

Untersuchungen von Kontaktöffnungs-Entladungen in einem zündfähigen H₂-Luft-Gemisch im Bereich niedriger Spannungen

Carsten Uber¹, Michael Hilbert¹

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.6 Explosionsgeschützte Sensorik und Messtechnik, Braunschweig

Elektrische Entladungen, die bei öffnenden elektrischen Kontakten wie beispielsweise beim Ziehen einer Steckverbindung auftreten können, sind eine Zündquelle in explosiven Atmosphären. In der Zulassungspraxis werden solche Entladungen im sogenannten IEC-Funkenprüfgerät zur Prüfung nach dem Zündschutzkonzept „i“ Eigensicherheit erzeugt. Die stark streuenden Ergebnisse dieses Gerätes und die noch nicht vollständig verstandene Physik der Kontaktvorgänge erfordern eine verbesserte Prüfmethode. Diese soll die für die Zündung relevante elektrische Entladung an der Zündgrenze nachbilden, um diese reproduzierbarer bestimmen zu können.

Für die Analyse der physikalischen Vorgänge, die zur Zündung führen, ist eine spezielle Kontaktvorrichtung entwickelt worden. Damit können die Entladungen > 200 µm Länge und mit einer Dauer von > 500 µs an einer bestimmbarer Position erzeugt und untersucht werden.

Für die Entladungen an der Zündgrenze bei niedrigen Spannungs- und Stromwerten (max. 30 V, 30 bis 100 mA Konstantstrombegrenzung) sind die Bedingung für die Erzeugung ermittelt worden. Das sind die Rauheit auf der Kontaktoberfläche, die langsame Kontaktöffnungsbewegung und eine geeignet regelnde Spannungsquelle mit Konstantstrombegrenzung. Damit sind für diese Entladungen an der Zündgrenze die Strom-Spannungs-Kennlinie, das Spektrum mit dominierenden Linien von Cadmium-Metalldampf sowie die Temperaturverläufe ermittelt worden.

1 Einleitung

Die Bewertung von elektrischen Entladungen für die Zündfähigkeit von explosionsfähigen Atmosphären hat eine wesentliche Bedeutung im Explosionsschutz. Im Bereich der Prozess- und Automationstechnologie können solche Entladungen bei niedrigen Spannungen beispielsweise in Störfällen wie einen Drahtbruch oder beim Ziehen eines Steckers von Baugruppen auftreten [01].

Zum Explosionsschutz wird in diesem Anwendungsgebiet bevorzugt das Zündschutzkonzept Eigensicherheit „i“ gemäß IEC 60079-11 [02] angewendet. Die hier aufgeführten Spezifikationen basieren auf dem IEC-Funkenprüfgerät, in dem eine Vielzahl von Kontaktöffnungen und -schließungen stattfinden und womit ermittelt werden kann, ob ein Prüfstromkreis „eigensicher“ ist oder ein Gasgemisch zündet. Jedoch streuen die Ergebnisse mit dem IEC-Funkenprüfgerät und sind schlecht reproduzierbar [03]. Für die Entwicklung einer Alternative mit reproduzierbareren Ergebnissen und geringerer Streuung werden die physikalischen Zusammenhänge untersucht [04]. Entladungen bei Kontaktschließungen hat Johannsmeyer [05] untersucht. Mit Untersuchungen solcher Entladungen über einen mehr statistischen Ansatz befassten sich Zborovszky und Cotugno [06]. Für die Anwendung von Methan gibt es Arbeiten von Faerstein [07] und Vogt [08]. Die Arbeit von Shekhar [09] befasst sich mit der Simulation solcher Vorgänge.

Von den vielfältigen Entladungen im IEC-Funkenprüfgerät konzentrieren sich diese ersten Untersuchungen [04] auf Entladungen von Kontaktöffnungen mit Konstantstrombegrenzung (einstellbar von 0 bis 100 mA, Spannungsquelle max. 30 V, rechteckförmige Kennlinie). Der Ansatz dabei ist die gezielte Analyse der relevanten Entladungen an der Zündgrenze des

Wasserstoff-Luft-Gemisches. Entladungen an der Zündgrenze, d. h. mit niedrigsten Strom- und Spannungswerten, sind in dieser Arbeit mit einer Zündwahrscheinlichkeit von $< 10^{-3}$ in Anlehnung an die Norm IEC 60079-11 [02] definiert. Dafür wurde hier eine experimentelle Kontaktvorrichtung entwickelt und gefertigt, um damit gezielt die relevanten Entladungen an der Zündgrenze zu erzeugen und untersuchen zu können [04]. Die speziellen Bedingungen für die Erzeugung dieser Entladungen (Worst-Case-Bedingungen) sind im Abschnitt 3 beschrieben. Die Charakteristiken dieser Metaldampfentladungen mit der quasistatischen Strom-Spannungs-Kennlinie, das Spektrum der Strahlung, eine Abschätzung der Temperatur sowie das zugehörige Zündkriterium sind in Abschnitt 4 dargestellt. Weitere Erläuterungen und weiterführende Untersuchungen sind bei Über [04] zu finden.

Die Ergebnisse sollen dann eine Nachbildung in einer Simulation ermöglichen und eine erste Grundlage für eine Alternative zum IEC-Funkenprüfgerät bilden.

2 Experimenteller Aufbau

Da die Entladungen im IEC-Funkenprüfgerät nach IEC 60079-11 [02] an verschiedenen Positionen auftreten, wurden für die Untersuchungen mehrere experimentelle Kontaktvorrichtungen entwickelt und gefertigt. Damit können die Entladungstypen der verschiedenen Positionen im IEC-Funkenprüfgerät für die Untersuchungen im optischen Fokusbereich der Versuchseinrichtung nachgebildet werden. Mit diesen Kontaktvorrichtungen werden die relevanten Kontaktöffnungsbewegungen für den untersuchten Stromkreis nachgebildet, wie diese im Funkenprüfgerät auftreten. Für die Untersuchungen sind diese Kontaktvorrichtungen in einer Explosionskammer platziert, die mit Wasserstoff-Luft-Gemisch ($\varphi(\text{H}_2) = 21\%$) gefüllt wird. Der Versuchsaufbau mit der Messtechnik ist in der folgenden Abbildung 1 dargestellt.

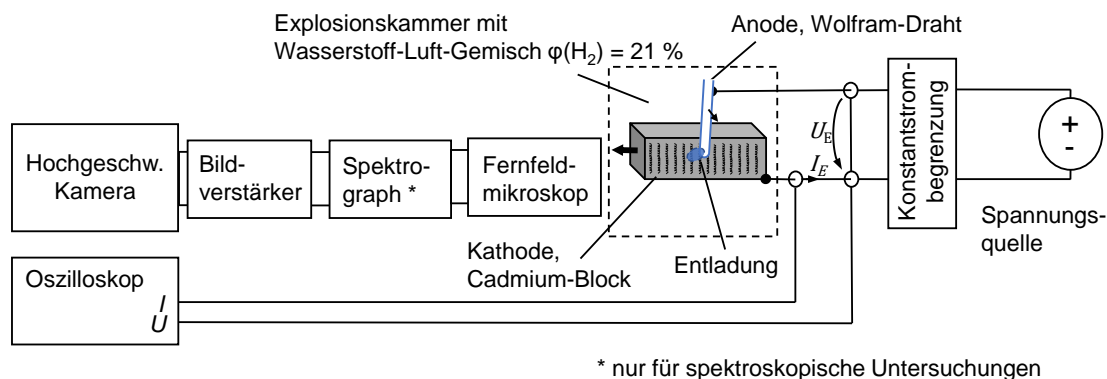


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit der Kontaktvorrichtung, vgl. [04]

Die Kontaktvorrichtung wird über eine Spannungsquelle und eine Konstantstrombegrenzung (rechteckförmige Kennlinie) mit definierten Strömen versorgt. Die Strom- und Spannungswerte werden über das Oszilloskop Yokogawa DL9040L gemessen. Die Länge der Entladung wird über die Aufzeichnungen mit der Hochgeschwindigkeitskamera Photron Fastcam SA5, einem Bildverstärker Hamamatsu C10880 sowie einem Fernfeldmikroskop Questar QM1 ermittelt. Für die spektroskopischen Untersuchungen wird zusätzlich der Spektrograph Acton Research Cooperation Typ 300 i mit einem Gitter mit $150 \text{ Linien mm}^{-1}$ genutzt.

3 Bedingungen für die Worst-Case-Entladung

Eine Worst-Case-Entladung wird hier definiert als eine Entladung, die bei minimalen Strom- und Spannungswerten noch eine Zündung des Gasgemisches an der Zündgrenze ermöglicht. Für die Untersuchungen wird in der experimentellen Kontaktvorrichtung eine Kontaktöffnungsbewegung nachgebildet, die vergleichbar mit der Bewegung im IEC-Funkenprüfgerät ist. Bei dem Vorgang treten folgende relevanten Phasen auf (siehe Abbildung 2):

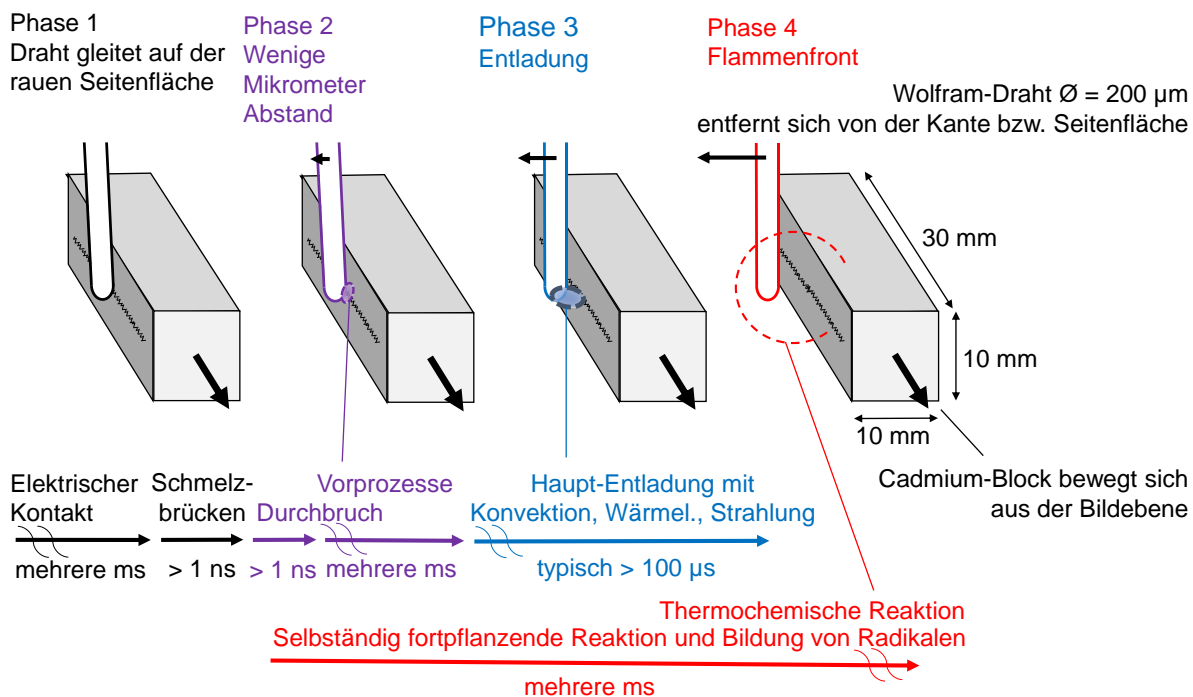


Abbildung 2: Ablauf der Kontaktöffnung mit einer Worst-Case-Entladung, vgl. [04]

In der Phase 1 gleitet der Draht über die raue Oberfläche. Wenn sich anschließend der Draht in Phase 2 in einem Abstand von wenigen Mikrometern über die Oberfläche bewegt, finden Vorprozesse mit vielen kleinen und kurzen Entladungen statt. Die relevante Hauptentladung erfolgt, wenn sich der Abstand zwischen dem Draht und dem Cadmium-Block weiter vergrößert. Dadurch findet eine thermochemische Reaktion im Gasgemisch statt, die zu einer selbständig fortschreitenden Zündung führen kann. Um die Entladungen mit Zündungen bei der Kontaktöffnung in der experimentellen Kontaktvorrichtung zu erzeugen sind zusätzlich folgende Bedingungen erforderlich.

Es ist eine bestimmte **Beschaffenheit der Cadmium-Oberfläche (Rauheit, Oxide etc.)** erforderlich, die durch eine Vorkonditionierung mit Kontaktvorgängen erzeugt wird. Mit einer längeren Vorkonditionierung mit mehr Kontaktvorgängen ändern sich die Rahmenbedingungen für die Entladung, so dass die Dauer der Haupt-Entladung ansteigt. Ab einer Vorkonditionierung von 10000 Kontaktvorgängen entstehen Worst-Case-Entladungen, die vergleichbar mit den Entladungen im IEC-Funkenprüfgerät sind. Daher erfolgte vor jeder Messreihe immer eine Vorkonditionierung von 10000 Kontaktvorgängen. Auf der Cadmium-Oberfläche zeigte sich dann eine ca. $50 \mu\text{m}$ tiefe Rille mit Partikelablagerungen. Auf dem Wolfram-Draht bildete sich eine Cadmium-Schicht mit bis zu $100 \mu\text{m}$ langen Whiskern, die ebenfalls aus Cadmium bestehen.

Zusätzlich ist für Worst-Case-Entladungen eine Kontakt-Öffnungsbewegung erforderlich, bei der Vorprozesse stattfinden wobei anschließend eine **langsame Kontaktöffnungsbewegung** (ca. $0,13 - 0,2 \text{ m s}^{-1}$) erfolgt, die vergleichbar mit den Vorgängen im IEC-Funkenprüfgerät sind.

Bei diesen Vorgängen muss die **Konstantstrombegrenzung geeignet** sein, den Strom entsprechend der sich ändernden Spannung konstant zu halten. Dabei treten im Spannungsverlauf am Anfang ein markanter Peak [10] und beim Übergang von den Vorprozessen zu den Hauptprozessen schnelle aperiodische Spannungsschwankungen [11] auf, die für stabile Entladungen charakteristisch sind. Diese sind bei einer hohen Bandbreite zu erkennen und von Hochspannungsentladungen bekannt [10, 11].

4 Eigenschaften der Entladung

Die in dieser Arbeit untersuchten Entladungen sind sehr klein, lichtschwach und zeitlich kurz und werden als Kompromiss zwischen zeitlicher Auflösung und Lichtstärke mit einer Bildrate von 33000 fps aufgenommen. Die folgende typische Bildfolge in Abbildung 3 zeigt eine Entladung mit 60 mA zu relevanten Zeitpunkten.

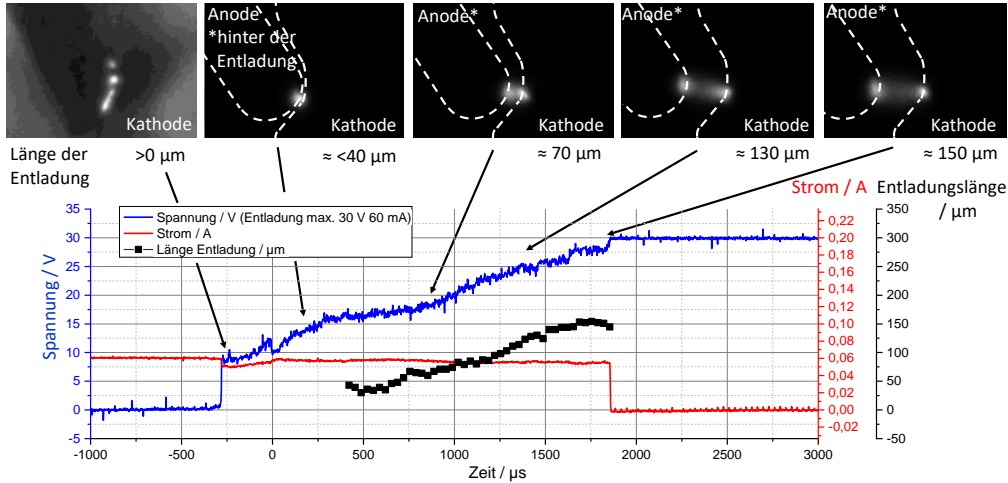


Abbildung 3: Bildfolge und Strom-(rot), Spannungsverlauf (blau) und Entladungslänge (schwarz) einer typischen Entladung, vgl. [04]

Zu Beginn der Entladung sind viele kurzlebige Vorentladungen nebeneinander zu erkennen (Aufnahme oben links, mit zus. Beleuchtung in einer anderen Messung aufgenommen). Die weiteren Aufnahmen zeigen die mit der Zeit länger werdende Entladung. Der Verlauf der Entladungslänge (schwarz) ist in Abbildung 3 unten dargestellt. Der zugehörige Verlauf der Spannung (blau) weist eine gute Korrelation mit der Entladungslänge auf. Im Stromverlauf (rot) ist zu erkennen, wie stabil die die Konstantstrombegrenzung den Strom regeln kann.

Die Korrelation der Spannung mit der Entladungslänge ist beispielhaft über 600 Messpunkte von 15 Entladungen mit 60 mA in Abbildung 4 dargestellt.

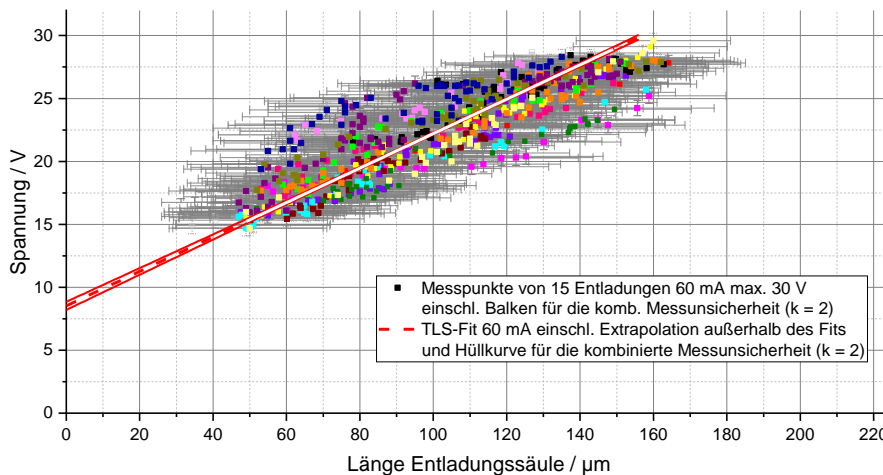


Abbildung 4: Messwerte von Entladungen mit 60 mA einschl. Fit, vgl. [04]

Aus den Ergebnissen der Entladungen von verschiedenen Strömen ergibt sich folgende Strom-Spannungs-Kennlinie (siehe Abbildung 5)

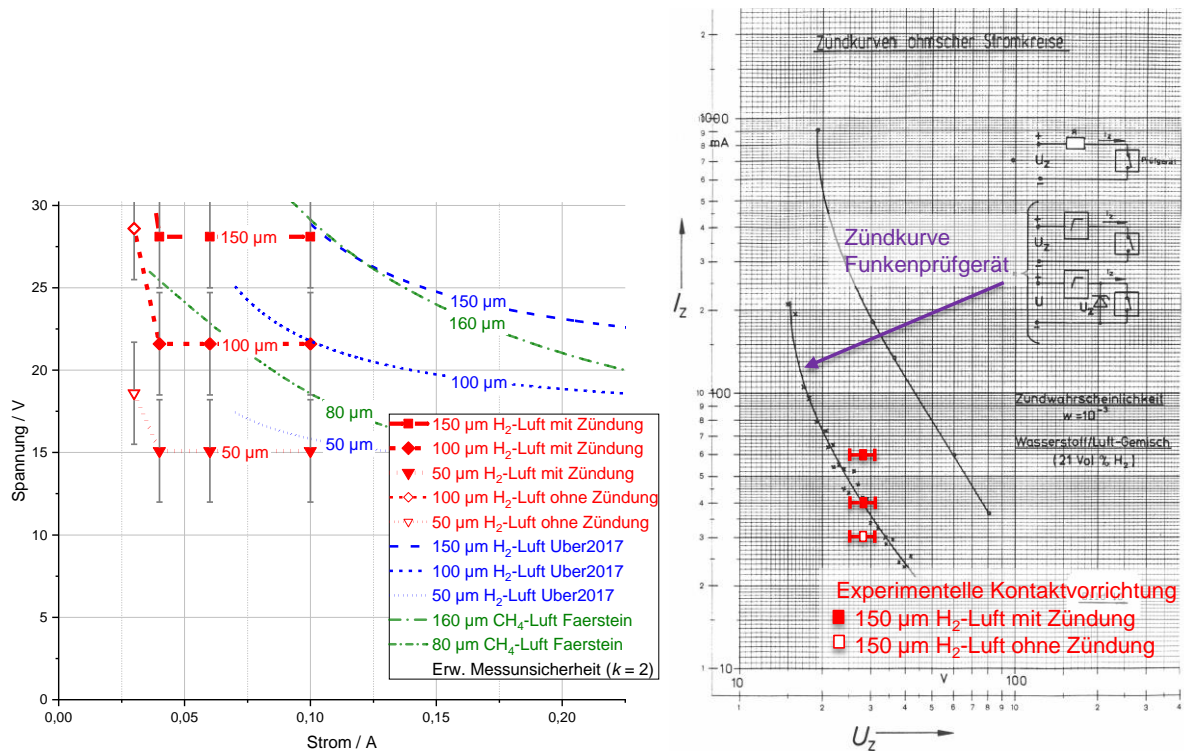


Abbildung 5 links: Ermittelte Strom-Spannung-Kennlinie mit Vergleichsdaten Über [12], Faerstein [07], vgl. [04]; rechts: Zündkurvendiagramm mit übertragenen Werten, vgl. [13]

In Abbildung 5 links sind die Lichtbogen-Kennlinien der Entladungen von Kontaktöffnungsvorgängen in Wasserstoff-Luft-Gemisch mit Konstantstrombegrenzung für 30 mA, 40 mA, 60 mA und 100 mA (rot) dargestellt. Für Entladungen mit 30 mA konnten keine Zündungen (rot, offene Symbole) ermittelt werden. Für den Vergleich sind die Werte für eine schnelle Kontaktöffnung (blau) von Über [12] sowie von Faerstein [07] für Entladungen in Methan (grün) eingefügt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung.

In den Untersuchungen mit den Bedingungen für die Worst-Case-Entladung und einer Spannungsquelle mit Konstantstrombegrenzung (Rechteckförmige Kennlinie) zündete das Wasserstoff-Luft-Gemisch ab einer sogenannten maximalen Netto-Leistungsaufnahme der Entladung von 520 mW und die Entladung hatte dabei eine Länge von min. 140 µm [4]. Auf Basis dieser Längen sind die elektrischen Parameter von Entladungen mit Zündungen dem Zündkurvendiagramm von Johannsmeyer [13] in Abbildung 5 rechts zugeordnet. Die Zündkurven basieren auf der Ermittlung von Viertel-Umdrehungen des Drahtalters bzw. der Dauer bis zu einer Zündung im IEC-Funkenprüfgerät. Dabei treten viele Kontaktvorgänge mit unterschiedlichen Bedingungen und Entladungen auf, die wesentlich von der sich verändernden Oberfläche bestimmt werden. Die Zündkurven basieren auf dem statistischen Mittelwert der Viertel-Umdrehungen des Drahtalters bis zur Zündung. Die ergänzend eingetragenen Werte der experimentellen Kontaktvorrichtung basieren auf der Physik der relevanten Entladung dieser Untersuchungen. Die angegebenen Werte zeigen, in welchem Bereich die Ergebnisse der Untersuchungen zuzuordnen sind.

Die mit Hilfe von optischer Emissionsspektroskopie ermittelte Strahlung dieser Entladungen (siehe Abbildung 6) zeigt eine Dominanz der spektralen Linien von Cadmium-Metaldampf. Linien von Wasserstoff oder Wolfram waren im untersuchten Bereich von 320 nm bis 670 nm nicht sichtbar.

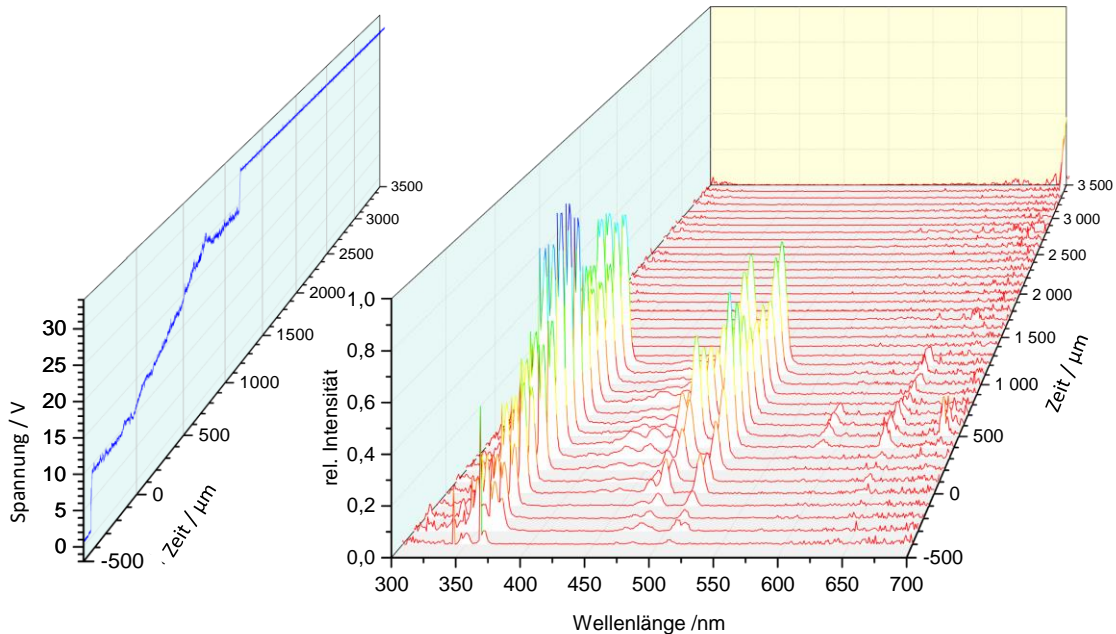


Abbildung 6: Beispiel für einen zeitlichen Verlauf des Spektrums und der Spannung einer Entladung mit Zündung (60 mA, Konstantstrombegrenzung), vgl. [04]

Im spektralen Verlauf in Abbildung 6 ist die Proportionalität zwischen der Intensität und der Spannung zu erkennen, die aufgrund des Konstantstromes der Leistung entspricht.

Die Temperatur ist für das Verständnis dieses Entladungstyps und des Zündvorganges eine relevante Größe. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Anregungstemperatur (Elektronenbewegung, Rotation, Schwingung und Translation) sowie eine leitfähigkeitsbezogene Temperatur dieser Entladungen abgeschätzt.

Die Anregungstemperatur entspricht hier der Elektronentemperatur und kann aus dem vorgenannten Spektrum über einen Boltzmann-Plot ermittelt werden. Dafür werden die relativen Intensitäten, d. h. die Strahldichte, von Linien unterschiedlicher Anregungsenergien genutzt. Mit Hilfe bekannter Plasmamparameter von Cadmium kann diese Anregungstemperatur ermittelt werden [14]. Die Methode basiert auf einem Plasma im Gleichgewichtszustand. Der zeitliche Verlauf für ausgewählte Entladungen ist in Abbildung 7 dargestellt.

Ergänzend wird die leitfähigkeitsbezogene Temperatur aus der elektrischen Leitfähigkeit des Cadmium-Metaldampfes ermittelt, die aus den elektrischen Werten sowie der vereinfachten Geometrie der Entladung resultiert. Dabei wird die Geometrie einem Zylinder angenähert. Diese Methode setzt ebenfalls ein Plasma im Gleichgewichtszustand voraus [15]. Zum Vergleich ist diese Temperatur ebenfalls in Abbildung 7 für ausgewählte Entladungen dargestellt.

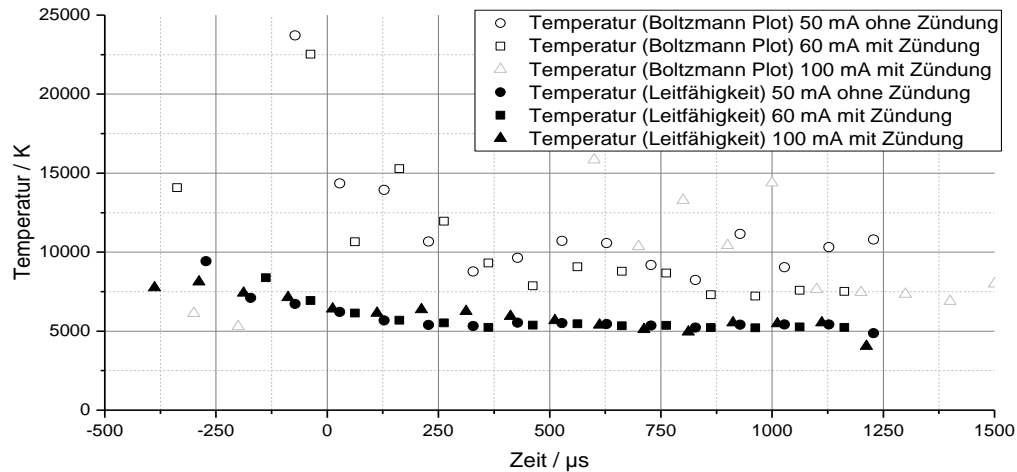


Abbildung 7: Verläufe der abgeschätzten Temperaturen (Leitfähigkeit & Boltzmann-Plot) von ausgewählten Entladungen, vgl. [04]

Bei den dargestellten Entladungen sind im Verlauf überwiegend typische Temperaturen von ca. 5 000 K bis 10 000 K zu erkennen. Zu Beginn der Entladung zeigt der Verlauf der Anregungstemperatur signifikant höhere Werte als die leitfähigkeitsbezogene Temperatur, was auf Nichtgleichgewichtsplasma hinweist. Anzumerken ist die hier relativ große Messunsicherheit aufgrund der kleinen Dimensionen im Mikrometerbereich. Diese Temperaturen sind zu Beginn ähnlich den Temperaturen von Glimmentladungen ($T_{\text{Rotation}} = 600 \text{ K}$, $T_{\text{Anregung}} = 20\,000 \text{ K}$) [16, 17] und am Ende ähnlich den Temperaturen von Bogenentladungen mit $> 5\,000 \text{ K}$ [16, 17]. Ein Nichtgleichgewichtsplasma hier ist besonders relevant, da durch die Bildung freier Radikale der Prozessverlauf in Richtung Zündung beeinflusst werden kann [18].

Im zeitlichen Verlauf ist auch eine ungefähr gleiche Temperatur der verschiedenen Entladungen mit und ohne Zündung zu erkennen. Damit ein ausreichendes Temperaturfeld für eine Zündung entsteht, sind für eine erfolgreiche Zündung jedoch weitere Parameter wie die örtliche Verteilung oder die Entladungsdauer ausschlaggebend.

5 Zusammenfassung

Die dargestellten Untersuchungen sind erste grundlegende Ergebnisse zur Schaffung einer alternativen Prüfmethode zum IEC-Funkenprüfgerät. Der Lösungsansatz basiert auf der physikalischen Nachbildung der elektrischen Entladungen an der Zündgrenze, die vergleichbar mit den Entladungen im IEC-Funkenprüfgerät mit einer Zündwahrscheinlichkeit von $< 10^{-3}$ sind.

Für die Untersuchungen dieser Entladung von Kontaktöffnungsvorgängen in Verbindung mit einer Kontaktstrombegrenzung ist eine spezielle Kontaktvorrichtung entwickelt worden. Zusätzlich sind die Bedingungen sowie die Charakteristiken ermittelt worden.

Zur Erzeugung solcher Entladungen sind als Bedingungen erforderlich:

- Eine langsame Kontaktöffnungs-Bewegung mit erst einem gleitenden Kontaktvorgang und anschließendem Öffnungsvorgang ($< 0,2 \text{ m s}^{-1}$).
- Eine Phase mit Vorprozessen zwischen dem gleitenden Kontaktvorgang und der Hauptentladung.
- Eine Rauheit auf der Oberfläche durch entsprechende Vorbehandlung, wie diese vergleichbar bei der Vorkonditionierung im IEC-Funkenprüfgerät auftritt. Diese ist gekennzeichnet durch Mikropartikel und Whisker auf der Cadmium-Oberfläche sowie einer Cadmium-Schicht auf der Wolfram-Anode.
- Eine Spannungsquelle mit Konstantstrombegrenzung, die den Strom geeignet nachregelt.

Für diese Entladungen im Spannungsbereich kleiner als 30 V und im Strombereich von 30 bis 60 mA ist die quasistatische Strom-Spannungs-Kennlinie ermittelt. Entladungen mit 30 mA zündeten ein Wasserstoff-Luftgemisch ($\varphi(\text{H}_2) = 21 \%$) nicht.

Die Cadmium-Metaldampf-Entladungen haben typische Temperaturen im Bereich von ca. 5000 K bis 10 000 K. Die signifikant höheren Anregungstemperaturen zum Entladungsbeginn weisen auf ein Nichtgleichgewichtsplasma hin.

Offene Fragestellungen sind die Anoden- und Kathodenvorgänge mit dem Ziel einer physikalischen Verallgemeinerung sowie die Ermittlung des dynamischen Verhaltens der Metaldampfentladung und der Vorgänge bei einer Zündung. Ergänzend sind die weiteren Kontakt-Situationen (Kontaktschließ-Vorgänge etc.) und Stromkreistypen zu untersuchen. Die Ergebnisse sollen neben dem Gewinn eines tiefergehenden Verständnisses eine erste Grundlage für die Schaffung der Alternative zum IEC-Funkenprüfgerät ermöglichen.

Danksagung

Die Autoren danken Thomas Uehlken (PTB AG 3.62) für die Unterstützung bei den Versuchsaufbauten und der experimentellen Durchführung. Weiterhin gilt Franko Schmähling (PTB FB 8.4) Dank für die Unterstützung bei der mathematischen Auswertung.

Literaturverzeichnis

- [01] **Steen, H. Hrsg.:** *Handbuch des Explosionsschutzes*. Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
- [02] **International Electrotechnical Commission:** *IEC 60079-11 Explosive atmospheres - Part 11: Equipment protection by intrinsic safety "i"*. IEC, Genf (CH), 2011.
- [03] **Klausmeyer, U. et al.:** *Einführung des internationalen "PTB Ex Proficiency Testing Scheme" für Vergleiche zwischen Ex-Laboratorien*. 13. BAM-PTB-Kolloquium zur chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik, 2013.
- [04] **Uber, C.:** *Zündung Charakterisierung elektrischer Kontakt-Entladungen im Bereich niedriger Spannungen im Zündgrenz-Bereich von Wasserstoff-Luft-Gemisch*, eingereichte Dissertation, TU Ilmenau, 2019.
- [05] **Johannsmeyer, U.:** *Zündung explosionsfähiger Gemische durch kurzzeitige Schließfunken in kapazitiven Stromkreisen für die Zündschutzart Eigensicherheit*, Dissertation, TU Braunschweig, 1984.
- [06] **Zborovszky, Z.; Cotugno, L. A.:** *Evaluation of the Cadmium Disc Breakflash in testing Electrical Circuits*. A Comprehensive Study of Intrinsic Safety Criteria, Denver Research Institute - University of Denver. Bureau of Mines Open File Report 68-76, 1974.
- [07] **Faerstein, L. B.:** *Vlijanie uslovij kommutacij na vosplamenjajuščuju sposobnost' šachtnych slabotočnych cepej i razrabotka sposobov ocenki ich iskrobezopasnosti*. Dissertation, Moskau, 1986.
- [08] **Vogt, G.:** *Untersuchungen der Zündung von explosionsfähigen Methan/Luft-Gemischen durch elektrische Entladungen in induktiven Stromkreisen von eigensicheren Betriebsmitteln für den Steinkohlebergbau*. Dissertation, TH Aachen. Mitteilungen der Westfälischen Berggewerkschaftskasse, Herne, 1980.
- [09] **Shekhar, R.:** *Modelling of ignition by low voltage electrical discharges in explosion protection applications*. Dissertation, The University of Queensland, Brisbane, 2018, DOI: 10.14264/uql.2019.16.
- [10] **Cernak, M. et al.:** *Effect of cathode surface properties on glow-to-arc transition in a short positive corona gap in ambient air*. Journal of Physics D Applied Physics, 1995, Vol. 28 (6), S. 1126, DOI: 10.1088/0022-3727/28/6/015.
- [11] **Lippmann, H.-J.:** *Schalten im Vakuum*. Physik und Technik der Vakuumschalter. VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2003.

- [12] **Uber, C. et al.:** *Experimental investigation of low-voltage spark ignition caused by separating electrodes*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, Vol. 49, S. 822–831, DOI: 10.1016/j.jlp.2017.03.015.
- [13] **Johannsmeyer, U.:** *Zusammenschaltung nichtlinearer und linearer eigensicherer Stromkreise Zündverhalten von Netzwerken eigensicherer Stromkreise mit elektronischen Strombegrenzungseinrichtungen*. PTB-Bericht PTB-W-16, 1979.
- [14] **Fantz, U.:** *Basics of plasma spectroscopy*. Plasma Sources Science and Technology, 2006, Vol. 15 (4), S. 137-147, DOI: 10.1088/0963-0252/15/4/s01.
- [15] **Runge, T.; Kopp., T. H.; Kurrat, M.:** *Experimental Investigations on Electrical Plasma Conductivity in a Model Spark Gap for Surge Currents*. Plasma Physics and Technology Journal, 2017, Vol. 4 (1), S. 24–27, DOI: 10.14311/ppt.2017.1.24.
- [16] **Babrauskas, V.:** *Ignition handbook*. Fire Science Publishers, Issaquah (WA, USA), 2003.
- [17] **Broekaert, J. A. C.:** *Analytical Atomic Spectrometry with Flames and Plasmas*. Wiley-VCH, Weinheim, 2002, DOI: 10.1002/3527606653.
- [18] **Langer, T.:** *Zündung von Wasserstoff/Luft-Gemischen durch repetierende Teilentladungen*, Dissertation, KIT Karlsruhe, 2013.