

Dipl.-Ing. Thomas Grunewald
Dr.-Ing. Rainer Grätz

**Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit
mechanisch erzeugter Schlagfunken
in explosionsfähigen Brenngas/Luft-
Gemischen**

– Untersuchung der Werkstoffkombination Stahl/Stahl –

Impressum

Forschungsbericht 279:

**Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter
Schlagfunken in explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemischen**

– Untersuchung der Werkstoffkombination Stahl/Stahl –

2007

Herausgeber:

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

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 © 2007 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Umschlag: Lutz Mittenzwei

Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.64

ISSN 0938-5533

ISBN 978-3-9811655-1-7

Kurzfassung

Geräte für den bestimmungsgemäßen Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen müssen die Anforderungen der europäischen Richtlinie 94/9/EG (Explosionsschutzrichtlinie) 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. In den der Richtlinie 94/9/EG nach geordneten einschlägigen Normen, z. B. EN 1127-1 und EN 13463-1 ff., sowie in der BGR 104 (Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung (Explosionsschutz-Regeln - EX-RL) sind die 13 möglichen Zündquellenarten aufgelistet. Die mechanisch erzeugten Funken stellen hierbei eine von diesen möglichen Zündquellenarten dar.

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 auf diesem Gebiet bestätigte diesen Mangel, der sowohl bei der Zündgefahrenbewertung als auch bei der Erstellung und Novellierung des für den Explosionsschutz einschlägigen Regelwerkes problematisch ist.

Im Maschinenbau und in der Verfahrenstechnik werden zum Bau u. a. von nichtelektrischen Geräten und Schutzsystemen zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen häufig Baustähle verwendet. Daher war es das Ziel der Forschungsarbeit, statistisch gesicherte Werte für die Zündwahrscheinlichkeit von Stahl-Schlagfunken in Abhängigkeit von der kinetischen Schlagenergie und der Mindestzündenergie der verwendeten Brenngas/Luft-Gemische zu ermitteln. Die Untersuchungen zur Entstehung mechanisch erzeugter zündfähiger Schlagfunken erfolgten mit Hilfe von Schlagfunkenmaschinen bei drei kinetischen Schlagenergiewerten.

Folgende Ergebnisse wurden für die Referenzbrenngase der IEC-Explosionsgruppen bei unterschiedlichen Gemischzusammensetzungen mit Luft erzielt:

1. Unterhalb der kinetischen Schlagenergie von 3 Nm konnten mit der im Rahmen dieser Untersuchung angewendeten Schlagkinematik und Schlaggeometrie keine zündfähigen mechanisch erzeugten Stahl-Schlagfunken erzeugt werden.
2. Bereits mit einer kinetischen Schlagenergie von 10 Nm konnten einzelne mechanisch erzeugte Stahl-Schlagfunken durch Oxidationsvorgänge des abgetrennten Teilchens zur gefährlichen Zündquelle werden. Die Versuche haben weiterhin gezeigt, dass dies für Brenngasgemische der IEC-Explosionsgruppe IIC (z. B. Acetylen und Wasserstoff) mit Luft mit einer Zündwahrscheinlichkeit im einstelligen Prozentbereich zutrifft. Literaturangaben zufolge können Explosionen aber auch für Brenngasgemische der Explosionsgruppe IIB (z. B. Ethylen) mit Luft nicht sicher ausgeschlossen werden.
3. Mit der vergleichsweise hohen kinetischen Schlagenergie von 190 Nm wurden alle Brenngas/Luft-Gemische unabhängig von einer stattfindenden Oxidation des Teilchens durch einen einzigen Schlagvorgang zur Explosion gebracht. Dabei lag die Zündwahrscheinlichkeit bei 100 % für Brenngasgemische der IEC-Explosionsgruppe IIC mit Luft. Für Brenngasgemische der IEC-Explosionsgruppen IIA (z. B. Propan und Benzindampf) und I (z. B. Methan) mit Luft fiel die Zündwahrscheinlichkeit bis in den einstelligen Prozentbereich ab.

Die experimentellen Untersuchungen haben weiter gezeigt, dass die Zündfähigkeit mechanisch erzeugter Funken grundsätzlich von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig ist. Eine Interpolation der Ergebnisse zwischen den kinetischen Schlagenergien von 10 Nm und 190 Nm ist daher nicht möglich.

Für zukünftige Untersuchungen ist deshalb eine Fortführung der Arbeiten u. a. mit weiteren kinetischen Schlagenergien vorgesehen. Diese Ergebnisse können ferner zur Validierung von numerischen Simulationen herangezogen werden.

Deskriptoren

Mechanisch erzeugte Funken	Schlagfunkenmaschine
Nichtelektrische Funken	Reibfunken
Schlagfunken	Heiße Oberflächen
Funken	Reibwärme
Partikel	Zündwahrscheinlichkeit
Schlagenergie	Zündgefahrenbewertung
Kinetische Schlagenergie	Zündwirksamkeit

Abstract

Equipment intended for use in potentially explosive atmospheres must meet the requirements of the European directive 94/9/EC. The declaration of conformity of the manufacturer testifies that they meet the requirements. The conformity assessment is based on the risk (ignition) assessment which identifies and estimates the ignition sources. The European standards in the area of the directive 94/9/EC (like EN 1127-1, EN 13463-1) describe 13 possible ignition sources. Mechanically generated sparks are one of them.

Statements to the ignition effectiveness and especially the ignition probability in case of mechanically generated sparks for a given kinetic impact energy and given explosive gas/air-mixtures are not possible. An extensive literature looking confirms this state. This was and is a problem in making and revising standards.

Simple ferritic steel is a common material for the construction of equipment also for non electrical applications intended for use in potentially explosive atmospheres for chemical and mechanical engineering and manufacturing technology. Therefore it was the objective of this study to get some statistical ignition probabilities depending on the kinetic impact energy and the minimum ignition energy of the explosive gas/air-mixture. This study was made with impact testing machines of BAM (Federal Institute of Materials Research and Testing) at three kinetic impact energies.

The following results were obtained for all the reference gas/air-mixtures of the IEC-explosion groups (I methane, IIA propane, IIB ethylene, IIC acetylene, hydrogen):

1. It was not possible to generate ignitable mechanically sparks for kinetic impact energies below 3 Nm for the test conditions in this study respectively the impact kinetics and impact geometry of the impact machines.
2. Single mechanically generated particles were able to be a dangerous ignition source through oxidation process at kinetic impact energies of 10 Nm. Furthermore the tests have shown that the ignition probability for explosive gas/air-mixtures of the IEC-explosion group IIC is below 10 %. The literature shows that ignitions of gas/air-mixtures of the IEC-explosion group IIB can not be excluded.
3. By using the relatively high kinetic impact energy of 190 Nm the tests have shown that it is possible to ignite all explosive gas/air-mixtures of the IEC-explosion groups by a single impact independent of an oxidation process. The ignition probability is 100 % in case of explosive gas/air-mixtures of the IEC-explosion group IIC. In case of the group IIA and I the ignition probability drops to below 10 %.

The tests have further shown that the ignition probability depends on a multitude of parameters. An interpolation of the results between the kinetic impact energies of 10 Nm and 190 Nm is not possible.

Future studies will include more tests with other kinetic impact energies. The results of the tests can be used for the validation of numeric simulations.

Descriptor

Mechanically generated sparks

Non electrical sparks

Impact sparks

Sparks

Particle

Impact energy

Kinetic energy

Impact test machine

Grinding sparks

Hot surface

Grinding energy

Ignition probability

Risk assessment

Ignition effectiveness

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Allgemeines zur Zündquelle „mechanisch erzeugte Funken“	7
3	Stand des Wissens	8
3.1	Literaturauswertung	9
3.2	Bewertung der Literaturrecherche: Was wurde untersucht – offene Fragen	11
4	Prüfmaschinen und mechanischer Ablauf	12
4.1	Prüfobjekte und Werkstoffe	13
4.2	Versuchsablauf	14
5	Versuche mit einer Schlagenergie von $W = 10$ Nm und verschiedenen Brenngas/Luft-Gemischen	15
5.1	Versuche mit Luft	15
5.2	Methan/Luft-Gemische	15
5.3	Propan/Luft-Gemische	16
5.4	Ethylen/Luft-Gemische	16
5.5	Acetylen/Luft-Gemische	17
5.6	Wasserstoff/Luft-Gemische	17
5.7	Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagversuche mit $W = 10$ Nm	19
5.8	Interpretation der Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit $W = 10$ Nm	20
5.9	Versuche mit einer Schlagenergie von $W = 10$ Nm und Edelgasen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und gleicher molarer Wärmekapazität	21
5.9.1	Argon/Luft-Gemische	21
5.9.2	Helium/Luft-Gemische	21
5.9.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit $W = 10$ Nm und Edelgasen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und gleicher molarer Wärmekapazität	23
5.10	Schlagfunkenversuche mit Acetylen/Luft-, Wasserstoff/Luft- und Ethylen/Luft-Gemischen zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit	23
5.10.1	Zündwahrscheinlichkeit bei Acetylen/Luft-Gemischen	24
5.10.2	Zündwahrscheinlichkeit bei Wasserstoff/Luft-Gemischen	24
5.10.3	Zündwahrscheinlichkeit bei Ethylen/Luft-Gemischen	24
5.10.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagfunkenversuche zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit mit Acetylen/Luft-, Wasserstoff/Luft- und Ethylen/Luft-Gemischen	27
6	Versuche mit einer Schlagenergie von $W = 190$ Nm mit Helium/Luft- und verschiedenen stöchiometrischen Brenngas/Luft-Gemischen	27
6.1	Helium/Luft-Gemische	27
6.2	Acetylen/Luft	27
6.3	Weitere Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppen	28
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit $W = 190$ Nm mit Helium/Luft- und verschiedenen stöchiometrischen Brenngas/Luft-Gemischen im Vergleich mit $W = 10$ Nm	28
7	Interpretation der Versuchsergebnisse	29
7.1	Zusammenhang zwischen kinetischer Schlagenergie und der Zündwahrscheinlichkeit	29
7.2	Gemisch-Zusammensetzung und Oxidationsfähigkeit von Stahl-Schlagfunken, abgetrennt aus ferritischen Stahlwerkstoffen	30
7.3	Einfluss des Zusammenhangs von Gemischzusammensetzung und Mindestzündenergie auf die Zündfähigkeit von Stahl-Schlagfunken aus ferritischen Stahlwerkstoffen	30
7.4	Einfluss der Wärmeleitfähigkeit und der molaren Wärmekapazität auf die Zündfähigkeit von Stahl-Schlagfunken aus ferritischen Stahlwerkstoffen	30
7.5	Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Zündfähigkeit von Stahl-Schlagfunken aus ferritischen Stahlwerkstoffen	31
7.6	Partikelgeschwindigkeit und -größe, Flächenpressung	32
8	Zusammenfassung	38
9	Ausblick	39
10	Literatur	39
11	Anhang	40
11.1	Bilder	40
11.2	Tabellen	42

1 Einleitung

Die EG-Richtlinie 94/9/EG „Geräte und Schutzsysteme zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen“ /L-1/ fordert von den Herstellern von Geräten, die unter den Geltungsbereich dieser Richtlinie fallen, eine Zündgefahrenbewertung als Grundlage für deren Konformitätsbewertung. Die Konformitätsbewertung ist Voraussetzung für die Konformitätserklärung des Herstellers, das Anbringen des CE-Zeichens und damit für das gewerbliche Inverkehrbringen dieser Geräte. Ausgangspunkt dieser Zündgefahrenbewertung ist die Identifizierung der möglichen Zündquellen. In der Literatur (Steen /L-2/, Bartknecht /L-3/) und in einschlägigen Normen EN 1127-1 /L-4/ und Regelwerken BGR 104 (EX-RL der BG Chemie) /L-5/ sind die möglichen Zündquellen in 13 Zündquellenarten klassifiziert worden. Eine Zündquellenart sind die mechanisch erzeugten Funken.

Bartknecht beziffert den Anteil der mechanischen Zündungen an allen Unfällen bei Staub/Luft-Gemischen mit rund 30 %. In einer Publikation von Prof. Hans Witt /L-6/ wurden am Beispiel von Ventilatoren viele Unfälle mit zum Teil erheblichen Zerstörungen an den strömungstechnischen Anlagen aufgezeichnet, deren vermutete Ursache mechanische Zündquellen mit etwa ähnlich hohem Anteil wie bei den Stäuben waren.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit mechanisch erzeugten Funken als Resultat von Schlagvorgängen. Aufgrund der großen technischen Relevanz insbesondere bei nichtelektrischen Geräten wurde die weit verbreitete Materialkombination Stahl-Stahl betrachtet.

Für den Bereich der Stahl-Schlagfunken gibt es zwar eine Reihe von bekannten Einflussgrößen auf die Zündwirksamkeit. Dies bestätigte auch eine umfangreiche Literaturrecherche. Die Zündwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Brennstoff/Luft-Atmosphäre bei bekannter kinetischer Schlagenergie lässt sich jedoch noch immer nur sehr vage beziffern.

Da es in der Literatur zwar einige bekannte, aber keine statistisch gesicherten Werte für die Zündwahrscheinlichkeit gibt, ist die Bewertung mechanischer Zündgefahren an Geräten die in explosionsgefährdeten Bereichen verwendet werden sollen, mit einer relativ großen Unsicherheit verbunden.

Dieses Problem zeigte sich insbesondere bei der Fortschreibung und Novellierung der europäischen Normen zum Explosionsschutz EN 1127-1, EN 13463-1 /L-7/ und prEN 14986 /L-8/. Die dort angegebenen Zahlenwerte für die Schlagenergie zwischen zwei Stahlwerkstoffen in Abhängigkeit von der Gerätekategorie und der IEC-Explosionsgruppe, bei denen mit hinreichender Sicherheit die Bildung von mechanisch erzeugten zündfähigen Funken ausgeschlossen werden kann, sind mit großer Unsicherheit behaftet. Sie wurden deshalb sehr konservativ mit großen Sicherheitsmargen angegeben.

Ziel der Forschungsarbeit war es deshalb, statistisch gesicherte Werte für die Zündwahrscheinlichkeit von Stahl-Schlagfunken in Abhängigkeit von der kinetischen Schlagenergie und der Mindestzündenergie der explosionsfähigen Atmosphäre zu ermitteln.

2 Allgemeines zur Zündquelle „mechanisch erzeugte Funken“

Ein mechanisch erzeugter Funke ist ein Teilchen mit erhöhter Temperatur, das aus festen Materialien durch den Energieeintrag bei Schlag-, Schleif- oder Reibvorgängen abgetrennt wurde. Ein mechanisch erzeugter Funke als Teilchen erhöhter Temperatur muss nicht unbedingt ein glühendes bzw. leuchtendes Teilchen sein, da die eingetragene Energie zwar für den Abtrennvorgang ausreichend sein kann, aber nicht ausreichend sein muss, um dieses Teilchen glühen zu lassen. In Abhängigkeit vom Werkstoff können die abgetrennten Teilchen 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 und 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 wirksam. 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 bei Schlagvorgängen liegt i. Allg. 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, Teilchen erhöhter Temperatur abzutrennen. Bei extremen Flächenpressungen können möglicherweise Kaltverschweißungen auftreten, deren heiße Kügelchen oder heiße Oberflächen unter Umständen als Zündquelle zu betrachten sind. Einzelne Schlagvorgänge mit deutlich höherer Relativgeschwindigkeit sind selten und müssen gesondert betrachtet werden, da hier wesentlich leichtere Teilchen mit hohem Energieinhalt bzw. hoher Ausgangstemperatur und somit deutlich höherer Zündwahrscheinlichkeit abgetrennt werden.

Bei Schleifvorgängen liegt die Relativgeschwindigkeit in der Regel oberhalb von etwa $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Allerdings können auch Schleifvorgänge mit weniger als $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zur Zündquelle werden, jedoch dann nicht durch die Zündquelle „mechanisch erzeugte (Schleif-) Funken“, sondern (bei hinreichend langzeitigem Anschleifen) durch die Zündquelle „heiße Oberfläche“ /L-9/.

3 Stand des Wissens

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hat bereits seit den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts auf dem Gebiet der mechanisch erzeugten Funken einige umfangreiche Forschungsarbeiten durchgeführt und publiziert. Hier 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“.

Zu dieser Zeit galt für den Explosionsschutz nur die Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (EX-VO) /L-10/. Bis etwa Mitte der sechziger Jahre des letzten Jahrhunderts vertrat man offensichtlich (zumindest laut Regelwerk) die Auffassung, dass alle Schutzmaßnahmen zur Vermeidung jeglicher Zündquellen erfüllt sind, wenn lediglich die elektrische Installation nach der EX-VO bzw. der VDE 0165 in der Fassung von 1965 ausgeführt ist.

1972 veröffentlichte die International Electrotechnical Commission (IEC) die IEC-Publikation 79/10 „Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche in Zonen“. Im Jahre 1975 erließ die Europäische Wirtschaftsgemeinschaft (EWG) die „Richtlinie des Rates vom 18. Dezember 1975 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in explosibler Atmosphäre (76/117/EWG)“. Angestoßen durch die Aktivitäten der IEC, die Harmonisierungsbestrebungen seitens der EWG und durch neue Forschungsergebnisse bzw. Erkenntnisse daraus, entschloss sich 1969 der Fachausschuss „Chemie“ der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (BG Chemie) das gesamte Sachgebiet des Explosionsschutzes neu zu regeln. Deshalb wurde in den Jahren 1969 bis 1973 die „Richtlinie für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung – Explosionsschutz-Richtlinien – (EX-RL)“ erarbeitet. Auf der „ACHEMA“ 1973 wurde die EX-RL dann als erster Entwurf der Öffentlichkeit vorgestellt, zum 1. Januar 1976 trat sie in Kraft.

Die EX-RL der BG Chemie war das erste Regelwerk, das alle Zündquellenarten berücksichtigte. Der nichtelektrische Explosionsschutz wurde entsprechend ausführlich behandelt und bezüglich des elektrischen Explosionsschutzes wurde auf das zutreffende Regelwerk, die ElexV und die VDE-Richtlinien verwiesen. Um Verwechslungen mit den Richtlinien der EU zu vermeiden, wurde die EX-RL mit der 15. Ergänzungslieferung zum 1. Juni 1998 in „Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit, Explosionsschutz-Regeln, (EX-RL)“ umbenannt. Die Zündquellenarten sind aktuell im Kapitel E 2.3 der BGR 104 „Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung (Explosionsschutz-Regeln – EX-RL)“ dargestellt.

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 diese 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 0: Bereich, in dem explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.
- 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 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.

Für brennbare Stäube gilt entsprechend:

- 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.
- 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 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.

Geräte werden, abhängig von ihrem Einsatzort, in zwei Gruppen eingeteilt. Gerätegruppe I gilt für Geräte zur Verwendung in Untertagebetrieben von Bergwerken sowie deren Über-tageanlagen, 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 1 sind so zu konstruieren und herzustellen, dass Zündquellen selbst bei selten auftretenden Gerätestörungen 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. Und Geräte der Kategorie 3 sind so zu konstruieren und herzustellen, dass vorhersehbar zu erwartende Zündquellen, die bei normalem Betrieb auftreten können, 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-11/ 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 für die einzelnen Explosionsgruppen sind folgende:

- IEC-Explosionsgruppe IIC:
 - Wasserstoff/Luft-Gemische, MZE = 0,017 mJ,
 - Acetylen/Luft-Gemische, MZE = 0,019 mJ,
- IEC-Explosionsgruppe IIB:
 - Ethylen/Luft-Gemische, MZE = 0,082 mJ,
- IEC-Explosionsgruppe IIA:
 - Propan/Luft-Gemische (vergleichbar mit Benzindampf/Luft-Gemischen), MZE = 0,024 mJ,
- IEC-Explosionsgruppe I:
 - Methan/Luft-Gemische, MZE = 0,28 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.

3.1 Literaturlauswertung

Um zunächst einen umfassenden Überblick über das bereits veröffentlichte Schrifttum und die dort beschriebenen Arbeiten auf dem Gebiet der mechanisch erzeugten Schlagfunken zu bekommen, wurde eine internationale Literaturrecherche durchgeführt. Insgesamt wurden 124 deutsch- und englischsprachige Literaturstellen weltweit gefunden und ausgewertet. Bei einigen technisch-wissenschaftlichen Arbeiten wurde die Problematik der Schlag- und Schleiffunken gleichzeitig behandelt. Einige Veröffentlichungen beschäftigen sich nur mit den Schleiffunken, die hier aber nicht Gegenstand der Forschung waren.

Die gefundene Literatur kann in die folgenden drei Komplexe unterteilt werden:

1. Untersuchungen zum Mechanismus der mechanisch erzeugten Funken, teilweise unter Verwendung oder Bezug auf die BAM-Prüfmaschinen, wobei sich ein nicht unerheblicher Teil mit der Problematik der Schleiffunken auseinandersetzt,

2. Betrachtung von konkreten praktischen Problemen, wie beispielsweise die Entzündung von Kühlschmierstoffen an Werkzeugmaschinen durch heiße Späne und ggf. durch Funken und
3. der Sonderfall des Gebrauches von Werkzeugen.

Im Folgenden werden nur die wichtigsten Literaturquellen zu 1) diskutiert, weil nur dieses Schrifttum sich mit dem Thema Schlagenergien bei mechanisch erzeugten Stahl-Schlagfunken auseinandersetzt. Die vollständige Literatursammlung liegt bei den Autoren des Forschungsberichtes vor.

Bereits 1955 wurde von *Voigtsberger* /L-12/ der Zündmechanismus der mechanisch erzeugten Stahl-Schlagfunken in der BAM untersucht.

Für Stahlwerkstoffe wurde in einer umfangreichen Versuchsreihe die Abhängigkeit der Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter Funken von der Härte, dem Kohlenstoffgehalt und dem Anteil des Legierungsbestandteiles Chrom anhand von Schleiffunkenversuchen untersucht. Die ermittelten Abhängigkeiten lassen sich auf Schlagfunken übertragen, da das Verhalten der abgetrennten Teilchen während des Fluges ähnlich ist.

Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

1. Je härter ein Kohlenstoffstahl und je höher sein Kohlenstoff-Gehalt ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, damit zündfähige Funken zu erzeugen. Der Grund liegt in der durch den Abtrennvorgang eingetragenen Energie in die Stahlteilchen und der daraus resultierenden Oxidationsmöglichkeit. Mit unlegierten Kohlenstoff-Stählen mit einem Kohlenstoff-Gehalt von 0,09 % C bis 1,10 % C, ungehärtet und gehärtet, mit einer Vickers-Härte von HV = 971 N/mm² bis HV = 5000 N/mm² lassen sich sogar für Gemische der IEC-Explosionsgruppe IIA zündfähige mechanisch erzeugte Funken erzeugen. Mit niedrig legierten Cr-Stählen (1,08 % C, 1,38 % Cr, HV = 2160N/mm²) und mit hochlegierten Wolfram-Chrom-Stählen (0,71 % C, 3,79 % Cr, 7,94 % W, HV = 2265N/mm²) lassen sich für Gemische der IEC-Explosionsgruppe IIC mechanisch erzeugte, zündfähige Funken erzeugen.
2. Mit steigendem Legierungsbestandteil Chrom (und in begrenzter Wirkung auch Wolfram) sinkt die Zündwahrscheinlichkeit zumindest durch oxidationsfähige Funken. Bei einem Anteil von mindestens 18,1 % Chrom lassen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit keine oxidationsfähigen Teilchen mehr abtrennen. Die Grenze für das Nichtentstehen von oxidationsfähigen Funken zeigten Versuche mit hochlegiertem Chrom-Stahl (1,06 % C, 18,11 % Cr, < 0,01 % W, 1,84 % V, HV = 2855 N/mm²). Die Größe des Energieinhaltes des abgetrennten Teilchens richtet sich dann nur noch nach der allein durch den Schlagvorgang eingetragenen Energie. Der Oxidationsprozess spielt dabei keine wesentliche Rolle mehr. Mit weiter steigendem Chromanteil und dabei sinkendem Kohlenstoffgehalt (0,11 % C, 22,95 % Cr, 0,01 % W, 0,02 % V, HV = 2247 N/mm²) nimmt die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung oxidierter Funken weiter ab.
3. Ein Chromanteil von etwa 18,1 % dürfte in Bezug auf Schlagvorgänge und kurzfristige Schleifvorgänge unter 1 s bis 3 s somit als Grenze für einen funkensicheren

Stahl zu betrachten sein. Die oxidationshemmende Wirkung des Chroms kann nur dann voll in Erscheinung treten, wenn dieses Metall in hinreichender Menge zur Verfügung steht und in äußerst feiner Verteilung, am besten atomdispers in Form von Chrom-Ferrit-Mischkristallen, vorliegt. Allerdings neigt das Chrom als Legierungsbestandteil bei hohem Kohlenstoffgehalt des Stahles (über 1 %) zur Bildung von Mischkarbiden, wodurch der ferritischen Grundmasse der notwendige Chromgehalt entzogen wird und somit die oxidationshemmende Wirkung des Chromes nicht voll wirksam werden kann.

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 Teilchen gut oxidieren und damit ein höheres Temperaturniveau erreichen. Im Laborversuch wurde ermittelt, dass die Entzündungstemperatur von Eisenteilchen bei etwa 400 °C liegt. Die oxidierten Stahlteilchen können Temperaturen bis rund 1.775 °C unter atmosphärischen Bedingungen, unter erhöhtem Sauerstoffanteil bis 2.250 °C erreichen. 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 Stahlteilchen.

Teilchen 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 potenzielle Zündquelle dar. Dies ließ sich durch Versuche, 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 Stahlteilchen mit dem vorhandenen Sauerstoff des Brenngas/Luft-Gemisches. Durch den Sauerstoffverbrauch des Stahlteilchens 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 im Bereich des stöchiometrischen Gemisches am zündwirksamsten sind, sind mechanisch erzeugte oxidationsfähige Stahlfunken eher im Bereich kurz über der UEG am zündwirksamsten, weil der für die Oxidation des Stahlfunkens notwendige Sauerstoffgehalt des Brenngas/Luft-Gemisches dort am höchsten ist. Direkt an der UEG ist die Mindestzündenergie 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.

Um ein Stahlteilchen 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. Die Spanlänge hat dabei im Gegensatz zur Ausgangstemperatur des betrachteten Werkstückes keinen Einfluss. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der vorangegangene Wärmeenergieeintrag sich zu der Abtren- und Reibarbeit addiert und so das abgetrennte Teilchen eher über die Entzündungstemperatur bringt.

Rechnerisch ist ermittelt worden, 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 Teilchen, nicht möglich ist. Dazu wäre ein Verformungsgrad in Höhe von 36:1 notwendig, der ohne Bruch eines normalen Stahlwerkstoffes nicht erreichbar ist.

Mechanisch erzeugte Funken aus oxidierbaren Werkstoffen sind nach den Untersuchungen von *Konschak* und *Voigtsberger* /L-13/ i. Allg. im Bereich der UEG und „etwas darüber“ am zündwirksamsten. Dies liegt am höheren Sauerstoff-Restgehalt dieser Brenngas/Luft-Gemische gegenüber den zündwilligsten Gemischen bei z. B. elektrischen Zündfunken. Zur Oxidation der abgetrennten Partikel wird Sauerstoff benötigt, der dann aber der nachfolgenden Verbrennungsreaktion des Brenngas/Luft-Gemisches nicht mehr zur Verfügung steht. Mit Acetylen/Luft-Gemischen wurde jedoch ermittelt, dass der Zündbereich auch bei eher geringen kinetischen Schlagenergien sehr viel größer ist und weit über diesen Bereich in der Nähe der UEG hinausgeht. Es wurden hierbei Explosionen der Versuchsgemische durch Stahlfunken in einem Gemischbereich von 3,0 Vol.-% bis 40,0 Vol.-% Acetylen in Luft festgestellt.

Schulz und *Dittmar* /L-14/ stellten fest, dass die Frage der möglichen Zündung eines Brenngas/Luft-Gemisches insbesondere von der kinetischen Schlagenergie abhängig ist. Höhere Schlagenergie führt zu höherer Zündwahrscheinlichkeit. Es wurde ermittelt, dass bei 100 Schlägen von ferritischem Stahl auf ferritischen Stahl in Brenngas/Luft-Gemischen der IEC-Explosionsgruppe IIA bei einer kinetischen Schlagenergie von 335 Nm etwa jeder zweite Schlag zur Zündung des Versuchsgemisches führte. Bei 245 Nm kinetischer Schlagenergie führte etwa jeder zehnte und bei 175 Nm jeder hundertste Schlag zur Zündung.

Ferner war damit der Nachweis erbracht, dass durch einzelne Schlagfunken nicht nur zündfähige Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppe IIC und IIB, sondern sogar Gemische der IEC-Explosionsgruppe IIA (z. B. Propan/Luft- und Benzindampf/Luft-Gemisch) zur Explosion gebracht werden können, sofern die Schlagenergie hinreichend groß ist.

Die bei höherer kinetischer Schlagenergie höhere Zündwahrscheinlichkeit resultiert hauptsächlich aus den größeren abgetrennten Partikeln, die im Falle des Oxidierens auf ein höheres Temperaturniveau aufgrund ihrer geometrischen Größe einen höheren Energieinhalt aufweisen.

Statistisch auswertbare Versuche und eine weitere Abstufung der Zündwahrscheinlichkeiten hin zu geringeren kinetischen Schlagenergien erfolgten nicht.

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-15/* 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-Gemisches 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.

Die Mindesttemperatur unter atmosphärischen Bedingungen, bei der Stahlteilchen beginnen zu verbrennen, liegt unter Extrapolation von Messwerten bei etwa 500 °C. Die übliche Temperatur für die Verbrennung von Stahlfunken in explosiven Brenngas/Luft-Gemischen beträgt rund 800 °C, da in Brenngas/Luft-Gemischen die Sauerstoffkonzentration durch die Verbrennung sinkt. Bei Schlagfunken tritt dabei in der Regel ein etwas niedrigerer und bei Schleiffunken häufig ein etwas höherer Temperaturwert auf. Die Erklärung hierfür liegt darin, dass bei Schleiffunken der entstehende Funkenregen bei Oxidationsvorgängen zu einem höheren Sauerstoffverbrauch führt als bei einzelnen Schlagfunken. Dadurch wird in der den Funkenregen umgebenden Gasschicht der Sauerstoffanteil weiter herabgesetzt. Um trotzdem oxidieren zu können, brauchen Schleiffunken im Vergleich zu einzelnen Schlagfunken dann eine höhere Ausgangstemperatur.

Nach Messungen von *Dittmar /L-15/* an zündfähigen Stahl-Schleiffunken von ferritischen Stählen liegt der Mindestdurchmesser 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 des Teilchens bestimmt das Volumen und somit auch den Energieinhalt. Ein kleiner Funke muss folglich für die gleiche Zündfähigkeit eine höhere Temperatur bzw. einen höheren Energieinhalt aufweisen.

Der Durchmesser hat ebenfalls 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.

Es war bereits bekannt, dass die Mindestzündenergie eines Brenngas/Luft-Gemisches auf die Frage, ob ein explosionsfähiges Gemisch gezündet werden kann, entscheidenden

Einfluss hat. Je geringer die Mindestzündenergie eines explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemisches, umso höher die Wahrscheinlichkeit, dieses durch eine Zündquelle zur Explosion zu bringen. Auch die obere und untere Explosionsgrenze eines Gemisches und der Anstieg der Zündenergie außerhalb der Mindestzündenergie im stöchiometrischen Mischungsverhältnis waren bekannt.

Trotz des Nachweises der Zündfähigkeit von einzelnen Stahl-Schlagfunken in allen IEC-Explosionsgruppen herrschte lange Zeit die Meinung vor, dass einzelne Stahl-Schlagfunken nur im Bereich der IEC-Explosionsgruppe IIC eine relevante Zündgefahr darstellen können (*Behrend /L-16/*). Insbesondere herrschte lange Zeit im Bergbau die Meinung vor, dass beim Einsatz von Stahlträgern, Stempeln, Schienen und Werkzeugen aus ferritischem Stahl Methan/Luft-Gemische (entspricht der IEC-Explosionsgruppe I) durch einzelne mechanisch erzeugte Funken nicht gezündet werden können. Diese Auffassung änderte sich, als man mit Schlagfunkenmaschinen sehr hohe kinetische Schlagenergien um rund 335 Nm erzeugen konnte und regelmäßig Zündungen des Prüfgemisches nachwies.

3.2 Bewertung der Literaturrecherche: Was wurde untersucht – offene Fragen

Die Bewertung der Literatur zeigt, dass in der Vergangenheit bereits mehrere Einflussfaktoren auf die Zündquelle „mechanisch erzeugte Funken“ untersucht wurden. Folgende Zusammenhänge wurden dabei gefunden:

Die Zündwahrscheinlichkeit von mechanisch erzeugten Schlagfunken hängt von nachstehenden Einflussfaktoren ab:

- Höhe der kinetischen Schlagenergie,
- Mindestzündenergie des Brenngas/Luft-Gemisches,
- Zusammensetzung des Brenngas/Luft-Gemisches,
- Härtegrad eines Werkstoffes und
- 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.

Mit höherer Schlagenergie steigt bei konstanten Randbedingungen die Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter Funken.

Bei jeweils 100 Schlägen zwischen ungehärteten ferritischen Stählen ergibt sich folgende Zündwahrscheinlichkeit für explosionsfähige Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppe IIA /L-14/:

- bei 175 Nm kinetischer Schlagenergie etwa 1 % Zündungen,

- bei 245 Nm kinetischer Schlagenergie etwa 10 % Zündungen und
- bei 335 Nm kinetischer Schlagenergie etwa 50 % Zündungen

Mit hinreichend hoher kinetischer Schlagenergie (≥ 175 Nm), lassen sich Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppe IIA zünden.

Weitere Versuche zeigten, dass sich Brenngas/Luft-Gemische mit deutlich geringerer Mindestzündenergie als dies bei den IEC-Explosionsgruppen IIB und IIC der Fall ist, mit signifikant geringerer kinetischer Schlagenergie (etwa um den Faktor 10 weniger) zünden lassen. Statistisch gesicherte Daten zu den Zündwahrscheinlichkeiten für kinetische Schlagenergien deutlich unter 175 Nm in Abhängigkeit von der Mindestzündenergie sind jedoch nicht vorhanden.

Jedes Gerät zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen muss hinsichtlich des Vorhandenseins potenzieller Zündquellen beurteilt werden. Dazu sind möglichst präzise Werte zur Beurteilung der Zündwahrscheinlichkeit der am Gerät vorhandenen Zündquellen notwendig. Diese sind aber, wie die Literaturlauswertung zeigt, für die Zündquellenart „mechanisch erzeugte Funken“ nicht verfügbar. 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.

Eine Erarbeitung statistisch gesicherter Werte für die Zündwahrscheinlichkeit von Stahl-Schlagfunken in Abhängigkeit von der kinetischen Schlagenergie und der Mindestzündenergie (gemäß den IEC-Explosionsgruppen) ist aus den hier vorgestellten Gründen daher sinnvoll und notwendig.

4 Prüfmachines und mechanischer Ablauf

Die Untersuchung der Entstehung mechanisch erzeugter zündfähiger Schlagfunken erfolgt durch Schlagfunkenmaschinen (SFM) (siehe Abb. A-2 und A-3). Diese sind Zylinderabschnitte mit innen liegendem Schlaghebel und Aufnahmevorrichtung des Schlagbolzens sowie innen liegender Schlagplatte. Die Schlagfunkenmaschine wird mit einem explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemisch (Versuchsanlage siehe Abb. 1) 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 Schläges. Die kinetische Energie des Schläges 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 hier durch Höhenänderung des bei Federvorspannung ausgelenkten Schlaghebels. Durch die Entlastung der vorgespannten Feder resultiert 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

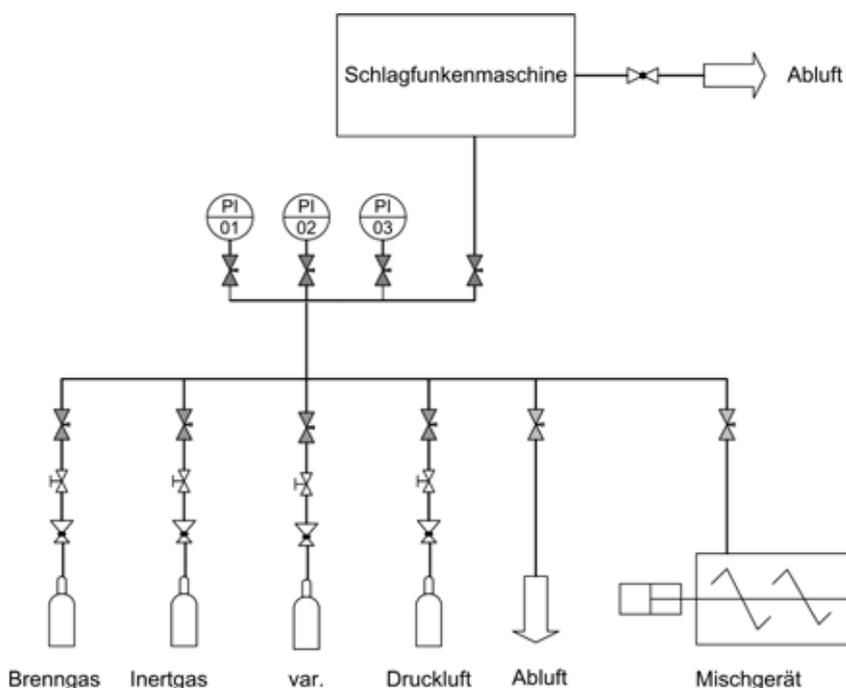


Abb. 1 Versuchsanlage zur Untersuchung der Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter Schlagfunken

wurde. Die Halter der Schlagplatte bestehen jeweils aus massivem Stahlguss, um die eingebrachte Schlagenergie nicht durch einfedern abzubauen. Der Schlagbolzen besteht aus \varnothing 10 mm Rundmaterial mit einer 90°-Spitze, die mit einer \varnothing 3 mm ebenen Fläche abgeflacht ist. Durch die Schlagvorgänge kann sich die ebene Fläche von \varnothing 3 mm auf etwa \varnothing 4 mm bis \varnothing 5 mm vergrößern. Sobald der Durchmesser über \varnothing 5 mm steigt, wird der Schlagbolzen ausgetauscht. Ausgeführt wird jeweils ein streifender Schlag, da bei dieser Art des Schlages die höchste Wahrscheinlichkeit besteht, Teilchen erhöhter Temperatur abzutrennen.

Es bedarf hierbei großer Erfahrung, um den so genannten streifenden Schlag bei ständig verschleißendem Schlagbolzen 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 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 hinaus, ist nicht die gesamte Federkraft in den Schlag- und Reibvorgang zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte eingebracht worden.

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.

Für die Untersuchung der mechanisch erzeugten Stahl-Schlagfunken bezüglich des hier definierten Zieles wurden zwei Schlagfunkenmaschinen mit maximalen kinetischen Schlagenergien von 10 Nm und 333 Nm verwendet.

– Schlagfunkenmaschine mit maximal 10 Nm kinetischer Schlagenergie (kleine SFM)

Bei der kleinen SFM (siehe Bild A-2) wird die Vorspannkraft der Feder über ein Blattfederpaket aufgebracht und durch einen Hebel bis zur Auslösung gehalten. Um alle Einflussparameter wie z. B. Dämpfungen des Blattfederpaketes mit zu erfassen, wurde zur Kalibrierung die Geschwindigkeit des Schlaghebels unmittelbar vor dem Aufsetzen auf die Schlagplatte mit Hilfe von zwei schnell ansprechenden Lichtschranken gemessen. Die Größe der kinetischen Schlagenergie W ist durch den Austausch der Blattfederpakete variabel.

An der kleinen SFM können die folgenden kinetischen Schlagenergien eingestellt werden:

- $W = 3$ Nm (Blattfederpaket 9-B) und
- $W = 10$ Nm (Blattfederpaket 6-B).

Die gemessene Geschwindigkeit des Schlaghebels des verwendeten Blattfederpaketes für die kinetische Schlagenergie von 3 Nm (9-B) betrug $14,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ und für 10 Nm (6-B) $10,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Die Abweichung des Messwertes für den Wert der kinetische Schlagenergie war für 3 Nm +/- 15,6 % und für 10 Nm +/- 11,4 %.

– Schlagfunkenmaschine mit maximal 333 Nm kinetischer Schlagenergie (große SFM)

Bei der großen SFM (siehe Abb. A-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.

An der großen SFM ist die Größe der kinetischen Schlagenergie W durch die Verstellung der Verzahnung der Torsionsfeder wie folgt variabel:

- $W = 33$ Nm,
- $W = 190$ Nm und
- $W = 333$ Nm.

Die gemessene Geschwindigkeit des Schlaghebels in der Einstellung für die Schlagenergie von 190 Nm betrug $14,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Die Abweichung des Messwertes kinetische Schlagenergie für diese Einstellung war +/- 8,2 %.

Vor dem Beginn jeder Versuchsreihe wurde die Explosionsfähigkeit des Prüfgemisches mit einem elektrischen Zündfunken überprüft und danach die Schlagfunkenmaschine mit neuem Prüfgemisch befüllt. Nach jeder Versuchsreihe mit jeweils 50 Schlagvorgängen wurde ebenfalls das Prüfgemisch elektrisch gezündet, um sicher zu stellen, dass es zum Zeitpunkt der Schlagfunkenversuche auch tatsächlich explosionsfähig war.

4.1 Prüfobjekte und Werkstoffe

Um die Matrix der zu untersuchenden Parameter nicht zu groß werden zu lassen, wurden die Untersuchungen nur mit der in der Praxis häufig verwendeten Werkstoffpaarung aus ferritischem, unlegiertem und ungehärtetem Stahl St52 (Werkstoffnummer 1.0570 – St52-3/S355J2G3) durchgeführt.

Diese 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 in der Vergangenheit durchgeführten BAM-Untersuchungen vergleichen zu können, wurde der bisherige Versuchsstandard von Schlagbolzen und Schlagplatte beibehalten.

Die Prüfobjekte haben die folgenden Abmaße:

- kleine SFM:
Schlagplatte $L = 101 \text{ mm} \cdot B = 50 \text{ mm} \cdot T = 10 \text{ mm}$ und Schlagbolzen $\varnothing 10 \text{ mm} \cdot L = 50 \text{ mm}$ mit 90°-Kegelspitze, die mit einer $\varnothing 3 \text{ mm}$ ebenen Fläche abgeflacht ist.
- große SFM:
Schlagplatte $L = 185 \text{ mm} \cdot B = 100 \text{ mm} \cdot T = 15 \text{ mm}$ (sowie weiteren Sondermaßen) und Schlagbolzen $\varnothing 10 \text{ mm} \cdot L = 50 \text{ mm}$ mit 90°-Kegelspitze, die mit einer $\varnothing 3 \text{ mm}$ ebenen Fläche abgeflacht ist.

Die Schlagfunkenversuche mit der kleinen SFM wurden in der Einstellung der kinetischen Schlagenergie mit $W = 3$ Nm und $W = 10$ Nm durchgeführt. Die Schlagfunkenversuche mit der großen SFM wurden in der Einstellung der kinetischen Schlagenergie mit $W = 190$ Nm durchgeführt.

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. Diese Versuchseinstellungen ergaben sich aus zwei Gründen: Zum einen ist bei einer kleinen und spitzen Geometrie aufgrund der Flächenpressung eher mit dem Abtrennen von Teilchen 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 Teilchen ab.

4.2 Versuchsablauf

Zuerst wurde mit der kleinen SFM ermittelt, ab welcher Schlagenergie in Luft zwischen ferritischen Stählen Teilchen derart abgetrennt werden, dass diese oxidieren können. Dies wurde mit der Einstellung für die kinetische Schlagenergie $W = 3 \text{ Nm}$ durchgeführt.

Anschließend wurden Versuche mit der kleinen SFM in der Einstellung mit $W = 10 \text{ Nm}$ durchgeführt. Dabei wurden die für die IEC-Explosionsgruppen jeweils charakteristischen Brenngas/Luft-Gemische mit Stahl-Schlagfunken beaufschlagt. Mit diesen Schlagfunkenversuchen sollte untersucht werden, bei welchen Brenngasgemischen oxidationsfähige Funken entstehen, die das Gemisch entzünden können.

Die Versuche wurden wie folgt durchgeführt:

- Stahl St52
- je IEC-Explosionsgruppe und je Gemisch-Zusammensetzung eine Versuchsreihe mit 100 Schlagfunkenversuchen. Beginn an der UEG, aufwärts in Schritten von jeweils 1,0 Vol.-% bzw. 2,5 Vol.-% bis zum stöchiometrischen Gemisch; anschließend in Schritten von jeweils 5,0 Vol.-% bis zur Grenze von 25,0 Vol.-%. Obwohl die obere Explosionsgrenze (OEG) bei Methan/Luft- und bei Propan/Luft-Gemischen bei 17,0 Vol.-% bzw. bei 10,8 Vol.-% liegt, wurden die Versuche bis zu Brenngasanteilen von bis zu 25,0 Vol.-% durchgeführt. Damit sollte das Oxidationsverhalten von Stahl-Schlagfunken bei diesen Bedingungen mit dem Oxidationsverhalten von Stahl-Schlag-

funken bei anderen Brenngas/Luft-Gemischen mit deutlich höherer OEG verglichen werden. Sobald ab einer bestimmten Gemisch-Zusammensetzung nur noch wenige oder keine oxidierten Funken festgestellt wurden, ist die nachfolgende Versuchsreihe mit der dann nächst höheren (fetteren) Gemisch-Zusammensetzung mit 50 Schlagfunkenversuchen durchgeführt worden.

- elektrische Zündung des Prüfgemisches vor Beginn von neuen Versuchsreihen
- Nachweis der Explosionsfähigkeit des jeweiligen Prüfgemisches durch elektrische Zündung, falls keine Explosion durch mechanische Funken erzeugt werden konnte.
- bei der Verwendung von neuen Schlagbolzen und ggf. Schlagplatten wurden vor dem Beginn bzw. der Fortführung der Schlagfunkenversuche 50 Schlagversuche ohne Prüfgemisch vorgenommen, um an der Schlagstelle eine gewisse Oberflächenrauigkeit zwecks deutlich besserer Wahrscheinlichkeit zur Funkenentstehung zu bekommen.

Um den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Oxidationsfähigkeit zu untersuchen, wurden zusätzlich Versuche mit Edelgas/Luft-Gemischen durchgeführt. Als Edelgase wurden Argon und Helium verwendet.

Weiterhin wurden folgende Versuche mit der großen SFM ($W = 190 \text{ Nm}$) durchgeführt:

- eine Versuchsreihe mit Helium/Luft-Gemischen von 5,0 Vol.-% bis 100 Vol.-% Helium in Luft und
- je IEC-Explosionsgruppe eine Versuchsreihe mit dem Gemisch, bei dem in der kleinen SFM die höchste Zündwahrscheinlichkeit bzw. der höchste Anteil oxidierter Funken erreicht wurde.

Die Unterscheidung zwischen oxidierten und nicht oxidierten Funken erfolgte durch visuelle Begutachtung im abgedunkelten Versuchsraum. Oxidierte Funken sind unzweifelhaft an ihrer starken, fast grellen Leuchterscheinungen sogar bei Tageslicht erkennbar. Nicht oxidierte Funken bzw. Teilchen erhöhter Temperatur glimmen hingegen nur schwach.

Für alle Versuche wurde der in der Praxis eingesetzte ferritische unlegierte Baustahl verwendet. Bei der Erzeugung von Schlagfunken aus ferritischem Stahl handelt es sich um oxidationsfähige Funken. Nach dem möglichen Oxidieren enthalten sie ein Vielfaches ihres Energieinhaltes gegenüber dem Zustand direkt nach dem Abtrennen, und können

Tabelle 1
Sicherheitstechnische Kenndaten der Referenzgase (entnommen aus CHEMSAFE-Datenbank [BAM, DECHEMA, PTB])

Explosionsgruppe nach IEC 60079-1:2004	Referenzgas	MZE ¹ des Referenzgases	UEG ²	Stöchiometrisches Gemisch	OEG ³
I	Methan (CH ₄)	0,28 mJ	4,4 Vol.-%	9,5 Vol.-%	17,0 Vol.-%
IIA	Propan (C ₃ H ₈)	0,24 mJ	1,7 Vol.-%	4,0 Vol.-%	10,8 Vol.-%
IIB	Ethylen (C ₂ H ₄)	0,082 mJ	2,4 Vol.-%	6,5 Vol.-%	32,6 Vol.-%
IIC	Acetylen (C ₂ H ₂)	0,019 mJ	2,3 Vol.-%	7,8 Vol.-%	100,0 Vol.-% ⁴
IIC	Wasserstoff (H ₂)	0,017 mJ	4,0 Vol.-%	28,5 Vol.-%	75,0 Vol.-%

¹ MZE: Mindestzündenergie

² UEG: Untere Explosionsgrenze

³ OEG: Obere Explosionsgrenze

⁴ Acetylen ist ein zerfallsfähiges Brenngas, welches auch ohne Zusatz von Luft bzw. Sauerstoff (ab etwa 82,0 Vol.-%) explosionsartig reagieren kann

somit eine überlegene Zündwirkung zeigen. Am Ende des Oxidationsprozesses kommt es zu kleinen Kohlenstoff-Explosionen, ähnlich einer Wunderkerze. Dieser Prozess benötigt – neben dem un- oder niedrig legierten Kohlenstoffstahl – viel Sauerstoff in dem Gemisch. Daher ist bei Brenngas/Luft-Gemischen mit eher geringem Brenngasanteil (oberhalb der

UEG) die Zündwahrscheinlichkeit im Falle von oxidationsfähigen Funken am größten.

Unter den o. g. Randbedingungen in Verbindung mit der Matrix in *Tabelle 1* ergeben sich rund 3.300 Schlagfunkenversuche.

5 Versuche mit einer Schlagenergie von $W = 10 \text{ Nm}$ und verschiedenen Brenngas/Luft-Gemischen

Fotos der beiden SFM während der jeweiligen Ausführung eines Schlages und die Tabellen mit den Versuchsergebnissen der Schlagfunkenversuche befinden sich im Anhang.

5.1 Versuche mit Luft

Bei insgesamt 500 Schlagfunkenversuchen in Luft mit der kinetischen Schlagenergie in Höhe von $W = 3 \text{ Nm}$ wurden nur bei 6 Schlagfunkenversuchen (entspricht 1,2 %) oxidierte Stahl-Schlagfunken beobachtet. Diese Schlagfunkenversuche zeigten, dass diese Energie für die hier angewandte Schlagkinematik und -geometrie die Grenze zur Erzeugung von oxidationsfähigen Stahl-Schlagfunken in Luft darstellt. Unterhalb dieser kinetischen Schlagenergie ist es praktisch kaum noch möglich, oxidationsfähige Stahl-Schlagfunken zu erzeugen.

Um bei den nachfolgenden Schlagfunkenversuchen mit Brenngas/Luft-Gemischen die Wahrscheinlichkeit des höchst möglichen Anteils von oxidierten Funken zu ermitteln, wurden zunächst mit der kinetischen Schlagenergie von 10 Nm Versuche in Luft durchgeführt. Von oxidierten Funken konnte

dann ausgegangen werden, wenn diese unter Leuchterscheinung verbrennen.

In Vorversuchen wurden 50 Schlagvorgänge durchgeführt, um eine gewisse Rauigkeit zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte herzustellen. Erst die dann folgenden Schlagvorgänge wurden bewertet.

Die Versuche zeigten, dass mit einer kinetischen Schlagenergie von 10 Nm zwischen ferritischen Stählen in Luft bei 96 % der Schläge oxidierte Funken erzeugt werden können.

5.2 Methan/Luft-Gemische

Bei den Schlagfunkenversuchen mit Methan/Luft-Gemischen (IEC-Explosionsgruppe I) war bei der relativ niedrigen kinetischen Schlagenergie von 10 Nm aufgrund der hohen Mindestzündenergie nicht mit der Explosion des Versuchsgemisches zu rechnen.

Die Versuche haben gezeigt, dass im Bereich oberhalb der UEG, bis zur stöchiometrischen Zusammensetzung (9,5 Vol.-%) die Wahrscheinlichkeit, unter Leuchterscheinung

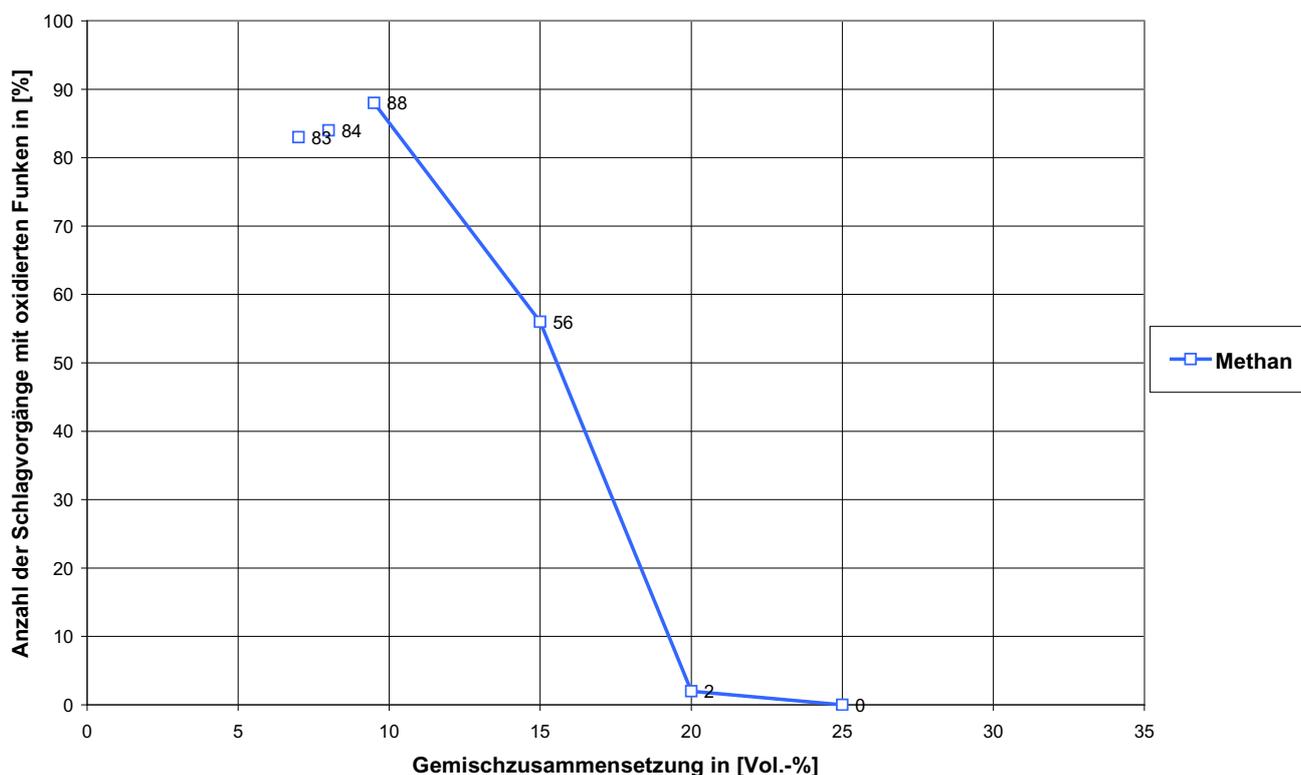


Abb. 2

Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Methan/Luft-Gemische bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung

verbrennende mechanische Stahl-Schlagfunken zu erzeugen, bei 80 % bis 90 % liegt.

Oberhalb des stöchiometrischen Gemisches bis 20,0 Vol.-% Brenngas in Luft ging die Wahrscheinlichkeit, oxidierte Funken zu schlagen, kontinuierlich und linear von etwa 90 % auf ca. 2 % zurück. Bei 15,0 Vol.-% betrug der Anteil der Versuche mit oxidierten Funken 56 % und der Anteil der Versuche mit nicht oxidierten Funken bzw. Teilchen erhöhter Temperatur ohne jegliche Zündwirkung 10 %. Keine oxidierten Funken bzw. schwach glimmende Funken wurden bei 10 % der Versuche bei 20 Vol.-% beobachtet. Bei 25 Vol.-% waren keine oxidierten Funken und nur noch wenige Teilchen erhöhter Temperatur zu erkennen. Die detaillierten Versuchsergebnisse sind in *Tabelle A-1* aufgelistet und in *Abb. 2* illustriert.

Bei Methan/Luft-Gemischen konnten mit $W = 10$ Nm durch mechanisch erzeugte Stahl-Funken bei der hier beschriebenen geometrischen Form und Kinematik keine Explosionen ausgelöst werden.

5.3 Propan/Luft-Gemische

Bei den Schlagfunkenversuchen mit Propan/Luft-Gemischen (IEC-Explosionsgruppe IIA) war aufgrund der hohen Mindestzündenergie dieses Brenngas/Luft-Gemisches und der im Verhältnis dazu relativ niedrigen kinetischen Schlagenergie von 10 Nm nicht mit der Explosion des Versuchsgemisches zu rechnen.

In *Abb. 3* ist der Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Propan/Luft-Gemische bei $W = 10$ Nm in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung dargestellt.

Im Bereich oberhalb der UEG (1,7 Vol.-%) bis 8,0 Vol.-% lag die Wahrscheinlichkeit, unter Leuchterscheinungen

verbrennende mechanische Stahl-Funken zu schlagen, bei 80 % bis etwa 90 %.

Im Bereich von rund 10,0 Vol.-% bis 25,0 Vol.-% Brenngasanteil ging die Wahrscheinlichkeit, oxidierte Funken zu schlagen, kontinuierlich und nahezu linear auf 0 % zurück. Bei 15,0 Vol.-% (OEG von Propan/Luft-Gemischen liegt bei 10,8 Vol.-%) betrug der Anteil der Versuche mit oxidierten Funken 56 %. Bei 20,0 Vol.-% lag der Anteil der Versuche mit oxidierten Funken bei 16 %. Nach Erhöhung auf 25,0 Vol.-% Propan in Luft waren keine oxidierten Funken oder Teilchen erhöhter Temperatur mehr zu erkennen.

Die detaillierten Versuchsergebnisse sind in *Tabelle A-2* aufgelistet.

Wie zu erwarten war, kam es bei Propan/Luft-Gemischen in keinem Fall zu einer Explosion des Prüfgemisches. Die relativ niedrige kinetische Schlagenergie konnte keine für das vorhandene Prüfgemisch hinreichend großen Teilchen abtrennen.

5.4 Ethylen/Luft-Gemische

Abb. 4 zeigt den Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Ethylen/Luft-Gemische (IEC-Explosionsgruppe IIB) bei $W = 10$ Nm in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung.

Im Bereich oberhalb der UEG (2,4 Vol.-% Ethylen in Luft) bis etwa 12,0 Vol.-% lag die Wahrscheinlichkeit, oxidierte mechanische Stahl-Funken zu schlagen, bei über 90 %. Trotz der Erzeugung von oxidierten Funken im zündfähigen Prüfgemisch kam es in keinem Fall zu einer Explosion. Dies lag, wie auch schon bei den Versuchen mit Methan/Luft- und Propan/Luft-Gemischen beobachtet, an der im Verhältnis

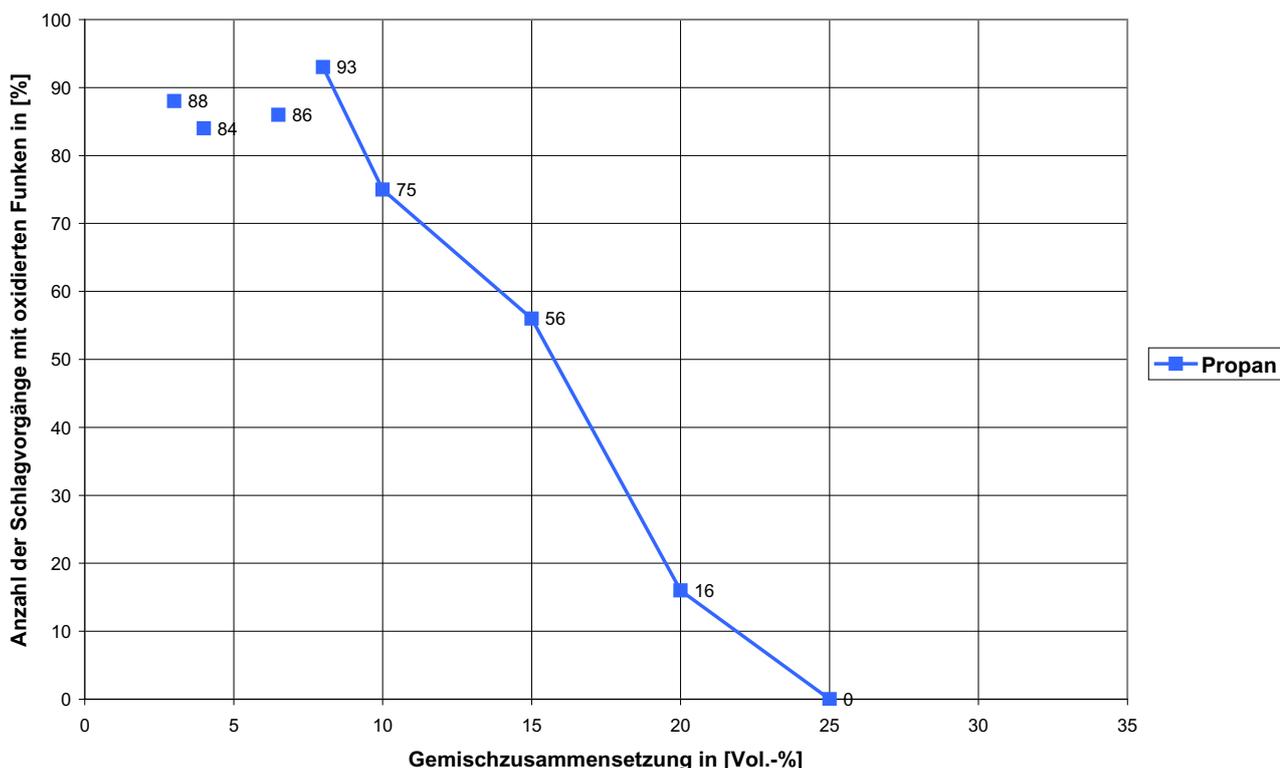


Abb. 3
Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Propan/Luft-Gemische bei $W = 10$ Nm in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung

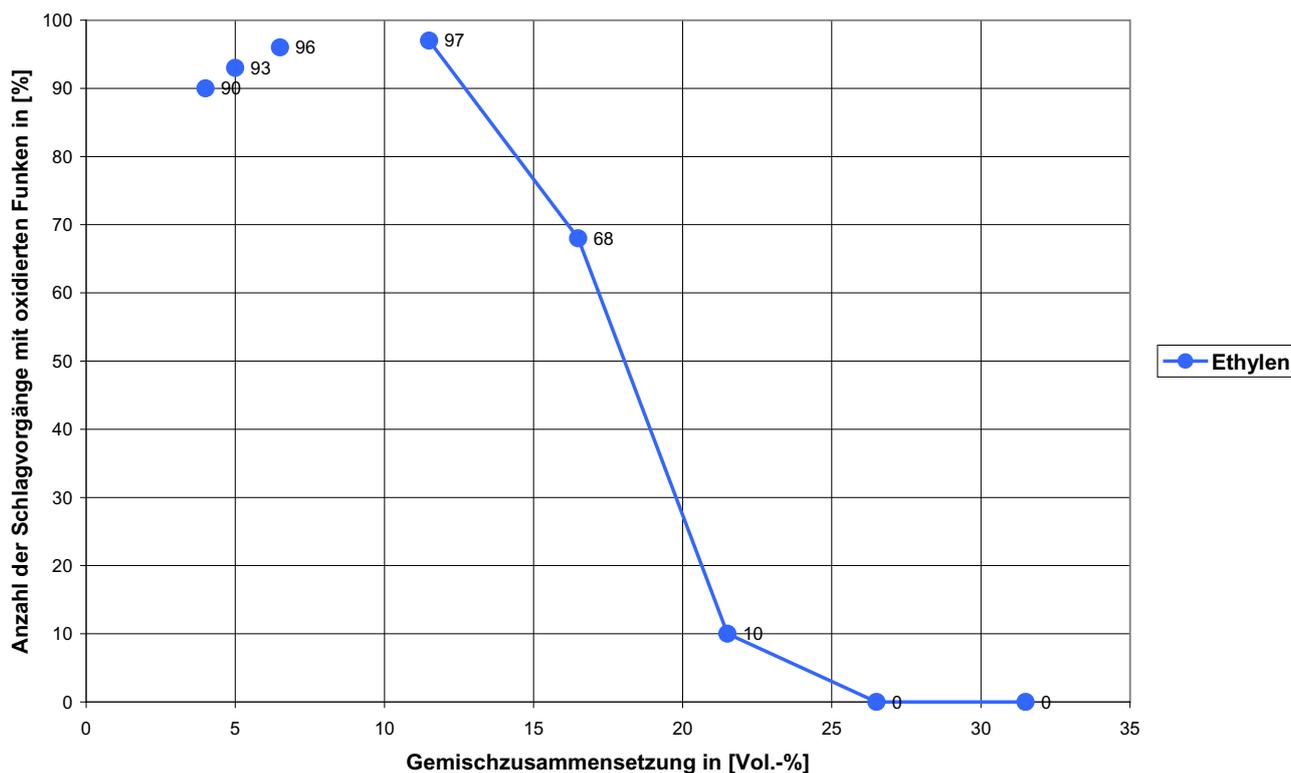


Abb. 4

Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Ethylen/Luft-Gemische bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung

zur Mindestzündenergie des Ethylen/Luft-Gemisches zu niedrigen kinetischen Schlagenergie in Höhe von 10 Nm . Dadurch konnten keine für die Explosion des Prüfgemisches hinreichend großen Teilchen abgetrennt werden.

In dem Bereich oberhalb $10,0 \text{ Vol.-%}$ Ethylenanteil in Luft ging die Wahrscheinlichkeit, oxidierte Funken zu schlagen, kontinuierlich auf 0 zurück. Bei $16,5 \text{ Vol.-%}$ betrug der Anteil der Versuche mit oxidierten Funken 68% . Bei $21,5 \text{ Vol.-%}$ lag der Anteil der Versuche mit oxidierten Funken bei 10% . Bei $26,5 \text{ Vol.-%}$ konnten hingegen keine oxidierten Funken und nur ein Teilchen erhöhter Temperatur beobachtet werden.

Die detaillierten Versuchsergebnisse sind in *Tabelle A-3* aufgelistet.

Trotz der Erzeugung von oxidierten Funken kam es bei insgesamt 650 Schlagfunkenversuchen in keinem Fall zu einer Explosion des Ethylen/Luft-Gemisches.

In der Literatur wurde aber berichtet, dass bei Schlagfunkenversuchen vereinzelt Explosionen nachgewiesen werden konnten.

5.5 Acetylen/Luft-Gemische

In *Abb. 5* ist der Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Acetylen/Luft-Gemische (IEC-Explosionsgruppe IIC) bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung dargestellt.

Im Bereich oberhalb der UEG ($2,3 \text{ Vol.-%}$ Acetylen in Luft) bis $8,0 \text{ Vol.-%}$ lag die Wahrscheinlichkeit, oxidierte mechanische Stahl-Funken zu schlagen, bei rund 90% . Alle beobachteten Funken waren unter Leuchterscheinungen verbrennend und somit oxidierte Funken. Diese Stahl-Schlagfunken

waren in der Lage, mehrere Explosionen des Prüfgemisches (11 Explosionen) zu verursachen.

In Bereich über $8,0 \text{ Vol.-%}$ Acetylen/Luft-Gemisch ging die Wahrscheinlichkeit, oxidierte Funken zu schlagen, kontinuierlich auf $1,8 \%$ zurück. Bei $13,0 \text{ Vol.-%}$ Acetylen in Luft betrug der Anteil der Versuche mit oxidierten Funken 73% . Dabei wurden 4 Explosionen beobachtet. Bei $18,0 \text{ Vol.-%}$ lag der Anteil der Versuche mit oxidierten Funken bei 18% . Hier kam es zu 3 Explosionen. Bei $23,0 \text{ Vol.-%}$ betrug der Anteil der oxidierten Funken nur noch $1,8 \%$. Teilchen erhöhter Temperatur waren nicht mehr zu beobachten. Es kam zu keiner Explosion des Prüfgemisches.

Die detaillierten Versuchsergebnisse sind in *Tabelle A-4* aufgelistet. Bemerkenswert ist insbesondere bei den Versuchen mit $13,0 \text{ Vol.-%}$ und $18,0 \text{ Vol.-%}$ der hohe Anteil der Explosionen bezogen auf die Versuche, bei denen oxidierte Funken beobachtet wurden.

Bei Acetylen/Luft-Gemischen muss bereits mit $W = 10 \text{ Nm}$ durch mechanisch erzeugte Stahl-Funken der hier beschriebenen geometrischen Form und Kinematik mit Explosionen gerechnet werden.

5.6 Wasserstoff/Luft-Gemische

Den Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Wasserstoff/Luft-Gemische (IEC-Explosionsgruppe IIC) bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung illustriert das *Abb. 6*.

Im Bereich von $6,0 \text{ Vol.-%}$ Wasserstoff in Luft lag die Wahrscheinlichkeit, oxidierte, zündfähige mechanische Stahl-Funken zu schlagen, bei 80% . Dieser Wert entspricht etwa dem der Brenngase aus Kohlenwasserstoff-Verbindungen.

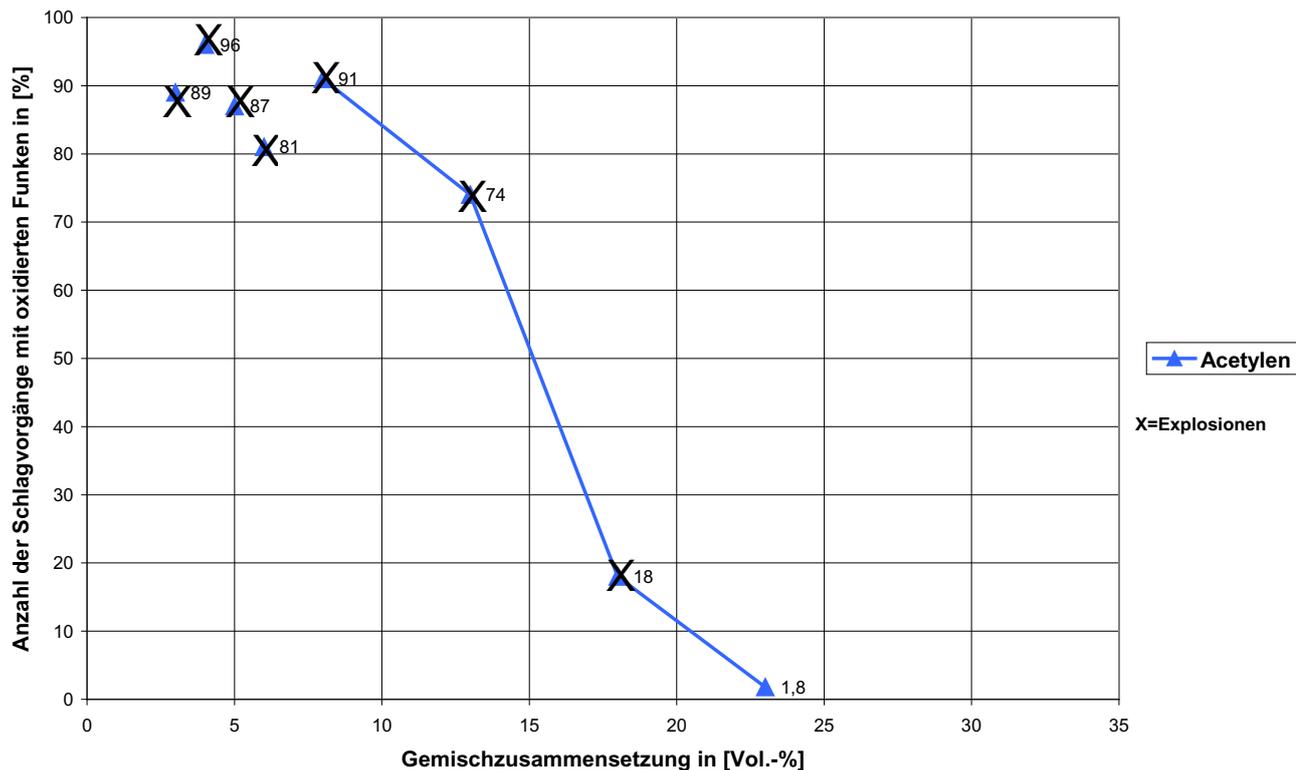


Abb. 5 Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Acetylen/Luft-Gemische bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung einschließlich erfolgter Explosionen (X)

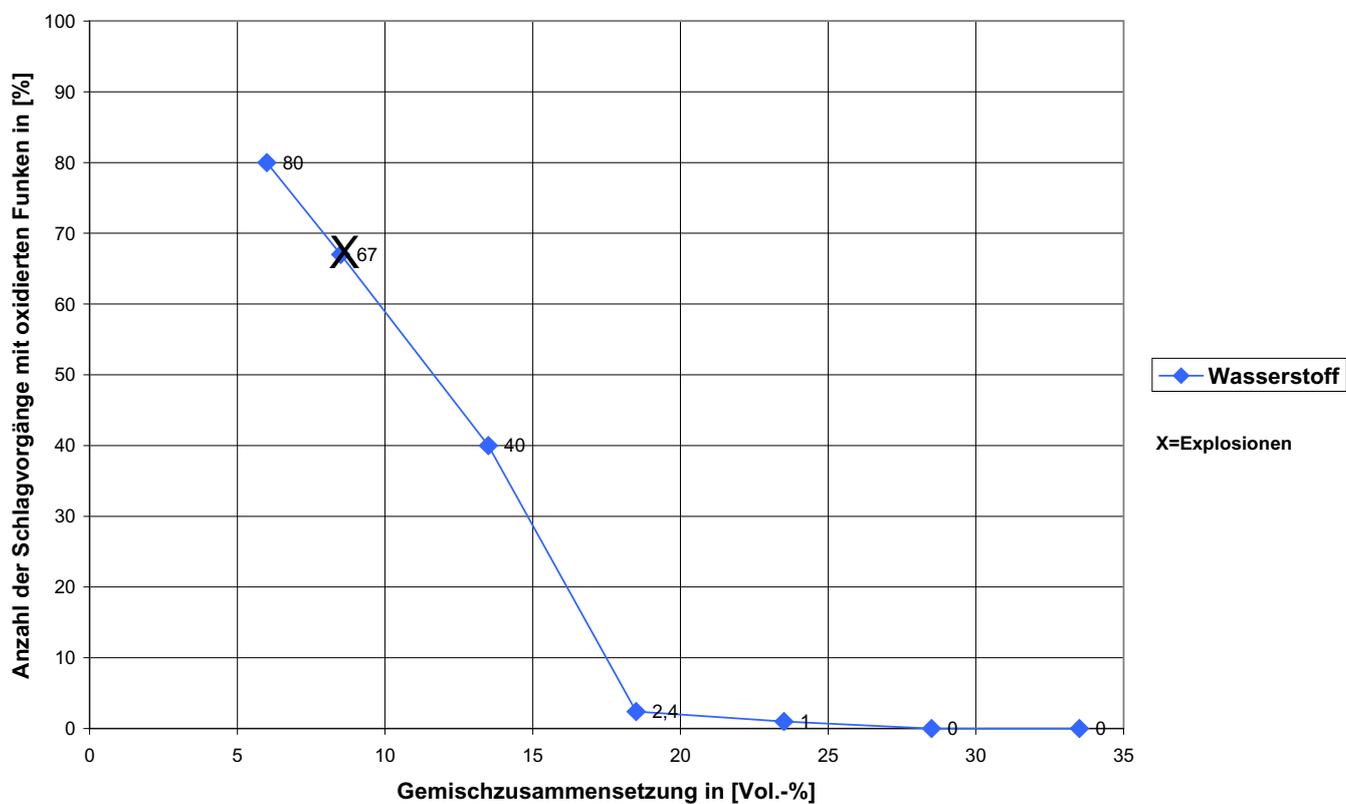


Abb. 6 Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Wasserstoff/Luft-Gemische bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung einschließlich erfolgter Explosionen (X)

Abweichend von allen bisherigen Werten bei den Kohlenwasserstoff-Verbindungen, lag bei 8,5 Vol.-% Wasserstoff in Luft die Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Stahl-Schlagfunken bei nur 67 %. Alle beobachteten Funken waren unter Leuchterscheinungen verbrennende, oxidierte Funken. Diese Stahl-Schlagfunken waren auch in der Lage, eine Explosion des Prüfgemisches zu verursachen.

Die Wahrscheinlichkeit, oxidierte Funken zu schlagen, ging annähernd linear von 80 % bis auf 2,4 % bei 18,5 Vol.-% Wasserstoff in Luft zurück. Bei 23,5 Vol.-% betrug dieser Wert nur noch 1,0 %. Trotz der Erzeugung von einigen oxidierten Funken, kam es nur zu einer Explosion des Prüfgemisches (bei 8,5 Vol.-%).

Bei 28,5 Vol.-% (stöchiometrische Gemischzusammensetzung) konnten keine mechanischen Stahl-Schlagfunken und keine Teilchen erhöhter Temperatur erzeugt werden.

Für Wasserstoff/Luft-Gemische muss bei $W = 10 \text{ Nm}$ nach den Ergebnissen dieser Untersuchungen nur bis etwa 18,5 Vol.-% mit dem Auftreten von Explosionen durch mechanisch erzeugte Stahl-Funken der hier beschriebenen geometrischen Form und Kinematik gerechnet werden. Die detaillierten Versuchsergebnisse sind in *Tabelle A-5* aufgelistet.

5.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagversuche mit $W = 10 \text{ Nm}$

Zur besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Graphen der jeweiligen Brenngas/Luft-Gemische sind in *Abb. 7* die Verläufe aller Brenngas/Luft-Gemische einschließlich der erfolgten Zündungen eingetragen. Dabei können folgende

Aussagen für alle untersuchten Brenngas/Luft-Gemische gemacht werden:

1. Bei den in diesem Abschnitt der Untersuchung verwendeten kinetischen Schlagenergien in Höhe von $W = 10 \text{ Nm}$ sind lediglich die oxidierten Funken zündfähig. Kein einziges abgetrenntes und nicht oxidiertes Partikel erhöhter Temperatur konnte die Zündung der Versuchsgemische auslösen.
2. In dem Bereich von der jeweiligen UEG bis 13,5 Vol.-% Brenngasanteil in Luft besteht bei allen Brenngas/Luft-Gemischen eine hohe Wahrscheinlichkeit, oxidierte, mechanisch erzeugte Stahl-Funken mit der relativ geringen kinetischen Schlagenergie $W = 10 \text{ Nm}$ abzutrennen.

Trotz des hohen Anteils oxidierte Funken in diesem Konzentrationsbereich kam es nur bei Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemischen (Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppe IIC) zu Explosionen des Prüfgemisches.

3. Im Bereich von 13,5 Vol.-% bis 25,0 Vol.-% Brenngas in Luft ging die Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung zündfähiger mechanischer Stahl-Schlagfunken kontinuierlich von rund 90 % gegen Null zurück.

Im Bereich über 13,5 Vol.-% bis 18,5 Vol.-% Brenngasanteil in Luft konnten nur bei Acetylen/Luft-Gemischen Explosionen ermittelt werden. Oberhalb von 23,0 Vol.-% waren auch bei Acetylen-Gemischen keine Explosionen des Prüfgemisches mehr zu verzeichnen.

4. Für den Bereich über 25,0 Vol.-% Brenngasanteil war es in allen untersuchten Brenngas/Luft-Gemischen mit

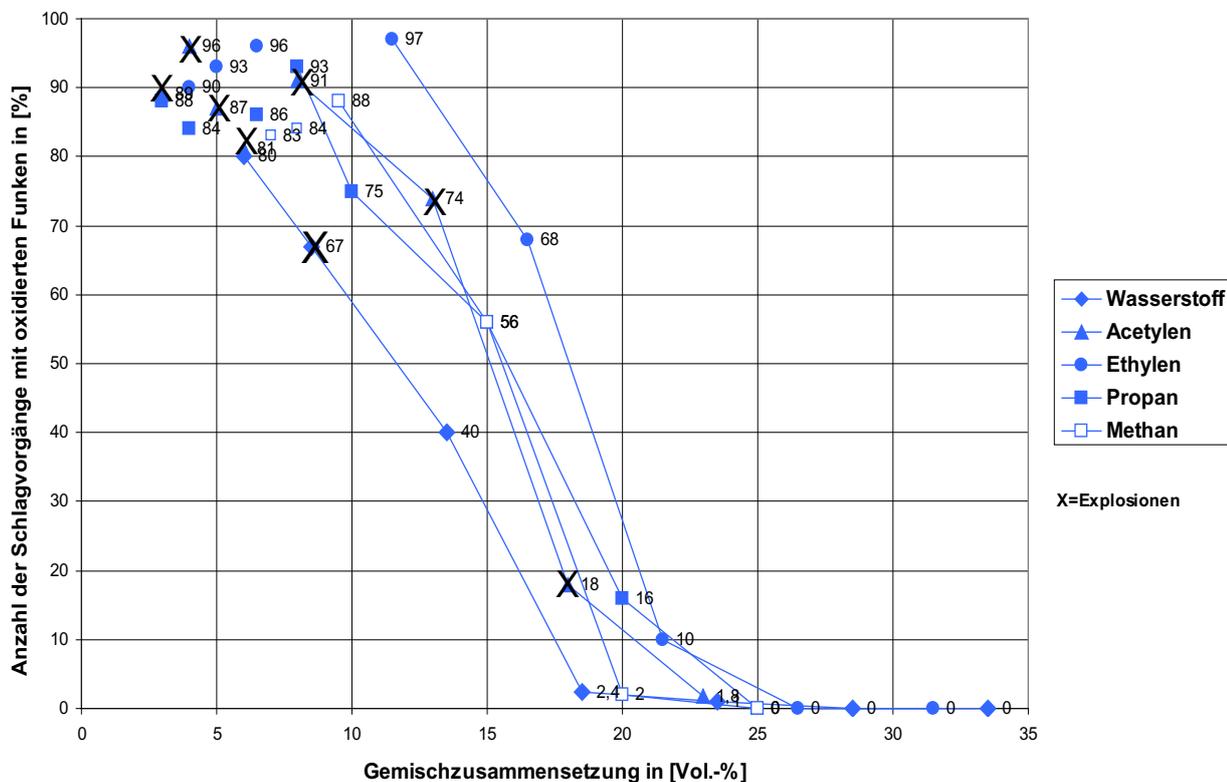


Abb. 7

Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für alle Brenngas/Luft-Gemische bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung einschließlich erfolgter Explosionen (X)

ferritischen ungehärteten Stahlwerkstoffen nicht mehr möglich, mit der kinetischen Schlagenergie von 10 Nm oxidationsfähige Stahlfunken zu erzeugen.

- Die Wasserstoff/Luft-Gemische verhielten sich bei > 6,0 Vol.-% in Bezug auf die Wahrscheinlichkeit, oxidierte und deshalb besonders zündfähige mechanische Stahl-Schlagfunken zu erzeugen, anders als die Brenngas/Luft-Gemische mit Kohlenwasserstoff-Verbindungen als Brenngas.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der kinetischen Energie in Höhe von 10 Nm oxidierte Stahl-Funken zu schlagen, lag im Bereich bis 15,0 Vol.-% Wasserstoff in Luft 20 % bis 25 % unter den gemittelten Werten der untersuchten Kohlenwasserstoff-Verbindungen. Der Mittelwert der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidiertes Stahl-Schlagfunken lag bei den Kohlenwasserstoff-Verbindungen im Bereich von 8,5 Vol.-% bis 10,0 Vol.-% bei 92 %. Bei Wasserstoff/Luft in der Gemisch-Zusammensetzung 8,5 Vol.-% lag der Wahrscheinlichkeitswert bei 67 %.

Bereits bei 20,0 Vol.-% Wasserstoff in Luft lag die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung oxidiertes Stahl-Schlagfunken bei rund 2,0 %. Demgegenüber lag der Mittelwert bei den Kohlenwasserstoff-Verbindungen bei 13 % bei 20,0 Vol.-%.

Zur weiteren Absicherung der Aussagen über Zündwahrscheinlichkeiten wurden weitere Schlagfunkenversuche mit dem jeweils für die Zündquelle „mechanisch erzeugte Stahl-Schlagfunken“ zündwilligsten Prüfgemisch durchgeführt.

5.8 Interpretation der Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit $W = 10 \text{ Nm}$

Die Ergebnisse können hinsichtlich der folgenden zwei Phänomene interpretiert werden:

- Erzeugung oxidiertes Teilchen und
- Explosion des Prüfgemisches.

Zu 1. Erzeugung oxidiertes Teilchen

Die Beantwortung der Frage, ob aus oxidationsfähigen Stählen abgetrennte Teilchen erhöhter Temperatur tatsächlich oxidieren können, hängt nicht nur vom Erreichen der für den Beginn des Oxidationsvorganges notwendigen Temperatur in Höhe rund 500 °C bis 800 °C ab. Kohlenstoff hat im erwärmten Zustand eine hohe Affinität zum Sauerstoff. Bedingt durch den Kohlenstoff im unlegierten ferritischen Baustahl kommt es nach der Abtrennung von erwärmten Teilchen auf wenigstens 500 °C bis 800 °C in Verbindung mit Sauerstoff zu exothermen Reaktionen. Diese Reaktionen laufen bis zum Bersten der sich zum leuchtenden Funken entwickelten kleinen Teilchen bzw. bis zu einer oder einigen Kohlenstoff-Explosionen. Auf die mögliche Oxidation hat demzufolge der Rest-Sauerstoffgehalt des Brenngas/Luft-Gemisches entscheidenden Einfluss. Es zeigte sich, dass nur im Bereich oberhalb der UEG bis unterhalb von 25,0 Vol.-% Brenngasanteil in Luft der Sauerstoff-Restgehalt hinreichend groß ist, dass mit $W = 10 \text{ Nm}$ erzeugte Stahl-Schlagfunken oxidieren können.

Zu 2. Zündung des Prüfgemisches

Explosionen des Prüfgemisches wurden nur bei Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemischen beobachtet. Der Grund für die nicht erfolgten Explosionen bei den anderen untersuchten Brenngas/Luft-Gemischen ist in der relativ niedrigen kinetischen Schlagenergie in Höhe von $W = 10 \text{ Nm}$ im Verhältnis zur hohen Mindestzündenergie dieser Gemische zu suchen. Die hier aufgewendete kinetische Schlagenergie konnte keine für Zündungen hinreichend große Teilchen abtrennen. Sind die abgetrennten Teilchen zu klein, können diese zwar auf ein deutlich höheres Temperaturniveau oxidieren, aber ihr Energieinhalt und ihre Lebensdauer sind oft zu gering für die Zündung dieser Brenngas/Luft-Gemische. Wird die kinetische Schlagenergie deutlich erhöht (z. B. auf $W = 175 \text{ Nm}$), ist mit der Abtrennung größerer Teilchen mit höherem Energieinhalt und höherer Ausgangstemperatur zu rechnen, die eher zur Zündung des Brenngas/Luft-Gemisches führen.

Unterschiede im Zündverhalten von Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemischen

Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemische haben ähnlich niedrige Mindestzündenergien in Höhe von 0,019 mJ und 0,017 mJ. Sie gehören gemäß IEC 60079-1:2004 in dieselbe Explosionsgruppe IIC. Für diese Einstufung wird im genormten Versuch die niedrigste Zündenergie aller Gemisch-Zusammensetzungen eines Brenngases ermittelt. Die niedrigste Zündenergie ist die so genannte Mindestzündenergie. Je weiter sich ein Brenngas/Luft-Gemisch vom stöchiometrischen Gemisch in Richtung UEG oder OEG entfernt, umso mehr steigt i. Allg. auch die Zündenergie an. Die Zündenergien in den Bereichen knapp oberhalb der UEG und knapp unterhalb der OEG überschreiten die eigentliche Mindestzündenergie deutlich. (Eine Ausnahme ist Acetylen, dessen Zündenergie bei über 25,0 Vol.-% wieder deutlich fällt.) Das stöchiometrische Gemisch liegt bei Acetylen mit 7,8 Vol.-% etwa in dem Bereich des größten Anteils von Versuchen, bei denen oxidationsfähige Funken erzeugt wurden. Aus diesem Grund reichten die mit der relativ niedrigen kinetischen Schlagenergie $W = 10 \text{ Nm}$ erzeugten Stahl-Funken aus, um das Acetylen/Luft-Gemisch im Bereich von 3,0 Vol.-% bis 18,0 Vol.-% Acetylenanteil in Luft zu zünden.

Bei Wasserstoff jedoch liegt das stöchiometrische Gemisch bei 28,5 Vol.-%, also in einem Bereich, in dem mit $W = 10 \text{ Nm}$ oxidierte Stahl-Schlagfunken nicht mehr erzeugt werden konnten. Von der UEG bis etwa 13,5 Vol.-% (Bereich mit der höchsten Wahrscheinlichkeit der Erzeugung oxidationsfähiger mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken) ist die Zündenergie von Wasserstoff in Luft deutlich höher als die Mindestzündenergie bei 28,5 Vol.-%. Daher kam es nur in einem Fall (bei der Gemisch-Zusammensetzung von 8,5 Vol.-% Wasserstoff in Luft) zu einer Zündung des Prüfgemisches. Bei 13,5 Vol.-% und bei 18,5 Vol.-% Wasserstoffanteil in Luft gab es keine Zündung des Prüfgemisches.

Weitere Einflussgrößen

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens oxidiertes Funken ist abhängig vom Luftanteil im Brenngas/Luft-Gemisch und damit vom Sauerstoffgehalt im Gemisch. Einer Klärung bedarf aber die Frage, warum bei gleichen Gemischkonzentrationen aber unterschiedlichen Brenngasen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens oxidiertes Funken unterschiedlich ist. Möglicherweise haben auch die Wärmeleitfähigkeit und/oder die Wärmekapazität des Brenngas/Luft-Gemisches Einfluss, ob eine Oxidation der Teilchen stattfinden kann oder nicht. Die

Frage ist dabei, wie schnell dem Teilchen die Wärme entzogen wird. Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Materialeigenschaft und gibt an, wie schnell eine Wärmemenge übertragen werden kann. Für Gasgemische ist sie von dem Druck, der Temperatur und der Gemischzusammensetzung abhängig. Die molare Wärmekapazität ist das Maß für die Wärmemenge, die pro Mol bzw. pro Gasvolumen aufgenommen werden kann. Aus diesem Grund wurden weitere Versuche mit Edelgasen gleicher molarer Wärmekapazität aber unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Edelgase wurden verwendet, um Reaktionseinflüsse auszuschließen.

5.9 Versuche mit einer Schlagenergie von $W = 10 \text{ Nm}$ und Edelgasen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und gleicher molarer Wärmekapazität

Um den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Brenngas/Luft-Gemisches auf die Wahrscheinlichkeit der Entstehung zündfähiger, oxidierter Stahl-Schlagfunken zu prüfen, wurden weitere Schlagfunkenversuche mit $W = 10 \text{ Nm}$ mit jeweils zwei Edelgas/Luft-Gemischen unterschiedlicher Gemisch-Zusammensetzung durchgeführt.

Es wurden zwei Edelgase verwendet, die bezüglich der Wärmeleitfähigkeit stark unterschiedlich, jedoch bezüglich der Wärmekapazität gleich sind. Die folgenden Angaben beziehen sich auf Raumtemperatur und Umgebungsdruck.

Die Wärmeleitfähigkeit des Edelgases Argon liegt mit

$$- \text{Ar: } \lambda = 178,2 \cdot 10^{-04} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

etwas unter der der Kohlenwasserstoff-Verbindungen der untersuchten Brenngas/Luft-Gemische ($180 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ für Propan bis $339 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ für Methan).

Das Edelgas Helium hat eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit von

$$- \text{He: } \lambda = 1.500 \cdot 10^{-04} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

die der Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff ($\lambda = 1.860 \cdot 10^{-04} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) nahe kommt.

Die molare Wärmekapazität von Argon und Helium ist mit

$$- \text{Ar: } C_p = 20,79 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$- \text{He: } C_p = 20,79 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

bei beiden Edelgasen gleich.

Einige sicherheitstechnische Kenngrößen und Materialeigenschaften der Referenz-Brenngase sowie zweier Edelgase und Luft sind zusammenfassend in *Tabelle 2* aufgelistet.

5.9.1 Argon/Luft-Gemische

In dem Bereich von 2,5 Vol.-% bis 20,0 Vol.-% Argon/Luft-Gemisch lag die Wahrscheinlichkeit, oxidierte und somit zündfähige mechanische Stahl-Funken zu schlagen, bei 100 %. Alle beobachteten Funken verbrannten unter Leuchterscheinung und waren somit oxidiert.

In dem Bereich von über 20,0 Vol.-% bis 35,0 Vol.-% Edelgas in Luft ging die Wahrscheinlichkeit, oxidierte Funken zu schlagen, von 100 % auf 77 % zurück. Von 35,0 Vol.-% Edelgasanteil bis etwa 45,0 Vol.-% ging der Anteil der oxidierten Funken kontinuierlich von rund 77 % bis 4 % zurück.

Bei 50,0 Vol.-% Argonanteil wurden keinerlei Funken beobachtet.

Die Ergebnisse der Versuche sind in *Tabelle A-6* enthalten und in *Abb. 8* dargestellt.

5.9.2 Helium/Luft-Gemische

Abb. 9 illustriert den Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Helium/Luft-Gemische in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung.

Bei 2,5 Vol.-% und 5,0 Vol.-% Helium/Luft-Gemisch lag die Wahrscheinlichkeit, oxidierte und somit zündfähige mechanische Stahl-Funken zu schlagen, bei 86 % bzw. 98 %. Alle beobachteten Funken verbrannten unter Leuchterscheinungen und waren somit oxidiert.

Danach fiel bis 20,0 Vol.-% Helium in Luft die Wahrscheinlichkeit, oxidierte Funken zu schlagen, auf 3 % ab. Interessant ist,

Tabelle 2

Sicherheitstechnische Kenndaten und Materialeigenschaften der Referenzgase sowie zweier Edelgase und Luft (entnommen aus CHEMSAFE-Datenbank)

Explosionsgruppe nach IEC 60079-1:2004	Referenzgas	MZE ¹	Stöchiometrisches Gemisch	Wärmeleitfähigkeit in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Molare Wärmekapazität in $\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
I	Methan (CH_4)	0,29 mJ	9,5 Vol.-%	$\lambda = 339 \cdot 10^{-04}$	$C_p = 34,57$
IIA	Propan (C_3H_8)	0,24 mJ	4,0 Vol.-%	$\lambda = 180 \cdot 10^{-04}$	$C_p = 73,50$
IIB	Ethylen (C_2H_4)	0,082 mJ	6,5 Vol.-%	$\lambda = 208 \cdot 10^{-04}$	$C_p = 45,18$
IIC	Acetylen (C_2H_2)	0,019 mJ	7,8 Vol.-%	$\lambda = 215 \cdot 10^{-04}$	$C_p = 39,35$
IIC	Wasserstoff (H_2)	0,017 mJ	28,5 Vol.-%	$\lambda = 1.860 \cdot 10^{-04}$	$C_p = 28,62$
/	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

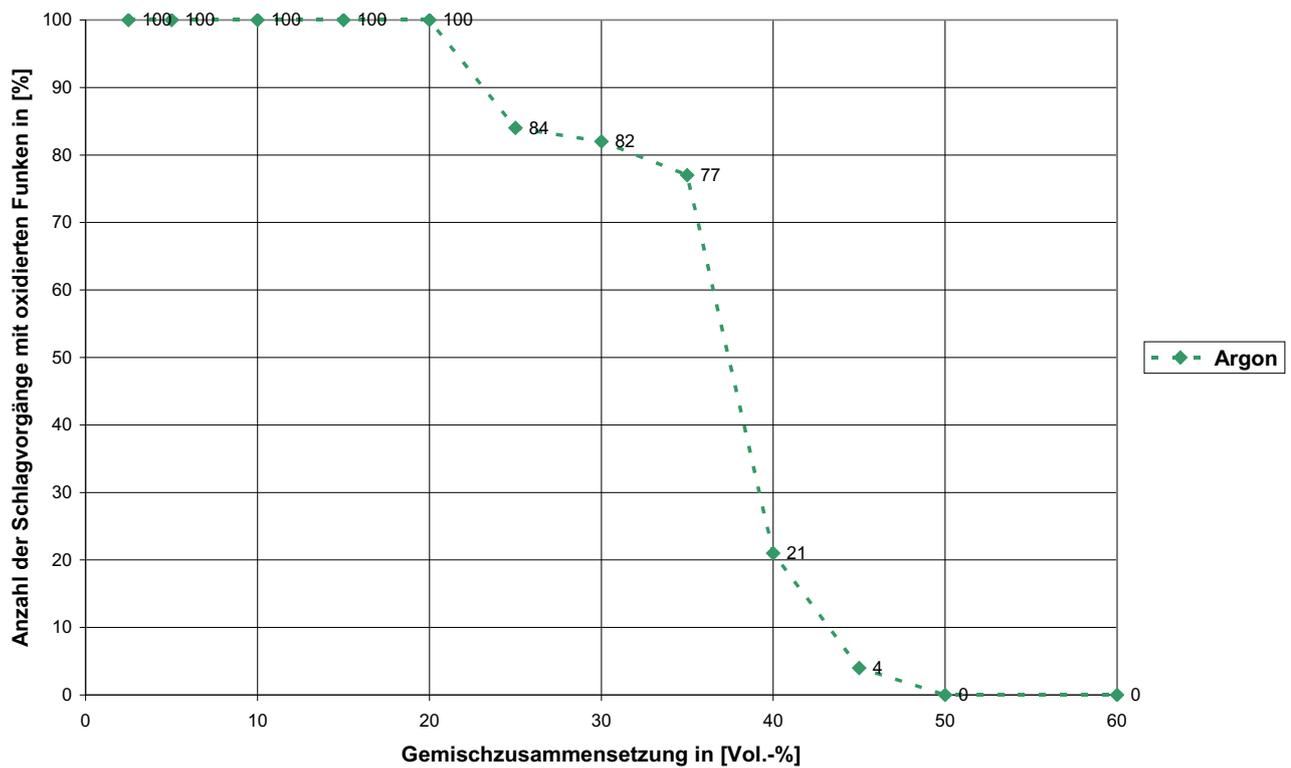


Abb. 8 Anteil der oxidierten Stahl-Schlagfunken für Argon/Luft-Gemische bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung (anderer Abzissenmaßstab)

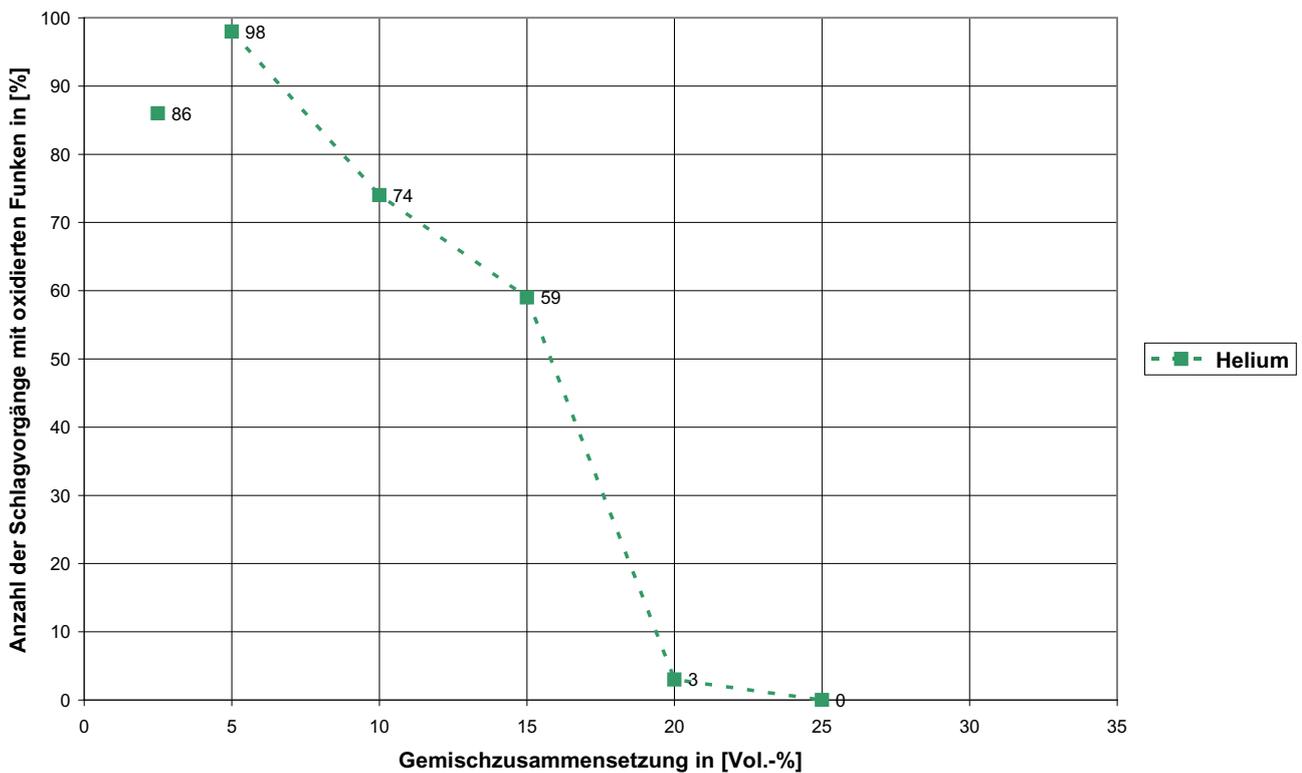


Abb. 9 Anteil der Versuche mit oxidierten Stahl-Schlagfunken für Helium/Luft-Gemische bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung

dass bei 10,0 Vol.-% die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung oxidierter Stahl-Schlagfunken bei 74 % und bei Wasserstoff in Luft bei 10,0 Vol.-% etwa 60 % (interpoliert) lag.

Bei 25,0 Vol.-% Heliumanteil wurde keinerlei Funken beobachtet.

Die Ergebnisse der Versuche sind in *Tabelle A-7* enthalten.

5.9.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit $W = 10 \text{ Nm}$ und Edelgasen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und gleicher molarer Wärmekapazität

Ein Vergleich der Kurven für Argon und Helium ist in *Abb. 10* dargestellt.

Argon hat mit $\lambda = 178,2 \cdot 10^{-04} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ eine im Vergleich zu Helium um den Faktor 8,5 niedrigere Wärmeleitfähigkeit von. Das erklärt die signifikant höhere Wahrscheinlichkeit der Erzeugung oxidierter Funken gegenüber Helium/Luft-Gemischen.

Die Schlagfunkenversuche mit Argon und Helium haben damit gezeigt, dass insbesondere bei Schlagfunkenvorgängen mit oxidationsfähigen Stählen und niedrigen kinetischen Schlagenergien die Wärmeleitfähigkeit einen deutlichen Einfluss darauf hat, ob die abgetrennten Teilchen in der Lage sind auf ein höheres und damit zündgefährlicheres Temperaturniveau zu oxidieren.

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein Grund für die deutlich schlechtere Zündwahrscheinlichkeit und den gegenüber mechanisch erzeugten Funken kleineren Zündbereich von Wasserstoff/Luft- im Vergleich zu Acetylen/Luft-Gemischen

(trotz ähnlicher MZE und selber Einstufung in die IEC-Explosionsgruppe IIC).

Ein Vergleich der Kurven in *Abb. 11* für Argon einerseits und Propan, Ethylen und Acetylen andererseits zeigt, dass auch hinsichtlich der molaren Wärmekapazität der Gemische eine Abhängigkeit erkannt werden kann. Argon hat etwa den Wert der Wärmeleitfähigkeit von Propan, Ethylen bzw. Acetylen. Die molare Wärmekapazität von Argon ist aber nur ca. halb so groß wie die der vorgenannten Gase. Je höher die molare Wärmekapazität ist, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung oxidierter Stahl-Schlagfunken.

5.10 Schlagfunkenversuche mit Acetylen/Luft-, Wasserstoff/Luft- und Ethylen/Luft-Gemischen zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit

In den Fällen, bei denen die Funkenbildung auch zur Explosion des Brenngas/Luft-Gemisches führte, wurden zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit weitere Versuchsreihen durchgeführt. Dies beinhaltete die Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemische. Zusätzlich wurden Versuche mit Ethylen/Luft-Gemisch durchgeführt, obwohl in den bis dahin durchgeführten Versuchen keine Explosionen beobachtet wurden. Der Grund bestand darin, dass in der Literatur von Zündungen dieses Gemisches durch mechanisch erzeugte Funken berichtet wurde. Mit Brenngas/Luft-Gemischen mit höheren MZE (Methan/Luft und Propan/Luft) wurden keine weiteren Versuche durchgeführt.

Die Schlagfunkenversuche zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit wurden mit folgenden Gemischen durchgeführt:

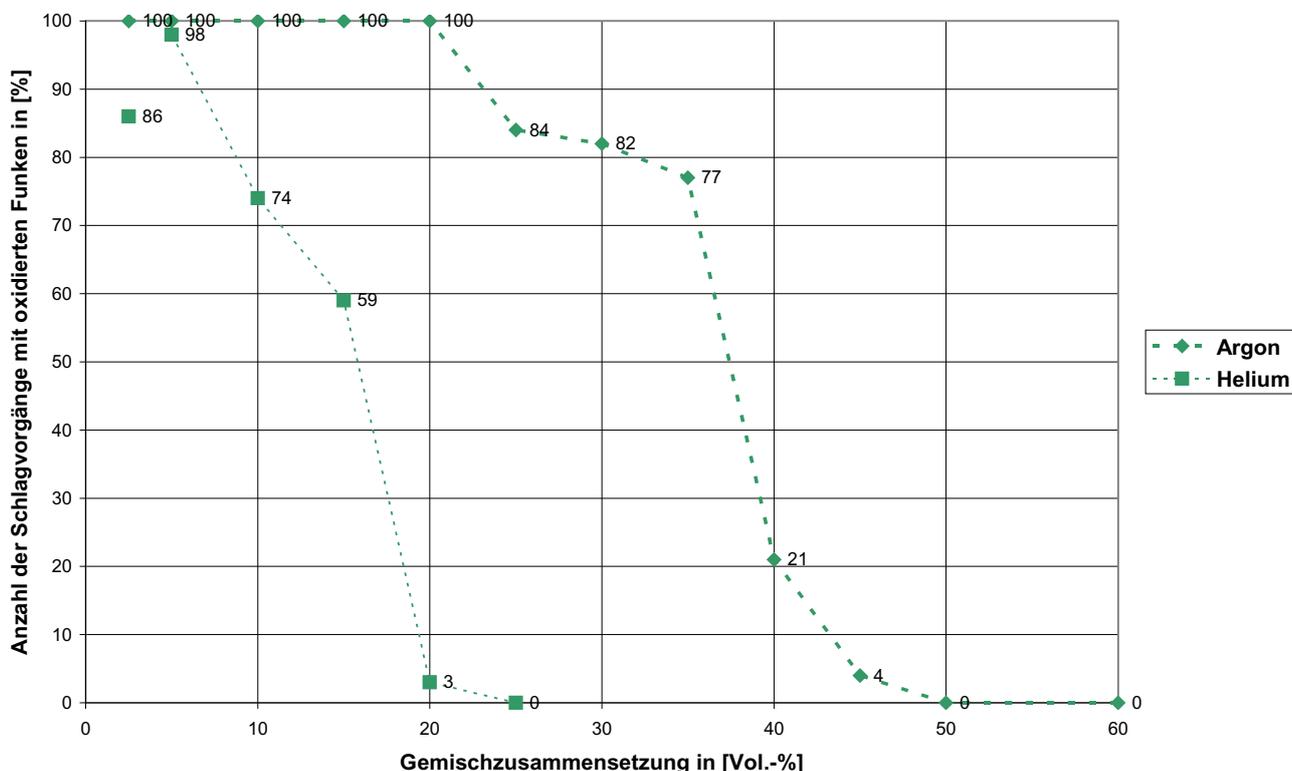


Abb 10

Anteil der Versuche mit oxidierten Stahl-Schlagfunken für Argon und Helium/Luft-Gemische bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung (anderer Abzissenmaßstab)

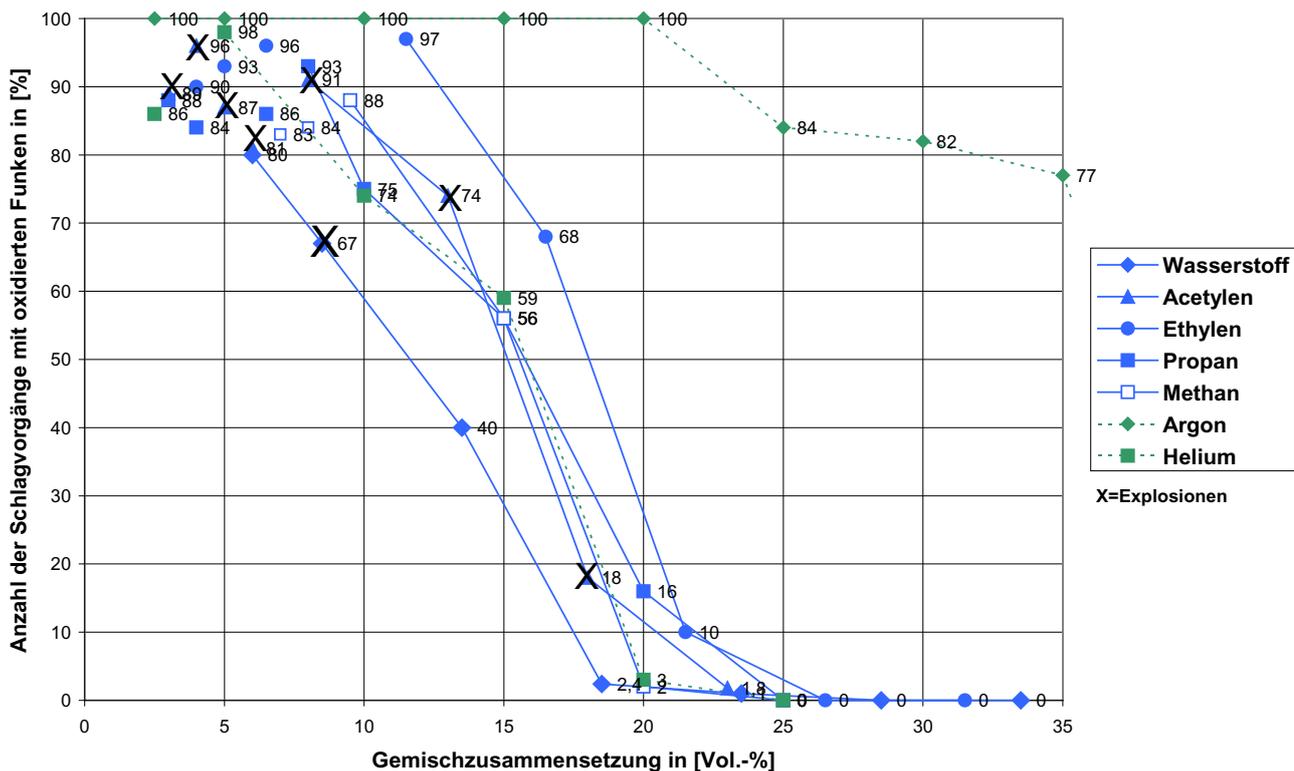


Abb. 11 Anteil der Versuche mit oxidierten Stahl-Schlagfunken für alle Brenngas/Luft-Gemische bei $W = 10 \text{ Nm}$ einschließlich der Edelgase in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung

- 8,0 Vol.-% Acetylen in Luft (stöchiometrisches Gemisch),
- 10,0 Vol.-% Wasserstoff in Luft (Gemisch mit der höchsten Zündfähigkeit mechanisch erzeugter oxidationsfähiger Stahl-Schlagfunken) und
- 6,5 Vol.-% Ethylen in Luft (stöchiometrisches Gemisch).

Für die Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit wurde der Anteil aller erfolgten Explosionen des jeweiligen Prüfgemisches über die Anzahl aller Schlagvorgänge aufgetragen. Die Versuche wurden so lange durchgeführt, bis die Zündwahrscheinlichkeiten konstant blieben.

5.10.1 Zündwahrscheinlichkeit bei Acetylen/Luft-Gemischen

Es wurden hier 1.500 Schlagvorgänge durchgeführt. Das entspricht 30 Versuchsreihen mit je 50 Schlagvorgängen.

In 25 von insgesamt 30 Versuchsreihen kam es zu 1 bis 4 Explosionen. In 11 Versuchsreihen trat je eine Explosion, in weiteren 12 Versuchsreihen je 2 und in je einer Versuchsreihe traten 3 bzw. 4 Explosionen auf. In der ersten Versuchsreihe traten 2 Explosionen auf. Daraus resultiert in Abb. 12 der Startwert von 4,0 %.

Im weiteren Verlauf pendelte sich der Wert der Zündwahrscheinlichkeit auf 2,9 % ein.

Die Zündwahrscheinlichkeit für Acetylen/Luft-Gemische durch mechanisch erzeugte und mit $W = 10 \text{ Nm}$ geschlagene Stahl-Schlagfunken der hier beschriebenen geometrischen Form und Kinematik kann daher mit rund 3,0 % angegeben werden.

5.10.2 Zündwahrscheinlichkeit bei Wasserstoff/Luft-Gemischen

Es wurden auch in diesen Untersuchungen 30 Versuchsreihen mit je 50 Schlagvorgängen durchgeführt, was 1.500 Schlagvorgängen entspricht.

Es kam in insgesamt 17 von 30 Versuchsreihen zu jeweils ein bis zwei Explosionen. In 12 Versuchsreihen kam es zu je 1 Explosion und in 5 Versuchsreihen kam es zu je 2 Explosionen des Prüfgemisches. Da es im Verlauf der ersten beiden Versuchsreihen zu keiner Explosion der Versuchsgemische kam, liegt der Startwert in Abb. 13 bei 0 %.

Im weiteren Verlauf pendelte sich der Wert der Zündwahrscheinlichkeit auf 1,5 % ein.

Für Wasserstoff/Luft-Gemische kann damit die Zündwahrscheinlichkeit durch mechanisch erzeugte und mit $W = 10 \text{ Nm}$ geschlagene Stahl-Funken bei der hier beschriebenen geometrischen Form und Kinematik mit rund 1,5 % angegeben werden.

5.10.3 Zündwahrscheinlichkeit bei Ethylen/Luft-Gemischen

Es wurden wieder 1.500 Schlagvorgänge durchgeführt, 30 Versuchsreihen mit je 50 Schlagvorgängen.

In keiner der insgesamt 30 Versuchsreihen kam es zur Explosion des Prüfgemisches.

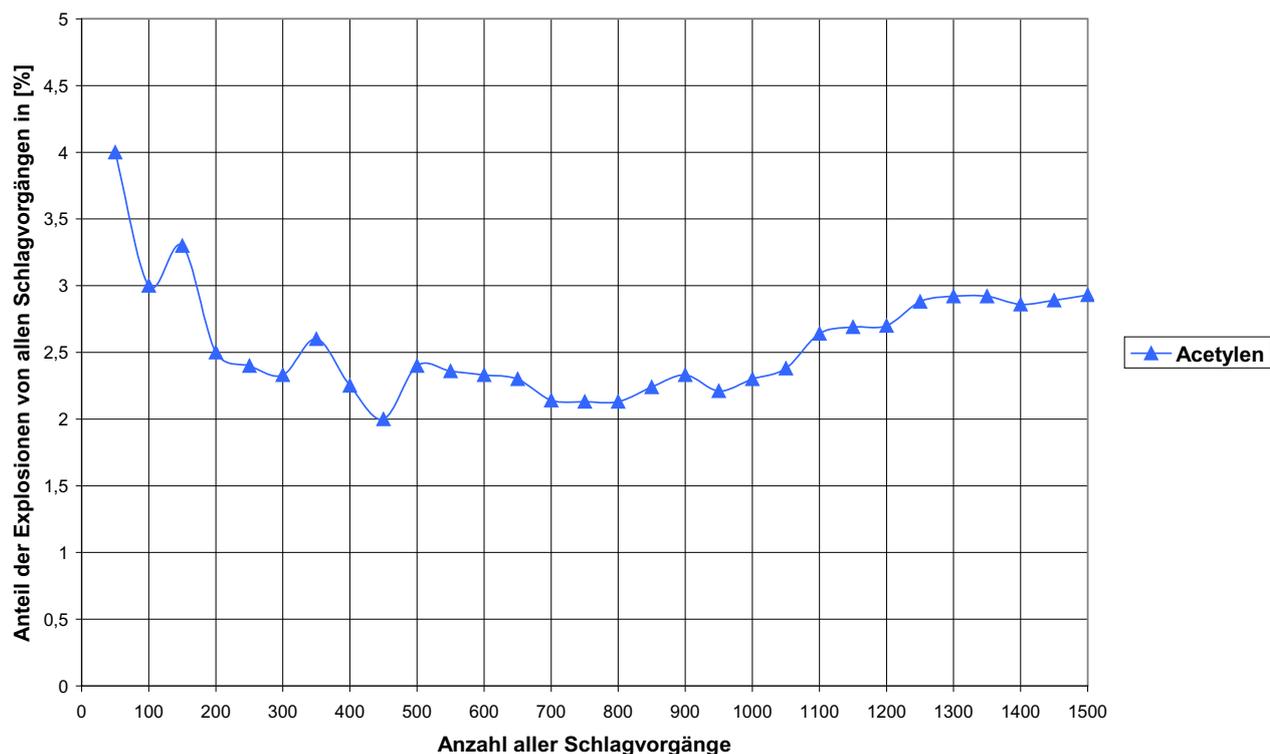


Abb. 12 Anteil der erfolgten Explosionen bei 8,0 Vol.-% Acetylen/Luft-Gemisch im für mechanisch erzeugte oxidationsfähige Stahl-Schlagfunken zündwilligsten Bereich bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Schlagvorgänge

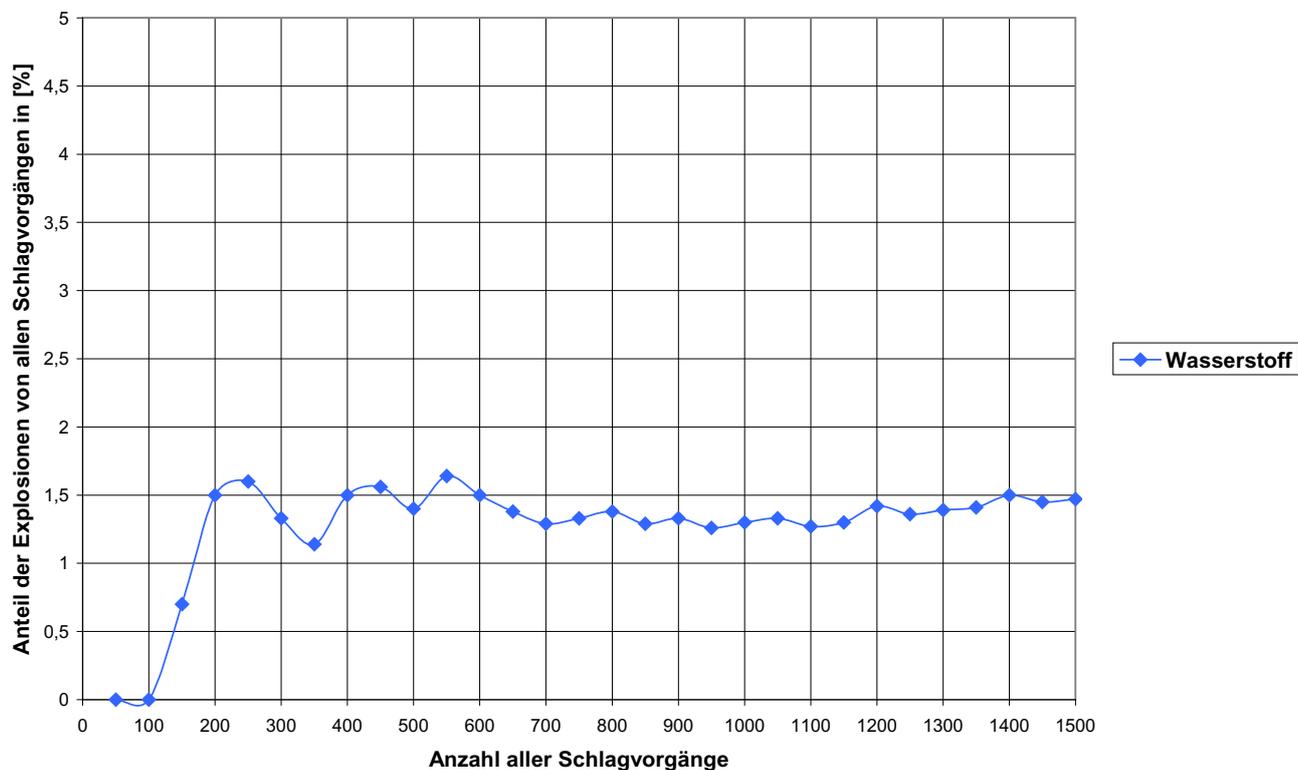


Abb. 13 Anteil der erfolgten Explosionen bei 10,0 Vol.-% Wasserstoff/Luft-Gemisch im für mechanisch erzeugte oxidationsfähige Stahl-Schlagfunken zündwilligsten Bereich bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Schlagvorgänge

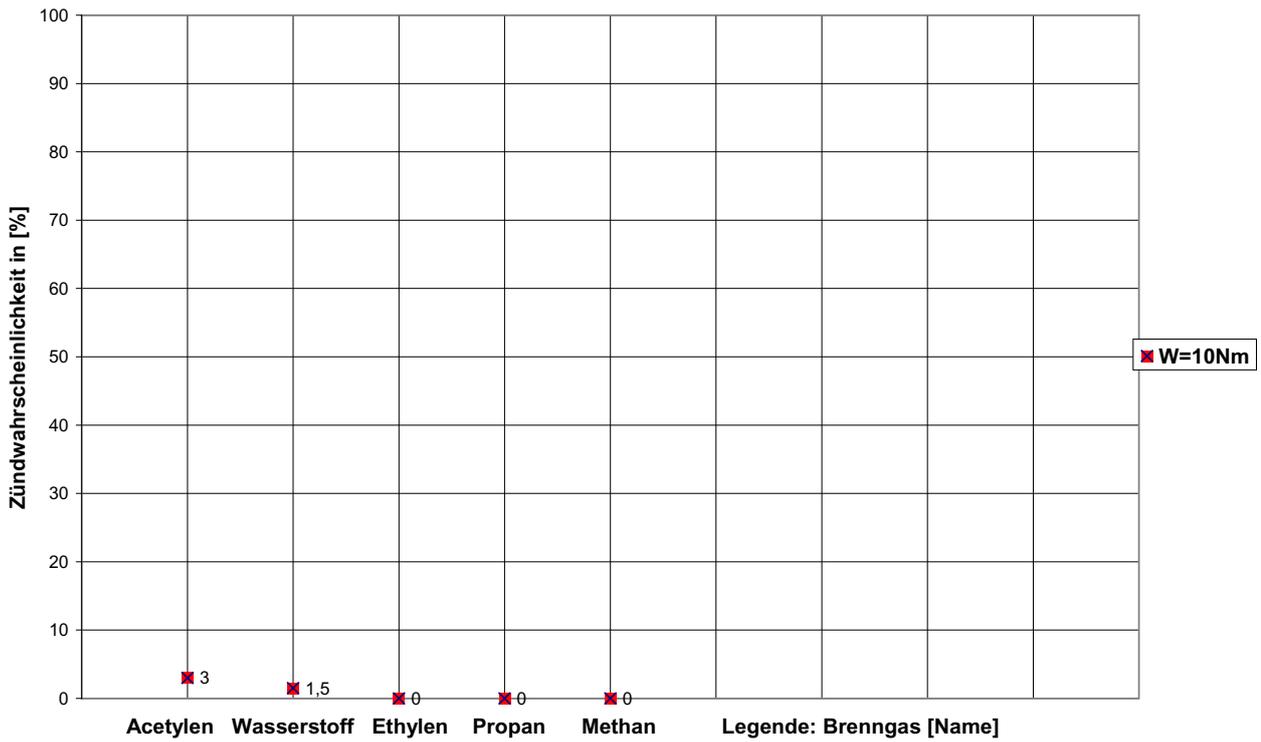


Abb. 14 Anteil der erfolgten Explosionen bei Acetylen/Luft-, Wasserstoff/Luft- und Ethylen/Luft-Gemischen im für mechanisch erzeugte oxidationsfähige Stahl-Schlagfunken zündwilligsten Bereich bei $W = 10 \text{ Nm}$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Schlagvorgänge

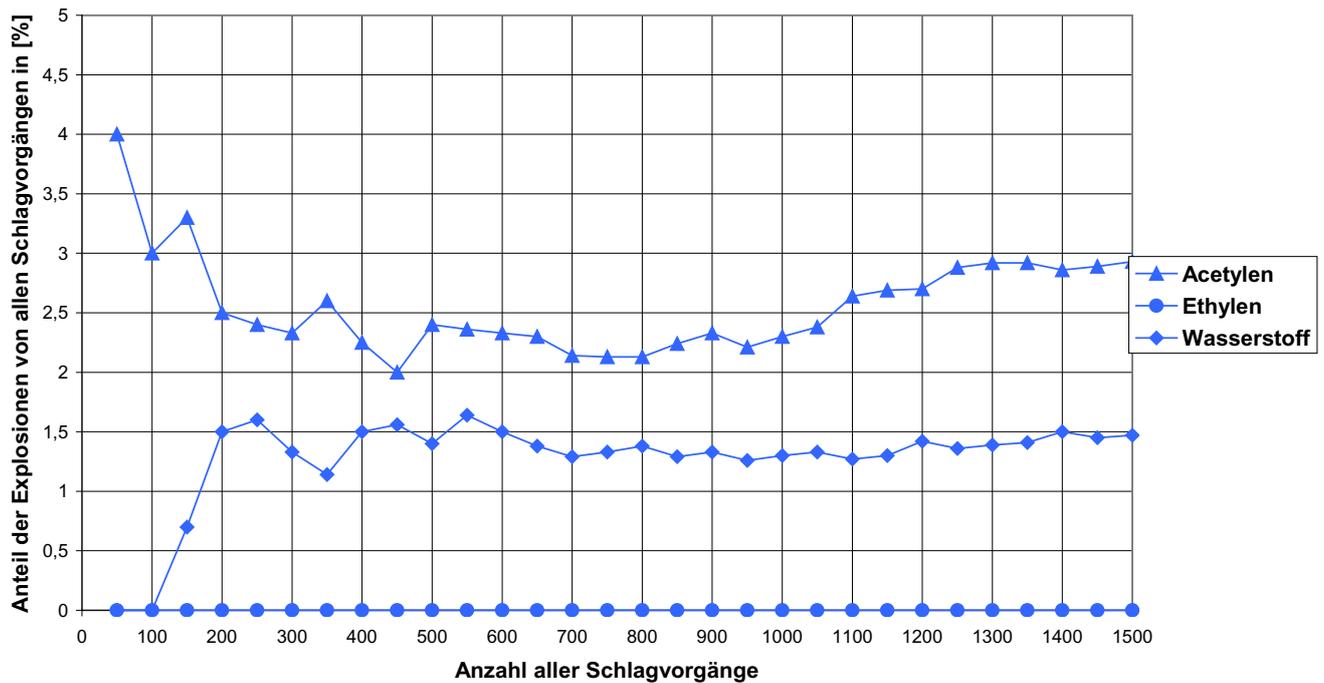


Abb. 15 Zündwahrscheinlichkeiten aller Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppen im für mechanisch erzeugte oxidationsfähige Stahl-Schlagfunken zündwilligsten Bereich bei $W = 10 \text{ Nm}$

5.10.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagfunkenversuche zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit mit Acetylen/Luft-, Wasserstoff/Luft- und Ethylen/Luft-Gemischen

Die Auswertung der Versuchsreihen zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit zeigt einen klaren Unterschied zwischen Acetylen/Luft-, Wasserstoff/Luft- und Ethylen/Luft-Gemischen.

Folgende Werte der Zündwahrscheinlichkeit wurden für $W = 10 \text{ Nm}$ ermittelt:

1. Acetylen/Luft-Gemische: ca. 3,0 % ,
2. Wasserstoff/Luft-Gemische: ca. 1,5 % und
3. Ethylen/Luft-Gemische: 0 %.
4. Mit Propan und Methan wurden keine Versuche zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit durchgeführt. Da bereits bei Ethylen keine Zündungen der Versuchsgemische beobachtet wurden, konnte davon ausgegangen werden kann, dass mit Propan und Methan keine Zündungen auftreten werden.

Die Verläufe zur Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit und die Ergebnisse daraus sind jeweils zusammenfassend in *Abb. 14* und *Abb. 15* dargestellt.

6 Versuche mit einer Schlagenergie von $W = 190 \text{ Nm}$ mit Helium/Luft- und verschiedenen stöchiometrischen Brenngas/Luft-Gemischen

6.1 Helium/Luft-Gemische

In dem Bereich aller Gemisch-Zusammensetzungen von 5,0 Vol.-% bis 100,0 Vol.-% Helium in Luft lag die Wahrscheinlichkeit, oxidierte oder geschmolzene und somit zündfähige mechanische Stahl-Funken zu schlagen bei 100 %.

Bis 20,0 Vol.-% Heliumanteil in Luft waren nach jedem Schlagvorgang sowohl oxidierte Funken erkennbar, als auch größere Teilchen, etwa 0,5 mm bis 1,0 mm im Durchmesser, die jeweils nach dem Schlagvorgang entdeckt wurden. Teilchen in dieser Größe können durch Schlagvorgänge nicht mehr zum Oxidieren gebracht werden.

Ab 25,0 Vol.-% Helium in Luft verbrannten nicht mehr alle Teilchen als Funken hell leuchtend unter Abgabe von Flam-menerscheinungen. Es waren in der großen SFM nach jedem Schlagvorgang geschmolzene Teilchen von rund 0,5 mm bis 1 mm Durchmesser zu finden. Ab 45,0 Vol.-% Heliumanteil in Luft wurden überwiegend geschmolzene Teilchen erzeugt. Auch bei 100,0 Vol.-% Helium traten im Versuch leuchtende bzw. glimmende Teilchen auf. Mangels Sauerstoff können die abgetrennten Teilchen nicht mehr oxidieren. Nach dem Versuch wurden geschmolzene Teilchen von rund 0,5 mm Durchmesser in der großen Schlagfunkenmaschine gefunden.

Bei allen Schlagvorgängen mit $W = 190 \text{ Nm}$ wurden zusätzlich zur Abtrennung von Teilchen Kaltschweißvorgänge beobachtet.

Tabelle 3
Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit $W = 190 \text{ Nm}$

Gemisch,/ bei $W = 190 \text{ Nm}$	Anteil Versuche bei denen oxidierte/geschmolzene Teilchen beobachtet wurden	Zündwahrscheinlichkeit
Wasserstoff/Luft	100 %	100 %
Acetylen/Luft	100 %	100 %
Ethylen/Luft	100 %	16,7 %
Propan/Luft	100 %	6,7 %
Methan/Luft	100 %	1,1 %

6.2 Acetylen/Luft

Um insbesondere die Frage der Zündfähigkeit von mit hoher Schlagenergie abgetrennten Teilchen erhöhter Temperatur und ohne Oxidationsmöglichkeit zu klären, wurden Schlagfunkenversuche mit Acetylen durchgeführt, da dies das einzige Referenzgas aller IEC-Explosionsgruppen mit einem Zündbereich bis 100,0 Vol.-% ist.

In dem Bereich von 8,0 Vol.-% Acetylen in Luft lag die Wahrscheinlichkeit, oxidierte und somit zündfähige mechanische Stahl-Funken zu schlagen, erwartungsgemäß bei 100 %. Alle erzeugten Stahl-Schlagfunken haben zur Zündung des jeweiligen Prüfgemisches geführt.

Aufgrund der hohen kinetischen Schlagenergie zündete auch bei 75,0 Vol.-% Acetylen in Luft jeder Schlagvorgang das Prüfgemisch. (siehe A-9)

Wegen der aus den Explosionen resultierten starken Rußentwicklung im Versuchsraum und der starken Verschmutzung der großen Schlagfunkenmaschine mit abgelagertem Ruß wurden die Schlagfunkenversuche nach 10 Schlagvorgängen mit 75,0 Vol.-% Acetylen in Luft – und 10 erfolgten Explosionen – beendet.

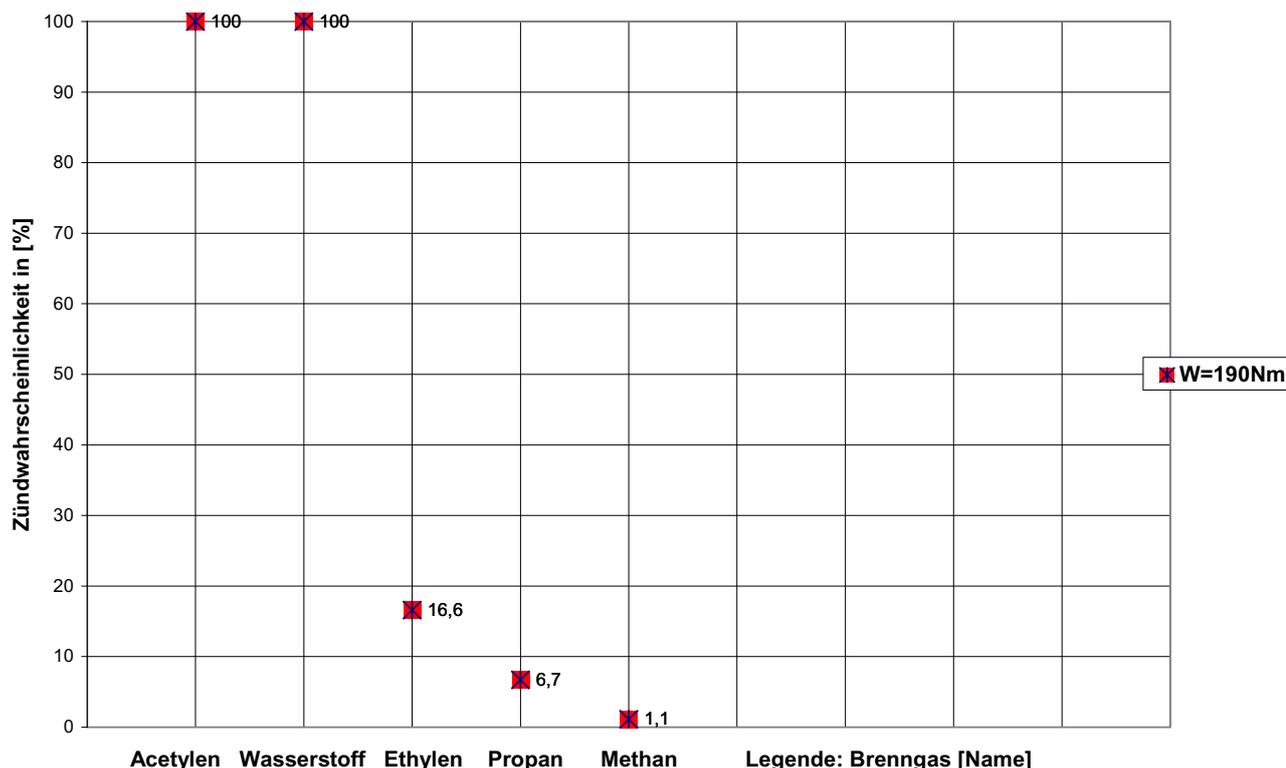


Abb. 16

Zündwahrscheinlichkeiten aller Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppen im für mechanisch erzeugte oxidationsfähige Stahl-Schlagfunken zündwilligsten Bereich bei $W = 190 \text{ Nm}$

6.3 Weitere Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppen

Um die Zündwahrscheinlichkeiten aller anderen Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppen mit $W = 190 \text{ Nm}$ zu ermitteln, wurden weitere Schlagfunkenversuche mit folgenden Gemischen durchgeführt:

- 10,0 Vol.-% Wasserstoff in Luft,
- 6,5 Vol.-% Ethylen in Luft,
- 4,0 Vol.-% Propan in Luft und
- 9,5 Vol.-% Methan in Luft.

Die folgenden Ergebnisse wurden für $W = 190 \text{ Nm}$ ermittelt (siehe *Tabelle 3*).

Die detaillierten Versuchsergebnisse sind in den *Tabellen A-10 bis A-13* aufgeführt.

Die graphische Darstellung der Ergebnisse der Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeiten sind zusammenfassend in *Abb. 16* dargestellt.

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit $W = 190 \text{ Nm}$ mit Helium/Luft- und verschiedenen stöchiometrischen Brenngas/Luft-Gemischen im Vergleich mit $W = 10 \text{ Nm}$

Bei den Schlagfunkenversuchen mit $W = 10 \text{ Nm}$ endete die Oxidationsfähigkeit der abgetrennten Teilchen bei rund

25,0 Vol.-%. Wie bereits ausgeführt, stellen mit $W = 10 \text{ Nm}$ abgetrennte Stahl-Teilchen aufgrund ihrer Größe, Lebensdauer und Energieinhalt im nichtoxidierten Zustand keine Zündquelle dar. Das bedeutet, dass oxidierte Funken, auch wenn sie nur mit $W = 10 \text{ Nm}$ erzeugt wurden, unter bestimmten Bedingungen eine Zündquelle darstellen können.

Im Gegensatz zu den Schlagfunkenversuchen mit $W = 10 \text{ Nm}$ wurden bei den Versuchen mit $W = 190 \text{ Nm}$ oxidationsfähige Funken in einem Bereich bis 45,0 Vol.-% gefunden. Aufgrund der hohen Abtrennleistung wird soviel Energie eingetragen, dass das abgetrennte Teilchen um einiges größer ist. Dadurch verbrennt es nicht in einem einzigen Oxidationsvorgang mit einigen wenigen kleinen Kohlenstoff-Explosionen, sondern in einer Vielzahl von Kohlenstoff-Explosionen, ähnlich einem kurzzeitigen Funkenregen wie bei Schleiffunkenvorgängen. Daraus resultiert die signifikant höhere Zündwahrscheinlichkeit von mit hoher Schlagenergie abgetrennten Stahl-Teilchen.

Weiterhin haben die Schlagfunkenversuche mit der kinetischen Schlagenergie von 190 Nm in Helium/Luft-Gemischen im Vergleich zu den Versuchen mit 10 Nm gezeigt, dass bei Schlagfunkenvorgängen mit hoher Schlagenergie – unabhängig von der Oxidationsfähigkeit eines Stahlwerkstoffes – Teilchen erhöhter Temperatur und damit Partikel mit hohem Energieinhalt über den gesamten Konzentrationsbereich erzeugt werden können. Eine Zündgefahr kann deshalb über den gesamten explosionsfähigen Bereich aller Brenngas/Luft-Gemische nicht ausgeschlossen werden.

Bereits in der Literatur (siehe Kapitel 3.1, *Schulz und Dittmar /L-14/*) wurde darauf verwiesen, dass sogar einzelne mit hoher kinetischer Energie geschlagene Stahl-Schlagfunken Brenngas/Luft-Gemische hoher Mindestzündenergie (also auch Methan/Luft-Gemische) zünden können.

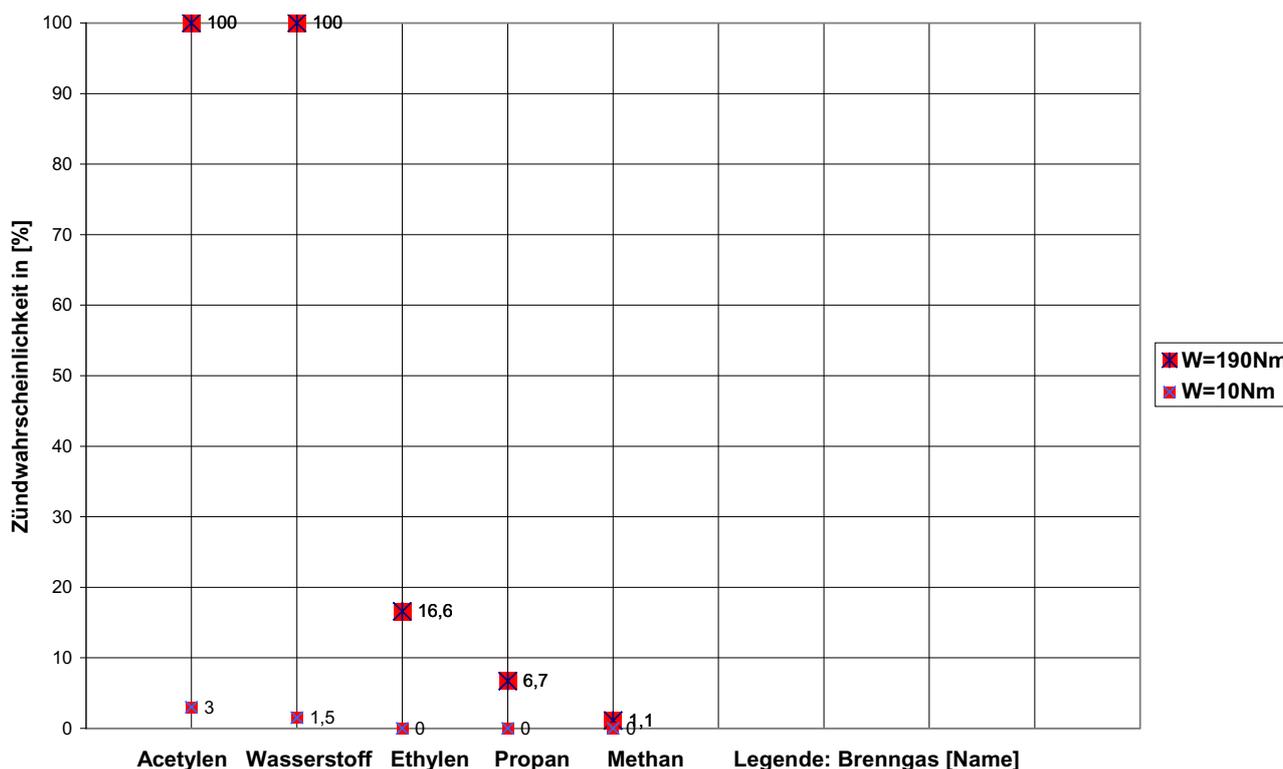


Abb. 17

Zündwahrscheinlichkeiten aller Brenngas/Luft-Gemische der IEC-Explosionsgruppen im für mechanisch erzeugte oxidationsfähige Stahl-Schlagfunken zündwilligsten Bereich bei $W = 10 \text{ Nm}$ und $W = 190 \text{ Nm}$

Im Gegensatz zur Literatur (bis 40,0 Vol.-% Acetylenanteil in Luft) ließen sich im Versuch die Acetylen/Luft-Gemische bis 75,0 Vol.-% Acetylen in Luft bei jedem Schlagvorgang zur Explosion bringen. Wegen der, wie bereits erwähnt, extrem starken Verschmutzung wurden keine weiteren Versuche mit höheren Gemischanteilen durchgeführt. Durch die Zerfallsfähigkeit von Acetylen kann aber eine Zündfähigkeit der Gemische bis nahezu 100,0 Vol.-% Acetylenanteil angenommen werden.

Die Schlagfunkenversuche mit $W = 190 \text{ Nm}$, bei denen 100 % Zündwahrscheinlichkeit ermittelt wurde (IIC-Gemische mit Wasserstoff und mit Acetylen), bedürfen naturgemäß

keiner höheren Versuchsanzahl zur statistischen Absicherung. Bei den Schlagfunkenversuchen mit hohen Schlagenergien insbesondere im Bereich einstelliger Prozentzahlen (I-Gemische mit Methan und IIA-Gemische mit Propan), kann eine deutlich höhere Versuchsanzahl die Prozent-Werte etwas verändern. Dazu wären dann weitere Versuche notwendig. Bedingt durch die zeitlich sehr viel aufwändigeren Schlagfunkenversuche mit der großen Schlagfunkenmaschine wurden diese ergänzenden Versuche hier nicht durchgeführt.

Die Ergebnisse der Ermittlung aller Zündwahrscheinlichkeiten und unterschiedlicher Schlagenergien im Vergleich sind zusammenfassend in *Abb. 17* dargestellt.

7 Interpretation der Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden einige aus den Versuchen resultierende zusammenfassende Aussagen zu den wichtigsten Einflussgrößen auf die Zündwahrscheinlichkeit gemacht.

7.1 Zusammenhang zwischen kinetischer Schlagenergie und der Zündwahrscheinlichkeit

Wie die durchgeführten Versuche gezeigt haben, besteht 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.

Für die Gemische der IEC-Explosionsgruppe IIC bedeutet das eine signifikante Zunahme der Zündwahrscheinlichkeit durch Stahl-Schlagfunken von 1,5 % (für Wasserstoff) bis 3,0 % (für Acetylen) bei $W = 10 \text{ Nm}$ auf 100 % bei $W = 190 \text{ Nm}$. Bei Ethylen beträgt die Zunahme der Zündwahrscheinlichkeit von 0 % auf 16,6 % und bei Propan von 0 % auf 6,7 %. Diese Abhängigkeiten sind in *Abb. 20* dargestellt.

Folgender Mechanismus kann für diese Abhängigkeit als verantwortlich angesehen werden:

Wichtig für die Zündwahrscheinlichkeit ist die Anzahl der abgetrennten Teilchen bzw. Funken pro Schlag. Entsteht im Fall von geringen kinetischen Schlagenergien ($W = 10 \text{ Nm}$) nur ein einzelner Funke, hat dieser im ungünstigsten Fall

(IIC-Gemisch mit Acetylen) eine Zündwahrscheinlichkeit von maximal 3,0 %. Werden durch hohe kinetische Schlagenergien gleich mehrere Teilchen mit hohem Energieinhalt und großem Durchmesser pro Schlag abgetrennt, entsteht kurzzeitig ein Funkenregen ähnlich einem Schleifvorgang (vgl. Abb. aus A-1). Durch die Überlagerung der Wärmefelder der einzelnen Funken entsteht eine sehr viel größere heiße Oberfläche im Gemischraum als bei einem einzelnen Funken. Der Anscheinsbeweis dafür ist die gegenüber einzelnen mechanisch erzeugten Stahl-Schlagfunken deutlich höhere Zündwahrscheinlichkeit von Schleif-Funkenregen.

Neben der kinetischen Schlagenergie haben auch die Geometrie des Schlagpartners, die Schlagkinematik und die Oberflächenrauigkeit einen Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeit.

Mit spitzer Geometrie wenigstens eines Schlagpartners und mit einem streifenden Schlag lassen sich eher Teilchen abtrennen. Weiterhin tritt bei rauerer Oberfläche insbesondere beim streifenden Schlag ein Verzahnungseffekt auf, sodass die Wahrscheinlichkeit Teilchen abzutrennen steigt.

Das bedeutet, dass sich auch mit deutlich geringerer kinetischer Schlagenergie als 190 Nm, aber mit spitzer Geometrie, streifender Schlaggeometrie und rauer, ggf. rostiger Oberfläche, zündfähige Teilchen abtrennen lassen. Ist die Oberfläche dagegen relativ glatt und findet möglicherweise nur ein stumpfer Schlag statt, kann sogar die Schlagenergie von $W = 190$ Nm nicht ausreichen, um zündfähige Funken zu erzeugen.

Interessant wären weiterhin Aussagen, wie sich die Zündwahrscheinlichkeit zwischen den o. g. Werten der kinetischen Schlagenergien verhält. Aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen ist eine lineare Abhängigkeit mit der daraus resultierenden Möglichkeit der einfachen Interpolation unwahrscheinlich. Daraus resultiert die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen.

7.2 Gemisch-Zusammensetzung und Oxidationsfähigkeit von Stahl-Schlagfunken, abgetrennt aus ferritischen Stahlwerkstoffen

Bei Schlagvorgängen, die zwischen oxidationsfähigen, ferritischen und ungehärteten Stahlwerkstoffen mit der kinetischen Schlagenergie in von Höhe $W = 10$ Nm durchgeführt werden, besteht nach den Ergebnissen dieser Untersuchungen nur in dem Bereich von der UEG bis etwa 25,0 Vol.-% Brenngasanteil in Luft überhaupt die Möglichkeit oxidationsfähige Funken zu schlagen. Nicht oxidierte Teilchen erhöhter Temperatur, die mit 10 Nm kinetischer Schlagenergie abgetrennt werden, sind aufgrund ihrer Teilchengröße, ihres Energieinhalts und der daraus resultierenden Lebensdauer nicht zündfähig.

Im Bereich über 25,0 Vol.-% Brenngas/Luft-Gemisch ist es mit ferritischen Stahlwerkstoffen mit der kinetischen Schlagenergie von 10 Nm nicht mehr möglich, oxidationsfähige Stahlfunken zu erzeugen. Somit kann eine Zündung von Brenngas/Luft-Gemischen aller IEC-Explosionsgruppen bei über 25,0 Vol.-% Brenngasanteil in Luft durch mechanische und mit $W = 10$ Nm erzeugte Stahl-Schlagfunken als unwahrscheinlich angesehen werden.

Bei Schlagvorgängen, die zwischen ferritischen und ungehärteten Stahlwerkstoffen mit der kinetischen Schlagenergie in Höhe $W = 190$ Nm durchgeführt werden, besteht in dem gesamten explosionsfähigen Bereich eines Brenngas/Luft-Gemisches die Möglichkeit, zündfähige Funken zu schlagen. Der Grund liegt darin, dass die Oxidationsfähigkeit der Teilchen bei sehr energiereichen Schlagvorgängen nicht mehr allein für die Zündung des Gemisches verantwortlich ist. Im Gegensatz zu den mit 10 Nm kinetischer Schlagenergie abgetrennten Teilchen haben diese Teilchen/Funken aufgrund ihres energiereichen Abtrennvorganges auch ohne Oxidationsvorgang eine deutlich höhere Teilchengröße, höheren Energieinhalt und damit eine längere Lebensdauer.

7.3 Einfluss des Zusammenhangs von Gemischzusammensetzung und Mindestzündenergie auf die Zündfähigkeit von Stahl-Schlagfunken aus ferritischen Stahlwerkstoffen

Mechanisch erzeugte Funken, die mit so niedriger kinetischer Schlagenergie erzeugt werden, dass sie nur aufgrund eines Oxidationsvorganges zur Zündquelle werden können, haben die höchste Wahrscheinlichkeit zur Oxidation im Bereich mit dem höchsten Sauerstoff-Gehalt im Brenngas/Luft-Gemisch. Über 25,0 Vol.-% Brenngasanteil in Luft lassen sich mit der kinetischen Schlagenergie von 10 Nm jedoch keine oxidierten Stahl-Schlagfunken mehr erzeugen.

Bei Kohlenwasserstoff-Verbindungen fallen der stöchiometrische Bereich mit der niedrigsten Zündenergie (der Mindestzündenergie, MZE) und die durch Oxidation hervorgerufene höchste Zündfähigkeit von mit 10 Nm mechanisch erzeugten Stahl-Schlagfunken zusammen, da der stöchiometrische Bereich im einstelligen Prozentbereich des Brenngasanteils in Luft liegt, und somit wenig Brenngas die Luft bzw. Restsauerstoff verdrängt. Damit liegt bei den Kohlenwasserstoff-Verbindungen das stöchiometrische Gemisch jeweils in dem Bereich der höchsten Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken. Bei Wasserstoff/Luft-Gemischen sind die Verhältnisse anders. Hier liegt das stöchiometrische Gemisch bei 28,5 Vol.-%. Unterhalb und oberhalb des stöchiometrischen Gemisches steigt die Zündenergie wieder an. Deshalb kommt es bei Wasserstoff/Luft-Gemischen im Gegensatz zu Acetylen/Luft-Gemischen trotz ähnlich niedriger MZE nur in einem deutlich kleineren Gemisch-Bereich von 6,0 Vol.-% bis unter 13,5 Vol.-% Wasserstoff in Luft zu Zündungen.

Bei mit 190 Nm mechanisch erzeugten Stahl-Schlagfunken spielt im Gegensatz zu 10 Nm aufgrund des energiereichen Abtrennvorganges und des dadurch bedingten deutlich höheren Energieinhalts des Teilchens auch ohne Oxidationsvorgang die Gemischzusammensetzung eine geringere Rolle. Entscheidend ist, dass die jeweilige Zündenergie überschritten wird.

7.4 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit und der molaren Wärmekapazität auf die Zündfähigkeit von Stahl-Schlagfunken aus ferritischen Stahlwerkstoffen

Die Wärmeleitfähigkeit und die molare Wärmekapazität des Brenngas/Luft-Gemisches haben Einfluss auf die Zündfähig-

keit mechanisch erzeugter Funken, die mit so niedriger kinetischer Schlagenergie erzeugt werden, dass sie nur aufgrund des Oxidationsvorganges zündfähig werden können.

Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Gemisches, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung oxidierter Stahl-Schlagfunken, da dem Teilchen sehr schnell die für den Oxidationsvorgang notwendige Wärme entzogen wird. Der Unterschied der Wärmeleitfähigkeit zwischen den betrachteten Brenngas/Luft-Gemischen beträgt mehr als Faktor 10.

Die geringere Zündwahrscheinlichkeit und der gegenüber mechanisch erzeugten Funken kleinere Zündbereich von Wasserstoff/Luft- im Vergleich zu Acetylen/Luft-Gemischen (trotz ähnlicher MZE und damit verbundener gleicher Einstufung beider Brenngase in IEC-Explosionsgruppe IIC) kann durch den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit begründet sein.

Je höher die molare Wärmekapazität, desto geringer die Wahrscheinlichkeit oxidierter Stahl-Schlagfunken zu erzeugen. Zwischen den betrachteten Brenngas/Luft-Gemischen unterscheiden sich die molaren Wärmekapazitäten um den Faktor 1,5.

7.5 Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Zündfähigkeit von Stahl-Schlagfunken aus ferritischen Stahlwerkstoffen

Erfahrungsgemäß lassen sich mit der geringen kinetischen Schlagenergie von $W = 10 \text{ Nm}$ auf relativ glatten Stahloberflächen auch mit spitzer Schlaggeometrie mit einer wesentlich geringeren Wahrscheinlichkeit oxidierter und somit zündfähige Teilchen abtrennen, als von einer rauen Oberfläche.

Bei sehr viel höherer kinetischer Schlagenergie ist dieser Einfluss geringer. Es lassen sich hier unabhängig von der Oberflächenrauigkeit immer oxidierte Funken abtrennen. Die Oberflächenrauigkeit hat damit nur geringen Einfluss auf Schlagvorgänge mit hoher kinetischer Schlagenergie.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden weitere Schlagfunkenversuche unter Luft durchgeführt, um die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit zu ermitteln.

Die Schlagfunkenversuche wurden jeweils auf einer neuen, unbenutzten Stelle der Schlagfläche durchgeführt. Die Versuche mit ferritischem und unlegiertem Stahl haben gezeigt, dass sich bei der relativ geringen kinetischen Schlagenergie von 10 Nm erst ab einer bestimmten Oberflächenrauigkeit durch den streifenden Schlag Teilchen und erst ab einer Oberflächenrauigkeit von $R_z = 14,51 \text{ }\mu\text{m}$ bis $27,76 \text{ }\mu\text{m}$ bei der hier angewendeten Schlaggeometrie und Schlagkinematik oxidationsfähige Funken abtrennen lassen.

Bis zu einer gemittelten R_z von $5,3 \text{ }\mu\text{m}$ konnten keine Teilchen erhöhter Temperatur abgetrennt werden, die anschließend in der Lage waren, auf ein höheres Temperaturniveau zu oxidieren. Dieser Mechanismus setzte erst nach 10 Schlagvorgängen und einer dann gemessenen Rautiefe von $R_z = 14,51 \text{ }\mu\text{m}$ ein. Nach 50 Schlagvorgängen lag die R_z bei $27,76 \text{ }\mu\text{m}$ und die Wahrscheinlichkeit Funken zu beobachten stieg auf 80% an. Ferner konnten ein deutlicher Materialabtrag bzw. durch Kaltschweißvorgänge Materialverlagerung beobachtet werden. Nach 100 Schlagvorgängen wurde die Oberfläche rauer ($R_z = 43,27 \text{ }\mu\text{m}$) und die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung von Funken erreichte 96% . Nach 200 Schlagvorgängen sank die Oberflächenrauigkeit auf $R_z = 42,33 \text{ }\mu\text{m}$. Auch die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung oxidierter Funken ging auf

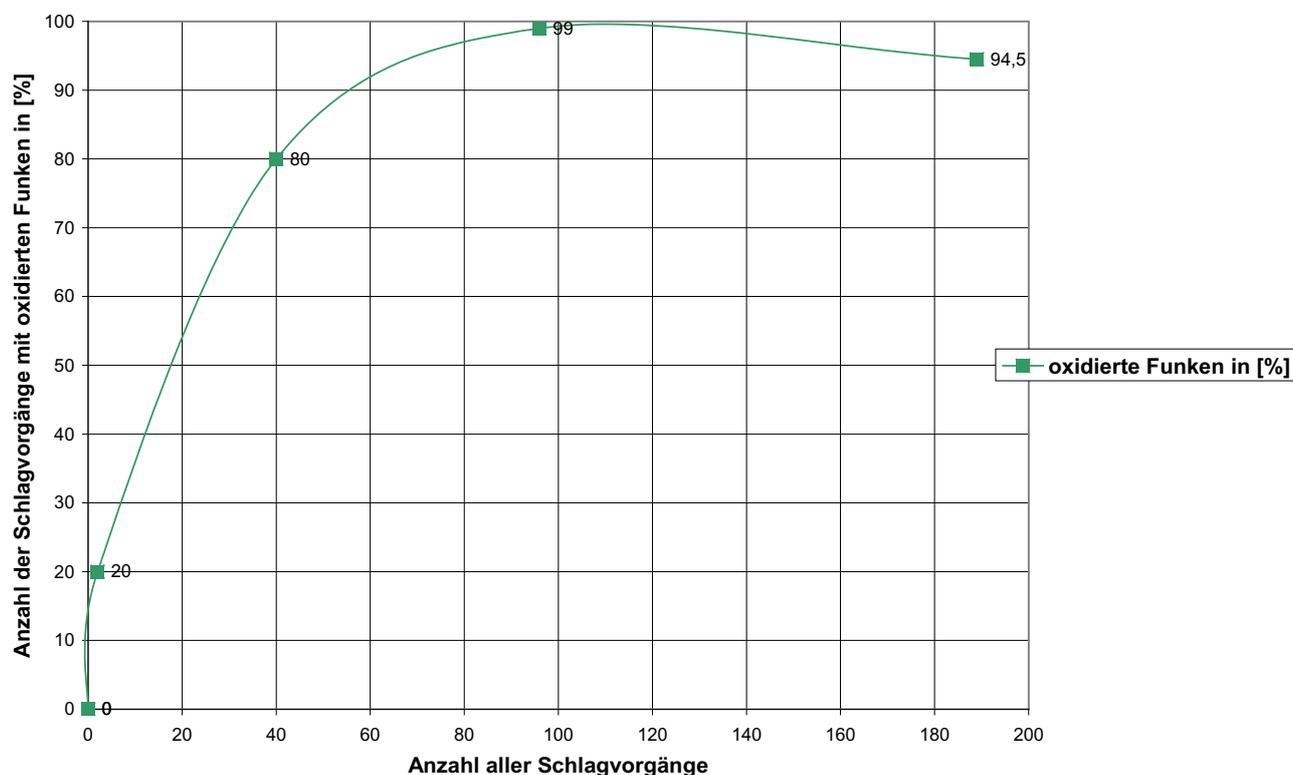


Abb. 18

Anzahl der Schlagvorgänge mit oxidierten Funken in Abhängigkeit von der Anzahl der ausgeführten Schlagvorgänge bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

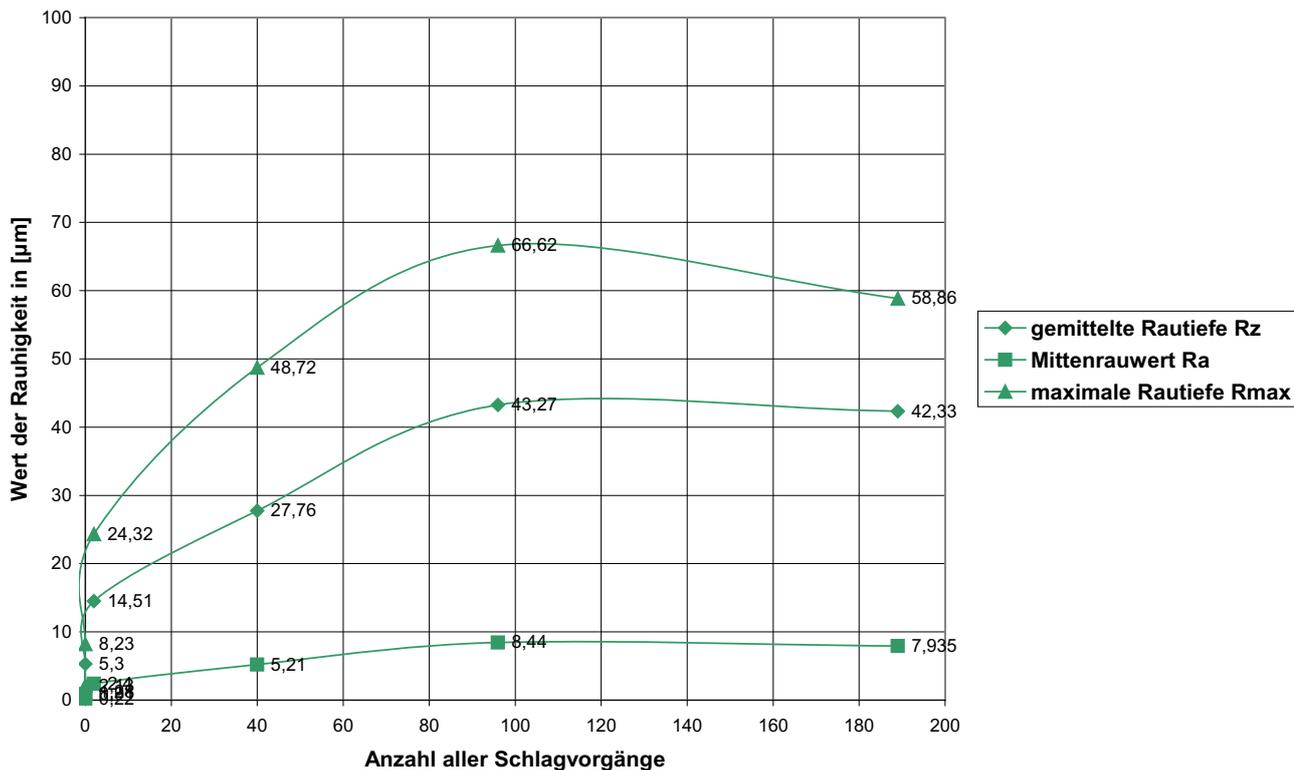


Abb. 19

Abhängigkeit der Rauigkeit von der Anzahl der ausgeführten Schlagvorgänge bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

94,5 % zurück. Vermutlich ist dabei so viel Material abgetragen und verlagert worden, dass das teilweise verlagerte kaltverschweißte Material nach einem Schlagvorgang nur noch kugelförmig abgleiten/abrollen konnte.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abb. 18 und 19 graphisch dargestellt. Die Tabelle A-14 enthält die Versuchswerte. Die Abb. 20 bis 25 zeigen die den Rauigkeitswerten zugrundeliegende Topographie und Aufnahmen.

Diese Ergebnisse bestätigten die gewählte Vorgehensweise bei den Schlagfunkenversuchen mit Brenngas/Luft-Gemischen. Hier wurden die eigentlichen Versuche mit den Versuchsgemischen erst nach 50 Schlagvorgängen ohne Versuchsgemisch durchgeführt. Der erste Schlagvorgang unter explosionsfähigem Brenngas/Luft-Gemisch war demzufolge der 51. Schlagvorgang insgesamt. Dieser lag somit in einem Bereich, der aufgrund der Oberflächenstruktur die höchstmögliche Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken hat. Nach insgesamt 200 Schlagvorgängen bzw. 150 Schlägen unter Brenngas/Luft-Gemisch wurde die Schlagstelle gewechselt und mit 50 Schlagvorversuchen neu „eingeschlagen“.

7.6 Partikelgeschwindigkeit und -größe, Flächenpressung

Für die Ermittlung der Partikelgeschwindigkeit wurden Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen erstellt. Dabei konnte für die Partikelgeschwindigkeit eine Geschwindigkeit unter der Schlaggeschwindigkeit ermittelt werden.

Die Geschwindigkeit des Schlaghebels betrug bei der kleinen SFM $10,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, die Partikelgeschwindigkeit nach dem Abtrennvorgang bis zum Oxidieren bzw. Verbrennen betrug etwa $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Die Partikelgröße der verbrannten Partikel aus den Schlagvorgängen mit der kleinen Schlagfunkenmaschine betrug etwa $0,1 \text{ mm}$ bis $0,2 \text{ mm}$. Deutlich kleine Partikel konnten makroskopisch nicht nachgewiesen werden.

Bei der großen SFM betrug die Schlaggeschwindigkeit $14,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Die Partikelgeschwindigkeit lag in dem Bereich von $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Die Partikelgröße der oxidierten Partikel betrug etwa $0,1 \text{ mm}$ bis $1,0 \text{ mm}$, überwiegend waren jedoch eher große Partikel zu beobachten.

Aufgrund der großen Oberflächenrauigkeit der abgetrennten Partikel – sowohl für die Schlagvorgänge mit der kleinen als auch mit der großen SFM und unter Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeit – ist eine turbulente Umströmung der fliegenden Partikel wahrscheinlich (Reynoldszahl etwa 100 bei Annahme einer umströmten Kugel).

Die Flächenpressung zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte beträgt für die Schlagfunkenversuche mit der kleinen SFM in der Einstellung $W = 10 \text{ Nm}$ $4,4 \text{ N/mm}^2$ bis $8,3 \text{ N/mm}^2$.

Für die große SFM beträgt die Flächenpressung für die kinetische Schlagenergie in Höhe von 190 Nm $10,0 \text{ N/mm}^2$ bis $16,7 \text{ N/mm}^2$.

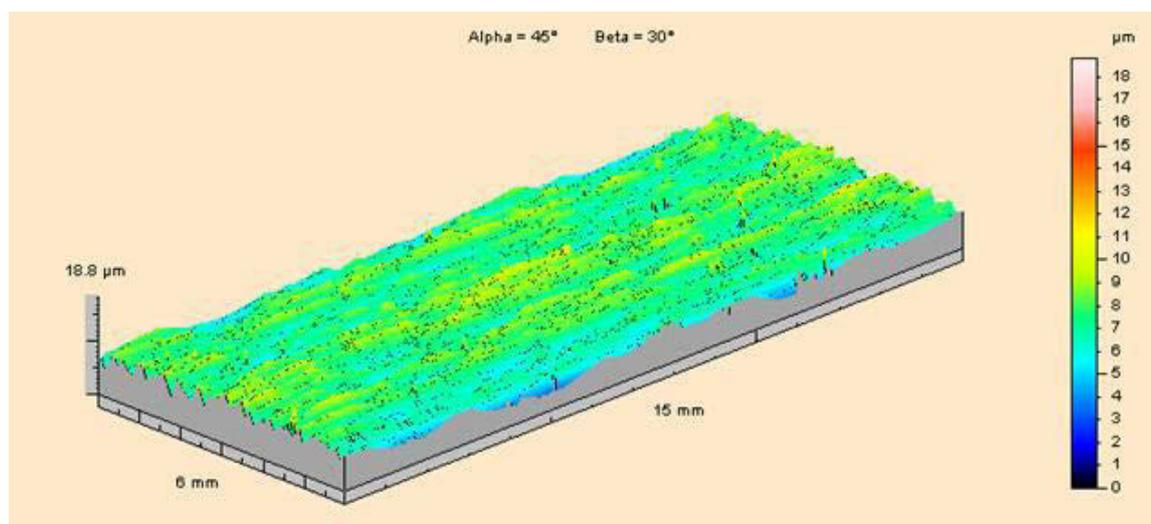


Abb. 20.1

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 0 Schlagvorgängen/im Anlieferungszustand: Oberflächen geschliffen, Schlagvorgänge in Schleifrichtung

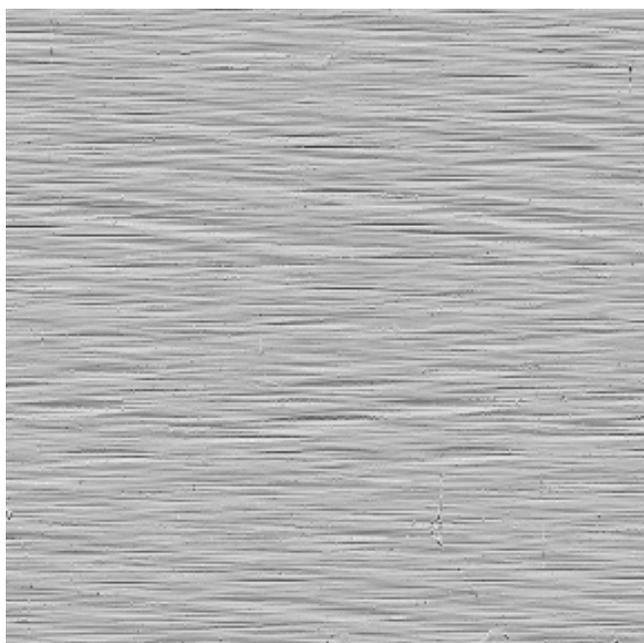


Abb. 20.2

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 0 Schlagvorgängen/im Anlieferungszustand: Oberflächen geschliffen, Schlagvorgänge in Schleifrichtung

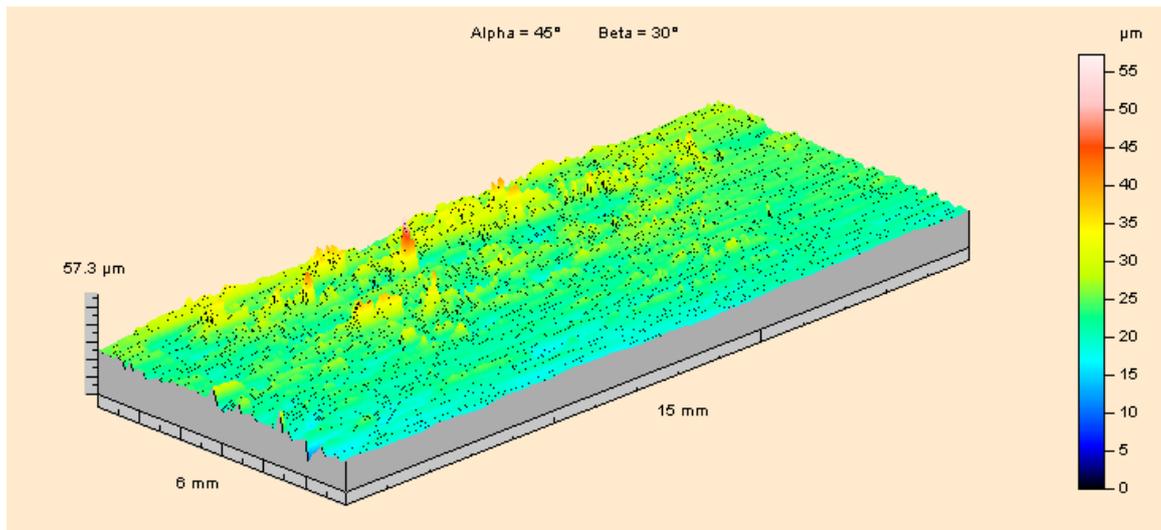


Abb. 21.1
Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 3 Schlagvorgängen

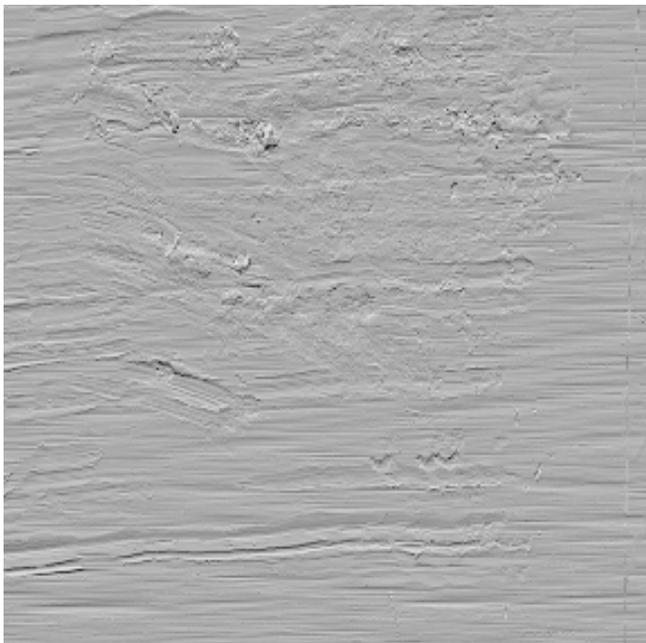


Abb. 21.2
Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 3 Schlagvorgängen

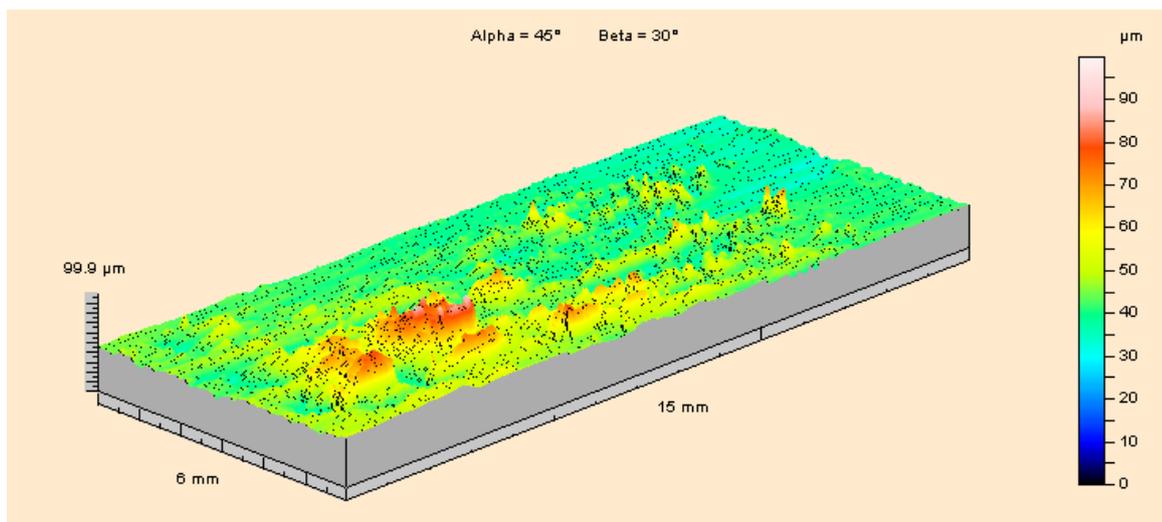


Abb. 22.1
 Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 10 Schlagvorgängen

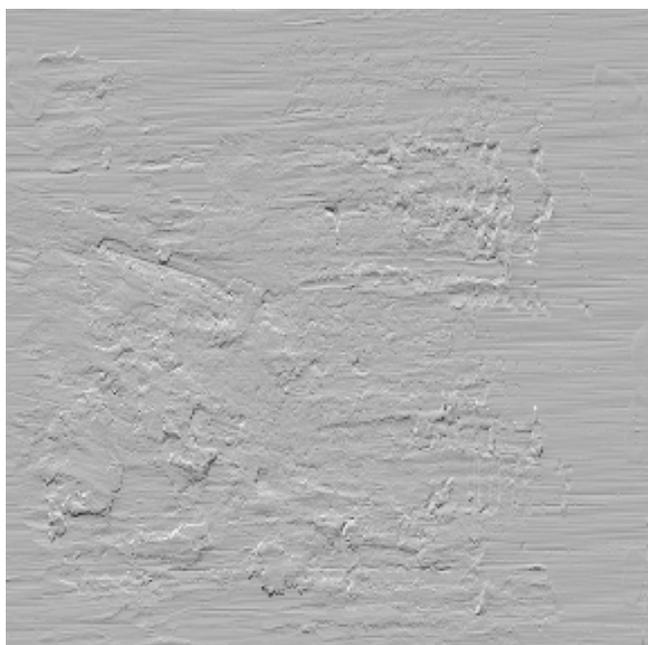


Abb. 22.2
 Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 10 Schlagvorgängen

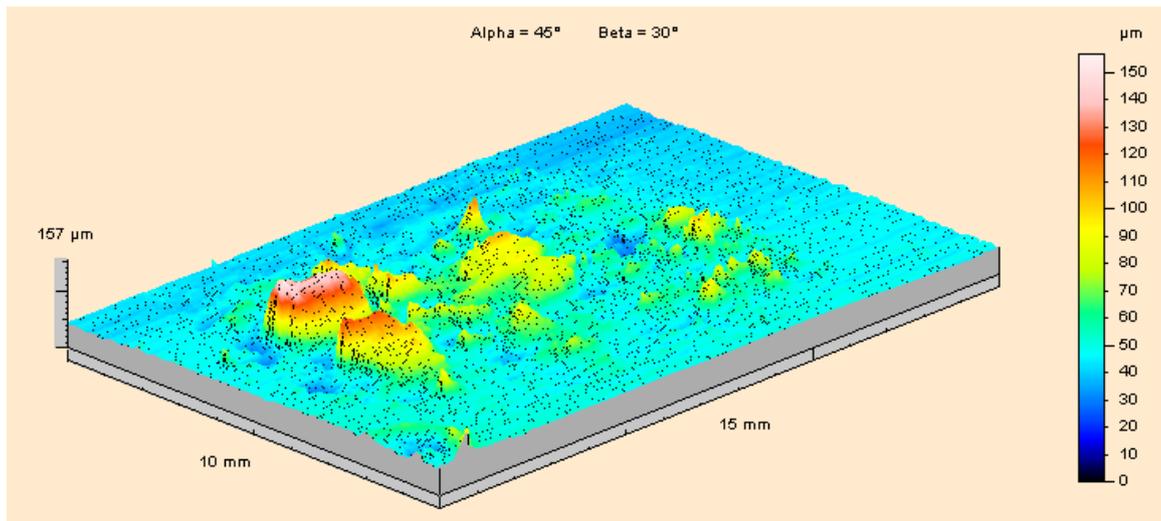


Abb. 23.1
Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 50 Schlagvorgängen

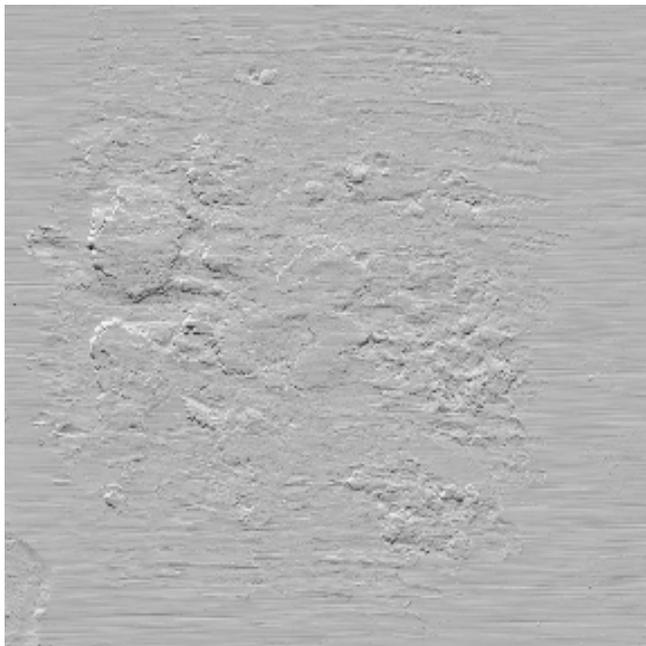


Abb. 23.2
Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 50 Schlagvorgängen

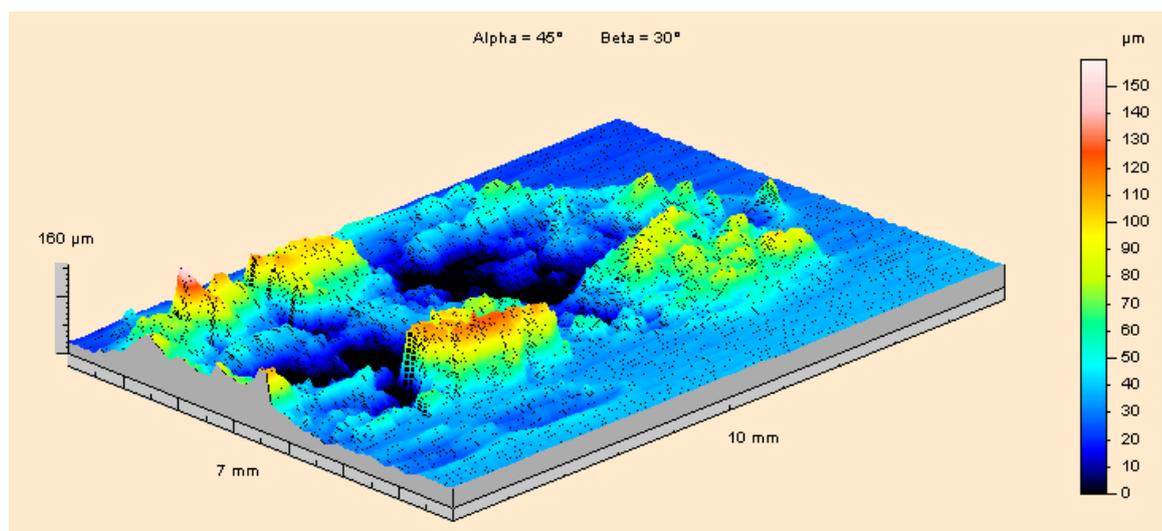


Abb. 24.1

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 100 Schlagvorgängen

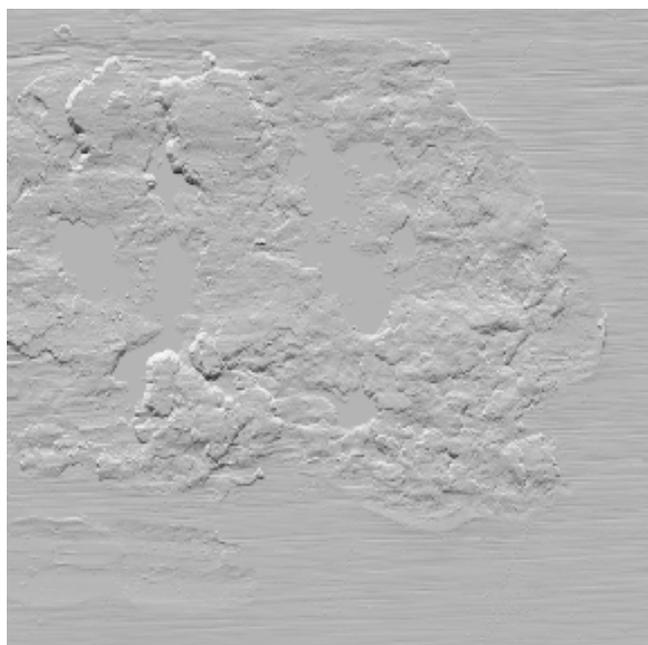


Abb. 24.2

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 100 Schlagvorgängen

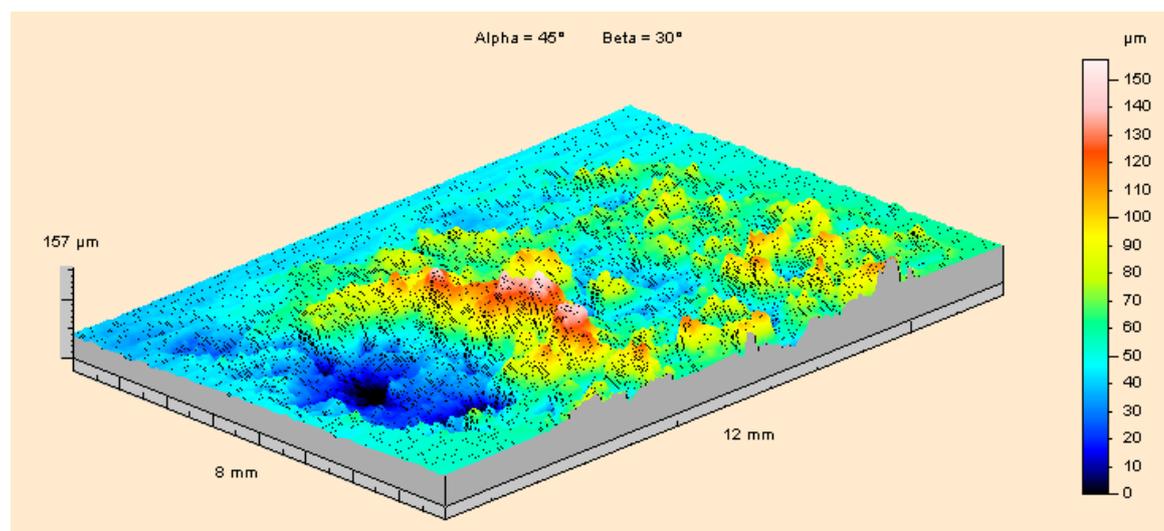


Abb. 25.1
Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 200 Schlagvorgängen

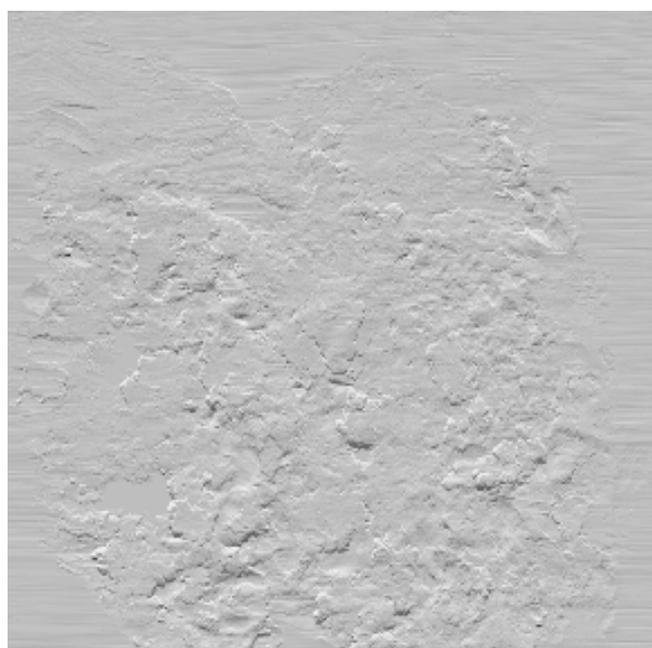


Abb. 25.2
Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52 und nach 200 Schlagvorgängen

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen zur Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter Funken, die aus Schlagvorgängen zwischen zwei aus ferritischem Stahl (St52) bestehenden Schlagpartnern resultieren, vorgestellt. Die Zündwahrscheinlichkeit wurde für verschiedene Versuchsgemische Brenngas/Luft der IEC-Explosionsgruppen (Methan (I), Propan (IIA), Ethylen (IIB), Acetylen und Wasserstoff (IIC)) bei zwei kinetischen Schlagenergien und unter Verwendung der bereits erörterten Schlagkinematik und -geometrie ermittelt. Dabei wurden verschiedene Einflussparameter (Gemischzusammensetzung, Oxidationsverhalten, Wärmeleitfähigkeit und -kapazität des Gemisches, Oberflächenrauigkeit, Partikelgeschwindigkeit und -größe) untersucht und die Ergebnisse ausgewertet.

Die folgenden grundsätzlichen Schlussfolgerungen können 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 Schlaggeometrie unwahrscheinlich, einzelne Stahl-Teilchen so abzutrennen, dass sie in der Lage sind, auf ein zündgefährliches Temperaturniveau zu oxidieren. 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 Stahl-Teilchen werden nur dann zur gefährlichen

Zündquelle, 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.

Die mögliche Oxidation hängt von einer Vielzahl von Einflussparametern ab. Findet keine Oxidation der abgetrennten Teilchen statt, ist in allen IEC-Explosionsgruppen 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 einem weiten Bereich der Gemischzusammensetzung. Bei Wasserstoff/Luft-Gemischen

(IIC) lag die Zündwahrscheinlichkeit bei etwa 1,5 % und dort auch nur im Bereich der Gemischzusammensetzung unter 13,5 Vol.-% Wasserstoffanteil in Luft.

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

Mit dieser hohen kinetischen Schlagenergie abgetrennte einzelne Teilchen können unabhängig von einem möglicherweise stattfindenden Oxidationsvorgang allein aufgrund ihres durch den Abtrennvorgang bedingten hohen Energieinhaltes und der hohen Teilchengröße unabhängig von der Gemischzusammensetzung 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).

9 Ausblick

In dem Bereich zwischen $W = 10 \text{ Nm}$ und $W = 190 \text{ Nm}$ ist eine einfache Interpolation der Ergebnisse nicht möglich, da in diesem Bereich ein Übergang zwischen den oben dargestellten Größenordnungen der Zündwahrscheinlichkeiten stattfindet und die Zündfähigkeit mechanisch erzeugter Funken grundsätzlich von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängt. Aussagen zwischen diesen beiden Extremen sind aber sehr bedeutsam für die sicherheitstechnische Praxis.

Aus diesem Grund ist für die Zukunft eine Fortführung der Arbeiten geplant. Die folgenden Schwerpunkte wurden als nächste Schritte festgelegt:

1. Durchführung von Schlagfunkenversuchen mit ferritischen Stählen im Bereich der kinetischen Schlagenergie zwischen 10 Nm und 190 Nm.

Dafür werden für die große Schlagfunkenapparatur Torsionsst- abfedern geringerer Stärken und somit geringerer kinetischer Schlagenergien angefertigt. Eine Veränderung der kleinen

Schlagfunkenapparatur erfolgt nicht, da der Aufwand zur Ermittlung des realen Energieeintrages der Blattfederkonstruktion unverhältnismäßig zur möglichen Genauigkeit ist.

2. Ermittlung von Daten für eine mögliche spätere mathematische Simulation des Schlagvorganges.

Es sollen Daten ermittelt werden, die die Basis für eine mögliche spätere mathematische Simulation darstellen können. Das ist in einem ersten Schritt die genaue Analyse des Vorganges mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Auf dieser Basis soll der Gesamtvorgang in Einzelschritte zerlegt werden. Mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen konnten bereits erste Ergebnisse zur Anfangsgeschwindigkeit der abgetrennten Teilchen ermittelt werden. Diese lag naturgemäß unter der Geschwindigkeit des Schlaghebels. Aussagen über die Partikelgeschwindigkeiten wurden bereits unter Punkt 6.6 gemacht.

10 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-6/ | Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Fachausschuss „Chemie“ der BGZ.
Witt, Hans: Explosionsschutz bei Ventilatoren, Veröff.: Normenausschuss Sicherheit von Geräten (NASG/GUA), Nr. 15-97. |
| /L-3/ | Bartknecht, W.: Explosionsschutz – Grundlagen und Anwendung. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, Hongkong, Barcelona, Budapest: Springer – Verlag 1993. | /L-7/ | DIN EN 13463-1: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 1: Grundlagen und Anforderungen. Beuth Verlag 2001. |
| /L-4/ | DIN EN 1127-1: Explosionsschutz, Teil 1: Grundlagen und Methodik. Berlin: Beuth Verlag 1997. | /L-8/ | prEN 14986: Design of fans working in potentially explosive atmospheres. Beuth Verlag 2005. |
| /L-5/ | Regeln für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung – Explosionsschutz-Regeln – (EX-RL). Hrsg.: | /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/ Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (EX-VO), 1963
- /L-11/ IEC 60079-1 Ed. 6.0: Explosive Atmospheres – Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures "d"
- /L-12/ *Voigtberger, P.* (BAM): Zündfähigkeit von Schleiffunken gegenüber explosiblen Gas- und Dampf-Luft-Gemischen. In: Bundesarbeitsblatt, Heft 6/1955. [BAM-II.11-Lit. 1-1]
- /L-13/ *Konschack, M.* (BAM), *Voigtberger, 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-14/ *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-15/ *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-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]

11 Anhang

11.1 Bilder



1)

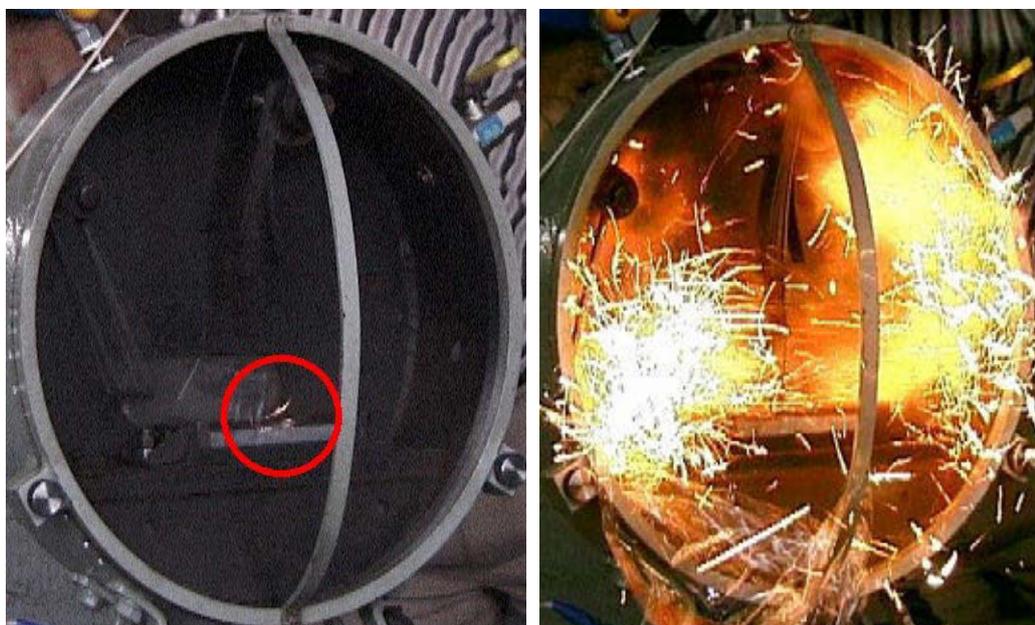
2)

3)

Abb. A-1

Entwicklung der Funkengarbe:

- 1) nach einem einzelnen Schlagvorgang mit $W = 10 \text{ Nm}$
- 2) nach einem einzelnen Schlagvorgang mit $W = 190 \text{ Nm}$ und
- 3) während eines Schleifvorganges



1)

2)

Abb. A-2

Fotos zeigen nach einem einzelnen Schlagvorgang mit $W = 10 \text{ Nm}$ die Entwicklung von einem abgetrennten Stahlteilchen in den Stadien:

- 1) Direkt nach dem Abtrennen und Beginn der Oxidation,
- 2) Übertragung der Wärme auf das Brenngas/Luft-Gemisch mit nachfolgender Explosion



1)

2)

Abb. A-3

Fotos zeigen nach einem einzelnen Schlagvorgang mit $W = 190 \text{ Nm}$ die Entwicklung von mehreren abgetrennten Stahlteilchen in den Stadien:

- 1) Direkt nach dem Abtrennen und Beginn der Oxidation. Durch das Abtrennen von mehreren Teilchen entsteht ein kurzzeitiger Funkenregen.
- 2) Übertragung der Wärme auf das Brenngas/Luft-Gemisch mit nachfolgender Explosion

11.2 Tabellen

Tabelle A-1

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Methan/Luft-Gemischen bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammensetzung in [Vol.-%]	7,0	8,0	9,5 stöch. Gem.	15,0 >OEG	20,0 >OEG	25,0 >OEG		
CH ₄								
Anzahl der Schlagvorgänge	100	100	100	50	50	50		
Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	83	84	88	28	1	0		
Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur	0	0	0	5	5	4		
Schlagvorgänge ohne Funken	17	16	12	17	44	46		
Anzahl der Explosionen	0	0	0	0	0	0		
Prozentualer Anteil der Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	83	84	88	56	2	0		

Tabelle A-2

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Propan/Luft-Gemischen bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammensetzung in [Vol.-%]		3,0	4,0 stöch. Gem.	6,5	8,0	10,0	15,0 >OEG	20,0 >OEG	25,0 >OEG
C_3H_8									
Anzahl der Schlagvorgänge		100	150	100	100	100	50	50	50
Schlagvorgänge mit oxidierten Funken		88	126	86	93	75	28	8	0
Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur		0	0	0	0	0	11	27	0
Schlagvorgänge ohne Funken		12	24	14	7	25	11	15	50
Anzahl der Explosionen		0	0	0	0	0	0	0	0
Prozentualer Anteil der Schlagvorgänge mit oxidierten Funken		83	84	86	93	75	56	16	0

Tabelle A-3

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Ethylen/Luft-Gemischen bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammen- setzung in [Vol.-%]	4,0	5,0	6,5 stöch. Gem.	11,5	16,5	21,5	26,5	
C_2H_4								
Anzahl der Schlagvorgänge	130	100	130	100	50	50	50	
Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	117	93	125	97	34	5	0	
Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur	0	0	0	0	0	9	0	
Schlagvorgänge ohne Funken	13	7	5	3	16	36	50	
Anzahl der Explosionen	0	0	0	0	0	0	0	
Prozentualer Anteil der Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	90	93	96	97	68	10	0	

Tabelle A-4

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Acetylen/Luft-Gemischen bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammensetzung in [Vol.-%]		3,0	4,0	5,0	6,0	8,0 stöch. Gem.	13,0	18,0	23,0
C_2H_2									
Anzahl der Schlagvorgänge		100	100	120	102	100	50	54	110
Schlagvorgänge mit oxidierten Funken		89	96	104	83	91	37	10	2
Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur		0	0	0	0	0	0	0	0
Schlagvorgänge ohne Funken		11	4	16	19	9	13	40	108
Anzahl der Explosionen		2	2	1	3	3	4	3	0
Prozentualer Anteil der Schlagvorgänge mit oxidierten Funken		89	96	87	97	91	74	18	1,8

Tabelle A-5

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Wasserstoff/Luft-Gemischen bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammensetzung in [Vol.-%]		6,0	8,5	13,5	18,5	23,5	28,5 stöch. Gem.	33,5	
H ₂									
Anzahl der Schlagvorgänge		100	100	100	250	104	100	100	
Schlagvorgänge mit oxidierten Funken		80	67	40	6	1	0	0	
Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur		0	0	0	0	0	0	0	
Schlagvorgänge ohne Funken		20	33	60	244	103	100	100	
Anzahl der Explosionen		0	1	0	0	0	0	0	
Prozentualer Anteil der Schlagvorgänge mit oxidierten Funken		80	67	40	2,4	1	0	0	

Tabelle A-6

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Argon/Luft-Gemischen bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammensetzung in [Vol.-%]	2,5	5,0	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
Ar 4.6												
Anzahl der Schlagvorgänge	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	100	100	100	100	100	84	82	77	21	4	0	0
Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur	0	0	0	0	0	11	10	9	6	7	14	0
Schlagvorgänge ohne Funken	0	0	0	0	0	5	8	14	73	89	86	100
Anzahl der Explosionen	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Prozentualer Anteil der Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	100	100	100	100	100	84	82	77	21	4	0	0

Tabelle A-7

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Helium/Luft-Gemischen bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammensetzung in [Vol.-%]	2,5	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0		
He 5.5								
Anzahl der Schlagvorgänge	100	100	100	100	100	100		
Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	86	98	74	59	3	0		
Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur	0	0	0	0	13	9		
Schlagvorgänge ohne Funken	14	2	26	41	84	91		
Anzahl der Explosionen	/	/	/	/	/	/		
Prozentualer Anteil der Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	86	98	74	59	3	0		

Tabelle A-8
 Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Helium/Luft-Gemischen bei $W = 190 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemisch- zusammen- setzung in [Vol.-%]	5,0	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
He 5.5															
Anzahl der Schlagvorgänge	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Anzahl der Schlagvorgänge mit oxidierten/ geschmolzenen Funken	20	20	20	20	20	20 ¹⁾	20 ¹⁾	20 ¹⁾	20 ¹⁾	20	20	20	20	20	20
Anzahl der Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anzahl der Schlagvorgänge ohne Funken	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anzahl der Explosionen	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Prozentualer Anteil von Schlagvorgängen mit oxidierten/ geschmolzenen Funken	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

¹⁾ Hier wurden zum Teil beide Mechanismen (oxidierte Funken, geschmolzene Teilchen beobachtet.

Tabelle A-9

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Acetylen/Luft-Gemischen bei $W = 190 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammensetzung in [Vol.-%]	8,0 stöch. Gem.	75,0						
C_2H_2								
Anzahl der Schlagvorgänge	20	10						
Anzahl der Schlagvorgänge mit oxidierten/geschmolzenen Funken	20	10						
Anzahl der Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur	0	0						
Anzahl der Schlagvorgänge ohne Funken	0	0						
Anzahl der Explosionen	20	10						
Prozentualer Anteil von Schlagvorgängen mit oxidierten/geschmolzenen Funken	100	100						

Tabelle A-10

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Wasserstoff/Luft-Gemischen bei $W = 190 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammensetzung in [Vol.-%]	10,0								
H ₂									
Anzahl der Schlagvorgänge	20								
Anzahl der Schlagvorgänge mit oxidierten/geschmolzenen Funken	20								
Anzahl der Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur	0								
Anzahl der Schlagvorgänge ohne Funken	0								
Anzahl der Explosionen	20								
Prozentualer Anteil von Schlagvorgängen mit oxidierten/geschmolzenen Funken	100								

Tabelle A-11

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Ethylen/Luft-Gemischen bei $W = 190 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammen- setzung in [Vol.-%]	6,5 stöch. Gem.								
C_2H_4									
Anzahl der Schlagvorgänge	30								
Anzahl der Schlagvorgänge mit oxidierten/ geschmolzenen Funken	30								
Anzahl der Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur	0								
Anzahl der Schlagvorgänge ohne Funken	0								
Anzahl der Explosionen	5								
Prozentualer Anteil von Schlagvorgängen mit oxidierten/ geschmolzenen Funken	100								

Tabelle A-12

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Propan/Luft-Gemischen bei $W = 190 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammensetzung in [Vol.-%]		4,0 stöch. Gem.							
C_3H_8									
Anzahl der Schlagvorgänge		30							
Anzahl der Schlagvorgänge mit oxidierten/geschmolzenen Funken		30							
Anzahl der Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur		0							
Anzahl der Schlagvorgänge ohne Funken		0							
Anzahl der Explosionen		2							
Prozentualer Anteil von Schlagvorgängen mit oxidierten/geschmolzenen Funken		100							

Tabelle A-13

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Methan/Luft-Gemischen bei $W = 190 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Gemischzusammen- setzung in [Vol.-%]	9,5 stöch. Gem.								
CH ₄									
Anzahl der Schlagvorgänge	94								
Anzahl der Schlagvorgänge mit oxidierten/ geschmolzenen Funken	94								
Anzahl der Schlagvorgänge mit Teilchen erhöhter Temperatur	0								
Anzahl der Schlagvorgänge ohne Funken	0								
Anzahl der Explosionen	1								
Prozentualer Anteil von Schlagvorgängen mit oxidierten/ geschmolzenen Funken	100								

Tabelle A-14

Ergebnisse der Schlagfunkenversuche mit Luft zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung oxidierter Funken in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit bei $W = 10 \text{ Nm}$ mit St52/St52

Luft	Neu- zustand								
Luft									
Anzahl der Schlagvorgänge mit 10 Nm	0	3	10	50	100	200			
Anzahl Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	/	0	2	40	96	189			
$R_z^{1)}$ in μm	1,28	5,30	14,51	27,76	43,27	42,33			
$R_a^{2)}$ in μm	0,22	0,91	2,40	5,21	8,44	7,935			
$R_{\text{max}}^{3)}$ in μm	2,13	8,23	24,32	48,72	66,62	58,86			
Prozentualer Anteil der Schlagvorgänge mit oxidierten Funken	/	0	20	80	96	94,5			

¹⁾ R_z : Die gemittelte Rautiefe R_z stellt das arithmetische Mittel aus den Einzelrautiefen (Z_1 bis Z_z) fünf aneinander grenzender Einzelmessstrecken dar.

²⁾ R_a : Der Mittenrauwert R_a entspricht der Höhe eines Rechteckes, dessen Länge gleich der Gesamtmessstrecke L_m ist. Das Rechteck muss flächengleich mit der Summe der zwischen Rauheitsprofil und mittlerer Linie eingeschlossenen Flächen sein.

³⁾ R_{max} : Die maximale Rautiefe R_{max} ist die größte der auf der Gesamtstrecke L_m vorkommende Einzelrautiefe.