

# Zündung von Wasserstoff/Luftgemischen durch elektrische Entladungen bei hochfrequenter Wechselspannung

Dr.-Ing. F. Lienesch, Dipl.-Ing.(FH) S. Homann, Dr.-Ing. D. Markus, Dipl.-Ing.(FH) M. Spilling,

## 1 Einleitung

In der chemischen und petrochemischen Industrie lassen sich brennbare Gas/Luftgemische nicht ausschließen. Ein sicherer Betrieb dieser Industrieanlagen erfordert daher ein Explosionsschutzkonzept. Elektrische Entladungen können brennbare Gas/Luftgemischen entzünden und müssen daher beim Explosionsschutz elektrischer Geräte berücksichtigt werden. In der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ werden offene spannungsführende Teile durch eine erhöhte Dimensionierung der Luft- und Kriechstrecken geschützt [1]. Als Bemessungsgrundlage gilt dabei die Versorgungsspannung, wobei transiente Überspannungen nicht betrachtet werden. In elektrischen Versorgungsnetzen können jedoch schaltungsbedingt transiente Überspannungen mit hochfrequenten Ausgleichvorgängen auftreten, die das Isolationssystem elektrischer Betriebsmittel beanspruchen. Bei umrichter gespeisten Antrieben entstehen auf langen Leitungen Ausgleichvorgänge, die ebenfalls hochfrequente Spannungen hervorrufen.

Im Gegensatz zu Funkenentladungen ist die Zündung durch Vor-/Teilentladungen bei hochfrequenter Wechselspannung bislang wenig betrachtet worden. Diese Veröffentlichung diskutiert Ergebnisse hinsichtlich des Zündrisikos dieser Entladungsformen. Beispielhaft zeigt Abb. 1 eine hochfrequente Vorentladung im ersten Teilbild und in den folgenden Teilbildern die anschließende Verbrennung des Wasserstoff/Luftgemisches [2].



Abb. 1 Zündung eines H<sub>2</sub>/Luft Gemischs durch eine Vor-/Teilentladung.

## **2 Zündung brennbarer Gase**

Gemische brennbarer Gase in Luft entzünden sich im Allgemeinen nicht spontan, sondern müssen mittels einer Zündquelle zur Zündung gebracht werden. Die zur Zündung notwendige Energie ist dabei abhängig vom Druck, der Temperatur, dem Zündvolumen und der Gemischzusammensetzung [3]. Die Mindestzündenergie bezeichnet die minimale Energiemenge, die unter sonst idealen Bedingungen dem System zugeführt werden muss, um eine Zündung zu erreichen [4]. Sinnvoller ist jedoch das Konzept einer Mindestzündenergiedichte, da das vorliegende Zündvolumen auf eine ausreichend hohe Temperatur erwärmt werden muss. Ist die Energiezufuhr – d.h. Temperaturerhöhung - ausreichend groß, wird die Zündung eingeleitet und es kommt zu einer sich selbst erhaltenden Flammenausbreitung, das Gemisch explodiert.

Aufgrund der Wichtigkeit sowohl für die Sicherheitstechnik als auch für die motorische Verbrennung sind verschiedene Zündquellen im Detail untersucht worden. Von besonderer Bedeutung ist dabei neben der Zündung an heißen Oberflächen [5] und der Zündung durch fokussierte Laserstrahlung [6] die elektrische Funkenzündung, bei der die Zündprozesse sowohl bei der Zündung durch einzelne Funken [7] als auch bei Zündung durch sich akkumulierende, einzeln nicht zündfähige Funken [8] detailliert untersucht worden sind. Dagegen ist die Zündung durch Vor- und Teilentladungen bei Anliegen einer hochfrequenten Wechselspannung noch nicht ausreichend verstanden.

## **3 Elektrische Entladung**

Elektrische Ladungsträger (Elektronen, Ionen) werden im elektrischen Gleichfeld entsprechend ihrer Polarität zu den Elektroden hin bewegt. Mit zunehmender Feldstärke und in Abhängigkeit von der Feldgeometrie setzen Ionisationsprozesse an der inhomogensten Stelle ein, die zu einer elektrischen Entladung führen. In Abhängigkeit von der Polarität und der Gasart treten unterschiedliche Entladungsformen auf.

Im Gegensatz zum Gleichfeld müssen bei hochfrequenter Wechselspannung die unterschiedlichen Beweglichkeiten der jeweiligen Ladungsträger betrachtet werden. Bei kritischen Frequenzen können sich Raumladungen durch Ionen ausbilden, die während einer Halbschwingung der anliegenden Wechselspannung die Schlagweite zwischen zwei Elektroden nicht überbrücken. Durch die Raumladungswolke kommt es zu elektrischen Feldüberhöhungen, die zum einen die Durchschlagspannung stark reduzieren und zum anderen die Energie einer Entladung erhöhen können [2]. Die Durchschlagspannung von Wasserstoff ist deutlich geringer als von Luft, da Wasserstoff eine höhere Beweglichkeit hat. Somit nimmt die

kinetische Energie der Ladungsträger (Elektronen) durch die größere mittlere freie Weglänge zu, wodurch die Ionisation erhöht wird.

Der Energieinhalt einer elektrischer Entladungen zeigt sich zum einen durch Leuchterscheinungen (Photoemission) und zum anderen durch ein entstehendes Temperaturfeld. Das Temperaturfeld führt zur Zündung des brennbaren Gas/Luftgemisches. Während Vorentladungen bei Gleichspannung ein geringes Temperaturfeld hervorrufen, entstehen durch Funkenentladungen hohe Temperaturfelder. Daher ist die Zündung durch Funkenentladungen sehr wahrscheinlich und soll hier nicht diskutiert werden.

#### **4 Versuchsaufbau**

Zur Erzeugung der Hochspannungs- Hochfrequenzentladungen wurde eine Wechselspannung von 650 kHz verwendet; die mit einem Frequenzgenerator erzeugte sinusförmige Wechselspannung diente als Eingangssignal für einen Leistungsverstärker. Das verstärkte Signal versetzte eine Luftspule in Resonanz und ermöglichte Wechselspannungsamplituden bis zu 20 kV. Als Elektrodenanordnung diente eine Spitze-Platte-Anordnung mit einem Radius der Spitze von 0,1 mm.

Die Versuche erfolgten in einem Plexiglasgefäß, in welches durch angebrachte Quarzglasfenster eine optische Beobachtung auch im UV-Bereich vorgenommen werden konnte. Die Entladungs- und Verbrennungserscheinungen wurden mittels einer lichtverstärkten CCD-Kamera aufgezeichnet. Durch das UV-sensitive Aufnahmesystem erreichte man eine empfindlichere Abbildung des Vorentladungsvorgangs (siehe Abb. 1, Teilbild 1). Die Aufnahme des Zündvorgangs (s. Abb. 1, Teilbilder 2 bis 5) diente als Nachweis für die Entzündung, da weder durch den Druckanstieg noch durch die Geräuschentwicklung eine Verbrennung bei niedrigen und hohen Volumenanteilen von Wasserstoff in Luft sicher nachgewiesen werden konnte.

Zur Gemischaufbereitung stand ein Massendurchflussreglersystem zur Verfügung, mit dem die Durchflüsse von Wasserstoff und Luft diskret eingestellt werden konnte. Der maximale Durchsatz des Luftkanals betrug 30 l/min und des Wasserstoffkanals 10 l/min.

#### **5 Ergebnisse**

Zur Zündung des Wasserstoff/Luftgemisches muss die Entladung ausreichend Energie in das Zündvolumen einbringen. Im elektrischen Gleichfeld kann die Energie der Vorentladung bei gegebener Elektrodenkonfiguration nur durch die Amplitude der Spannung variiert werden, die entsprechend die elektrische Feldstärke und damit auch die Länge (Volumen) der Entladung bestimmt.

Im elektrischen Wechselfeld stellt sich im Unterschied zum Gleichfeld die Frage, ob sich durch Aufakkumulieren der Energieinhalt der Vor-/Teilentladung erhöht, so dass weitere Parametergrößen die Zündfähigkeit beeinflussen. Im Folgenden wird der Einfluss von Schlagweite, Spannung und Anzahl der Schwingungen auf das Zündverhalten von Wasserstoff/Luft Gemischen untersucht. Die in den Diagrammen eingezeichneten Daten zeigen den Parametersatz, bei dem in 10 von 10 Versuchen keine Zündung des Gas/Luft-Gemisches erfolgte.

### **5.1 Die Zündung in Abhängigkeit der Spannungsamplitude**

Bei einer Pulslänge von 50 Schwingungen und einer Schlagweite von 40 mm wurde zur Zündung notwendige Amplitude der Wechselspannung bestimmt. In Abb. 2 zeigt sich ein Minimum der Spannungsamplitude in dem Bereich 20% und 30% Volumenanteil Wasserstoff in Luft. Bei Erhöhung oder Erniedrigung des Anteils von Wasserstoff in Luft steigt die zur Zündung notwendige Spannungsamplitude an. Dieser Verlauf deckt sich mit dem Verlauf der Zündgrenzkurve [4]. Mit zunehmender Spannungsamplitude steigt die elektrische Feldstärke an und die Länge der Entladung, auf die sich die Energie verteilt, nimmt zu. Durch die höhere Feldstärke werden mehr Ionisierungsprozesse einsetzen, die den Energieinhalt vergrößern. Daher muss die Energiedichte mit Erhöhung der Spannungsamplitude insgesamt aufgrund der starken Zunahme der Ionisierungsprozesse trotz des größeren Volumens der Entladung ansteigen.

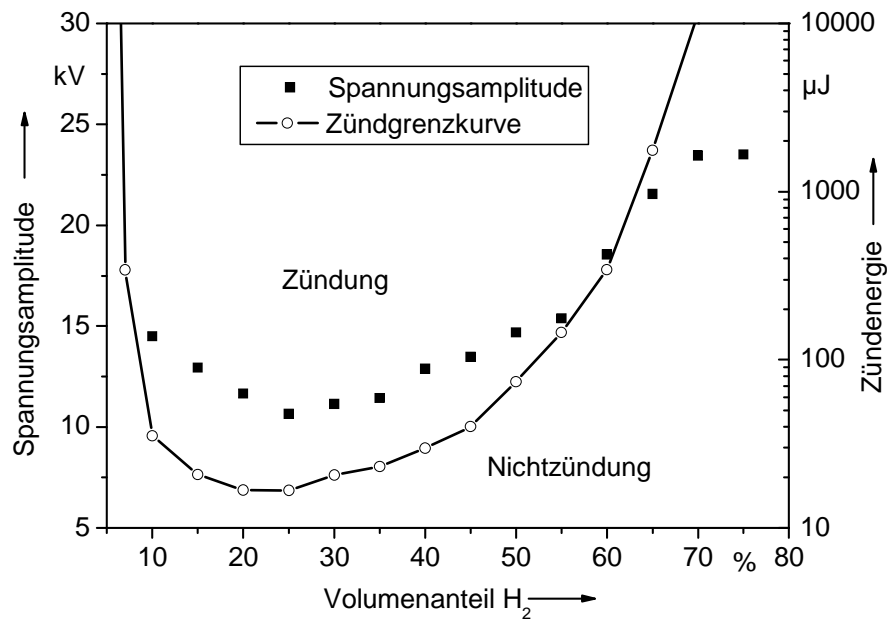


Abb. 2      Abhängigkeit der zur Zündung notwendigen Spannungsamplitude vom Volumenanteil Wasserstoff im Vergleich zur Zündgrenzkurve [4] (50 Schwingungen,  $s = 40$  mm).

## 5.2 Die Zündung in Abhängigkeit von der Schlagweite

Bei einer Pulslänge von 50 Schwingungen und einer Amplitude der Wechselspannung von 11,2 kV wurde die Schlagweite  $s$  in Abhängigkeit des Wasserstoffs in Luft bestimmt, bei der es nicht mehr zu einer Zündung des Wasserstoff/Luftgemisches kommt. In Abb. 3 ist erkennbar, dass die zur Nichtzündung notwendige Schlagweite in dem Bereich 20%...30% Volumenanteil Wasserstoff in Luft ein Maximum hat. Bei einer Schlagweite von  $s \leq 10$  mm kommt es zu einem Durchschlag, wodurch es stets zu einer Zündung des Wasserstoff/Luftgemisches kommt. Die maximal einstellbare Schlagweite betrug durch den Versuchsaufbau bedingt 50 mm. Daher konnte der Wert für 20% Volumenanteil Wasserstoff in Luft nicht bestimmt werden, da auch bei dieser Schlagweite eine Zündung beobachtet wurde.

Aufgrund der elektrischen Feldverteilung bei konstanter Spannung nimmt die Länge der Entladung mit zunehmender Schlagweite ab, wodurch sich die Energiedichte erhöht. Gleichzeitig verringert sich jedoch bei Erhöhung der Schlagweite aufgrund der abnehmenden Feldstärke die Anzahl an Ionisationen und damit an Ladungsträgern. Je geringer die Zündenergie des Gemisches ist (s. Abb. 2), desto größer ist die Schlagweite, bei der gerade noch eine Zündung beobachtet werden kann. Die Energiedichte nimmt

offensichtlich mit zunehmender Schlagweite ab, woraus folgt, dass die Abnahme der Ionisierungsprozesse der dominierende Prozess ist.

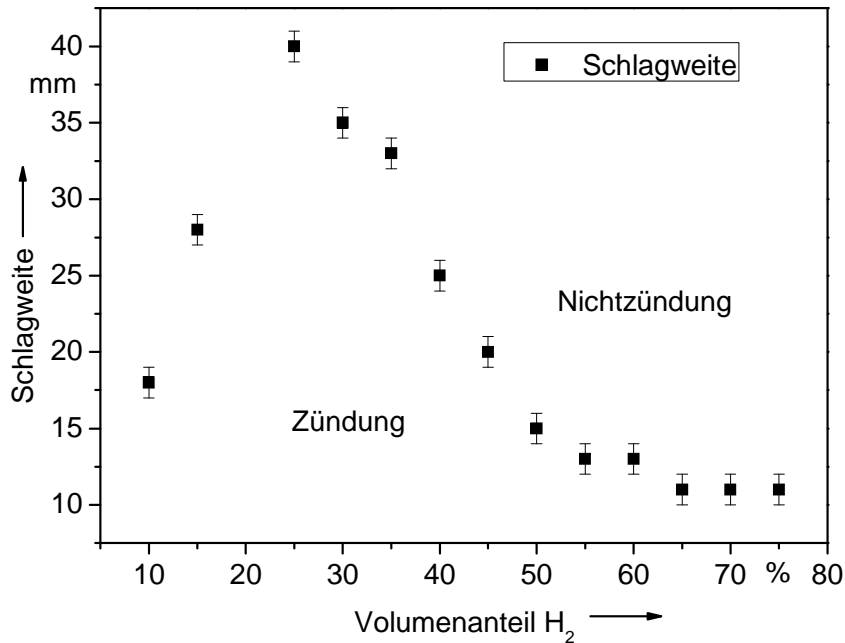


Abb. 3      Abhängigkeit der zur Nichtzündung notwendigen Schlagweite vom Volumenanteil Wasserstoff (50 Schwingungen,  $\hat{U} = 11 \text{ kV}$ )

### 5.3 Die Zündung in Abhängigkeit der Anzahl der Schwingungen

Bei einer Amplitude von 11,2 kV und einer Schlagweite von  $s = 40 \text{ mm}$  wurde die zur Zündung notwendige Anzahl an Sinusschwingungen für verschiedene Wasserstoff/Luftgemische bestimmt. Abb. 4 zeigt bei einem Volumenanteil von 20% Wasserstoff in Luft ein Minimum der Anzahl an Schwingungen, die zur Zündung des Gemisches notwendig sind. Mit Erhöhung oder Verringerung des Anteils von Wasserstoff in Luft nimmt die zur Zündung notwendige Anzahl an Schwingungen und damit die notwendige Pulsdauer zu. Beim Vergleich mit der Zündgrenzkurve (s. Abb. 2) wird deutlich, dass sich die Energie der Vorentladungen bei hochfrequenter Wechselspannung in Abhängigkeit von der Anzahl an Schwingungen aufakkumuliert.

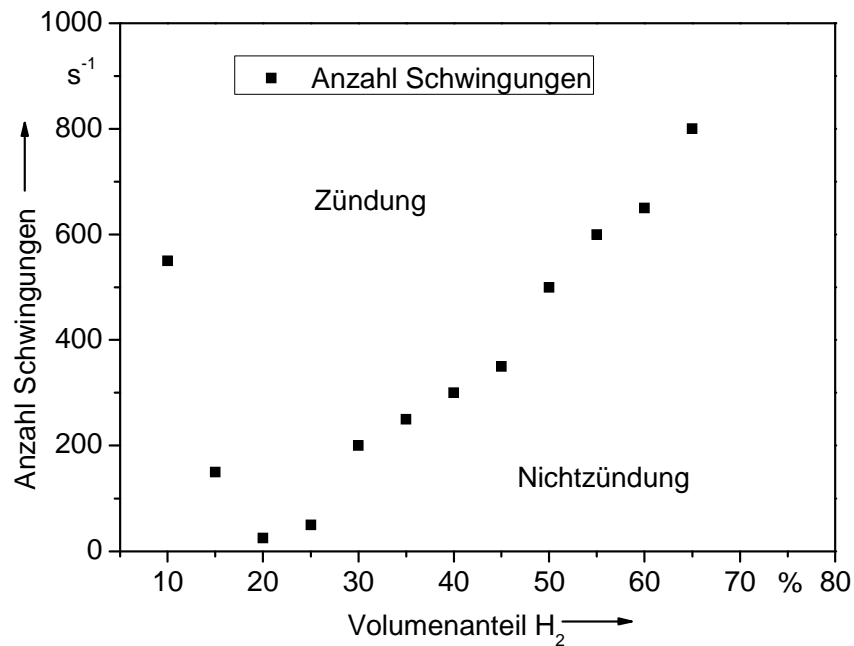


Abb. 4 Abhängigkeit der zur Zündung notwendigen Anzahl von Schwingungen vom Volumenanteil Wasserstoff ( $s = 40 \text{ mm}$ ,  $\hat{U} = 11 \text{ kV}$ ).

## 6 Konsequenzen für die Dimensionierung von Luft- und Kriechstrecken in Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ gemäß EN 60079-7

Für eine Schlagweite (Mindestluftstrecke) von 44 mm sieht die Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ eine maximal zulässige Bemessungsspannung  $U_B$  (bei 50Hz / 60Hz) von 4 kV (Effektivwert) vor, wobei eine Spannungstoleranz von 10% zusätzlich unterstellt werden kann. Durch die Vorgaben ergibt sich eine maximal erlaubte Spannungsamplitude bei Wechselspannung von

$$\hat{U} = U_B \cdot \sqrt{2} \cdot 1,1 = 4 \text{ kV} \cdot \sqrt{2} \cdot 1,1 = 6,22 \text{ kV} .$$

Die Untersuchungen ergaben für die Frequenz von 650 kHz bei einer Spannungsamplitude von 11,2 kV und einer Pulsdauer von lediglich 77  $\mu\text{s}$  (50 Schwingungen) eine kritische Schlagweite von  $s_k > 40 \text{ mm}$ . Hieraus resultiert sicherlich ein Grenzbereich, der sicherheitstechnisch im Sinne des Ansatzes der Erhöhten Sicherheit betrachtet werden muss. Die Anforderung „Transiente Überspannungen müssen nicht berücksichtigt werden“ ist daher nicht für alle Spannungsebenen haltbar.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Entladungen (Vor-/Teilentladungen) bei Verwendung von hochfrequenter Wechselspannung sind in der Lage, ein brennbares Gas/Luft Gemisch zu entzünden. Das Aufakkumulieren von Entladungen bei hochfrequenter Wechselspannung ist durch die mangelnde Beweglichkeit der Ionen zu erklären, die während einer Halbschwingung des elektrischen Feldes nicht die Elektrode erreichen können und somit im elektrischen Feld verbleiben. Der Energieinhalt wird im wesentlichen durch die Anzahl der Ionisationen und damit dem Entstehen von Ladungsträgern (Ionen) bestimmt. Die Ladungsmenge vergrößert sich überproportional durch Erhöhung der Feldstärke und proportional durch Erhöhung der Anzahl der Schwingungen.

Hinsichtlich der Dimensionierung der Luft- und Kriechstrecken für explosionsgeschützte elektrische Geräte dürfen die in dieser Veröffentlichung untersuchten Effekte nicht vernachlässigt werden. Eine Übertragung auf andere brennbare Gase soll weitere Aufschlüsse über die relevanten chemischen und physikalischen Prozesse aufzeigen.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN / IEC 60079-7 Ed. 3  
Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche  
Teil 7: Erhöhte Sicherheit „e“.
  
- [2] *Lienesch, F.*: Untersuchungen zum Durchschlag brennbarer Gase als Beitrag zum Explosionsschutz elektrischer Betriebsmittel, Dissertation. In Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 282, 1999.
  
- [3] *Warnatz, J., Maas, U. und Dibble, R.*: Verbrennung. Springer-Verlag, Berlin, 3. Aufl. (2001).
  
- [4] *Krämer, H.*: Sicherheitstechnische Kennzahlen zur Beurteilung der Zündfähigkeit elektrischer Gasentladungen in explosionsfähigen Gas- oder Dampf/Luft-Gemischen. In: Dechema-Monographien Band 107-VCH, Verlagsgesellschaft (1987).
  
- [5] *Steen, H. Gödde, M. und Bothe, H.*: Zündung durch heiße Oberflächen. In: Handbuch des Explosionsschutzes, *Steen, H.* (Hrsg.). Wiley-VCH, Weinheim (2000) S. 177-205.
  
- [6] *Ronney, P.*: Laser versus conventional ignition of flames. Opt. Eng. (1994) **33** 510-521.



- [7] *Thiele, M., Selle, S., Riedel, U., Warnatz, J. und Maas, U.:* Numerical simulation of spark ignition including ionization. Proc. Comb. Inst. (2000) **28** 1177-1185.
- [8] *Markus, D. Gerlach, U. und Maas, U.:* Physikalisch–chemische Betrachtungen zum Zündverhalten eigensicherer Stromkreise. PTB–Mitteilungen (1999) **109** 339-346.