bedingungen
- Kenngrößen bei nicht-atmosphärische Bedingungen
- Auswirkungen auf Maßnahmen des Explosionsschutzes
- Abbildung im Regelwerk
- Beispiel: Flammendurchschlagsicherungen

- Ein Überblick
- **Bedingungen**
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

Die atmosphärischen Bedingungen werden in den Leitlinien zur Richtlinie 2014/34/EU beschrieben:

- Temperaturbereich -20 °C bis $+60\text{ °C}$
- Druckbereich 800 hPa bis 1100 hPa
- Oxidationsmittel Luft (Sauerstoffgehalt 20,9 Vol%)

- Ein Überblick
- **Bedingungen**
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

Nicht-atmosphärische Bedingungen sind alle Abweichungen von den vorgenannten Bedingungen:

- niedrigere oder höhere Temperaturen
- niedrigere oder höhere Drücke
- abweichender Sauerstoffgehalt oder andere Oxidationsmittel
- Abweichungen in mehreren Größen sind nicht ausgeschlossen!

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

Unterteilung der sicherheitstechnischen Kenngößen des Explosionsschutzes in drei Gruppen:

- Kenngößen zur Beschreibung explosionsfähiger Gemische
- Kenngößen zur Beschreibung der Zündeigenschaften explosionsfähiger Gemische
- Kenngößen zur Beschreibung der Explosionseigenschaften explosionsfähiger Gemische

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

1. Die Explosionsgrenzen

- Bekannt: der Explosionsbereich wird mit steigender Temperatur und steigendem Druck größer.
- $UEG(T) = UEG(T_0) \cdot (1 + k_U(T - T_0))$
 k_U -Werte bis -27%/100K
- $OEG(T) = OEG(T_0) \cdot (1 + k_O(T - T_0))$
 k_O -Werte bis +37%/100K
- $UEG(p) = UEG(p_0) \cdot (1 + k_p(p - p_0))$
 k_p -Werte zwischen +55%/K bis -210%/100K für verschiedene Druckbereiche
- $OEG(p)$ ist stoffspezifisch nicht-linear

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

2. Die Sauerstoffgrenzkonzentration

- Bekannt: Die Sauerstoffgrenzkonzentration sinkt mit steigender Temperatur.
- $SGK_I(T) = SGK_I(T_0) \cdot (1 + k_S(T - T_0))$
 k_S -Werte bis -18%/100K
- Zur Druckabhängigkeit der SGK ist wenig bekannt.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

3. Die Explosionspunkte

- Bekannt: Die Explosionspunkte sind eng mit den Explosionsgrenzen und dem Dampfdruck verknüpft.
- Es ist ein ähnliches Verhalten wie bei den Explosionsgrenzen zu erwarten.
- Gesicherte Messungen liegen nicht vor.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

4. Andere Oxidationsmittel

- Zu einigen Gemischen mit anderen Oxidationsmitteln gibt es Daten.
- Die Oxidationswirkung kann als Oxidationspotenzial in Relation zu Luft ausgedrückt werden.
- Belastbare Daten, die eine allgemeinere Beschreibung zulassen liegen nicht vor.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

1. Die Zündtemperatur

- Bekannt: Die Zündtemperatur sinkt mit steigendem Druck.
- Es gibt Indizien für einen stoffspezifischen Grenzwert oberhalb 5 MPa.
- Stoffspezifisches oder stoffgruppenspezifisches Verhalten können unterschieden werden.
- Ist in Sauerstoff deutlich niedriger als in Luft, für andere Oxidationsmittel ist wenig bekannt.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

2. Die Mindestzündenergie

- Bekannt: Die Mindestzündenergie sinkt mit steigendem Druck, steigender Temperatur und steigendem Oxidationspotenzial.
- Nur sehr wenige Daten bei nicht-atmosphärischen Bedingungen bekannt.
- Bisher keine quantitativen Zusammenhänge ableitbar.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

3. Der Mindestzündstrom

- Bekannt: Der Mindestzündstrom fällt mit steigendem Druck und steigender Temperatur.
- Mit steigendem Oxidationspotenzial wird ebenfalls ein sinken des Mindestzündstroms erwartet.
- Aus bisherige Messungen lassen sich keine quantitativen Zusammenhänge ableiten.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

1. Der maximale Explosionsdruck

- Bekannt: Der Explosionsdruck steigt mit dem Anfangsdruck, sinkt aber mit steigender Anfangstemperatur.

- $$P_{max}(T, p) = \frac{P_{max}(T_0, p_0) \cdot p \cdot T_0}{T \cdot p_0}$$

- Für Sauerstoff liegen einige Daten vor, zu anderen Oxidationsmitteln ist wenig bekannt.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

2. Der maximale zeitliche Druckanstieg

- Bekannt: Ist für viele Stoffe proportional zum Anfangsdruck, unterhalb von 200 °C ist er wenig Temperaturabhängig.
- Keine Untersuchungen mit anderen Oxidationsmitteln bekannt.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- **Kenngrößen**
- Auswirkungen
- Regelwerk
- Beispiel

3. Die flammendurchschlagsichere Spaltweite

- Bekannt: Die flammendurchschlagsichere Spaltweite sinkt mit steigender Temperatur und steigendem Druck
- $GSW(T) = GSW(T_0) \cdot (1 + k_{GSW}(T - T_0))$
mit k_{GSW} -Werten zwischen -5%/100K und -12%/100K
- $GSW(p) = GSW(p_0) \cdot p^n$
mit $n = -0,9$ bis $-1,1$
- Empfindlich bezüglich anderer Oxidationsmittel, Spaltweiten oft kaum messbar.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- **Auswirkungen**
- Regelwerk
- Beispiel

Grundsätzlich gilt:

Bei nicht-atmosphärischen Bedingungen sind die zur Anwendung kommenden Maßnahmen des Explosionsschutzes zu hinterfragen und bezüglich ihrer Wirksamkeit unter den veränderten Bedingungen zu bewerten!

Nicht-atmosphärische Bedingungen bedeuten nicht immer eine Verschärfung des Explosionsschutzes, sondern können auch Erleichterungen bringen.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- **Auswirkungen**
- Regelwerk
- Beispiel

Maßnahmen zur Gemischvermeidung

Hier gilt es zu berücksichtigen:

- Veränderung der Explosionsgrenzen (z.B. durch Temperaturerhöhung in Lacktrocknern, siehe auch EN 1539)
- Veränderung der Explosionspunkte (z.B. in Materialdruckbehältern die entzündbare Vorlagen enthalten)
- Veränderung der Sauerstoffgrenzkonzentration (z.B. inertisierte Rührkessel bei erhöhter Temperatur und erhöhtem Druck)

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- **Auswirkungen**
- Regelwerk
- Beispiel

Maßnahmen gegen potenzielle Zündquellen

Hier können einige Zündschutzarten ihre Wirksamkeit verlieren:

- Eigensicherheit „i“ und Zündschutzart „n“
- Druckfeste Kapselung „d“
- erhöhte Sicherheit „e“ und die konstruktive Sicherheit „c“
- Temperaturklassen sind neu zu bewerten

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- **Auswirkungen**
- Regelwerk
- Beispiel

Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes

Auch hier sind Anpassungen notwendig:

- Anpassung der Festigkeit explosiondruckfester und explosionsdruckstoßfester Bauweisen
- Anpassung flammendurchschlagsicherer Spalte (Flammendurchschlagsicherungen, druckfeste Kapselung)
- Verändertes Verhalten von Explosionsdruckentlastungen
- Wirksamkeit autonomer Schutzsysteme

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- **Regelwerk**
- Beispiel

explosionsfähige Atmosphäre wird betrachtet in:

- Richtlinie 2014/34/EU und Richtlinie 1999/92/EG
- 11. ProdSV und Betriebssicherheitsverordnung

Die Gefahrstoffverordnung schränkt ihren Anwendungsbereich nicht auf explosionsfähige Atmosphäre ein, sie betrachtet auch explosionsfähige Gemische.

→ Rückwirkung auf die BetrSichV z.B. bezüglich überwachungsbedürftiger Anlagen.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- **Regelwerk**
- Beispiel

Ein Beispiel

Flammendurchschlagsicherungen

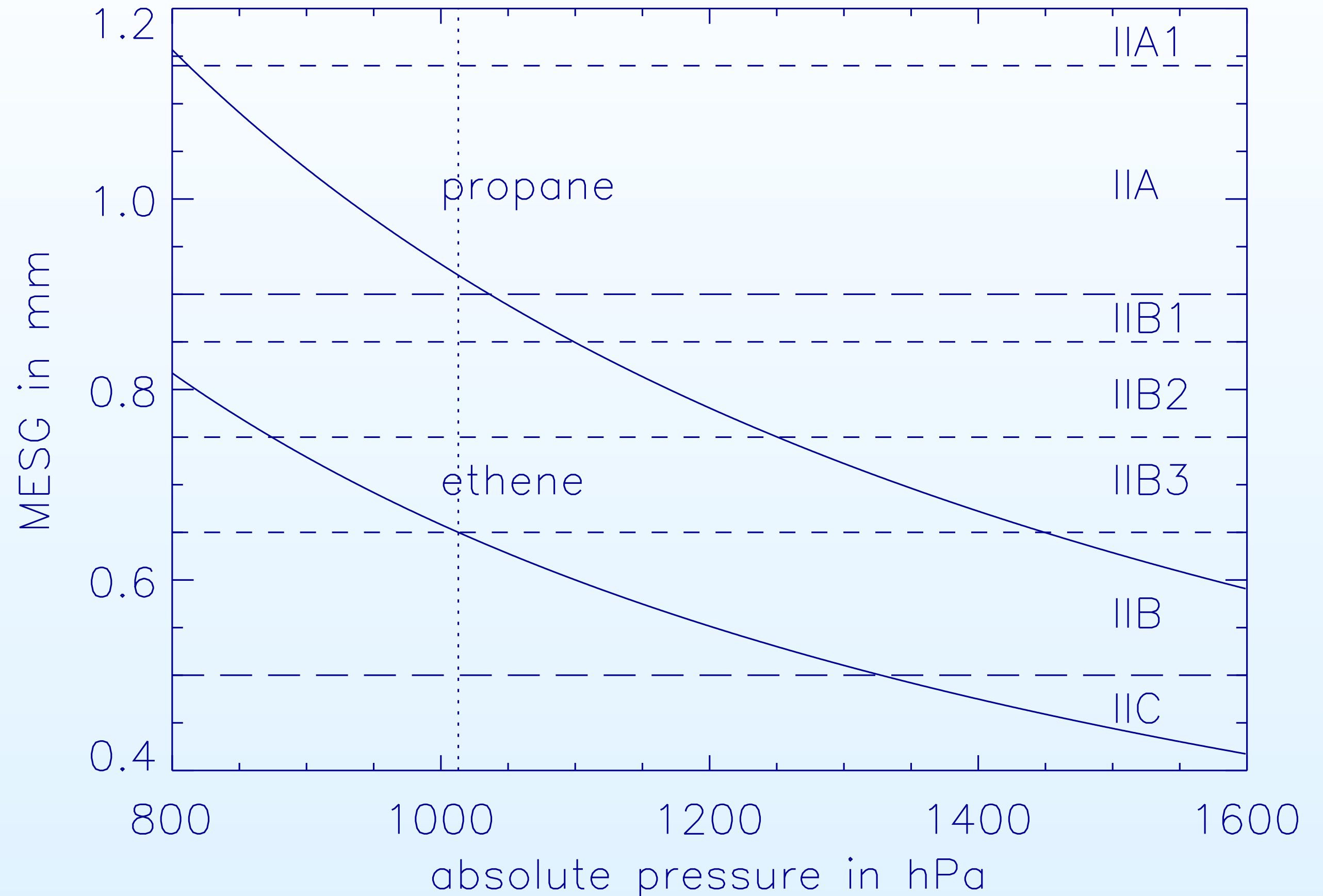
Flammendurchschlagsicherungen werden in Maschinen und Anlagen eingesetzt, um die Ausbreitung von Explosionen zu verhindern.



- es gibt eine Vielzahl von Bauarten für die verschiedensten Anwendungen
- sie werden primär nach der Explosionsgruppe klassifiziert
- Die Prüfung erfolgt bei atmosphärischen Bedingungen (ISO 16852, demnächst ISO/IEC 80079-49) ohne Bestimmung der Leistungsgrenzen → Bestimmung der Leistungsgrenzen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen

Druckabhängigkeit der flammendurchschlagsicheren Spaltweite

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**

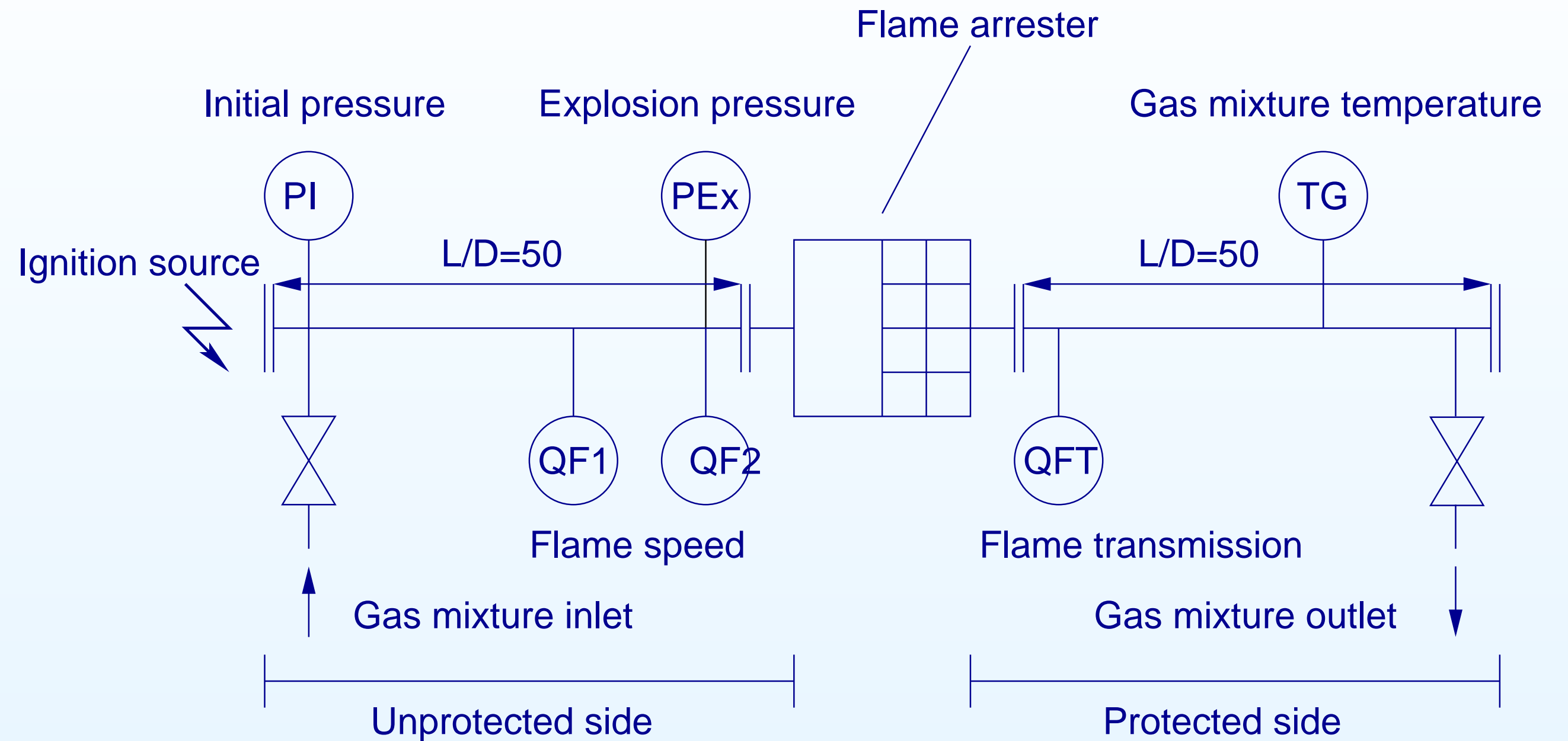


- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**

Fragestellung: Ist die Leistungsgrenze einer Flammendurchschlagsicherung durch die Grenzspaltweite des Gemische bei Beaufschlagung beschreibbar und gilt dies auch für abweichende Konzentrationen von Sauerstoff oder Inertgas als nur mit Luft?

- Ausgangspunkt: stöchiometrisches Propan-Luft- oder Ethen-Luft-Gemisch
- Variation des Sauerstoffgehalts im Gemisch mit Luft
- Variation des Inertgases (Argon, Stickstoff, Kohlendioxid) und dessen Anteils im Gemisch mit Luft
- Beschränkung auf Deflagrationen
- Erhöhung des Anfangsdruck bis zum Flammendurchschlag
- Versuchsaufbau in Anlehnung an EN ISO 16852

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**



- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**

		oxygen concentration in vol-%					
		30	29	28	27	26	25
initial pressure in hPa	1600					*	
	1550				*		
	1500				*	*	
	1450				*	*	
	1400				*	*	
	1350				*		
	1300			*	*		
	1250						
	1200			*	*		
	1150			*			
	1100		*	*	*		
1020							
		30	29	28	27	26	25
		oxygen concentration in vol-%					

propane-oxygen-air mixture

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**

		oxygen concentration in vol-%					
		25	24	23	22	21	19.6
initial pressure in hPa	1600					*	*
	1550						
	1500					*	
	1450					*	
	1400				*	*	
	1350			*	*		
	1300			*	*	*	
	1250			*	*		
	1200			*	*	*	
	1150						
	1100		*	*	*	*	
1020							
		25	24	23	22	21	19.6
		oxygen concentration in vol-%					

ethene-oxygen-air mixture

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**

		oxygen concentration in vol-%					
		20.11	19.71	19.10	18.10	17.09	16.09
initial pressure in hPa	1600				*	*	
	1550				*		
	1500				*		
	1450						
	1400			*	*		
	1350						
	1300			*			
	1250			*			
	1200			*			
	1150						
	1100		*				
	1020	*	*				
		0	2	5	10	15	20
		nitrogen additive in vol-%					

propane-nitrogen-air mixture

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**

		oxygen concentration in vol-%					
		19.60	19.20	18.61	17.63	16.65	15.67
initial pressure in hPa	1600				*	*	
	1550						
	1500				*	*	
	1450				*		
	1400			*	*	*	
	1350			*			
	1300		*	*	*		
	1250		*	*			
	1200		*	*			
	1150						
	1100	*	*	*			
	1020	*					
		0	2	5	10	15	20
		nitrogen additive in vol-%					

ethene-nitrogen-air mixture

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**

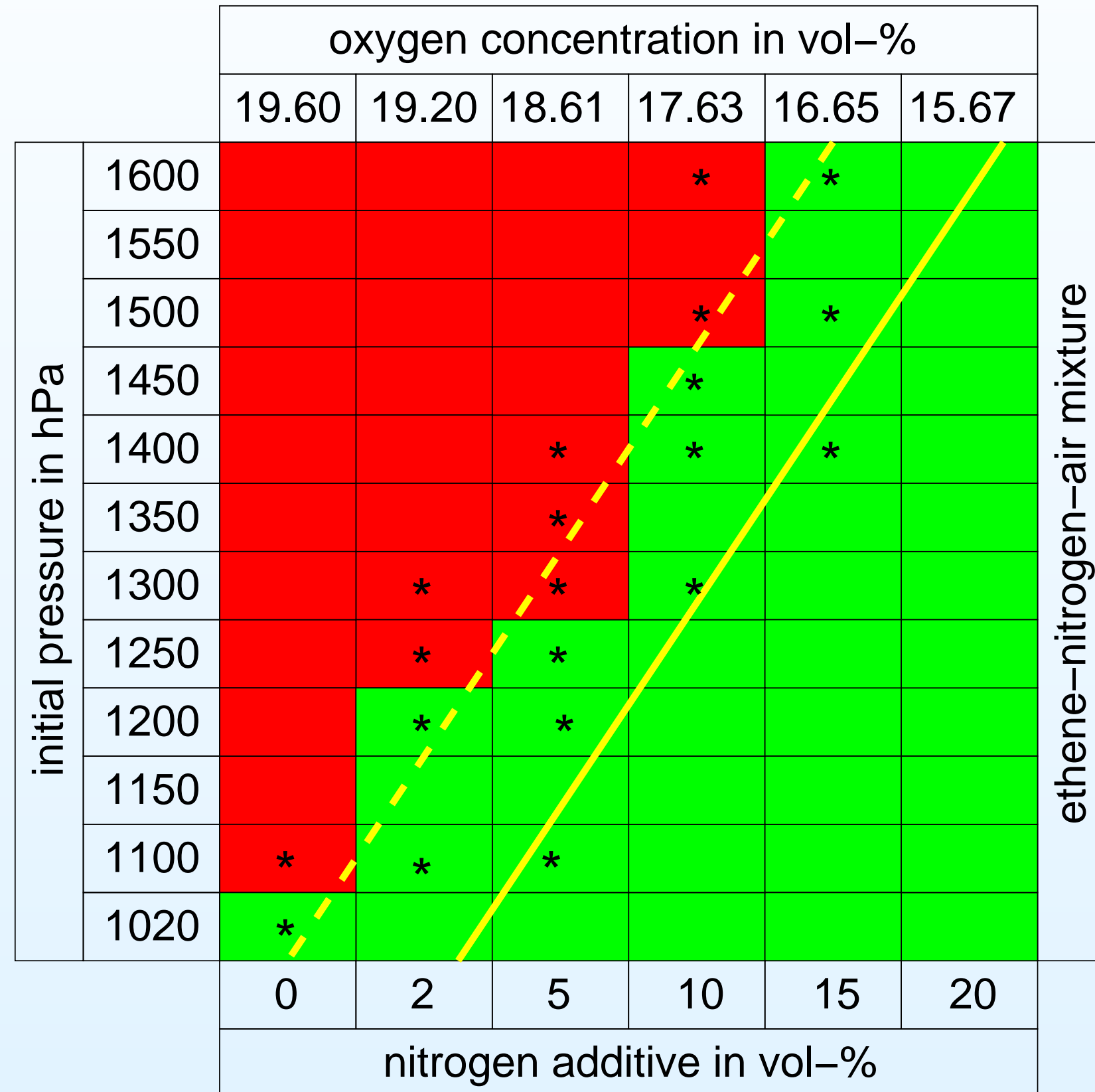
		oxygen concentration in vol-%					
		19.60	19.20	18.61	17.63	16.65	15.67
initial pressure in hPa	1600				*	*	
	1550						
	1500				*	*	
	1450				*		
	1400			*	*	*	
	1350			*			
	1300		*	*	*		
	1250		*	*			
	1200		*	*			
	1150						
	1100	*	*	*			
	1020	*					
		0	2	5	10	15	20
		nitrogen additive in vol-%					

ethene–nitrogen–air mixture

- Die Leistungsgrenze wurde im Verhältnis zur Gemischspaltweite betrachtet.
- Die aus den Messungen bestimmte mittlere Grenzspaltweite für die jeweilige Flammensperre bietet eine grobe aber allgemeine Beschreibung der Leistungsgrenze
- Sie kann als Ausgangspunkt für gezielte Tests dienen oder ...

... der Festlegung einer ausreichenden Sicherheitsmarge für den Betrieb.

- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**



- Ein Überblick
- Bedingungen
- Kenngrößen
- Auswirkungen
- Regelwerk
- **Beispiel**



Dr.rer.nat. Frank Stolpe
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
AG 3.72 Explosionsvorgänge bei
nicht-atmosphärischen Bedingungen

Bundesallee 100
D-38116 Braunschweig
Tel.: 0531/592-3414
Fax.: 0531/592-3705
Email: frank.stolpe@ptb.de