

Zündung durch Hochspannungs-Kondensator-entladungen nahe der Mindestzündenergie

Stefan Essmann¹, Detlev Markus¹, Ulrich Maas²

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.5 „Zünddurchschlagsprozesse“, Braunschweig

² KIT – Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Thermodynamik, Karlsruhe

Im Rahmen der DFG-Forschergruppe FOR 1447 „Safety Relevant Ignition Processes“ wird die Zündung durch elektrische Entladungen untersucht. Klassischerweise wird für die Beurteilung der Gefährdung durch Funkenzündungen die sicherheitstechnische Kenngröße Mindestzündenergie (MZE) verwendet, welche den Charakter eines Schwellwertes hat. Aktuelle Studien weisen darauf hin, dass statistische Verfahren bei der Untersuchung von Zündungen besser für die Abbildung des stochastischen Verhaltens geeignet sind. In dieser Arbeit werden Funkenzündungen bei Propan/Luft- und Ethen/Luft Gemischen untersucht. Dazu werden in einem Kugel/Kugel-Elektroden-Aufbau zunächst die Zündgrenzkurven bestimmt. Diese stimmen gut mit den Daten anderer Autoren überein. Für das jeweils zündwilligste Gemisch wird die Zündwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Funkenenergie durch logistische Regression bestimmt. Die Zündwahrscheinlichkeit bei der MZE beträgt demnach für Ethen/Luft weniger als 1 %. Zur zuverlässigen Detektion von Zündungen wird ein Hochgeschwindigkeits-Schlieren-Aufbau verwendet. Aus den hierbei erzeugten Bilderserien ergeben sich die Flammenfrontgeschwindigkeiten. Die Abhängigkeit der Flammenfrontgeschwindigkeit von der Gemischzusammensetzung kann mit dem Versuchsaufbau bestätigt werden, während die Funkenenergie keinen messbaren Einfluss auf die Flammenausbreitung hat. Der Versuchsaufbau soll in Verbindung mit numerischen Simulationen ein besseres Verständnis der physikalisch-chemischen Prozesse, insbesondere der Verluste, ermöglichen, die für die Zündung bei Energien nahe der MZE relevant sind.

1 Einleitung

Die sicherheitstechnische Kenngröße Mindestzündenergie (MZE) ist eine der wichtigsten Eigenschaften brennbarer Gase, die zur Beurteilung der Sicherheit von Anlagen und Geräten und der Abschätzung von Risiken durch verschiedene Zündquellen, beispielsweise elektrostatische Entladungen, herangezogen wird [1, 2]. Die stochastische Charakteristik der Funkenzündung infolge elektrostatischer Entladungen nahe der MZE wurde in letzter Zeit für Propan/Luft-, Ethen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemische [3, 4] sowie für Treibstoffe und andere brennbare Gemische, die für die Luftfahrttechnik relevant sind, untersucht [5–7]. Hierbei scheint sich immer mehr die Auffassung durchzusetzen, dass die Funkenzündung nicht als Schwellwertproblem im klassischen Sinne der MZE zu betrachten ist, sondern als ein Phänomen, das einer gewissen Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegt. In der vorliegenden Arbeit wird mit einem ähnlichen Ansatz ein Versuchsaufbau charakterisiert, welcher der Untersuchung des Zündprozesses durch Funkenentladungen nahe der MZE dient. Dabei werden niederenergetische Hochspannungs-Kondensatorentladungen in einem näherungsweise homogenen elektrischen Feld als Modell elektrostatischer Entladungen genutzt. Zunächst werden für Propan/Luft- und Ethen/Luft-Gemische unter Variation der Gemischzusammensetzung bei konstanten Schlagweiten (1,7 mm für Propan, 1,2 mm für Ethen) die Zündgrenzkurven bestimmt. Mittels logistischer Regression wird für das jeweils zündwilligste Gemisch die Zündwahrscheinlichkeit als Funktion der Funkenenergie bestimmt [6]. Zusätzlich wird die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung als Funktion der Gemischzusammensetzung mithilfe eines Hochgeschwindigkeits-Schlieren-Aufbaus bestimmt. Sowohl die Energie, die zur Zündung notwendig ist, als auch die Flammenausbreitung sind

Anknüpfungspunkte für numerische Simulationen der Funkenzündung. Damit wird es möglich sein, die beim Zündprozess auftretenden Verluste zu quantifizieren. Dazu gehören elektrische Verluste, elektromagnetische Strahlung, Wärmeleitung zu den Elektroden und Verluste aufgrund der durch den Funken ausgelösten Stoßwelle, allesamt Größen, die experimentell kaum zu fassen sind.

2 Hintergrund

Elektrostatische Entladungen können an Gasspalten auftreten, wenn über dem Spalt eine elektrische Spannung U anliegt, die größer ist als die Durchbruchspannung des Dielektrikums U_d . Ist dies der Fall, so kommt es zur Ionisierung des Gases durch Elektronenlawinen (Townsend- bzw. Generationen-Mechanismus) [8]. Die Leitfähigkeit steigt stark an und über den Spalt kann für eine kurze Zeit ein großer Strom fließen, bis die Spannung wieder unter die Durchbruchspannung fällt. Diese Art der Entladung nennt man Funkenentladung.

Die Zündung eines Brennstoff/Luft-Gemisches durch eine Funkenentladung ist ein stochastischer Prozess, bei dem innerhalb eines bestimmten Energieintervalls Funken gleichen Energieinhalts nicht in jedem Fall das gleiche Resultat (Zündung oder Nichtzündung) liefern. Aus experimentellen Daten ist ersichtlich, dass keine diskrete Energie existiert, die bei jedem Versuch zur Zündung führt, während das gleiche Gemisch bei einer nur geringfügig kleineren Energie nie zündet. Ganz im Gegenteil findet man in jedem Datensatz zur Zündung nahe der MZE Datenpunkte mit Nichtzündungen bei einer höheren Energie als die niedrigste Energie, die erforderlich war, um das Gemisch zu zünden. Es ist allerdings nicht bekannt, ob die Funkenzündung selbst die Eigenschaft eines stochastischen Prozesses hat, oder ob die Abweichungen von einem festen Grenzwert in der Variation der Umgebungsbedingungen und zufälligen Messfehlern der Messgeräte ihren Ursprung haben. Bisher wurde trotz sorgfältiger Kontrolle der die Zündung beeinflussenden Parameter nie eine Grenze gefunden, die Zündungen und Nichtzündungen eindeutig separiert [9, 10]. Unabhängig von der Quelle des stochastischen Verhaltens ist dieses für verschiedene Stoffe und Aufbauten gut reproduzierbar [4–6]. In diesem Kontext ist das Verständnis der MZE zu betonen als diejenige niedrigste Energie, bei der je eine Zündung beobachtet wurde. Dies bedeutet keineswegs, dass eine Zündung bei einer geringeren Energie nicht möglich wäre, sondern, dass dies unwahrscheinlich ist, denn die MZE wurde über eine Vielzahl von Versuchen ermittelt. Neben der Funkenenergie ist auch die durch den Funken übertragene Ladung zur Charakterisierung der Zündung Gegenstand aktueller Forschung in der PTB [11, 12].

Mit Regressionsanalysen können mehr Informationen über Zündprozesse gewonnen werden als durch die Bestimmung eines Grenzwertes. Da der Ausgang eines Zündexperimentes eine binäre Variable mit den Ausprägungen ja/nein bzw. 0/1 ist, wurde die logistische Regression von einigen Autoren zur Auswertung entsprechender Datenreihen genutzt [3, 5–7, 13]. Die Voraussetzungen für die Anwendung der logistischen Regression wurden von Bane formuliert [14]. Erstens muss die unabhängige Variable, in diesem Fall die Funkenenergie, metrisch oder kategorial sein und einer Normalverteilung unterliegen. Mit der Langlie-Methode [15] kann die Funkenenergie derart variiert werden, dass sie näherungsweise normalverteilt ist. Dabei ist der für ein Experiment einzustellende Wert in Abhängigkeit von den Ergebnissen der vorherigen Experimente über einen Algorithmus zu ermitteln. Zweitens darf es keine Abhängigkeit zwischen unabhängigen Variablen geben bzw. wenn es eine solche Abhängigkeit gibt, darf nur eine unabhängige Variable verändert werden, während alle anderen konstant gehalten werden müssen. Um dies sicherzustellen, wird das Gemisch im Testaufbau nach jedem Experiment gewechselt, auch wenn keine Zündung stattgefunden hat. Drittens ist eine ausreichend große Anzahl an Beobachtungen notwendig (mindestens 50).

Bei der Anwendung der logistischen Regression auf Zündprozesse wird die Zündwahrscheinlichkeit mit der Funktion

$$P(E) = \frac{1}{1 + \exp(\beta_0 - \beta_1 \cdot E)} \quad (1)$$

modelliert, wobei E die Funkenenergie bezeichnet. Die Regressionsparameter β_0 und β_1 werden durch Maximierung der „Likelihood“-Funktion

$$L = \prod_{i=1}^n P(E_i)^{y_i} \cdot (1 - P(E_i))^{1-y_i} \quad (2)$$

berechnet. Das Konfidenzintervall der Wahrscheinlichkeitsverteilung kann mit den Varianzen und der Kovarianz der Regressionsparameter bestimmt werden. Eine ausführlichere Darstellung der logistischen Regression und ein entsprechender Matlab-Code finden sich in [16].

3 Aufbau und Durchführung der Experimente

Die Zündversuche werden in einem zylindrischen Gefäß mit 2,35 Litern Volumen durchgeführt, das vier regelmäßig angeordnete Flansche aufweist. Zwei der Flansche sind mit Quarzglasfenstern versehen, so dass das Gefäß der Schlieren-Methode zugänglich ist. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (1000 Bilder/s) werden Weißlicht-Schlieren-Bilder der Zündvorgänge und der nachfolgenden Flammenausbreitung erfasst. Als Elektrodenkonfiguration wurde eine Kugel/Kugel-Anordnung gewählt, so dass ein näherungsweise homogenes elektrisches Feld vorliegt. Die Stahlkugeln haben einen Durchmesser von 2 mm und sind im Abstand von 1,7 mm für Propan/Luft bzw. 1,2 mm für Ethen/Luft angeordnet. Bei dieser Konfiguration erreicht die zur Zündung notwendige Energie besonders niedrige Werte nahe der MZE [12]. Der elektrische Aufbau besteht im Wesentlichen aus einer Hochspannungsquelle, einem variablen Vakuumkondensator, einem Ladewiderstand (1 G Ω) und der Funkenstrecke selbst. Strom und Spannung werden mit einem Shunt-Widerstand (1 Ω) und einem Hochspannungstastkopf (Tektronix P6015 A) gemessen. Beide Signale werden von einem Oszilloskop aufgezeichnet, das bei einem Funken von der steigenden Flanke des Stromsignals getriggert wird. Die Kamera wird über den Triggerausgang des Oszilloskops angesteuert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 skizziert.

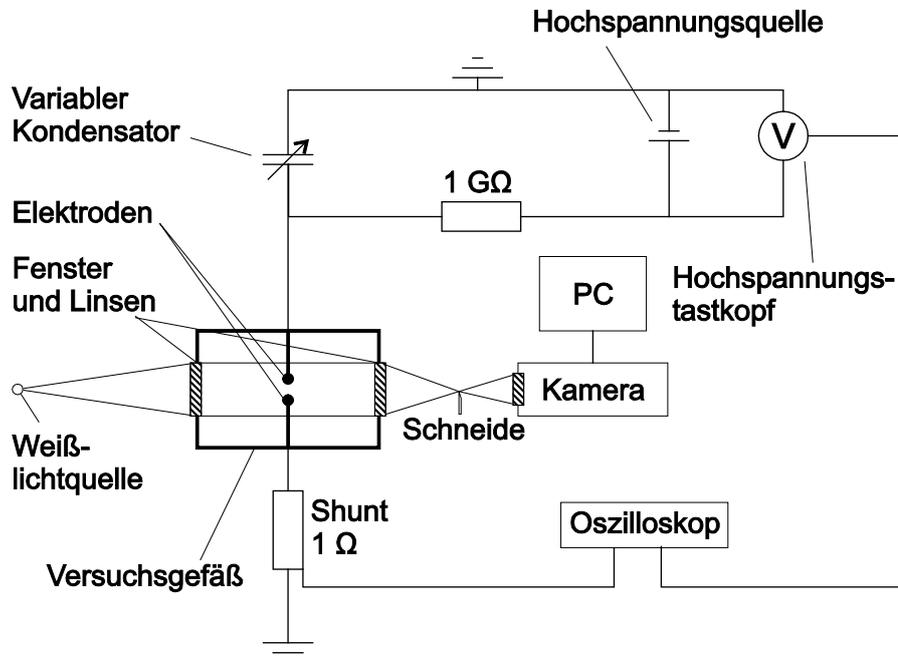


Abbildung 1: Schematische Darstellung des elektrischen und optischen Versuchsaufbaus.

Zwischen den Kugelelektroden werden durch Anlegen von Hochspannung Funken niedriger Energie erzeugt. Die Funkenenergie wird als die im Kondensator zum Zeitpunkt der Entladung gespeicherte Energie

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (3)$$

angenommen. In Gleichung (3) bezeichnet C die Gesamtkapazität des Versuchsaufbaus, also die Summe der Kapazität des variablen Kondensators und der Streukapazitäten, und U ist die anliegende Spannung zum Zeitpunkt der Entladung. Die Durchbruchspannung U_d hängt bei konstanter Gemischzusammensetzung nur von der Spaltweite ab. Da die Spaltweite für Propan und Ethen jeweils konstant gehalten wird, kann die Funkenenergie allein über den variablen Kondensator eingestellt werden. Mit dem Schlieren-Aufbau werden Zündungen bzw. Nichtzündungen eindeutig erkannt.

Die Gemischaufbereitung funktioniert über ein System aus einem Brenngas- und einem Luftmassenstromregler. Das Versuchsgefäß wird mit mindestens dem Fünffachen seines Volumens gespült und das Gemisch wird hinsichtlich seiner Sauerstoffkonzentration analysiert, wodurch der Brenngasanteil bestimmt werden kann. Bei Experimenten zur Bestimmung der Zündwahrscheinlichkeit wird aus dem oben angeführten Grund nach jedem Versuch das Gemisch ausgetauscht, bei Experimenten zur Bestimmung der Zündgrenzkurve erfolgt ein Austausch nach jeder Zündung und spätestens nach fünf Nichtzündungen. Alle Experimente werden unter atmosphärischen Bedingungen bei Raumtemperatur (21 °C) durchgeführt.

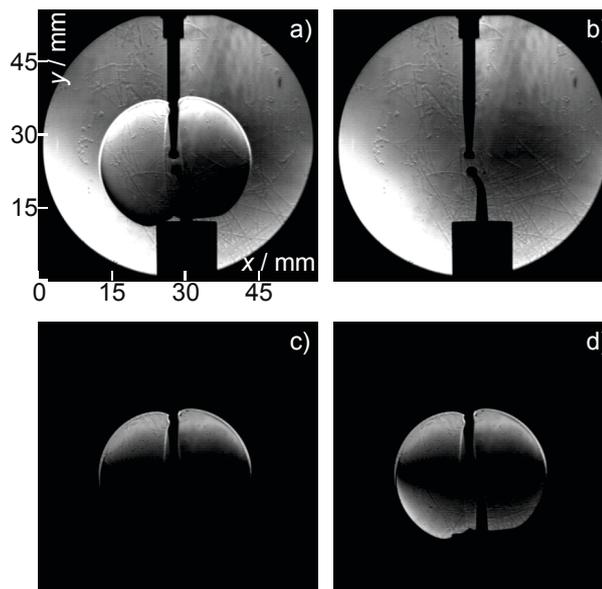


Abbildung 2: Hintergrundreduktion der Schlieren-Bilder. a) Originalbild, b) Hintergrundbild, c) hintergrundreduziertes Bild, d) finales für die Analyse verwendetes Bild. Der untere Teil der kugelförmigen Flamme wird nach Subtraktion des inversen Hintergrundes vom inversen Bild erhalten.

Die Schlieren-Aufnahmen werden wie folgt analysiert: Zunächst wird eine Hintergrundreduktion durchgeführt (Abbildung 2), dann wird das Intensitätsprofil des Bildes über verschiedenen Geraden analysiert, um die Flammenfront zu bestimmen. Es werden dabei Geraden betrachtet, die vom Mittelpunkt der Flamme ausgehen, wobei der Mittelpunkt manuell bestimmt wird, und die nach außen in einem Winkel von -10° bis 10° zur Horizontalen verlaufen. Es wird nur dieser kleine Bereich betrachtet, um den Einfluss der Elektroden auf die gemessene Flammenausbreitung gering zu halten. Die Flammenfront wird beim halben Maximum der Intensität definiert (Abbildung 3). Für jede Zündung stehen etwa 10 Bilder zur Verfügung, was einem Zeitintervall von 10 ms entspricht. Die Flammenfrontgeschwindigkeit ergibt sich aus der zeitlichen Ableitung der Flammenfrontposition.

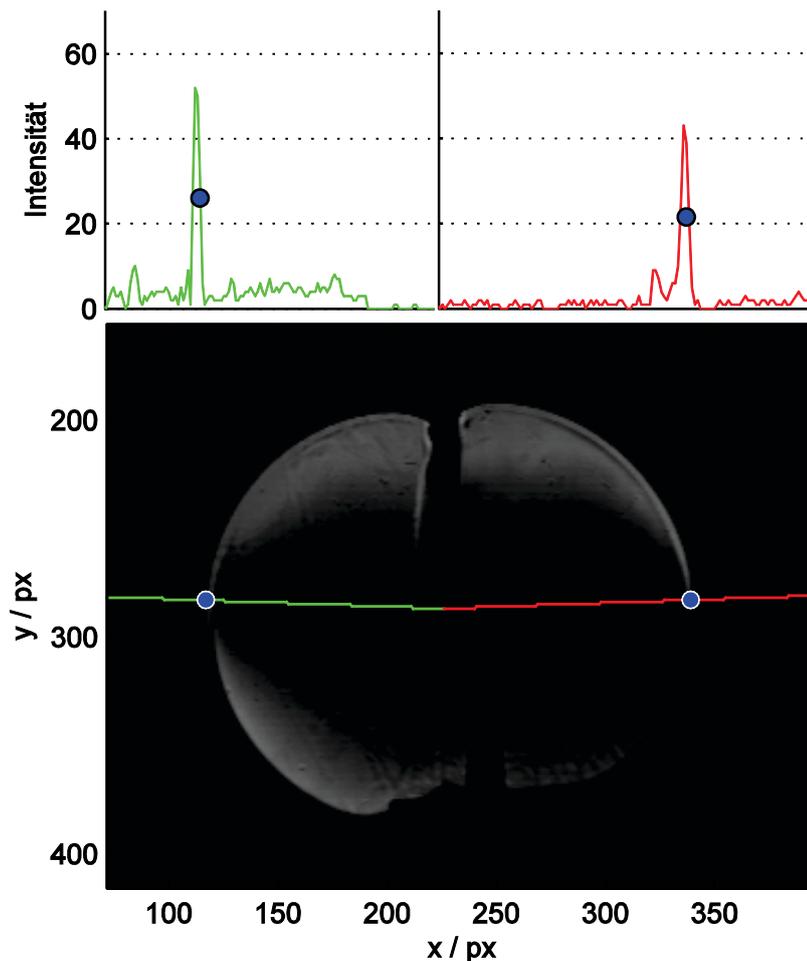


Abbildung 3: Bestimmung der Flammenfront durch Analyse von Intensitätsprofilen. Die Position wird beim halben Maximum der Intensität definiert.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Zündgrenzkurve

Die Zündgrenzkurve für Propan/Luft ist in Abbildung 4 dargestellt. Jeder Datenpunkt repräsentiert eine Zündung bzw. Nichtzündung und nicht eine Zündung bei 10 bzw. 100 Versuchen wie bei anderen Autoren [1, 2, 4]. Deshalb wird erwartet, dass die Zündgrenzkurve leicht in Richtung größerer Energien verschoben ist. Der Vergleich mit den Daten anderer Autoren zeigt hinsichtlich der Zündgrenzkurve gute Übereinstimmung [1, 3, 17]; die Werte der Mindestzündenergie von 0,24 mJ [2], 0,26 mJ [1] und 0,33 mJ [4] konnten aufgrund der unterschiedlichen Versuchsdurchführung nicht reproduziert werden. Die kleinste Funkenenergie, die zu einer Zündung führte, war 0,45 mJ bei einer Konzentration von 5,2 Vol.-% Propan. Dieser Wert stimmt gut mit dem Wert 0,48 mJ von Eckhoff u. a. überein [3].

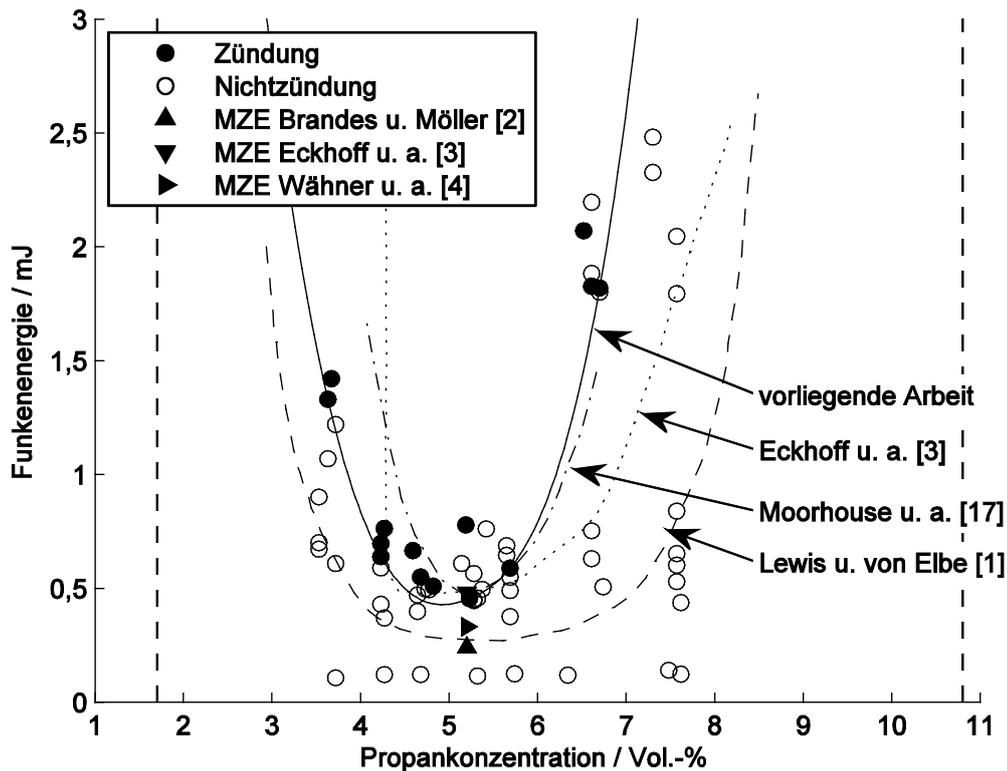


Abbildung 4: Zündgrenzkurve von Propan/Luft für eine 2 mm-Kugel/Kugel-Elektrodenkonfiguration und eine Spaltweite von 1,7 mm

Bei Ethen ist die Menge an Vergleichsdaten stärker beschränkt als im Fall von Propan. Die niedrigste gemessene Zündenergie war 0,144 mJ bei einer Ethenkonzentration von 8,0 Vol.-%. Dieser Wert ist wesentlich größer als Literaturwerte (0,082 mJ [2], 0,081 mJ [4]). Um festzustellen, ob diese Diskrepanz auf den Versuchsaufbau zurückzuführen ist, wurden mit dem jeweils zündwilligsten Gemisch Versuche zur Bestimmung der Zündwahrscheinlichkeit durchgeführt.

4.2 Zündwahrscheinlichkeit

Die Verteilung der Zündwahrscheinlichkeit eines Ethen/Luft-Gemisches mit 8,0 Vol.-% Ethen ist in Abbildung 5 aufgetragen. Grundlage der Berechnung sind 50 Datenpunkte, die die oben dargestellten Anforderungen erfüllen. Das zweiseitige Konfidenzintervall zum Konfidenzniveau 95 % ist mit gestrichelten Linien eingetragen und der Energiebereich, in dem es zu Überlappungen zwischen Zündungen und Nichtzündungen kommt, ist grau unterlegt (0,147 bis 0,203 mJ). Die Regressionskoeffizienten wurden zu $\beta_0 = -8,85$ und $\beta_1 = 51,1 \text{ mJ}^{-1}$ bestimmt. Da nun die Wahrscheinlichkeitsverteilung bekannt ist, kann zu jeder beliebigen Funkenenergie die entsprechende Zündwahrscheinlichkeit berechnet werden. Die Zündwahrscheinlichkeit für die niedrigste in dieser Arbeit gemessene Energie, die zu einer Zündung führte ($E = 0,144 \text{ mJ}$), beträgt 18,4 %. Für den bekannten Wert der MZE [2] beträgt die Zündwahrscheinlichkeit 0,94 %. Diese Wahrscheinlichkeit stimmt gut mit den Daten von Wähner u. a. [4] überein, aus denen man die Zündwahrscheinlichkeit 0,71 % für die MZE berechnen kann.

Im Licht dieser Ergebnisse scheint es sinnvoll, den Zündprozess nicht durch einen Schwellwert zu charakterisieren, sondern als einen einer statistischen Verteilung unterliegenden Prozess zu verstehen.

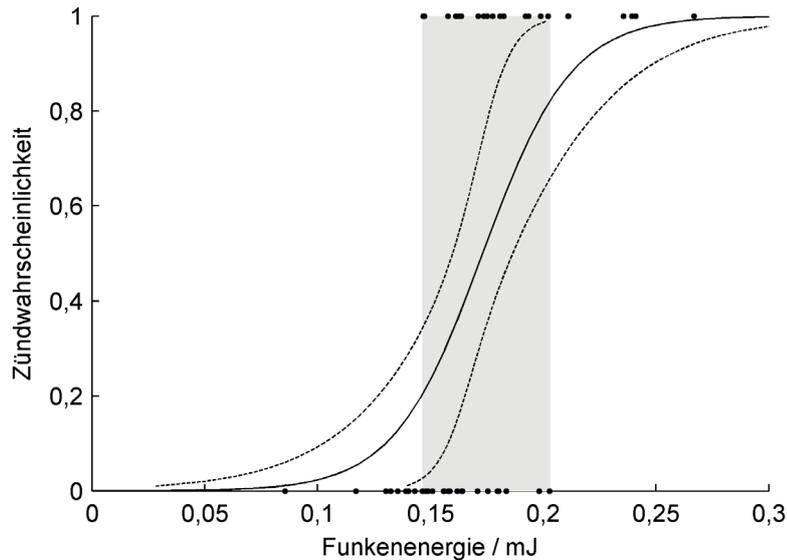


Abbildung 5: Logistische Verteilung der Zündwahrscheinlichkeit und Konfidenzintervall (95 %) eines Ethen/Luft-Gemisches mit 8,0 Vol.-% Ethen. Der Überlappungsbereich zwischen Zündung und Nichtzündung ist grau hervorgehoben.

4.3 Flammenausbreitung

Neben der verlässlichen Beurteilung des Ausgangs von Experimenten (Zündung oder Nichtzündung) wurde der Schlieren-Aufbau genutzt, um die Flammenausbreitung nach der Zündung zu visualisieren und quantitativ auszuwerten. Abbildung 6 zeigt die Flammenausbreitung eines Propan/Luft-Gemisches mit 4,55 Vol.-% Propan nach Zündung durch einen Funken mit $E = 0,42 \text{ mJ} = 1,8 \cdot \text{MZE}$.

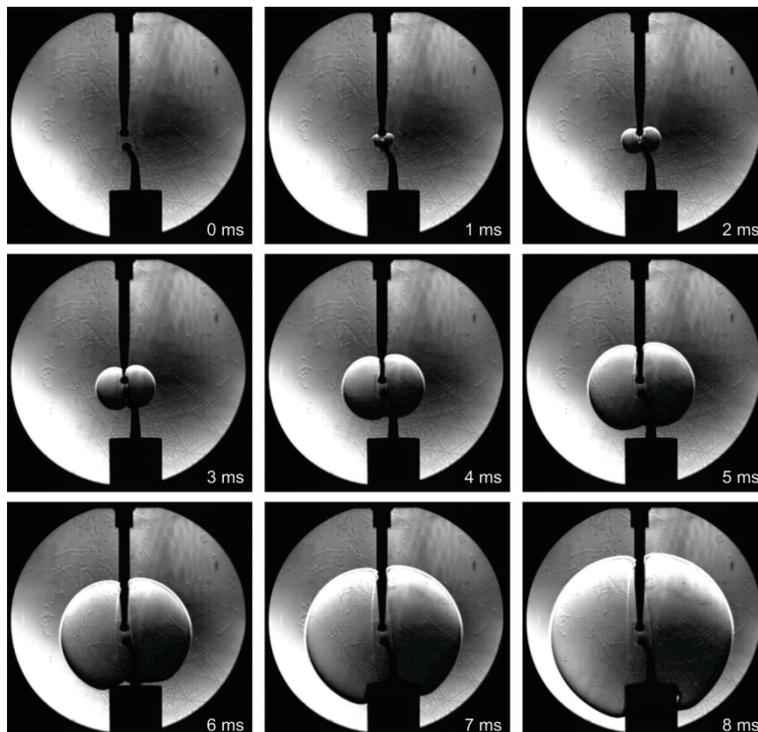


Abbildung 6: Ausbreitung einer Flamme des Gemisches 4,55 Vol.-% Propan in Luft nach Zündung durch einen Funken mit $E = 0,42 \text{ mJ} = 1,8 \cdot \text{MZE}$

Die Schlieren-Serien werden hinsichtlich des Flammenradius als Funktion der Zeit analysiert. Für vier unterschiedliche Propan/Luft-Gemische sind entsprechende Kurven in Abbildung 7 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Steigung der Kurven nach einigen ms konstant wird. In diesem Bereich der Kurven wird daher die Flammenfrontgeschwindigkeit durch lineare Regression bestimmt, wie in Abbildung 7 angedeutet. Sie ist stark von der Gemischzusammensetzung abhängig, wie Abbildung 8 zeigt. Das Maximum der Flammenfrontgeschwindigkeit liegt für Propan bei einem fetteren als dem stöchiometrischen Gemisch ($c_{\text{stöch}} = 4,03 \text{ Vol.-%}$ [18]). Die Messdaten stimmen gut mit den Werten von Taylor überein [19]. Ein Einfluss der verwendeten Zündenergie auf die ermittelte Flammenfrontgeschwindigkeit wurde für Ethen/Luft-Gemische nicht beobachtet.

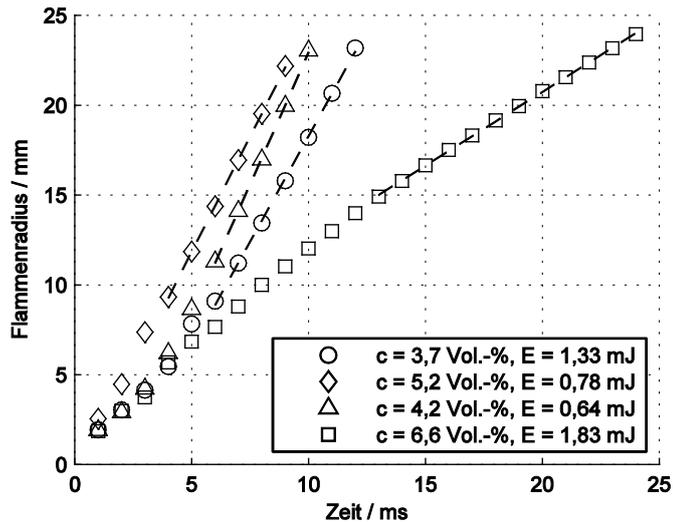


Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung des Flammenradius einiger Propan/Luft-Flammen. Gestrichelte Linien deuten die Steigung der Kurven im jeweils ausgewerteten Bereich an.

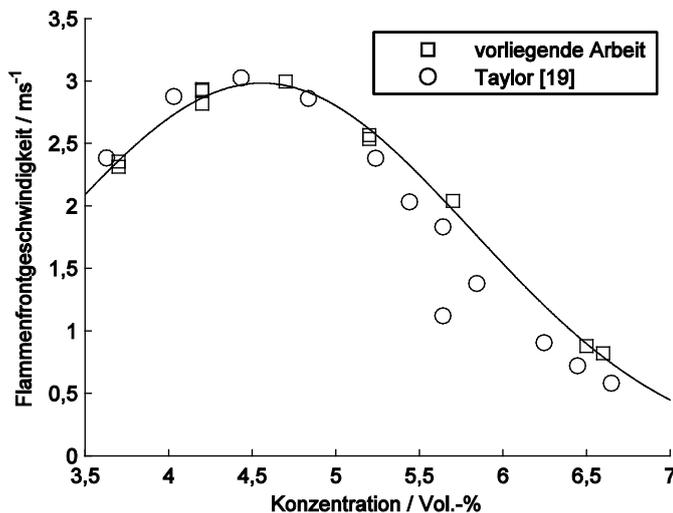


Abbildung 8: Flammenfrontgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Konzentration für Propan/Luft-Gemische

5 Zusammenfassung

Ein Versuchsaufbau zur Erzeugung kapazitiver Funken im Bereich der MZE wurde durch die Messung von Zündgrenzkurven, durch die Bestimmung von Zündwahrscheinlichkeiten und

durch die Bestimmung von Flammenfrontgeschwindigkeiten von Propan/Luft- und Ethen/Luft-Gemischen charakterisiert. Die Zündgrenzkurven zeigen, dass mit dem Versuchsaufbau zur Literatur vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. Durch logistische Regression wurde die Zündwahrscheinlichkeit eines Ethen/Luft-Gemisches berechnet. Mit diesem Ansatz kann die stochastische Natur der Funkenzündung hinreichend gut beschrieben werden. Für die tabellierte MZE von Ethen wurde eine Zündwahrscheinlichkeit von knapp 1 % berechnet. Mithilfe von Hochgeschwindigkeits-Schlieren-Aufnahmen wurden Flammenradien in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt, woraus die Flammenfrontgeschwindigkeit abgeleitet werden konnte. Diese Geschwindigkeit ist stark von der Gemischzusammensetzung, nicht jedoch von der Funkenenergie abhängig.

Mit den in dieser Arbeit gewonnenen experimentellen Ergebnissen sollen numerische Simulationen evaluiert werden, die das frühe Stadium der Flammenausbreitung beschreiben. Die Simulation berücksichtigt chemische Kinetik, Transportphänomene neutraler Spezies, von Ionen und Elektronen sowie die elektrodynamische Beschreibung der Interaktion zwischen dem Funken und dem Brenngas/Luft-Gemisch.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung der Arbeiten in der Forschergruppe FOR 1447 „Safety Relevant Ignition Processes“.

Literaturverzeichnis

- [1] Lewis, B.; Elbe, G. von: *Combustion, Flames and Explosion of Gases*, 3. Auflage. Orlando 1987.
- [2] Brandes, E.; Möller, W.: *Flammable liquids and gases. Brennbare Flüssigkeiten und Gase*, 2. Auflage. Bremerhaven 2008.
- [3] Eckhoff, R. K.; Ngo, M.; Olsen, W.: On the minimum ignition energy (MIE) for propane/air. In: *Journal of Hazardous Materials* 175 (2010), S. 293–97.
- [4] Wähner, A.; Gramse, G.; Langer, T.; Beyer, M.: Determination of the Minimum Ignition Energy on the Basis of a Statistical Approach: 9th International Symposium on Hazard, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions 2010.
- [5] Lee, J. J.; Shepherd, J. E.: *Spark Ignition Measurements in Jet A: part II, Explosion Dynamics Laboratory Report FM 99-7*. Pasadena 2000.
- [6] Moffett, S. P.; Bhandari, S. G.; Shepherd, J. E.; Kwon, E.: Investigation of Statistical Nature of Spark Ignition: Fall Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute 2007.
- [7] Bane, S. P. M.; Ziegler, J. L.; Boettcher, P. A.; Coronel, S. A.; Shepherd, J. E.: Experimental investigation of spark ignition energy in kerosene, hexane, and hydrogen. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 26 (2011), S. 290–94.
- [8] Kückler, A.: *Hochspannungstechnik. Grundlagen, Technologie, Anwendungen*, 3. Auflage. Berlin 2009.
- [9] Randeberg, E.; Olsen, W.; Eckhoff, R. K.: A new method for generation of synchronised capacitive sparks of low energy. In: *Journal of Electrostatics* 64 (2006), S. 263–72.
- [10] Eckhoff, R. K.; Olsen, W.: A new method for generation of synchronized capacitive sparks of low energy. Reconsideration of previously published findings. In: *Journal of Electrostatics* 68 (2010) 1, S. 73–78.
- [11] Pidoll, U. von; Brzostek, E.; Froechtenigt, H.-R.: Determining the incendivity of electrostatic discharges without explosive gas mixtures. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 40 (2004), S. 1467–75.

- [12] Langer, T.; Gramse, G.; Möckel, D.; Pidoll, U. von; Beyer, M.: MIE experiments and simultaneous measurement of the transferred charge – A verification of the ignition threshold limits. In: *Journal of Electrostatics* 70 (2012), S. 97–104.
- [13] Bane, S. P. M.; Shepherd, J. E.; Kwon, E.; Day, A. C.: *Statistical Analysis of Electrostatic Spark Ignition of Lean H₂-O₂-Ar mixtures: International Conference on Hydrogen Safety 2009.*
- [14] Bane, S. P. M.: *Spark Ignition: Experimental and Numerical Investigation With Application to Aviation Safety, PhD thesis. Pasadena 2010.*
- [15] Langlie, H. J.: *A reliability test method for "One-Shot" items: Proceedings of the Eighth Conference on the Design of Experiments in Army Research Development and Testing 1963.*
- [16] Bane, S. P. M.; Coronel, S. A.; Boettcher, P. A.; Shepherd, J. E.: *Statistical Analysis of Spark Ignition of Kerosene-Air Mixtures: Fall Technical Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute 2011.*
- [17] Moorhouse, J.; Williams, A.; Maddison, T. E.: *An investigation of the minimum ignition energies of some C₁ to C₇ hydrocarbons. In: Combustion and Flame 23 (1974) 2, S. 203–13.*
- [18] Warnatz, J.; Maas, U.; Dibble, R. W.: *Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation, 4. Auflage. Berlin 2006.*
- [19] Taylor, S. C.: *Burning velocity and the influence of flame stretch, PhD thesis. Leeds 1991.*

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.