

Dipl.-Ing. Thomas Grunewald
Dr. rer. nat. Robert Finke
Dr.-Ing. Rainer Grätz

**Untersuchungen zur Zündwahrscheinlichkeit
und Datenanalyse zur Erfassung der
Einflussgrößen mechanisch erzeugter
Stahl-Schlagfunken in explosionsfähigen
Brenngas/Luft-Gemischen**

Impressum

Forschungsbericht 292:

**Untersuchungen zur Zündwahrscheinlichkeit
und Datenanalyse zur Erfassung der Einflussgrößen
mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken
in explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemischen**

2010

Herausgeber:

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8112029
E-Mail: info@bam.de
Internet: www.bam.de

Copyright © 2010 by
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

ISSN 0938-5533

ISBN 978-3-9813853-0-4

Kurzfassung

Mechanisch erzeugte Schlagfunken stellen in explosionsgefährdeten Bereichen eine potentielle Zündquelle dar. Eine Vielzahl von mechanischen und reaktionskinetischen Einflüssen verursacht dabei eine komplexe Interaktion von Parametern, von deren Auswirkung auf die Zündwahrscheinlichkeit bislang wenig bekannt ist. Die statistisch erfassten Eigenschaften von Schlagfunken in dieser Untersuchung lassen auf stochastische Prozesse schließen, bei denen die Anzahl der durch einen Schlagprozess abgetrennten Partikel und deren Oxidationsverhalten sowie die Höhe der kinetischen Schlagenergie entscheidenden Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeit hat.

Statistisch belastbar konnte in Ergänzung zum BAM Forschungsbericht 279 durch empirische Untersuchungen erstmals die Zündwahrscheinlichkeit von mechanisch erzeugten Stahl-Schlagfunken mit der Werkstoffpaarung unlegierter Stahl/unlegierten Stahl von $W = 3 \text{ Nm}$ bis 277 Nm ermittelt werden. Ferner wurde die Zündfähigkeit von durch energiereiche Schlagvorgänge ($\geq 190 \text{ Nm}$) abgetrennten nicht oxidierten Partikeln erhöhter Temperatur in überstöchiometrischen Gemischen nachgewiesen. Während eine eindeutige Korrelation von Schlagenergie und Zündwahrscheinlichkeit sowie eine Korrelation von Schlagenergie und Anzahl abgetrennter Partikel festgestellt wurde, lieferte die Untersuchung in Hinblick auf die gemessenen einzelnen Parameter (wie z. B. Anzahl, Größe, Geschwindigkeit, mögliche Oxidation und Oxidationszeit und -verhalten der Partikel im Zusammenhang zur Schlagenergie und zur Zündwahrscheinlichkeit) kein eindeutiges Ergebnis. Auch eine Hauptkomponentenanalyse (PCA), die die Interaktion der einzelnen Parameter berücksichtigt, konnte keine spezifische Kombination messbarer Eigenschaften der Partikel finden, die mit einer deutlichen Erhöhung der Zündwahrscheinlichkeit korreliert.

Schlagwörter: mechanisch erzeugte Funken, Schlagfunken, Stahl-Schlagfunken, Schlagvorgang, Schlagversuche, Partikel, explosionsfähige Gasgemische, Werkstoffe, Zündgefahr, Zündquellen, Zündwahrscheinlichkeit

Abstract

Mechanically generated impact sparks are a potential ignition source in explosive atmospheres. A great number of mechanical and procedural chemical reactions are the reason of a complex interaction of the influencing variables. The influence of the ignition probability is only little known. The summary of the statistically collected characteristics of mechanically generated impact sparks is a stochastic process, but the number and the oxidizing characteristic of the separated particles and the amount of the kinetic impact energy are the important influence of the ignition probability.

Empirical studies and the review to the BAM science report 279 represent for the first time and statistically firm the ignition probability of mechanically generated impact sparks for homogeneous ferritic steel pairing in the impact range from $W = 3 \text{ Nm}$ to 277 Nm . Furthermore it shows the ignition probability from separated not oxidized but increased temperature sparks generated through high-energy impacts ($\geq 190 \text{ Nm}$) in hyperstoichiometric air/gas-mixture. Whereas the study clearly shows a correlation between impact energy and ignition probability and between impact energy and number of separated particles, it doesn't statistically clearly show a correlation between impact energy and individual values (like number, dimensions, possible oxidizing process, oxidizing time and oxidizing characteristics). Also a realized Principal Component Analysis (PCA) taking into account the interaction between the summary of the number of influencing variables, shows no specific combination of measurable properties of the particles correlating with a significant increase of the ignition probability.

Descriptors: mechanically generated sparks, impact sparks, impacts, particles, explosive atmosphere, ignition hazard, ignition source, ignition probability

Inhalt

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung | 7 |
| 2 | Allgemeines zur Zündquelle mechanisch erzeugter Funken | 8 |
| 3 | Stand der Technik und der Normung | 9 |
| 4 | Stand der Forschung | 11 |
| 5 | Stand der neueren Forschungsergebnisse der BAM | 14 |
| 6 | Weiterführung der Forschung und statistische Untersuchungen zu abgetrennten Partikeln | 17 |
| 7 | Design der weiterführenden Untersuchungen | 17 |
| 7.1 | Prüfmaschine und mechanischer Ablauf | 17 |
| 7.2 | Technische Daten der Prüfmaschine, Schlaghebelgeschwindigkeiten und Flächenpressungen | 18 |
| 7.3 | Prüfobjekte und Werkstoffe | 23 |
| 7.4 | Versuchsablauf und Prüfgemische | 23 |
| 7.5 | Sicherheitstechnische Kenndaten der Referenzbrenngase | 25 |
| 7.6 | Datenanalyse zur Erfassung mechanischer und reaktionskinetischer Einflussgrößen | 26 |
| 8 | Weiterführende Versuche zur Zündwahrscheinlichkeit | 26 |
| 8.1 | Versuche mit Methan | 26 |
| 8.1.1 | Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Methan | 27 |
| 8.1.2 | Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Methan | 27 |
| 8.2 | Versuche mit Propan | 27 |
| 8.2.1 | Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Propan | 28 |
| 8.2.2 | Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Propan | 28 |
| 8.3 | Versuche mit Ethylen | 28 |
| 8.3.1 | Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Ethylen | 29 |
| 8.3.2 | Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Ethylen | 29 |
| 8.4 | Versuche mit Acetylen | 29 |
| 8.4.1 | Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Acetylen | 30 |
| 8.4.2 | Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Acetylen | 30 |
| 8.5 | Versuche mit Wasserstoff | 30 |
| 8.5.1 | Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Wasserstoff | 30 |
| 8.5.2 | Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Wasserstoff | 31 |
| 8.6 | Vergleichsversuche mit Acetylen und Wasserstoff außerhalb der definierten Gemischzusammensetzungen | 31 |
| 8.6.1 | Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Acetylen | 32 |
| 8.6.2 | Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Wasserstoff | 32 |
| 8.7 | Vergleichsversuche mit Helium | 33 |
| 8.8 | Zusammenfassung und Interpretation der Versuchsergebnisse zum Oxidationsverhalten und zur Zündwahrscheinlichkeit | 33 |

| | | |
|-------|---|----|
| 8.8.1 | Oxidationsverhalten in Abhängigkeit zum Brenngasanteil und zur Höhe der kinetischen Schlagenergie | 33 |
| 8.8.2 | Zündwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit zum Brenngasanteil und zur Höhe der kinetischen Schlagenergie | 35 |
| 9 | Versuche zur statistischen Erfassung mechanischer und reaktionskinetischer Einflussgrößen | 38 |
| 9.1 | Zusammenfassung und Interpretation der Versuchsergebnisse zur Datenanalyse zur Erfassung mechanischer und reaktionskinetischer Einflussgrößen | 39 |
| 9.1.1 | Zusammenhang zwischen kinetischer Schlagenergie und Zündwahrscheinlichkeit | 39 |
| 9.1.2 | Anzahl der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur und Zeit bis zur Zündung in Abhängigkeit von der Schlagenergie | 39 |
| 9.1.3 | Vergleichsversuche mit Acetylen/Stickstoff-Gemisch außerhalb der definierten Gemischzusammensetzungen | 43 |
| 9.1.4 | Größe und Geschwindigkeit abgetrennter Partikel mit erhöhter Temperatur in Abhängigkeit von der Schlagenergie | 43 |
| 9.1.5 | Zeit bis zur Oxidation und Dauer der Oxidation für abgetrennte Partikel mit erhöhter Temperatur in Abhängigkeit von der Schlagenergie | 45 |
| 9.1.6 | Hauptkomponentenanalyse (PCA) für alle oxidierten Partikel von Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemischen | 47 |
| 10 | Interpretation der Ergebnisse | 49 |
| 10.1 | Streuung der Daten | 49 |
| 10.2 | Mögliche Einflüsse auf die Zündwahrscheinlichkeit | 50 |
| 11 | Zusammenfassung | 52 |
| 12 | Ausblick | 55 |
| 13 | Literatur | 56 |
| 14 | Anhang | 58 |
| 14.1 | Tabellen | 58 |

1 Einleitung

Hersteller von Geräten, die in den Geltungsbereich der Richtlinie 94/9/EG „Geräte und Schutzsysteme zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen“ /L-1/ fallen, müssen eine Zündgefahrenbewertung als Grundlage für die Konformitätsbewertung erstellen. Voraussetzung für die Konformitätsbewertung ist die Konformitätserklärung des Herstellers sowie das anschließende Anbringen des CE-Zeichens für die Berechtigung des Inverkehrbringens des Gerätes. Die Identifizierung der möglichen Zündquellen ist dabei Ausgangspunkt der Zündgefahrenbewertung. In der Literatur (Steen /L-2/, Bartknecht /L-3/) und in einschlägigen Normen EN 1127-1 /L-4/ und EN 13463-1 /L-5/ sowie den Regelwerken BGR 104 (Explosionsschutz-Regeln der BG Chemie) /L-6/ sind die möglichen Zündquellen in 13 Zündquellenarten klassifiziert worden. Eine Zündquellenart davon sind die mechanisch erzeugten Funken.

Der Anteil der mechanischen Zündungen an allen Unfällen bei Staub/Luft-Gemischen wird von Bartknecht mit rund 30 % beziffert. Am Beispiel von Ex-Ventilatoren wurden viele Unfälle mit zum Teil erheblichen Zerstörungen an den strömungstechnischen Anlagen in einer Publikation von Witt /L-7/ aufgezeichnet, deren nachgewiesene oder vermutete Ursache mechanische Zündquellen mit etwa ähnlich hohem Anteil wie bei den Stäuben waren.

Für den Bereich der Stahl-Schlagfunken gibt es zwar eine Reihe von bekannten Einflussgrößen auf die Zündwirksamkeit. Dies bestätigte auch eine umfangreiche Literaturrecherche (vergl. BAM-Forschungsbericht 279 /L-8/). Die Zündwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Brennstoff/Luft-Atmosphäre bei bekannter kinetischer Schlagenergie lässt sich jedoch noch immer nur sehr vage beziffern. Deshalb wurde in einem ersten neueren Forschungsvorhaben /L-8/ die aufgrund der großen technischen Relevanz insbesondere bei nichtelektrischen Geräten weit verbreitete Materialkombination unlegierter Baustahl / unlegierter Baustahl (St52 / St52) betrachtet.

Aufgrund der relativ groben Abstufung bezüglich der bis 2007 verfügbaren kinetischen Schlagenergien der Schlagfunkenmaschinen in der BAM und der im Ergebnis des Forschungsvorhabens festgestellten Vielzahl von sowohl mechanischen als auch reaktionskinetischen Einflüssen war ein weiteres Forschungsvorhaben notwendig. In diesem neuen hier vorgestellten Forschungsvorhaben soll die vermutete komplexe Interaktion von Parametern und deren Auswirkung auf die Zündwahrscheinlichkeit genauer untersucht werden.

2 Allgemeines zur Zündquelle mechanisch erzeugter Funken

Ein mechanisch erzeugter Funke ist ein Partikel mit erhöhter Temperatur, das aus festen Materialien durch den Energieeintrag bei Schlag-, Schleif- oder Reibvorgängen abgetrennt wurde. Als Partikel erhöhter Temperatur muss es nicht unbedingt glühend bzw. leuchtend sein, da die eingetragene Energie zwar für den Abtrennvorgang ausreichend sein kann, aber nicht ausreichend sein muss, um dieses Partikel glühen zu lassen. In Abhängigkeit vom Werkstoff können die abgetrennten Partikel durch den Sauerstoffanteil der Luft oxidieren. Durch diese exotherme Reaktion wird Energie freigesetzt und der Funke erreicht höhere Temperaturen verbunden mit Flammenerscheinungen. Wenn die Temperatur des Funkens oberhalb der Mindestzündtemperatur der möglichen explosionsfähigen Atmosphäre liegt, die Funkenoberfläche hinreichend groß ist und damit gleichzeitig der Funke einen ausreichenden Energieinhalt besitzt, dann ist dieser Funke eine potentielle Zündquelle. Trifft dieser auf eine explosionsfähige Atmosphäre, kann es zur Zündung führen, d. h. die potentielle Zündquelle wird eine wirksame Zündquelle. Je mehr zündfähige Funken schnell hintereinander geschlagen werden, desto größer ist die Summe der zur Verfügung stehenden Oberflächen und somit auch die Wahrscheinlichkeit ihres Wirksamwerdens, die Zündwahrscheinlichkeit.

In Abhängigkeit von der Art der Entstehung der mechanisch erzeugten Funken unterscheidet man zwischen Schlag- und Schleiffunken. Der wichtigste Unterschied besteht darin, dass bei Schleifvorgängen ein länger andauernder Kontakt zwischen den Schleifpartnern besteht, während beim Schlagvorgang dieser nur kurzzeitig vorhanden ist. Weiterhin unterscheiden sich beide Vorgänge insbesondere durch die Relativgeschwindigkeit zwischen den Schlag- oder Schleifpartnern:

Die Relativgeschwindigkeit von zündwirksamen Schlagvorgängen liegt im Allgemeinen im Bereich von $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis etwa $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, unter besonderen, jedoch eher seltenen Bedingungen und mit sehr hohen Anpresskräften (über 3,5 kN) auch bei $0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Unter $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ist es praktisch nicht mehr möglich, Partikel erhöhter Temperatur abzutrennen. Bei extremen Flächenpressungen können möglicherweise Kaltverschweißungen auftreten, deren heiße Kügelchen oder heiße Oberflächen unter Umständen als Zündquelle zu betrachten sind.

Oberhalb von $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sind einzelne Schlagvorgänge eher selten und müssen gesondert betrachtet werden, da hier wesentlich leichter Partikel mit hohem Energieinhalt bzw. hoher Ausgangstemperatur und somit höherer Zündwahrscheinlichkeit abgetrennt werden können.

Bei zündwirksamen Reib- und Schleifvorgängen liegt die Relativgeschwindigkeit in der Regel oberhalb von etwa $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Allerdings können Reib- und Schleifvorgänge auch mit weniger als $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bei hinreichendem Anpressdruck zur Zündquelle werden, jedoch dann oft nicht durch die Zündquelle „mechanisch erzeugte (Schleif-) Funken“, sondern (bei hinreichend langzeitigem Anschleifen) durch die Zündquelle „heiße Oberfläche“ /L-9/. Ein weiterer Sonderfall ist der anschlagende Reibvorgang, wobei bereits ab $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Relativgeschwindigkeit mit der Erzeugung von zündfähigen mechanisch erzeugten Funken sogar gegenüber Benzindampf/Luft-Gemischen gerechnet werden muss /L-10/.

3 Stand der Technik und der Normung

Bereits seit 1950 hat die BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung auf dem Gebiet der mechanisch erzeugten Funken einige umfangreiche Forschungsarbeiten durchgeführt und veröffentlicht. Dabei wurden erstmals Grenzwerte zur Zündwirksamkeit der kinetischen Schlagenergie und erste Zündwahrscheinlichkeiten bestimmt. Viele weitere Forschungsarbeiten wurden mit dem Schlag- und Schleiffunken-Maschinenpark der BAM durchgeführt. Aus diesem Grund beziehen sich einige deutschsprachige Veröffentlichungen aus den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts auf die „BAM-Apparatur“.

Das erste Regelwerk in Europa, das alle Zündquellenarten berücksichtigte waren 1972 (Vorstellung) bzw. 1976 (Inkrafttreten) die Explosionsschutz-Richtlinien - EX-RL (dann BGR 104, jetzt TRBS 2152) /L-6/ der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (BG Chemie). Der nicht-elektrische Explosionsschutz wurde entsprechend ausführlich behandelt und bezüglich des elektrischen Explosionsschutzes wurde auf das zutreffende Regelwerk, die ElexV /L-11/ und die VDE-Richtlinien verwiesen.

Um Verwechslungen mit den Richtlinien der EU zu vermeiden, wurden die EX-RL in „Technische Regeln für Betriebssicherheit TRBS 2152, Gefährliche Explosionsfähige Atmosphäre – Allgemeines – und deren weitere Teile einschließlich einer Beispielsammlung überführt.

Die EG-Richtlinie 94/9/EG unterteilt Geräte zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen in Abhängigkeit vom Einsatzort, der Häufigkeit des Auftretens und der Dauer des Verbleibens explosionsfähiger Brennstoff/Luft-Atmosphäre, in der sie verwendet werden sollen, in Gerätegruppen und -kategorien. Je häufiger und länger eine Brennstoff/Luft-Atmosphäre in einem als explosionsgefährlich eingestuftem Bereich verbleibt, umso geringer muss die Wahrscheinlichkeit von Zündquellen sein, die ein Gerät verursachen kann.

Für die Bewertung werden Betriebsbereiche in „Zonen“ eingeteilt. Aus dieser Einteilung ergibt sich der Umfang der zu ergreifenden Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten, die durch gefährliche explosionsfähige Atmosphäre gefährdet werden können.

Für Gase, Dämpfe oder Nebel gilt nachfolgende Einteilung:

- Zone 2:** Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.
- Zone 1:** Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln bilden kann.
- Zone 0:** Bereich, in dem explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.

Für brennbare Stäube gilt entsprechend:

- Zone 22:** Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.
- Zone 21:** Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub bilden kann.
- Zone 20:** Bereich, in dem explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.

Geräte werden, abhängig von ihrem Einsatzort, in zwei Gruppen eingeteilt. Gerätegruppe I gilt für Geräte zur Verwendung in Untertagebetrieben von Bergwerken sowie deren Übertageanlagen, die durch Grubengas und/oder brennbare Stäube gefährdet werden können. Gerätegruppe II gilt für Geräte zur Verwendung in den übrigen Bereichen, die durch eine explosionsfähige Atmosphäre gefährdet werden können.

Die Gerätegruppe II wird in Abhängigkeit vom Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre im vorgesehenen Einsatzbereich in drei Kategorien unterteilt.

Geräte der Kategorie 3:

sind so zu konstruieren und herzustellen, dass vorhersehbar zu erwartende Zündquellen, die bei normalem Betrieb auftreten können, vermieden werden.

Geräte der Kategorie 2:

sind so zu konzipieren und herzustellen, dass sogar bei häufig auftretenden Gerätestörungen oder fehlerhaften Betriebszuständen, mit denen üblicherweise gerechnet werden muss, Zündquellen vermieden werden.

Geräte der Kategorie 1:

sind so zu konstruieren und herzustellen, dass Zündquellen selbst bei selten auftretenden Gerätestörungen vermieden werden.

Das bedeutet, dass bei Geräten, bei denen aufgrund ihrer Bauweise und vorgesehenen Betriebsweise bzw. Funktionsweise mit mechanisch erzeugten Funken zu rechnen ist, Aussagen über die Zündwahrscheinlichkeit der möglicherweise entstehenden mechanisch erzeugten Funken gemacht werden müssen. Zahlenwerte, ab welcher kinetischen Schlagenergie mit welcher Wahrscheinlichkeit ein mechanisch erzeugter Funke welche explosionsfähige Atmosphäre zündet, finden sich jedoch nicht in der Literatur.

Nach IEC 60079-1 Ed. 6.0 /L-12/ werden explosionsfähige Atmosphären in vier Explosionsgruppen unterteilt. Klassifizierungsmerkmale sind die Normspaltweite (MESG) und der Mindestzündstrom bzw. das Mindestzündstromverhältnis. Unabhängig davon kann für die charakteristischen Gemische der Explosionsgruppen die Mindestzündenergie (MZE) ermittelt werden.

Die Mindestzündenergien der charakteristischen Gemische (Referenzbrenngase) für die einzelnen IEC-Explosionsgruppen sind Folgende:

IEC-Explosionsgruppe I:

Methan/Luft-Gemische, MZE = 0,29 mJ

IEC-Explosionsgruppe IIA:

Propan/Luft-Gemische
(vergleichbar mit Benzindampf/Luft-Gemischen), MZE = 0,024 mJ

IEC-Explosionsgruppe IIB:

Ethylen/Luft-Gemische, MZE = 0,082 mJ

IEC-Explosionsgruppe IIC:

Acetylen/Luft-Gemische, MZE = 0,019 mJ
Wasserstoff/Luft-Gemische, MZE = 0,017 mJ

Grundsätzlich gilt auch bei den mechanisch erzeugten Funken:

Je geringer die Mindestzündenergie, desto höher die Wahrscheinlichkeit der Zündung einer Brenngas/Luft-Atmosphäre durch einen mechanisch erzeugten Schlagfunken jeweils gleicher kinetischer Schlagenergie. Die Praxis zeigt jedoch, dass es bei den mechanisch erzeugten Funken weitere Einflussgrößen auf die Zündwahrscheinlichkeit gibt, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden.

4 Stand der Forschung

Geräte für den bestimmungsgemäßen Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen müssen die Anforderungen der europäischen Richtlinie 94/9/EG (Explosionsschutzrichtlinie) /L-1/ erfüllen. Die Erfüllung dieser Anforderungen wird in der EG-Konformitätserklärung des Herstellers dokumentiert. Grundlage für die Bewertung der Konformität ist die Zündgefahrenbewertung, die im Wesentlichen die Identifizierung und Bewertung möglicher Zündquellen beinhaltet. Die mechanisch erzeugten Funken sind hierbei eine wichtige Zündquelle.

Aussagen über die Zündwirksamkeit und insbesondere Zündwahrscheinlichkeit von mechanisch erzeugten Schlagfunken in Abhängigkeit von der jeweiligen Brenngas/Luft-Atmosphäre bei bekannter kinetischer Schlagenergie lassen sich nach dem bisherigen Kenntnisstand (vergl. Literaturrecherche in BAM-Forschungsbericht 279 /L-8/) nur sehr vage formulieren, was sowohl bei der Zündgefahrenbewertung als auch bei der Erstellung und Novellierung des für den Explosionsschutz einschlägigen Regelwerkes [/L-4/, /L-5/] problematisch ist. Da jedes Gerät zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen hinsichtlich des Vorhandenseins potenzieller Zündquellen beurteilt werden muss, sind möglichst präzise Werte zur Beurteilung der Zündwahrscheinlichkeit der vorhandenen Zündquellen notwendig. Eine Literaturschau zeigte, dass diese Werte für die Zündquellenart „mechanisch erzeugte Funken“ nicht verfügbar sind. Somit müssen Geräte, bei denen die Gefahr der Entstehung mechanisch erzeugter Stahl-Funken bzw. mechanisch erzeugter zündfähiger Stahl-Funken besteht, noch immer mit großen Sicherheitszuschlägen versehen werden. Dies ist auf Dauer betriebs- und volkswirtschaftlich ein nicht zufrieden stellender Zustand.

Die bisher zu diesem Thema durchgeführten Untersuchungen beschäftigen sich mit empirischen Untersuchungen zur Zündwahrscheinlichkeit und deren Einflussfaktoren, ohne die dafür relevanten statistischen Eigenschaften der Schlagfunken wie Anzahl, Größe oder Oxidationsverhalten zu erfassen /L-9/, /L-10/, /L-13/ bis /L-15/. Die Untersuchungen kommen zu dem Schluss, dass die Zündwahrscheinlichkeit im Wesentlichen von den folgenden Einflussfaktoren abhängt: Der Höhe der kinetischen Schlagenergie, der Zusammensetzung, Mindestzündenergie und Wärmeleitfähigkeit des Brenngas/Luft-Gemisches und dem Härtegrad und der Oxidationsfähigkeit des Werkstoffes.

Die Mindestzündenergie hat einen entscheidenden Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeit. Je geringer die Mindestzündenergie eines explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemisches, umso höher die Wahrscheinlichkeit, dieses durch eine mechanisch erzeugte Zündquelle zur Explosion zu bringen. Auch der Einfluss der oberen und unteren Explosionsgrenze eines Gemisches und des Anstieges der Zündenergie außerhalb der Mindestzündenergie waren bekannt.

Es wurde von Voigtsberger und Schulz /L-9/ beobachtet, dass beim Schlagen auf Kohlenstoffstähle aufgrund der Affinität des Kohlenstoffs zum Sauerstoff bei erhöhter Temperatur die wegfliegenden Partikel gut oxidieren und damit ein höheres Temperaturniveau erreichen. Im Laborversuch wurde ermittelt, dass die Entzündungstemperatur von reinen Eisenpartikeln bei etwa 400 °C liegt. Die Mindesttemperatur unter atmosphärischen Bedingungen, bei der Partikel aus ferritischem unlegiertem Stahl beginnen verbrennen zu können, liegt unter Extrapolation von Messwerten bei etwa 500 °C. Im Brenngas/Luft-Gemisch kann durch den niedrigeren Sauerstoffanteil die Temperatur zum Erreichen der Oxidation je nach Brenngasanteil bis rund 800 °C ansteigen (oder die Oxidation gegebenenfalls ganz ausbleiben). Die oxidierten Stahlpartikel können unter atmosphärischen Bedingungen Temperaturen bis rund 1.775 °C und unter erhöhtem Sauerstoffanteil bis

2.250 °C erreichen. Temperaturen bis 2.300 °C werden auch bei Schleifvorgängen zwischen Kohlenstoffstahl und Korundschleifscheiben erreicht /L-10/. Je höher die Temperatur der Stahlfunken, umso höher ist deren Zündwahrscheinlichkeit im explosionsfähigen Gemisch. Mit zunehmendem Brenngasgehalt eines Brenngas/Luft-Gemisches sinkt der Sauerstoffrestgehalt. Dies vermindert wiederum die Oxidationsmöglichkeit der ferritischen Stahlpartikel.

Partikel erhöhter Temperatur bzw. Funken, die nicht oxidieren oder aufgrund ihrer Werkstoffeigenschaften nicht oxidieren können, in der Literatur oft auch „kalte Funken“ genannt, haben eine deutlich geringere Wahrscheinlichkeit ein Brenngas/Luft-Gemisch zu zünden.

Grundsätzlich stellen alle in Luft funkengebenden Stähle eine potentielle Zündquelle dar. Dies ließ sich durch Schleifversuche, allerdings mit gehärteten Kohlenstoffstählen in Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen, zeigen. Entsprechende Versuche ergaben einen Zündbereich mechanisch erzeugter Stahlfunken von 5,3 Vol.-% bis 74,0 Vol.-% Wasserstoff in Luft. Die unterschiedliche Zündfähigkeit der verschiedenen legierten Stahlsorten resultiert aus den jeweils unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten der Stahlpartikel mit dem vorhandenen Sauerstoff des Brenngas/Luft-Gemisches. Durch den Sauerstoffverbrauch des Stahlpartikels während des Oxidierens findet in dessen direkter Umgebung eine Wasserstoffanreicherung statt. Im Bereich der unteren Explosionsgrenze (UEG) entsteht durch diese Konzentrationsänderung um den Funken herum ein Gemisch mit besserer Zündfähigkeit.

Im Gegensatz zu elektrischen Funken, die jeweils im stöchiometrischen Gemisch am zündwirksamsten sind, sind mechanisch erzeugte oxidationsfähige Stahlfunken eher in dem Bereich wenige Volumenprozent oberhalb der UEG (außer bei Wasserstoff) am zündwirksamsten, weil in diesem Bereich des Gemisches der für die Oxidation des Stahlfunkens notwendige Sauerstoffgehalt des Brenngas/Luft-Gemisches dort am höchsten ist. Trotz des absolut höchsten Sauerstoffgehaltes direkt an der UEG ist jedoch die Zündenergie des Brenngas/Luft-Gemisches für die Zündung durch mechanisch erzeugte Stahlfunken (nicht Funkenregen aus Schleifvorgängen) zu hoch. Deshalb lässt sich beispielsweise Wasserstoff im Bereich der UEG bei 4,0 Vol.-% H₂ in Luft durch mechanisch erzeugte Stahlfunken nicht zünden. Bei rund 8,0 Vol.-% H₂ in Luft sind dann aber sehr wohl Explosionen möglich.

Bezüglich des Zusammenhangs zwischen der Größe eines abgetrennten Partikels und dessen Ausgangstemperatur bzw. Oxidationsmöglichkeit wurden Versuche mit einer Fräsmaschine durchgeführt /L-9/. Um ein Stahlpartikel abzutrennen, dessen Temperatur allein durch die eingetragene Abtren- und Reibarbeit oberhalb der Entzündungstemperatur von 400 °C liegt, reicht beim Bearbeitungsverfahren „Fräsen“ eine eingetragene Energie zum Spanabheben in Höhe von $0,13 \cdot 10^{-2}$ Nm aus. Man hatte herausgefunden, dass die Spanlänge dabei im Gegensatz zur Ausgangstemperatur des betrachteten Werkstückes keinen Einfluss auf die Höhe der Temperatur des abgetrennten Spanes nach dem Abtrennvorgang hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der vorangegangene Wärmeenergieeintrag sich zu der Abtren- und Reibarbeit addiert und so das abgetrennte Partikel eher über die Entzündungstemperatur bringt. Direkt übertragbare Aussagen über den Einfluss der Partikelgröße auf die Zündwahrscheinlichkeit wurden nicht getroffen.

Rechnerisch ist ermittelt worden /L-9/, dass bei einem Schlagvorgang zwischen ferritischen nicht gehärteten Stählen die Explosion eines Brenngas/Luft-Gemisches nur durch plastische Deformation, d. h. ohne die Abtrennung von Partikeln, nicht möglich ist. Dazu wäre ein Verformungsgrad in Höhe von 36:1 notwendig, der ohne Bruch eines normalen Stahlwerkstoffes nicht erreichbar ist.

Die höhere Zündwahrscheinlichkeit von oxidierenden Teilchen, die zu leuchtenden Funken werden, gegenüber nichtoxidierenden Teilchen erhöhter Temperatur, hat ihre Ursache im Oxidationsvorgang des abgetrennten Stahlteilchens. Dittmar /L-10/ führt dazu aus, dass ein einzelnes abgetrenntes Stahlteilchen, das nicht auf ein höheres Temperaturniveau oxidiert, im allgemeinen nicht ausreicht, um selbst sehr reaktionsfreudige Gemische aus Acetylen/Luft oder Wasserstoff/Luft zu zünden. Erst wenn die wegen des Kohlenstoffgehaltes oxidationsfähigen Stahlteilchen im Sauerstoff des Brenngas/Luft-Gemische selbst verbrennen und damit ihre Verbrennungswärme als Zündenergie für das explosionsfähige Brenngas/Luft-Gemisch zur Verfügung stellen, werden sie zur relativ sicheren Zündquelle. Es zeigte sich also, dass – wie schon bei der einfachen

Betrachtung der Funkengarbe – erst die Verbrennung der Teilchen diese zu zündfähigen Funken werden lässt.

Der Durchmesser des Teilchens bestimmt das Volumen und somit auch den Energieinhalt. Ein kleiner Funke muss folglich für den gleichen Energieinhalt und somit die gleiche Zündfähigkeit eine höhere Temperatur aufweisen. Nach Messungen von Dittmar /L-15/ an zündfähigen Stahl-Schleiffunken von ferritischen Stählen liegt der Minstdurchmesser der einzelnen oxidationsfähigen Teilchen in der Größenordnung von 0,01 mm bis 0,1 mm. Allerdings gibt es auch eine obere Grenze für die Teilchengröße, bei deren Überschreitung die Verbrennung des Teilchens selbst nicht mehr in Gang kommt. Die größten, jedoch bei Schleifvorgängen zwischen ferritischem Stahl und einer Korundschleifscheibe aufgefundenen Teilchen, die oxidiert und zu kleinen Kugeln geschmolzen waren, hatten einen Durchmesser von 0,2 mm.

Der Durchmesser hat einen Einfluss auf die Lebensdauer eines Funkens. Dittmar vermutete, dass die Lebensdauer eines Funkens in Verbindung mit der Wärmeleitfähigkeit einen Einfluss auf die Zündfähigkeit hat. Normalerweise beträgt die Lebensdauer von oxidierten Funken rund 0,01 s. Hat ein Funke eine Lebensdauer im Bereich von 0,001 s und das Brenngas/Luft-Gemisch eine hinreichend kleine Wärmeleitfähigkeit, wird angenommen, dass es zu keiner Explosion mehr kommen kann.

Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden:

Die bisher veröffentlichten Untersuchungen können in die folgenden drei Komplexe unterteilt werden /L-3/ bis /L-16/:

- Untersuchungen zu den Einflussfaktoren für das Entstehen mechanisch erzeugter Funken, teilweise unter Verwendung oder Bezug auf die BAM-Prüfmaschinen, wobei ein nicht unerheblicher Teil die Problematik der Schleiffunken betraf,
- Betrachtung von konkreten praktischen Problemen, wie beispielsweise die Entzündung von Kühlschmierstoffen an Werkzeugmaschinen durch heiße Späne und ggf. durch Funken und
- der Sonderfall des Gebrauches von Werkzeugen.

Dabei wurden folgende Aussagen gemacht:

- Die Zündwahrscheinlichkeit von mechanisch erzeugten Schlagfunken hängt im Wesentlichen von 5 Einflussfaktoren ab. Diese sind die Höhe der kinetischen Schlagenergie, die Mindestzündenergie des Brenngas/Luft-Gemisches, die Zusammensetzung des Brenngas/Luft-Gemisches, der Härtegrad eines Werkstoffes und die Oxidationsfähigkeit des Werkstoffes.
- Funken aus oxidationsfähigen Werkstoffen oxidieren bei einem hohen Luft-Anteil im Brenngas/Luft-Gemisch am ehesten.
- Das Oxidationsverhalten von Funken aus Stählen ist abhängig von deren Kohlenstoff- und Chromgehalt. Schnell hintereinander geschlagene Schlagfunken oder Funkenregen (aus hier nicht betrachtenden Schleifvorgängen) haben, trotz eines anderen Zündmechanismus, eine sehr viel höhere Zündwahrscheinlichkeit als einzelne Schlagfunken.

Aussagen über die Zündwirksamkeit und insbesondere Zündwahrscheinlichkeit von mechanisch erzeugten Schlagfunken in Abhängigkeit von der jeweiligen Brenngas/Luft-Atmosphäre bei bekannter kinetischer Schlagenergie lassen sich nach dem bisherigen Kenntnisstand nur sehr vage formulieren.

Eine umfangreiche Literaturrecherche /L-8/ auf diesem Gebiet bestätigte diese Wissenslücke, die sowohl bei der Zündgefahrenbewertung als auch bei der Erstellung und Novellierung des für den Explosionsschutz einschlägigen Regelwerkes problematisch ist.

5 Stand der neueren Forschungsergebnisse der BAM

In den neueren im BAM-Forschungsbericht 279 /L-8/ veröffentlichten Untersuchungen, wurde für die Referenzbrenngase aller IEC-Explosionsgruppen /L-12/ der Zusammenhang zwischen Schlagenergie, Gemischzusammensetzung, Oberflächenrauigkeit der Schlagplatte und Zündwahrscheinlichkeit ermittelt, wobei als Schlagenergie die zunächst nur die Werte $W = 3 \text{ Nm}$, 10 Nm und 190 Nm dienten.

Ferner wurde die Zündwahrscheinlichkeit für verschiedene Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppen I (Methan), IIA (Propan), IIB (Ethylen) und IIC (Acetylen und Wasserstoff) bei zwei kinetischen Schlagenergien und unter Verwendung der bereits erörterten Schlagkinematik und Geometrie der Schlagpartner ermittelt. Dabei wurden verschiedene Einflussparameter (Gemischzusammensetzung, Oxidationsverhalten, Wärmeleitfähigkeit und -kapazität des Gemisches, Oberflächenrauigkeit, Partikelgeschwindigkeit und -größe) untersucht und die Ergebnisse ausgewertet.

Obwohl sowohl Schlag- als auch Reib- und Schleiffunken zur Zündquellenart mechanisch erzeugte Funken gehören, wurden die Reib- und Schleiffunken wegen der grundsätzlich anderen Randbedingungen in dieser Arbeit nicht behandelt.

Die folgenden grundsätzlichen Schlussfolgerungen konnten gezogen werden:

1. Kinetische Schlagenergie in Höhe von $W = 3 \text{ Nm}$:

Unterhalb dieser kinetischen Schlagenergie ist es mit der im Rahmen dieser Untersuchung angewendeten Schlagkinematik und Geometrie der Schlagpartner unwahrscheinlich einzelne Stahlpartikel so abzutrennen, dass sie in der Lage sind, auf ein zündgefährliches Temperaturniveau zu oxidieren. Dieser Wert bestätigte (unter Betrachtung der Messtoleranz bei der Ermittlung der kinetischen Schlagenergie ($\pm 8,4 \%$)) die Versuche von Schulz und Dittmar, deren Grenzwert bei $W = 3,4 \text{ Nm}$ lag /L-15/. Im nicht oxidierten Zustand stellen mit dieser Schlagenergie abgetrennte Partikel keine Zündgefahr dar.

2. Kinetische Schlagenergie in Höhe von $W = 10 \text{ Nm}$:

Mit dieser niedrigen kinetischen Schlagenergie abgetrennte einzelne Stahlpartikel können nur dann zur wirksamen Zündquelle werden, wenn diese durch einen Oxidationsvorgang auf ein höheres Temperaturniveau gelangen. Eine Zündung durch oxidierte mechanische Stahl-Schlagfunken wurde nur bei den untersuchten Brenngas/Luft-Gemischen der IEC-Explosionsgruppe IIC beobachtet. Aufgrund von Literaturangaben kann aber auch in der IEC-Explosionsgruppe IIB eine Zündgefahr in der Praxis nicht ausgeschlossen werden. Findet keine Oxidation der abgetrennten Partikel statt, ist in allen IEC-Explosionsgruppen bei der hier angewendeten Schlagenergie nicht mit einer Zündung durch einzelne mechanisch erzeugte Stahl-Schlagfunken zu rechnen.

Die höchste Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken betrug für Acetylen/Luft-Gemische (IEC-Explosionsgruppe IIC) rund $3,0 \%$ in einen weiten Bereich der Gemischzusammensetzung. Bei Wasserstoff/Luft-Gemischen (IIC) lag die Zündwahrscheinlichkeit bei etwa $1,5 \%$ und dort auch nur im Bereich der Gemisch-Zusammensetzung unter $13,5 \text{ Vol.-%}$ Wasserstoffanteil in Luft.

3. Kinetische Schlagenergie in Höhe von $W = 190 \text{ Nm}$:

Mit dieser hohen kinetischen Schlagenergie abgetrennte einzelne Partikel können unabhängig von einem möglicherweise stattfindenden Oxidationsvorgang allein aufgrund ihres durch den Abtrennvorgang bedingten hohen Energieinhaltes und der hohen Partikelgröße unabhängig von der Gemisch-Zusammensetzung ein Brenngas/Luft-Gemisch zünden.

Die Zündwahrscheinlichkeit lag bei den betrachteten Brenngas/Luft-Gemischen der IEC-Explosionsgruppe IIC bei 100 %. Bei den anderen untersuchten Brenngas/Luft-Gemischen bewegte sich die Zündwahrscheinlichkeit zwischen 16,6 % (IIB) bzw. 6,7 % (IIA) und 1,1 % (I).

4. Weitere Ergebnisse:

Die experimentellen Untersuchungen haben weiter gezeigt, dass die Zündfähigkeit mechanisch erzeugter Funken grundsätzlich von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig ist, über deren Zusammenwirken keine statistischen und/oder grundsätzlichen Erkenntnisse vorliegen. Eine Interpolation der Ergebnisse zwischen den kinetischen Schlagenergien von 10 Nm und 190 Nm ist daher nicht möglich.

Die Abbildung 1 zeigt schematisch die Verknüpfung der Einflussgrößen, die auf ein durch mechanisch erzeugte Stahl-Schlagfunken verursachtes Zündereignis wirken.

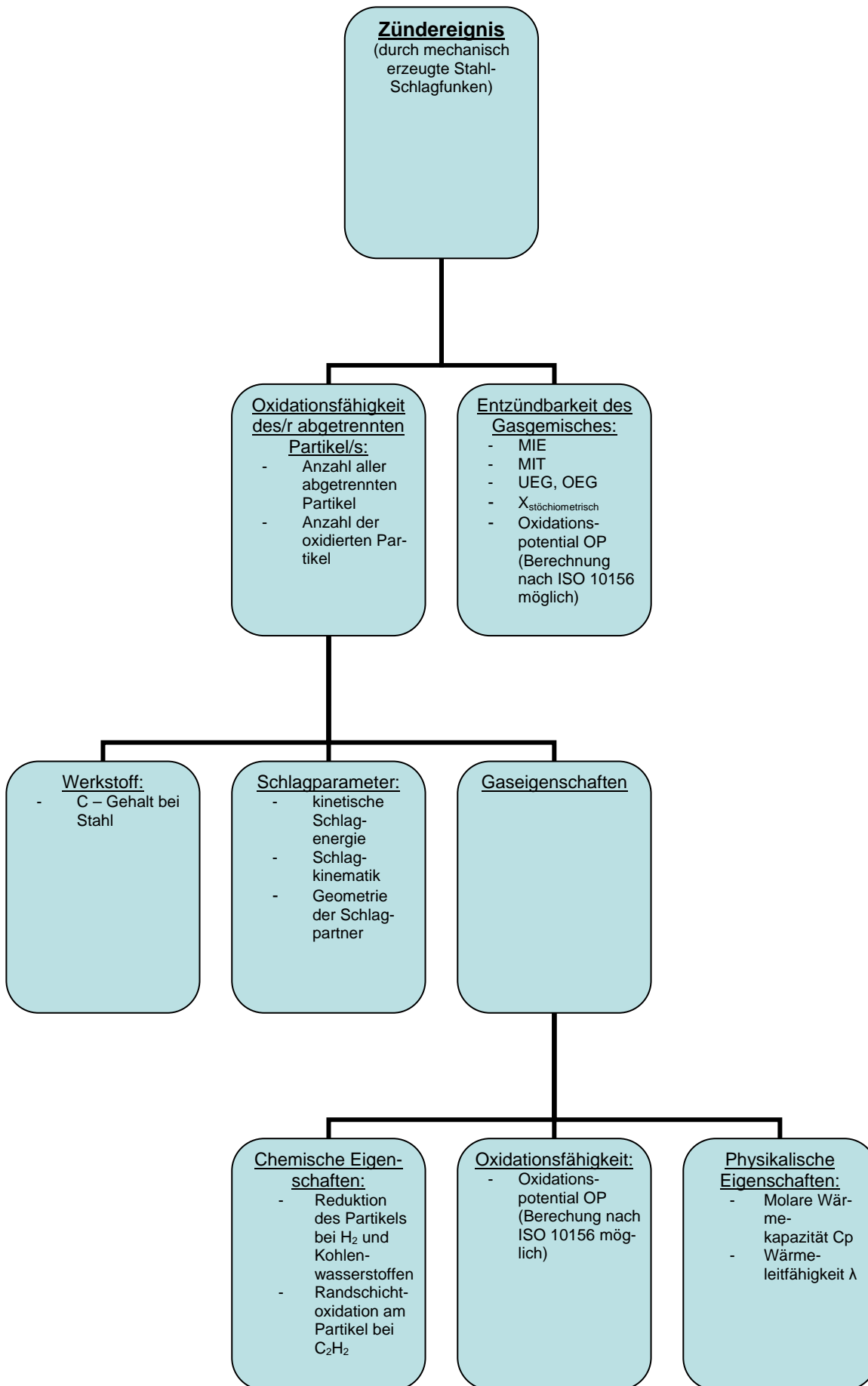


Abb 1: Verknüpfung der Einflussgrößen, die auf ein Zündereignis durch mechanisch erzeugte Stahl-Schlagfunken wirken

6 Weiterführung der Forschung und statistische Untersuchungen zu abgetrennten Partikeln

Da bei den Untersuchungen für den BAM-Forschungsbericht 279 /L-8/ nur grobe Abstufungen bei den verwendeten kinetischen Schlagenergien möglich waren, sollten diese bei den Untersuchungen für den vorliegenden Forschungsbericht verkleinert werden. Ein Ziel dieser Forschungsarbeit war es, Werte für die Zündwahrscheinlichkeit von Stahl-Schlagfunken mit der homogenen Werkstoffpaarung unlegierter Baustahl St52-3 (Werkstoffnummer 1.0570) in Abhängigkeit von der kinetischen Schlagenergie – in relativ kleinen Stufen von 10 Nm bis 277 Nm - und der Mindestzündenergie gemäß der IEC-Explosionsgruppen /L-12/ verwendeten Brenngas/Luft-Gemische zu ermitteln.

Ein weiteres Ziel der aktuellen Forschungsarbeit war die statistische Erfassung von Eigenschaften, Verhalten und Zündfähigkeit einzelner abgetrennter Partikel unter dem Einfluss von Schlagenergie und Gemischzusammensetzung. Darauf aufbauend sollte die vermutete komplexe Interaktion von Parametern und deren Auswirkung auf die Zündwahrscheinlichkeit genauer untersucht werden.

7 Design der weiterführenden Untersuchungen

Die Untersuchungen erfolgten sowohl mit der kleinen Schlagfunkenmaschine als auch einer modifizierten Version der großen Schlagfunkenmaschine, die beide bereits für die Untersuchungen zum Forschungsbericht 279 /L-8/ verwendet wurden. Diese Maschinen haben den im Folgenden beschriebenen prinzipiellen Aufbau. Es handelt sich dabei um einen zu einer Seite offenen Zylinderabschnitt mit innen liegendem Schlaghebel und Aufnahmevorrichtung des Schlagbolzens sowie innen liegender Schlagplatte. Das Ausströmen des Brenngas/Luft-Gemisches durch die offene Seite verhinderte eine transparente Plastikfolie. Die Plastikfolie dient gleichzeitig als Berstscheibe. Die Schlagfunkenmaschine wird mit dem explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemisch gefüllt, das in einem Mischgerät hergestellt wird. Danach schlägt der Schlagbolzen mit einer definierten kinetischen Schlagenergie auf die Schlagplatte.

Zur Aufzeichnung der Versuche diente eine Hochgeschwindigkeitskamera mit einer zeitlichen Auflösung von bis zu 250 Bildern/s.

7.1 Prüfmaschine und mechanischer Ablauf

Die Schlagfunkenmaschine wird mit einem explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemisch (Versuchsanlage siehe Abb. 2) gefüllt, dann wird unter definierten Bedingungen mit dem Schlagbolzen bei gewählter kinetischer Schlagenergie auf die Schlagplatte geschlagen. Die dabei entstehenden Funken können das explosionsfähige Gemisch entzünden. Es kann jede beliebige Werkstoffpaarung aus festen Materialien geprüft werden.

Definierte Bedingungen sind erforderlich, um die Schlagfunkenversuche reproduzierbar durchführen zu können. Dazu gehören die Kalibrierung der kinetischen Schlagenergie, die geometrische Form des Schlagbolzens und die Art des Schlages. Die kinetische Energie des Schlages ist definiert als $W = 0,5 \cdot m \cdot v^2$. Sie beschreibt die eingebrachte Energie, mit der der Schlaghebel (Masse m) den Schlag bis zum Stillstand des Schlaghebels auf der Schlagplatte ausführt (Aufprallgeschwindigkeit v). Die Kraft setzt sich multiplikativ aus Masse und Beschleunigung zusammen. Eine Änderung der eingebrachten Kraft ergibt sich durch die Verwendung einer anderen Feder. Durch die Entlastung der vorgespannten Feder erfolgt eine Beschleunigung des Schlaghebels bis zum Aufschlagen auf die Schlagplatte. Der Aufsetzpunkt des Schlaghebels ist auch der Nullpunkt der (entspannten) Feder. Somit wird gewährleistet, dass sich die Feder des Schlaghebels bis zum Aufsetzen auf die Schlagplatte voll entspannt und die gesamte Vorspannkraft in Beschleunigung umgesetzt wird.

Die Halter der Schlagplatte bestehen jeweils aus massivem Stahlguss, um die eingebrachte Schlagenergie nicht durch Einfedern abzubauen. Der Schlagbolzen besteht aus \varnothing 10 mm Rund-Vollmaterial mit einer 90 °-Kegelspitze, die mit einer \varnothing 3 mm ebenen Fläche abgeflacht ist. Vor Beginn einer Versuchsreihe wird jeder neue Schlagbolzen einige Male „eingeschlagen“ und beginnt somit je nach kinetischer Schlagenergie bereits mit einem Durchmesser an der Spitze des Schlagbolzens von etwa \varnothing 3 mm bis \varnothing 5 mm. Sobald dieser Durchmesser über \varnothing 6 mm steigt, wird der Schlagbolzen ausgetauscht.

Der streifende Schlag ist der energiereichste Schlag, da durch den spitzen Winkel zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte sowohl Schlag- als auch Reibvorgänge wirken und gleichzeitig hohe Flächenpressungen entstehen. Daher besteht bei dieser Art des Schlages die höchste Wahrscheinlichkeit, Partikel erhöhter Temperatur abzutrennen. Es bedarf hierbei großer Erfahrung, um den so genannten streifenden Schlag bei ständig verschleißendem Schlagbolzen bei jedem neuen Schlagvorgang effektiv einzustellen. Bei dem streifenden Schlag soll der Schlaghebel bzw. der Schlagbolzen während des Schlages über die Schlagplatte streifen und bei der Nulllage des Schlaghebels (oder kurz dahinter) stehen bleiben. Die Nulllage ist die Lage, bei der die Feder des Schlaghebels voll entspannt ist und der Schlagbolzen mittig auf der Schlagplatte stehen bleibt. Kommt es vorher zum Stillstand des Schlaghebels, ist kein richtiger streifender Schlag ausgeführt worden. Pendelt der Schlaghebel hingegen über seinen Nullpunkt deutlich hinaus, ist nicht die gesamte Federkraft in den Schlag- und Reibvorgang zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte eingebracht worden.

Als Brenngase für die verwendeten Brenngas/Luft-Gemische wurden die Referenzbrenngase der IEC-Explosionsgruppen gemäß IEC 60079:2004 /L-12/ verwendet.

7.2 Technische Daten der Prüfmaschine, Schlaghebelgeschwindigkeiten und Flächenpressungen

Der gesamte Versuchsaufbau einschließlich der Gasmischanlage ist schematisch in der Abbildung 2 dargestellt.

Die kleine Schlagfunkenmaschine (vergl. /L-8/) kann den Bereich der kinetischen Schlagenergie $W = 3$ Nm und 10 Nm abdecken.

Bei der großen Schlagfunkenmaschine (siehe Abb. 3) wird die Vorspannkraft der Feder über eine Torsionsfeder aufgebracht und ebenfalls durch einen Hebel bis zur Auslösung gehalten. Um alle Einflussparameter wie z. B. Dämpfungen durch die großen Lagerungen mit zu erfassen, wurde auch hier zur Kalibrierung u. a. die Geschwindigkeit des Schlaghebels unmittelbar vor dem Aufsetzen auf die Schlagplatte mit Hilfe eines schnell ansprechenden Lichtschrankenpaares gemessen. Das Spektrum der kinetischen Schlagenergien der großen Schlagfunkenmaschine kann in relativ kleinen Stufen den Bereich von $W = 31$ Nm bis 277 Nm abdecken (ggf. auch mit 10 Nm).

Die jeweils für die eingesetzten Torsionsfedern gemessenen Geschwindigkeiten des Schlaghebels unmittelbar vor dem Aufschlagen auf die Schlagplatte und die u. a. daraus resultierende kinetische Schlagenergie sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Abweichung der Messwerte für die kinetische Schlagenergie beträgt +/- 8,2 %. Errechnet wurde die Abweichung aus den jeweiligen Messtoleranzen der einzelnen Messverfahren (Messtoleranz der Wägung und des Vermessens, Messtoleranz und Ansprechzeit des Oszilloskops und der Lichtschranken, usw.) sowie deren Aufsummierung.

Tabelle 1: Geschwindigkeiten und kinetische Energien des Schlaghebels der großen Schlagfunkenmaschine mit jeweils unterschiedlichen Torsionsfedern

| Torsionsfeder-Kurzzeichen | kinetische Energie W [Nm] | Schlaghebelgeschwindigkeit v [m/s] |
|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| <i>B9-3Nm</i> ¹⁾ | 3 | 12,4 |
| <i>B6-10Nm</i> ¹⁾ | 10 | 10,3 |
| K10 | 31 | 5,7 |
| H7= | 61 | 8,1 |
| H7- | 72 | 8,8 |
| H7 | 80 | 9,3 |
| J7 | 126 | 11,6 |
| 1Z | 190 | 14,3 |
| 1V | 220 | 15,4 |
| 1V+ _{1Zahn} ²⁾ | 277 | 17,3 |

¹⁾ Die Werte der kleinen Schlagfunkenmaschine werden mit Blattfederpaketen und nicht mit Torsionsfedern erreicht. Daraus resultieren im Vergleich der beiden Schlagfunkenmaschinen andere Werte für die Schlaghebelgeschwindigkeit und Flächenpressung.

²⁾ Die Torsionsfeder mit dem Kurzzeichen 1V kann zur Erreichung einer höheren kinetischen Schlagenergie um einen Zahn (der Torsionsfeder-Verzahnung auf der Schlaghebelseite) vorgespannt werden.

Die Flächenpressung zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte beträgt für die Schlagfunkenversuche mit der kleinen SFM in der Einstellung $W = 3 \text{ Nm}$ $F/A = 0,41 \text{ N/mm}^2$ und in der Einstellung $W = 10 \text{ Nm}$ $F/A = 1,36 \text{ N/mm}^2$, bezogen auf eine wirksame Fläche des Schlagbolzens von $\varnothing = 3,0 \text{ mm}$ (abweichend von /L-8/).

Für die große SFM sind die jeweiligen Flächenpressungen zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte in Abhängigkeit von der kinetischen Schlagenergie, dem Gebrauchszustand des Schlagbolzens (Durchmesser der Spitze) und des Reibwegs in der Tabelle 2 ersichtlich.

Durch unterschiedliche Federbauarten für die kleine Schlagfunkenmaschine (Blattfedern) und die große Schlagfunkenmaschine (Torsionsfeder) und den entsprechend unterschiedlichen Schlaghebelmassen resultieren bei gleichen kinetischer Schlagenergie (aus hier nicht weiter beschriebenen Vergleichsversuchen) jeweils unterschiedliche Schlaghebelgeschwindigkeiten und Flächenpressungen. Da die Einflussgröße Relativgeschwindigkeit noch nicht abschließend beurteilt werden kann, sind daher die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar.

Tabelle 2: Werte der Flächenpressungen zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte für die große Schlagfunkenmaschine mit jeweils unterschiedlichen Torsionsfedern:

Die Werte wurden als Näherungswert errechnet ohne Betrachtung von Reibung an der Schlagstelle, Kaltschweißvorgängen, Materialverlagerungen, Federrückstellkraft bei Ausschlag des Schlaghebels über den Nullpunkt (Wert A_1 : Schlagbolzen neu, \varnothing 3,0 mm, Wert A_2 : Schlagbolzen gebraucht bzw. „eingeschlagen“, $\varnothing \approx 6,0$ mm, Gesamtauslenkung des Schlaghebels $\varphi_{\max} = 16,1^\circ$, Schlaghebel-länge $L = 427$ mm).

Der Wert A_1 und die daraus resultierende Flächenpressung sind in Klammern gesetzt, da jeder neue Schlagbolzen vor Beginn einer Versuchsreihe einige male „eingeschlagen“ wird und je nach Höhe der kinetischen Schlagenergie bereits mit einem Durchmesser von etwa \varnothing 3 mm bis \varnothing 5 mm startet. Bei etwa $\varnothing \approx 6$ mm wird der verschlissene Schlagbolzen ausgetauscht.

| Torsionsfeder-Kurzzeichen | kinetische Energie W [Nm] | Flächenpressung F/A [N/mm ²] ($A_1=7,07$ mm ²), $A_2\approx 28,3$ mm ² ($\varnothing_1=3$ mm), $\varnothing_2\approx 6$ mm) | Reibweg L [mm] \equiv $\sin \alpha$ [°] |
|-----------------------------------|---------------------------|--|---|
| K10 | 31 | ($\approx 3,3$ bis) $\approx 1,2$ | $\approx 45 \equiv 6,0^\circ$ |
| H7= | 61 | ($\approx 6,4$ bis) $\approx 1,6$ | $\approx 45 \equiv 6,0^\circ$ |
| H7- | 72 | ($\approx 7,6$ bis) $\approx 1,9$ | $\approx 45 \equiv 6,0^\circ$ |
| H7 | 80 | ($\approx 9,4$ bis) $\approx 2,4$ | $\approx 50 \equiv 6,7^\circ$ |
| J7 | 126 | ($\approx 16,4$ bis) $\approx 4,1$ | $\approx 55 \equiv 7,4^\circ$ |
| 1Z | 190 | (≈ 31 bis) $\approx 7,8$ | $\approx 70 \equiv 9,4^\circ$ |
| 1V | 220 | (≈ 39 bis) $\approx 9,7$ | $\approx 75 \equiv 10,1^\circ$ |
| 1V+ _{1Zahn} ¹ | 277 | (≈ 49 bis) $\approx 12,2$ | $\approx 75 \equiv 10,1^\circ$ |

¹⁾ Die Torsionsfeder mit dem Kurzzeichen 1V kann zur Erreichung einer höheren kinetischen Schlagenergie um einen Zahn (der Torsionsfeder-Verzahnung auf der Schlaghebelseite) vorgespannt werden.

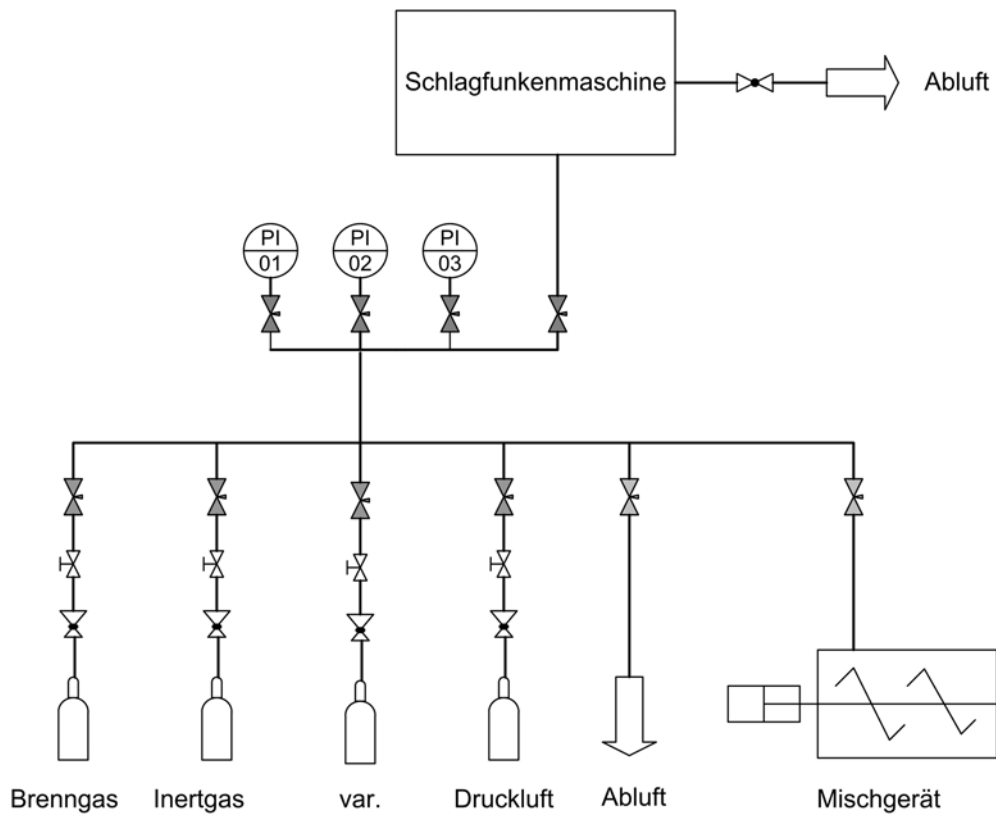
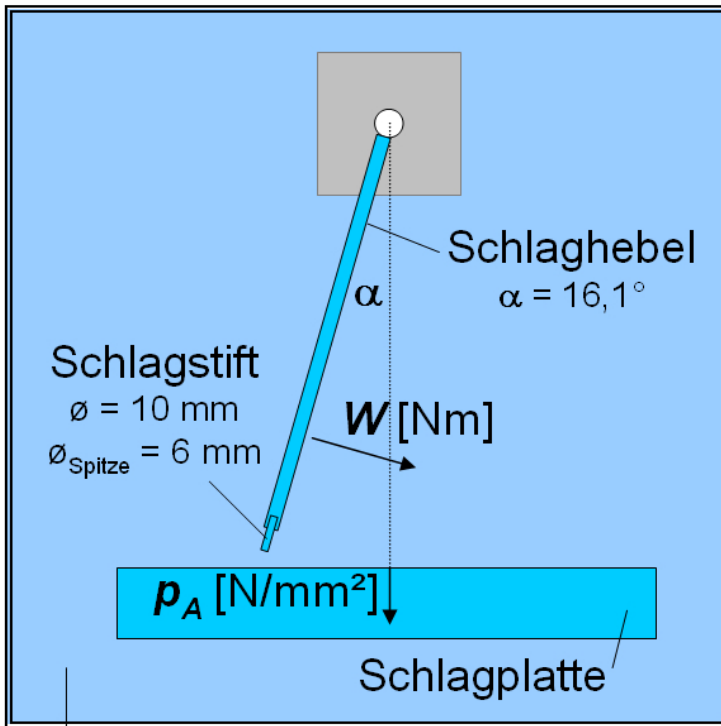


Abb. 2: Versuchsanlage zur Untersuchung der Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter Schlagfunken – schematischer Aufbau



$c_{\text{Brennstoff}} \text{ [Vol-\%]}$

Abb. 3-1: Große Schlagfunkenmaschine – schematischer Aufbau

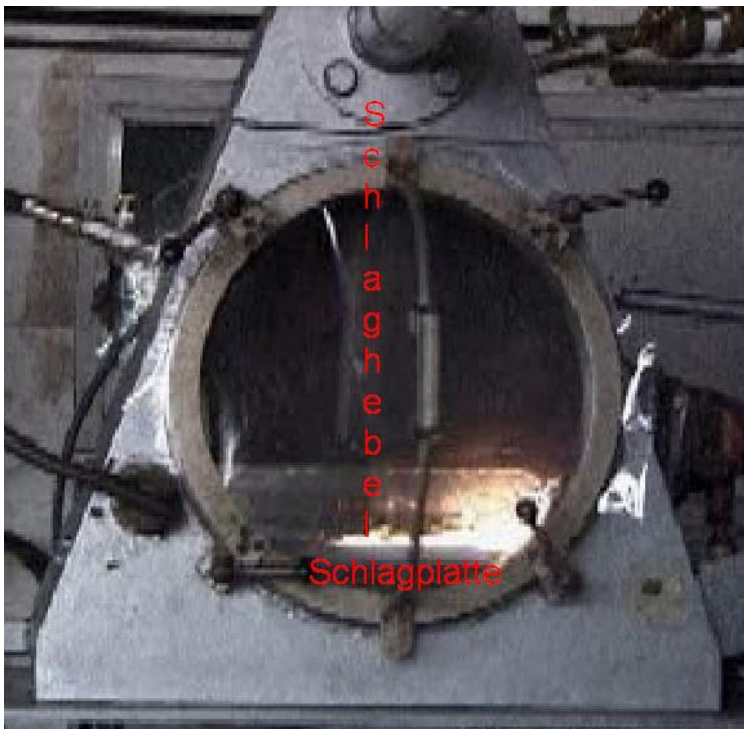


Abb. 3-2: Große Schlagfunkenmaschine im Moment eines ausgeführten Schlagvorganges mit Funkengarbe: Schlaghebel mit eingesetztem Schlagbolzen, Schlagplatte

7.3 Prüfobjekte und Werkstoffe

Die Prüfobjekte haben die folgenden Abmaße:

- Schlagplatte L = 185 mm • B = 100 mm • T = 15 mm (sowie weiteren Sondermaßen) (185 mm bezogen auf die Schlagseite)) und
- Schlagbolzen \varnothing 10 mm • L = 50 mm mit 90 °Kegelspitze, die mit einer \varnothing 3 mm ebenen Fläche abgeflacht ist.

Schlagbolzen und Schlagplatte bestehen jeweils aus

- unlegiertem Baustahl Stahl St52-3 mit der Werkstoffnummer 1.0570.

Für eine Kontrollgruppe von Schlagvorgängen in Luft wurde für die Kamerabilder neben der Werkstoffpaarung unlegierter Baustahl / unlegierter Baustahl auch die Werkstoffpaarung

- Edelstahl X5CrNi18-10 mit der Werkstoffnummer 1.4301 (Schlagbolzen)
- gegen
- unlegierten Baustahl St52-3 mit der Werkstoffnummer 1.0570 (Schlagplatte)

verwendet.

Die verwendeten unlegierten Baustähle haben einen Kohlenstoffgehalt von max. 0,22 %. Auf ungehärtete ferritische Stähle ähnlicher Zusammensetzung und Eigenschaften lassen sich die hier erzielten Ergebnisse vermutlich übertragen.

Um die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse mit den bisher in der BAM durchgeführten - Untersuchungen vergleichen zu können, wurde der bisherige Versuchsstandard von Schlagbolzen und Schlagplatte beibehalten.

Mit diesen Einstellungen ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen älterer Untersuchungen möglich. Dies könnte auch dann von Bedeutung sein, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Weiterentwicklung des europäischen Regelwerkes im Rahmen des Explosionsschutzes, wenn ein normiertes Prüfverfahren zur Beurteilung der Gefahr der Entstehung zündfähiger mechanisch erzeugter Funken angestrebt wird.

Die Versuchseinstellungen ergaben sich aus zwei Gründen:

Zum einen ist bei einer kleinen und spitzen Geometrie aufgrund der Flächenpressung eher mit dem Abtrennen von Partikeln erhöhter Temperatur und somit zündfähigen mechanisch erzeugten Funken zu rechnen. Damit sind (bis auf wenige Sonderfälle) alle möglichen geometrischen Formen der mechanisch erzeugten Schlagfunken abgedeckt.

Zum anderen trennt der so genannte streifende Schlag im Gegensatz zum stumpfen Schlag durch das Streifen über die Oberfläche des Schlagpartners am ehesten Partikel ab.

7.4 Versuchsablauf und Prüfgemische

In /L-8/ wurde die Oxidationsfähigkeit von Stahl-Schlagfunken bei W = 3 Nm und 10 Nm sowie die Zündwahrscheinlichkeit in den Stufen W = 3 Nm, 10 Nm und 190 Nm untersucht.

In den Untersuchungen für den vorliegenden Bericht wurde die Zündwahrscheinlichkeit von Stahl-Schlagfunken aller Referenzbrenngase der IEC-Explosionsgruppen /L-12/ mit kinetischen Schlagenergien in relativ kleinen Stufen von W = 10 Nm bis 277 Nm ermittelt.

Die Versuche dazu wurden wie folgt durchgeführt:

- Schlagpartner unlegierter Baustahl gegen unlegierten Baustahl.
- Für eine Kontrollgruppe in Luft (nur für Kamerabilder) wurde Edelstahl (Schlagbolzen) gegen unlegierten Baustahl (Schlagplatte) verwendet.
- Es wurde - außer bei Wasserstoff - jeweils das stöchiometrische Gemisch verwendet. Vorversuche /L-8/, graphisch dargestellt in Abbildung 4, haben gezeigt, dass Schlagfunken bei $W = 10$ Nm aus oxidationsfähigem unlegiertem Stahl-Werkstoff im Bereich bis 13,5 Vol.-% Brenngasanteil in Luft die meisten oxidierten Funken erzeugen. Oberhalb von 13,5 Vol.-% Brenngasanteil in Luft sinkt die Oxidationsfähigkeit der abgetrennten Partikel und über 25 Vol.-% waren praktisch keine oxidationsfähigen abgetrennten Partikel mehr zu beobachten.
- Die stöchiometrische Gemischzusammensetzung der Referenzbrenngase der IEC-Explosionsgruppen liegt unterhalb der zur Erzeugung der höchsten Anzahl von oxidierten Funken optimalen Gemischzusammensetzung von maximal 13,5 Vol.-%.
- Für Wasserstoff/Luft-Gemische wurde in /L-8/ festgestellt, dass die beste Oxidationsfähigkeit der abgetrennten Partikel (und somit die höchste Zündwahrscheinlichkeit) bei 8,5 Vol.-% bis 10,0 Vol.-% Wasserstoffanteil in Luft liegt; also deutlich im unterstöchiometrischen Bereich. Bereits bei 18,5 Vol.-% H_2 in Luft waren mit 10 Nm nur noch 2,4 % an oxidierten Funken zu beobachten.
- Die Schlagfunkenversuche über 10 Nm wurden ebenfalls mit dem für mechanisch erzeugte Stahl-Schlagfunken ermittelten zündfähigsten Gemisch durchgeführt, um jeweils den Fall der größten Zündwahrscheinlichkeit zu ermitteln.
- Jeweils vor dem Beginn einer neuen Versuchsreihe erfolgte eine elektrische Zündung des Prüfgemisches, da sich dadurch freie Radikale an der Behälterinnenwand absetzen. Durch das Absetzen von freien Radikalen an der Behälterinnenwand können für eine bestimmte Zeitdauer nachfolgende Explosionen leichter erfolgen.
- Die Schlagfunkenmaschine wurde mindestens mit dem 3,5-fachen Innenvolumen zur Sicherstellung der benötigten Brenngasgemischkonzentration gespült.
- Falls keine Explosion durch mechanisch erzeugte Funken erzeugt werden konnte, erfolgte der Nachweis der Explosionsfähigkeit des jeweiligen Prüfgemisches durch eine elektrische Zündung.
- Bei der Verwendung von neuen Schlagbolzen und ggf. Schlagplatten wurden (bei Energien unterhalb von 190 Nm) vor dem Beginn bzw. der Fortführung der Schlagfunkenversuche einige Schlagversuche ohne Prüfgemisch vorgenommen, um an der Schlagstelle eine gewisse Oberflächenrauigkeit zwecks deutlich besserer Wahrscheinlichkeit zur Funkenentstehung zu bekommen /L-8/.
- Die im Rahmen der Arbeiten zu /L-8/ große Anzahl von Vorversuchen wurde in die statistische Auswertung mit einbezogen.
- Die ersten 7 bis 10 Schlagfunkenversuche wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Mehr Kameraaufnahmen wurden jeweils nicht gemacht, da die Auswertung aller Einzelbilder ohnehin einen großen Zeitaufwand bedeutete.

7.6 Datenanalyse zur Erfassung mechanischer und reaktionskinetischer Einflussgrößen

Es sollte untersucht werden, welche partikelbezogenen Parameter Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeiten haben. Für die statistische Analyse dieser Einflussgrößen wurden für alle Referenz-Brenngasgemische folgende Abhängigkeiten von der Schlagenergie betrachtet:

- die Anzahl der beobachteten abgetrennten Partikel
- die Zahl der zur Zündung führenden Partikel
- der prozentuale Anteil oxidierter Partikel
- die Zeit bis zur Zündung
- die Geschwindigkeit der beobachteten Partikel
- die Größe der beobachteten Partikel
- die Zeit, die die oxidierten Partikel bis zur Oxidation benötigten
- die Dauer der Oxidation

Für jedes Gasgemisch und jede einzelne Schlagenergie wurden zwischen 7 und 10 Einzelversuche in die Auswertung aufgenommen. Pro Einzelversuch wurden zwischen 1 und 4 deutlich erkennbare Partikel ausgewählt.

Zur Untersuchung dieser Interaktionen wurde eine PCA (Principle Component Analysis - Hauptkomponentenanalyse) verwendet. Eine PCA ist oft dann hilfreich, wenn die Daten multivariat sind, d. h. über viele Freiheitsgrade verfügen. Sie dreht die Koordinatenachsen in einem hochdimensionalen System, dessen Dimensionen durch alle möglichen Parameter von Datensätzen bestimmt sind, und findet die Richtungen im Raum, die die größte Varianz innerhalb der Daten einfangen. Somit besteht die Möglichkeit, eine unübersichtliche Menge von Information auf wesentliche Parameter zu beschränken.

Zur Aufzeichnung der Versuche wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera mit einer zeitlichen Auflösung von zunächst 250 Bildern/s (für Acetylen/Luft) und später mit 125 Bildern/s (für alle anderen Referenzbrenngas/Luft-Gemische) verwendet, mit der für die Zündwahrscheinlichkeit relevante Parameter wie Zahl, Größe, Geschwindigkeit und Oxidationsverhalten einzelner abgetrennter Partikel bestimmt wurden.

8 Versuche zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit

Die jeweils mit der kinetischen Schlagenergie in Höhe von $W = 10 \text{ Nm}$ und 190 Nm ermittelten Ergebnisse beziehen sich auf den Forschungsbericht 279 /L-8/. Um die Lücke zwischen den kinetischen Schlagenergien ($W = 10 \text{ Nm}$ und 190 Nm) zu schließen, wurde in relativ kleinen Sprüngen die jeweilige Zündwahrscheinlichkeit zwischen 10 Nm und 190 Nm bzw. bis 277 Nm ermittelt. Die Anzahl der Schlagvorgänge innerhalb der einzelnen Versuchsreihen wurde deshalb reduziert.

8.1 Versuche mit Methan

Alle Stahl-Schlagfunkenversuche mit dem Referenzbrenngas Methan der IEC-Explosionsgruppe I wurden mit dem stöchiometrischen Gemisch 9,5 Vol.-% Methan in Luft durchgeführt.

8.1.1 Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Methan

Die insgesamt 443 Schlagfunkenversuchen (einschl. 100 Schlagfunkenversuche mit 10 Nm und 94 mit 190 Nm) mit verschiedenen Schlagenergien mit Methan zeigten bezüglich der Oxidationsfähigkeit der Stahl-Schlagfunken, dass erst ab der kinetischen Schlagenergie in Höhe von $W = 80$ Nm oxidierte Funken durch die jeweiligen Schlagvorgänge erzeugt werden konnten.

8.1.2 Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Methan

Die Versuche zeigten bezüglich der Zündwahrscheinlichkeit, dargestellt in Abbildung 5, dass

- es mit der Schlagenergie $W = 126$ Nm und kleineren Schlagenergien mit dem hier beschriebenen Versuchsaufbau nicht gelang, das Prüfgemisch durch Stahl-Schlagfunken zur Explosion zu bringen,
- es erst mit den kinetischen Schlagenergien in Höhe von 190 Nm und 277 Nm gelang, durch den Schlagvorgang das Prüfgemisch zur Explosion zu bringen und
- bei 190 Nm die Zündwahrscheinlichkeit $\bar{x} = 1,06$ % und bei 277 Nm $\bar{x} = 0,94$ % beträgt.

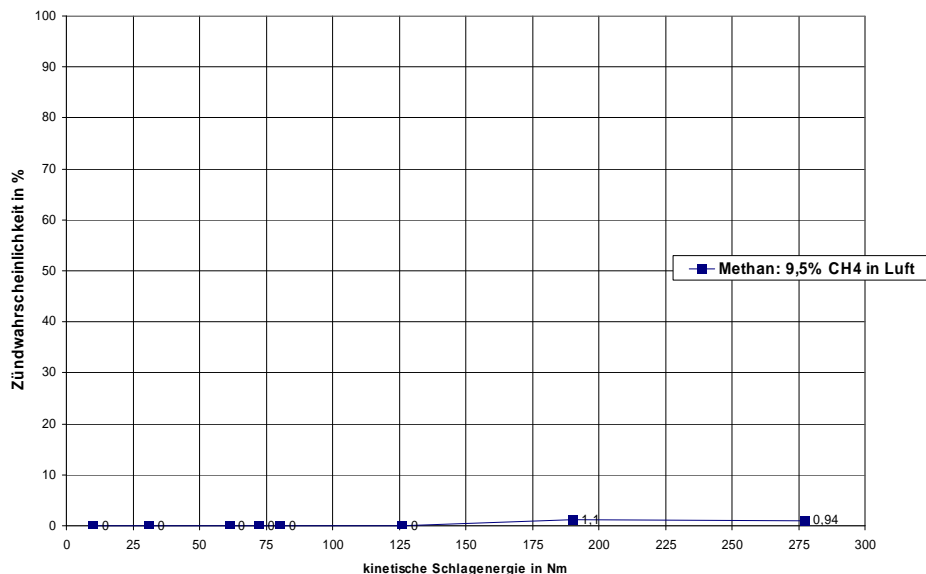


Abb. 5: Zündwahrscheinlichkeiten mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken in 9,5 Vol.-% Methan in Luft (stöchiometrisch) für verschiedene kinetische Schlagenergien

8.2 Versuche mit Propan

Die Schlagfunkenversuche mit dem Referenzbrenngas Propan (IEC-Explosionsgruppe IIA) wurden mit dem stöchiometrischen Gemisch 4,0 Vol.-% Propan in Luft durchgeführt.

8.2.1 Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Propan

Die mit Propan durchgeführten 362 Schlagfunkenversuchen (einschl. 100 Schlagfunkenversuche mit 10 Nm und 30 mit 190 Nm) und verschiedenen Schlagenergien zeigten in Bezug auf die Oxidationsfähigkeit der Stahl-Schlagfunken, dass mit $W = 72$ Nm und größeren Schlagenergien mit jedem Schlagvorgang oxidierte Funken erzeugt wurden.

8.2.2 Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Propan

Für die Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit zeigten die Versuche (vergl. Abbildung 6), dass

- es mit der Schlagenergie $W = 126$ Nm und kleineren Schlagenergien mit dem hier beschriebenen Versuchsaufbau nicht gelang, das Prüfgemisch durch Stahl-Schlagfunken zur Explosion zu bringen,
- es mit den kinetischen Schlagenergien ab 190 Nm gelang, das Prüfgemisch durch mechanisch erzeugte Funken zu zünden,
- die Zündwahrscheinlichkeit bei 190 Nm $\bar{x} = 6,67$ % und bei 277 Nm $\bar{x} = 2,38$ % beträgt. Für das Absinken der Zündwahrscheinlichkeit kann die Änderung des Verhältnisses von kinetischer Schlagenergie und höherer Verformungsarbeit mit der Folge größerer abgetrennter Partikel mit kleinerem Wärmeinhalt pro Volumen vermutet werden (siehe auch Abschnitt 8.8.2)

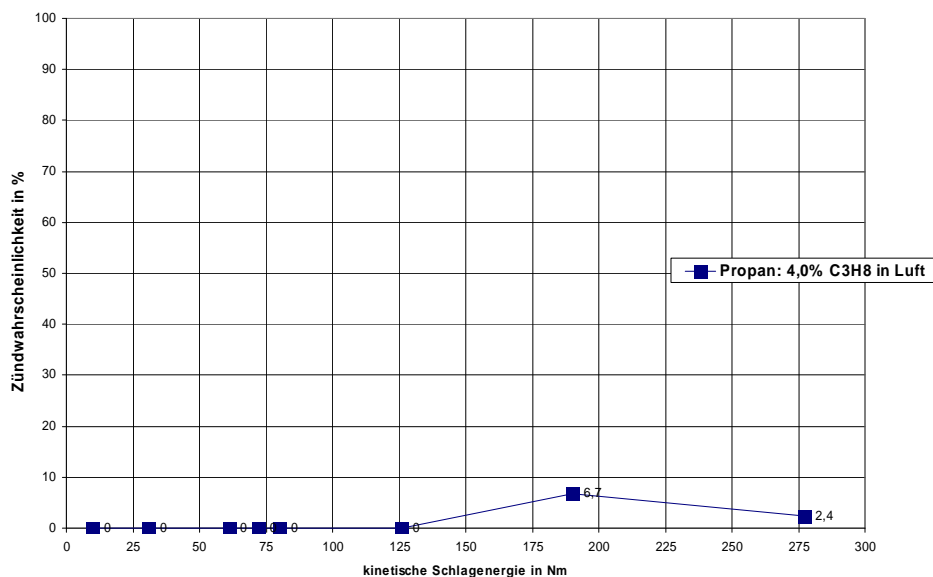


Abb. 6: Zündwahrscheinlichkeiten mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken in 4,0 Vol.-% Propan in Luft (stöchiometrisch) für verschiedene kinetische Schlagenergien

8.3 Versuche mit Ethylen

Die Schlagfunkenversuche mit dem Referenzbrenngas Ethylen (IEC-Explosionsgruppe IIB) wurden mit dem stöchiometrischen Gemisch 6,5 Vol.-% Ethylen/Luft durchgeführt.

8.3.1 Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Ethylen

Durchgeführt wurden insgesamt 486 Schlagfunkenversuche (einschl. 130 Schlagfunkenversuche mit 10 Nm und 30 mit 190 Nm) mit dem Referenzbrenngas Ethylen. In Bezug auf die Oxidationsfähigkeit der Stahl-Schlagfunken zeigte sich, dass mit der kinetischen Energie in Höhe von 61 Nm und größeren Energien bei allen Schlagvorgängen nur noch oxidierten Funken zu erkennen waren.

8.3.2 Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Ethylen

Bezüglich der Zündwahrscheinlichkeit zeigten die Versuche, wie in Abbildung 7 ersichtlich, dass

- keine Explosion durch Schlagfunken mit $W = 72$ Nm und kleineren Energien erzeugt werden konnte,
- mit der Schlagenergie in Höhe von $W = 80$ Nm und größeren Schlagenergien das Prüfgemisch gezündet werden konnte,
- die Zündwahrscheinlichkeiten für 80 Nm $\bar{x} = 1,49$ %, 126 Nm $\bar{x} = 2,44$ %, 190 Nm $\bar{x} = 16,67$ %, 277 Nm $\bar{x} = 16,67$ % beträgt.

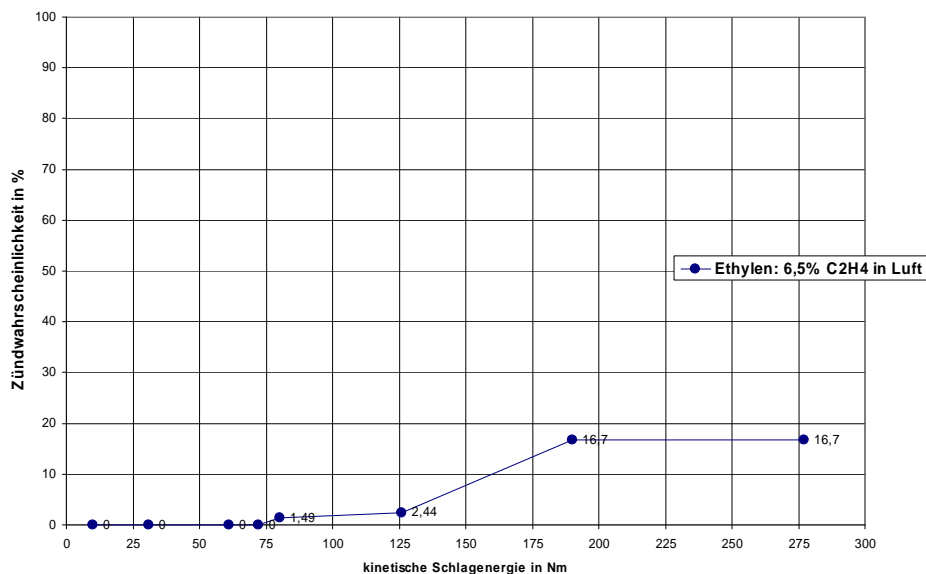


Abb. 7: Zündwahrscheinlichkeiten mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken in 6,5 Vol.-% Ethylen in Luft (stöchiometrisch) für verschiedene kinetische Schlagenergien

8.4 Versuche mit Acetylen

Die Schlagfunkenversuche mit dem Referenzbrenngas Acetylen (IEC-Explosionsgruppe IIC) wurden mit dem stöchiometrischen Gemisch 8,0 Vol.-% Acetylen/Luft durchgeführt.

8.4.1 Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Acetylen

Bei insgesamt 172 durchgeführten Schlagfunkenversuche (einschl. 100 Schlagfunkenversuche mit 10 Nm und 20 mit 190 Nm) mit dem Referenzbrenngas Acetylen zeigte sich bezüglich der Oxidationsfähigkeit der Stahl-Schlagfunken, dass bereits bei 31 Nm kinetischer Schlagenergie bei allen Schlagvorgängen oxidierte Funken erzeugt wurden.

8.4.2 Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Acetylen

Die Versuche zeigten bezüglich der Zündwahrscheinlichkeit (vergl. Abbildung 8), dass

- es bereits bei 10 Nm zur Explosion des Prüfgemisches kam.
- bei 10 Nm die Zündwahrscheinlichkeit bei $\bar{x} = 3,0 \%$, bei 31 Nm bei $\bar{x} = 65 \%$ und ab 61 Nm und größeren Energien bei $\bar{x} = 100 \%$ lag.

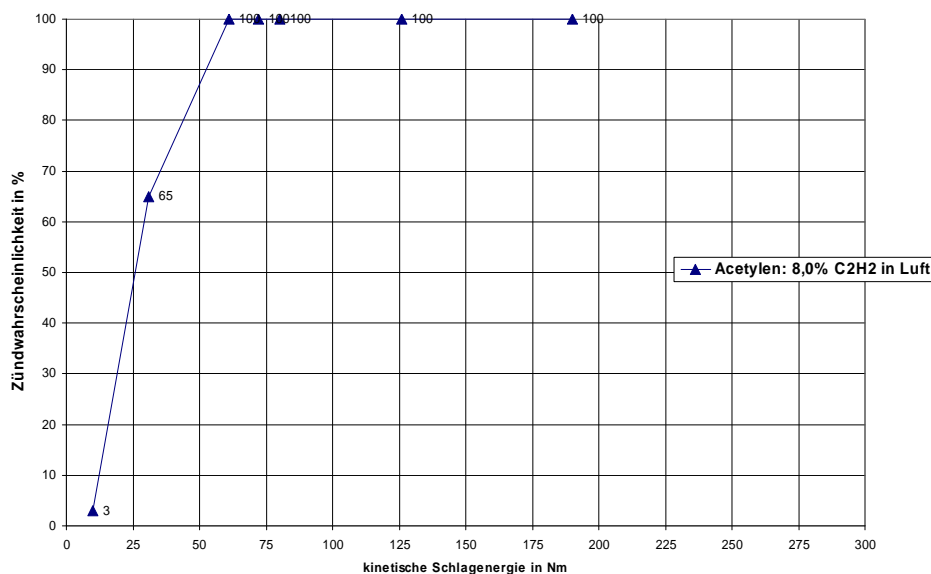


Abb. 8: Zündwahrscheinlichkeiten mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken in 8,0 Vol.-% Acetylen in Luft (stöchiometrisch) für verschiedene kinetische Schlagenergien

8.5 Versuche mit Wasserstoff

Die Schlagfunkenversuche mit dem Referenzbrenngas Wasserstoff (IEC-Explosionsgruppe IIC) wurden mit dem unterstöchiometrischen Gemisch von 10,0 Vol.-% Wasserstoff in Luft durchgeführt (vergl. Abschn. 7.4).

8.5.1 Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel in Wasserstoff

Es wurden insgesamt 241 Schlagfunkenversuche (einschl. 100 Schlagfunkenversuche mit 10 Nm und 20 mit 190 Nm) mit dem Referenzbrenngas Wasserstoff durchgeführt. Dabei zeigte sich bezüglich der Oxidationsfähigkeit der Stahl-Schlagfunken, dass ab 72 Nm mit jedem Schlag oxidierte Funken erzeugt wurden.

8.5.2 Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Wasserstoff

Die Auswertung der Versuche zeigte (wie in Abbildung 9 ersichtlich) bezüglich der Zündwahrscheinlichkeit, dass

- es bereits ab 10 Nm zur Explosion des Prüfgemisches kam,
- die Zündwahrscheinlichkeit bei der Schlagenergie 10 Nm $\bar{x} = 1,5\%$ /L-8/, 31 Nm $\bar{x} = 1,78\%$, bei 61 Nm $\bar{x} = 20\%$ und ab 72 Nm $\bar{x} = 100\%$ beträgt.

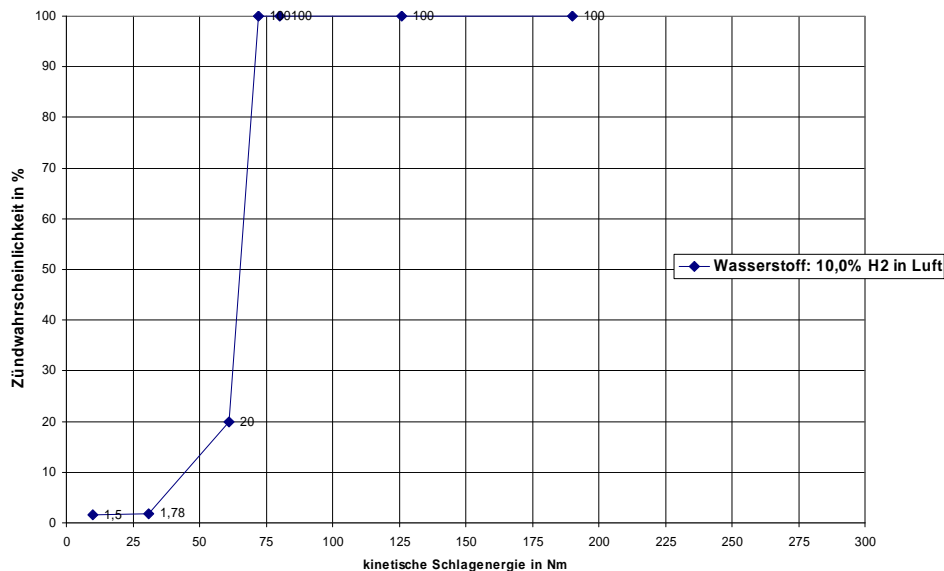


Abb. 9: Zündwahrscheinlichkeiten mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken in 10,0 Vol.-% Wasserstoff in Luft (unterstöchiometrisch) für verschiedene kinetische Schlagenergien

8.6 Vergleichsversuche mit Acetylen und Wasserstoff außerhalb der in Abschnitt 8.5 verwendeten Gemischzusammensetzungen

Für die Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppe IIC sollte ermittelt werden, ob unter Verwendung deutlich höherer Schlagenergien auch Gemische mit „fetteren“ Brenngaskonzentrationen als den unter Abschnitt 7.4 ermittelten zur Explosion gebracht werden können.

Die in Abschnitt 7.4 definierten Bedingungen bezüglich des für die Zündquelle mechanisch erzeugten Schlagfunken jeweils zündwilligsten Brenngas/Luft-Gemisches ergaben sich aus umfangreichen Vorversuchen (/L-8/). Es wurde mit der kinetischen Schlagenergie 10 Nm die Brenngasgemischkonzentration mit dem jeweils höchsten Anteil oxidierten Funken bezogen auf die Anzahl von Schlagvorgängen ermittelt, da die mit dieser relativ niedrigen kinetischen Schlagenergie abgetrennten Partikel nur nach erfolgter Oxidation zur Zündquelle werden können. Wie bereits erwähnt, befindet sich die Gemischkonzentration mit dem höchsten Anteil an oxidierten Funken unter 13,5 Vol.-% Brenngasanteil in Luft. Bei den Kohlenwasserstoff-Verbindungen liegen alle stöchiometrischen Gemischzusammensetzungen in dem Bereich von 4,0 Vol.-% (Propan) bis 9,5 Vol.-% (Methan) und somit in dem Bereich der Gemischzusammensetzung für die höchste Anzahl von oxidierten Funken. Bei Wasserstoff lag dagegen der Bereich der Gemischzusammensetzung mit dem höchsten Anteil an oxidierten Funken deutlich unter dem Wert der stöchiometrischen Gemischzusammensetzung (28,5 Vol.-% H₂ in Luft).

8.6.1 Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Acetylen

Die mit der kinetischen Energie $W = 190 \text{ Nm}$ mit 75,0 Vol.-% Acetylen in Luft durchgeführten 10 Schlagfunkenversuche /L-8/ zeigten, dass

- es bei allen Schlagvorgängen zur Explosion des Prüfgemisches kam. Auf Grund der sehr schnellen Zerfallsreaktion des Acetylens kann keine sichere Aussage über einen möglichen Oxidationsprozess getroffen werden. Vergleichsversuche mit ähnlich hohem Heliumanteil in Luft zeigten aber, dass bei diesem hohen Gasanteil in Luft eine Oxidation eher nicht mehr möglich ist.
- Daher muss davon ausgegangen werden, dass mit energiereichen Schlagvorgängen sogar überstöchiometrische Acetylen/Luft-Gemische auch ohne Oxidation zur Explosion gebracht werden können.
- Wegen der beobachteten 100 % Zündwahrscheinlichkeit und der starken Verschmutzung der Schlagfunkenmaschine wurde auf weitere Schlagfunkenversuche mit so hohen Acetylenkonzentrationen verzichtet.

8.6.2 Zündwahrscheinlichkeit der abgetrennten Partikel in Wasserstoff

Wie die Vorversuche mit der kinetischen Schlagenergie $W = 10 \text{ Nm}$ gezeigt haben, hat Wasserstoff trotz der geringsten Mindestzündenergie aller Referenz-Brenngase den höchsten Abfall des Anteils oxidierteter Funken zwischen 13,5 Vol.-% (40 % oxidierte Funken) und 23,5 Vol.-% (1 % oxidierte Funken) Brenngasanteil in Luft /L-8/. Bereits in dem Bereich von 13,5 Vol.-% zu 18,5 Vol.-% H_2 in Luft sank der Anteil oxidierteter Funken von 40 % auf 2,4 %. Als Mittelwert zwischen 13,5 % und 18,5 % wurden deshalb die Vergleichsversuche mit Wasserstoff zunächst mit 16,0 Vol.-% H_2 in Luft durchgeführt. Die 130 Schlagfunkenversuche mit den kinetischen Energien von $W = 31 \text{ Nm}$ bis 277 Nm mit 16,0 Vol.-% Wasserstoffanteil in Luft haben gezeigt (vergl. Abb. 10), dass

- es nur bei 190 Nm und 277 Nm zur Explosion des Prüfgemisches kam, und
- die Zündwahrscheinlichkeit bei 190 Nm bei 20 % und erst bei 277 Nm bei 100 % lag.

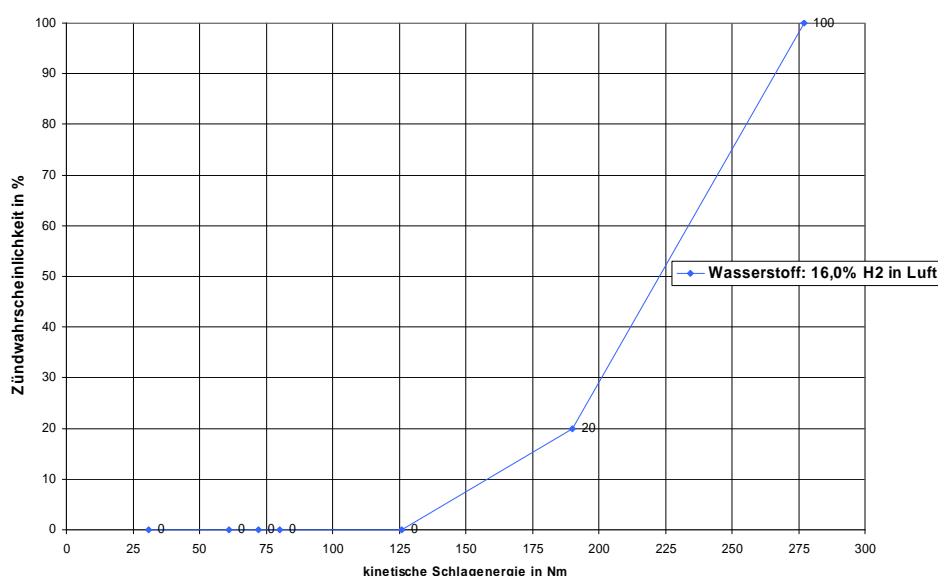


Abb. 10: Zündwahrscheinlichkeiten mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken in 16,0 Vol.-% Wasserstoff in Luft (unterstöchiometrisch) für verschiedene kinetische Schlagenergien

8.7 Vergleichsversuche mit Helium

Die Schlagfunkenversuche mit 190 Nm mit 75,0 Vol.-% Acetylenanteil in Luft und somit nur noch rund 5 % Sauerstoffanteil im Gemisch zeigten, dass bei der Verwendung von energiereichen kinetischen Schlagenergien (≥ 190 Nm) die abgetrennten Partikel in Acetylen-Gemischen nicht mehr oxidieren müssen, um eine wirksame Zündquelle zu werden.

Da Acetylen aber ein zerfallsfähiges Brenngas ist, wurden zusätzlich Schlagfunkenversuche mit 190 Nm in 16,0 Vol.-% Wasserstoffanteil in Luft durchgeführt – und somit in einem Bereich, in dem Stahl-Schlagfunken mit nicht energiereichen Schlagenergien eher selten oxidieren können. Es zeigte sich, dass bei der Verwendung von energiereichen kinetischen Schlagenergien (≥ 190 Nm) die Gemischzusammensetzung einen geringeren Einfluss auf das Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur hat als bei geringeren kinetischen Schlagenergien (10 Nm). Somit können mit energiereichen Schlagvorgängen Wasserstoffgemischkonzentrationen zur Explosion gebracht werden, die bei 10 Nm eine sehr geringe Zündwahrscheinlichkeit durch Stahl-Schlagfunken haben.

Zur Ermittlung der Oxidationsfähigkeit von Stahl-Schlagfunken in Abhängigkeit zur Gemischkonzentration bzw. zum Restsauerstoffgehalt werden deshalb noch einmal die Stahl-Schlagfunkenversuche mit Helium in den Gemischkonzentrationen von 5,0 Vol.-% bis 100 Vol.-% Heliumanteil in Luft zitiert /L-8/. Die Schlagfunkenversuche mit 190 Nm haben gezeigt, dass

- oxidierte Funken bis 45,0 Vol.-% Heliumanteil erzeugt werden,
- in dem Bereich über 45,0 Vol.-% kaum eine Oxidation der abgetrennten Partikel visuell erkannt werden konnte. Es wurden überwiegend abgetrennte Partikel erhöhter Temperatur und einige wenige große ebenfalls nicht oxidierte aber zum Teil geschmolzene Partikel mit einem Durchmesser von rund $\varnothing \approx 1,0$ mm gefunden (vergl. Abb. 10), wahrscheinlich aus Kaltschweißvorgängen, erzeugt werden können.

8.8 Zusammenfassung und Interpretation der Versuchsergebnisse zum Oxidationsverhalten und zur Zündwahrscheinlichkeit

8.8.1 Oxidationsfähigkeit in Abhängigkeit vom Brenngasanteil und der kinetischen Schlagenergie

Bei den im Rahmen der Arbeiten für /L-8/ bereits durchgeführten Schlagfunkenversuchen mit $W = 10$ Nm war erkennbar, dass bis etwa bis 13,5 Vol.-% Brenngasanteil in Luft die meisten abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur oxidieren. In dem Bereich ab 13,5 Vol.-% bis 18,5 Vol.-% Brenngasgemischkonzentration nimmt der Anteil der oxidierten Funken bereits deutlich ab. Die Oxidationsfähigkeit für mit 10 Nm Schlagenergie abgetrennte Partikel endet bei rund 25,0 Vol.-%. Über 25,0 Vol.-% Brenngasanteil in Luft können mit 10 Nm keine oxidationsfähigen Stahlpartikel mehr abgetrennt werden. Die mit 10 Nm abgetrennten Stahlpartikel stellen aufgrund ihrer Größe, Lebensdauer und Energieinhalt im nichtoxidierten Zustand keine Zündquelle dar. Im oxidierten Zustand jedoch stellen sie unter bestimmten Bedingungen eine Zündquelle dar. Zur Zündquelle werden die oxidierten Stahl-Schlagfunken auch bei $W = 10$ Nm bei den Referenzbrenngasen der IEC-Explosionsgruppe IIC.

Bereits mit 10 Nm kinetischer Schlagenergie in Luft und in Brenngasgemischkonzentrationen gemäß Abschnitt 7.4 können in etwa 85 % aller Schlagvorgänge oxidierte Partikel/Funken erzeugt werden.

Um bei jedem Schlagvorgang zu 100 % oxidierte Stahlschlagfunken zu erzeugen, musste die kinetische Energie für

- Methan (IEC-Explosionsgruppe I) $W = 80 \text{ Nm}$,
- Propan (IIA) 72 Nm ,
- Ethylen (IIB) 61 Nm ,
- Acetylen (IIC) 31 Nm und
- Wasserstoff (IIC) 72 Nm betragen
(vergl. Tabelle A-1).

Somit nimmt mit steigender kinetischer Schlagenergie die Wahrscheinlichkeit zu, mit jedem Schlag Partikel zu erzeugen, die danach oxidieren. Trotzdem aber steigt mit zunehmender kinetischer Schlagenergie die Zündwahrscheinlichkeit bei allen Referenz-Brenngasen nicht im gleichen Maße an. Da der rein mechanische Vorgang des Abtrennens von Partikeln durch Schlagvorgänge aber nicht vom Gasgemisch abhängt, zeigt sich damit, dass nach dem Abtrennvorgang auch die Gaseigenschaften (vergl. Abb. 1) Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeit haben.

Bei den Schlagfunkenversuchen mit Wasserstoff bis 61 Nm waren im Gegensatz zu Acetylen deutlich geringere Prozentzahlen für den Anteil an Schlagvorgängen mit oxidierten Funken zu beobachten. Aufgrund der rund 10-fach höheren Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs gegenüber Acetylen (bzw. allen anderen Kohlenwasserstoff-Referenzbrenngasen, vergl. Tabelle 3) wird den abgetrennten Partikeln erhöhter Temperatur so schnell ihr Wärmeinhalt entzogen, dass dadurch die Oxidationsfähigkeit und Oxidationswahrscheinlichkeit sinkt.

Hingegen konnten bei Schlagfunkenversuchen in Helium/Luft-Gemischen mit $W = 190 \text{ Nm}$ oxidierte Funken in einem Bereich bis $45,0 \text{ Vol.-%}$ beobachtet werden /L-8/. Somit hat die Gemischzusammensetzung bei steigender kinetischer Schlagenergie einen geringeren Einfluss auf die Oxidationsfähigkeit als bei vergleichsweise geringen Schlagenergien in Höhe von 10 Nm .

Über $45,0 \text{ Vol.-%}$ Heliumanteil in Luft wurden visuell kaum mehr oxidierte Funken erkannt, jedoch überwiegend abgetrennte Partikel erhöhter Temperatur und einige wenige große nicht oxidierte (nicht verbrannte) aber zum Teil geschmolzene Partikel mit einem Durchmesser von rund $\varnothing \approx 1,0 \text{ mm}$ gefunden (vergl. Abb. 11). Diese großen Partikel wurden jedoch nicht während des Fluges durch das Brenngasgemisch durch Kamerabilder detektiert, sondern nach dem Schlagvorgang auf dem zuvor gereinigten Boden der Schlagfunkenmaschine gefunden. Vermutlich sind diese aus Kaltschweißvorgängen aufgrund der hohen Flächenpressung zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte entstanden.

Mit energiereichen Schlagvorgängen in Höhe von 190 Nm erzeugte Partikel erhöhter Temperatur können auch ohne Oxidation und somit auch in überstöchiometrischen Gemischzusammensetzungen Acetylen/Luft-Gemische zur Explosion bringen. Zumeist sind die abgetrennten Partikel mit steigender kinetischer Schlagenergie nicht deutlich größer. Die höhere Zündwahrscheinlichkeit ergibt sich aus der zumeist aufgrund der hohen Verformungs- und Abtrennleistung bei energiereichen Schlägen ($\geq 190 \text{ Nm}$) in das Partikel eingetragenen Energie. Dies bestätigten die Schlagfunkenversuche mit 190 Nm Schlagenergie in $75,0 \text{ Vol.-%}$ Acetylenanteil in Luft. Aufgrund des hohen Brenngasanteils und somit geringen Luft- bzw. Restsauerstoffanteils (etwa $5,0 \text{ Vol.-% O}_2$) im Gemisch ist die Oxidation kaum mehr möglich. Trotzdem kam es regelmäßig zur Explosion des Prüfgemisches.

Die Zündtemperatur von stöchiometrischem Acetylen/Luft-Gemisch liegt bei 305 °C . Die Zündtemperatur von deutlich überstöchiometrischen Acetylen/Luft-Gemischen liegt bis $82,0 \text{ Vol.-%}$ Acetylenanteil in Luft ebenfalls bei 305 °C /L-18/. Somit liegt die Temperatur der (nicht oxidierten) abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur bei energiereichen Schlagvorgängen ($\geq 190 \text{ Nm}$) deutlich über 305 °C . Da Oxidationsprozesse nicht beobachtet werden konnten - Oxidationsprozesse finden bei Stahl-Partikeln ab etwa 500 °C (in Luft) bis 800 °C (in Brenngas/Luft-Gemischen) /L-10/ (vergl. auch Abschnitt 4) statt - kann die Temperatur der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur auf unter 800 °C angenommen werden. Aber unterhalb welchem Sauerstoffanteil im

Gemisch keine Oxidation von abgetrennten Stahl-Partikeln erhöhter Temperatur mehr möglich ist, ist nicht bekannt und wird auch von weiteren Randbedingungen mit abhängen (u. a. Wärmeleitfähigkeit und Reaktionsfreudigkeit des Brenngases, Ausgangstemperatur des abgetrennten Partikels bedingt durch weitere Randbedingungen des Schlages).

Aber auch bei den Versuchen mit 190 Nm und 277 Nm in 16,0 Vol.-% Wasserstoff/Luft-Gemisch (H_2 -Gemischzusammensetzung vergl. Abschnitt 7.4) kam es zur Zündung des Prüfgemisches.

Es bedarf weiterer Schlagfunkenversuche oberhalb von $W = 10$ Nm und unterhalb von $W = 190$ Nm um beurteilen zu können, ob nicht energiereiche Schlagvorgänge überstöchiometrische Acetylen/Luft-Gemische zur Explosion bringen können. Es wird vermutet, dass nicht energiereiche Schlagvorgänge überstöchiometrische Acetylen/Luft-Gemische bzw. Brenngas/Luft-Gemische zur Explosion bringen können.



Abb. 11: Zum Teil geschmolzenes, nicht oxidiertes großes Stahlpartikel nach einem Schlagvorgang mit $W = 190$ Nm in 100 % Helium

8.8.2 Zündwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit zum Brenngasanteil und zur Höhe der kinetischen Schlagenergie

Methan, Propan:

Bei Methan (vergl. Abb. 5, 12) und Propan (vergl. Abb. 6, 12) kam es mit der hier beschriebenen Schlagkinematik, Geometrie der Schlagpartner und Prüfgemischen jeweils ab $W = 190$ Nm zur Explosion des Prüfgemisches.

Die Zündwahrscheinlichkeit bei den Versuchen mit Methan lag sowohl bei 190 Nm als auch bei 277 Nm bei rund 1,0 %. Es gab keine Steigerung der Zündwahrscheinlichkeit zwischen 190 Nm und 277 Nm. Bei Propan lag die Zündwahrscheinlichkeit bei 190 Nm bei 6,7 % und bei 277 Nm bei 2,4 %. Auch hier gab es keine Steigerung der Zündwahrscheinlichkeit zwischen 190 Nm und 277 Nm, sondern auch unter Betrachtung der relativ großen Toleranz des Wertes der Schlagenergie in Höhe von $\pm 8,2$ % eher einen Trend zu einer Verringerung der Zündwahrscheinlichkeit.

Für den bei Propan erkennbaren Trend zu keiner weiteren Steigerung bzw. eher zu einer Verringerung der Zündwahrscheinlichkeit bei energiereichen Schlagvorgängen bei nicht zerfallsfähigen Brenngasen wird als Erklärung vermutet, dass die Veränderung des Verhältnisses von kinetischer Schlagenergie und höherer Verformungs- und Abtrennarbeit der beiden Schlagpartner mit der Folge größerer abgetrennter Partikel verantwortlich ist. Dadurch ergibt sich ein sprunghaft kleinerer Wärmeinhalt pro Volumen des abgetrennten Partikels, wodurch das Partikel (vergl. Abb. 11) dann häufig nicht mehr in den zur Oxidation notwendigen Temperaturbereich gebracht wird. Für diesen Vorgang mit betrachtet werden müsste dabei auch die im Vergleich zu Acetylen und Wasserstoff höhere Mindestzündenergie von Methan und Propan.

Ethylen:

Die Schlagfunkenversuche mit Ethylen (vergl. Abb. 7, 12) ergaben Explosionen des Prüfgemisches ab einer kinetischen Schlagenergie von 80 Nm mit einer Zündwahrscheinlichkeit von 1,5 %. Bei 126 Nm konnte eine Zündwahrscheinlichkeit von 2,44 % und bei 190 Nm und 277 Nm von 16,7 % errechnet werden. (In der Literatur finden sich jedoch beobachtete Explosionen mit geringeren kinetischen Energien.)

Acetylen:

Im Fall von Acetylen (vergl. Abb. 8, 12) ergaben die Schlagfunkenversuche bereits bei $W = 10$ Nm die Zündung des Prüfgemisches mit einer Zündwahrscheinlichkeit in Höhe von 3,0 % /L-8/, bei 31 Nm in Höhe von 65 % und bereits bei 61 Nm und höheren Energien zu 100 %.

Auch deutlich überstöchiometrische Acetylen/Luft-Gemische (75,0 Vol.-% C_2H_2 in Luft) konnten durch die Zerfallsfähigkeit des Acetylens zur Explosion gebracht werden.

Wasserstoff:

Auch bei Wasserstoff (vergl. Abb. 9, 12) war, ähnlich wie bei Acetylen, bereits bei 10 Nm die Explosion des Prüfgemisches zu beobachten, jedoch mit geringerer Zündwahrscheinlichkeit in Höhe von 1,5 % und in einem deutlich kleineren Bereich der Gemischkonzentration /L-8/. Bei 31 Nm war eine Zündwahrscheinlichkeit in Höhe von 1,8 %, bei 61 Nm 20 % und bei 72 Nm in Höhe von 100 % festzustellen.

Durch energiereiche Schlagvorgänge (≥ 190 Nm) ließen sich auch Wasserstoff/Luft-Gemische auch außerhalb des für mechanisch erzeugte Stahl-Schlagfunken ermittelten zündfähigsten Gemisches (vergl. Abschnitt 7.4) zur Explosion bringen.

Einige sicherheitstechnische Kenngrößen und Materialeigenschaften der Referenz-Brenngase sowie zweier Edelgase und Luft sind zusammenfassend in der Tabelle 4 aufgelistet (verwendete Prüfgemische vergl. Abschnitt 7.4).

Tabelle 4: Sicherheitstechnische Kenngrößen und Materialeigenschaften der Referenzgase sowie zweier Edelgase und Luft

| Explosionsgruppe nach IEC 60 079-1:2004 | Referenzbrenngas | MZE ¹⁾ [mJ]* | stöchiometrischer Brennstoffanteil im Gemisch mit Luft [Vol.-%]* | Wärmeleitfähigkeit [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] | Molare Wärmekapazität [$\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] |
|---|---|-------------------------|--|---|--|
| I | Methan (CH ₄) | 0,28 | 9,5 | $\lambda=339 \cdot 10^{-04}$ | $C_p=34,57$ |
| IIA | Propan (C ₃ H ₈) | 0,24 | 4,0 | $\lambda=180 \cdot 10^{-04}$ | $C_p=73,50$ |
| IIB | Ethylen (C ₂ H ₄) | 0,082 | 6,5 | $\lambda=208 \cdot 10^{-04}$ | $C_p=45,18$ |
| IIC | Acetylen (C ₂ H ₂) | 0,019 | 7,7 | $\lambda=215 \cdot 10^{-04}$ | $C_p=39,35$ |
| IIC | Wasserstoff (H ₂) | 0,017 | 29,5 | $\lambda=1.860 \cdot 10^{-04}$ | $C_p=28,62$ |
| / | Luft | / | / | $\lambda=260 \cdot 10^{-04}$ | $C_p \approx 29,1^2$ |
| / | Argon (Ar) | / | / | $\lambda=178,2 \cdot 10^{-04}$ | $C_p=20,79$ |
| / | Helium (He) | / | / | $\lambda=1.500 \cdot 10^{-04}$ | $C_p=20,79$ |

¹⁾ MZE: Mindestzündenergie

²⁾ Wert für Stickstoff

^{*)} Quelle: Datenbank CHEMSAFE, Version 1.4.10 (2009)

Nach dem Abtrennvorgang der Stahl-Partikel erhöhter Temperatur sind erhebliche Unterschiede beim Oxidationsverhalten und bei der Zündwahrscheinlichkeit zwischen den einzelnen Brenngasen und den unterschiedlichen kinetischen Schlagenergien zu beobachten. Wie aus der Abbildung 12 zu ersehen, steigt im Allgemeinen die Zündwahrscheinlichkeit mit zunehmender kinetischer Schlagenergie. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle A-1 enthalten.

Ein Anstieg der Zündwahrscheinlichkeit war bei allen verwendeten Referenzbrenngas/Luft-Gemischen mit steigender Schlagenergie bis $W = 190 \text{ Nm}$ zu erkennen. Über 190 Nm erbrachte eine weitere Steigerung der kinetischen Schlagenergie keine weitere Erhöhung des in die abgetrennten Partikel eingebrachten Energieinhalts, da sich bei energiereichen Schlagvorgängen das Verhältnis von Schlagenergie und Verformungs- und Abtrennarbeit verändert.

Jedoch unterscheiden sich insbesondere Acetylen und Wasserstoff, beides Referenzbrenngase der IEC-Explosionsgruppe IIC, beide mit ähnlich sehr niedriger Mindestzündenergie, bezüglich der beobachteten Zündwahrscheinlichkeiten auch in Abhängigkeit zur Gemischzusammensetzung unterhalb von 62 Nm von einander. Somit müssen der Wärmeübertrag von den Partikeln auf das Prüfgemisch bzw. die Wärmeleitfähigkeit des Brenngases und ggf. mikrochemische Reaktionen mit dem Brenngasgemisch sowie das Zusammenwirken einer Vielzahl von Parametern eine Rolle spielen.

Daher wurde zur Erfassung der mechanischen und reaktionskinetischen Einflussgrößen eine Datenanalyse durchgeführt.

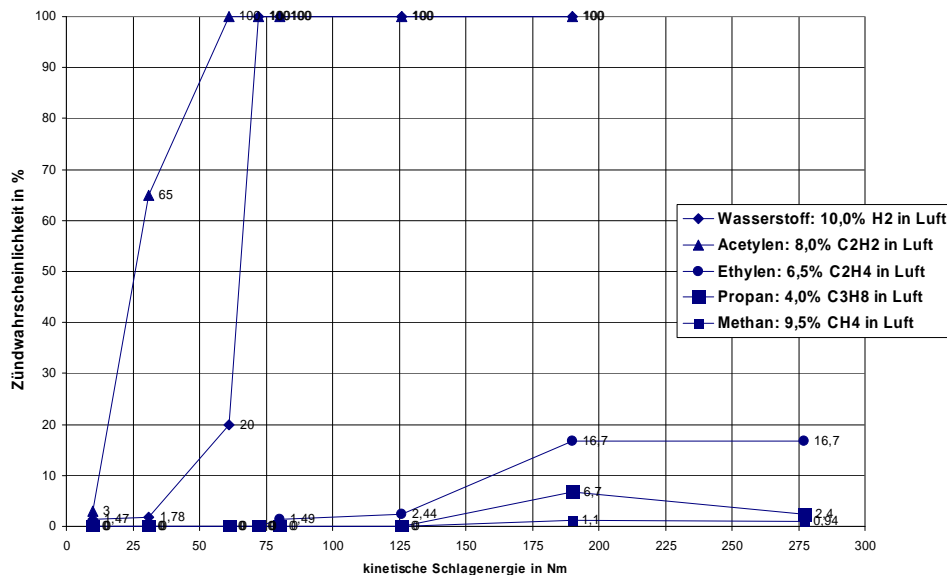


Abb. 12: Zündwahrscheinlichkeiten mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken aller Referenz-Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppen für verschiedene kinetische Schlagenergien (Werte für 10 Nm und 190 Nm vergl. /L-8/)

9 Versuche zur statistischen Erfassung mechanischer und reaktionskinetischer Einflussgrößen

Für die Aufzeichnung der Versuche wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera mit einer zeitlichen Auflösung von zunächst 250 Bildern/s (für Acetylen/Luft) und später 125 Bildern/s (alle anderen (Brenn-) Gasgemische) verwendet, mit der für die Zündwahrscheinlichkeit relevante Parameter wie Zahl, Größe, Geschwindigkeit und Oxidationsverhalten einzelner abgetrennter Partikel bestimmt wurden. Es stellte sich heraus, dass die Auflösung von 125 Bildern/s ausreichend für eine Analyse war und deutlich den relativ großen zeitlichen und speichertechnischen Aufwand reduzierte. Die Detektion der abgetrennten Partikel erfolgte dabei visuell anhand der Kamerabilder. Die Entscheidung über den Zeitpunkt einer Explosion nach Aufschlagen des Schlagbolzens erfolgte ebenfalls anhand visueller Kriterien. In allen Fällen, in denen es zu einer Explosion kam, wurde eine sich kontinuierlich ausbreitende Flammenfront beobachtet, die bei Acetylen deutlich, bei Wasserstoff nur schwach sichtbar war, und die in jedem Fall die Plastikfolie zerstörte.

Zur Auswertung der einzelnen Schlagversuche wurden die Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera in Einzelbildern gespeichert. Für jeden Versuch wurde die zugehörige Serie von Einzelbildern nachträglich mit einem Raster überzogen, um Größe und Geschwindigkeit der beobachteten Partikel zu bestimmen. Da oxidierte Partikel wegen ihrer Reaktion mit dem umgebenden Gas in der Regel auf den aufeinander folgenden Einzelbildern scheinbar an Größe zunahm, wurde für die Bestimmung ihres Volumens das jeweils erste Einzelbild verwendet, auf dem sie sichtbar wurden. Für die Volumenberechnung wurde als Näherung eine Kugelform angenommen. Die Entscheidung, ob ein Partikel oxidiert war oder nicht, wurde anhand der Farbe und Helligkeit der Partikel getroffen. Oxidierte Partikel waren an ihrer grell-weißen Färbung und durch die Reaktion mit dem umgebenden Gas an der scheinbaren Zunahme ihrer Größe zu erkennen, während nicht oxidierte Partikel eine rötliche Färbung aufwiesen und über die Einzelbilder hinweg konstante Größe behielten.

Es konnten jedoch nur für Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemische Schlagversuche mit Explosionen der jeweiligen Gemische mit der Kamera aufgenommen werden, da wegen der wesentlich geringeren Zündwahrscheinlichkeit bei den anderen Gemischen erheblich mehr

Schlagversuche notwendig waren. Die Explosionen traten je nach Brenngasart dabei erst nach über 20 bis 100 durchgeführten Versuchen auf, und damit erst nachdem die Kamera aus Zeitgründen (insbesondere die Einzelbild-Auswertung von Hochgeschwindigkeits-Videoclips ist sehr zeitintensiv) nicht mehr verwendet wurde.

Die Zündwahrscheinlichkeit wird durch das Zusammenwirken einer Vielzahl von Parametern bestimmt. Daher wurde zur Ermittlung von Parameterkombinationen mit besonders hoher Zündwahrscheinlichkeit abschließend das Gesamtsystem in einem mehrdimensionalen Parameterraum betrachtet, dessen Achsen sämtliche Parameter repräsentieren (Principle Component Analysis Hauptkomponentenanalyse). Jedes einzelne beobachtete Partikel wurde anhand von 8 Parametern in einem 8-dimensionalen Parameterraum charakterisiert:

- die Anzahl der beobachteten abgetrennten Partikel
- die Zahl der zur Zündung führenden Partikel
- der prozentuale Anteil oxidierter Partikel
- die Zeit bis zur Zündung
- die Geschwindigkeit der beobachteten Partikel
- die Größe der beobachteten Partikel
- die Zeit, die die oxidierten Partikel bis zur Oxidation benötigten
- die Dauer der Oxidation

9.1 Zusammenfassung und Interpretation der Versuchsergebnisse zur Datenanalyse zur Erfassung mechanischer und reaktionskinetischer Einflussgrößen

9.1.1 Zusammenhang zwischen kinetischer Schlagenergie und -Zündwahrscheinlichkeit

Wie bereits durch empirische Untersuchungen festgestellt, besteht im Allgemeinen ein direkter Zusammenhang zwischen der kinetischen Schlagenergie und der Zündwahrscheinlichkeit: Je höher die kinetische Schlagenergie, umso höher die Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung zündfähiger mechanischer Stahl-Schlagfunken.

9.1.2 Anzahl der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur und Zeit bis zur Zündung in Abhängigkeit von der Schlagenergie

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Schlagenergie und der Anzahl der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur ließ sich nur für das Acetylen/Luft-Gemisch beobachten (vergl. Abb. 13). Die sogenannte erhöhte Temperatur von abgetrennten Stahlpartikeln aus Schlagvorgängen liegt etwa in dem Bereich von 500 °C bis 800 °C /L-10/. Mit steigender kinetischer Schlagenergie stiegen die Anzahl der durch den Schlagvorgang abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur und der prozentuale Anteil oxidierter Funken (vergl. Abb. 14, vergl. Tabellen A-2 bis A-7). Bis 61 Nm konnten für jeden einzelnen Schlagvorgang bis zu 5 abgetrennte Partikel erhöhter Temperatur gezählt werden, bei 72 Nm waren in 30 % der Versuche bereits Funkenregen mit einer Vielzahl von abgetrennten Partikeln zu beobachten. Ab $W = 80$ Nm ließen sich bei Acetylen/Luft keine genauen Aussagen mehr über Anzahl und mögliche Oxidationsentwicklung einzelner Partikel machen, da nur noch Funkenregen (eine Wolke von sehr vielen sich überlagernden Funken) auftraten. Die Abbildungen 15 bis 17 zeigen signifikante Einzelbilder jeweils einer Serie von Einzelbildern direkt nach dem Schlagvorgang von der Oxidation bis zur Zündung des Prüfgemisches. Mit der Zunahme der kinetischen Schlagenergie erkennt man die Zunahme der Anzahl

der oxidierten Funken sowie die Zunahme der Funken, die etwa zeitgleich das Prüfgemisch zur Explosion bringen.

Bei allen anderen Gasgemischen konnte keine eindeutige Korrelation von Partikelzahl und Schlagenergie beobachtet werden (vergl. Abb. 13). Die Zahl der durch die Kamerabilder detektierten abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur lag in fast allen Fällen zwischen 1 und 5. Zu beachten ist dabei, dass alle Partikel anhand der Highspeed-Kamerabilder visuell detektiert wurden und nur die Partikel während des Fluges direkt nach dem Abtrennen betrachtet wurden. Die Anzahl der sichtbaren abgetrennten Partikel bei gleichen Schlagenergien bei Acetylen/Luft-Gemischen im Vergleich zu den anderen Brenngas/Luft-Gemischen unterscheidet sich, weil es bei den Versuchen mit Acetylen zu mikrochemischen Zerfallsreaktionen um die erhitzten, nichtoxidierten und oxidierten Partikel herum kam, die bei allen anderen Brenngas/Luft-Gemischen nicht auftraten. Somit waren die Partikel bzw. Funken im Acetylen/Luft-Gemisch makroskopisch gut zu erkennen (siehe Abschnitt 10).

Da aber der rein mechanische Schlagvorgang einschließlich des Abtrennens der einzelnen Partikel erhöhter Temperatur nicht von der Art des Brenngases und dessen Gemischzusammensetzung abhängen kann, müssen die Versuche mit Acetylen als Referenz für die Anzahl der abgetrennten Partikel genommen werden.

Als Kontrollgruppe wurden zusätzlich Schlagversuche in Luft mit den Materialkombinationen Stahl/Stahl und Stahl/Edelstahl für Schlagbolzen und Schlagplatte durchgeführt. Hier korrelierte die mittlere Anzahl der detektierten abgetrennten Partikel für die Kombination Stahl/Stahl mit der Zunahme der Schlagenergie, allerdings lag sie im Vergleich zu Acetylen/Luft deutlich geringer im Bereich zwischen 1 und 7, während der prozentuale Anteil oxidierten Funken in den meisten Fällen 100 % betrug. Funkenregen wurde in zwei von zehn Schlagversuchen bei einer Schlagenergie von 190 Nm und in einem von zehn bei einer Schlagenergie von 126 Nm beobachtet. Die Anzahl abgetrennter Partikel für die Kombination Stahl/Edelstahl (Schlagbolzen/Schlagplatte) lag noch niedriger und schwankte für alle Schlagenergien zwischen 1 und 3. Auch hier waren nahezu alle Partikel oxidiert.

Obwohl auch bei Wasserstoff bereits ab 72 Nm eine Zündwahrscheinlichkeit von 100 % verzeichnet wurde, lag die Anzahl der detektierten Partikel deutlich niedriger als bei Acetylen/Luft und es wurde kein Funkenregen beobachtet. Grundsätzlich waren alle Partikel, die zu einer Zündung führten, oxidiert (Funken). Bei Wasserstoff/Luft führte in allen Fällen eindeutig nur ein einzelner Funken zur Zündung, während bei Acetylen/Luft von 22 registrierten Versuchen in einem Fall 5, in einem anderen 4 und in zwei weiteren 2 Funken die Zündung verursachten. In allen anderen Fällen verursachte ebenfalls ein einzelner Funken die Zündung. Das bedeutet, dass eine Überlagerung der Wärmefelder einzelner Partikel mit erhöhter Temperatur nicht verantwortlich für den Anstieg der Zündwahrscheinlichkeit ist. Es besteht ein Unterschied zwischen der Anzahl abgetrennter Partikel und der Zahl der zur Zündung führenden Funken.

Bezogen auf den Mittelwert variierte die Zeit bis zur Zündung bei Wasserstoff/Luft-Gemischen stärker als bei Acetylen/Luft. Sie war unabhängig von der Schlagenergie und lag bei Wasserstoff/Luft-Gemischen in einem Bereich zwischen 0,016 s und 0,48 s (Mittelwert 0,102 s, Standardabweichung 0,1 s) (vergl. Tabelle A-2). Dieses Resultat ist wahrscheinlich auch auf die kaum sichtbare Flammenfront bei der Explosionsausbreitung zurückzuführen. Die Zeit bis zur Zündung zeigte bei Acetylen/Luft ebenfalls keine signifikante Korrelation mit der Schlagenergie und lag dort für alle Werte von 31 Nm bis 190 Nm in einem Bereich zwischen 0,016 s und 0,16 s (Mittelwert 0,0566 s, Standardabweichung 0,03 s) (vergl. Tabelle A-3).

Damit hat der Übergang von einzelnen Funken zu einer Überlagerung des Wärmefeldes vieler Funken keinen deutlichen Einfluss auf die Zeit bis zur Zündung.

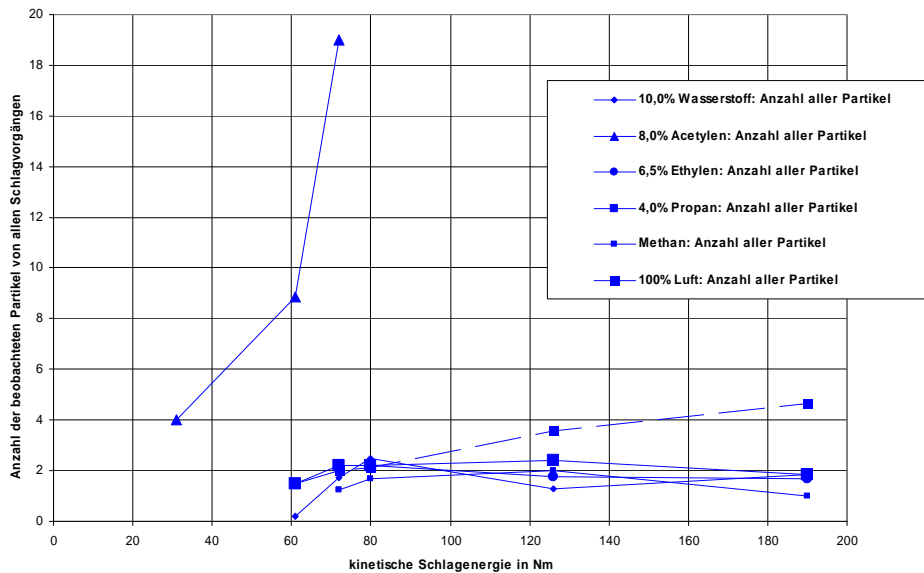


Abb. 13: Anzahl der beobachteten abgetrennten Partikel während des Fluges nach einem Schlagvorgang durch Detektion der -Kamerabilder. Als Referenz ist Acetylen anzusehen.

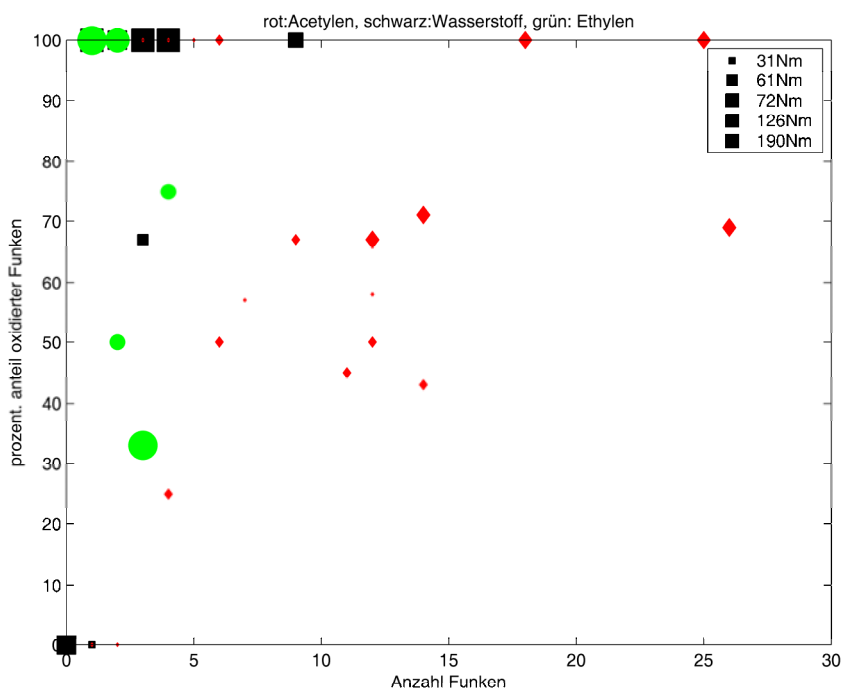


Abb. 14: Prozentualer Anteil oxidierter Funken (y-Achse) aus der -Gesamtzahl registrierter Partikel (x-Achse) pro Schlagvorgang. Jedes Quadrat markiert einen Schlagvorgang. Die Größe der Quadrate ist mit zunehmender Schlagenergie korreliert.



Abb. 15: Entwicklung einzelner (max. bis 3 bis 5) Partikel nach einem Schlagvorgang zwischen unlegiertem Stahl, $W = 31 \text{ Nm}$, 8,0 Vol.-% Acetylen/Luft-Gemisch: Erzeugung der Partikel durch Abtrennvorgang, Beginn der Oxidation - einzelner Partikel, einige Partikel verglühen nach der Oxidation ohne Zündwirkung, Zündung des Gemisches durch einen einzelnen Partikel



Abb. 16: Beginn des Übergangs zu Funkenregen nach einem Schlagvorgang - zwischen unlegiertem Stahl, $W = 71 \text{ Nm}$, 8,0 Vol.-% Acetylen/Luft-Gemisch: Erzeugung der Partikel durch Abtrennvorgang, Beginn der Oxidation, - Zündung des Gemisches durch mehrere Partikel, Beginn der Überlagerung der Wärmefelder

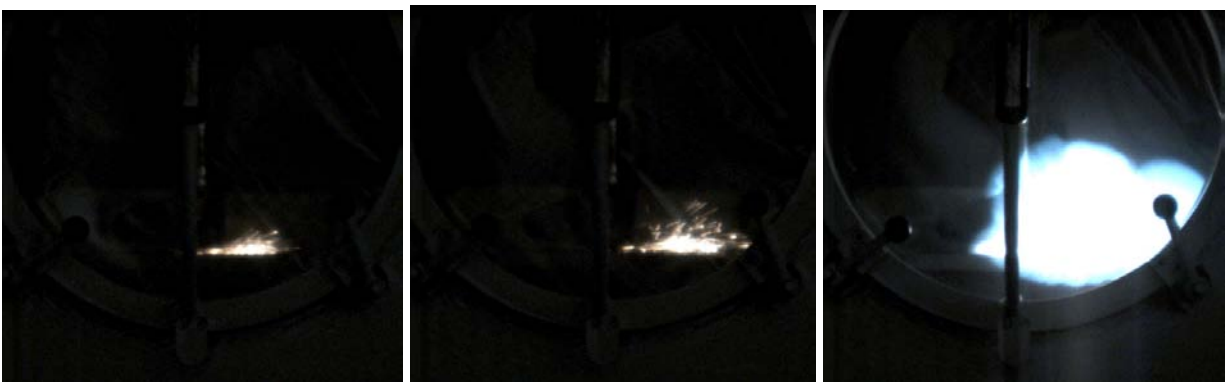


Abb. 17: Entwicklung eines Funkenregens nach einem Schlagvorgang zwischen unlegiertem Stahl, $W = 80 \text{ Nm}$, 8,0 Vol.-% Acetylen/Luft-Gemisch: Erzeugung der Partikel durch Abtrennvorgang, Beginn der Oxidation, Zündung des Gemisches durch mehrere Partikel, deren Wärmefelder sich überlagern

9.1.3 Vergleichsversuche mit Acetylen/Stickstoff-Gemisch außerhalb der definierten Gemischzusammensetzungen

Die Auswertung der Kamerabilder hat einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der kinetischen Schlagenergie und der Anzahl der abgetrennten Partikel bei den Acetylen/Luft-Gemischen gezeigt. Der rein mechanische Prozess des Schlagvorganges hängt aber nicht von der Art des Brenngases und dessen Gemischzusammensetzung ab. Es konnte beobachtet werden, dass es zwischen den abgetrennten Partikeln erhöhter Temperatur und dem Acetylen zu einer Reaktion kam. Diese Reaktion begrenzte sich mikroskopisch klein auf die direkte Umgebung des Partikels. Einige dieser mikroskopisch kleinen bereits eingeleiteten Acetylenzerfallsreaktionen führten nicht zur Zündung des Acetylen/Luft-Gemisches, obwohl das Gemisch (dann einige hundertstel Sekunden später), je nach Acetylenanteil fast immer durch Partikel erhöhter Temperatur oder durch Funken zur Explosion gebracht wurde.

Um die Reaktion zwischen den abgetrennten Partikeln erhöhter Temperatur und dem Acetylen ohne den zusätzlichen Einfluss des Sauerstoffs zu erforschen, wurden daher Vergleichsversuche mit 75 Vol.-% Acetylenanteil in 25 Vol.-% Stickstoff durchgeführt. Bei dieser Gemischzusammensetzung liegt der Stabilitätsgrenzdruck bei 1,35 bar (abs.) /L-19/. Somit konnte bei atmosphärischen Bedingungen das Verhalten der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur bis zum Erlöschen bzw. Verglühen ohne Explosion des Prüfgemisches beobachtet werden.

Es kam während der Schlagfunkenversuche mit 190 Nm mit dem Gemisch 75 Vol.-% C₂H₂ in 25 Vol.-% N₂ erwartungsgemäß zu keiner Explosion des Prüfgemisches. Die Auswertung der Kamerabilder zeigte nur schwach glimmende abgetrennte Partikel erhöhter Temperatur ohne jegliche mikrochemische Reaktion (begrenzt um den Bereich um das/die Partikel herum) mit dem Acetylen (in etwa vergleichbar mit den Schlagfunkenversuchen mit 190 Nm in 100 Vol.-% Helium bzw. Heliumanteil über 45 Vol.-% in Luft). Durch das vollständige Fehlen des Sauerstoffs und somit nicht möglicher Oxidation blieben die abgetrennten Partikel offensichtlich auch unter der für eine auf der Partikeloberfläche stattfindende Acetylenzerfallsreaktion notwendigen Temperatur. Es wurden daher keine weiteren Schlagfunkenversuche mit Acetylen/Stickstoff-Gemischen durchgeführt.

9.1.4 Größe und Geschwindigkeit abgetrennter Partikel mit erhöhter Temperatur in Abhängigkeit von der Schlagenergie

Es wurde als nächstes untersucht, ob eine Zunahme der Schlagenergie zu größeren Partikeln und/oder zu Partikeln mit höherem Energieinhalt führt und ob dieser Faktor die Zündwahrscheinlichkeit beeinflusst.

Hinsichtlich einer höheren kinetischen Schlagenergie hat diese eine höhere Partikelgeschwindigkeit zur Folge. Partikel mit höherer Geschwindigkeit treffen in derselben Zeit mit mehr Gasmolekülen des Brenngasgemisches zusammen als Partikel mit geringerer Geschwindigkeit und geben somit mehr Wärme an die Umgebung ab, was wiederum ihre Zündfähigkeit herabsetzt. Beide Parameter könnten sich aber auch gegenseitig beeinflussen, wenn mit steigender Schlagenergie sowohl größere als auch schnellere Partikel abgetrennt werden.

Auch hier wurde die Kontrollgruppe in Luft mit den Kombinationen unlegierter Stahl / unlegierter Stahl und unlegierter Stahl / Edelstahl eingesetzt.

Bezüglich der Größe der in den Kamerabildern beobachteten abgetrennten Partikel ließ sich keine statistisch signifikante Korrelation mit der Schlagenergie feststellen. Abb. 18 zeigt die mittleren Volumina aller in die Analyse aufgenommenen Partikel für alle Schlagenergien und Gase. In fast allen Fällen war eine starke Streuung der gemessenen Werte zu verzeichnen, die sich in den großen Standardabweichungen niederschlägt. Die optisch sichtbare Partikelgröße ist eine relative Größe, die insbesondere wegen der Vergleichbarkeit der einzelnen Partikel bzw. des Ermitteln besonders zündfähiger Parameterkombinationen verwendet wurde. Der Grund ist die Vermessung der rötlich-glühenden nicht oxidierten und grell-weißen oxidierten Partikel auf den Kamerabildern,

die durch den Lichtschein um das Partikel herum nicht scharf begrenzt waren. Die wahre Partikelgröße ist deutlich kleiner, vermutlich um den Faktor 10 und somit in etwa 0,1 mm bis 0,28 mm im Durchmesser.

Hinsichtlich der Geschwindigkeit der abgetrennten Partikel trat ebenfalls eine starke Streuung der Messwerte auf. In Abb. 19 sind die Anfangsgeschwindigkeiten der gemessenen Partikel (Geschwindigkeit auf dem ersten Einzelbild nach Auftreffen des Schlagbolzens) dargestellt. Für die Kontrollgruppe in Luft mit der Kombination Stahl/Edelstahl ist eine Zunahme der mittleren Geschwindigkeit mit der Schlagenergie zu verzeichnen, allerdings ist die Zahl der registrierten Partikel für diese Gruppe im Vergleich zu den anderen am Geringsten. Auch für die Kombination Stahl/Stahl und das Gemisch Propan/Luft steigt die mittlere Geschwindigkeit leicht mit der Schlagenergie, wenn auch nicht statistisch signifikant. Auffällig ist der Unterschied zu Wasserstoff/Luft und Ethylen/Luft, bei denen die mittleren Geschwindigkeiten nicht mit der Schlagenergie ansteigen und im Vergleich zur ersten Gruppe niedriger liegen. Da für Acetylen/Luft-Gemische nur bis 72 Nm einzelne Partikel beobachtet werden konnten, ist keine Aussage über die Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit möglich. Beobachtungen über 72 Nm waren vermutlich durch zunächst kleine Acetylen-Zerfallsreaktionen um die einzelnen Partikel herum nicht möglich, da dann nur noch eine große leuchtende Wolke zu beobachten war.

Werden nur die Funken betrachtet, die eindeutig die Zündung verursachten, ist kein deutlicher Unterschied zu den anderen Partikeln hinsichtlich Größe und Geschwindigkeit zu erkennen. Abgesehen von zwei Partikeln bei Acetylen/Luft bei $W = 31$ Nm und Wasserstoff/Luft bei 80 Nm Schlagenergie lagen alle Größen im Bereich der in Abb. 5 dargestellten Mittelwerte. Die Geschwindigkeiten streuten dagegen sehr stark.

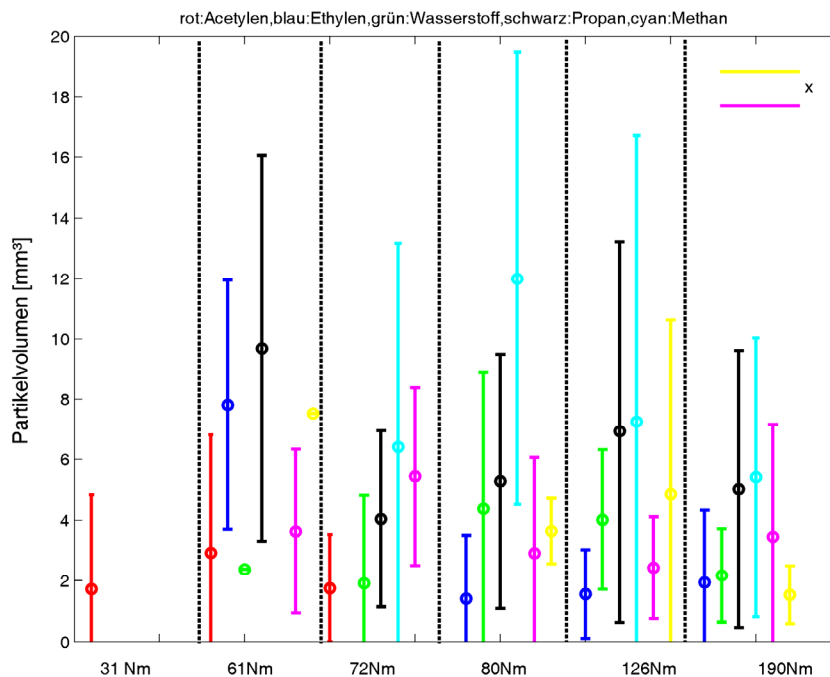


Abb. 18: Mittlere Volumina aller abgetrennten Partikel unabhängig vom Oxidationsverhalten und für alle verwendeten Brenngasgemische über der Schlagenergie mit den zugehörigen Standardabweichungen. Die in der Legende mit x gekennzeichneten Werte markieren die Kontrollgruppe in Luft mit der Werkstoffkombination unlegierter Stahl / unlegierter Stahl (---) und unlegierter Stahl / Edelstahl (---). Für $W = 31$ Nm konnte nur bei Acetylen/Luft-Gemischen Partikel beobachtet werden und ab $W = 80$ Nm trat für dieses Brenngasgemisch nur noch Funkenregen auf.

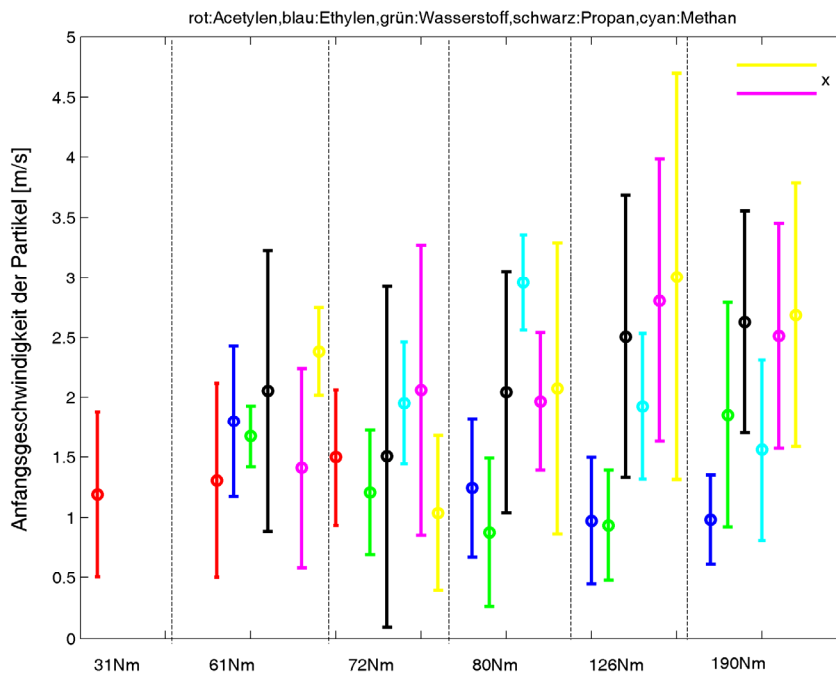


Abb. 19: Mittlere Anfangsgeschwindigkeiten aller abgetrennten Partikel unabhängig vom Oxidationsverhalten und für alle verwendeten Brenngasgemische über der Schlagenergie mit den zugehörigen Standardabweichungen. Die in der Legende mit x gekennzeichneten Werte markieren die Kontrollgruppe in Luft mit der Werkstoffkombination unlegierter Stahl / unlegierter Stahl (---) und unlegierter Stahl / Edelstahl (---). Für $W = 31 \text{ Nm}$ konnte nur bei Acetylen/Luft-Gemischen Partikel beobachtet werden und ab $W = 80 \text{ Nm}$ trat für dieses Brenngasgemisch nur noch Funkenregen auf.

9.1.5 Zeit bis zur Oxidation und Dauer der Oxidation für abgetrennte Partikel mit erhöhter Temperatur in Abhängigkeit von der Schlagenergie

Die bisherigen Ergebnisse belegen den Einfluss einzelner oxidierter Partikel auf die Zündwahrscheinlichkeit zumindest bei Acetylen/Luft- (im Bereich bis 72 Nm) und bei Wasserstoff/Luft-Gemischen. Durch die mit steigender Zündenergie eines Brenngas/Luft-Gemisches stark sinkende Anzahl von gefilmten Schlagfunkenversuchen mit erfolgten Explosionen lässt sich diese Vermutung nur bedingt auf die weiteren Brenngas/Luft-Gemische verallgemeinern. Allerdings zeigen die Beobachtungen, dass auch bei den anderen Brenngas/Luft-Gemischen nur einzelne oxidierte Partikel die Explosion auslösten. Aus diesem Grund wurde das Oxidationsverhalten der einzelnen Partikel näher untersucht.

Abb. 20 zeigt die mittleren Zeiten, die die Partikel für die jeweilige Schlagenergie vom Auftreffen des Schlaghebels auf der Schlagplatte bis zum Beginn der Oxidation benötigten. Abb. 21 zeigt die mittleren Zeiten, wie lange die Partikel im oxidierten Zustand beobachtet werden konnten. Obwohl sich die Brenngasgemische hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit deutlich voneinander unterscheiden (Wasserstoff etwa um den Faktor 10 höher als die Kohlenwasserstoff-Verbindungen), ist kein eindeutiger Trend zu beobachten.

Auch wenn nur die Funken in Betracht gezogen werden, die das Gemisch zündeten, lässt sich kein signifikanter Unterschied zu den nicht zur Zündung führenden oxidierten Funken feststellen (vergl. Tabellen A-2 bis A-7).

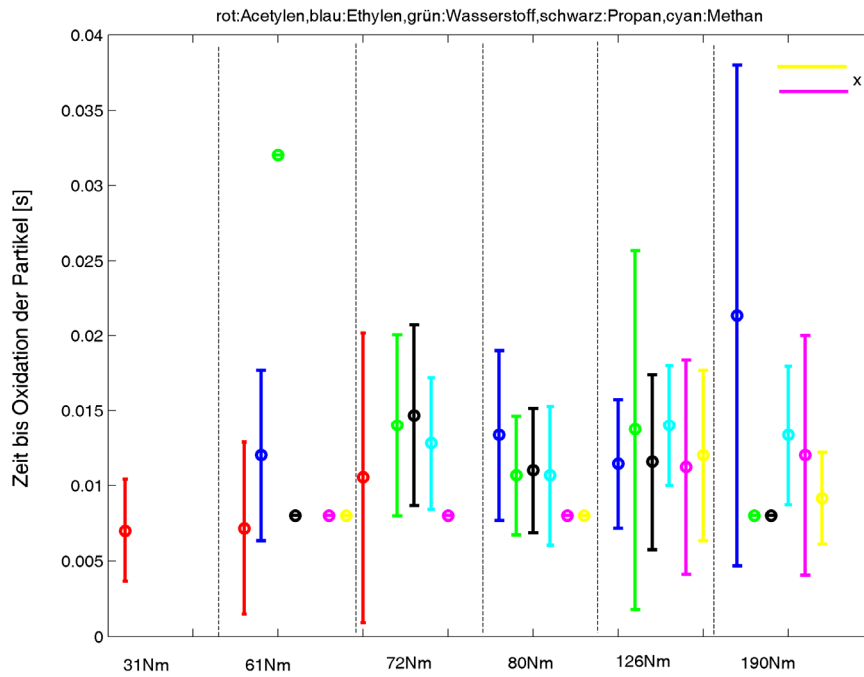


Abb. 20: Mittlere Zeiten vom Auftreffen des Schlaghebels/Schlagbolzens auf die Schlagplatte bis zur Oxidation für alle oxidierten Partikel/Funken und für alle verwendeten Brenngasgemische über der Schlagenergie mit den zugehörigen Standardabweichungen. Die in der Legende mit x gekennzeichneten Werte markieren die Kontrollgruppe in Luft mit der Werkstoffkombination unlegierter Stahl / unlegierter Stahl (---) und unlegierter Stahl / Edelstahl (---). Für $W = 31 \text{ Nm}$ konnte nur bei Acetylen/Luft-Gemischen Partikel beobachtet werden und ab $W = 80 \text{ Nm}$ trat für dieses Brenngasgemisch nur noch Funkenregen auf.

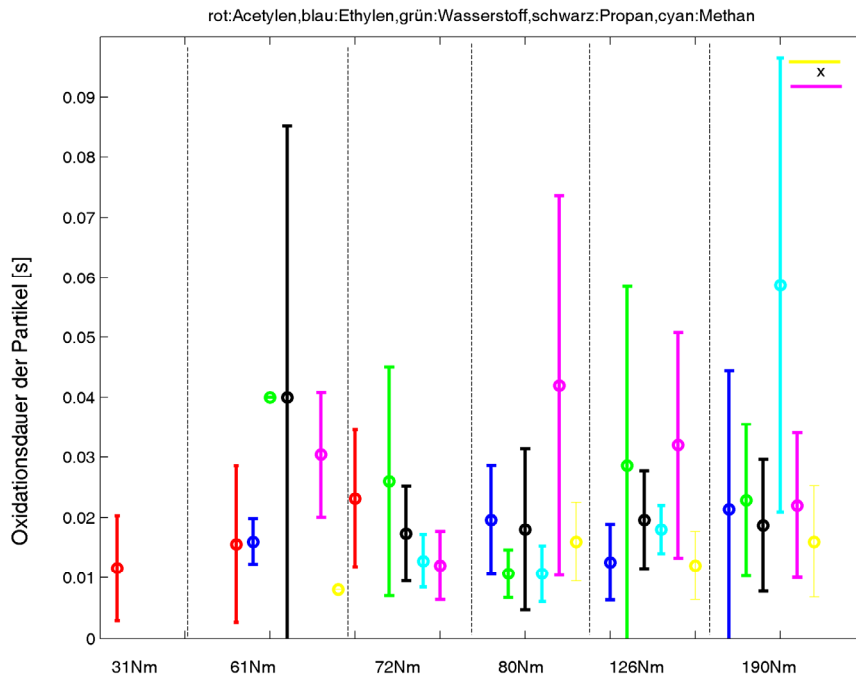


Abb. 21: Mittlere Dauer der Oxidation für alle oxidierten Partikel/Funken und für alle verwendeten Brenngasgemische über der Schlagenergie mit den zugehörigen Standardabweichungen. Die in der Legende mit x gekennzeichneten Werte markieren die Kontrollgruppe in Luft mit der Werkstoffkombination unlegierter Stahl / unlegierter Stahl (---) und unlegierter Stahl / Edelstahl (---). Für $W = 31$ Nm konnte nur bei Acetylen/Luft-Gemischen Partikel beobachtet werden und ab $W = 80$ Nm trat für dieses Brenngasgemisch nur noch Funkenregen auf.

9.1.6 Hauptkomponentenanalyse (PCA) für alle oxidierten Partikel von Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemischen

Abschließend wurde die Interaktion der Parameter Geschwindigkeit, Größe, Oxidationsverhalten, vom Zündverhalten unabhängige Beobachtungsdauer, Schlagenergie und Zündverhalten für alle oxidierten und damit theoretisch zündfähigen Partikel für die Gemische Acetylen/Luft und Wasserstoff/Luft untersucht. Ziel war es, eine mögliche spezifische Konfiguration von Parametereigenschaften für die zündenden Partikel zu finden, die sich im Parameterraum als Ballung oder Cluster manifestieren würde.

Die Ergebnisse der vorhergehenden Abschnitte wurden jedoch auch hier bestätigt. Ein deutlicher Unterschied zwischen den das Prüfgemisch zündenden und nicht zündenden Partikeln konnte nicht gefunden werden.

Abb. 22 und Abb. 23 zeigen die Projektion der 8-dimensionalen Datenpunkte auf die ersten drei Hauptkomponenten der PCA für Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemische. Dabei entspricht jedes Symbol genau einem oxidierten Partikel. Die Kreise kennzeichnen dabei die Partikel, die eine Explosion des Prüfgemisches verursachten, die Rautensymbole alle anderen. Obwohl in beiden Fällen einzelne „Ausreißer“ existieren (markiert durch die Ellipsen), bestehen sie sowohl aus zündenden als auch aus nicht zündenden Partikeln.

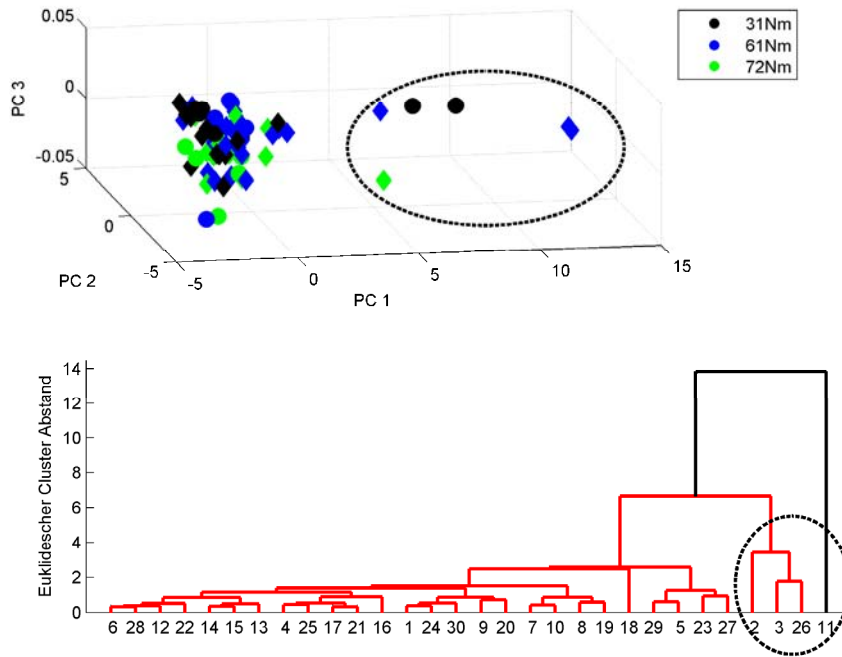


Abb. 22: Hauptkomponentenanalyse (PCA) für Acetylen/Luft-Gemische. Dargestellt ist die Projektion aller oxidierten Partikel/Funken auf die ersten drei Hauptkomponenten, die die größten Varianzen in den Daten einfangen. Die Farben markieren die unterschiedlichen kinetischen Schlagenergien. Die Kreise stellen alle zur Explosion des Prüfgemisches führenden Partikel/Funken dar, die Rauten allen anderen. Das Baumdiagramm markiert die euklidischen Abstände der Partikel in diesem Raum untereinander und ihre Gruppierung zu Clustern. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle Partikel im Baumdiagramm dargestellt; die Zahlen markieren auch „Knoten“, das heißt zwei oder mehrere Partikel in minimalem Abstand. Die Ellipse markiert die sechs Partikel, die auch im Raum der ersten drei Hauptkomponenten als „Ausreißer“ zu erkennen sind.

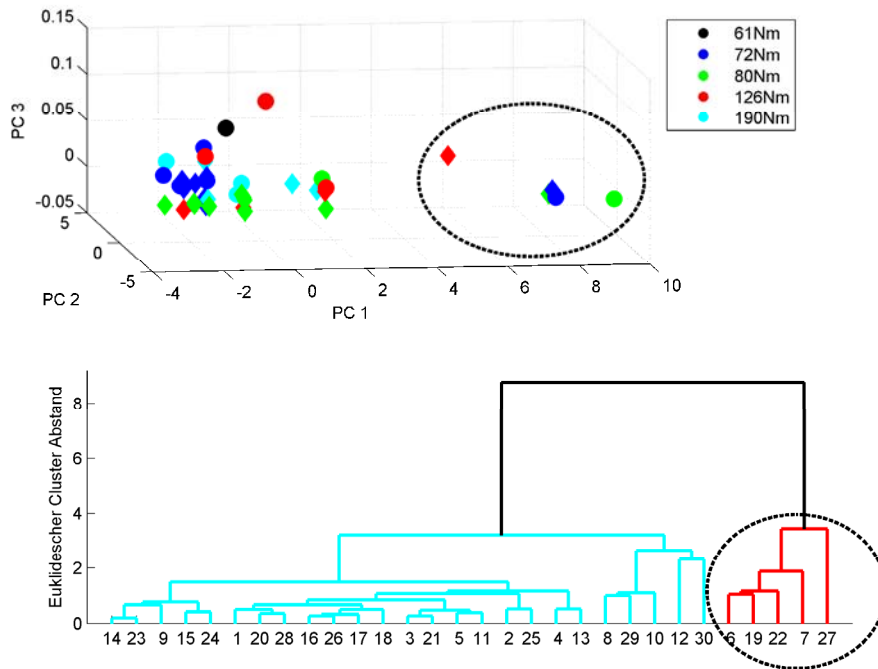


Abb. 23: Hauptkomponentenanalyse (PCA) für Wasserstoff/Luft-Gemische. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle Partikel im Baumdiagramm dargestellt; die Zahlen markieren auch „Knoten“, das heißt zwei oder mehrere Partikel in minimalem Abstand. Die Ellipse markiert die fünf Partikel, die auch im Raum der ersten drei Hauptkomponenten als „Ausreißer“ zu erkennen sind.

10 Interpretation der Ergebnisse

10.1 Streuung der Daten

Der vorliegende Bericht stellt – zusätzlich zur Vervollständigung der empirischen Untersuchung über die Zündwahrscheinlichkeit der Werkstoffpaarung ferritischer Stahl / ferritischen Stahl - einen ersten Versuch zur statistischen Erfassung von messbaren Eigenschaften durch Schlagvorgänge abgetrennter Partikel und ihren möglichen Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeit bei Schlagfunkenversuchen dar. Während eine weitgehend eindeutige Korrelation von Schlagenergie und Zündwahrscheinlichkeit sowie eine Korrelation von Schlagenergie und Anzahl abgetrennter Partikel festgestellt wurden, lieferte die Untersuchung in Hinblick auf die anderen gemessenen Eigenschaften kein eindeutiges Ergebnis.

Die vorgestellten Ergebnisse weisen generell eine starke Streuung auf, die sich an den Standardabweichungen ablesen lässt. Besonders bei den Partikelgrößen und dem Oxidationsverhalten sind im statistischen Mittel keine signifikanten Korrelationen mit der Schlagenergie und damit auch mit der Zündwahrscheinlichkeit festzustellen.

Ein möglicher Grund dafür kann in der Interaktion der einzelnen Teile der Schlagapparatur liegen. Es stellte sich heraus, dass die Schlagversuche durch die Verformung und Aufräumung der Oberfläche des Schlagbolzens und der Schlagplatte bei hohen kinetischen Schlagenergien bereits nach wenigen Schlägen stark unterschiedliche Resultate zur Folge hatten. So konnten in einigen Fällen bei einer Schlagenergie von 190 Nm in den ersten 2 bis 3 Schlagversuchen nur ein oder sogar gar kein Partikel beobachtet werden, während die nächsten Schläge große Funken oder sogar Fun-

kenregen zur Folge hatten. Damit beeinflusste bereits die Anzahl der Schlagvorgänge die Beschaffenheit der Schlagpartner und somit auch das Messergebnis.

Auch minimale, manuell (mit der für die Versuche verwendeten Schlagfunkenmaschine) nicht beeinflussbare Änderungen in den Anfangsbedingungen, wie die Ausrichtung der Schlagplatte relativ zum gespannten Schlaghebel, konnten dazu führen, dass in einem Fall bei gleichen Versuchsbedingungen ein streifender Schlag mit mehreren abgetrennten Partikeln aber mit geringerer Schlagenergie erfolgte. In einem anderen Fall erfolgte kein streifender Schlag, die Schlagenergie wurde vollständig auf die Schlagplatte übertragen, ohne jedoch oxidierte Partikel abzutrennen.

Um möglichst identische Versuchsbedingungen zu erreichen, wäre es unter anderem erforderlich gewesen, bei höheren Schlagenergien nach jedem einzelnen Schlag Schlagbolzen und Schlagplatte auszutauschen. Dies hätte jedoch einen wesentlich höheren Materialaufwand (angefertigte Schlagpartner, Brenngase) und einen unvermeidbar höheren Zeitaufwand (Wechsel der Schlagpartner, Herstellen und Einfüllen des Gemisches) zur Folge gehabt. Für zukünftige Untersuchungen ist eine veränderte Schlagfunkenmaschine geplant, bei der das Schlagstück als Projektil mit definierter kinetischer Energie durch einen Fallturm auf die Schlagplatte schlägt. Eine solche Apparatur ist in der Lage, die Varianzen in den Anfangsbedingungen auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Varianz in den Daten leitet sich zusätzlich aus den sehr unterschiedlichen Eigenschaften einzelner Partikel pro Schlag ab. Einzelne abgetrennte Partikel unterschieden sich teils deutlich in Größe, Geschwindigkeit und Oxidationsverhalten voneinander. So wurden große Funken beobachtet, die verglühten, während ein nur halb so großes Partikel zunächst nicht sichtbar war, dann oxidierte und das Gemisch zur Explosion brachte.

10.2 Mögliche Einflüsse auf die Zündwahrscheinlichkeit

Ein eindeutiges Ergebnis der statistischen Untersuchung ist die Zunahme der abgetrennten Partikel und des prozentualen Anteils oxidierten Partikel mit der Zunahme der Schlagenergie bei Acetylen/Luft. Bei allen anderen Brenngas/Luft-Gemischen der IEC-Gasegruppen konnte diese Korrelation zumindest nicht beobachtet werden. Lediglich bei der Kontrollgruppe in Luft für die Werkstoffkombination Stahl/Stahl konnte eine Korrelation festgestellt werden.

Die rein mechanischen Prozesse des Schlagvorganges und für das Abtrennen der Partikel hängen nicht von der Zusammensetzung des Gasgemisches ab. Daher lässt sich der Anstieg der Anzahl abgetrennter Partikel aus den Versuchen mit Acetylen mit dem Anstieg der kinetischen Schlagenergie auf alle anderen Gasgemische verallgemeinern. Durch mikrochemische Zerfallsreaktionen zwischen abgetrennten Partikeln erhöhter Temperatur und oxidierten Funken mit dem Acetylen (sofern auch Sauerstoff mit im Gemisch vorhanden ist), sind diese Partikel visuell zu erkennen, während dies bei den anderen Gemischen auf Grund fehlender zusätzlicher chemischer Reaktionen nicht der Fall ist. Eine Möglichkeit, die tatsächliche und nicht lediglich beobachtete Anzahl abgetrennter Partikel zu bestimmen, könnte in späteren Untersuchungen darin bestehen, die Partikel direkt nach dem Schlagvorgang mit Hilfe eines Filternetzes aufzufangen.

Ein weiteres Ergebnis ist, dass vor allem einzelne Funken ein Gemisch zünden und die Zündwahrscheinlichkeit bereits auf 100 % ansteigen lassen, ohne dass bereits ein Funkenregen auftritt. Damit ist die Aufaddierung der einzelnen Wärmefelder vieler kleinerer oxidierten Partikel zu einem großen Wärmefeld nicht entscheidend. Vielmehr deutet dieses Ergebnis auf eine erhöhte Zündwahrscheinlichkeit infolge der Zunahme der Anzahl abgetrennter Partikel hin.

Je mehr Partikel durch einen Schlagvorgang abgetrennt werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein oxidiertes Partikel aus der Menge der insgesamt abgetrennten Partikel über genügend Energie zur Zündung des Brenngas/Luft-Gemisches verfügt.

Um genügend Energie zur Zündung eines Brenngas/Luft-Gemisches zur Verfügung zu haben, muss das Partikel eine bestimmte Größe übersteigen, um den Energieverlust infolge der Wärme-

ableitung durch das umgebende Gas auszugleichen. Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus dem Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Brenngases auf die Oxidationsfähigkeit der abgetrennten Partikel (Wasserstoff hat bei ähnlich geringer Mindestzündenergie eine rund 10-fach höhere Wärmeleitfähigkeit als Acetylen – und ähnlich wie auch die weiteren Kohlenwasserstoff-Verbindungen der Referenz-Brenngase). Eine Zunahme der Partikelgröße mit der Höhe der Schlagenergie konnte zwar nicht gefunden werden. Jedoch bedeutet das nicht, dass sie nicht aufgetreten ist. Zudem konnten bei Schlagfunkenversuchen mit 190 Nm teilweise deutlich größere Partikel gefunden werden /L-8/. Vermutlich ist der Mangel an Daten und die große Streuung der Messwerte dafür verantwortlich.

Wie der Vergleich der Ergebnisse der Schlagfunkenversuche zwischen der kleinen SFM und der großen SFM zeigt, hat auch die Schlaghebelgeschwindigkeit Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeit. Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit zwischen den Schlagpartnern aber ähnlich hoher kinetischer Schlagenergie steigt auch (wenn auch in vermutlich geringem Maß) die Zündwahrscheinlichkeit. Mit den vorhandenen Prüfmaschinen lassen sich konstruktiv bedingt jeweils keine anderen Schlaghebelgeschwindigkeiten einstellen. Wegen der fehlenden Einstellmöglichkeiten wurde diese Einflussgröße auch nicht in die Datenanalyse mit einbezogen.

11 Zusammenfassung

Die beiden wesentlichen Ziele der Untersuchung bestanden darin, die Werte für die Zündwahrscheinlichkeit von Stahl-Schlagfunken in Abhängigkeit von der kinetischen Schlagenergie (von $W = 10 \text{ Nm}$ bis 277 Nm) und der Mindestzündenergie gemäß den in den IEC-Explosionsgruppen verwendeten Brenngas/Luft-Gemischen zu ermitteln. Des Weiteren sollte eine mögliche Korrelation zwischen den gemessenen Eigenschaften einzelner Partikel und der Zündwahrscheinlichkeit heraus gefunden werden, wodurch besonders zündgefährliche Kombination von Einflussgrößen extrahieren werden könnten.

Die mit der hier angewendeten Schlagkinematik, Geometrie der Schlagpartner, verwendeten Werkstoffpaarungen und Brenngas/Luft-Gemischen ermittelten Zündwahrscheinlichkeiten der jeweiligen kinetischen Schlagenergie von 10 Nm bis 277 Nm in Abhängigkeit zu den Referenz-Brenngasen der IEC-Explosionsgruppen sind in der Abbildung 12 graphisch dargestellt.

Die folgenden Werte der Schlagenergien zeigen jeweils den Beginn der im Versuch mit der hier angewandten Schlagkinematik, Geometrie der Schlagpartner sowie weiteren beschriebenen Randbedingungen und Anzahl der Versuche beobachteten Explosionen der entsprechenden IEC-Explosionsgruppe:

1) Kinetische Schlagenergie:

Erwartungsgemäß bestätigte sich, dass die Zündwahrscheinlichkeit bei zunehmender kinetischer Schlagenergie bis zu einem Grenzwert steigt.

W = 3 Nm:

Keine Zündgefahr, da keine oxidierten Partikel/Funken abgetrennt werden konnten. Im nicht oxidierten Zustand stellen mit dieser Schlagenergie abgetrennte Partikel keine Zündgefahr dar.

W = 10 Nm:

Explosionen mit den Referenzbrenngas/Luft-Gemischen der IEC-Explosionsgruppe IIC (Acetylen, Wasserstoff). Aufgrund von Literaturangaben können Explosionen bei Ethylen nicht ausgeschlossen werden.

W = 61 Nm:

Die Zündwahrscheinlichkeit von stöchiometrischen Acetylen/Luft-Gemischen liegt bei 100 %.

W = 72 Nm:

Die Zündwahrscheinlichkeit von (unterstöchiometrischen) Wasserstoff/Luft-Gemischen liegt bei 100 %.

W = 80 Nm:

Explosionen mit dem Referenzbrenngas/Luft-Gemisch der IEC-Explosionsgruppe IIB (Ethylen).

W = 190 Nm:

Explosionen mit den Referenzbrenngas/Luft-Gemischen der IEC-Explosionsgruppe IIA und I (Propan, Methan).

W = 277 Nm:

Bis 190 Nm war bei allen Referenzbrenngas/Luft-Gemischen ein Anstieg der Zündwahrscheinlichkeit mit steigender kinetischer Schlagenergie zu erkennen. Eine weitere Erhöhung der Schlagenergie auf 277 Nm (mit der hier angewandten Schlagkinematik und Geometrie der Schlagpartner sowie weiteren Randbedingungen)

führte zu keiner weiteren Steigerung der Zündwahrscheinlichkeit, da die in die abgetrennten Partikel eingebrachte Energie durch die Änderung des Verhältnisses von kinetischer Schlagenergie und höherer Verformungs- und Abtrennarbeit nicht mehr zunahm.

2) Gemischzusammensetzung und Oxidationsverhalten:

Der höchste Anteil von oxidierten Schlagfunken wurde – außer bei Wasserstoff - im Bereich bis 13,5 Vol.-% Brenngasanteil in Luft erzeugt. **Somit ist bei den Kohlenwasserstoff-Verbindungen der Referenzbrenngase der IEC-Explosionsgruppen die stöchiometrische Gemischzusammensetzung auch die optimale Gemischzusammensetzung zur Erzeugung des höchsten Anteils von oxidierten Schlagfunken.** Bei Wasserstoff wurde festgestellt, dass die beste Oxidationsfähigkeit bei 8,5 Vol.-% bis 10,0 Vol.-% Wasserstoff in Luft liegt; also im deutlich unterstöchiometrischen Bereich.

Die Erzeugung des höchsten Anteils von oxidierten Schlagfunken bedeutet auch die jeweils höchste Zündwahrscheinlichkeit.

Nachgewiesen wurde bei steigender kinetischer Schlagenergie ein deutlich geringerer Einfluss der Gemischzusammensetzung auf die Oxidationsfähigkeit der abgetrennten Partikel und somit auf die Zündwahrscheinlichkeit. Je höher die kinetische Schlagenergie umso weniger sind oxidationsfähige Stahl-Schlagfunken aufgrund des hohen Energieinhalts durch die steigende Verformungs- und Abtrennleistung auf die für die Explosion eines Brenngas/Luft-Gemisches durch die Zündquelle Schlagfunken zündwilligste Gemischzusammensetzung angewiesen (vergl. Abschn. 7.4).

Mit energiereichen Schlagvorgängen ≥ 190 Nm abgetrennte Stahl-Partikel können auch im nicht oxidierten Zustand Brenngasgemische insbesondere der IEC-Explosionsgruppe IIC (Acetylen) zünden.

Somit ist zwar das stöchiometrische Gemisch (außer bei Wasserstoff) für die Zündquelle mechanisch erzeugte Schlagfunken das zündwilligste und somit das Gemisch mit der höchsten Zündwahrscheinlichkeit, aber auch deutlich überstöchiometrische Gemische können durch einzelne Schlagvorgänge zur Explosion gebracht werden.

3) Zündzeit - Zeitdauer vom Abtrennvorgang bis zur Zündung des Gemisches:

Die Dauer vom Abtrennvorgang unmittelbar nach einem Schlagvorgang bis zur Explosion des Brenngas/Luft-Gemisches beträgt als Mittelwert 0,05 s (für Acetylen/Luft-Gemische) bis 0,1 s (für Wasserstoff/Luft-Gemische).

4) Temperatur der abgetrennten Partikel:

Oxidationsprozesse bei Stahl-Partikeln finden ab etwa 500 °C (in Luft) bis 800 °C (in Brenngas/Luft-Gemischen und je nach Brenngasanteil im Gemisch) statt. Oxidierte Stahl-Schlagfunken können dann unter atmosphärischen Bedingungen eine Temperatur bis etwa 1.775 °C, unter erhöhtem Sauerstoffanteil (und bei Schleifvorgängen mit Korundschleifscheiben) bis 2.250 °C erreichen.

Die mit energiereichen Schlagvorgängen in Höhe von 190 Nm abgetrennten Stahl-Partikel weisen ohne mögliche Oxidation in Gemischen ohne Luft direkt nach dem Abtrennvorgang eine Temperatur in dem Bereich über 305 °C bis 800 °C auf. Bereits -

ohne Oxidation sind diese Stahlpartikel in Acetylen zündfähig, durch Oxidation steigt neben der Temperatur und dem Energieinhalt vor allem die Zündwahrscheinlichkeit.

Es ist zu vermuten, dass überstöchiometrische Acetylen-Gemische auch durch nicht energiereiche Schlagvorgänge (≤ 190 Nm) zur Explosion gebracht werden können. Möglicherweise können auch andere reaktionsfähige Brenngase durch einzelne abgetrennte Stahlpartikel erhöhter Temperatur gezündet werden.

Ferner kann angenommen werden, dass auch mit Chrom hochlegierte und somit als funkenarm betrachtete Edelstähle ($\geq 16,5$ % Cr-Anteil) durch energiereiche Schlagvorgänge zündfähige Partikel erhöhter Temperatur erzeugen können.

5) Anzahl und Größe der abgetrennten bzw. oxidierten Partikel/Funken:

Festgestellt werden konnte die Zunahme der Anzahl der abgetrennten Partikel und des prozentualen Anteils oxidierten Partikel/Funken mit der Erhöhung der Schlagenergie bei Acetylen/Luft und bei der Kontrollgruppe in Luft. Auf die anderen Brenngas/Luft-Gemische lässt sich Zunahme der Anzahl abgetrennter Partikel übertragen, da die rein mechanischen Prozesse für das Abtrennen der Partikel erhöhter Temperatur (nicht jedoch der dann mögliche Oxidationsprozess während des Fluges der Partikel durch das Gemisch) nicht von der Zusammensetzung des Gasgemisches abhängen können.

Die anderen gemessenen Parameter Größe, Geschwindigkeit und Oxidationsverhalten der einzelnen Partikel lassen hingegen in der vorhandenen Datenmenge keinen eindeutigen Trend erkennen. Die Auswertung belegt den eher stochastischen Charakter der Messresultate. Auch eine Hauptkomponentenanalyse (PCA), die die Interaktion einzelner Parameter berücksichtigt, konnte keine spezifische Kombination messbarer Eigenschaften der Partikel finden, die mit einer deutlichen Erhöhung der Zündwahrscheinlichkeit korreliert ist. Der Durchmesser der abgetrennten nicht oxidierten Partikel erhöhter Temperatur liegt etwa im Bereich von 0,1 mm bis 0,28 mm.

Je höher die kinetische Schlagenergie, umso mehr Partikel werden durch einen Schlagvorgang abgetrennt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein oxidiertes Partikel aus der Menge der insgesamt abgetrennten Partikel über genügend Energie zur Zündung des Brenngas/Luft-Gemisches verfügt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Anzahl der abgetrennten Partikel mit steigender Schlagenergie einen wesentlichen Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeit hat. Auch bei einer stochastischen Verteilung der gemessenen Partikeleigenschaften steigt mit der Anzahl abgetrennter Partikel die Wahrscheinlichkeit, dass einige Partikel oxidieren. Zumeist verglühen diese oxidierten Partikel/Funken ohne Zündwirkung.

Daraus folgt, dass die Zündwahrscheinlichkeit steigt, je mehr abgetrennte Stahl-Partikel pro Schlagvorgang tatsächlich zu Funken oxidieren.

Somit ist bei einem durch Schlagvorgänge erzeugten Funkenregen nicht die Überlagerung der Wärmefelder maßgeblich für die Zündwahrscheinlichkeit, sondern die hohe/höhere Anzahl der oxidierten Partikel/Funken.

6) Relativgeschwindigkeit zwischen den Schlagpartnern:

Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit zwischen den Schlagpartnern aber ähnlich hoher kinetischer Schlagenergie steigt die Zündwahrscheinlichkeit.

7) **Kombination besonders zündwirksamer Einflussgrößen:**

Mechanisch erzeugte Schlagfunken stellen in explosionsgefährdeten Bereichen eine potentielle Zündquelle dar. Eine Vielzahl von mechanischen und reaktionskinetischen Einflüssen verursacht dabei eine komplexe Interaktion von Parametern, von deren Auswirkung auf die Zündwahrscheinlichkeit bislang wenig bekannt ist.

Daher lassen die statistisch erfassten Eigenschaften von Schlagfunken in dieser Untersuchung auf stochastische Prozesse schließen, bei denen die Anzahl der durch einen Schlagprozess abgetrennten Partikel und deren Oxidationsverhalten sowie die Höhe der kinetischen Schlagenergie entscheidenden Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeit hat. Eine Kombination von besonders zündwirksamen Einflussgrößen konnte nicht gefunden werden – was nicht heißt, dass diese nicht existiert!

12 **Ausblick**

Um die gesamte Bandbreite der Messparameter abgetrennter Partikel aus Schlagvorgängen abzudecken und um die Standardabweichungen zu verringern, ist für weiterführende Untersuchungen die statistische Erfassung einer größeren Anzahl von Schlagversuchen notwendig. Für eine weitergehende Untersuchung der durch den Abtrennprozess verursachten mechanischen Eigenschaften der Partikel wie Größe und Geschwindigkeit lässt sich aufgrund der visuellen Detektierbarkeit das Acetylen/Luftgemisch als geeignetes Studienobjekt heranziehen.

Allerdings ist dies nur im unteren Bereich der Schlagenergie bis etwa 80 Nm möglich, da bei höheren Energien ein Übergang zu Funkenregen erfolgt, der eine Beobachtung einzelner Partikel unmöglich macht. Denkbar ist der Einsatz von Filternetzen um die Schlagstelle herum, um auch bei den im Vergleich zu Acetylen/Luft schwächer reagierenden Gasgemischen die Menge der abgetrennten Partikel zu erfassen und zumindest ihre Größe nachträglich zu bestimmen. Darüber hinaus ist die Konstruktion einer erweiterten Schlagfunkenapparatur erforderlich, für die sich pro Schlagversuch möglichst identische Randbedingungen mit möglichst reduzierten Rüstzeiten einstellen lassen.

Die Schlagfunkenversuche sind, von Vergleichsversuchen abgesehen, mit dem jeweils für diese Zündquelle zündfähigsten Brenngas/Luft-Gemisch durchgeführt worden. Außer bei Wasserstoff sind dies die stöchiometrischen Gemische. Es wäre zu erforschen, wie sich das jeweilige Oxidationsverhalten und insbesondere die Zündwahrscheinlichkeit bei nicht stöchiometrischen Gemischen verändern, und welcher Bereich der Gemischzusammensetzung durch Schlagfunken zündfähig ist.

Im Allgemeinen liegt die Relativgeschwindigkeit bei Schlagvorgängen im Bereich von $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis etwa $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Bei ähnlich hoher kinetischer Schlagenergie steigt mit der Erhöhung der Relativgeschwindigkeit auch die Zündwahrscheinlichkeit. Daher wäre zu ermitteln, wie hoch der Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf die Zündwahrscheinlichkeit ist.

Bei Schlagvorgängen zwischen (insbesondere mit Chrom über 18,1 % Chromanteil) hochlegierten Edeltählen kommt es aus werkstofftechnischen Gründen oft nicht zur Erzeugung von oxidierten Partikeln/Funken. Wie Untersuchungen an überstöchiometrischen Acetylen/Luft-Gemischen mit energiereichen Schlagvorgängen mit 190 Nm gezeigt haben, können auch nicht oxidierte Partikel erhöhter Temperatur das Gemisch zur Explosion bringen. Auch die Schlagfunkenversuche der Kontrollgruppe ferritischer Stahl / Edelstahl erzeugte Funken. Es wäre daher zu untersuchen, ob und unter welchen Bedingungen Edelstahl-Schlagfunken Brenngas/Luft-Gemische zur Explosion können.

13 Literatur

- /L-1/ Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (ATEX 100a)
- /L-2/ Steen, H. (BAM): Handbuch des Explosionsschutzes. Weinheim: Verlag Wiley-VCH 2000.
- /L-3/ Bartknecht, W.: Explosionsschutz – Grundlagen und Anwendung. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, Hongkong, Barcelona, Budapest: Springer – Verlag 1993.
- /L-4/ DIN EN 1127-1: Explosionsschutz, Teil 1: Grundlagen und Methodik. Berlin: Beuth Verlag 1997.
- /L-5/ DIN EN 13463-1: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 1: Grundlagen und Anforderungen. Beuth Verlag 2008.
- /L-6/ Technische Regeln für Betriebssicherheit TRBS 2152, Gefährliche Explosionsfähige Atmosphäre – Allgemeines – und deren weitere Teile. Hrsg.: Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie – BG RCI
- /L-7/ Witt, Hans: Explosionsschutz bei Ventilatoren, Veröff.: Normenausschuss Sicherheit von Geräten (NASG/GUA), Nr. 15-97.
- /L-8/ Grunewald, Th. (BAM), Grätz, R. (BAM): Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter Schlagfunken in explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemischen, Untersuchung der Werkstoffkombination Stahl/Stahl. In: Forschungsbericht 279. Hrsg.: BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin 2007. ISBN 978-3-9811655-1-7.
- /L-9/ Voigtsberger, P. (BAM), Schulz, F. (BAM): Untersuchung über die Zündwirkung metallischer Funken auf Mischungen von brennbaren Gasen, Dämpfen und Stäuben mit Luft. In: BAM-Forschungsbericht. Berlin 1957. [BAM-II.11-Lit. 1-2]
- /L-10/ Dittmar, P. (BAM): Reib- und Schlagfunken als Zündquelle. In: Handbuch der Raumexplosionen. Hrsg.: Freytag, H.-H. Weinheim: Verlag Chemie 1965. [BAM-II.11-Lit. 5-1]
- /L-11/ Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (EX-VO), 1963
- /L-12/ IEC 60079-1 Ed. 6.0: Explosive Atmospheres – Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures "d"
- /L-13/ Voigtberger, P. (BAM): Zündfähigkeit von Schleiffunken gegenüber explosiblen Gas- und Dampf-Luft-Gemischen. In: Bndesarbeitsblatt, Heft 6/1955. [BAM-II.11-Lit. 1-1]
- /L-14/ Konschack, M. (BAM), Voigtsberger, P. (BAM): Mechanisch erzeugte Funken als Zündquelle für Acetylen/Luft-Gemische. In: Arbeitsschutz, Heft 11. Stuttgart, Köln: Verlag W. Kohlhammer, November 1957. [BAM-II.11-Lit. 2-1]
- /L-15/ Schulz, F. (BAM), Dittmar, P. (BAM): Experimentelle Untersuchungen über die Zündfähigkeit von Schlagfunken gegenüber explosiblen gasförmigen Gemischen. In: Arbeitsschutz, Heft 10. Stuttgart, Köln: Verlag W. Kohlhammer, Oktober 1963. [BAM-II.11-Lit. 3-1]

- /L-16/ Behrend, E. (BAM); Ritter, K.: Mechanisch erzeugte Funken. In: Handbuch des Explosionsschutzes. Hrsg.: Steen, H. (BAM). Weinheim: Verlag Wiley-VCH 2000. [BAM-II.11-Lit. 5-4]
- /L-17/ Reimer, H.: Untersuchung über die Zündbarkeit eines Methan-Luft-Gemisches durch Schlagfunken bei Stahl. Hrsg.: Dissertation an der TH Stuttgart 1957 [BAM-II.11-Lit. 3-6]
- /L-18/ Schröder, V. (BAM) und Holtappels, K. (BAM), Zündung von Acetylen durch Druckstoß in Rohrleitungen. In: Chemie Ingenieur Technik CIT, Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH, 2009
- /L-19/ Schendler, Th. (BAM), Schulze, H.-P. (BAM), Stabilitätsgrenzdrücke von Acetylen/Gas-Gemischen. In: Chemie Ingenieur Technik CIT, Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH, 1990

14 Anhang

14.1 Tabellen

Tabelle A-1:

Werte des Oxidationsverhaltens und der Zündwahrscheinlichkeiten für alle verwendeten Referenz-Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppen

| Brenngasart und Gemischzusammensetzung | E_{kin} [Nm] | Anteil beobachteter oxidierter Funken [%] | Zündwahrscheinlichkeit [%] | Anzahl der Stahl-Schlagfunkenversuche [Stück] | Relativgeschwindigkeit [m/s] | Flächenpressung [N/mm ²] |
|--|-------------------|---|----------------------------|---|------------------------------|--------------------------------------|
| Wasserstoff | | | | | | |
| 10,0 % H ₂ | 3,0 ¹⁾ | 0 | 0,0 | 50 | 12,4 | 0,41 |
| 10,0 % H ₂ | 10 ¹⁾ | 67 | 1,47 ³⁾ | 100 | 10,3 | 1,36 |
| 10,0 % H ₂ | 31 | 30 (19) ²⁾ | 1,78 | 56 | 5,7 | 1,2 |
| 10,0 % H ₂ | 61 | 25 (70) ²⁾ | 20 | 20 | 8,1 | 1,6 |
| 10,0 % H ₂ | 72 | 100 | 100 | 10 | 8,8 | 1,9 |
| 10,0 % H ₂ | 80 | 100 | 100 | 8 | 9,3 | 2,4 |
| 10,0 % H ₂ | 126 | 100 | 100 | 7 | 11,6 | 4,1 |
| 10,0 % H ₂ | 190 | 100 | 100 | 10 | 14,3 | 7,8 |
| 10,0 % H ₂ | 277 | / | / | / | 17,3 | 12,2 |
| Acetylen | | | | | | |
| 8,0 % C ₂ H ₂ | 3,0 ¹⁾ | 0 | 0,0 | 50 | 12,4 | 0,41 |
| 8,0 % C ₂ H ₂ | 10 ¹⁾ | 91 | 3,0 ³⁾ | 100 | 10,3 | 1,36 |
| 8,0 % C ₂ H ₂ | 31 | 100 | 65 | 20 | 5,7 | 1,2 |
| 8,0 % C ₂ H ₂ | 61 | 100 | 100 | 10 | 8,1 | 1,6 |
| 8,0 % C ₂ H ₂ | 72 | 100 | 100 | 7 | 8,8 | 1,9 |
| 8,0 % C ₂ H ₂ | 80 | 100 | 100 | 8 | 9,3 | 2,4 |
| 8,0 % C ₂ H ₂ | 126 | 100 | 100 | 7 | 11,6 | 4,1 |
| 8,0 % C ₂ H ₂ | 190 | 100 | 100 | 20 | 14,3 | 7,8 |
| 8,0 % C ₂ H ₂ | 277 | / | / | / | 17,3 | 12,2 |
| Ethylen | | | | | | |
| 6,5 % C ₂ H ₄ | 10 ¹⁾ | 96 ¹⁾ | 0,0 ³⁾ | 130 | 10,3 | 1,36 |
| 6,5 % C ₂ H ₄ | 31 | / | / | / | 5,7 | 1,2 |
| 6,5 % C ₂ H ₄ | 61 | 100 | 0,0 | 100 | 8,1 | 1,6 |
| 6,5 % C ₂ H ₄ | 72 | 100 | 0,0 | 100 | 8,8 | 1,9 |
| 6,5 % C ₂ H ₄ | 80 | 100 | 1,49 | 67 | 9,3 | 2,4 |
| 6,5 % C ₂ H ₄ | 126 | 100 | 2,44 | 41 | 11,6 | 4,1 |
| 6,5 % C ₂ H ₄ | 190 | 100 | 20 | 5 | 14,3 | 7,8 |
| 6,5 % C ₂ H ₄ | 277 | 100 | 16,7 | 18 | 17,3 | 12,2 |
| Propan | | | | | | |
| 4,0 % C ₃ H ₈ | 10 ¹⁾ | 84 ¹⁾ | 0,0 | 150 | 10,3 | 1,36 |
| 4,0 % C ₃ H ₈ | 31 | 10 (50) ²⁾ | 0,0 | 10 | 5,7 | 1,2 |
| 4,0 % C ₃ H ₈ | 61 | 50 (40) ²⁾ | 0,0 | 10 | 8,1 | 1,6 |
| 4,0 % C ₃ H ₈ | 72 | 100 | 0,0 | 10 | 8,8 | 1,9 |
| 4,0 % C ₃ H ₈ | 80 | 100 | 0,0 | 10 | 9,3 | 2,4 |
| 4,0 % C ₃ H ₈ | 126 | 100 | 0,0 | 100 | 11,6 | 4,1 |
| 4,0 % C ₃ H ₈ | 190 | 100 | 6,67 | 30 | 14,3 | 7,8 |
| 4,0 % C ₃ H ₈ | 277 | 100 | 2,38 | 42 | 17,3 | 12,2 |
| Methan | | | | | | |
| 9,5 % CH ₄ | 10 ¹⁾ | 88 ¹⁾ | 0,0 | 100 | 10,3 | 1,36 |
| 9,5 % CH ₄ | 31 | (20) ²⁾ | 0,0 | 10 | 5,7 | 1,2 |
| 9,5 % CH ₄ | 61 | 20 (80) ²⁾ | 0,0 | 10 | 8,1 | 1,6 |
| 9,5 % CH ₄ | 72 | 70 (30) ²⁾ | 0,0 | 10 | 8,8 | 1,9 |
| 9,5 % CH ₄ | 80 | 100 | 0,0 | 10 | 9,3 | 2,4 |
| 9,5 % CH ₄ | 126 | 100 | 0,0 | 100 | 11,6 | 4,1 |
| 9,5 % CH ₄ | 190 | 100 | 1,06 | 94 | 14,3 | 7,8 |
| 9,5 % CH ₄ | 277 | 100 | 0,94 | 107 | 17,3 | 12,2 |

1) Die mit der großen Schlagfunkenmaschine ermittelten Werte für die Oxidation sind nicht direkt vergleichbar mit den Werten die mit der kleinen SFM mit Blattfeder ermittelt wurden, da bei ähnlicher kinetischer Schlagenergie die kleine SFM konzeptbedingt eine höhere Schlaggeschwindigkeit und Flächenpressung aufweist.

2) Werte in Klammern: Beobachtete, glimmende, nicht oxidierte abgetrennte Partikel

3) bezogen auf 1500 Schlagfunkenversuche (vergl. /L-8/)

Tabelle A-2:

Wasserstoff/Luft-Gemisch: Werte des Verhaltens der abgetrennten Stahl-Partikel nach dem Schlagvorgang bis zum Verlöschen oder nach erfolgter Oxidation bis zum Verglühen oder bis zum Beginn der Zündung des Prüfgemisches

| File ID | Schlag-energie [Nm] | | Zündung des Prüfgemisches [ja/nein] | Zündzeit (von Abtrennvorgang bis Beginn Zündung) [s] | Anzahl der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur [Stück] | Anzahl der davon oxidierten Partikel/Funken [%] | Wie viele Funken zünden [Stück] | Funkenregen [ja/nein] |
|---------------------|---------------------|--|-------------------------------------|--|--|---|---------------------------------|-----------------------|
| H ₂ | | | | | | | | |
| 1 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 2 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 3 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 4 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 5 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 6 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 7 | 61 | | n | 0 | 1 | 0 | 0 | n |
| 8 | 61 | | j | 0.168 | 1 | 100 | 1 | n |
| 9 | 61 | | j | 0.16 | 1 | 100 | 1 | n |
| 10 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 11 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 12 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 13 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 14 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 15 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 16 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 17 | 61 | | n | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 18 | 61 | | j | 0.136 | 2 | 100 | 1 | n |
| | | | | | | | | |
| 1 | 72 | | j | 0.08 | 3 | 67 | 1 | n |
| 2 | 72 | | j | 0.035 | 4 | 100 | 1 | n |
| 3 | 72 | | j | 0.344 | 3 | 67 | 1 | n |
| 4 | 72 | | j | 0.256 | 1 | 100 | 1 | n |
| 5 | 72 | | j | 0.24 | 1 | 100 | 1 | n |
| 6 | 72 | | j | 0.16 | 1 | 100 | 1 | n |
| 7 | 72 | | j | 0.056 | 1 | 100 | 1 | n |
| 8 | 72 | | j | 0.032 | 0 | 0 | 0 | j |
| 9 | 72 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 10 | 72 | | j | 0.048 | 2 | 50 | 1 | n |
| 11 | 72 | | j | 0.072 | 1 | 100 | 1 | n |
| | | | | | | | | |
| 1 | 80 | | j | 0.048 | 9 | 100 | 1 | n |
| 2 | 80 | | j | 0.024 | 0 | 0 | 0 | j |
| 3 | 80 | | j | 0.048 | 0 | 0 | 0 | j |
| 4 | 80 | | j | 0.024 | 0 | 0 | 0 | j |
| 5 | 80 | | j | 0.024 | 3 | 100 | 1 | n |
| 6 | 80 | | j | 0.024 | 0 | 0 | 0 | j |
| 7 | 80 | | j | 0.048 | 4 | 100 | 1 | n |
| 8 | 80 | | j | 0.016 | 4 | 100 | 1 | n |
| | | | | | | | | |
| 13 | 126 | | j | 0.088 | 2 | 100 | 1 | n |
| 14 | 126 | | j | 0.136 | 1 | 100 | 1 | n |
| 15 | 126 | | j | 0.016 | 0 | 0 | 0 | j |
| 16 | 126 | | j | 0.48 | 1 | 100 | 1 | n |
| 17 | 126 | | j | 0.016 | 0 | 0 | 0 | j |
| 18 | 126 | | j | 0.128 | 3 | 100 | 1 | n |
| 19 | 126 | | j | 0.144 | 2 | 100 | 1 | n |
| | | | | | | | | |
| 6 | 190 | | j | 0.056 | 4 | 100 | 1 | j |
| 7 | 190 | | j | 0.016 | 1 | 100 | 1 | j |
| 8 | 190 | | j | 0.088 | 1 | 100 | 1 | n |
| 9 | 190 | | j | 0.16 | 1 | 100 | 1 | n |
| 10 | 190 | | j | 0.016 | 1 | 100 | 1 | n |
| 11 | 190 | | j | 0.2 | 3 | 100 | 1 | n |
| Σ34St. (ohne Zünd.) | | | | Σ 0,1019 | | | | |

Tabelle A-3:

Acetylen/Luft-Gemisch: Werte des Verhaltens der abgetrennten Stahl-Partikel nach dem Schlagvorgang bis zum Verlöschen oder nach erfolgter Oxidation bis zum Verglühen oder bis zum Beginn der Zündung des Prüfgemisches

| File ID | Schlagenergie [Nm] | | Zündung des Prüfgemisches [ja/nein] | Zündzeit (von Abtrennvorgang bis Beginn Zündung) [s] | Anzahl der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur [Stück] | Anzahl der davon oxidierten Partikel/Funken [%] | Wie viele Funken zünden [Stück] | Funkenregen [ja/nein] |
|-----------------------------------|--------------------|--|-------------------------------------|--|--|---|---------------------------------|-----------------------|
| C₂H₂ | | | | | | | | |
| 4 | 10 | | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| 5 | 10 | | n | 0 | 3 | 100 | 0 | n |
| 6 | 10 | | n | 0 | 2 | 0 | 0 | n |
| 8 | 10 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 9 | 10 | | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| 31 | | | | | | | | |
| 1 | 31 | | n | 0 | 1 | 0 | 0 | n |
| 2 | 31 | | j | 0.048 | 4 | 75 | 1 | n |
| 3 | 31 | | j | 0.16 | 3 | 100 | 1 | n |
| 4 | 31 | | n | 0 | 2 | 0 | 0 | n |
| 5 | 31 | | n | 0 | 3 | 100 | 0 | n |
| 6 | 31 | | j | 0.016 | 4 | 100 | 1 | n |
| 7 | 31 | | j | 0.048 | 12 | 58 | 1 | n |
| 8 | 31 | | j | 0.148 | 7 | 57 | 1 | n |
| 9 | 31 | | j | 0.016 | 4 | 100 | 4 | n |
| 10 | 31 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 11 | 31 | | j | 0.016 | 1 | 100 | 1 | n |
| 12 | 31 | | j | 0.016 | 5 | 100 | 5 | n |
| 13 | 31 | | n | 0 | 4 | 100 | 0 | n |
| 14 | 31 | | j | 0.024 | 4 | 100 | 1 | n |
| 15 | 31 | | n | 0 | 5 | 100 | 0 | n |
| 16 | 31 | | j | 0.02 | 3 | 33 | 1 | n |
| 61 | | | | | | | | |
| 1 | 61 | | j | 0.048 | 14 | 43 | 1 | j |
| 2 | 61 | | j | 0.096 | 11 | 45 | 1 | j |
| 6 | 61 | | j | 0.02 | 4 | 25 | 1 | j |
| 7 | 61 | | j | 0.088 | 9 | 67 | 1 | j |
| 8 | 61 | | j | 0.044 | 6 | 100 | 1 | j |
| 9 | 61 | | j | 0.04 | 6 | 50 | 1 | j |
| 10 | 6 | | j | 0.036 | 12 | 50 | 1 | j |
| 72 | | | | | | | | |
| 1 | 72 | | j | 0.052 | 14 | 71 | 2 | j |
| 3 | 72 | | j | 0.064 | 25 | 100 | 1 | j |
| 6 | 72 | | j | 0.056 | 12 | 67 | 1 | j |
| 7 | 72 | | j | 0.06 | 18 | 100 | 1 | j |
| 8 | 72 | | j | 0.072 | 26 | 69 | 2 | j |
| Σ21St. (ohne Zünd.) | | | | | Σ 0,0565714 | | | |

Tabelle A-4:

Ethylen/Luft-Gemisch: Werte des Verhaltens der abgetrennten Stahl-Partikel nach dem Schlagvorgang bis zum Verlöschen oder nach erfolgter Oxidation bis zum Verglühen oder bis zum Beginn der Zündung des Prüfgemisches

| File ID | Schlagenergie [Nm] | | Zündung des Prüfgemisches [ja/nein] | Zündzeit (von Abtrennvorgang bis Beginn Zündung) [s] | Anzahl der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur [Stück] | Anzahl der davon oxidierten Partikel/ Funken [%] | Wie viele Funken zünden [Stück] | Funkenregen [ja/nein] |
|-----------------------------------|--------------------|--|-------------------------------------|--|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| C₂H₄ | | | | | | | | |
| 1 | 80 | | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| 2 | 80 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 3 | 80 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 4 | 80 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 5 | 80 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 7 | 80 | | n | 0 | 4 | 75 | 0 | n |
| 126 | | | | | | | | |
| 1 | 126 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 2 | 126 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 3 | 126 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 6 | 126 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 190 | | | | | | | | |
| 1 | 190 | | n | 0 | 3 | 33 | 0 | n |
| 2 | 190 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 6 | 190 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |

Tabelle A-5:

Propan/Luft-Gemisch: Werte des Verhaltens der abgetrennten Stahl-Partikel nach dem Schlagvorgang bis zum Verlöschen oder nach erfolgter Oxidation bis zum Verglühen oder bis zum Beginn der Zündung des Prüfgemisches

| File ID | Schlagenergie [Nm] | Zündung des Prüfgemisches [ja/nein] | Zündzeit (von Abtrennvorgang bis Beginn Zündung) [s] | Anzahl der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur [Stück] | Anzahl der davon oxidierten Partikel/Funken [%] | Wie viele Funken zünden [Stück] | Funkenregen [ja/nein] |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------------|--|--|---|---------------------------------|-----------------------|
| C₃H₈ | | | | | | | |
| 1 | 61 | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| 2 | 61 | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 1 | 72 | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 2 | 72 | n | 0 | 3 | 66 | 0 | n |
| 3 | 72 | n | 0 | 4 | 50 | 0 | n |
| 4 | 72 | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 5 | 72 | n | 0 | 3 | 33 | 0 | n |
| 6 | 72 | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 1 | 80 | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 2 | 80 | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 3 | 80 | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| 4 | 80 | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 5 | 80 | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 7 | 80 | n | 0 | 4 | 100 | 0 | n |
| 2 | 126 | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 3 | 126 | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 5 | 126 | n | 0 | 3 | 100 | 0 | n |
| 6 | 126 | n | 0 | 4 | 25 | 0 | n |
| 7 | 126 | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 2 | 190 | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| 4 | 190 | n | 0 | 3 | 0 | 0 | n |
| 5 | 190 | n | 0 | 1 | 0 | 0 | n |
| 6 | 190 | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 8 | 190 | n | 0 | 1 | 0 | 0 | n |
| 9 | 190 | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |

Tabelle A-6:

Methan/Luft-Gemisch: Werte des Verhaltens der abgetrennten Stahl-Partikel nach dem Schlagvorgang bis zum Verlöschen oder nach erfolgter Oxidation bis zum Verglühen oder bis zum Beginn der Zündung des Prüfgemisches

| File ID | Schlag-energie [Nm] | | Zündung des Prüfgemisches [ja/nein] | Zündzeit (von Abtrennvorgang bis Beginn Zündung) [s] | Anzahl der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur [Stück] | Anzahl der davon oxidierten Partikel/Funken [%] | Wie viele Funken zünden [Stück] | Funkenregen [ja/nein] |
|-----------------|---------------------|--|-------------------------------------|--|--|---|---------------------------------|-----------------------|
| CH ₄ | | | | | | | | |
| 3 | 72 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 4 | 72 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 5 | 72 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 6 | 72 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| | | | | | | | | |
| 2 | 80 | | n | 0 | 2 | 0 | 0 | n |
| 3 | 80 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 7 | 80 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| | | | | | | | | |
| 1 | 126 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 2 | 126 | | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| 4 | 126 | | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| 7 | 126 | | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| | | | | | | | | |
| 2 | 190 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 4 | 190 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 5 | 190 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| | | | | | | | | |

Tabelle A-7:

Luft: Werte des Verhaltens der abgetrennten Stahl-Partikel nach dem Schlagvorgang bis zum Verlöschen oder nach erfolgter Oxidation bis zum Verglühen oder bis zum Beginn der Zündung des Prüfgemisches

| File ID | Schlag-energie [Nm] | | Zündung des Prüfgemisches [ja/nein] | Zündzeit (von Abtrennvorgang bis Beginn Zündung) [s] | Anzahl der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur [Stück] | Anzahl der davon oxidierten Partikel/Funken [%] | Wie viele Funken zünden [Stück] | Funkenregen [ja/nein] |
|---------|---------------------|--|-------------------------------------|--|--|---|---------------------------------|-----------------------|
| Luft | | | | | | | | |
| 1 | 61 | | n | 0 | 3 | 100 | 0 | n |
| 2 | 61 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 3 | 61 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 4 | 61 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 5 | 61 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 6 | 61 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 1 | 72 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 2 | 72 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 3 | 72 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 4 | 72 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 5 | 72 | | n | 0 | 3 | 100 | 0 | n |
| 6 | 72 | | n | 0 | 4 | 25 | 0 | n |
| 1 | 80 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 2 | 80 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 3 | 80 | | n | 0 | 4 | 100 | 0 | n |
| 4 | 80 | | n | 0 | 2 | 50 | 0 | n |
| 5 | 80 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 6 | 80 | | n | 0 | 1 | 100 | 0 | n |
| 7 | 80 | | n | 0 | 4 | 100 | 0 | n |
| 8 | 80 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 1 | 126 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 2 | 126 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 3 | 126 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 4 | 126 | | n | 0 | 4 | 100 | 0 | n |
| 5 | 126 | | n | 0 | 6 | 100 | 0 | n |
| 6 | 126 | | n | 0 | 5 | 100 | 0 | n |
| 7 | 126 | | n | 0 | 4 | 100 | 0 | n |
| 1 | 190 | | n | 0 | 5 | 100 | 0 | j |
| 2 | 190 | | n | 0 | 5 | 100 | 0 | n |
| 3 | 190 | | n | 0 | 3 | 100 | 0 | n |
| 4 | 190 | | n | 0 | 7 | 100 | 0 | j |
| 5 | 190 | | n | 0 | 2 | 100 | 0 | n |
| 6 | 190 | | n | 0 | 5 | 25 | 0 | n |
| 7 | 190 | | n | 0 | 4 | 50 | 0 | n |
| 8 | 190 | | n | 0 | 6 | 100 | 0 | j |