

Sicherheitstechnische Kenngrößen von Alkohol/Luft-Gemischen – Explosionsdruck, zeitlicher Druckanstieg, Verbrennungsgeschwindigkeit

Maria Mitu^{1,2}, Elisabeth Brandes¹

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.4 „Grundlagen des Explosionsschutzes“, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

² „Ilie Murgulescu“ Institut für Physikalische Chemie von Rumänischen Akademie, Labor 3 „Chemische Kinetik“, Spl. Independentei 202, 060021 Bukarest, Rumänien

Für Methanol, Ethanol, 2-Propanol, 2-Butanol und 1-Pentanol wurden für die sicherheitstechnischen Kenngrößen Explosionsdruck und zeitlicher Druckanstieg die Druckabhängigkeit für Drücke kleiner 1 bar und die Temperaturabhängigkeit für Temperaturen bis 100 °C untersucht. Die aus der Literatur bekannten Druck- und Temperaturabhängigkeiten des Explosionsdruckes konnten bestätigt werden. Für den zeitlichen Druckanstieg ergab sich eine vergleichbare Druckabhängigkeit. Für den K_G -Wert kann ein Einfluss des Volumens des Explosionsgefäßes, das für die Bestimmung des zeitlichen Druckanstieges verwendet wurde, nicht ausgeschlossen werden.

1 Einleitung

Alkohole spielen heute in der Chemie eine vielfältige Rolle. Sie sind wichtige Zwischenprodukte in der chemischen Industrie und dienen auch als Lösemittel für Farben und Lacke (alle kurzkettigen Alkohole) oder für die Duftstoffe bei der Parfümherstellung. Alkohole sind Bestandteil vieler Desinfektionsmittel sowie Reinigungsmittel. Mit Alkansäuren entstehen Ester, die als Geruchs- und Geschmacksstoffe in der Lebensmittel- und Parfümindustrie verwendet werden. Alkohole eignen sich auch als Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge. Vor allem Ethanol wird als Kraftstoff oder Kraftstoffzusatz für Ottomotoren eingesetzt.

Der maximale Explosionsdruck, der maximale zeitliche Druckanstieg und die Verbrennungsgeschwindigkeit dienen als Grundlage für die Explosionsschutzmaßnahmen wie explosionsdruckfeste oder explosionsdruckstoßfeste Bauweise, Explosionsdruckentlastung und Explosionsunterdrückung.

Für unterschiedliche Alkohol/Luft-Gemische wurden Explosionsdrücke, zeitliche Druckanstiege und Verbrennungsgeschwindigkeiten bestimmt.

Diese Messungen sind Bestandteil systematischer Untersuchungen zu deren Druck- und Temperaturabhängigkeit sowie zum Einfluss der Gefäßvolumina und anderer Oxidationsmittel als Luft.

2 Experimentelle Untersuchungen

Die Versuchsaufbauten sowie die Durchführung und Auswertung entsprechen EN 15967 [1]. Die Versuchsaufbauten unterscheiden sich in den Volumina der Explosionsgefäße. Es wurden Explosionsgefäße mit 5 l und mit 20 l Volumen eingesetzt. Das jeweilige Prüfgemisch wurde kontinuierlich durch Vermischen von Gasströmen hergestellt. Eine Folge von Induktionsfunken zwischen zwei Elektroden diente als Zündquelle, die sich in der Mitte des Explosionsgefäßes befand. Das jeweilige Verfahren (Versuchsaufbauten, Durchführung und Auswertung) wurde nach EN 15967 [1], Annex A und Annex B verifiziert. Beide Versuchsaufbauten erfüllten die Anforderungen aus Annex A und Annex B.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Messunsicherheit

Mit Methanol/Luft-Gemischen mit einem Methanolanteil von 12,28 Vol% wurde die Standardmessunsicherheit des angewendeten Bestimmungsverfahrens bei $T_0 = 323 \text{ K}$ und $p_0 = 1 \text{ bar}$ basierend auf 12 Tests ermittelt. Für den Explosionsdruck p_{ex} ergab sich eine Standardmessunsicherheit von 1,5 %, für den zeitlichen Druckanstieg $(dp/dt)_{ex}$ eine solche von 8 %. Die erweiterte Messunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ [2] liegt somit für p_{ex} bei 3 % und $(dp/dt)_{ex}$ bei 16%.

3.2 Explosionsdruck

In EN 13237 [3] und EN 15967 [1] sind der Explosionsdruck p_{ex} und der maximale Explosionsdruck p_{max} wie folgt definiert:

Explosionsdruck p_{ex} : höchster Druck, der in einem geschlossenen Behälter bei der Explosion eines definierten Brennstoff/Luft- oder Brennstoff/Luft/Inertgas-Gemisches unter festgelegten Prüfbedingungen auftritt.

maximaler Explosionsdruck p_{max} : Höchstwert, der bei der Bestimmung der Explosionsdrücke gemessen wird, wenn der Anteil an brennbarem Stoff im Brennstoff/Luft-Gemisch variiert wird.

Abb. 1 zeigt die experimentell bestimmten Explosionsdrücke p_{ex} als Funktion der Gemischzusammensetzung bei 358 K und Umgebungsdruck für die untersuchten Alkohole im Gemisch mit Luft.

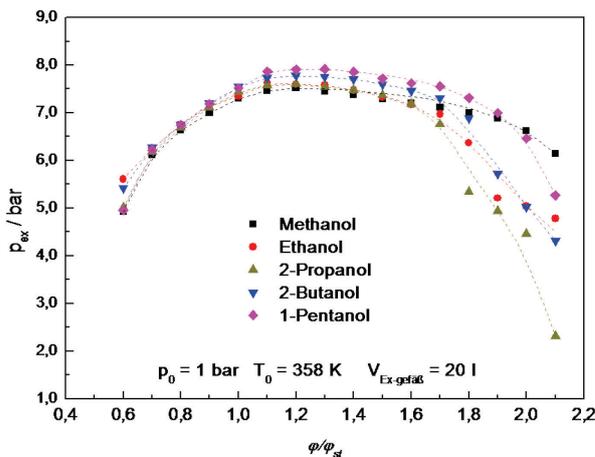


Abbildung 1: Explosionsdrücke der untersuchten Alkohol/Luft-Gemische als Funktion der Gemischzusammensetzung

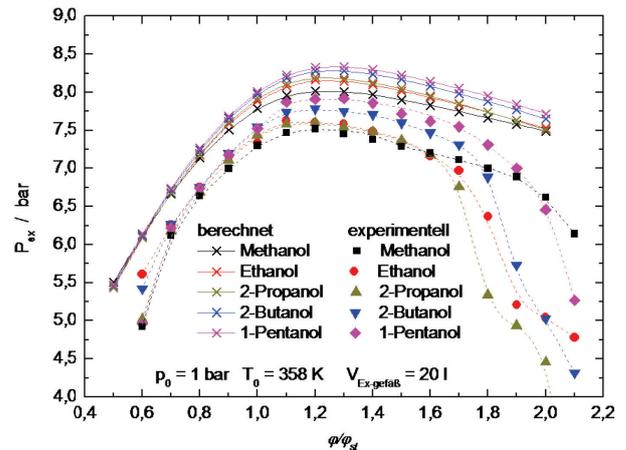


Abbildung 2: Vergleich der experimentell bestimmten und theoretischen Explosionsdrücke

Die daraus abgeleiteten maximalen Explosionsdrücke fasst Tabelle 1 zusammen. Sie sind auf 0,1 bar gerundet [1].

Es zeigt sich:

- dass für alle untersuchten Alkohole $p_{ex}f(\varphi)$ im Bereich des maximalen Explosionsdruckes relative flach verläuft,
- ein leichter Anstieg der maximalen Explosionsdrücke mit zunehmender C-Kettenlänge ergibt,
- die Unterschiede in den Explosionsdrücken und maximalen Explosionsdrücken der jeweiligen Alkohole im Konzentrationsbereich bis ca. $\varphi/\varphi_{st} = 1,7$ gering sind ($\varphi_{st} = 1$: stöchiometrische Konzentration). Für Gemischkonzentrationen größer $\varphi/\varphi_{st} = 1,7$ ergeben

sich größere Unterschiede, da die untersuchten Alkohole unterschiedlich weite Explosionsbereiche haben.

Tabelle 1: Maximale Explosionsdrücke für Alkohol/Luft-Gemische
Experimentelle und theoretische Werte

Alkohol	φ/φ_{st}	p_{max} (bar)	
		experimentell $T_0 = 358 \text{ K}, p_0 = 1 \text{ bar}$ $V_{\text{Ex.-gefäß}}: 20 \text{ l}$	theoretisch $T_0 = 358 \text{ K}, p_0 = 1 \text{ bar}$
Methanol	1,2	$7,5 \pm 0,08$	8,0
Ethanol	1,1	$7,6 \pm 0,04$	8,15
2-Propanol	1,2	$7,6 \pm 0,13$	8,2
2-Butanol	1,2	$7,8 \pm 0,06$	8,3
1-Pentanol	1,3	$7,9 \pm 0,06$	8,35

Tabelle 1 enthält auch die theoretischen maximalen Explosionsdrücke der Gemische. Sie wurden mit Hilfe von [4] für 358 K berechnet. Grundlage hierbei ist die Berechnung der adiabatischen Flammentemperatur unter idealisierten Annahmen.

Abbildung 2 zeigt den Vergleich der experimentell bestimmten und der theoretischen Explosionsdrücke über den gesamten untersuchten Konzentrationsbereich. Dabei zeigt sich, dass die Berechnung sowohl den grundsätzlichen Verlauf der Explosionsdrücke als auch die Werte an sich im unterstöchiometrischen Bereich und teilweise im überstöchiometrischen Bereich zufriedenstellend wiedergibt. Die berechneten Werte liegen in der Regel um ca. 0,5 bar höher.

Abbildung 3 zeigt am Beispiel von Ethanol den Einfluss des Ausgangsdruckes.

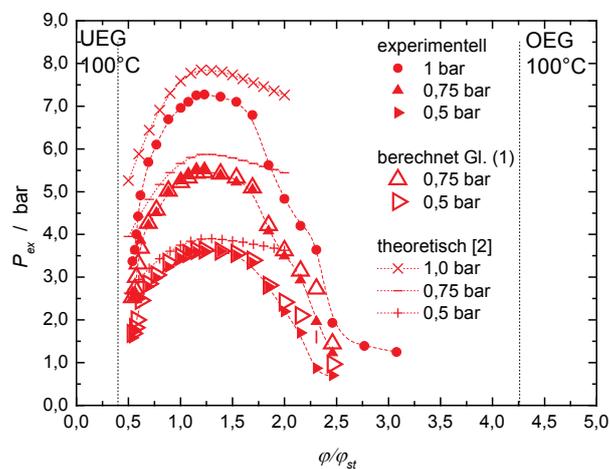


Abbildung 3: Ethanol/Luft-Gemische: Experimentell bestimmte, berechnete und theoretische Explosionsdrücke bei unterschiedlichen Ausgangsdrücken ($V_{\text{Ex.-gefäß}}: 5 \text{ l}$)

Den berechneten Werten liegt folgende Korrelation [1, 5, 6] zu Grunde:

$$p_{ex}(p) = p_{ex}(p_0) \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

Mit p_{ex} : Explosionsdruck, p_0 : Bezugsdruck, p : Ausgangsdruck.

Die berechneten Werte basieren auf $p_0 = 1 \text{ bar}$ und dem jeweiligen Explosionsdruck bei 1 bar.

Die theoretischen Explosionsdrücke wurden mit Hilfe der in [4] angegebenen Beziehung berechnet.

Dabei zeigt sich, dass die nach Gleichung 1 berechneten Werte sehr gut mit den experimentell bestimmten Werten übereinstimmen. Von wenigen Ausnahmen abgesehen liegt die Abweichung innerhalb der Standardmessunsicherheit.

Vergleichbare Ergebnisse ergeben sich auch für die anderen untersuchten Alkohole.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen am Beispiel von Methanol und 2-Propanol den Einfluss der Ausgangstemperatur.

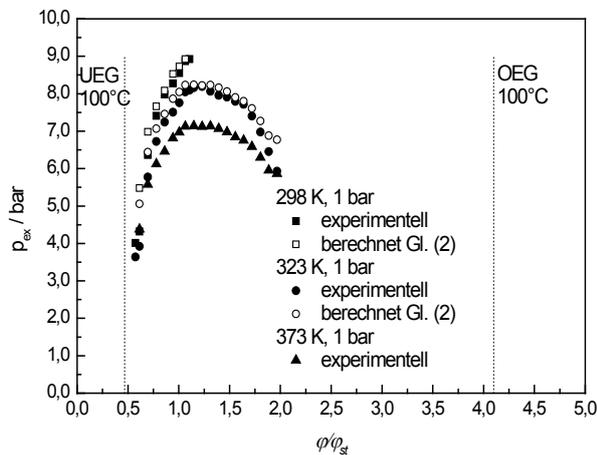


Abbildung 4: Methanol/Luft-Gemische: Experimentell bestimmte und berechnete Explosionsdrücke bei unterschiedlichen Ausgangstemperaturen ($V_{\text{Ex-gefäß}}$: 5 l)

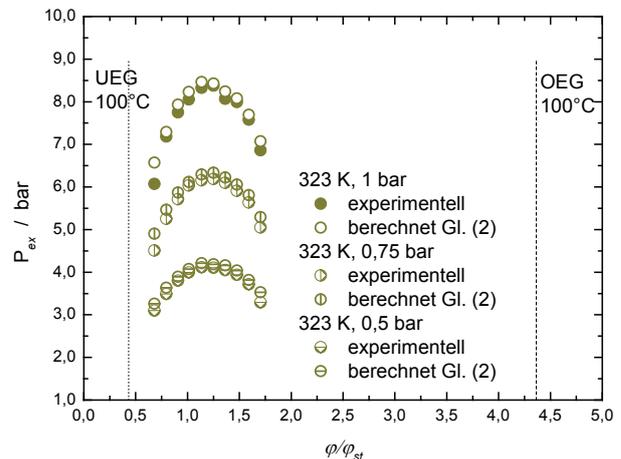


Abbildung 5: 2-Propanol/Luft-Gemische: Experimentell bestimmte und berechnete Explosionsdrücke bei unterschiedlichen Ausgangstemperaturen ($V_{\text{Ex-gefäß}}$: 5 l)

Den berechneten Werten liegt folgende Korrelation [1, 5, 6] zu Grunde:

$$p_{\text{ex}}(T) = p_{\text{ex}}(T_0) \frac{T_0}{T} \quad (2)$$

Mit: p_{ex} : Explosionsdruck, T_0 : Bezugstemperatur, T : Ausgangstemperatur

Basis für die berechneten Werte ist $T_0 = 373 \text{ K}$ und der jeweilige Explosionsdruck bei 373 K. Verglichen mit der Druckabhängigkeit ist die Übereinstimmung ähnlich gut, wenn auch im allgemeinen leicht höhere Werte berechnet werden. Von wenigen Ausnahmen abgesehen liegt sie innerhalb der Standardmessunsicherheit. In allen Fällen ergibt die Berechnung jedoch Werte zur sicheren Seite. Vergleichbare Ergebnisse ergeben sich auch für die anderen untersuchten Alkohole und für die Messreihen mit einem Volumen von 20 l.

3.2 Zeitlicher Druckanstieg

In EN 13237 [3] und EN 15967 [1] sind der zeitliche Druckanstieg $(dp/dt)_{\text{ex}}$ und der maximale zeitliche Druckanstieg $(dp/dt)_{\text{max}}$ wie folgt definiert:

zeitlicher Druckanstieg $(dp/dt)_{\text{ex}}$: höchster Wert der Steigung (erste Ableitung) der Druck-Zeit-Kurve (geglättet, falls erforderlich), der in einem geschlossenen Behälter bei der Explosion eines definierten Brennstoff/Luft- oder Brennstoff/Luft/Inertgas-Gemisches unter festgelegten Prüfbedingungen auftritt

maximaler zeitlicher Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{\text{max}}$: höchster Wert des zeitlichen Druckanstieges, der sich durch Variieren des Anteils an brennbarem Stoff im Gemisch ergibt.

Abbildung 6 zeigt die experimentell bestimmten zeitlichen Druckanstiege $(dp/dt)_{ex}$ als Funktion der Gemischzusammensetzung bei 358 K und Umgebungsdruck für die untersuchten Alkohole im Gemisch mit Luft. Das Volumen des Explosionsgefäßes betrug 20 l.

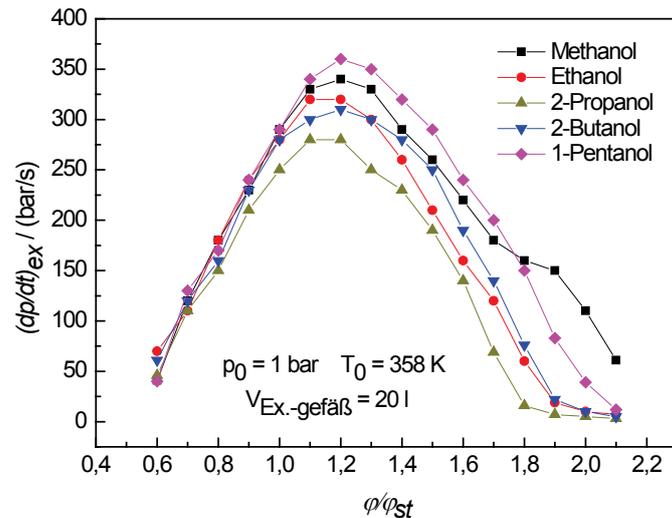


Abbildung 6: Zeitlicher Druckanstieg der untersuchten Alkohol/Luft-Gemische als Funktion der Gemischzusammensetzung

Die daraus abgeleiteten maximalen zeitlichen Druckanstiege fasst Tabelle 2 zusammen. Die Werte sind entsprechend EN 15967 [1] gerundet. Im Gegensatz zu den Ergebnissen für die Explosionsdrücke ergibt sich für $(dp/dt)f(\varphi)$ im Bereich des maximalen zeitlichen Druckanstiegs ein engerer Kurvenverlauf. Auch scheint ein Einfluss der Molekülkonfiguration (verzweigt oder unverzweigt) möglich. Die beiden verzweigten Alkohole zeigen im Bereich des maximalen zeitlichen Druckanstiegs die niedrigsten Werte.

Tabelle 2: Maximale zeitliche Druckanstiege der untersuchten Alkohole bei Umgebungsdruck und 385 K ($V_{Ex.-gefäß}$: 20 l)

Alkohol	Methanol	Ethanol	2-Propanol	2-Butanol	1-Pentanol
$(dp/dt)_{max}$ / (bar/s)	340	320	280	310	360

Abbildung 7 zeigt am Beispiel von Ethanol den Einfluss des Ausgangsdruckes. Den berechneten Werten liegt folgende Korrelation zu Grunde:

$$dp_{ex} / dt(p) = dp_{ex} / dt(p_0) \frac{p}{p_0} \quad (3)$$

Mit: $(dp/dt)_{ex}$: zeitlicher Druckanstieg, p_0 : Bezugsdruck, p : Ausgangsdruck
Es zeigt sich, dass die nach Gleichung 3 berechneten Werte gut mit den experimentell bestimmten übereinstimmen, jedoch tendenziell niedrigere Werte erhalten werden, im Gegensatz zur analogen Berechnung der Explosionsdrücke. Von wenigen Ausnahmen am Rande des Explosionsbereiches abgesehen, liegt die Abweichung jedoch innerhalb der Standardmessunsicherheit. Vergleichbare Ergebnisse ergeben sich für die anderen untersuchten Alkohole und für die Messreihen mit einem Gefäßvolumen von 5 l.

Zumindest für die untersuchten Alkohole ist der Temperatureinfluss im untersuchten Temperaturbereich gering. Abbildung 8 zeigt dies am Beispiel von 2-Propanol. Offensichtlich kompensieren sich der Temperatureinfluss auf den Explosionsdruck (p_{ex} sinkt mit zunehmender Temperatur) und auf die Reaktionsgeschwindigkeit (steigt mit zunehmender Temperatur) im untersuchten Temperaturbereich weitestgehend. Aktuell ist jedoch hinsichtlich des Tempe-

temperatureinflusses auf den zeitlichen Druckanstieg keine Verallgemeinerung möglich (siehe auch [7, 8]).

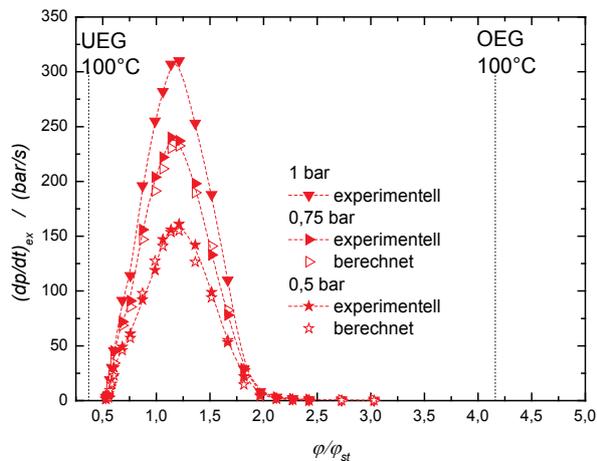


Abbildung 7: Ethanol/Luft-Gemische: Experimentell bestimmte und berechnete zeitliche Druckanstiege bei unterschiedlichen Ausgangsdrücken ($V_{Ex.-gefäß}$: 20 l)

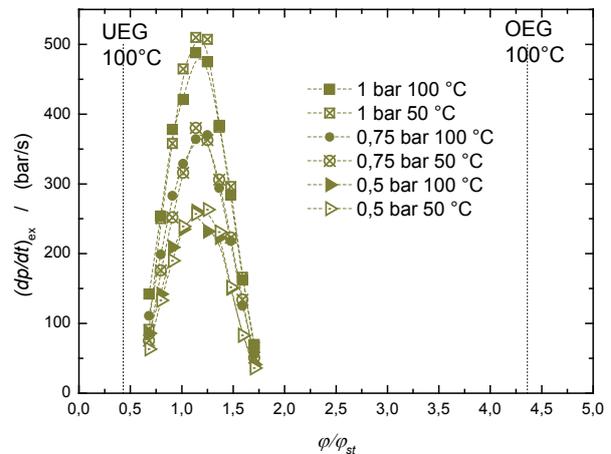


Abbildung 8: 2-Propanol/Luft-Gemische: Experimentell bestimmte und berechnete zeitliche Druckanstiege bei unterschiedlichen Ausgangsdrücken und Temperaturen ($V_{Ex.-gefäß}$: 5 l)

Die Werte für $(dp/dt)_{max}$ und $(dp/dt)_{ex}$ sind abhängig vom Volumen und von der Form des Explosionsgefäßes, das bei ihrer Bestimmung eingesetzt wird. So sinkt z. B. $(dp/dt)_{max}$ mit zunehmendem Volumen des Explosionsgefäßes. Daher ist es üblich, einen auf ein Volumen von 1 m³ normierten zeitlichen Druckanstieg (K_G) unter Verwendung folgender Gleichung anzugeben:

$$K_G = \sqrt[3]{V} \cdot \left(\frac{dp}{dt} \right) \quad (4)$$

Dabei ist V das Volumen des Explosionsgefäßes, das bei der Bestimmung eingesetzt wird. Diese Gleichung, auch als 'Kubisches Gesetz' bezeichnet, setzt das ideale Verhalten der Explosion voraus. Tabelle 3 zeigt exemplarische K_G -Werte, berechnet aus den dp/dt -Werten, die bei Versuchsreihen mit einem Volumen von 20 l erhalten wurden. Die K_G -Werte sind auf $1 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ gerundet.

Tabelle 3: Exemplarische K_G -Werte ($\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) für die untersuchten Alkohol/Luft-Gemische bei 358 K und 1 bar ($V_{Ex.-gefäß}$: 20 l)

ϕ/ϕ_{st}	Methanol	Ethanol	2-Propanol	2-Butanol	1-Pentanol
0,6	11	19		17	11
0,8	47	47	39	42	44
0,9	62	63	56	61	65
1,0	78	76	67	74	77
1,1	88	87	74	81	93
1,2	91	87	74	84	97
1,3	88	80	67	79	93

Zumindest für Gase wurde jedoch nachgewiesen, dass vor allem K_{Gmax} mit zunehmendem Volumen steigt [7, 8, 9].

Für Methanol, Ethanol und 2-Propanol ergeben sich abhängig vom Volumen des Explosionsgefäßes (5 l, 20 l) ebenfalls unterschiedliche K_G -Werte. Allerdings liegen die K_G -Werte berechnet auf Grundlage der Ergebnisse im 20-l-Gefäß niedriger als die K_G -Werte, die auf den Messreihen in einem 5-l-Gefäß basieren. Tabelle 4 zeigt einen Vergleich mit Literaturwerten.

Tabelle 4: K_{Gmax} -Werte aus Literaturquellen zum Vergleich

	Eigene Untersuchungen $V_{Ex.-gefäß}: 5\text{ l}$ 1 bar 323 K, 373 K		Eigene Untersuchungen $V_{Ex.-gefäß}: 20\text{ l}$ 1 bar 278K, 323 K, 358 K, 373 K				[10] $V_{Ex.-gefäß}: 5\text{ l}$ Umgebungsbedingungen,	[11] $V_{Ex.-gefäß}: 20\text{ l}$ 1 bar, 373 K	[12] $V_{Ex.-gefäß}: 10\text{ l}$ 1 bar, 339 K
Methanol	108	105	94	96	91	91	75 (angegeben als extrapoliert)	75	45
Ethanol	95	95		85	87	85	78 (zitiert in [9])		34
2-Propanol	87	83			78	76	83 (angegeben als extrapoliert)		30

3.3 Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit

Die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der sich eine ebene ungestörte Flamme durch ein ruhendes vorgemischtes Brennstoff/Luft-Gemisch ausbreitet. Sie sollte nur von der Zusammensetzung des Gemisches sowie von Druck und Temperatur abhängen [13, 14].

Die Verbrennungsgeschwindigkeit wurde nach der Druckanstiegsmethode [14, 15] aus den Messreihen im Explosionsgefäß mit einem Volumen von 20 l bestimmt. Die so ermittelten Verbrennungsgeschwindigkeiten der untersuchten Alkohole sind Abbildung 9 zu entnehmen.

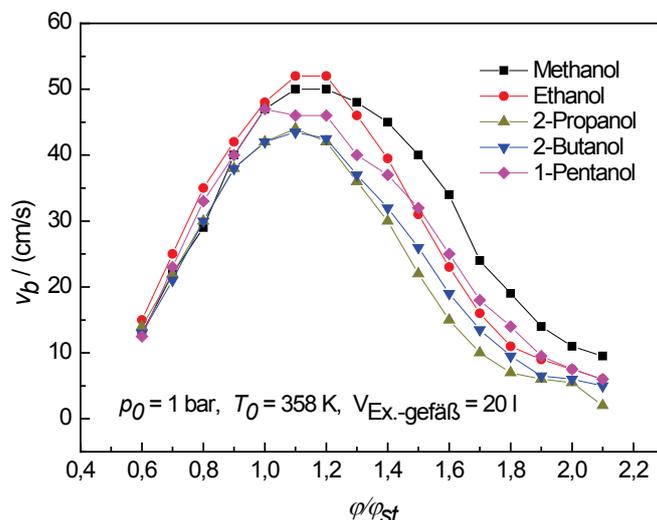


Abbildung 9: Verbrennungsgeschwindigkeiten der untersuchten Alkohol-Luft-Gemische (berechnet aus den zeitlichen Druckanstiegen nach [15]) als Funktion der Gemischzusammensetzung)

Ein Vergleich mit Daten aus der Literatur zeigt, dass die Bestimmung der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit nach der Druckanstiegsmethode nach Bradley offensichtlich zu etwas niedrigeren Werten führt. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen dies bei 1 bar und 358 K am Beispiel der Methanol/Luft-Gemische [16, 17, 18, 19] und der Ethanol/Luft-Gemische [14, 20, 21]. Die Literaturwerte wurden jedoch jeweils in Explosionsgefäßes mit geringerem Volumen

ermittelt. Die Werte aus [19, 20] wurden durch Auswertung schlierenoptischer Aufzeichnungen erhalten. Die Werte in [18] wurden aus den zeitlichen Druckanstiegen unter Berücksichtigung der Flammdehnung ermittelt.

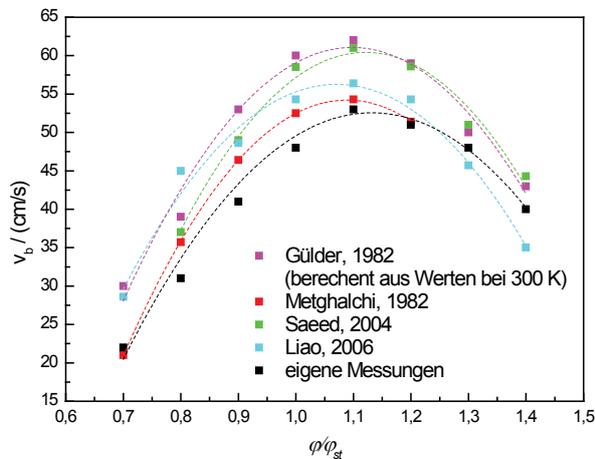


Abbildung 10: laminare Verbrennungsgeschwindigkeiten für Methanol/Luft-Gemische bei 358 K und 1 bar

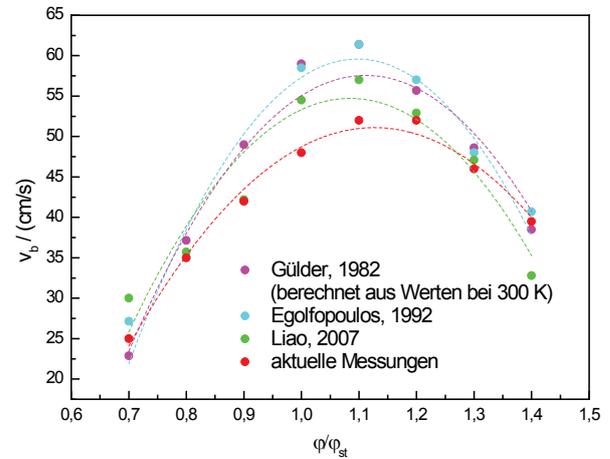


Abbildung 11: laminare Verbrennungsgeschwindigkeiten für Ethanol/Luft-Gemische bei 358 K und 1 bar

4 Zusammenfassung

Innerhalb der untersuchten Druck- und Temperaturbereiche konnte für die untersuchten Alkohole - Methanol, Ethanol, 2-Propanol, 2-Butanol und 1-Pentanol - für

- den Explosionsdruck die Druck- und Temperaturabhängigkeit nach folgender

$$\text{Korrelation } p_{ex}(p) = p_{ex}(p_0) \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T} \text{ . bestätigt werden,}$$

- den zeitlichen Druckanstieg eine entsprechende Druckabhängigkeit

$$p_{ex}(p) = p_{ex}(p_0) \frac{p}{p_0} \text{ , jedoch keine eindeutige Temperaturabhängigkeit gezeigt}$$

werden.

Für den K_G -Wert ergab sich eine Abhängigkeit vom Volumen des Explosionsgefäßes, das für die Bestimmung des zeitlichen Druckanstieges verwendet wurde.

Literaturverzeichnis

- [1] EN 15967 (2009): Verfahren zur Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges für Gase und Dämpfe.
- [2] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008
- [3] EN 13237 (2012): Explosionsgefährdete Bereiche - Begriffe für Geräte und Schutzsysteme zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen.
- [4] Gaseq, 2005: <http://www.c.morley.dsl.pipex.com/>
- [5] E. Brandes et al.: Sicherheitstechnische Kenngrößen bei reduzierten Ausgangsdrücken 8. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik ; (Tagungsbericht / BAM): (1999), 85 - 90
- [6] M. Hattwig, H. Steen, Handbook of Explosion Protection: Wiley-VCH, 2004

- [7] Report on the experimentally determined lower explosion limits, explosion pressures and rate of explosion pressure rise – Part 1: methane, hydrogen and propylene
<http://www.morechemistry.com/SAFEKINEX/deliverables.html>
- [8] Report on the experimentally determined lower explosion limits, explosion pressures and rate of explosion pressure rise – Part 2: ethane, ethane, propane, n-butane, ammonia and carbon monoxide
<http://www.morechemistry.com/SAFEKINEX/deliverables.html>
- [9] Standard on explosion protection by Deflagration Venting, NFPA 68, 2012
- [10] W. Bartknecht "Explosions-Schutz: Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag, 1993
- [11] Y. M. Chang, K. H. Hu, J. K. Chen, C. M. Shu, Flammability studies of benzene and methanol with different vapor mixing ratios under various initial conditions, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 83(1), 107–112 (2006)
- [12] H.R. Maysey, Gas and Dust Explosion Venting, Chemical and Process Engineering, October 1965; Ref. 5: Eastman Kodak Co. "Test in closed 10-l. (0.352-cu.ft.) vessel", (1952).
- [13] M. Scheid: Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2005
- [14] G. E. Andrews, D. Bradley: Combustion and Flame 18, 133 (1972).
- [15] D. Bradley, A. Mitcheson, Combustion and Flame 26, 201 (1976).
- [16] Ö.L. Gülder, Laminar burning velocities of methanol, ethanol and isooctane-air mixtures, 19-th Symposium (International) on Combustion 275-281 (1982).
- [17] M. Metghalchi, Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane and indolene at high pressure and temperature, Combustion and Flame 48, 191-210 (1982).
- [18] K. Saeed, C.R. Stone, Measurements of the laminar burning velocity for mixtures of methanol and air from a constant-volume vessel using a multizone model, Combustion and Flame 139, 152-166 (2004).
- [19] S.Y. Liao, D.M. Jiang, Z.H. Huang, K. Zeng, Characterization of laminar premixed methanol-air flames, Fuel 85, 1346-1353 (2006).
- [20] S.Y. Liao, D.M. Jiang, Z.H. Huang, K. Zeng, Q. Cheng, Determination of the laminar burning velocities for mixtures of ethanol and air at elevated temperatures, Applied Thermal Engineering 27, 374-380 (2007).
- [21] F.N. Egolfopoulos, D.X. Du, C.K. Law, in: 24th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute Pittsburgh PA, 833–841 (1992).

Terms of Use

Any party may pass on this Work by electronic means and make it available for download under the terms and conditions of the Digital Peer Publishing License (DPPL) Version 3.0. The text of the license may be accessed and retrieved via Internet at <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-dppl-v3-en8>.

Beyond the conditions of the DPPL, the data which is contained in this catalog May only be used by any party for signal processing if the data is inserted into the source code of the program together with a reference to the catalog and if the program documentation (if available) also contains a reference to this catalog.

Exclusion of Liability

Deviating from paragraphs 12 and 13 of the DPPL Version 3.0, a comprehensive exclusion of liability applies. This states: This catalog is made available without any special or implied guarantee, which – among others – includes the implicit guarantee of the use of the catalog for a certain purpose. Under no circumstances is PTB responsible for any direct or indirect damage, independent of how it arose, through the use of the catalog. This also applies to damage due to errors of the catalog, which were already known at the occurrence of the damage.