

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik

Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Bauwesen

Masterarbeit

von

Paul Thiele

Matrikelnummer 20062784

13. Februar 2014

Mindestzündenergie von Staubgemischen

Prof. Dr. Ing. habil. Ulrich Krause
Erstbetreuer
Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg

Dr.-Ing. Dieter Gabel
Zweitbetreuer
Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg



OTTO-VON-GUERICKE-
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG
Fakultät für Verfahrens- und
Systemtechnik

HOCHSCHULE MAGDEBURG-
STENDAL
Fachbereich Bauwesen



Aufgabenstellung der Masterarbeit für

Herrn Paul Thiele

Matrikelnummer: 20062784

Thema: Mindestzündenergie von Staubgemischen

Erläuterung

Die Mindestzündenergie von Stäuben ist eine wichtige sicherheitstechnische Kenngröße und entscheidend bei der Bewertung von Zündquellen in der betrieblichen Praxis. Gerade hier treten die Stäube jedoch nicht als Reinstoffe, sondern häufig in Gemischen unterschiedlicher Zusammensetzung auf. Um Einzelbestimmung aller Stoffmischungen zu vermeiden wäre eine Beziehung zur Beschreibung der Abhängigkeit der MZE vom Stoffmengenanteil einer Komponente wünschenswert.

Zu bearbeiten sind folgende Punkte:

- Literaturrecherche
- Inbetriebnahme der neuen MZE Apparatur
- Erstellung einer Versuchsanleitung
- Messung an unterschiedlichen Stäuben und Staubgemischen
- Versuch der Herleitung einer mathematischen Beziehung zur Berechnung der MZE von Staubgemischen in Abhängigkeit von der Konzentration

Ein Plakat zum Thema in A0 hochkant ist zu erstellen.

Beginn der Arbeit: 2.10.13

Abgabe der Arbeit: 19.2.14

Erstgutachter
Prof. U. Krause

Zweitgutachter
Dr.-Ing. D. Gabel

Erklärung zur selbstständigen Anfertigung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, Paul Thiele, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt habe.

Ich habe keine anderen, als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Stellen dieser Arbeit, welche direkt oder indirekt aus Quellen übernommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde bisher nicht in gleicher oder ähnlicher Form bei einem anderen Prüfungsamt vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Paul Thiele

Zielsetzung

Die Mindestzündenergie ist als sicherheitstechnische Kenngröße zur Bewertung der Gefährlichkeit von brennbaren Stäuben unerlässlich. Durch wissenschaftliche Grundlagenforschung in den 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden die Einflussgrößen der Mindestzündenergie eingehend erforscht. Diese Forschungen sowie die Entwicklung immer genauerer Testapparaturen in den letzten 20 Jahren trugen dazu bei, die Mindestzündenergie immer besser bestimmen zu können. Dank genormter Messverfahren ist es heute ohne Probleme möglich Messergebnisse reproduzierbar zu ermitteln.

Die Mindestzündenergie wird häufig zur Durchführung der Explosionsschutzmaßnahme „Vermeidung wirksamer Zündquellen“ herangezogen. Dabei wird versucht, alle Energien zu verhindern, welche ausreichen, um ein mögliches Staub/Luft-Gemisch zu entzünden. Zur Anwendung dieser Maßnahme ist die Kenntnis der Mindestzündenergie des Staub/Luft-Gemisches notwendig. Ausschlaggebend ist dabei die kleinste Mindestzündenergie der vorhandenen Stäube. In der Praxis treten Stäube in reiner Form jedoch eher selten auf. Häufiger sind Gemische aus verschiedenen Stäuben anzutreffen. Untersuchungen zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Staubgemischen sind bisher nicht bekannt.

Diese Arbeit soll zur Entwicklung einer Formel beitragen, die es ermöglicht aus der Kenntnis des Mischungsverhältnisses einer Staubbmischung sowie der einzelnen Mindestzündenergien der beteiligten Stäube, die Mindestzündenergie des Staubgemisches zu bestimmen.

Abstract

The minimum is essential as a safety parameter for the assessment of hazards of combustible dusts. Through basic scientific research in the 70ies and 80ies of the last century, the influence of the minimum sizes have been thoroughly investigated. This research and the development of more accurate testing equipments in the last 20 years helped to determine the minimum ignition always better. Thanks to standardized measurement methods is to determine today without any problems reproducible measurement results.

The minimum is often „avoid effective ignition sources“ used to carry the explosion protection measure. It will seek to prevent all energies that are sufficient to ignite a possible dust / air mixture. To apply this measure knowledge of the minimum of the dust/air-mixture is necessary. The crucial factor is the smallest minimum ignition of the existing dust. In practice, however, dusts in pure form rarely occurs. More common are mixtures encountered in various dusts. Investigations to determine the minimum ignition energy of dust mixtures are not yet known.

This work will help to develop a formula that allows , from the knowledge of the mixing ratio of a dust mixture and the individual minimum ignition energies of dust involved to determine the minimum ignition energy of dust mixture.

Inhaltsverzeichnis

1	Mindestzündenergie	2
1.1	Bedeutung der Mindestzündenergie von Stäuben	2
1.2	Definitionen aus der Literatur	6
1.3	Einflussgrößen der Mindestzündenergie	8
1.3.1	Standardisierbare Einflussgrößen	9
1.3.2	Nicht standardisierbare Einflussgrößen	13
1.4	Definition Mindestzündenergie	19
2	Voruntersuchungen	20
2.1	Zündung	21
2.1.1	Zündung hoher Heftigkeit	23
2.1.2	Zündung mittlerer Heftigkeit	23
2.1.3	Zündung geringer Heftigkeit	23
2.1.4	Zündung sehr geringer Heftigkeit	23
2.1.5	Flammenreaktion ohne Zündung	24
2.1.6	Flammenerscheinung zwischen den Elektroden	24
2.2	Nichtzündung	24
2.2.1	Versuchsanzahl	28
2.3	Undichtigkeiten am Hartmann-Rohr	29
2.4	Datenauswertung	30
2.5	Koronaentladung	30
2.6	Elektrodenabstand	31
2.7	Druckstoß zur Staubaufwirbelung	32
2.8	Einstellungen einer gewünschten Spannung	33
2.9	Zündverzugszeit	33
3	Durchgeführte Experimente	35
3.1	Umsetzung der Versuche	35
3.2	Ergebnisse	36
3.3	Fehlerabschätzung	38
4	Bedienungsanleitung (MIE III)	39
4.1	Gültigkeit	39
4.2	Funktionserklärung der Geräte	39
4.2.1	MIE III	39
4.2.2	Flachschreiber	41
4.2.3	004 MIE Dispersion mit modifiziertem Hartmann-Rohr	42

4.3	Bedienung	43
4.3.1	Vor dem Experiment	43
4.3.2	Einstellung einer gewünschten Energie	45
4.3.3	Einstellungen am Flachsreiber	48
4.3.4	Anpassen des Elektrodenabstandes	49
4.3.5	Erzeugung kleiner Energien	49
4.3.6	Versuchsdurchführung	50
4.3.7	Mögliche Fehler und Lösungen	53
5	Zusammenfassung	55
5.1	Versuchsauswertung	55
5.2	Ausblick	56
5.2.1	Hinweise zu zukünftigen Untersuchungen der Mindestzündenergie von Staubgemischen	56
5.2.2	Stochastische Berechnung der Mindestzündenergie	57
	Anhang	i
A	Anhang Zündungen und Flammerscheinungen	i
B	Anhang Eintrittswahrscheinlichkeit einer Nichtzündung	viii
C	Anhang Mailverkehr / Stellungnahme Chilworth	x
D	Anhang Protokolle Versuchsergebnisse	xiv
E	Anhang Fehlerermittlung	xix

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung	Abschnitt
MZE	mJ	Mindestzündenergie	1.1
E_1	mJ	größte ermittelte Energie, bei der keine Zündung erfolgt	1.1
E_2	mJ	kleinste ermittelte Energie, bei der eine Zündung möglich ist	1.1
α		Anteil des Zugemischten Staubes	1.1
λ		Korrekturfaktor	1.1
C	g/m ³	Konzentration des Staubes in Luft	1.3.2
m_{HR}	g	Masse des Staubes im Hartmann-Rohr	1.3.2
V_{HR}	m ³	Volumen des Hartmann-Rohres	1.3.2
T	°C, K	Temperatur	1.3.2
c		Konzentration	1.3.2
ρ	kg/m ³	Dichte	1.3.2
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Staubes	1.3.2
T_{Fl}	°C	Grenzwert der adiabaten Flammentemperatur	1.3.2
d	m	Durchmesser eines Staubteilchens	1.3.2
M	m	Medianwert	1.3.2
$P(k p, n)$		Wahrscheinlichkeit einer Binominalverteilung	2.2
p		Einzelwahrscheinlichkeit eines Ereignisses	2.2
n		Anzahl der Versuche	2.2
k		Anzahl der positiven Ereignissen	2.2
p_{nz}		Häufigkeit welche beschreibt das es nicht zu einer Zündung kommt	2.2
p_z		Zündhäufigkeit	2.2
m_{H_2O}	g	Masse von Wassers	3.2
m_{vor}	g	Masse des Staubes vor Erhitzen	3.2
m_{nach}	g	Masse des Staubes nach Erhitzen	3.2
E	J	Energie	4.3.2
C	F	Kapazität	4.3.2
U	V	Spannung	4.3.2
P_{NZ}		Eintrittswahrscheinlichkeit einer Nichtzündung	5.2.2

1 Mindestzündenergie

1.1 Bedeutung der Mindestzündenergie von Stäuben

Staubexplosionen werden seit mehreren hundert Jahren beschrieben. Erst seit dem 19. Jahrhundert ist jedoch bekannt, dass Explosionen durch Stäube hervorgerufen werden können. Zunächst glaubte man nicht an die Explosionsfähigkeit von Stäuben und suchte nach einem Brenngas als Explosionsursache [1]. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts wurden systematische Untersuchungen über das Zündverhalten von Stäuben im Labor durchgeführt. Ziel war, die Ermittlung sicherheitstechnischer Kenngrößen und die Gefährlichkeit von Staub/Luft-Gemischen besser bestimmen, beschreiben und einschätzen zu können. Dabei wurde zunächst versucht, die Explosionsgefährlichkeit eines Staubes über das Flammenbild zu bestimmen, welches bei der Zündung einer Staubwolke durch eine Gasflamme entsteht [2]. Später kristallisierte sich jedoch die Mindestzündenergie als besseres Bewertungskriterium heraus. Die Mindestzündenergie wird dabei stets als Intervall angegeben.

$$E_1 < MZE < E_2 \quad (1.1)$$

MZE = Mindestzündenergie [mJ]

E_1 = größte ermittelte Energie, bei der keine Zündung erfolgt [mJ]

E_2 = kleinste ermittelte Energie, bei der eine Zündung möglich ist [mJ]

Gab es zu Beginn noch keine klaren Regelungen zum Bestimmungsverfahren der Mindestzündenergie, erkannte *Bussenius*, dass die Mindestzündenergie von dem Prüfverfahren und der verwendeten Apparatur abhängig ist [3]. Zunächst wurden daher die Einflussgrößen der Mindestzündenergie näher untersucht. Dazu lieferten unter anderen *Glarner* und *Kalkert* wertvolle Beiträge [1][4]. *Berthold* konnte unter Einbeziehung eigener Beobachtungen erstmals eine Richtlinie zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen vorstellen [5][6]. Diese Richtlinie, zur Bestimmung der Mindestzündenergie, wurde später international anerkannt [7]. Durch die Entwicklung neuerer Apparaturen (z. B. der MIKE3 Versuchsapparatur der Kühner AG) gelang es den Aufwand, welcher mit der Bestimmung der Mindestzündenergie verbunden war, immer weiter zu reduzieren. Eine notwendige Berücksichtigung schwer zu beeinflussender Einflussgrößen, wie die Zündverzugszeit, war somit immer einfacher möglich [7]. Durch die erwähnten Weiterentwicklungen der Versuchsverfahren, wurde eine Anpassung der entsprechenden Richtlinie notwendig. Dies führte zur aktuell gültigen DIN EN 13821.

Zunächst gelangte man zu der Überzeugung, dass Staub/Luft-Gemische eine wesentlich höhere Mindestzündenergie aufweisen als Gas/Luft-Gemische. *Schäfer* beschreibt eine Faustregel, nach der die Mindestzündenergie von Stäuben um das Hundert bis Tausendfache höher liegt als die von Gasen [8]. *Busse* ordnet die Mindestzündenergie von Stäuben (bis auf Metallstäube, roten Phosphor und Sprengstoffe) sogar ausschließlich in den Bereich von 10 mJ bis 100 mJ ein [3]. Spätere Untersuchungen zeigten, dass die Mindestzündenergie von Stäuben wesentlich niedriger liegt, als zunächst angenommen. So wurde die Mindestzündenergie von Gas/Luft-Gemischen in den Bereich von 0,1 mJ bis 0,01 mJ eingeordnet und festgestellt, dass der Wert der Mindestzündenergie von Stäuben nur um ein vielfaches höher liegt, als der Wert der Mindestzündenergie von Gasen [4]. Später wurde festgestellt, dass die Mindestzündenergien von Stäuben im Bereich von 1 mJ oder darunter liegen können [9]. Es konnte somit nachgewiesen werden, dass die Mindestzündenergie von Stäuben, unter bestimmten Umständen, nur unwesentlich höher als die Mindestzündenergie von Gasen sein kann.

Die Mindestzündenergie von Stäuben wird heute vorrangig zur Beurteilung der Zündwirksamkeit von Funken erzeugenden Zündquellen in Staub/Luft-Gemischen herangezogen. Dabei wird zwischen elektrisch erzeugten Funken und mechanisch erzeugten Funken unterschieden. Elektrisch erzeugte Funken können durch kapazitive, induktive oder elektrostatische Beeinflussung entstehen und treten als Büschel-, Schüttkegel-, Gleitstielbüschel- oder Funkenentladung auf [3][7]. Mechanisch erzeugte Funken unterscheiden sich in Schlag-, Schleif-, oder Reibfunken. Die Beurteilung der Zündwirksamkeit von Zündquellen kann dabei über die Äquivalentenergien erfolgen. Dabei wird für jede Zündquelle die entsprechend freigesetzte Energie ermittelt, die so genannte Äquivalentenergie.

Ist die Mindestzündenergie eines Staubes kleiner als die Äquivalentenergie eines elektrisch erzeugten Funkens, kann das Staub/Luft-Gemisch von der Zündquelle zur Entzündung gebracht werden. In Abbildung 1.1 sind die Äquivalentenergien für drei typische elektrische Zündquellen dargestellt.

Untersuchungen von *Bartknecht* und *Siwek* ergaben, dass die Gefährlichkeit von mechanisch erzeugten Funken für Staub/Luft-Gemische jahrelang überschätzt wurde [7][10]. Zudem ist die Mindestzündenergie zur Beurteilung mechanisch erzeugter Funken als Zündquelle von Staub/Luft-Gemischen allein nicht ausreichend. Durch die hohe Temperatur, von mechanisch erzeugten Funken, ist zur Beurteilung der Gefährlichkeit derselben, zusätzlich zur Kenntnis der Mindestzündenergie, die Kenntnis der Zündtemperatur (T_Z) des Staubes nötig. In Abbildung 1.2 ist dies für ausgewählte Arten von mechanisch erzeugten Funken dargestellt. Liegt das Wertepaar, bestehend aus der Mindestzündenergie und Zündtemperatur, unterhalb der entsprechenden Geraden, besteht die Gefahr einer Staubexplosion. Oberhalb der Geraden ist dies nicht der Fall.

Eine niedrige Mindestzündenergie ist, im Bereich des Explosionsschutzes, mit höheren Kosten verbunden als eine hohe Mindestzündenergie. Da bisher Untersuchungen zur Mindestzündenergie lediglich an Reinstoffen durchgeführt wurden, wird zur Beurteilung von Staubgemischen die niedrigste Mindestzündenergie des im Gemisch enthaltenen Reinstoffes herangezogen. Die eigentliche Mindestzündenergie des Staubgemisches könnte jedoch höher liegen. Demzufolge könnten Kosten entstehen, welche eingespart werden könnten,

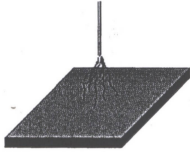
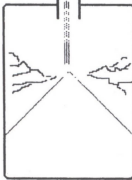

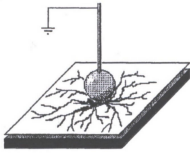
Entladungsart	elektrische Äquivalentenergie E_{Ae}
Büschel-Entladung 	3 mJ
Schüttkegel-Entladung 	1 J
Funken-Entladung 	10 J
Gleitstielbüschel-Entladung 	1 J

Abbildung 1.1: Elektrische Äquivalentenergien für typische Zündquellen von Staubexplosionen [7].

wenn die genaue Mindestzündenergie von Staubgemischen bekannt wäre. Die experimentelle Bestimmung aller Staubgemische ist jedoch ein unrealistisches Vorhaben.

Diese Arbeit soll dazu beitragen, die Berechenbarkeit der Mindestzündenergie von Staubgemischen zu ermöglichen. Ziel dabei ist es, die Mindestzündenergie eines Staubgemisches, bei Kenntnis der Mindestzündenergie der Reinstoffe sowie des Mischungsverhältnisses, zu berechnen. Idealerweise sollte dies nach Formel 1.2 erfolgen.

$$MZE_{Gemisch} = (\alpha MZE_1 + (1 - \alpha) MZE_2) \lambda \quad (1.2)$$

$MZE_{Gemisch}$ = Mindestzündenergie des Staubgemisches [mJ]

MZE_1 = Mindestzündenergie Staub 1 [mJ]

MZE_2 = Mindestzündenergie Staub 2 [mJ]

α = Anteil des Zugemischten Staub

λ = Korrekturfaktor

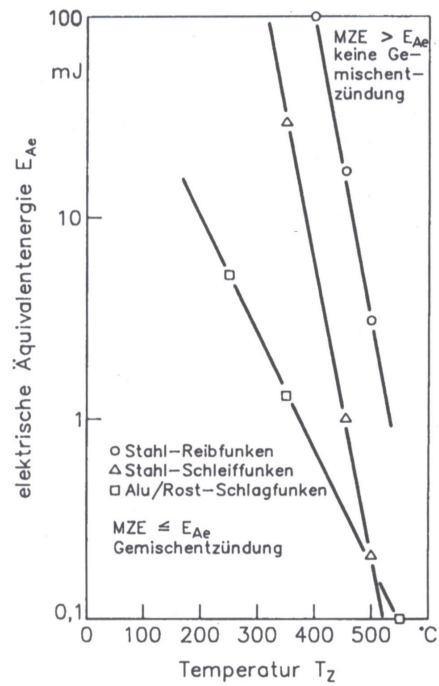


Abbildung 1.2: Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken [7].

Dabei wird die Annahme zugrunde gelegt, dass sich die Mindestzündenergie eines Staubgemisches innerhalb eines Bereiches bewegt, dessen Grenzen die Mindestzündenergien der am Gemisch beteiligten Reinstoffe bilden.

1.2 Definitionen aus der Literatur

In der Fachliteratur sind verschiedene Definitionen für die Mindestzündenergie von Stäuben zu finden. Im Folgenden werden einige Definitionen der Mindestzündenergie in chronologischer Reihenfolge aufgeführt. Dabei wurden ausschließlich Definitionen der Mindestzündenergie berücksichtigt, welche sich auf Staub/Luft-Gemische beziehen.

In seiner Dissertation hat *Kalkert* die Mindestzündenergie folgendermaßen definiert:

„Die kapazitive Mindestzündenergie ist definiert als die kleinstmögliche bei einer Entladung eines Kondensators verfügbare elektrische Gesamtenergie, die bei Variation von Ladung und Kapazität des Entladungskreises und von Abstand, Form und Material der Elektroden sowie bei Variation der Konzentration des Gemisches- das sogenannte zündwilligste Gemisch gerade noch entzündet.“ [4]

Im selben Jahr wurde vom Autorenkollektiv um *Bussenius* die Mindestzündenergie als die

„...minimale Energie, die einem brennbaren Stoff zugeführt werden muß, damit er sich an der Luft entzündet“ [3]

beschrieben.

Glärner dagegen definiert die Mindestzündenergie, in unterschiedlichen Schriften, ausschließlich über die Art ihrer Ermittlung [1][11]. Er beschreibt sie als Kondensatorentladungsenergie bei welcher, durch Energiehalbierung und Variation der Konzentration, der Energiewert ermittelt wird, bei dem keine Staubexplosion mehr eintritt. Dabei ist lediglich die Anzahl der notwendigen Versuche, bei denen es nicht zu einer Explosion kommen darf, in [1] und [11] verschieden. *Glärner* unterscheidet dabei die Mindestzündenergie, welche sich auf jede beliebige Staubkonzentration bezieht und die minimale Mindestzündenergie, welche das zündfreudigste Gemisch beschreibt.

Im Lexikon Brandschutz von 1986 wird die Mindestzündenergie definiert als

„Kleinstmögliche Energiemenge, die das zündwilligste Gemisch [...] gerade noch zündet.“ [12]

Zusätzlich werden die Versuchsbedingungen mit 20 °C und 0,1 MPa angegeben.

In dem von *Berthold* verfassten und später international übernommenen VDI-Fortschrittsbericht ist folgende Definition zu finden:

„Als Mindestzündenergie [...] gilt der [...] niedrigste Wert der kapazitiv gespeicherten Energie, die bei der Entladung über eine Funkenstrecke ausreicht, das zündwilligste Gemisch aus Staub und Luft bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur eben noch zu zünden.“ [6]

Selbige Definition verfasste *Berthold* bereits einige Jahre früher [5].

In der Richtlinie „Statische Elektrizität“ wird die Mindestzündenergie als die

„...kleinste in einem Kondensator gespeicherte elektrische Energie, die bei der Entladung über eine Funkenstrecke ausreicht, das zündwilligste Gemisch [...] bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur zu entzünden“ [13]

definiert.

Barthknecht und *Siwek* kommen zu folgender Festlegung:

“Die Mindestzündenergie (MZE) [...] ist definiert als der niedrigste Wert der kapazitiv gespeicherten Energie, die bei der Entladung über eine Funkenstrecke ausreicht, das zündwilligste Gemisch [...] bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur eben noch zu entzünden.“ [7]

In der aktuellen, in Deutschland und Europa anerkannten, Norm zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen (DIN EN 13821) wird die Mindestzündenergie beschrieben als die

„... unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte niedrigste, in einem Kondensator gespeicherte elektrische Energie, die bei Entladung gerade noch ausreicht, das zündwilligste Gemisch eines vorgegebenen Staubes zu entzünden.“ [14]

Die Versuchsbedingungen werden anschließend mit Temperaturen im Bereich von 20 °C bis 25 °C und einem Umgebungsdruck von 0,8 bar bis 1,1 bar festgelegt.

Im Handbuch, zu der von der Kühner AG konstruierten MIKE 3 Apparatur, zur Bestimmung der Mindestzündenergie, versteht man unter der

“... Mindestzündenergie [...] den niedrigsten Energiewert, den eine Hochspannungskondensatorentladung aufbringen muss, um das zündwilligste Staub/Luft-Gemisch zur Entzündung zu bringen.“ [15]

Auch hier wird an anderer Stelle darauf verwiesen, dass die Versuche bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur durchzuführen sind.

Es überrascht nicht, dass sich die Definitionen in vielen Bereichen ähneln. Dennoch fällt auf, dass vor allem Definitionen, welche nach 1983 erstellt wurden, einen Bezug zu den Versuchsbedingungen herstellen. Dies ist wahrscheinlich auf den Erkenntnisgewinn langjähriger Forschungsarbeit im Bereich der verschiedenen Einflussgrößen der Mindestzündenergie zurückzuführen.

Unterschiede in der Definition sind bezüglich der Art einer Zündung vorhanden. Während *Glärner* die Mindestzündenergie als die Energie definiert, bei der es zu einer Staubexplosion kommt, ist in allen anderen Quellen nur von einer Zündung bzw. einer gerade noch Zündung des Staub/Luft-Gemisches die Rede.

Einigkeit hingegen herrscht bei der Aussage, dass die Mindestzündenergie bei der Konzentration des zündwilligsten Gemisches zu suchen ist.

Aus den angeführten Definitionen geht nicht hervor, dass in der entsprechenden Fachliteratur bezüglich der Anzahl der notwendigen Versuche, welche zur Bestimmung der Mindestzündenergie notwendig sind, sehr unterschiedliche Aussagen zu finden sind. Wird betrachtet, dass:

- sich die Zündwahrscheinlichkeit mit abnehmender Zündenergie verringert (Abbildung 1.3),
- die Mindestzündenergie ermittelt wird, in dem die Zündenergie reduziert wird und
- als erreicht gilt, wenn am zündwilligsten Gemisch eine Folge von mehreren Nichtzündungen auftritt,

ist klar, weshalb eine Diskussion über die genaue Anzahl der Nichtzündungen notwendig ist (siehe dazu Abschnitt 2.2).

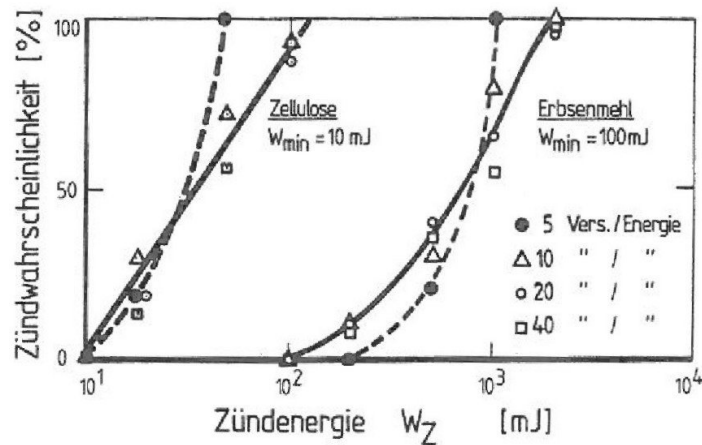


Abbildung 1.3: Zündwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Zündenergie [6].

Bevor versucht wird, eine allgemein gültige Definitionen zu finden, sollen die Einflussgrößen der Mindestzündenergie betrachtet werden.

1.3 Einflussgrößen der Mindestzündenergie

Bei der Bestimmung der Mindestzündenergie gibt es diverse Einflussgrößen, welche auf das Ergebnis der experimentellen Untersuchung einwirken. Die Einflussgrößen der Mindestzündenergie lassen sich dabei in standardisierbare und nicht standardisierbare Einflussgrößen unterteilen.

1.3.1 Standardisierbare Einflussgrößen

Werden bei allen Stäuben innerhalb eines bestimmten Bereiches oder bei einem bestimmten Wert einer Einflussgröße Minimalwerte der Mindestzündenergie erreicht, ist diese Einflussgröße standardisierbar. Ist dieser Wert oder Bereich einmal bestimmt, kann er bei allen Stäuben zur Bestimmung der Mindestzündenergie angewendet werden. Diese Art von Einflussgrößen kann in allgemeingültigen Richtlinien festgehalten und als Versuchsbedingung vorgeschrieben werden.

Elektroden und Elektrodenabstand

Die bei der Funkenerzeugung verwendeten Elektroden sowie der eingestellte Elektrodenabstand haben einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Mindestzündenergie. Dabei haben sowohl das verwendete Material als auch die Form der Elektroden Auswirkung auf das Ergebnis.

Forschungen ergaben, dass mit abnehmenden Elektrodenabstand die ermittelte Mindestzündenergie steigt [1][6]. Aus Abbildung 1.4 ist zu erkennen, dass sich die Mindestzündenergie ab einem Elektrodenabstand von ca. 6 mm einem konstanten Wert annähert.

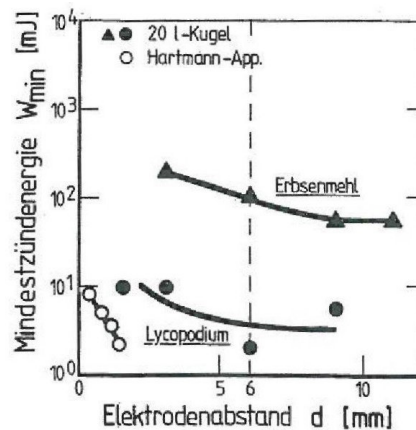


Abbildung 1.4: Einfluss des Elektrodenabstandes auf die Mindestzündenergie [6].

Der Elektrodendurchmesser hat zwar keinen Einfluss auf die Mindestzündenergie, jedoch erhebliche Auswirkungen auf die Zündhäufigkeit (Abbildung 1.5). Wie bereits in Abschnitt 1.2 erwähnt, sinkt durch die Reduzierung der Zündenergie auch die Zündwahrscheinlichkeit (Abbildung 1.3). Wird die Zündwahrscheinlichkeit nun durch den Elektrodendurchmesser zusätzlich reduziert, kann dies zu Nichtzündungen führen, obwohl die Mindestzündenergie noch nicht erreicht ist.

Mindestwerte der Mindestzündenergie werden mit spitzen Elektroden erreicht [6]. *Bartknecht* und *Siwek* haben bei gemeinsamen Versuchen mit der MIKE 3 Versuchsapparatur der Kühner AG beobachtet, dass es bei der Annäherung der (spitzen) Elektroden zu Koronaentladungen kommt [7]. Dies wurde vom Autor auch bei kleinen Elektrodenabständen,

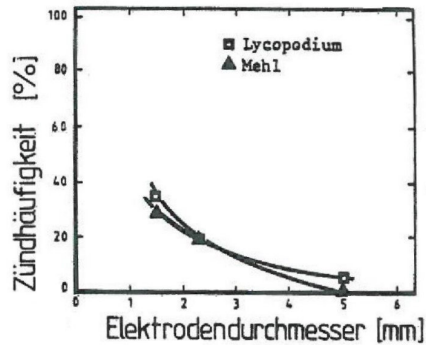


Abbildung 1.5: Einfluss des Elektrodenabstandes auf die Zündhäufigkeit [6].

mit der MIE III Versuchsapparatur der Firma Chilworth, beobachtet. Durch die Wahl der Funkenauslösung, mittels einer Initialzündung oder Relais, können die Koronaentladungen in der MIKE 3 Versuchsapparatur verhindert werden [15][7]. Die Koronaentladung kann auch durch die Verwendung runder Elektroden weitestgehend vermieden werden [7]. Dies ist jedoch nur der Fall, wenn die Elektroden nicht verschmutzt sind. Da auch die Reinheit der Elektroden die Zündhäufigkeit beeinflusst [6], sollte bei der Versuchsdurchführung die Elektrodenreinheit einen hohen Stellenwert einnehmen.

Auch das Material der Elektroden beeinflusst die Mindestzündenergie [1]. Nach *Bertold* ist dieser Einfluss jedoch von nicht nennenswerter Größe [6].

Es ist ersichtlich, dass sich der Einfluss des Elektrodenabstandes und des Elektrodendurchmessers durch die Festlegung konkreter Werte standardisieren lässt. In den gängigen Normen wurde der Elektrodenabstand daher auf 6 mm und der Elektrodendurchmesser auf 2 mm festgelegt [6][14][15].

Induktivität

Die Zündfähigkeit von Stäuben ist nach Untersuchungen von *Kalkert* [4] abhängig von der Entladungszeit der einzelnen Funken. Eine Verbesserung der Zündfähigkeit könne demnach durch eine Verlängerung der Funkenentladezeit erreicht werden. Die optimale Entladezeit liege dabei zwischen 0,1 ms und 1 ms.

Zusätzlich wurde von *Eckhoff* beobachtet, dass Funken bei hohen Spannungen den Staub vor sich herschieben. Somit entsteht zwischen den Elektroden eine staubfreie Zone, die dazu führt, dass eine Zündung des Staub/Luft-Gemisches nicht erfolgt. Laut *Eckhoff* kann ein „Wegschieben“ des Staubes durch die zeitliche Verlängerung der Funken verhindert werden [16].

Mithilfe der Induktivität wird die Entladungszeit der Funken zeitlich gedehnt [1][6][17]. Somit wird durch das Zuschalten einer Induktivität die Entladezeit der Funken verlängert und ein Wegblasen des Staubes verhindert. Eine bessere Zündung der Staub/Luft-Gemische sowie eine niedrigere Mindestzündenergie ist die Folge.

Da die Mindestzündenergie für eine zugeschaltete Induktivität von 1 mH bis 2 mH überwiegend konstant minimale Werte annimmt (Abbildung 1.6), sollte sich die tatsächlich verwendete Induktivität in diesem Bereich befinden. Dieser Sachverhalt wurde daher in der aktuellen Norm übernommen [14].

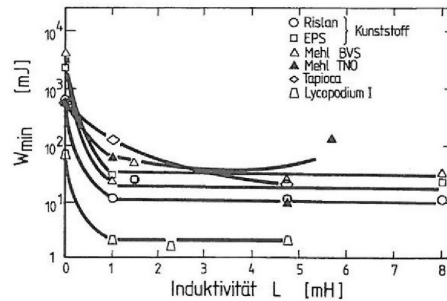


Abbildung 1.6: Einfluss der Induktivität auf die Mindestzündenergie [6].

Jedoch reagieren nicht alle Stäube mit einer verbesserten Zündfähigkeit auf das Zuschalten einer Induktivität [6]. Im allgemeinen sind, durch eine zugeschaltete Induktivität, keine erhöhten Mindestzündenergien gemessen worden. Eine Variation der Induktivität zur Bestimmung der Mindestzündenergie ist daher nicht notwendig. Ein generelles Zuschalten der Induktivität kann empfohlen werden.

Umgebungsdruck

Eine Beeinflussung der Mindestzündenergie durch den Vordruck im Prüfbehälter wurde bisher nur bei sehr niedrigen Drücken beobachtet [1]. Bei Drücken unter 1 bar sinkt die zündwilligste Staubkonzentration, die Mindestzündenergie jedoch steigt (Abbildung 1.7).

Da die Mindestzündenergie für Drücke über 1 bar konstant niedrige Werte annimmt, kann davon ausgegangen werden, dass für die allgemeine Praxis eine Bestimmung der Mindestzündenergie bei Atmosphärendruck ausreicht.

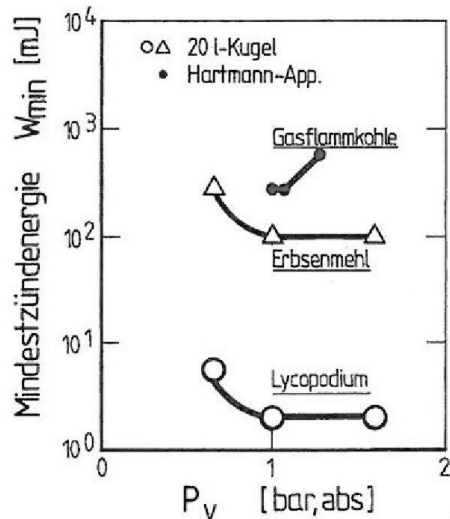


Abbildung 1.7: Druckbeeinflussung der Mindestzündenergie [6].

Feuchte

Lange war man der Ansicht, dass ein Feuchtigkeitsgehalt von wenigen Masse-Prozent in Stäuben eine Staubexplosion verhindert. *Glärner* konnte im Rahmen seiner Arbeit nachweisen, dass die Produktfeuchte mindestens 50 % (Masseprozent) betragen muss, um diese Eigenschaft zu erfüllen [1]. Untersuchungen von *Zeeuwen* und *Laar* zeigten, dass der Einfluss der Produktfeuchte auf die Mindestzündenergie unterhalb von 5 % (Masseprozent) gering ist (Abbildung 1.8) [18] [15].

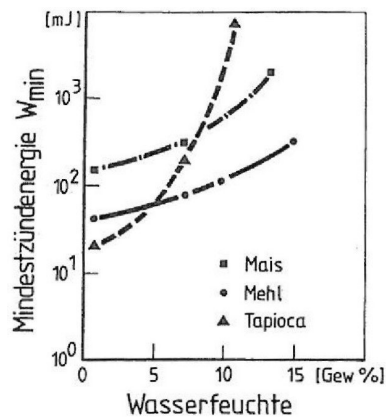


Abbildung 1.8: Einfluss der Feuchte auf die Mindestzündenergie [6].

Beträgt die Produktfeuchte mehr als 5 % (Masseprozent), muss die Feuchte durch Trocknung des Staubes reduziert werden. Da unterhalb einer Produktfeuchte von 5 % (Masseprozent) Minimalwerte erreicht werden, ist eine Variation der Produktfeuchte zur

Bestimmung der Mindestzündenergie nicht nötig, wenn der genannte Grenzwert eingehalten wird.

1.3.2 Nicht standardisierbare Einflussgrößen

Nicht standardisierbare Einflussgrößen sind staubspezifisch. Es lassen sich bei diesen Einflussgrößen keine allgemeingültigen Werte oder Bereiche festlegen, innerhalb derer Minimalwerte der Mindestzündenergie, erreicht werden. Es ist daher bei der experimentellen Bestimmung der Mindestzündenergie notwendig, nicht standardisierbare Einflussgrößen solange zu variieren, bis die tatsächliche Mindestzündenergie erreicht ist. Dabei ist ein durchdachtes und strukturiertes Vorgehen empfehlenswert. Nicht standardisierbare Einflussgrößen sollten daher in der Definition der Mindestzündenergie gesondert erwähnt werden.

Konzentration

Abbildung 1.9 zeigt den Zusammenhang von Zündenergie und Konzentration. Das Minimum der Kurve stellt dabei die Mindestzündenergie dar. Der genaue Verlauf der Kurve ist für jeden Staub unterschiedlich und konnte bisher nur durch Experimente ermittelt werden. Um das Minimum dieser Kurve - und damit die Mindestzündenergie - experimentell zu bestimmen, muss die Konzentration des Staubes und die verwendete Zündenergie systematisch variiert werden. Die Konzentration errechnet sich dabei nach Formel 1.3.

$$C = \frac{m_{HR}}{V_{HR}} \quad (1.3)$$

C = Konzentration des Staubes in Luft [g/m³]

m_{HR} = Masse des Staubes im Hartmann-Rohr [g]

V_{HR} = Volumen des Hartmann-Rohres [m³]

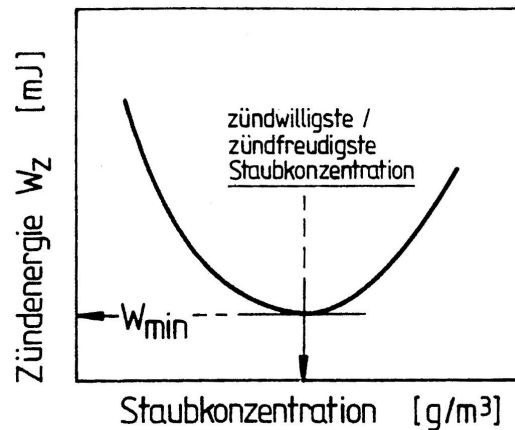


Abbildung 1.9: Einfluss der Staubkonzentration auf die Mindestzündenergie [6].

Turbulenz

Ohne näher darauf einzugehen, stellte *Bussenius* zunächst fest, dass mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit eines Staub/Luft-Gemisches die Mindestzündenergie abnimmt [3]. Spätere Untersuchungen von *Glärner* führten zu dem Ergebnis, dass die Intensität der Turbulenz einen maßgeblichen Einfluss auf die Mindestzündenergie hat [1]. So wurden in allen Versuchen Mindestwerte bei ruhenden Gemischen (Gemische mit einer niedrigen Turbulenzintensität) gemessen [1][5].

Als Maß für die Intensität der Turbulenz wurde die Zündverzugszeit (t_v) eingeführt [1][6]. Die Turbulenz an sich ist jedoch keine physikalisch messbare Größe. Über die Turbulenz des Staub/Luft-Gemisches während eines Versuches können daher keine konkreten Angaben gemacht werden. Die von *Bartknecht* und *Glärner* beschriebene Turbulenz kann daher nur ein Verwirbelungsphänomen sein. Es ist allerdings richtig, dass Verwirbelungen mit der Zeit abnehmen. Die Einführung der Zündverzugszeit als Einflussgröße ist die logische Konsequenz.

Glärner beobachtete, dass mit zunehmender Zündverzugszeit die Mindestzündenergie sinkt [1]. Schnell gelangte man zu der Erkenntnis, dass die optimale Zündverzugszeit für jeden Staub verschieden ist.

Das Finden der optimalen Zündverzugszeit ist nur durch permanente Variation derselben möglich [7]. Die Schwierigkeit dabei entsteht durch die verschiedenen Flugeigenschaften der Stäube. Die Zündung soll möglichst bei einem ruhenden und homogenen Gemisch erfolgen. Ist die Zündverzugszeit zu kurz, ist der Staub im Prüfgefäß nicht homogen verteilt. Ist die Zündverzugszeit zu lang, kommt es zur Fraktionierung des Staubes. Beides kann zu einer fehlerhaften (zu hohen) Messung der Mindestzündenergie führen. Zum Variieren der Zündverzugszeit ist eine automatische Synchronisation (bzw. eine Abstimmung) vom Aufwirbeln des Staubes und des Funkenüberschlages notwendig.

Die Angabe einer einheitlichen Zündverzugszeit, bei der für alle Stäube Minimalwerte der Mindestzündenergie zu erwarten sind, ist nicht möglich.

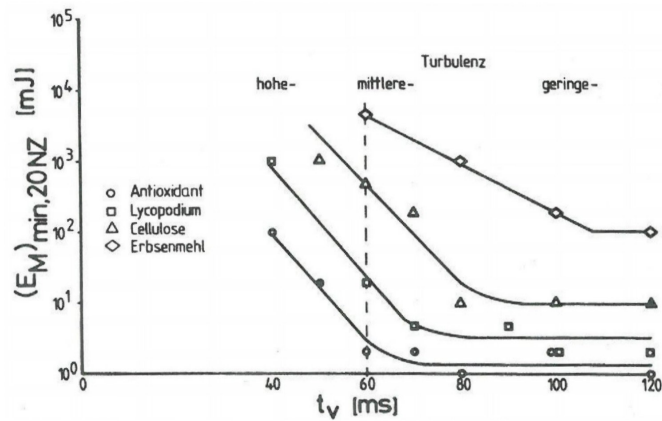


Abbildung 1.10: Einfluss der Turbulenz (Zündverzugszeit t_v) auf die Mindestzündenergie [1].

Sauerstoffkonzentration

Wird in Räumen mit verminderter Sauerstoffkonzentration mit brennbaren Stäuben gearbeitet, ist es notwendig, den Einfluss des Stickstoff-/Sauerstoffverhältnisses auf die Mindestzündenergie zu kennen. Auch hier hat *Glärner* wertvolle Versuche durchgeführt [1].

In Abbildung 1.11 ist zu erkennen, dass die Mindestzündenergie mit abnehmenden Sauerstoffanteil stark ansteigt, der Anstieg sich jedoch in Abhängigkeit von dem jeweiligen Stoff unterscheidet. Wie zu erwarten, verringert sich die Mindestzündenergie wenn das Sauerstoffniveau über das in der Atmosphäre vorhandene Maß steigt. Diese Erkenntnis überrascht nicht, da ähnliche Phänomene auch von anderen sicherheitstechnischen Kenngrößen (z. B. der unteren Explosionsgrenze) bekannt sind.

In der deutlich überwiegenden Mehrzahl aller Fälle, in denen die Mindestzündenergie zur Beurteilung einer Sachlage herangezogen wird, herrschen Normalbedingungen (ca. 21 % Sauerstoff und ca. 79 % Stickstoff). Eine Variation der Sauerstoffkonzentration ist daher nur in anfangs beschriebenen Ausnahmefällen notwendig.

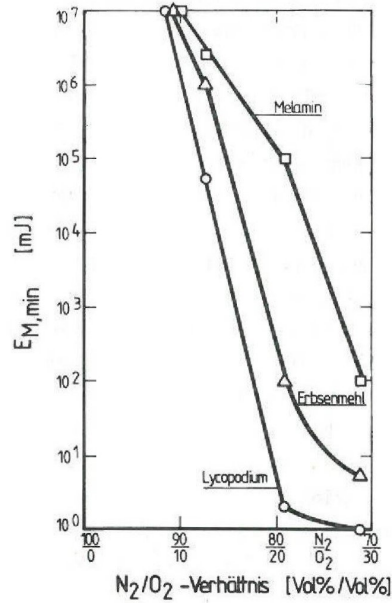


Abbildung 1.11: Einfluss des Stickstoff-/Sauerstoffverhältnisses auf die Mindestzündenergie [11].

Temperatur

Ausführliche Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf die Mindestzündenergie wurden erstmals von *Glärner* durchgeführt [1][11]. Dabei wurde festgestellt, dass mit zunehmender Umgebungstemperatur die Mindestzündenergie sinkt. *Glärner* kommt in seiner Arbeit zu dem Schluss, dass der Einfluss der Temperatur auf die Mindestzündenergie bei schwer entzündlichen Stäuben größer ist als bei leicht entzündlichen Stäuben. Zudem beobachtete er, dass bei steigender Temperatur die zündfreudigste Staubkonzentration sinkt. *Glärner* kommt zu dem Ergebnis, dass sich die Geraden aller Stoffe, welche im Diagramm die Verknüpfung von Mindestzündenergie und Temperatur für verschiedene Stäube darstellen, bei einer doppelt logarithmischen Darstellung in einem Punkt schneiden. Dieser Schnittpunkt wird bei einer Energie von 0,088 mJ und einer Temperatur von 1000 °C angegeben (Abbildung 1.13) [1][11]. Nach *Glärner* ist damit lediglich die Ermittlung der Mindestzündenergie bei Raumtemperatur nötig, um auf die Mindestzündenergie bei überhöhten Temperaturen zu schließen. Dazu müsse in einem doppelt logarithmischen Koordinatensystem von Temperatur und Mindestzündenergie, lediglich eine Gerade vom oben beschriebenen allgemeinen Schnittpunkt zu dem Punkt der Mindestzündenergie bei Raumtemperatur gezeichnet werden (siehe Abbildung 1.13) [1][11].

Rechnerisch lässt sich diese Beobachtung mit folgender Formel abschätzen [15]:

$$MZE(T) = 10^{-4,056+(1,873-0,624*\log(T))*(\log(MZE_{25\text{ °C}})+4,056)} \quad (1.4)$$

Diese Formel ist für den Bereich von 25 °C bis 300 °C gültig.

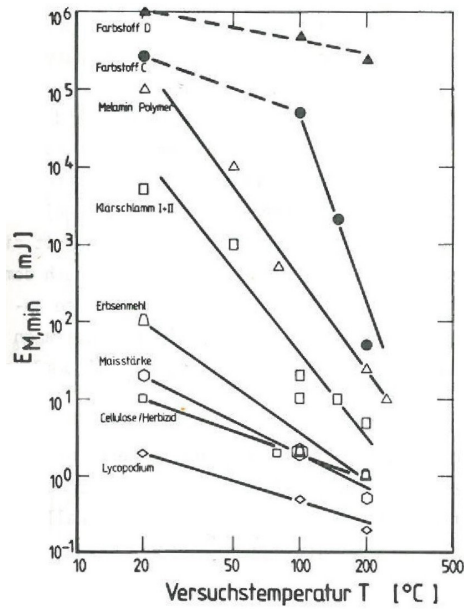


Abbildung 1.12: Einfluss der Temperatur auf die Mindestzündenergie [11].

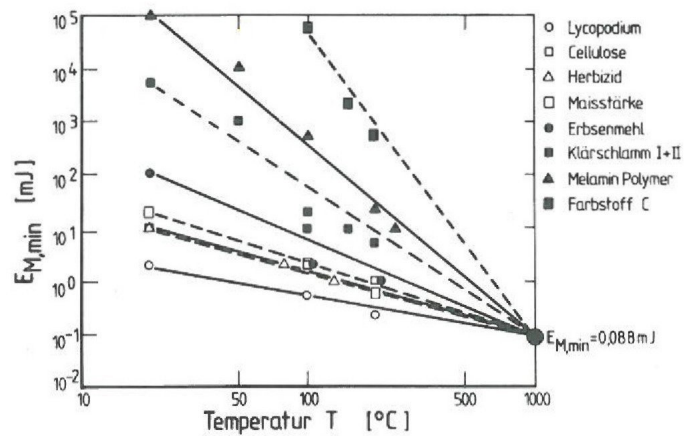


Abbildung 1.13: Abhängigkeit der Mindestzündenergie von der Temperatur verschiedener Stäube mit Darstellung des gemeinsamen Schnittpunktes [11].

Eine Variation der Temperatur zur Ermittlung von Niedrigstwerten der Mindestzündenergie ist demnach nicht erforderlich.

Partikelgröße

Die Größe der Partikel eines Staubes hat den größten Einfluss auf die Mindestzündenergie. Theoretische Untersuchungen von *Kalkert* führten zu einer Formel, mit welcher es theoretisch möglich ist, die Mindestzündenergie eines Staubes abzuschätzen [4].

$$W_0 = (4\Pi\kappa)^{\frac{3}{2}} \rho c \left[\frac{\ln 2}{12} \frac{\rho_{SCS}}{\lambda} \right]^{\frac{3}{2}} T_{Fl} d^3 \quad (1.5)$$

c = Konzentration

ρ = Dichte [kg/m³]

λ = Wärmeleitfähigkeit des Staubes [W/(m K)]

T_{Fl} = Grenzwert der adiabaten Flammentemperatur [°C]

d = Durchmesser eines Staubteilchens [m]

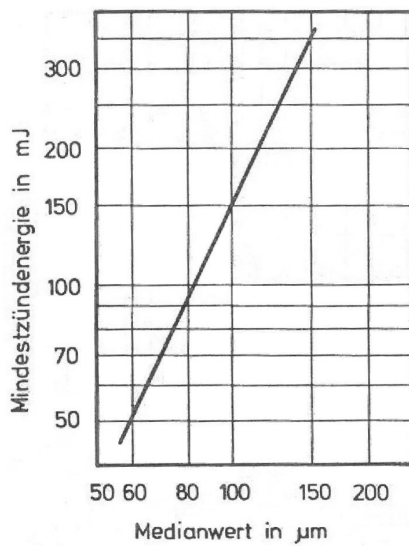
Der Formel liegen unter anderem die Modellannahme von kugelförmigen, immer gleich großen, Staubpartikeln sowie einer homogenen Verteilung der Staubteilchen in der Luft zugrunde. Die Anwendung der Formel ist daher nur sehr beschränkt möglich. Da *Kalkert* nicht alle Variablen und Indizes der Formel eindeutig benannte, wird die Anwendung der Formel zusätzlich erschwert. Die Verwendung der Formel ist zudem mit einem zusätzlichen Arbeitsaufwand verbunden da, zu deren Anwendung, neben der Bestimmung der Kornverteilung des Staubes, auch die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Grenzwertes der adiabaten Flammentemperatur sowie der Dichte notwendig ist.

Aus der abschätzenden Formel geht jedoch hervor, dass der Durchmesser eines Staubteilchens mit der dritten Potenz in die Berechnung der Mindestzündenergie eingeht. Dies zeigt den hohen Einfluss der Partikelgröße auf die Mindestzündenergie und wird von experimentellen Untersuchungen bestätigt (Abbildung 1.14). Ein Staub ist demnach umso entzündlicher, je feiner er ist.

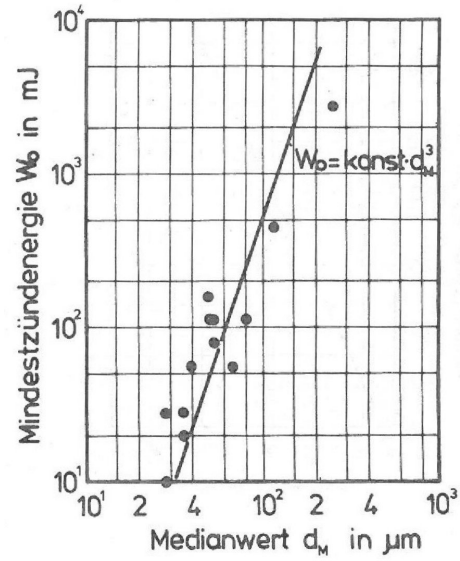
Es ist daher von elementarer Wichtigkeit bei der Angabe der Mindestzündenergie zumindest den Medianwert der Korngrößenverteilung des untersuchten Staubes anzugeben.

Ist die Mindestzündenergie (MZE) einer Staubfraktionen bekannt, lassen sich auch die Mindestzündenergien anderer Fraktionen des selben Staubes abschätzen. Dazu muss der Medianwert (M) der jeweiligen Staubfraktionen bekannt sein. Die Abschätzung erfolgt dabei rechnerisch mit folgender Formel [15]:

$$MZE_2 = MZE_1 + \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{2,5} \quad (1.6)$$



(a) Getreidestärke



(b) Polyäthylenstäube

Abbildung 1.14: Einfluss der Partikelgröße auf die Mindestzündenergie [4].

Index 1 steht dabei für die Fraktion mit bekannter Mindestzündenergie. Index 2 für die Fraktion, deren Mindestzündenergie abgeschätzt werden soll.

1.4 Definition Mindestzündenergie

Aus den in Abschnitt 1.2 vorhandenen Definitionen sowie den in Abschnitt 1.3 beschriebenen Einflussgrößen lässt sich die Mindestzündenergie für Stäube mit folgender Definition zusammenfassen.

Die Mindestzündenergie ist die kleinste, kapazitiv gespeicherte Energie, welche ausreicht, unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen, das möglichst homogen verteilte zündwilligste Gemisch eines Staubes, unter Variation der Zündverzugszeit bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur, eben noch zu entzünden.

2 Voruntersuchungen

Zur experimentellen Bestimmung der Mindestzündenergie stand die MIE III Versuchsvorrichtung der Firma Chilworth mit der Seriennummer 2012110036 zur Verfügung. Diese beinhaltet eine Einheit zur Energieerzeugung (siehe Abbildung 4.1) sowie eine Zerstäubereinheit mit modifiziertem Hartmann-Rohr (siehe Abbildung 4.3). Um die Mindestzündenergie später genau auswerten zu können, wird die an den Elektroden anliegende Spannung mittels des analogen Flachschräubers L 200 E der Firma Linseis (siehe Abbildung 4.2) aufgezeichnet.

Die an der Energieeinheit eingestellte Energie wird im Hartmann-Rohr als kontinuierliche Einzelfunkenentladung freigesetzt. Mittels einer Fernbedienung wird manuell ein Druckluftstoß ausgelöst, welcher den im Hartmann-Rohr befindlichen Staub aufwirbelt. Durch systematische Variation der Staubkonzentration und Energiereduzierung wird dabei die kleinste Energie ermittelt, welche ausreicht, um das Staub/Luft-Gemisch zu entzünden. Dabei wird die Mindestzündenergie (MZE) als Intervall angegeben. Die untere Grenze des Intervalls wird durch die Energie E_1 gebildet. Diese ist die Energie, bei der gerade keine Zündung des Staub/Luft-Gemisches mehr möglich ist. Die obere Grenze ist die Energie E_2 , welche ausreicht ein Staub/Luft-Gemisch gerade noch zu zünden.

$$E_1 < MZE < E_2$$

Die bisher vorhandene Bedienungsanleitung der MIE III Versuchsvorrichtung beschreibt ein Vorgehen, durch das entscheidende Einflussgrößen (z.B. Elektrodenabstand, Zündverzugszeit) der Mindestzündenergie nicht berücksichtigt werden. Zudem weist die standardmäßige Konstruktion der Zerstäubereinheit mit modifiziertem Hartmann-Rohr Mängel auf. Diese führen während der Versuche zu einem ungewollten und nicht kontrollierbaren Staubaustritt aus dem Hartmann-Rohr.

Da mit der vorhandenen Versuchsvorrichtung die Detektion einer Zündung nur optisch erfolgen kann, musste im Vorfeld geklärt werden, welche Flammerscheinung als Zündung gewertet werden kann und welche nicht. Auch der Begriff einer Nichtzündung musste genauer untersucht werden, da in der entsprechenden Fachliteratur teils widersprüchliche Angaben zu finden sind.

Zusätzlich wurde ein auf Excel basierendes Auswertungstool erstellt, welches die Durchführung und Auswertung der Messungen erheblich erleichtert (siehe Abschnitt 2.4).

Da bisher an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg jegliche Erfahrung im Umgang mit der verwendeten Versuchsvorrichtung fehlte, waren im Vorfeld der eigentlichen Experimente, umfangreiche Voruntersuchungen nötig. Durch diese, teils langwierigen Versuche wurden im Rahmen dieser Arbeit die Handhabung sowie die Grenzen der verwendeten Versuchsvorrichtung ermittelt.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurde eine neue Bedienungsanleitung erstellt (siehe Anhang 4). Mit dieser Bedienungsanleitung ist ein besseres wissenschaftliches Arbeiten möglich. Im Folgenden werden die durchgeführten Voruntersuchungen vorgestellt.

2.1 Zündung

In den Definitionen der Mindestzündenergie wird diese beschrieben als Energie, bei der es zur Zündung oder Explosion eines Staub/Luft-Gemisches kommt (Abschnitt 1.2). In der Fachliteratur herrscht keine Einigkeit darüber, was eine Zündung eigentlich ist oder ab wann man von einer Zündung bzw. einer Nichtzündung sprechen kann.

Einen guten Überblick über die Möglichkeiten zur Detektion einer Zündung ist in der Arbeit von *Kalkert* [4] zu finden. Demnach kann eine Zündung durch

- optische Beobachtung,
- Temperaturmessung und
- Druckmessung

ermittelt werden. Dabei wird die Druckmessung als das zuverlässigste Verfahren zur Detektion einer Zündung beschrieben. Die Temperaturmessung ist nach *Kalkert* nur bedingt zur Zündungskontrolle geeignet, da die Messfühler aufgrund ihrer Trägheit sowie der unvermeidbaren Strahlungsfehler nur ungenaue Messdaten liefern. Die optische Beobachtung sei ebenfalls nicht zuverlässig, da sie der Subjektivität des jeweiligen Operateurs unterliegt.

Im vorliegenden Fall wird zur Bestimmung der Mindestzündenergie das modifizierte Hartmann-Rohr¹ verwendet. Die Detektion einer Zündung mittels Temperaturmessung ist damit nicht möglich. Da die Druckmessung bei einem modifizierten Hartmann-Rohr jedoch nur über den Öffnungswinkel des Deckels und lediglich in drei Stufen erfolgt (Stufe 0: kein Druckanstieg, Stufe 1: deutlicher Druckanstieg, Stufe 2: Druckanstieg in der Größenordnung einer Explosion/Detonation), kann die Detektion einer Zündung mittels Druckmessung bei der Verwendung eines modifizierten Hartmann-Rohres nicht eindeutig erfolgen. Da Zündungen von Staub/Luft-Gemischen oft nur mit einem sehr geringen Druckanstieg verbunden sind, würden viele Zündungen nicht erkannt werden. Dies trifft auf alle Versuchsapparaturen, welche mit einem modifizierten Hartmann-Rohr arbeiten (so zum Beispiel auch das MIKE3 der Kühner AG), zu. Die Detektion einer Zündung kann bei einer Verwendung des modifizierten Hartmann-Rohres demnach nur über eine visuelle Kontrolle erfolgen.

Der bewegliche Deckel des modifizierten Hartmann-Rohres wurde bei der von Chilworth, verwendeten Zerstäubereinheit, durch eine Vorrichtung ersetzt, welche die obere Öffnung des Hartmann-Rohres mit einem Filterpapier verschließt. Dennoch wird die Begrifflichkeit eines modifizierten Hartmann-Rohres beibehalten.

¹Ein Hartmann-Rohr ist druckdicht und zur Druckmessung mit einem Druckaufnehmer ausgestattet, ein modifiziertes Hartmann-Rohr lediglich mit einem beweglichen Deckel [4].

Da bei der Verwendung des modifizierten Hartmann-Rohres auf die optische Beobachtung zurückgegriffen werden muss, soll im Folgenden geklärt werden, welche Kriterien erfüllt sein müssen, um eine Flammerscheinung als Zündung werten zu können. Dazu wurden zunächst Literaturquellen, welche sich mit diesem Thema beschäftigten ausgewertet. Die unterschiedlichen Aussagen verschiedener Autoren über die Art sowie die Eigenschaften einer Zündung sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Literaturangaben von optischen Zündkriterien.

Art der Zündung	Eigenschaften / Bemerkung	Quelle
Flamme	Flammerscheinung	[12]
Flamme	Flammenreaktion, welche das gesamte Hartmann-Rohr ausfüllt	[19]
Flamme	selbstständig fortpflanzende Flammenreaktion, welche das gesamte Hartmann-Rohr ausfüllt	[5]
Explosion	selbstständig fortschreitende Reaktion	[6]
Flamme	selbstständig fortschreitende Reaktion	[6]
Flamme	Flamme, welche sich ohne weitere Energiezufuhr selbstständig fortbewegt und deutlich von der Zündquelle ablöst	[4]
Flamme	selbstständige Flammenreaktion ausgehend von Position der Funkenentladung	[14]

Übereinstimmend wird von einer Zündung gesprochen, wenn es zu einer Flammerscheinung gekommen ist. Eine Explosion wird zwar genannt, kann als Zündkriterium jedoch ausgeschlossen werden, da eine Zündung nicht zwangsläufig zu einer Explosion führen muss. Auch das Kriterium, dass die Flamme das ganze Hartmann-Rohr erfüllen muss, kann verworfen werden, da es auch kleinere Flammerscheinungen gibt, welche eindeutig als Zündung zu werten sind (siehe Anhang A).

In der Praxis kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Staubkonzentration in einem Raum überall gleich groß ist. Kommt es jedoch bei einer lokal geringen Staubkonzentration zu einer sich ausbreitenden Flammenreaktion, kann die Flammenausbreitung zur Zündung einer höheren Staubkonzentration führen, welche örtlich an die Flamme angrenzt. Das Merkmal einer selbstständig fortschreitenden Flamme bzw. selbstständigen Flammenausbreitung sollte daher beibehalten werden.

Die Eigenschaft, dass sich Flammen von der Zündquelle ablösen müssen, ist insbesondere bei kleinen Flammen von Bedeutung. Das Kriterium der von der Zündquelle abgelösten Flamme sollte deshalb nicht aus den Augen verloren werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine Flammerscheinung als Zündung gewertet, wenn sich

- die Flammerscheinung
- selbstständig
- ausbreitet und
- von der Zündquelle ablöst.

Im Folgenden sind einige Flammenerscheinungen näher erklärt. Zum besseren Verständnis sind Fotografien der beschriebenen Flammenerscheinungen Anhang A dargestellt. Diese Bilder wurden aus aufgezeichneten highspeed Videos, Bild für Bild, extrahiert. Den Bildern kann der zeitliche Fortschritt vom Beginn der Zündung entnommen werden.

2.1.1 Zündung hoher Heftigkeit

Die eindeutigste Zündung, welche durch optische Beobachtung identifiziert werden kann, ist die Zündung hoher Heftigkeit. Bei dieser kommt es in Verbindung mit einer stark ausgeprägten, sich schnell ausbreitenden, Flammenfront zu einem lauten Knall. Das eingespannte Filterpapier, welches die obere Öffnung des Hartmann-Rohres verschließt, wird dabei aus der Verankerung gerissen und zerstört. Eine Zündung hoher Heftigkeit ist in Anhang A.1 abgebildet.

2.1.2 Zündung mittlerer Heftigkeit

Bei einer Zündung mittlerer Heftigkeit kommt es zunächst zu einer Ablösung der Flamme von der Zündquelle. Später wird diese, wie in Anhang A.2 zu sehen ist, komplett von der Flamme umschlossen. Die Flamme breitet sich dabei selbstständig im ganzen Hartmann-Rohr aus. Das, die obere Öffnung des Hartmann-Rohres verschließende, Filterpapier wird dabei nicht zwangsläufig zerstört. Ein lauter Knall, wie bei der Zündung hoher Heftigkeit, ist nicht zu vernehmen.

2.1.3 Zündung geringer Heftigkeit

Die Zündung geringer Heftigkeit ist der Zündung mittlerer Heftigkeit sehr ähnlich. Sie ist ebenfalls eine Flammenreaktion, welche sich selbstständig fortpflanzt. Lediglich die räumliche Ausbreitung der Flamme ist, im Vergleich zu einer Zündung mittlerer Heftigkeit, etwas schwächer. Wie in Anhang A.3 zu sehen, erstreckt sich eine Zündung geringer Heftigkeit zwar über das gesamte Hartmann-Rohr, füllt dieses jedoch nicht komplett aus. Das Filterpapier an der oberen Öffnung wird durch diese Zündung meistens beschädigt.

2.1.4 Zündung sehr geringer Heftigkeit

Diese Art der Zündung kann bei ungenauer Beobachtung leicht übersehen werden (siehe Anhang A.4). Da sich die Flamme selbstständig fortschreitend ausbreitet und sich eindeutig von der Zündquelle ablöst, ist diese Flammenerscheinung dennoch als Zündung zu werten. Es sind somit alle Kriterien einer Zündung erfüllt, auch wenn diese nur sehr schwach ausgeprägt sind und sich damit an der Grenze zu einer Flammenreaktion bewegt, welche nicht als Zündung gewertet werden kann.

2.1.5 Flammenreaktion ohne Zündung

Eine solche Flammenerscheinung tritt oft auf, wenn sich abgelagerter Staub, zum Beispiel an den Elektroden, löst und nach unten fällt. In Anhang A.5 ist eine solche Flammenreaktion bildlich dargestellt. Es ist zu sehen, dass es zwar eindeutig zu einer Entzündung kommt, sich die Flamme jedoch nicht selbstständig ausbreitet. Die Flamme löst sich zwar scheinbar von der Zündquelle, das obere Ende der Flamme verharnt jedoch am selben Ort. Das legt den Schluss nahe, dass die Energie nicht ausreicht um das Staub/-Luftgemisch zu entzünden und nur einzelne Staubpartikel, welche sich durch Erschütterung von den Wänden oder den Elektroden des Hartmann-Rohres lösen, verbrannt sind. Diese Flammenerscheinung kann nicht als Zündung gewertet werden. Da es aber zu einer Verbrennung kommt, wird die ursprüngliche Konzentration des Staub/Luft-Gemisches verändert. Der Versuch muss daher nach dem Erscheinen einer solchen Flamme beendet werden.

2.1.6 Flammenerscheinung zwischen den Elektroden

Eine solche Reaktion äußert sich durch das kurze Aufblitzen einer winzigen Flamme zwischen den Elektroden. Bei flüchtiger Betrachtung dieser Erscheinung könnte man die Flamme für einen helleren Funken halten (siehe Anhang A.6). Da aber alle Funken eines Versuches annähernd die gleiche Energie aufweisen, ist ein einzelner Funken, welcher heller ist als andere, nicht möglich. Es ist davon auszugehen, dass bei einer solchen Erscheinung lediglich einige wenige Staubpartikel gezündet wurden. Auch wurde bei einer solchen Flammenerscheinung die Konzentration des Staub/Luft-Gemisches verändert. Der Versuch muss daher auch beim Erscheinen einer solch kleinen Flamme abgebrochen werden.

2.2 Nichtzündung

Die Mindestzündenergie gilt als bestimmt, wenn am zündwilligsten Gemisch die Zündenergie soweit reduziert wurde, dass es zu einer Nichtzündung des Staub/Luft-Gemisches kam. Eine **Nichtzündung** tritt dabei ein, wenn der aufgewirbelte Staub **mehrmals** in Folge **nicht zündet**. Beachtet man, dass eine Staubprobe maximal vier- bis fünfmal aufgewirbelt werden darf und danach ausgetauscht werden muss [15][20], wird klar, warum Versuche zur Bestimmung der Mindestzündenergie mit einem erheblichen Arbeitsaufwand verbunden sind. Dieser Arbeitsaufwand könnte durch die Verringerung der Anzahl der Versuche eingegrenzt werden. Es ist daher von Vorteil die geringste Anzahl von Versuchen zu kennen, welche notwendig sind, um, mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit, eine Zündung oder Nichtzündung zu erzeugen. In Tabelle 2.2 sind Kriterien einer Nichtzündung aus verschiedenen Quellen zusammengefasst.

Sowohl die Art der Zündung als auch die Anzahl der notwendigen Versuche, bei denen es nicht zu einer Zündung kommt, werden unterschiedlich beschrieben. Auf die Definition einer Zündung wurde in Abschnitt 2.1 ausführlich eingegangen. In der vorliegenden Arbeit wird eine Flammenerscheinung deshalb nicht als Zündung gewertet, wenn die Kri-

Tabelle 2.2: Angaben aus der Literatur zur Bestimmung einer Nichtzündung.

Anzahl mindestens notwendiger Versuche	Art der Zündung	Bemerkung	Quelle
5	Zündung	Aufgrund des hohen Versuchsaufwandes bei Stäuben nur 5 Versuche	[17]
10	Zündung		[6]
10	Zündung		[15]
10	Zündung		[14]
10	Zündung		[7]
10/20	Zündung	außerhalb Europa (ASTM Norm) / Europa	[20]
20	Zündung		[21]
20	Explosion	bei vorheriger Bestimmung des zündwilligsten Gemisches	[11]
20	Zündung	bei Kenntnis des zündwilligsten Gemisches	[1]
20	Explosion		[5]

terien einer Zündung (siehe Abschnitt 2.1) nicht erfüllt wurden (wenn es nicht zu einer Zündung des Staub/Luft-Gemisches gekommen ist).

Bartknecht hat den Einfluss der Versuchsanzahl auf die Zündwahrscheinlichkeit experimentell untersucht [21] (siehe Abbildung 1.3). Dabei wurde bei mehreren Tests mit zwei verschiedenen Stäuben, bei einer unterschiedlichen Anzahl von Versuchen, die Zündenergie (und damit auch die Zündwahrscheinlichkeit) systematisch reduziert. Das Ergebnis dieser Untersuchung war, dass sich die Zündwahrscheinlichkeit von leicht- (MZE < 10 mJ) und normal entzündlichen Stäuben (MZE < 100 mJ) ab einer Anzahl von zehn Versuchen nicht wesentlich verändert. Für schwer entzündliche Stäube (MZE > 100 mJ) wurden keine Untersuchungen durchgeführt. *Bartknecht* nahm jedoch an, dass sich die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Zündung bei schwer entzündlichen Stäuben ab einer Anzahl von 20 Versuchen nicht mehr ändert und setzte deshalb die Anzahl der notwendigen Versuche auf 20 fest. *Berthold*, welcher sich auf dieselben Untersuchungen bezog, postulierte dagegen eine Anzahl von nur zehn Versuchen [6].

Bei den beschriebenen Untersuchungen wurden lediglich zwei Stäube, je einer für leicht und einer für normal entzündliche Stäube, analysiert. Aus diesen Versuchen wurde später auf alle Stäube geschlossen. Dabei wurde nicht zwischen leicht und schwer entzündlichen Stäuben unterschieden. Aus den Arbeiten von *Kalkert* und *Glarner* geht jedoch hervor, dass die Zündwahrscheinlichkeit zwar mit abnehmender Zündenergie sinkt, der genaue Wert jedoch staubspezifisch ist [1][4]. Ein allgemeingültiger Rückschluss aufgrund der Untersuchung von lediglich zwei Stäuben (Zellulose, Erbsenmehl) ist daher diskussionsbedürftig, zumal *Berthold* schwer entzündlichen Stäuben komplett außen vor ließ. Auch auf eine statistische Betrachtung des Sachverhaltes wurde verzichtet.

Wie bereits erwähnt, sinkt mit abnehmender Zündenergie die Zündwahrscheinlichkeit (siehe Abschnitt 1.2, Abbildung 1.3). Die Nichtzündung eines Staub/Luft-Gemisches ist demzufolge ein Zufallsereignis, welches von der Zündwahrscheinlichkeit (p_z) und der Anzahl der Versuche (n) abhängig ist. Ist dabei die Anzahl der notwendigen Versuche zu klein, ist es möglich, dass eine Folge von Versuchen, bei denen es zu keiner Zündung der Staub/Luft-Gemische kommt, als Nichtzündung gewertet wird, obwohl die niedrigste Zündenergie noch nicht erreicht ist. Im ungünstigsten Fall würde dies zu einer falschen Bestimmung der Mindestzündenergie führen.

Bei einer statistischen Betrachtung kann eine Nichtzündung als sicher angesehen werden, wenn sich ihre Eintrittswahrscheinlichkeit über viele Versuche nicht wesentlich ändert. Bewegt sich die Wahrscheinlichkeit einer Nichtzündung im Bereich um 0,5 kann dies als kritisch angesehen werden. Die Wahrscheinlichkeit einer Zündung sowie einer Nichtzündung wären in diesem Fall annähernd gleich groß. Das Ergebnis wäre damit nicht eindeutig. Ist die Wahrscheinlichkeit einer Nichtzündung deutlich größer oder kleiner als 0,5, ist das Ergebnis eindeutiger. Da die Zündwahrscheinlichkeit eine Funktion der Zündenergie - und bei jedem Staub verschieden - ist, kann diese nicht als konstant angesehen werden. Es stellt sich also die Frage wie viele Versuche notwendig sind, um eine Nichtzündung oder Zündung sicher zu erkennen.

Da es bei der Durchführung eines Versuches nur zwei mögliche Ergebnisse gibt, Zündung und keine Zündung, kommt für eine statistische Betrachtung nur die Binomialverteilung in Frage. Mit dieser ist es möglich die Wahrscheinlichkeit $P(k|p,n)$ für eine beliebige Anzahl von positiven Ereignissen (k) aus einer Reihe von (n) Versuchen bei Kenntnis der Einzelwahrscheinlichkeit eines Ereignisses (p) zu ermitteln.

$$P(k|p, n) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k} \quad (2.1)$$

Zum Bestimmen einer Nichtzündung müsste für die Einzelhäufigkeit (p) die Häufigkeit, welche beschreibt das es nicht zu einer Zündung kommt, eingesetzt werden. Diese Häufigkeit (p_{nz}) ist durch Versuche nicht ermittelbar. Jedoch ist es möglich die Zündhäufigkeit (p_z) experimentell zu bestimmen. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Nichtzündung $P(k|p, n)$ soll daher die Zündhäufigkeit (p_z) herangezogen werden. Dies ist möglich, wenn das positive Ereignis k (Zündung) bei allen Versuchen (n) nicht auftritt ($k = 0, P(0|p, n)$). Daraus ergibt sich:

$$P(0|p, n) = \binom{n}{0} \cdot p^0 \cdot (1 - p)^{n-0} \quad (2.2)$$

$$P(0|p, n) = (1 - p)^n \quad (2.3)$$

Es ist bekannt, dass bei unendlich vielen Versuchen die Wahrscheinlichkeit einer Nichtzündung Null ist ($n \rightarrow \infty, P(0|p_z, n) = 0$). Die Wahrscheinlichkeit einer Nichtzündung ($P(0|p_z, n)$) in Abhängigkeit der Zündwahrscheinlichkeit (p_z) und der Versuchsanzahl ist in Abbildung 2.1 (für Zündwahrscheinlichkeiten von 0,1 - 0,01) grafisch veranschau-

licht. Die dazugehörigen Werte können Tabelle B.1 (Anhang B) entnommen werden. Die höchste Versuchszahl wurde mit 35 festgelegt. Dieser Wert ist um mehr als die Hälfte größer als die höchste Anzahl an Versuchen, welche der Literatur entnommen werden konnte. Aufgrund des hohen Versuchsaufwandes ist eine so hohe Versuchszahl unrealistisch. Um genauere Aussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeit einer Nichtzündung zu erlangen, wird eine Betrachtung dennoch bis zu dieser Versuchszahl durchgeführt.

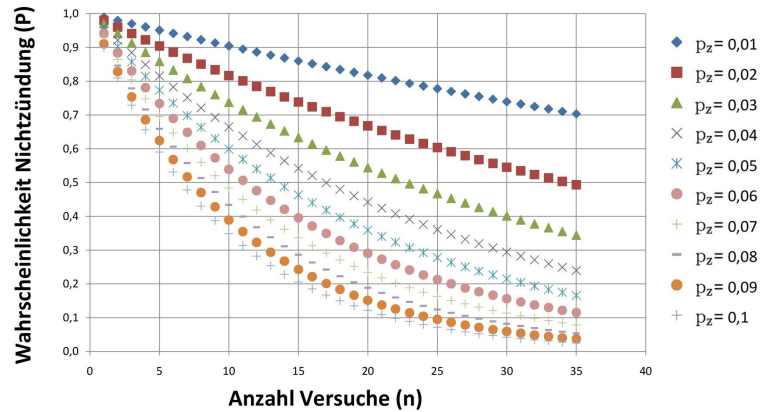


Abbildung 2.1: Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit einer Nichtzündung von der Versuchszahl und der Zündwahrscheinlichkeit.

Aus Abbildung 2.1 wird deutlich, dass aus statistischer Sicht eine Angabe einer allgemeingültigen Versuchszahl nicht möglich ist, da die Eintrittswahrscheinlichkeiten einer Nichtzündung bei einer gleichen Versuchszahl, aber verschiedenen Zündwahrscheinlichkeiten, zu stark voneinander abweichen. Es ist jedoch zu sehen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Nichtzündung mit einer zunehmenden Anzahl von Versuchen stärker fällt, je größer die Zündwahrscheinlichkeit ist. Allerdings ist es offensichtlich, dass bei den dargestellten Zündwahrscheinlichkeiten 5 Versuche für ein eindeutiges Ergebnis nicht ausreichen, da sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten einer Nichtzündung durch eine geringe Erhöhung der Versuchszahl stark verändert. Da die Wahrscheinlichkeit einer Nichtzündung bei unendlich vielen Versuchen Null ist, gibt es bei einer festgelegten Versuchszahl immer eine Wahrscheinlichkeit, dass die Versuchszahl nicht ausreicht, um eine Nichtzündung sicher zu bestimmen. Die Festlegung auf eine bestimmte Versuchszahl zur Bestimmung einer Nichtzündung ist dabei eine Abwägung zwischen der Durchführbarkeit und dem eben beschriebenen Risiko.

Über den tatsächlichen Verlauf der Zündwahrscheinlichkeit von Staub/Luft-Gemischen gibt es bisher nur wenige Untersuchungen. Für obige Untersuchung wurden daher angenommene Zündwahrscheinlichkeiten zugrunde gelegt.

2.2.1 Versuchsanzahl

In Tabelle 2.3 sind einige im Rahmen der Voruntersuchungen ermittelten Zündhäufigkeiten dargestellt. Die Zündhäufigkeit p_z errechnet sich dabei nach Formel 2.4.

$$p_z = \frac{\text{Anzahl Zündungen}}{\text{Anzahl durchgeführten Versuche}} \quad (2.4)$$

Die in der Tabelle abgebildeten Zündwahrscheinlichkeiten stellen nicht die Zündwahrscheinlichkeit an der Mindestzündenergie dar, sollen aber dennoch zur Ermittlung der Versuchsanzahl herangezogen werden.

Tabelle 2.3: Experimentell ermittelte Zündhäufigkeit der verwendeten Stäube.

Stoff	Zündhäufigkeit p_z	Energie [mJ]
Povidon	$1/7 = 0,143$	35,06
Magnesiumstearat	$1/13 = 0,0796$	10,05
Stoffgemisch (5 % Dimenhydrinat 95 % Povidon)	$1/7 = 0,143$	75,9
Stoffgemisch (2 % Dimenhydrinat 98 % Magnesiumstearat)	$1/11 = 0,091$	348
Stoffgemisch (5 % Dimenhydrinat 95 % Mikrokristalline Cellulose)	$1/2 = 0,5$	1011

Es ist ersichtlich, dass die ermittelten Zündwahrscheinlichkeiten deutlich größer, als die in Abbildung 2.1 angenommenen Zündwahrscheinlichkeiten, sind. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten einer Nichtzündung, welche sich mit den ermittelten Zündwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Versuchsanzahl ergeben, sind in Abbildung 2.2 veranschaulicht.

Es ist zu sehen, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Nichtzündung bei den ermittelten Zündwahrscheinlichkeiten relativ schnell fällt. Außerdem befindet sich die höchste Wahrscheinlichkeit für eine Nichtzündung für den Fall, dass die Versuchszahl auf 10 Versuche festgelegt ist, im Bereich um 0,5. Eine Zündung oder Nichtzündung ist somit mit annähernd gleicher Wahrscheinlichkeit möglich. Die Versuchsanzahl für alle folgenden Versuche wird daher auf 15 festgesetzt.

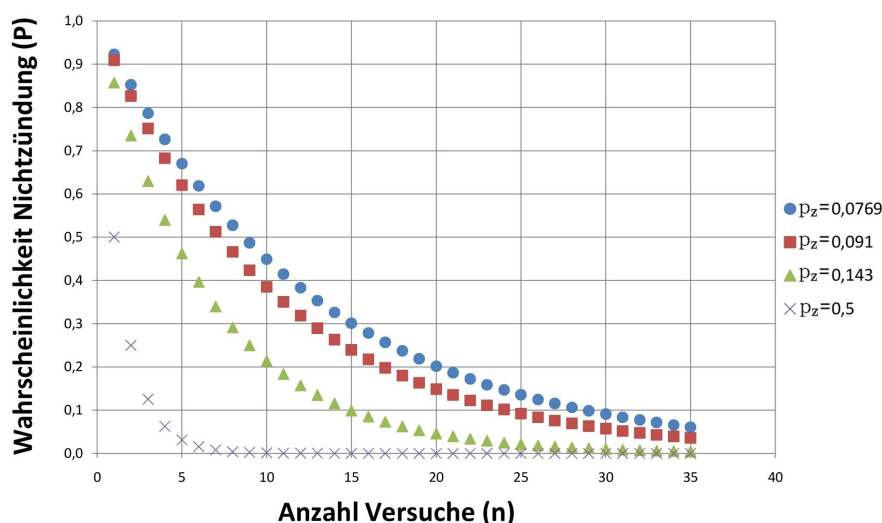


Abbildung 2.2: Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit einer Nichtzündung von der Versuchsanzahl und der Zündwahrscheinlichkeit (die Zündwahrscheinlichkeiten wurden aus Versuchen ermittelt).

2.3 Undichtigkeiten am Hartmann-Rohr

Im Rahmen der Vorversuche wurde festgestellt, dass Undichtigkeiten am Hartmann-Rohr teilweise zu einem erheblichen Staubverlust führen können. Dieser Staubverlust hat eine Konzentrationsänderung des Staub/Luft-Gemisches zur Folge. Es wurde ermittelt, dass die Undichtigkeit aufgrund der Art der Einfassung des Hartmann-Rohres hervorgerufen wird.

Um das Hartmann-Rohr auf dem Dispersionsgerät zu befestigen, muss es in einer Fassung fixiert werden. Zum Verbleib des Hartmann-Rohres in der Fassung wird das Hartmann-Rohr mittels Madenschrauben in der Fassung eingeklemmt. Dadurch wird der transparente Kunststoff, aus welchem das Hartmann-Rohr gefertigt ist, leicht verformt. An der Stelle, an der die Madenschrauben auf den Kunststoff treffen, entstehen daraufhin kleine Spalten zwischen dem Hartmann-Rohr und dessen Fassung. Durch diese Spalten kann beim Aufwirbeln des Staubes selbiger entweichen.

Um einer Verformung des Hartmann-Rohres bei dessen Fixierung in der Fassung vorzubeugen, wurden die Stellen, an denen die Madenschrauben auf den Kunststoff des Hartmann-Rohres treffen, mit kleinen Bohrungen versehen. Diese Bohrungen reichen bis in den Kunststoff des Hartmann-Rohres hinein, durchdringen diesen jedoch nicht. Die Madenschrauben können nun in die Löcher, welche durch die Bohrung entstanden sind, geschraubt werden. Das Hartmann-Rohr kann somit in der Fassung fixiert werden, ohne dass es durch die Fixierung verformt wird. Durch die zusätzliche Verwendung einer Dichtung konnte der Staubaustritt weiter reduziert werden. Die Dichtung wurde dabei aus Filterpapier hergestellt und in mehreren Lagen zwischen dem Hartmann-Rohr und dessen

Aufnahme in der Fassung eingebracht. So kann die Staubprobe vier- bis fünfmal aufgewirbelt werden (wie in [20],[15] gefordert), ohne das mit einer signifikanten Änderung der Konzentration des Staub/Luft-Gemisches gerechnet werden muss.

2.4 Datenauswertung

Da die Mindestzündenergie durch systematische Variation der Konzentration und der Funkenenergie ermittelt wird, werden die gesammelten Daten schnell unübersichtlich, was eine sofortige Auswertung erschwert. Für eine bessere Auswertung der Messergebnisse wurde im Rahmen dieser Arbeit, auf der Grundlage der Energietabellen des MIE III ([22]), ein Excel-Datenblatt entwickelt. Mit Hilfe des Datenblattes kann anhand

- der mit dem Flachsreiber ermittelten Spannung,
- der ausgewählten Kondensatorzeile sowie
- der aktivierten Kondensatoren

die Energie des Funkens errechnet sowie die Konzentration der Stäube in der Luft (in g/m^3) ermittelt werden. Die Ergebnisse werden anschließend automatisch in Tabellenform sowie in einem Diagramm zusammengefasst. Mithilfe des entwickelten Auswertungstools ist es somit möglich die Daten sofort auszuwerten und das weitere Vorgehen zur Bestimmung der Mindestzündenergie zu organisieren. Insbesondere die Variation der Konzentration kann so besser geplant werden, da nach jedem Versuch sofort ersichtlich ist, ob und in welcher Weise die nachfolgende Variationen der Konzentration erfolgen müssen (Erhöhung oder Reduzierung).

Der Wert der Energie wird von dem Datenblatt automatisch nach Formel 2.5 interpoliert.

$$f(x) = f_0 + \frac{f_1 - f_0}{x_1 - X_0}(x - x_0) \quad (2.5)$$

Grundlage für die Interpolation sind die Energietabellen der MIE III Versuchsanlage [22], welche zur Bestimmung der Funkenenergie herangezogen werden müssen (siehe Abschnitt 4.3.2). Erst nach Beendigung der Versuche wurden dem Autor die genauen Kapazitäten der einzelnen Kondensatoren zugetragen. Damit konnten Energiewerte, welche vorher nur durch Interpolation zu ermitteln waren, berechnet werden. Der durch die Interpolation entstandene Fehler konnte somit ebenfalls ermittelt werden. In Anhang E ist der durch die Interpolation entstandene maximale Fehler für jeden Kondensator dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Fehler marginal ist. Die ermittelten (interpolierten) Ergebnisse können somit verwendet werden.

2.5 Koronaentladung

Mit der verwendeten Apparatur ist es nicht möglich Koronaentladungen, welche bei Energien unter 10 mJ und kleinen Elektrodenabständen auftreten, zu beeinflussen (siehe Ab-

schnitt 1.3.1). Eine Funkenauslösung durch Initialzündung oder Relais ist nicht möglich. Somit ist das Auftreten von Koronaentladungen vorprogrammiert. Es wurde jedoch versucht, durch die Verwendung runder Elektroden (entgegen der aktuellen Norm DIN EN 13821, in der spitze Elektroden vorgeschrieben werden [14]) sowie häufiges und sorgfältiges Putzen der Elektroden, dem Effekt der Koronaentladung entgegen zu wirken. Wie groß der tatsächliche Einfluss der Koronaentladung bei der kontinuierlichen Einzelfunkenentladung war, kann nicht genau beziffert werden.

2.6 Elektrodenabstand

In allen gängigen Normen zur Bestimmung der Mindestzündenergie wird ein Elektrodenabstand von mindestens 6 mm vorgeschrieben. Das Benutzerhandbuch des MIE III dagegen schreibt einen standardmäßigen Elektrodenabstand von 5 mm vor [20]. Aus Abschnitt 1.3.1 ist bekannt, dass die Mindestzündenergie mit abnehmenden Elektrodenabstand steigt. Es ist demnach möglich, dass sich die tatsächlichen Mindestzündenergien unterhalb der gemessenen Werte befinden können.

Nach den Energietabellen stellt das MIE III Energien im Bereich von 2,25 mJ und 2273 mJ zur Verfügung [22]. Im Laufe verschiedener Experimente wurde festgestellt, dass es sich als schwierig erweist bei einem Elektrodenabstand von 6 mm sehr kleine Energien zu erzeugen. Es wurde daher untersucht, welche Minimalspannungen bei der MIE III Versuchsanordnung nötig sind, um bei einem Elektrodenabstand von 6 mm einen Funkenüberschlag zwischen den Elektroden zu erzeugen. Diese Untersuchung wurde für alle Kondensatoren der MIE III Versuchsanordnung durchgeführt. Anschließend wurde mit Hilfe der Energietabellen ermittelt, welche Energien dabei erzeugt wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.4 dargestellt. Dabei ist für jeden Kondensator die kleinstmögliche Energie, bei welcher ein Zündfunke erzeugt werden konnte sowie die dazugehörige Mindestspannung, ersichtlich.

Tabelle 2.4: Mit einem Elektrodenabstand von 6 mm erzeugbare Energien (*1 Energie nicht messbar, da wahrscheinlich Kondensator defekt; *2 nach [22] „Stray Energy“ vernachlässigbar gering).

		Anzahl									
Kondensatoren		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Stray
25 pF	Spannung [kV]	11,40	11,40	10,80	11,20	11,50	11,30	10,90	11,10	11,00	11,30
	Energie [mJ]	13,60	15,30	15,30	18,15	20,81	21,68	21,82	24,05	25,29	11,54
100 pF	Spannung [kV]	10,20	11,20	11,20	11,40	11,20	11,10	11,10	10,90	10,90	11,30
	Energie [mJ]	14,85	24,43	30,90	38,86	43,96	49,32	55,73	59,57	65,63	11,51
1 nF	Spannung [kV]	11,50	11,10	11,10	11,50	11,30	11,30	11,40	11,30	*1	*2
	Energie [mJ]	80,00	137,60	200,70	282,50	338,30	402,20	476,60	533,80	*1	*2
10 nF	Spannung [kV]	11,20	11,50								*2
	Energie [mJ]	627,00	1338								*2

Es wird deutlich, dass mit einem Elektrodenabstand von 6 mm eine minimale Energie von 10,20 mJ erzeugt werden kann.

Kleinere Energien können nur mit einer weiteren Reduzierung des Elektrodenabstandes erreicht werden. Im Benutzerhandbuch von Chilworth wird beschrieben, dass zur Erzeugung von Funken mit kleinen Energien eine Verringerung des Elektrodenabstandes auf maximal 2 mm nötig sein kann. Auch für diesen Abstand wurden die möglichen Mindestwerte der Funkenspannung und der Energie experimentell ermittelt. Diese können Tabelle 2.5 entnommen werden.

Tabelle 2.5: Mit einem Elektrodenabstand von 2 mm erzeugbare Energien (*1 Energie nicht messbar da, wahrscheinlich Kondensator defekt; *2 nach [22] „Stray Energy“ vernachlässigbar gering).

		Anzahl									
Kondensatoren		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Stray
25 pF	Spannung [kV]	8,40	8,40	8,30	8,30	8,40	8,20	8,20	8,40	8,40	8,40
	Energie [mJ]	7,40	8,32	9,05	9,99	11,12	11,43	12,36	13,81	14,80	6,44
100 pF	Spannung [kV]	8,40	8,40	7,90	8,00	7,60	7,80	7,80	7,80	7,90	7,30
	Energie [mJ]	10,09	13,77	15,37	19,10	20,30	24,40	27,57	30,56	34,50	4,82
1 nF	Spannung [kV]	7,90	7,70	7,60	7,70	7,50	7,50	7,80	7,60	*1	*2
	Energie [mJ]	38,10	66,20	94,40	127,40	149,50	178,00	233	242,20	*1	*2
10 nF	Spannung [kV]	7,50	7,50								*2
	Energie [mJ]	282	570,50								*2

Mit einem Elektrodenabstand von 2 mm kann demzufolge eine minimale Energie von 4,82 mJ erzeugt werden. Die Erzeugung noch kleinerer Energien ist im erwähnten Benutzerhandbuch nicht beschrieben. Es ist allerdings möglich kleinere Energien zu erzeugen. Dies ist allerdings relativ schwierig und erfordert vom Operateur ein Vorgehen mit viel Fingerspitzengefühl. Zudem sind die so ermittelten Ergebnisse mit großen Unsicherheiten behaftet. Das Vorgehen zur Einstellung solch kleiner Energien ist in Abschnitt 4.3.7 beschrieben.

2.7 Druckstoß zur Staubaufwirbelung

Der Druckstoß, mit welchem der Staub im Hartmann-Rohr aufgewirbelt werden soll, wurde auf 7 bar festgelegt [20][7]. Im Rahmen von anderen Unklarheiten erklärte Chilworth auf Anfrage (siehe Anhang B Antwort 5), dass der Druckstoß in Abhängigkeit von den Flugeigenschaften der Stäube so gewählt werden muss, dass die Staubprobe nicht zu weit nach oben geschleudert wird. So wäre der Druck dann richtig eingestellt, wenn verhindert wird, dass der Staub beim Aufwirbeln gegen das Filterpapier (welches die obere Öffnung des Hartmann-Rohres verschließt) geschleudert wird. So soll verhindert werden, dass der Staub am Filterpapier hängen bleibt und sich somit die Staubkonzentration des Staub/Luft-Gemisches ändert. Die Auswirkung des geänderten Druckluftstoßes auf die Mindestzündenergie kann, nach der Auffassung des Verfasseres, als gering eingeschätzt werden.

2.8 Einstellungen einer gewünschten Spannung

Bei der MIE III Versuchsapparatur der Firma Chilworth, muss der Elektrodenabstand für jede Funkenspannung neu eingestellt werden. Dabei stellt es sich teilweise als sehr schwierig heraus den Elektrodenabstand so zu wählen, dass der Funke genau bei der gewünschten Energie/Spannung auftritt. Um den Arbeitsaufwand nicht unnötig zu erhöhen, wurde eine Schwankung der Spannung von $\pm 0,1$ kV um den eigentlichen Wert akzeptiert. Der so entstandene maximale Fehler wurde rechnerisch ermittelt und kann Tabelle 2.6 entnommen werden.

Tabelle 2.6: Maximaler Fehler bei Abweichung der Spannung um $\pm 0,1$ kV.

Kondensator Zeile	Energie, bei der der Fehler maximal wird [mJ]	Fehler absolut [mJ]	Fehler relativ [%]
25 pF	46,42	0,61	1,31
100 pF	88,4	1,6	1,81
1 nF	1037,4	13,6	1,31
10 nF	2243	29,3	1,31

Zudem wurde bei Voruntersuchungen festgestellt, dass eine hohe Spannung und eine große Anzahl von zugeschalteten Kondensatoren die Durchführung von Experimenten behindern kann. Dies äußert sich vor allem durch folgende Punkte:

- Schwankende Spannungen, obwohl der Spannungsregler auf einen festen Wert eingestellt ist.
- Lange Aufladezeiten der Kondensatoren nach einer Funkenentladung.
- Funken treten mit einer Frequenz von $\ll 1$ Hz auf.

Das zeitliche Zusammentreffen von Funke und aufgewirbeltem Staub ist unter diesen Umständen extrem schwierig. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die beschriebenen Abweichungen die Versuchsergebnisse beeinflussen.

2.9 Zündverzugszeit

In Abschnitt 1.4 ist beschrieben, dass die Mindestzündenergie unter Variation der Zündverzugszeit ermittelt werden muss. So soll die Mindestzündenergie bei einem möglichst ruhenden Gemisch gefunden werden. Die Zündverzugszeit bewegt sich dabei im Millisekundenbereich. Um den Einfluss der Zündverzugszeit untersuchen zu können, ist eine Synchronisation der Aufwirbelung des Staubes und des Zündfunkens nötig. Dies kann nur von entsprechenden Steuergeräten durchgeführt werden. Nach Aussage von Chilworth entspricht der Verzicht auf die Variation der Zündverzugszeit mehr der Realität (Anhang C Antwort 2). Ein solches Steuergerät stand deshalb für die Untersuchung der

Mindestzündenergie von Staubgemischen bei der Verwendung der MIE III Versuchsanlage nicht zur Verfügung.

Bei den durchgeführten Versuchen konnte daher der, teils erhebliche, Einfluss der Zündverzugszeit auf die Mindestzündenergie (Abschnitt 1.3.2) nicht berücksichtigt werden. Die Auswertung von Abbildung 1.10 ergibt, dass die durch die Zündverzugszeit hervorgerufene absolute Abweichung der Mindestzündenergie in Abhängigkeit von dem verwendeten Staub das 200 - 300 fache der eigentlichen Mindestzündenergie betragen kann. Der genaue Wert ist jedoch für jeden Staub verschieden. Außerdem kann Abbildung 1.10 nicht als repräsentativ angesehen werden, da dort nur vier zufällig ausgewählte Stäube dargestellt sind. Es ist jedoch zu sehen, wie erheblich der Einfluss der Zündverzugszeit auf die Mindestzündenergie sein kann.

Bei den durchgeführten Versuchen kann der tatsächliche Einfluss der Zündverzugszeit nicht beziffert werden.

3 Durchgeführte Experimente

3.1 Umsetzung der Versuche

Zur Herleitung einer mathematischen Beziehung zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Staubgemischen wurden Versuche durchgeführt. Dazu wurde zunächst die Mindestzündenergie der Reinstäube ermittelt. Anschließend wurde die Beeinflussung der Mindestzündenergie durch das Zumischen eines Staubes analysiert. Die gewonnenen Daten sollten dabei als Grundlage für die themagebende Untersuchung sein.

Für den Versuch zur Herleitung einer mathematischen Beziehung zur Berechnung der Mindestzündenergie von Staubgemischen wurden

- Dimenhydrinat,
- Magnesiumstearat,
- Mikrokristalline Cellulose,
- Povidon und
- Aerosil

zur Verfügung gestellt. Diese Stoffe weisen ein breites Anwendungsspektrum auf. Die Pharma- oder Chemieindustrie sowie die Lebensmittelbranche sind nur einige Anwendungsgebiete dieser Stoffe.

Aerosil wird dabei vorrangig als Dispersionsmittel zur Verbesserung der Flugeigenschaften von Stäuben verwendet. Dimenhydrinat ist ein Wirkstoff aus der Pharmaindustrie, welcher unter anderem Übelkeit bekämpfen soll. Magnesiumstearat, Mikrokristalline Cellulose und Povidon dienen dabei häufig als Trägerstoff. Wirkstoffe werden dabei in Größenordnungen von lediglich einigen Milligramm mit den Trägerstoffen vermischt und anschließend zu Tabletten gepresst. Die Zumischung des Wirkstoffes im Trägerstoff bewegt sich dabei im Gewichts-Promillebereich. Solche eben beschriebenen Staubgemische wurden im Rahmen dieser Masterarbeit untersucht, um zukünftig zur Zündquellen-Vermeidung die Mindestzündenergie solcher Staubgemische berechnen zu können. Aufwendige Versuche mit jeder möglichen Mischungskonzentration sollen somit vermieden werden. Wie in der Realität, wurde auch in den Versuchen ein Wirkstoff mit verschiedenen Füllstoffen vermischt.

Es wurde festgestellt, dass sich einige der zu untersuchenden Stäube nur schlecht untersuchen lassen bzw. sich ihre Handhabbarkeit sehr schwierig gestaltet. Dies äußerte sich

vor allem durch die Ablagerung des Staubes an den Elektroden. So wurden die Elektroden teilweise völlig von dem untersuchten Staub umschlossen. In einigen Fällen kam es zur Brückenbildung zwischen den Elektroden. Die beschriebenen Staubablagerungen ließen sich nicht durch vorsichtiges Klopfen am Prüfbehälter oder durch wiederholte Druckluftstöße beseitigen und führten häufig zu einer Unterdrückung des Zündfunken. Stäube, bei denen ein solches Verhalten beobachtet werden konnte, wurde Aerosil zugemischt. Die Handhabung der Stäube wurde damit um ein vielfaches erleichtert. Die Zumischung betrug dabei, wie in [6] beschrieben, 1 % des Gewichtsanteils des untersuchten Staubes.

Um zu sehen, ob durch die Zumischung von Dimenhydrinat grundsätzlich mit einer Beeinflussung der Mindestzündenergie zu rechnen ist, wurde den Trägerstoffen zunächst 5 % ihres Gewichtsanteils Dimenhydrinat zugemischt. Wurde eine Beeinflussung festgestellt, sollte die prozentuale Zumischung reduziert werden, um den genauen Verlauf der Beeinflussung zu ermitteln.

Staubgemische wurden mit einem Rotationsmischer hergestellt. Da sich der zur Verfügung gestellte Rotationsmischer lediglich um eine Achse dreht, wurden die Stäube anschließend erneut in einem Walzenmischer gemischt. So kann von einer optimalen Vermischung der Stäube ausgegangen werden.

Da die Mindestzündenergie durch Variation der Konzentration und systematische Energiereduzierung bestimmt wird, muss darauf geachtet werden, dass die gewählte Startkonzentration sowie die Startenergie sicher im explosionsfähigen Bereich liegen. Dafür ist es wichtig die untere Explosionsgrenze (C_{ExU}) zu kennen. Ist die untere Explosionsgrenze bekannt, kann verhindert werden, dass diese bei den Versuchen zur Bestimmung der Mindestzündenergie unterschritten wird. Aufgrund dessen wurde bei allen Stäuben, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, die untere Explosionsgrenze bestimmt.

3.2 Ergebnisse

Alle Stäube wurden vor Versuchsbeginn auf ihren Feuchtegehalt untersucht. Dazu wurde eine kleine Menge des jeweiligen Staubes erhitzt. Vor und nach dem Erhitzen wurde die Masse der Staubprobe ermittelt. Die Differenz wird durch verdunstetes Wasser verursacht. Die absolute Produktfeuchte lässt sich dabei mit Formel 3.1 ermitteln.

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{vor}} - m_{\text{nach}} \quad (3.1)$$

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ = Masse des Wassers

m_{vor} = Masse des Staubes vor dem Erhitzen

m_{nach} = Masse des Staubes nach dem Erhitzen

Es wurde festgestellt, dass die Produktfeuchte von allen verwendeten Stäuben deutlich unter 5 % lag. Eine Beeinflussung des Ergebnisses aufgrund der Produktfeuchte ist daher nicht zu erwarten.

Die Untersuchungen wurden bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck durchgeführt, auch hier wird nicht von einer Beeinflussung der Messergebnisse ausgegangen.

Die Korngrößenverteilung wurde anhand eines Bildgebungsverfahrens durch Anlegen von Tangenten an die Seiten der abgebildeten Partikel ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass die Partikel aller Stäube eine nahezu sphärische Form aufweisen. Die Abweichung der Partikel von einer ideal Kugel lag bei allen untersuchten Stäuben bei ca. 10 %. Der in den Ergebnissen angegebene mittlere Partikeldurchmesser ist der Durchschnitts-Durchmesser auf der kleinsten Seite der Partikel. Der mittlere Partikeldurchmesser der Staubgemische wurde rechnerisch ermittelt.

Dimenhydrinat ist der einzige Stoff, von dem die Mindestzündenergie im Vorfeld bekannt war [23]. Die Mindestzündenergie (MZE) von Dimenhydrinat beträgt $1 \text{ mJ} < \text{MZE} < 3 \text{ mJ}$. Da genaue Energiemessungen unterhalb von 4,82 mJ mit dem MIE III nicht möglich sind (siehe Abschnitt 2.6), konnte diese Angabe nicht eindeutig überprüft werden. Es wurde lediglich festgestellt, dass eine Energie von ca. 3 mJ ausreicht, um aufgewirbeltes Dimenhydrinat zu entzünden.

Den Füllstoffen Mikrokristalline Cellulose und Povidon wurde (wie in Abschnitt 2 beschrieben), für eine bessere Handhabbarkeit, Aerosil beigemischt. Zudem wurde bei der Untersuchung der Staubgemische Povidon/Dimenhydrinat und Mikrokristalliner Cellulose/Dimenhydrinat beobachtet, dass sich die Stoffgemische beim Aufwirbeln entmischen.

Die Ergebnisprotokolle können in Anhang D eingesehen werden.

Tabelle 3.1: Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Staubgemischen.

Stoff	Mittlerer Partikel- durchmesser [mm]	C_{Ex_0} [g/m ³]	Mindestzündenergie	
			E_1 [mJ]	E_2 [mJ]
Dimenhydrinat	0,0534	25,00	1,00	3,00
Magnesiumstearat	0,0118	28,33	5,36	7,93
Povidon	0,0649	62,50	14,18	35,06
Mikrokristalline Cellulose	0,1982	133,33	nicht ermittelbar	nicht ermittelbar
Staubgemisch 95 % Mikrokristalline Cellulose & 5 % Dimenhydrinat	0,1910	115,12	255,00	499,00
Staubgemisch 95 % Povidon & 5 % Dimenhydrinat	0,0643	81,64	50,40	62,92

3.3 Fehlerabschätzung

Aus den vorangegangenen Erklärungen wird deutlich, dass die mit dem MIE III ermittelte Mindestzündenergie, fehlerbehaftet ist. Dabei sind neben den relativ genau quantifizierbaren Fehlern aus der Spannungseinstellung (siehe Abschnitt 2.8 und Tabelle 2.6) und der Interpolation der Energiewerte (siehe Abschnitt 2) auch einige nicht eindeutig quantifizierbare Abweichungen bekannt.

Der Gesamtfehler setzt sich aus dem Fehler, welcher durch das Einstellen der Spannung entsteht (siehe Tabelle 2.6) und dem Fehler, hervorgerufen durch das Interpolieren der Energiewerte (siehe Anhang E), zusammen. Der Gesamtfehler wird daher mit 10 % des eigentlichen gemessenen Wertes angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass diese konservative Schätzung des gesamten Messfehlers sichere Messergebnisse liefert. Jedoch sollte beachtet werden, dass die Abweichung durch Einflussgrößen welche bei den durchgeführten Experimenten nicht berücksichtigt werden konnten, erheblich größer sein kann.

4 Bedienungsanleitung (MIE III)

4.1 Gültigkeit

Die Bedienungsanleitung zur Untersuchung der Mindestzündenergie bezieht sich auf die Kombination der folgenden Geräte:

- MIE III der Firma Chilworth
- Flachsreiber der Firma Linseis
- 004 Mie Dispersion mit modifiziertem Hartmann-Rohr

4.2 Funktionserklärung der Geräte

4.2.1 MIE III

Das MIE III der Firma Chilworth stellt eine genau quantifizierbare Energie zur Verfügung, mit deren Hilfe Funken in einem modifizierten Hartmann-Rohr (siehe Abschnitt 4.2.3) erzeugt werden. Die mit dem MIE III erzeugbare Energie liegt im Bereich zwischen 2,25 mJ und 2273 mJ [22].

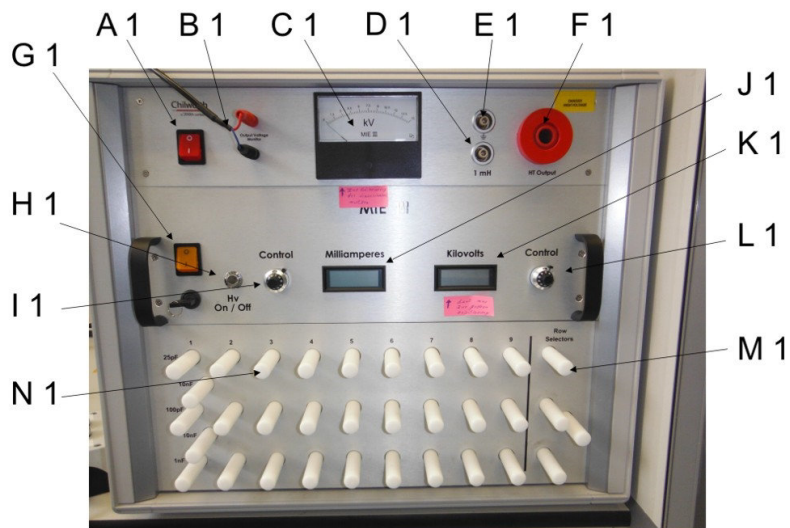


Abbildung 4.1: Versuchsapparatur MIE III der Firma Chilworth.

- A 1 = Ein / Aus Überwachung / Anzeige Funkenspannung
- B 1 = Ausgangsbuchsen für externes Spannungsüberwachungsgerät zur Anzeige der Funkenspannung (z. B. Flachsreiber, digitaler Datenlogger)
- C 1 = Anzeige Spannung analog [kV]
- D 1 = Erdung / Erdleitung Hochspannungsleitung der Funkenerzeugung (mit [1 mH] Induktivität)
- E 1 = Erdung / Erdleitung Hochspannungsleitung der Funkenerzeugung (ohne [1 mH] Induktivität)
- F 1 = Ausgang Hochspannung für Funkenerzeugung
- G 1 = Ein / Aus Energieerzeugungseinheit
- H 1 = Ein / Aus Hochspannung
- I 1 = Stromstärkenregler (muss immer auf max. eingestellt sein)
- J 1 = Anzeige Stromstärke [mA]
- K 1 = Anzeige der Spannung [kV] digital
- L 1 = Spannungsregler
- M 1 = Wähleinrichtung für Kondensatorzeilen („Row Selectoren“)
- N 1 = Zuschaltbare Kondensatoren

Das MIE III unterteilt sich in zwei Funktionseinheiten. Die Funktionseinheit im oberen Teil des Gerätes dient der Überwachung und Auswertung der Funkenspannung an den Elektroden. Mit einem analogen (C1) sowie digitalen (K1) Spannungsmesser kann die Spannung an den Elektroden grob kontrolliert werden. Zur Aufzeichnung der Funkenspannung ist ein zusätzlicher Anschluss (B1) vorhanden. Bei der Verwendung eines externen Spannungsmessgerätes muss beachtet werden, dass 1 V am Anschluss 10 kV an den Elektroden entspricht.

Im unteren Teil des MIE III kann die Einstellung der gewünschten Energie für die Funkenerzeugung vorgenommen werden. Die Energie der Funken kann dabei über die Kondensatoren sowie über die Spannung beeinflusst werden. Jeder Kondensator befindet sich in einer Kondensatorzeile. Diese werden durch die „Row Selectoren“ (M1) aktiviert. Eine Kondensatorzeile umfasst dabei mehrere (bis zu neun) einzeln zuschaltbare Kondensatoren (N1). Alle Kondensatoren einer Kondensatorzeile besitzen die gleiche Kapazität.

Niemals dürfen **zwei Kondensatorzeilen gleichzeitig** aktiviert werden, anderenfalls ist mit erheblichem Schaden des Gerätes zu rechnen.

Die Buchsen D1, E1 und F1 dienen zum Anschluss der Elektroden des Hartmann-Rohres, wobei F1 die Anschlussbuchse für den Hochspannungsstecker ist. Mit D1 und E1 wird der Schaltkreis des Zündfunken geschlossen. D1 und E1 unterscheiden sich hinsichtlich ihrer jeweiligen Induktivität. Wird die mit D1 bezeichnete Buchse verwendet, besitzt der Stromkreis eine Induktivität von 1 mH. Mit zugeschalteter Induktivität nimmt die zeitliche Dauer der Funken zu. Bei einigen Stäuben lassen sich so kleinere Mindestzündenergien erzeugen.

4.2.2 Flachsreiber

Der Flachsreiber ist ein entscheidendes Instrument, um die einzelnen Versuche auswerten zu können. Mit ihm wird die Spannung an den Elektronen im Hartmann-Rohr und somit die Funkenspannung gemessen. Unter Beachtung der gewählten Kondensatoren am MIE III sowie der Funkenspannung kann mit den Energietabellen [22] die tatsächliche Energie der Funken ermittelt werden.

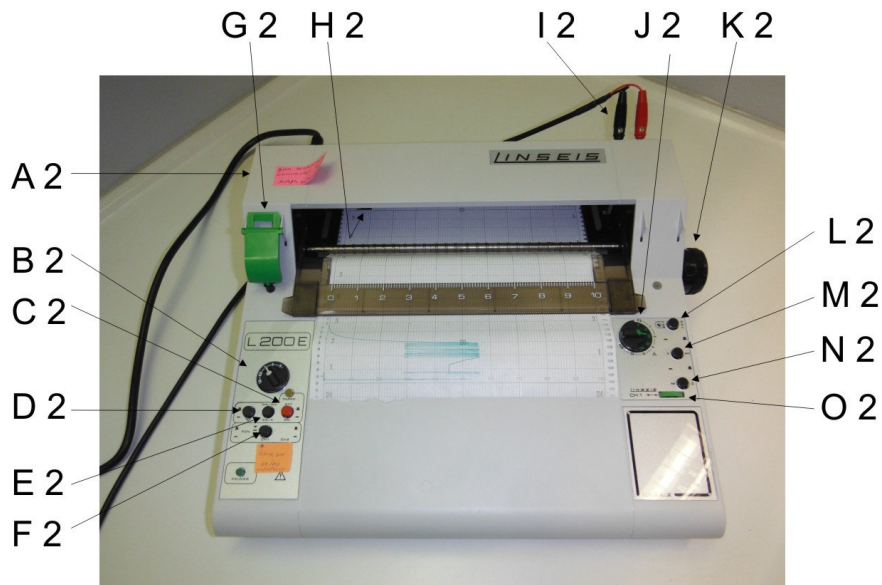


Abbildung 4.2: Flachsreiber

- A 2 = Ein / Aus Schalter (verdeckt)
- B 2 = Stellrad für die Geschwindigkeit des Papiervorschubs
- C 2 = Ein / Aus Papiervorschub
- D 2 = schneller Papiervorschub
- E 2 = Wählschalter für Geschwindigkeit des Papiervorschubs ([mm/min] oder [mm/s])
- F 2 = Schreibfeder heben / senken
- G 2 = Schreibfeder (ausgebaut)
- H 2 = Schreibfeder Halterung (verdeckt)
- I 2 = Anschlussbuchsen Datenkabel (Eingangssignal Funkenspannung)
- J 2 = Stellrad Skalierung Eingangssignal
- K 2 = Handrad (zum manuellen Papiervorschub)
- L 2 = variable Meßbereichsdehnung Ein / Aus (muss im Regelfall gedrückt sein)
- M 2 = Wählschalter Eingangssignal [V] oder [mV]
- N 2 = Messen (muss gedrückt sein)
- O 2 = Einstellrad des Nullpunktes

Der Flachsreiber zeichnet die Spannung der Elektroden analog auf Papier auf. Die tatsächliche Funkenspannung kann später durch Ausmessen ermittelt werden. Zur besseren Ablesbarkeit sollte zu Beginn eines Experimentes eine Spannungsskala auf dem Papier erstellt werden (siehe Abschnitt 4.3.2).

Wichtig: Um die aufgezeichneten Daten nicht zu verfälschen, dürfen sich während der Aufzeichnung der Daten keine Geräte mit einer Störstrahlung (z. B. Mobiltelefone, Computermonitore, Funkgeräte etc.) in unmittelbarer Nähe des Flachsreibers befinden.

4.2.3 004 MIE Dispersion mit modifiziertem Hartmann-Rohr

Das 004 MIE Dispersion mit modifiziertem Hartmann-Rohr dient zur örtlichen und zeitlichen Zusammenführung des erzeugten Funkens und des aufgewirbelten Staubes.

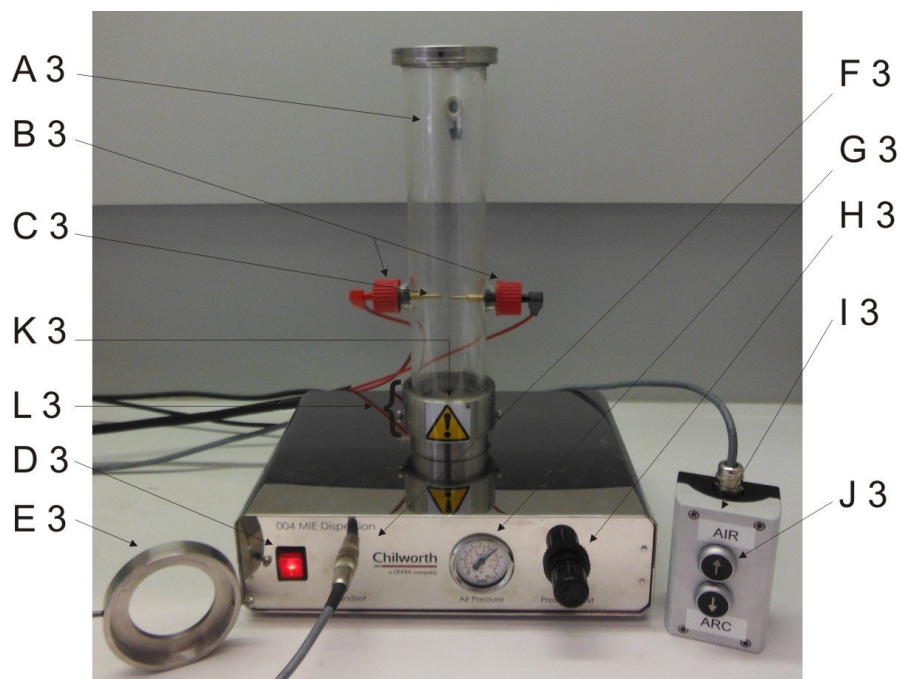


Abbildung 4.3: 004 MIE Dispersion mit modifiziertem Hartmann-Rohr.

A 3	=	modifiziertes Hartmann-Rohr
B 3	=	Anschluss der Elektroden
C 3	=	Elektroden
D 3	=	Ein /Aus 004 MIE Dispersion
E 3	=	Deckel zum Einspannen / Verschließen des Hartmann-Rohres
F 3	=	Anschluss für die Fernbedienung
G 3	=	Druckanzeige
H 3	=	Druckregler
I 3	=	Fernbedienung
J 3	=	Aktivierung Luft (Verwirbelung)
K 3	=	Tiegel zur Aufnahme der Staubprobe
L 3	=	Halterung zum Befestigen des Hartmann-Rohres

Das Gerät unterteilt sich dabei in

- das modifizierte Hartmann-Rohr und
- die Verwirbelungseinheit.

Das modifizierte Hartmann-Rohr ist auf der Verwirbelungseinheit befestigt, kann jedoch problemlos abgenommen werden.

Mit der Verwirbelungseinheit werden Staubproben durch Druckluft aufgewirbelt. Der Druck der einströmenden Luft kann dabei variiert werden. Das Aufwirbeln der Stäube erfolgt im Hartmann-Rohr. Um zu verhindern, dass aufgewirbelter Staub durch die obere Öffnung des Hartmann-Rohres austritt, wird diese während der Versuche verschlossen.

Achtung !!! Beim Hantieren an den Elektroden des Hartmann-Rohres ist besondere Vorsicht geboten. Unachtsames und unbedachtes Arbeiten kann zu Stromschlägen führen. Vor jeder Arbeit an den Elektroden ist sicherzustellen, dass die Hochspannung am MIE III ausgeschaltet wurde. Zusätzlich können die Elektroden bewusst entladen werden (zum Entladen der Elektroden hat sich ein langer flacher Pinsel mit Holzgriff bewährt [Entladungspinsel]).

4.3 Bedienung

4.3.1 Vor dem Experiment

Zu Beginn sind alle sichtbaren Kabel und Verbindungen auf Beschädigungen zu überprüfen. Beschädigte Kabel dürfen nicht verwendet und müssen ausgetauscht werden. Anschließend ist sicherzustellen, dass alle Geräte an eine Stromversorgung angeschlossen sind. Wurde die gesamte Apparatur ab und an anderer Stelle wieder aufgebaut, ist insbesondere am Flachsreiber darauf zu achten, dass die Eingangsspannung auf das jeweilige Stromnetz eingestellt ist.

Für die Energieübertragung vom MIE III zum Hartmann-Rohr darf nur das dazu vorgesehene Kabel (siehe Abbildung 4.4) verwendet werden [20]. Die Länge des Kabels hat

Einfluss auf die Energie des Zündfunktens im Hartmann-Rohr. Aus diesem Grund muss bei jedem Versuch das Original-Kabel verwendet werden. Dieses darf nicht gekürzt, verlängert oder auf eine andere Art und Weise verändert werden. Wird ein anderes Kabel verwendet, ist eine exakte Einstellung des Zündfunktens mittels der Energietabellen (Abschnitt 4.3.2) nicht möglich. Zu Beginn ist der silberfarbene Stecker des Kabels am MIE III mit der Buchse D1 oder E1 (Abbildung 4.1) zu verbinden. Der rote Hochspannungsstecker ist an der Buchse F1 (Abbildung 4.1) anzuschließen. Das andere Ende des Kabels wird an den Elektroden des Hartmann-Rohres B3 (siehe Abbildung 4.3) angeschlossen.



Abbildung 4.4: Energieübertragungskabel vom MIE III zum Hartmann-Rohr.

Das 004 Mie Dispersionsgerät muss zusätzlich mit Druckluft versorgt werden. Zur Auslösung der Staubverwirbelung im Hartmann-Rohr ist die Fernbedienung I3 notwendig (Abbildung 4.3).

Zur Überwachung der Spannung an den Elektroden muss der Flachsreiber mit dem MIE III verbunden werden. Die Buchsen für das Ausgangssignal B1 (Abbildung 4.1) am MIE III befinden sich in der Überwachungseinheit des MIE III. Die Anschlussbuchsen am Flachsreiber I2 (Abbildung 4.2) sind auf der Rückseite des Gerätes angeordnet. Während eines Versuches zeichnet der Flachsreiber kontinuierlich die an den Elektroden anliegende Spannung auf. Mit Hilfe dieser Aufzeichnung kann später die tatsächliche Energie des Zündfunktens ermittelt werden. Vor Beginn der Versuche muss die Schreibfeder des Flachsreibers in die Halterung H2 (Abbildung 4.2) eingesetzt werden. Dazu muss sich die Halterung der Schreibfeder H2 in der nicht abgesenkten Stellung befinden. Die Schreibfeder muss so in die Halterung eingebracht werden, dass die Nasen, rechts und links der Feder, auf den Stiften der Halterung aufliegen. Durch leichten Druck von oben rastet die Schreibfeder in der Halterung ein.

Vor dem Experiment ist das Hartmann-Rohr auf Verunreinigungen zu kontrollieren. Ein verunreinigtes Hartmann-Rohr darf nicht zur Versuchsdurchführung verwendet werden. Wird vor Versuchsbeginn eine Verunreinigung festgestellt, muss das Hartmann-Rohr gereinigt werden. Zum Reinigen wird eine milde Seife, lauwarmes Wasser und eine lange Bürste (z. B. Flaschenbürste) empfohlen. Auf keinen Fall darf das Hartmann-Rohr durch das Reinigen von Innen aufgeraut werden. Auf der aufgerauten Innenfläche könnten sich sonst Staubpartikel absetzen. Auch eine Trübung des Glases durch Reinigungsmittel oder Materialien (z. B. Stahlwolle) sollte verhindert werden.

Zur Durchführung des Experimentes stehen modifizierte Hartmann-Rohre aus Glas und Kunststoff zur Verfügung. Die Glasvariante weist eine geringere Leckrate auf, ist jedoch anfälliger gegen das Klopfen bei Anhaftungen. Die Glasrohre können durch das Klopfen reißen und später bei einer Zündung des Staube/Luft-Gemisches zerspringen. Das Hartmann-Rohr aus Kunststoff sollte demzufolge dann zum Einsatz kommen, wenn Stäube untersucht werden, welche besonders stark an den Elektroden oder den Wänden des Hartmann-Rohres haften bleiben. Das Hartmann-Rohr wird mittels einer Halterung (L3 siehe Abbildung 4.3) an dem 004 Mie Dispersionsgerät befestigt. In der Halterung wird das Hartmann-Rohr mit Madenschrauben eingespannt. Um die Leckrate der PET-Rohre nicht zusätzlich zu erhöhen, sind Bohrungen an den Stellen, an denen die Madenschrauben auf das Hartmann-Rohr treffen, hilfreich (siehe Abschnitt 2). Zusätzlich kann eine Dichtung mit dem gleichen Innen- und Außendurchmesser wie das PET-Rohr zu einer geringeren Leckrate bei den Kunststoffrohren beitragen, wenn diese in der Halterung direkt unter dem Hartmann-Rohr eingebaut wird (siehe Abschnitt 2).

4.3.2 Einstellung einer gewünschten Energie

Die Energie eines elektrisch erzeugten Funkens kann mit der Formel

$$E = \frac{1}{2} * C * U^2 \quad (4.1)$$

berechnet werden. Dabei ist C die Kapazität der Kondensatoren (in Farad [F]) sowie U die an den Elektroden anliegende Spannung (in Volt [V]).

Zusätzlich hat der Abstand der Elektroden entscheidenden Einfluss auf die an den Elektroden anliegende Spannung. Der Elektrodenabstand beeinflusst somit die Energie des erzeugten Funkens. Die richtige Einstellung des Elektrodenabstandes wird in Abschnitt 4.3.4 erläutert. Um die Spannung an den Elektroden auswerten und messen zu können, muss zu Beginn die Überwachungseinheit des MIE III mittels des Schalters A1 (siehe Abbildung 4.1) eingeschaltet werden.

Die Energieerzeugungseinheit des MIE III wird durch den Schalter G1 (Abbildung 4.1) eingeschaltet. Die richtige Einstellung für die gewünschte Energie lässt sich mit Hilfe der Energietabellen [22] des MIE III bestimmen. Dazu muss zunächst die gewünschte Energie in den Tabellen gesucht werden. Jede Tabelle steht dabei für eine Kondensatorzeile (siehe Tabellenkopf). Über die Spalten der jeweiligen Tabelle wird die Anzahl der notwendigen Kondensatoren ermittelt. Die erforderliche Spannung wird in der jeweiligen Zeile abgelesen. In Abbildung 4.5 ist dies beispielhaft visualisiert.

Spalten einer Tabelle, welche mit „Stray Rail“ beschriftet sind, bezeichnen die Streukapazität. In der 25 pF und 100 pF Kondensatorzeile reicht diese Streukapazität aus, um Energien von bis zu 20,48 mJ zu erzeugen. Um nur mit der Streukapazität zu arbeiten, muss der entsprechende Row Selector ohne Kondensatoren aktiviert werden. In den Kondensatorzeilen, in denen keine Streukapazität ausgewiesen wurde, ist diese vernachlässigbar gering.

*3 25pF range	*1 Energy in mJ									*2 Stray 25pF	*4 Rail
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
5 12500000	2.61	2.94	3.28	3.61	3.93	4.24	4.59	4.88	5.23	2.28	
6 18000000	3.76	4.23	4.72	5.20	5.65	6.10	6.61	7.02	7.52	3.28	
7 24500000	5.12	5.76	6.42	7.08	7.69	8.31	8.99	9.56	10.24	4.46	
8 32000000	6.69	7.52	8.38	9.25	10.05	10.85	11.74	12.48	13.38	5.82	
9 40500000	8.46	9.52	10.61	11.70	12.72	13.73	14.86	15.80	16.93	7.37	
10 50000000	10.45	11.75	13.10	14.45	15.70	16.95	18.35	19.50	20.90	9.10	
11 60500000	12.64	14.22	15.85	17.48	19.00	20.51	22.20	23.60	25.29	11.01	
12 72000000	15.05	16.92	18.86	20.81	22.61	24.41	26.42	28.08	30.10	13.10	
13 84500000	17.66	19.86	22.14	24.42	26.53	28.65	31.01	32.96	35.32	15.38	
14 98000000	20.48	23.03	25.68	28.32	30.77	33.22	35.97	38.22	40.96	17.84	
15 112500000	23.51	26.44	29.48	32.51	35.33	38.14	41.29	43.88	47.03	20.48	

Abbildung 4.5: Energietabelle für 25 pF Kondensatorzeile, Energieangaben in mJ
 *1 Kondensatorzeile, *2 zuschaltbare Kondensatoren, *3 Spannung kV,
 *4 mögliche Energien.

Wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, werden die Kondensatorzeilen über die Row Selectoren (M1) aktiviert. Row Selectoren (M1) sowie die Kondensatoren (N1) einer Kondensatorzeile werden durch festes Drücken und anschließendes Drehen im Uhrzeigersinn bis zum Anschlag eingeschaltet. In der aktivierten Stellung ragen die entsprechenden Stäbe nur zur Hälfte aus dem Gehäuse des MIE III heraus und können dadurch eindeutig als eingeschaltet erkannt werden. Eingeschaltete Row Selectoren werden deaktiviert, in dem sie entgegen dem Uhrzeigersinn bis zum Anschlag gedreht werden. Dabei springen die Stangen automatisch in die Ausgangsstellung zurück.

Es ist zu beachten, dass die Kondensatoren immer in der Reihenfolge ihrer Nummerierung zugeschaltet werden müssen. Zwischen aktivierten Kondensatoren dürfen sich keine deaktivierten Kondensatoren befinden. Es darf jeweils nur ein Row Selector und somit nur eine Kondensatorzeile genutzt werden. Wird die Kondensatorzeile gewechselt, müssen vorher alle Kondensatoren deaktiviert werden.

Während der Nutzung einer Kondensatorzeile **darf kein** anderer Row Selector oder Kondensator aktiviert sein.

Eine Besonderheit stellt die 10 nF Kondensatorzeile dar. Diese ist versetzt zwischen den anderen Kondensatorzeilen angeordnet. Der dazugehörige Row Selector befindet sich rechts unterhalb des 100 pF Row Selectors. Die Kondensatoren dieser Zeile müssen von oben nach unten zugeschaltet werden.

In Bezug auf die Spannung sind den Tabellen nur ganzzahlige Werte zu entnehmen (Abbildung 4.5). Aus den Diagrammen, welche sich den Tabellen anschließen, geht hervor, dass die Änderung der Energie zwischen zwei aufeinander folgenden ganzzahligen Spannungen nahezu linear verläuft (siehe Abbildung 4.6). Zur genauen Ermittlung der Spannung kann daher innerhalb einer Spalte linear interpoliert werden. Der dabei entstandene Fehler ist minimal (siehe Tabelle 2.6).

Ferner kann die notwendige Spannung aus den Diagrammen, in denen die Graphen für die zuschaltbaren Kondensatoren stehen, ermittelt werden. Über die angestrebte Ener-

gie, welche auf der Ordinaten abgetragen ist, kann (wie in Abbildung 4.6 verdeutlicht) die notwendige Spannung in Abhängigkeit vom Kondensator auf der Abszisse abgelesen werden.

Um die gewünschte Spannung einzustellen, muss die Hochspannung mittels des Schalters H1 zugeschaltet werden. Anschließend wird die Spannung über den Spannungsregler (L1) eingestellt.

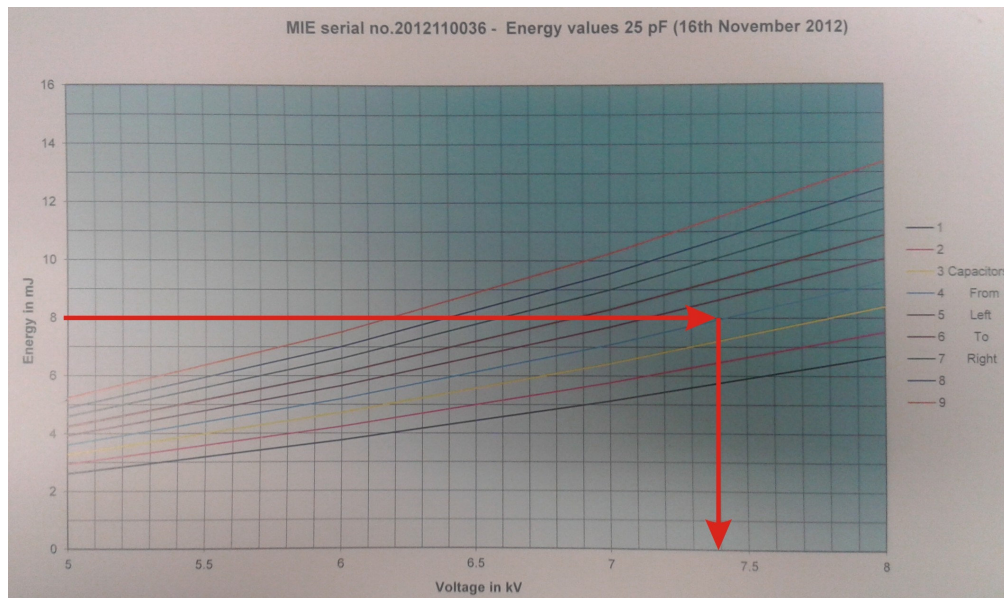


Abbildung 4.6: Diagramm 25 pF Kondensatorzeile, für die Energie von 8 mJ ist bei 4 Kondensatoren eine Spannung von 7,4 kV notwendig.

Mit zunehmender Anzahl von aktivierten Kondensatoren erhöht sich die Zeit, in der die Spannung an den Elektroden nach einem Funkenüberschlag wieder vollständig aufgeladen ist. Gleiches gilt für hohe Spannungen. Erweist sich diese Tatsache bei der Versuchsdurchführung als zu hinderlich, kann versucht werden, die Energie mit anderen Einstellungen zu erzeugen.

Vor jedem Versuch ist sicherzustellen, dass der Regler für die Stromstärke (I1) auf die maximal Stellung eingestellt ist.

Um sicher zu stellen, dass die Energie des Funkens der gewünschten Energie entspricht, muss zum Zeitpunkt des Funkenüberschlages die Spannung an den Elektroden kontrolliert werden. Die Kontrolle der Funkenspannung erfolgt mit Hilfe der Spannungsskala, welche auf dem Auswertungsbogen des Flachscreibers erstellt wird (siehe dazu Abschnitt 4.3.3). Kommt es nicht oder zu früh zum Funkenüberschlag muss der Elektrodenabstand angepasst werden (siehe dazu Abschnitt 4.3.4). Tritt der Funkenüberschlag bei der gewünschten und eingestellten Spannung auf, kann mit dem Experiment begonnen werden.

4.3.3 Einstellungen am Flachsreiber

Um die vom Flachsreiber aufgezeichnete Spannung exakt bestimmen zu können, muss auf dem Datenpapier des Flachsreibers eine Spannungsskala erstellt werden. Zur Erstellung dieser Skala muss zunächst der Abstand der Elektroden im Hartmann-Rohr soweit vergrößert werden, dass es bei maximaler Spannung nicht zu einem Funkenüberschlag kommt. Anschließend wird durch Absenken und Anheben der Schreibfeder (Abbildung 4.2) die jeweilige Spannung auf dem Auswertungsbogen markiert. Der genaue Wert der Spannung muss dabei auf dem Spannungsmesser des MIE III abgelesen werden (K1 siehe Abbildung 4.1). Um später die exakte Spannung ermitteln zu können, müssen die erzeugten Punkte auf dem Auswertungsbogen beschriftet werden. In Abbildung 4.7 ist eine solche Spannungsskala veranschaulicht.

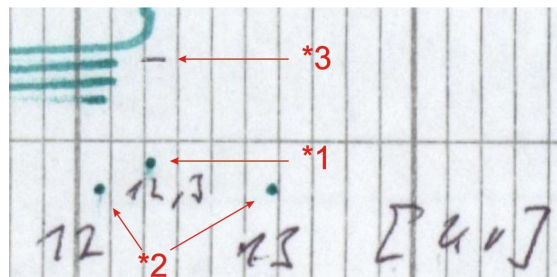


Abbildung 4.7: Spannungsskala (vergrößerte Darstellung), *1 aus den Energietabellen ermittelte Spannung, *2 ganzzahliger Vorgänger und Nachfolger der Spannung, *3 Markierung der Aufwirbelung (siehe Abschnitt 4.3.6).

Wie aus Abbildung 4.7 ersichtlich, sollte der ganzzahlige Vorgänger und Nachfolger der ermittelten Spannung sowie die ermittelte Spannung selbst in der Skala dargestellt werden. Somit ist es im Anschluss möglich, die exakte Spannung einzelner Versuche durch Ausmessen zu bestimmen. In der Regel entspricht dabei 1 mm auf dem Auswertungsbogen 0,1 kV.

Es empfiehlt sich, die Skala vor jedem Versuch sowie nach dem Wechsel von Kondensatoren oder Kondensatorzeilen neu zu erstellen. Wird bei mehreren Versuchen keine Veränderung der Energieeinstellungen vorgenommen, ist es ausreichend die Skala vor dem ersten Versuch zu erstellen. Bei nachfolgenden Versuchen ist eine Markierung der benötigten und aus den Energietabellen ermittelten Spannung hinreichend.

Um später die Auswertung zu vereinfachen, muss als Letztes die Geschwindigkeit des Papiervorschubes eingestellt werden. Grundsätzlich ist für eine hohe Frequenz des Funkens eine hohe und für eine niedrigere Funkenfrequenz eine kleine Geschwindigkeit des Papiervorschubes empfehlenswert. Geschwindigkeiten zwischen 0,2 mm/s und 1 mm/s haben sich dabei als geeignet erwiesen.

Die Geschwindigkeit des Papiervorschubes ist richtig eingestellt, wenn sich die Spannungsspitzen auf dem Auswertungsbogen deutlich voneinander unterscheiden lassen. Verschwimmen die aufgezeichneten Spannungsspitzen ineinander, ist eine Anpassung der Geschwindigkeit des Papiervorschubes nötig.

4.3.4 Anpassen des Elektrodenabstandes

Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, hat der Elektrodenabstand entscheidenden Einfluss auf die Spannung und somit auf die Energie des Funkens an den Elektroden.

Von vornherein ist zu beachten, dass der Elektrodenabstand niemals kleiner als 2 mm sein darf.

Im Regelfall nimmt mit steigender Spannung auch der Elektrodenabstand zu. Dabei ist es schwerer den Elektrodenabstand für hohe Spannungen einzustellen. Den Elektrodenabstand so einzustellen, dass der Funke genau bei der gewünschten Spannung auftritt (siehe dazu Abschnitt 4.3.2), hat sich in der Praxis als sehr schwierig und zeitaufwendig erwiesen. Es wird daher empfohlen, den Elektrodenabstand mit einer Spannungstoleranz von $\pm 0,1$ kV einzustellen. Aus Tabelle 2.6 ist zu entnehmen, dass der dadurch entstandene absolute Fehler maximal 1,81 % beträgt und daher als minimal betrachtet werden kann. Der Zeitaufwand für eine genauere Einstellung des Elektrodenabstandes steht in keinem Verhältnis zu dem dadurch besseren Ergebnis.

Ist der Funke zwischen den Elektroden aufgetreten, bevor die gewünschte Spannung erreicht wurde, ist der Elektrodenabstand zu vergrößern. Andernfalls muss der Abstand zwischen den Elektroden verkleinert werden. Wird beobachtet, dass die Spannung mehr als $\pm 0,1$ kV über die gewünschte Spannung hinaus steigt, muss diese mittels des Spannungsreglers L1 am MIE III neu eingestellt werden.

Bevor am Hartmann-Rohr der Elektrodenabstand verändert wird, muss die Hochspannung (H1) am MIE III ausgeschaltet werden. Zudem ist es ratsam die Elektroden zu entladen. Verletzungen, verursacht durch elektrische Schläge, sollen so vermieden werden.

Sobald sichergestellt ist, dass an den Elektroden keine Spannung anliegt, ist es möglich die Stecker von den Elektroden (B3) zu lösen. Anschließend kann der Elektrodenabstand mit einem geeigneten Werkzeug angepasst werden. Nach der Korrektur des Elektrodenabstandes sind die Verbindungen zu den Elektroden (B3) wieder herzustellen.

Für einen reibungslosen Versuchsablauf ist die regelmäßige Wiederkehr des Funkens bedeutend. Bei der Einstellung des Elektrodenabstand muss darauf geachtet werden, dass der Funke mit einer Regelmäßigkeit von maximal 1 Hz auftreten darf. Ist die Wiederkehr des Funkens häufiger, kann es zu Abweichungen der Funkenenergie kommen. Eine Wiederkehr des Funkens von weniger als 1 Hz ist unproblematisch, verzögert allerdings den Versuchsablauf.

4.3.5 Erzeugung kleiner Energien

Wie bereits in Abschnitt 2.6 erwähnt, ist die kleinste Energie, welche sicher mit dem MIE III (mit der Seriennummer 2012110036) erzeugt werden kann, 4,82 mJ. Untersuchungen ergaben, dass kleinere Energien nur mit der Akzeptanz eines relativ hohen und nur sehr schwer zu bestimmenden Fehlers erzeugt werden können.

Energien von weniger als 4,82 mJ können nur mit der Streukapazität der 25 pF oder der 100 pF Kondensatorzeile erzeugt werden. Dazu ist bei einem Elektrodenabstand von 2 mm die maximal mögliche Spannung einzustellen.

Bei dieser Verfahrensweise liegt die Funkenfrequenz deutlich über 1 Hz und ähnelt einer langsamen Dauerfunkenstrecke. Dies spiegelt sich auch in der Spannungsaufzeichnung des Flachschrifters wieder. In Abbildung 4.8 ist eine solche Aufzeichnung exemplarisch dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Funkenspannung um einen festen Wert schwankt, einzelne Funken jedoch stark abweichen. Durch langsames Reduzieren der Spannung kann der Wert, um welchen die Spannung schwankt, langsam erhöht werden. Auf diese Weise ist es möglich die Funkenenergie unterhalb von 4,82 mJ etwas zu steuern. Der Wert, um welchen die Spannung schwankt, kann dabei bestenfalls durch eine gute Schätzung ermittelt werden.

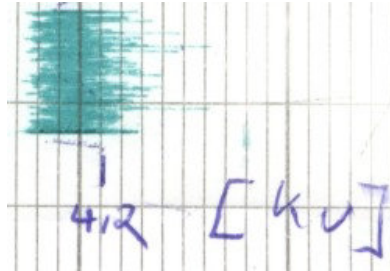


Abbildung 4.8: Aufzeichnung der Spannung bei 2 mm Elektrodenabstand und maximaler Spannung.

Mit Hilfe der Diagramme aus [22] oder durch Inter- bzw. Extrapolation der Tabellenwerte aus [22] kann die Energie der geschätzten Spannung ermittelt werden. Die so ermittelte Energie liegt im Regelfall unter der in Tabelle 2.5 beschriebenen sicher erreichbaren Minimalenergie.

Bei Verwendung dieser Methode ist keine eindeutige Bestimmung der Mindestzündenergie möglich. Kommt es zur Zündung wurde jedoch nachgewiesen, dass die so erzeugte Energie ausreicht, um die entsprechende Probe zu entzünden. Die Mindestzündenergie der so untersuchten Probe entspricht daher entweder genau dieser Energie oder ist so klein, dass sie mit dem MIE III nicht eindeutig ermittelt werden kann.

4.3.6 Versuchsdurchführung

In Abbildung 4.9 ist der Bereich, in dem es zu einer Staubexplosion kommen kann, in Abhängigkeit von Staubkonzentration in Luft und Zündenergie dargestellt. Die parabelförmige Kurve zeigt die Abhängigkeit der Zündenergie von der Konzentration. Der zündfähige Bereich befindet sich oberhalb der parabelförmigen Kurve. Durch Versuche gilt es, das Minimum dieser Kurve und damit die Mindestzündenergie zu finden.

Dabei muss die zu untersuchende Probe zunächst so gewählt werden, dass deren Konzentration sicher im zündfähigen Bereich liegt. Anschließend wird die Energie, welche zur Zündung aufgewendet wird, solange halbiert, bis es zu einer eindeutigen Nichtzündung kommt (Abschnitt 2.2). Da nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann, ob diese ermittelte Energie die Mindestzündenergie ist und ob sich die Energie auf der auf- oder absteigenden Seite der Parabel befindet, muss als nächstes die Konzentration bei gleich-

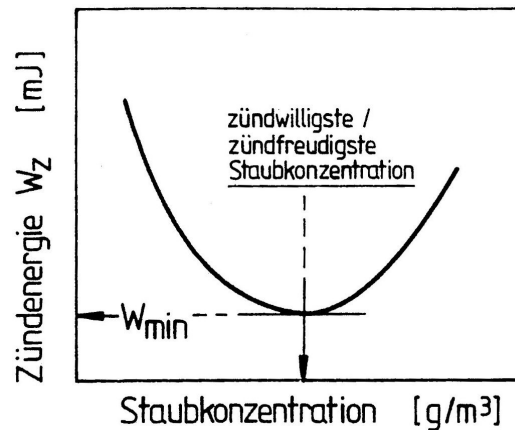


Abbildung 4.9: Einfluss der Staubkonzentration auf die Mindestzündenergie [6]

bleibender Energie variiert werden. Führt eine Änderung der Konzentration zu einer Zündung, wird anschließend die Energie halbiert. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis die Mindestzündenergie eindeutig bestimmt ist. Dies ist der Fall, wenn ausgehend von einem Wertepaar aus Konzentration und Zündenergie, eine Reduzierung der Energie sowie eine positive und negative Variation der Konzentration zu einer Nichtzündung führt, bei dem Wertepaar selbst jedoch eine Zündung beobachtet wurde.

Das Experiment beginnt mit dem Abwiegen der Probe. Mit dem Gewicht der Probe lässt sich die Konzentration der aufgewirbelten Staubprobe im Hartmann-Rohr ermitteln. Die abgewogene Probe muss in den dafür vorgesehenen Tiegel (K3) eingefüllt werden. Anschließend wird das Hartmann-Rohr auf der entsprechenden Verankerung angebracht. Ist dies geschehen, kann die Hochspannung am MIE III (H1) eingeschaltet werden. Daraufhin muss erneut die Funkenspannung kontrolliert werden. Entspricht die Funkenspannung nicht der gewünschten Spannung, ist der Elektrodenabstand erneut anzupassen (siehe Abschnitt 4.3.4). Abschließend wird die obere Öffnung des Hartmann-Rohres verschlossen. Dies geschieht mittels des dafür vorgesehenen Deckels (E3) und dem entsprechenden Filterpapier. Das Filterpapier wird dazu in den Deckel eingelegt. Der Deckel wird auf die obere Öffnung des Hartmann-Rohres montiert und „handfest“ verschraubt. Wird der Deckel nicht oder zu locker fixiert, besteht die Gefahr, dass sich das Filterpapier durch den Druckanstieg beim Aufwirbeln der Probe löst oder reißt, obwohl es nicht zu einer Zündung gekommen ist. Ist der Deckel nicht richtig fixiert, kann er zudem bei einer Explosion des Staub/Luft-Gemisches nach oben geschleudert werden.

Sind alle Voreinstellungen durchgeführt, kann die Staubprobe durch Drücken des „Air“-Knopfes auf der Fernbedienung (I3) aufgewirbelt werden. Dabei darf der obere Rand der Staubwolke maximal bis zur verschlossenen oberen Öffnung des Hartmann-Rohres reichen. Wird ein Großteil der Staubwolke gegen das Filterpapier geschleudert, muss der Luftdruck der eingeblasenen Luft reduziert werden. Das Anpassen des Luftdrucks erfolgt mit dem dafür vorgesehenen Regler H3.

Nach dem Aufwirbeln kann es zur Anhaftung des Staubes an den Innenwänden des Hartmann-Rohres sowie an den Elektroden kommen. Die angehaftete Staubmenge führt zu einer Änderung der aufgewirbelten Staubmenge und somit zur Änderung der Konzentration des Staub/Luft-Gemisches. Um die Versuche aufgrund dessen nicht vorzeitig beenden zu müssen, kann durch leichtes Klopfen gegen das Hartmann-Rohr versucht werden, den Staub von den Innenwänden und den Elektroden zu lösen. Eine Staubprobe darf dabei maximal fünfmal aufgewirbelt werden. Der Staubverlust durch Undichtigkeiten am Hartmann-Rohr würden sonst zu einer Änderung der Konzentration und damit zu falschen Versuchsergebnissen führen. Wird vor dem fünften Versuch beobachtet, dass die aufgewirbelte Staubmenge nicht mehr der ursprünglich eingefüllten entspricht, muss der Versuch ebenfalls beendet werden. Kommt es zu einer Flammenerscheinung, welche jedoch keine Zündung darstellt (siehe Abschnitt 2.1), ist der Versuch ebenfalls zu beenden. Um eine eindeutige Nichtzündung zu erhalten (siehe Abschnitt 2.2, können daher mehrere Durchgänge notwendig sein. Nach einer Zündung (siehe Abschnitt 2.1) folgt das weitere Vorgehen nach dem oben beschriebenen Verfahren.

Während der Versuche muss der Flachsreiber eingeschaltet, der Papiervorschub aktiviert und die Schreibfeder abgesenkt sein. Um später die genaue Spannung der Funken zum Zeitpunkt der Aufwirbelung ausmessen zu können, müssen die Aufwirbelungen auf dem Auswertungsbogen des Flachsreibers markiert werden. Dies geschieht, wie in Abbildung 4.7 zu sehen, mittels einer kleinen, händisch eingetragenen, waagerechten Markierung neben der entsprechenden Spannungsspitze. Auf diese Weise kann bei der späteren Auswertung die Spannung und somit die Energie einer Zündung bzw. einer Nichtzündung ermittelt werden.

Nach einem durchgeführten Versuch muss das Hartmann-Rohr gereinigt werden. Im Idealfall ist ein gründliches Ausbürsten mit einer Flaschenbürste ausreichend. Bei einer stärkeren Verschmutzung, z. B. nach einer Zündung, ist das Hartmann-Rohr komplett zu reinigen. Verunreinigte Elektroden können die Ergebnisse verfälschen bzw. das Einstellen des Elektrodenabstandes erheblich erschweren. Die Elektroden müssen daher regelmäßig auf Verunreinigungen überprüft werden. Wurden Verunreinigungen festgestellt, können diese mit feinem Schleifpapier entfernt werden.

4.3.7 Mögliche Fehler und Lösungen

Während eines Versuches können diverse, durch die Apparate verursachte, Fehler auftreten. Diese Fehler sind oftmals durch ungewöhnliche Spannungsanzeigen auf dem Flachschreiber sowie am MIE III (K1) ersichtlich. Da ein Abbruch und Neustart des laufenden Versuches oft mit einem erheblichen Zeitverlust verbunden ist, empfiehlt es sich, einige Fehler während des laufenden Versuches zu beheben.

In der folgenden Tabelle sind mögliche Fehler, welche beobachtet wurden, beschrieben und Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die dargestellten Fehler erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Fehler	Lösungsmöglichkeiten
Funken springen während des Versuches nach dem Aufwirbeln nicht mehr über.	<ul style="list-style-type: none"> • Leicht gegen das Hartmann-Rohr klopfen, sodass möglicher Staub von den Elektroden fällt. • Erneut Aufwirbeln. • Versuch abbrechen und Elektroden reinigen.
Es lässt sich keine gleichbleibende Spannung einstellen. Jeder Funke hat eine andere Spannung.	<ul style="list-style-type: none"> • Elektroden putzen. • Elektrodenabstand neu einstellen. Wenn die Funkenfrequenz höher als 1 Hz ist, kann sich keine gleichbleibende Energie einstellen.
Die gewünschte Spannung lässt sich nicht einstellen. Der Funke springt entweder zu früh, zu spät oder gar nicht über.	<ul style="list-style-type: none"> • Elektroden putzen. • Gewünschte Spannung am Spannungsregler L1 einstellen → Elektrodenabstand soweit es geht anpassen → Spannung am Spannungsregler L1 erhöhen, bis Funke bei gewünschter Energie überspringt (Kontrolle auf dem Flachschreiber) <p>Diese Methode kann zu unsicheren Ergebnissen führen, da die Spannung an den Elektroden über die gewünschte Spannung hinaus steigen kann. Ein zu großes Überschreiten der gewünschten Spannung ist daher zu vermeiden.</p>

Fehler	Lösungsmöglichkeiten
<p>Die Spannung lädt von Beginn an nicht vollständig auf.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kontrollieren, ob Kondensatorstangen richtig aktiviert sind. • Kontrollieren, ob nur ein „Row Selector“ aktiviert ist. • Wenn dies nicht zur Lösung führt, versuchen, die gewünschte Energie mit einer anderen Einstellung zu erzeugen.
<p>Die Spannung lädt nach dem Aufwirbeln nicht mehr komplett auf.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hochspannung am MIE III ausschalten (H1) → warten bis an den Elektroden keine Spannung mehr anliegt → anschließend Hochspannung wieder einschalten (H1) • Wenn der Fehler mehrmals bei den gleichen Einstellungen auftritt und sich nicht beheben lässt, ist es besser die Energie mit einer anderen Einstellungen zu erzeugen.
<p>Die auf dem Flachsreiber angezeigte Spannung stimmt nicht mit der am MIE III angezeigten Spannung (K1) überein bzw. steigt während des Versuches sprunghaft an.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Am Flachsreiber mittels, des Stellrades (O2), Nullpunkt überprüfen. Möglicherweise wurde das Stellrad unbeabsichtigt betätigt. • Versuch abbrechen und die Spannungsskala neu erstellen.
<p>Die Zeit, bis die Spannung aufgeladen ist, ist sehr lang.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Versuchen, die Energie mit weniger Kondensatoren zu erzeugen.
<p>Beim Erstellen der Spannungsskala fällt auf, dass der Abstand zwischen ganzzahligen Spannungen unterschiedlich groß ist.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Versuchen, die Energie mit anderen Einstellungen zu erzeugen. • Wenn dies nicht erfolgreich ist, das Experiment abbrechen. Alle Geräte ausschalten und die Versuche an einem anderen Tag fortsetzen.

5 Zusammenfassung

5.1 Versuchsauswertung

Die Mindestzündenergie von Mikrokristalliner Cellulose konnte nicht bestimmt werden, da es bei der Untersuchung des Reinstoffes auch bei hohen Energien zu keiner Zündung des Staubes gekommen ist. Ergebnisse konnten nur für das Staubgemisch mit 95 % Mikrokristalliner Cellulose und 5 % Dimenhydrinat ermittelt werden. Es wurde dabei beobachtet, dass sich die wesentlich größeren Staubpartikel der Mikrokristallinen Cellulose weiter im Hartmann-Rohr ausbreiteten, als das Dimenhydrinat. Das Staubgemisch war somit im Hartmann-Rohr nicht homogen verteilt. Der Anteil des 5%ig zugemischten Dimenhydrinat würde ohne die Mikrokristalline Cellulose eine Konzentration von ca. $33,4 \text{ g/m}^3$ aufweisen und damit über der ermittelten unteren Explosionsgrenze von Dimenhydrinat liegen. Da eine Entmischung beobachtet wurde, kann nicht mit eindeutiger Sicherheit gesagt werden, ob bei der Zündung des Staubgemisches Mikrokristalline Cellulose / Dimenhydrinat das Staubgemisch oder nur das Dimenhydrinat zu den beobachteten Zündungen beigetragen hat. Aus den Ergebnissen kann deshalb keine Formel abgeleitet werden, welche die Mindestzündenergie von Stäuben beschreibt.

Die Untersuchung von Magnesiumstearat und Dimenhydrinat ergab eine ähnliche Mindestzündenergie beider Stäube. Aufgrund der Ähnlichkeit der Mindestzündenergien der Stoffe, wäre es unmöglich den Einfluss auf die Mindestzündenergie, welcher durch das Mischen beider Stoffe entstehen würde, zu ermitteln. Es konnte nicht sicher festgestellt werden, ob ein möglicher Einfluss durch das Mischen der Stoffe oder durch Messungenauigkeiten verursacht wird. Eine Formel zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Staubgemischen auf Grundlage dieser Werte würde, wenn überhaupt, nur mit einer extrem hohen Ungenauigkeit entwickelt werden können. Auf eine Untersuchung des Staubgemisches 95 % Magnesiumstearat / 5 % Dimenhydrinat wurde daher verzichtet.

Die ermittelten Mindestzündenergien von Povidon und Dimenhydrinat weichen deutlich voneinander ab. Die Entwicklung einer Formel zur Berechnung der Mindestzündenergie von Staubgemischen könnte so theoretisch möglich sein. Entgegen der grundsätzlichen Annahme, dass sich die Mindestzündenergie eines Staubgemisches innerhalb eines Bereiches bewegt, dessen Grenzen die Mindestzündenergien der Reinstoffe des Staubgemisches bilden, ist die Mindestzündenergie des Staubgemisches (95 % Povidon und 5 % Dimenhydrinat) wesentlich höher als die der beteiligten Reinstoffe. Die Entwicklung einer Formel zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Staubgemischen war somit nicht möglich. Zudem könnte eine solche Formel mit den zur Verfügung stehenden Stäuben nicht validiert werden. Zusätzlich wurde, ähnlich wie bei den Versuchen mit Mikrokristalliner

Cellulose, auch bei Versuchen mit Povidon und Dimenhydrinat beim Aufwirbeln der Staubmischung eine Entmischung der Stoffe beobachtet. Die Entmischung war zwar nicht so deutlich wie bei Mikrokristalliner Cellulose, könnte aber dennoch zu einer Abweichung der gemessenen Mindestzündenergie führen.

Mit den verwendeten Stäuben ist die Entwicklung einer Formel zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Staubgemischen nicht möglich.

Zudem ist die MIE III Versuchsanordnung aufgrund

- der großen Unsicherheit bei der Bestimmung von Zündenergien von weniger als 4,82 mJ,
- der komplizierten Handhabung,
- einer ungenauen Auswertung der tatsächlichen Funkenspannung (analoger Flachsreiber),
- fehlender Möglichkeit das Aufwirbeln des Staubes und den Zündfunken zu synchronisieren und somit fehlender Berücksichtigung der Zündverzugszeit und
- einem systembedingten Elektrodenabstand von weniger als 6 mm mit einer einhergehenden Verfälschung der Mindestzündenergie

nur bedingt für die themengebende Untersuchung, bei den verwendeten Stäuben, geeignet.

5.2 Ausblick

5.2.1 Hinweise zu zukünftigen Untersuchungen der Mindestzündenergie von Staubgemischen

Aus der vorliegenden Arbeit sind Hinweise für zukünftige Versuche zur Herleitung einer mathematischen Beziehung für die Bestimmung der Mindestzündenergie von Staubgemischen ableitbar. Es ist denkbar, mit einer noch zu entwickelnden Formel die Mindestzündenergie von Staubgemischen zu errechnen. Die Entwicklung einer solchen Formel ist allerdings nicht möglich, wenn die Mindestzündenergie der Ausgangsstoffe zu nahe beieinander liegen.

Die Mindestzündenergien von den Reinstäuben, welche für eine Staubmischung verwendet werden, sollten sich daher, bei zukünftigen Untersuchungen zu demselben Thema, deutlich voneinander unterscheiden.

Es zeigte sich, dass sich Staubgemische beim Aufwirbeln entmischen, wenn die Partikelgröße der einzelnen Stäube deutlich voneinander abweicht. Dadurch kann es zur Zündung von nur einem Staub aus dem Staubgemisch kommen. Eine eindeutige Aussage zur Mindestzündenergie des Staubgemisches ist damit allerdings nicht möglich. Um nach dem Aufwirbeln eine möglichst homogene Vermischung zu erzielen, sollten daher die Partikelgröße der zu mischenden Stäube annähernd identisch sein. Auch das Staubungsverhalten der vermischten Stäube sollte vergleichbar sein.

5.2.2 Stochastische Berechnung der Mindestzündenergie

Aus statistischer Sicht ist die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Nichtzündung nur von der Anzahl der Versuche (n) und der Zündwahrscheinlichkeit (p_z) abhängig. Wird für die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Nichtzündung (P_{NZ}) ein beliebiger Wert (zwischen Null und Eins) festgelegt, kann die unbekannte Zündwahrscheinlichkeit (p_z) in Abhängigkeit von der Versuchsanzahl aus einem, wie in Abbildung 2.1 dargestellten, Diagramm ermittelt werden. Selbiges Ergebnis ergibt sich, wenn Formel 2.3 nach der Zündwahrscheinlichkeit (p_z) umgestellt wird.

$$p_z = 1 - \sqrt[n]{P_{NZ}} \quad (5.1)$$

Wäre es nun möglich für jeden Staub die Abhängigkeit der Zündwahrscheinlichkeit von der Zündenergie am zündwilligsten Gemisch zu ermitteln, könnte die Mindestzündenergie eines jeden Staubes berechnet werden. Der genaue Verlauf von kleineren Zündwahrscheinlichkeiten als der Zündwahrscheinlichkeit der Mindestzündenergie ist dabei vernachlässigbar. In Abbildung 5.1 ist dies veranschaulicht.

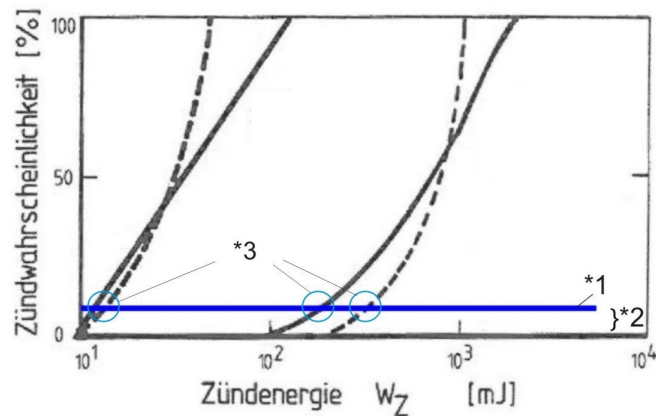


Abbildung 5.1: *1 Zündwahrscheinlichkeit an der Mindestzündenergie; *2 Bereich kann vernachlässigt werden; *3 Zündwahrscheinlichkeit der Mindestzündenergie wenn, die Graphen den Verlauf der Zündwahrscheinlichkeit am zündwilligsten Gemisch zeigen [modifizierte Darstellung aus [6]]

Die Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Abhängigkeit der Zündwahrscheinlichkeit von der Zündenergie wäre sinnvoll, wenn mit einem solchen Verfahren der Verlauf der Zündwahrscheinlichkeit am zündwilligsten Gemisch bestimmt werden kann und der Arbeitsaufwand dieses Verfahrens geringer ist als jener, welche die experimentelle Bestimmung der Mindestzündenergie einfordert.

Literaturverzeichnis

- [1] GLARNER, Thomas: *Temperatureinfluss auf das Explosions- und Zündverhalten brennbarer Stäube*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Diss., 1983
- [2] LEUSCKE, G. ; OSSWALD, R.: Bedeutung und Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen brennbarer Stäube. In: *VDI-Berichte 304, Sichere Handhabung brennbarer Stäube* (1978), S. 29 – 38
- [3] BUSSENIUS, Siegfried: *Brand- und Explosionsschutz in der Industrie*. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1982
- [4] KALKERT, Norbert: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Explosionskenndaten von Mischungen aus mehreren gas- und staubförmigen Brennstoffkomponenten und Luft*, Universität Dortmund, Diss., 1980
- [5] BERTHOLD, Wolfgang: Mindestzündenergie - Prüfverfahren. In: *VDI-Berichte 494, Sichere Handhabung brennbarer Stäube* (1984), S. 105 – 108
- [6] BERTHOLD, Werner: *VDI Fortschrittsbericht, Reihe: 3 Nr. 134, Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen*. Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 1987
- [7] BARTKNECHT, Wolfgang ; SIWEK, R.: Bedeutung von Mindestzündenergie und Zündtemperatur für die Beurteilung der Zündwirksamkeit von Zündquellen in Staub/Luft-Gemischen. In: *Staub - Reinhaltung der Luft 54* (1994), S. 325 – 330 bzw. 415 – 421
- [8] SCHÄFER, H. K.: Die Vermeidung von Zündquellen für Staubexplosionen. In: *VDI-Berichte 304, Sichere Handhabung brennbarer Stäube* (1978), S. 103 – S. 106
- [9] RITTER, Klaus: *Die Zündwirksamkeit mechanisch erzeugter Funken gegenüber Gas/Luft- und Staub/Luft-Gemischen*, Universität Fridericiana Karlsruhe (TH), Diss., 1984
- [10] BARTKNECHT, Wolfgang: *VDI Fortschrittsbericht, Reihe: 3 Nr. 180, Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken und heißen Oberflächen in Staub/Luft- und Brenngas/Luft-Gemischen*. Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 1989
- [11] GLARNER, Thomas: Mindestzündenergie - Einfluss der Temperatur. In: *VDI-Berichte 494, Sichere Handhabung brennbarer Stäube* (1984), S. 109 – 118

- [12] HÄHNEL, Erich (Hrsg.): *Lexikon Brandschutz*. 2. überarbeitete Auflage. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1986
- [13] BUNDESVERBAND DER UNFALLKASSEN: *Richtlinien für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen -Richtlinien „Statische Elektrizität“*. Fockensteinstraße 1, 81539 München, Januar 1992
- [14] *DIN EN 13821, Explosionsfähige Atmosphären Explosionsschutz Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen*. Deutsches Institut für Normung e.V., März 2003
- [15] CESANA, Christoph ; SIWEK, Richard: *Handbuch MIKE 3*. Dinkelbergstrasse 1, CH-4127, Birsfelden, Schweiz: Kühner AG, März 2010
- [16] DR.ECKHOFF, R. K.: Auslösung von Staubexplosionen durch elektrische Funken. In: *VDI-Berichte 304, Sichere Handhabung brennbarer Stäube* (1978), S. 61 – 67
- [17] STEEN, Henrikus (Hrsg.): *Handbuch des Explosionsschutzes*. WILEY-VCH Verlag, 2000
- [18] ZEEUWEN, J.P. ; VAN LAAR, G.F.M: An overview of the research at TNO in the dust explosion field over the last decade. In: *VDI-Berichte 494, Sichere Handhabung brennbarer Stäube* (1984), S. 81 – 84
- [19] FRANKE, H.: Bestimmung der Mindestzündenergie von Kohlestaub/Methan/Luft-Gemischen (Hybride Gemische). In: *VDI-Berichte 304, Sichere Handhabung brennbarer Stäube* (1978), S. 69 – S. 72
- [20] CHILWORTH A DEKRA COMPANY (Hrsg.): *User Information an Instructions*. Beta House, Southampton Science Park, Southampton SO16 7NS, United Kingdom: Chilworth a DEKRA company, November 2012
- [21] BARTKNECHT, Werner: *Untersuchungen des Explosions- und Zündverhaltens brennbarer Stäube und hybrider Gemische*. VDI Verlag, 1985 (Schriftenreihe "Humanisierung des Arbeitslebens"Band 64)
- [22] CHILWORTH A DEKRA COMPANY (Hrsg.): *Minimum Ignition Energy III Apparatus Calibration Certification for MIE Serial Number 2012110036*. Beta House, Southampton Science Park, Southampton SO16 7NS, United Kingdom: Chilworth a DEKRA company, November 2012
- [23] GABEL, Dieter: *Persönliche Mitteilung*. Otto von Guericke Universität Magdeburg, 2013

A Anhang Zündungen und Flammerscheinungen

A.1 Zündung hoher Heftigkeit

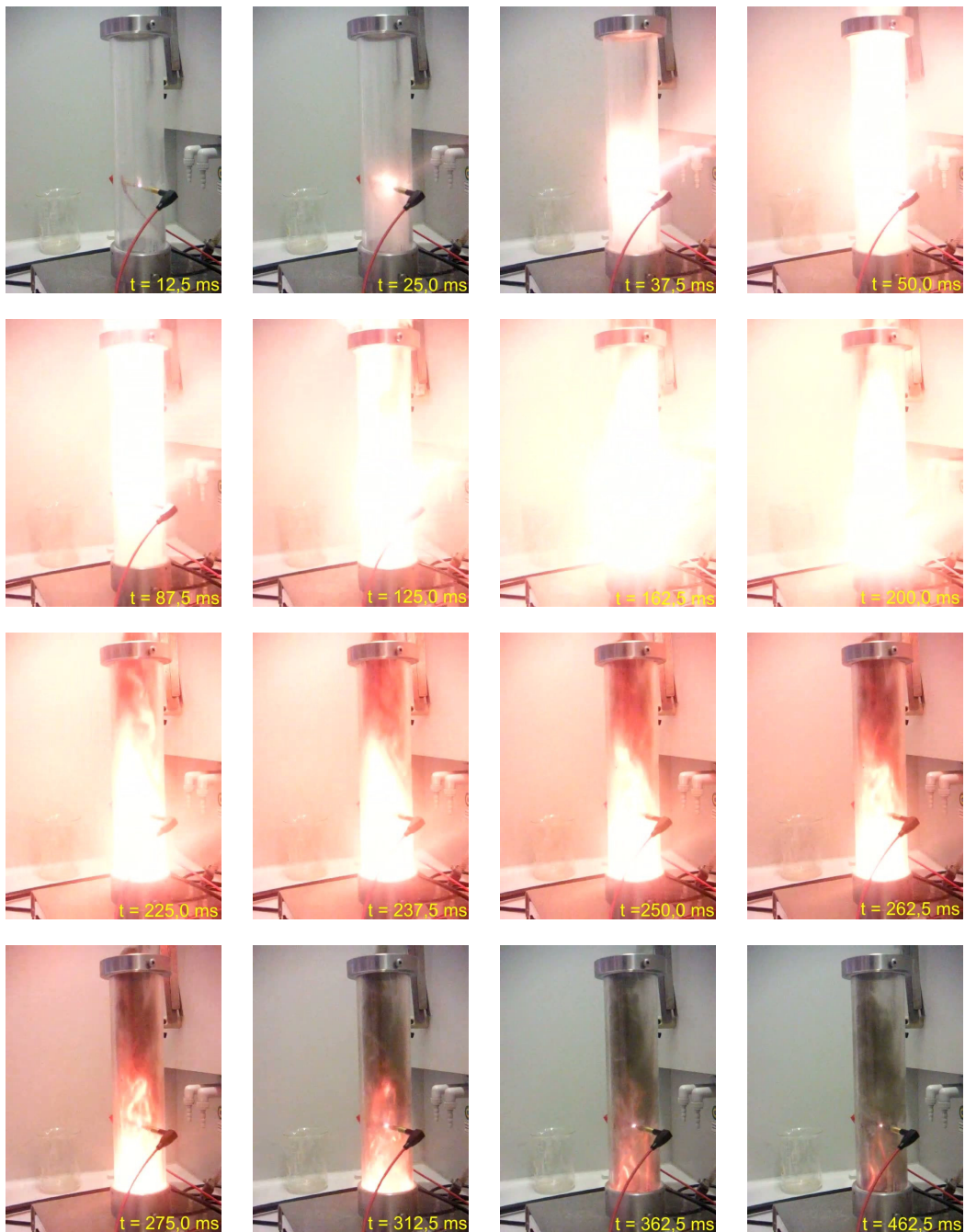


Abbildung A.1: Zündung hoher Heftigkeit.

A.2 Zündung mittlerer Heftigkeit

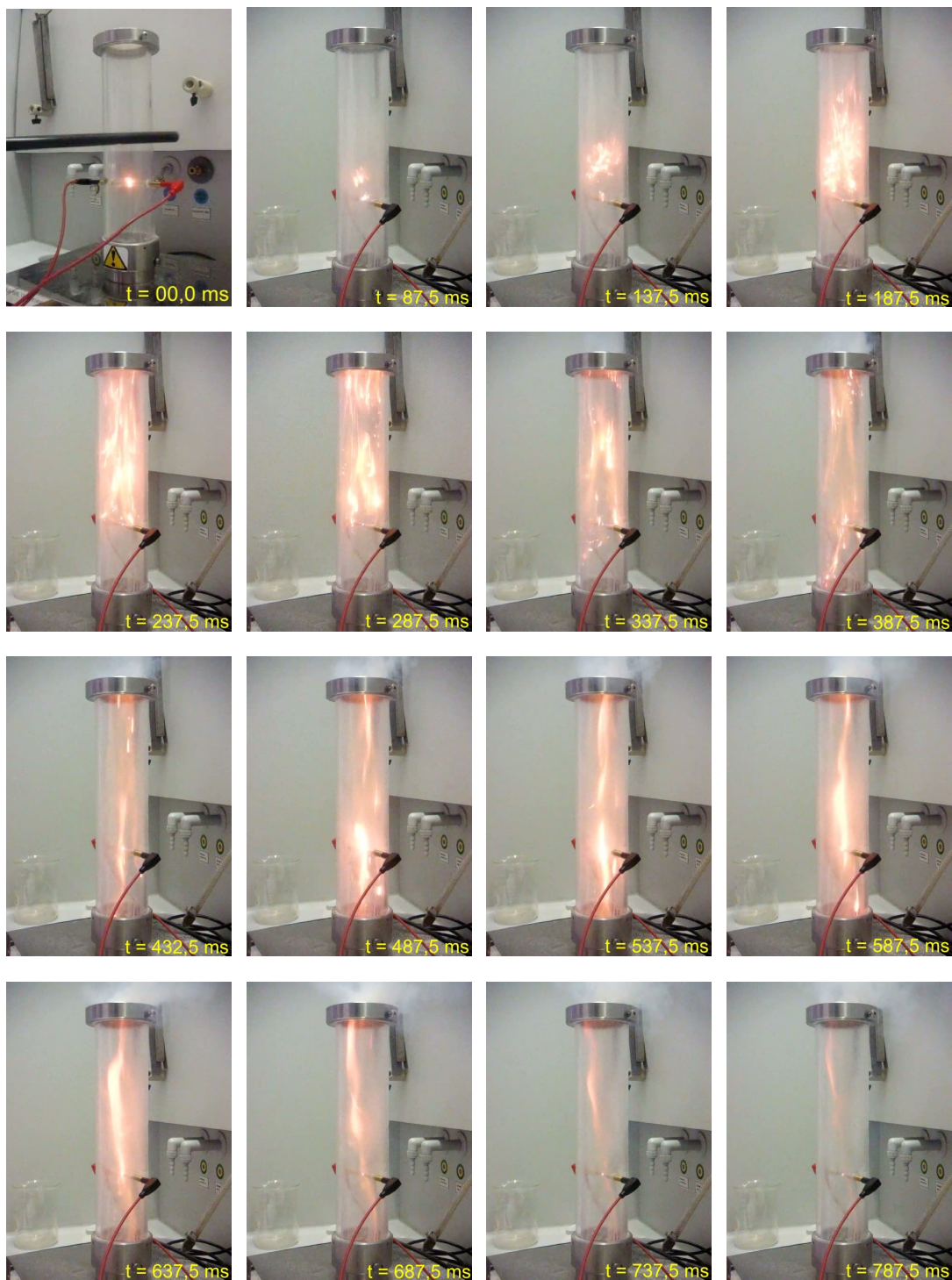


Abbildung A.2: Eindeutige Zündung.

A.3 Zündung geringer Heftigkeit



Abbildung A.3: Nicht das ganze Hartmann-Rohr ist von Flammen ausgefüllt.

A.4 Zündung sehr geringer Heftigkeit

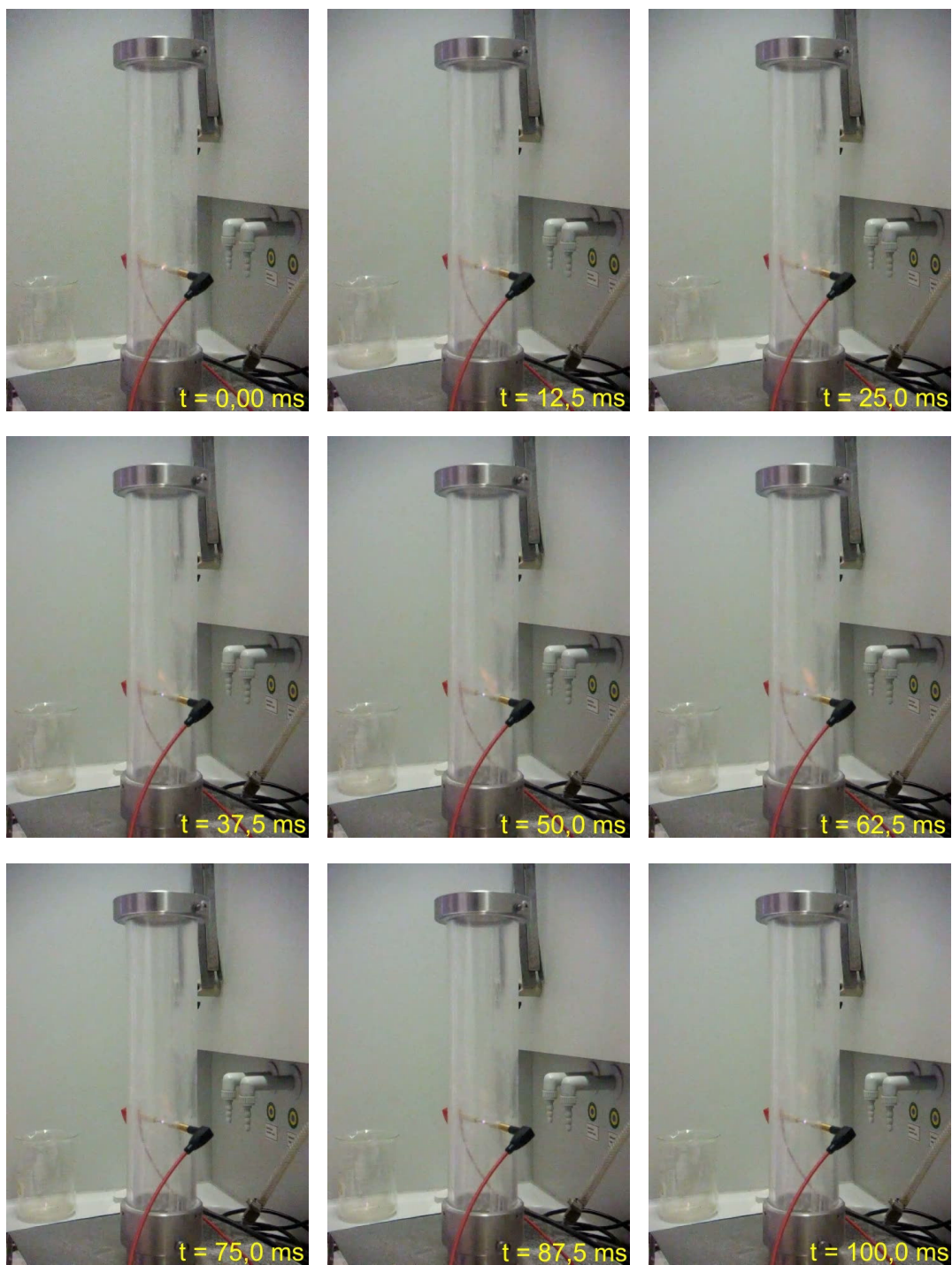


Abbildung A.4: Teil 1 Flammenreaktion welche gerade noch als Zündung gewertet werden kann.

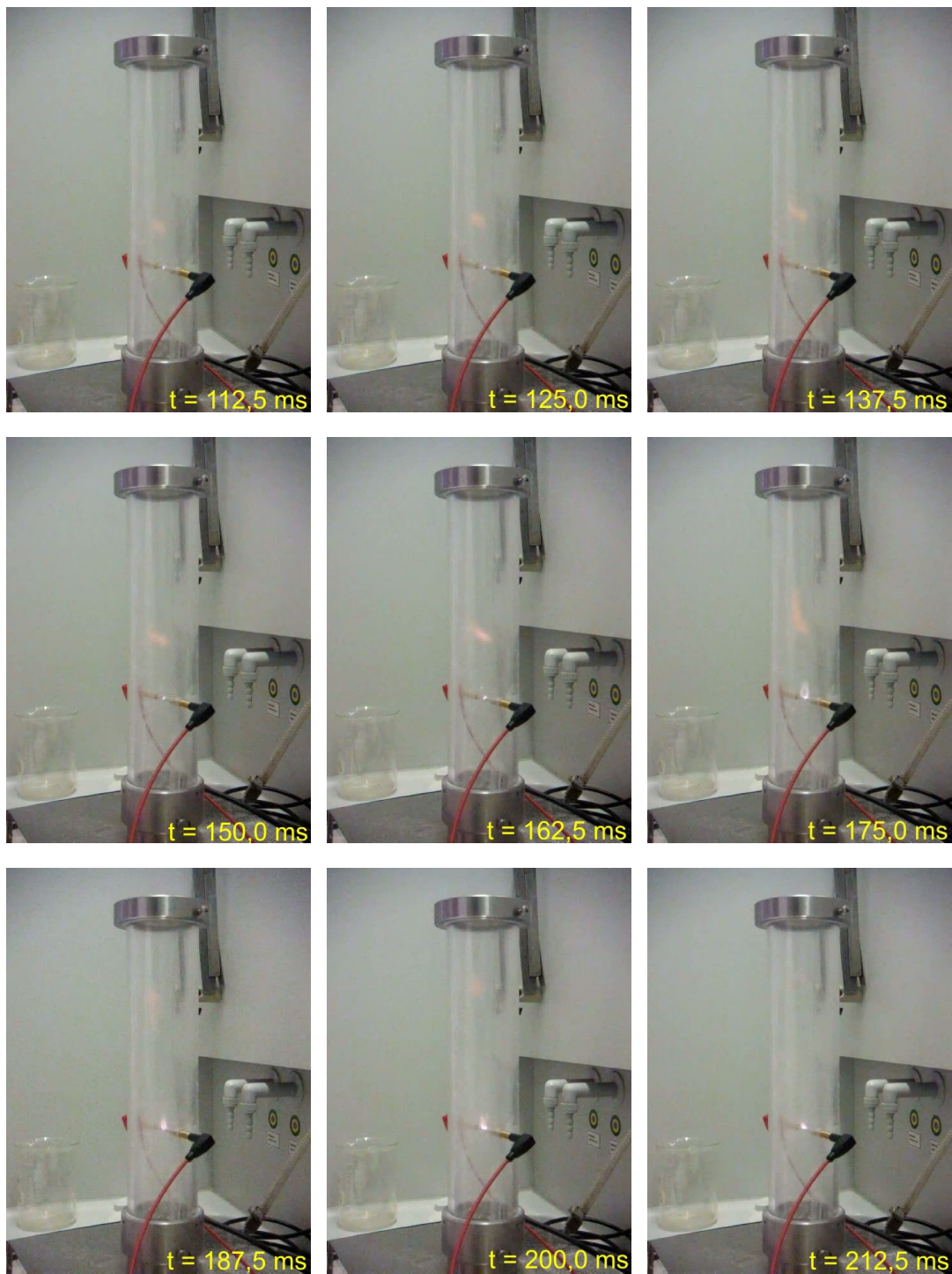


Abbildung A.5: Teil 2 Flammenreaktion welche gerade noch als Zündung gewertet werden kann.

A.5 Flammerscheinung ohne Zündung

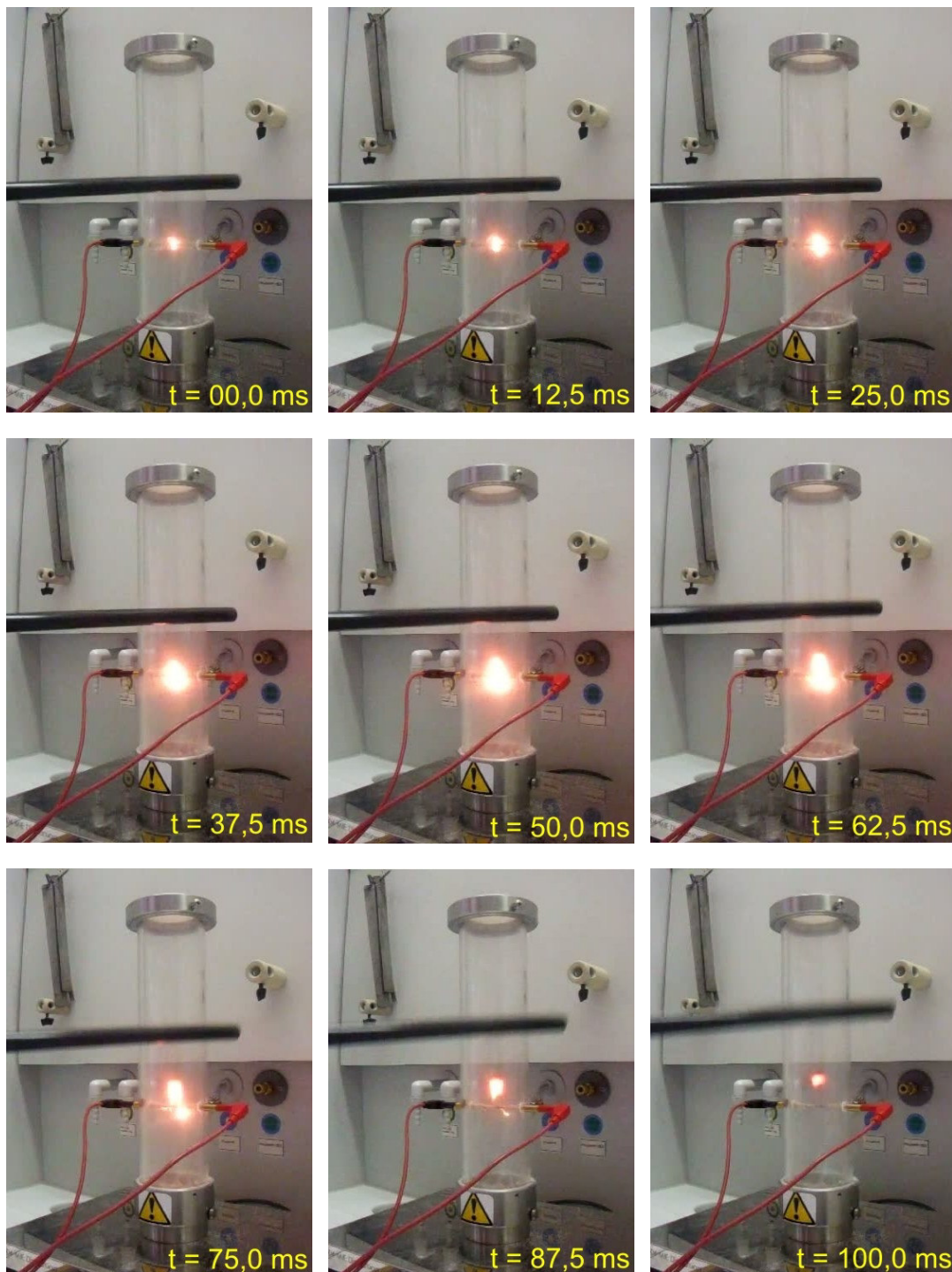


Abbildung A.6: Flammerscheinung über den Elektroden (keine Zündung).

A.6 Flammerscheinung zwischen den Elektroden

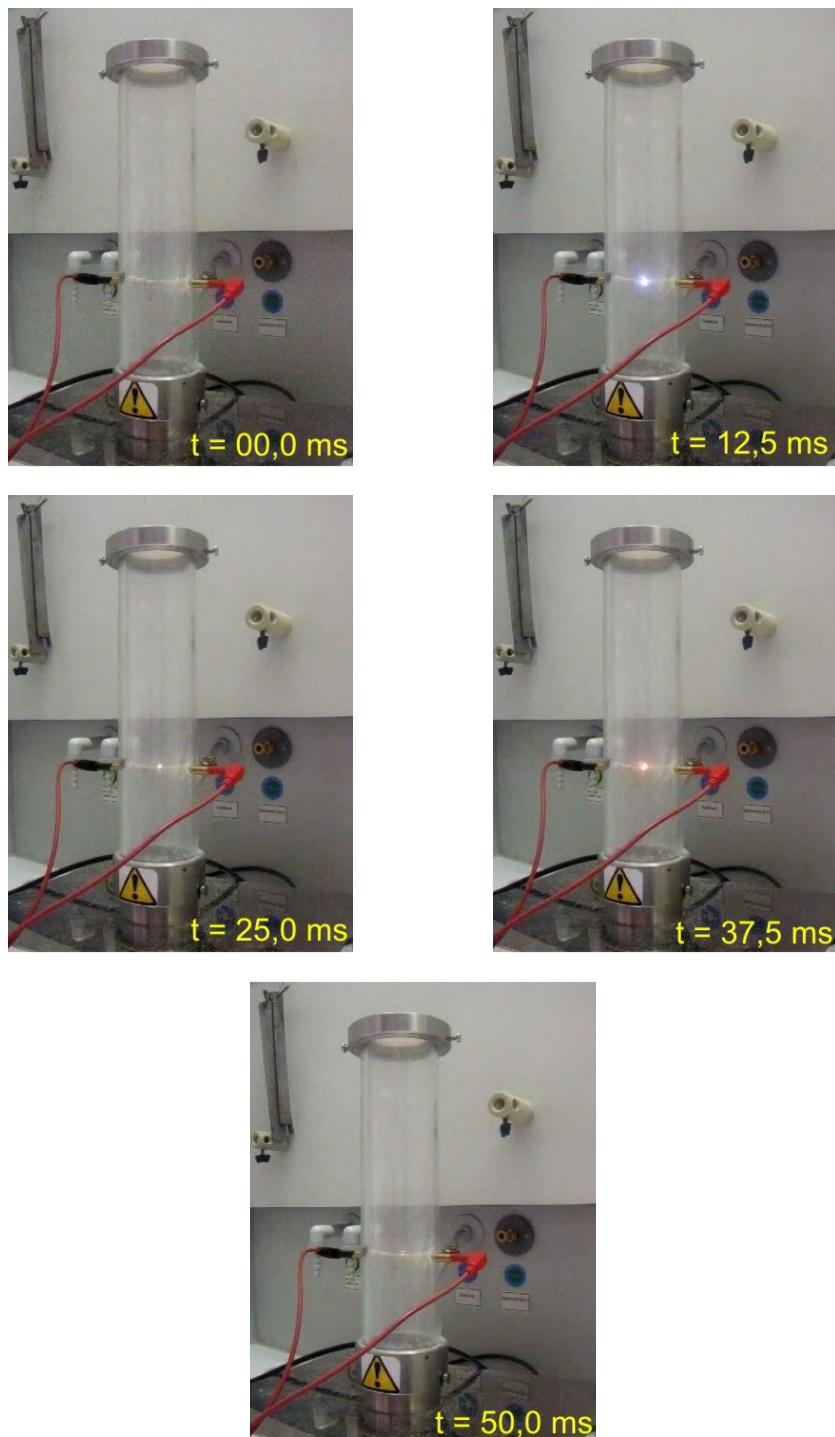


Abbildung A.7: Flammerscheinung zwischen den Elektroden (keine Zündung).

B Anhang Eintrittswahrscheinlichkeit einer Nichtzündung

Tabelle B.1: Eintrittswahrscheinlichkeit einer Nichtzündung ($P(0|p_z, n)$), Zündwahrscheinlichkeit p_z fiktiv gewählt.

n (Anzahl Versuche)	$p_z = 0,01$	$p_z = 0,02$	$p_z = 0,03$	$p_z = 0,04$	$p_z = 0,05$	$p_z = 0,06$	$p_z = 0,07$	$p_z = 0,08$	$p_z = 0,09$	$p_z = 0,1$
1	0,9900	0,9800	0,9700	0,9600	0,9500	0,9400	0,9300	0,9200	0,9100	0,9000
2	0,9801	0,9604	0,9409	0,9216	0,9025	0,8836	0,8649	0,8464	0,8281	0,8100
3	0,9703	0,9412	0,9127	0,8847	0,8574	0,8306	0,8044	0,7787	0,7536	0,7290
4	0,9606	0,9224	0,8853	0,8493	0,8145	0,7807	0,7481	0,7164	0,6857	0,6561
5	0,9510	0,9039	0,8587	0,8154	0,7738	0,7339	0,6957	0,6591	0,6240	0,5905
6	0,9415	0,8858	0,8330	0,7828	0,7351	0,6899	0,6470	0,6064	0,5679	0,5314
7	0,9321	0,8681	0,8080	0,7514	0,6983	0,6485	0,6017	0,5578	0,5168	0,4783
8	0,9227	0,8508	0,7837	0,7214	0,6634	0,6096	0,5596	0,5132	0,4703	0,4305
9	0,9135	0,8337	0,7602	0,6925	0,6302	0,5730	0,5204	0,4722	0,4279	0,3874
10	0,9044	0,8171	0,7374	0,6648	0,5987	0,5386	0,4840	0,4344	0,3894	0,3487
11	0,8953	0,8007	0,7153	0,6382	0,5688	0,5063	0,4501	0,3996	0,3544	0,3138
12	0,8864	0,7847	0,6938	0,6127	0,5404	0,4759	0,4186	0,3677	0,3225	0,2824
13	0,8775	0,7690	0,6730	0,5882	0,5133	0,4474	0,3893	0,3383	0,2935	0,2542
14	0,8687	0,7536	0,6528	0,5647	0,4877	0,4205	0,3620	0,3112	0,2670	0,2288
15	0,8601	0,7386	0,6333	0,5421	0,4633	0,3953	0,3367	0,2863	0,2430	0,2059
16	0,8515	0,7238	0,6143	0,5204	0,4401	0,3716	0,3131	0,2634	0,2211	0,1853
17	0,8429	0,7093	0,5958	0,4996	0,4181	0,3493	0,2912	0,2423	0,2012	0,1668
18	0,8345	0,6951	0,5780	0,4796	0,3972	0,3283	0,2708	0,2229	0,1831	0,1501
19	0,8262	0,6812	0,5606	0,4604	0,3774	0,3086	0,2519	0,2051	0,1666	0,1351
20	0,8179	0,6676	0,5438	0,4420	0,3585	0,2901	0,2342	0,1887	0,1516	0,1216
21	0,8097	0,6543	0,5275	0,4243	0,3406	0,2727	0,2178	0,1736	0,1380	0,1094
22	0,8016	0,6412	0,5117	0,4073	0,3235	0,2563	0,2026	0,1597	0,1256	0,0985
23	0,7936	0,6283	0,4963	0,3911	0,3074	0,2410	0,1884	0,1469	0,1143	0,0886
24	0,7857	0,6158	0,4814	0,3754	0,2920	0,2265	0,1752	0,1352	0,1040	0,0798
25	0,7778	0,6035	0,4670	0,3604	0,2774	0,2129	0,1630	0,1244	0,0946	0,0718
26	0,7700	0,5914	0,4530	0,3460	0,2635	0,2001	0,1516	0,1144	0,0861	0,0646
27	0,7623	0,5796	0,4394	0,3321	0,2503	0,1881	0,1409	0,1053	0,0784	0,0581
28	0,7547	0,5680	0,4262	0,3189	0,2378	0,1768	0,1311	0,0968	0,0713	0,0523
29	0,7472	0,5566	0,4134	0,3061	0,2259	0,1662	0,1219	0,0891	0,0649	0,0471
30	0,7397	0,5455	0,4010	0,2939	0,2146	0,1563	0,1134	0,0820	0,0591	0,0424
31	0,7323	0,5346	0,3890	0,2821	0,2039	0,1469	0,1054	0,0754	0,0537	0,0382
32	0,7250	0,5239	0,3773	0,2708	0,1937	0,1381	0,0981	0,0694	0,0489	0,0343
33	0,7177	0,5134	0,3660	0,2600	0,1840	0,1298	0,0912	0,0638	0,0445	0,0309
34	0,7106	0,5031	0,3550	0,2496	0,1748	0,1220	0,0848	0,0587	0,0405	0,0278
35	0,7034	0,4931	0,3444	0,2396	0,1661	0,1147	0,0789	0,0540	0,0369	0,0250

Tabelle B.2: Eintrittswahrscheinlichkeit einer Nichtzündung ($P(0|p_z, n)$), Zündwahrscheinlichkeit p_z aus Versuchen ermittelt.

n (Anzahl Veruche)	$p_z =$ 0,0769	$p_z =$ 0,091	$p_z =$ 0,143	$p_z =$ 0,5
1	0,9231	0,9090	0,8570	0,5000
2	0,8521	0,8263	0,7344	0,2500
3	0,7866	0,7511	0,6294	0,1250
4	0,7261	0,6827	0,5394	0,0625
5	0,6703	0,6206	0,4623	0,0313
6	0,6187	0,5641	0,3962	0,0156
7	0,5711	0,5128	0,3395	0,0078
8	0,5272	0,4661	0,2910	0,0039
9	0,4867	0,4237	0,2494	0,0020
10	0,4492	0,3852	0,2137	0,0010
11	0,4147	0,3501	0,1831	0,0005
12	0,3828	0,3182	0,1570	0,0002
13	0,3534	0,2893	0,1345	0,0001
14	0,3262	0,2630	0,1153	0,0001
15	0,3011	0,2390	0,0988	0,0000
16	0,2780	0,2173	0,0847	0,0000
17	0,2566	0,1975	0,0726	0,0000
18	0,2369	0,1795	0,0622	0,0000
19	0,2186	0,1632	0,0533	0,0000
20	0,2018	0,1483	0,0457	0,0000
21	0,1863	0,1348	0,0391	0,0000
22	0,1720	0,1226	0,0335	0,0000
23	0,1588	0,1114	0,0287	0,0000
24	0,1465	0,1013	0,0246	0,0000
25	0,1353	0,0921	0,0211	0,0000
26	0,1249	0,0837	0,0181	0,0000
27	0,1153	0,0761	0,0155	0,0000
28	0,1064	0,0691	0,0133	0,0000
29	0,0982	0,0629	0,0114	0,0000
30	0,0907	0,0571	0,0098	0,0000
31	0,0837	0,0519	0,0084	0,0000
32	0,0773	0,0472	0,0072	0,0000
33	0,0713	0,0429	0,0061	0,0000
34	0,0658	0,0390	0,0053	0,0000
35	0,0608	0,0355	0,0045	0,0000

C Anhang Mailverkehr / Stellungnahme Chilworth

Paul Thiele

Betreff: WG: RE: Questions on MIE testing

----- Original-Nachricht -----

Betreff:RE: Questions on MIE testing

Datum:Thu, 12 Sep 2013 12:57:29 +0000

Von:Declan Cowhig <dcowhig@chilworthglobal.com>

An:dieter.gabel@ovgu.de <dieter.gabel@ovgu.de>

Hi Dieter

Sorry for the delay in responding.

The important thing to remember with the MIE apparatus is that :

- 1) When the unit is sparking, the timing (determined by how high you have the voltage set to) must be of discrete slow nature (about 1 second gap when audibly listening although this is only rule of thumb. If sparking is 1/10ths of a second or every 0.5 seconds then recovery time will be slower). What you are experiencing on the chart recorder is rapid arcing and you cannot tell a consistent level at the point of breakdown because your arcing is very fast. This is ok when purely carrying out some functionality testing but is not really great for testing and obtaining reliable values as shown in graph 1. The chart recorder response will not be fast enough to keep up with rapid arcing so what you need to do is slow the arcing down.
- 2) It is important to note that with the trickle charge method of testing, i.e arc, capacitor charge up, arc again, capacitor charge up etc that the way you conduct the test is important. At Chilworth the value of energy we would like to test at is looked up and relevant capacitor selected (it is important to note that where 8 is identified on the energy look up graphs that this means select capacitors 1,2,3,4,5,6,7,8 on that row and NOT just 8). The relevant row selector must be selected AND only select one row at a time. Capacitors are selected with voltage OFF since otherwise internal MIE unit arcing could occur.

Then the voltage is adjusted upwards until breakdown occurs AND THEN the voltage is backed off just enough so that breakdown does not occur. We then disperse the powder up past the arc gap and it is the turbulence nature of the powder passing the electrodes which creates the arc across the electrodes. We find this much more true to life in a real situation.

Sometimes it is necessary (with high voltage off) to adjust the arc gap to get the desired energy. It is also important to note that a coating of powder on the electrodes can actually make suppression of the arc very easy and through turbulence the arc can occur. So, for instance if you wanted to test at 500mJ I would select, for example, capacitors 1-8 on the 1 nF row at 11 Kv (505 mJ actual), then 100mJ e.g capacitor 1 at 13 kV (spark gap opened or reduced as required – 102mJ actual). If it proved difficult to suppress the spark I would disperse once onto the electrodes and use this coating to my advantage but it depends on the powder.

Of course if the energy or concentration of powder is right and it is conducive to ignition then ignition will indeed occur. It is easy to see on the chart recorder the point at which the ignition occurs but you have to start with suppressed spark or slower arcing intervals

- 3) The difference between analogue device and the value on the chart recorder should be the same BUT ONLY when in a static condition. When arcing this is due to the inertia of the pointer – you are right. Please note that the top tray analogue meter is more for guidance and trouble shooting. It is the chart recorder that is important. If you have a known calibrated voltage meter then put it to the DC range and measure the equivalent dc voltage across the red and the black recorder output sockets. The chart recorder pen needs to align with the digital voltmeter on these terminals. Once set up then you do not need the digital meter. For

instance 0 volts = 0 kV, 1V = 10 kV and 1.5 V = 15kV (although the power supply is deliberately restricted and will not quite hit that).

You can also purchase a DC high voltage digital meter for cross checking the high voltage output if you like. I can quote for that if it is ever of interest once you have familiarised yourself with the equipment

- 4) It is important to note that every powder is naturally different from moisture content, particle size, some are very sticky, some very conductive or very insulating. This can present various difficulties in how easy they are to test. Sometimes you have to clean the acrylic tube (soapy warm water only and NOT acetone) and dry them thoroughly/clean the electrodes much more often after a few shots. Other times you can perform 20 dispersions quite happily. The optimal voltages for starting testing are generally 8 - 13 kV but it depends on various factors. Your experiences with graph 4 are most probably because cleaning needs to be done more often. Try cleaning and just sparking again without dispersing and then suppress sparking by backing off the voltage and then disperse. See what happens. Our technicians have been practising for years. An insulated rod to knock off particularly "sticky" powders is ideal and necessary sometimes to aid the testing and aids arcing. Of course if that does not make life easier for certain powders then you have to dismantle the electrodes and clean + do the tube as well. We also use an industrial Hepa filter type vacuum cleaner to dispose of unspent or spent powder before the next refill of dust concentration.
- 5) Again, start with a clean tube/electrodes and practice the above. As pointed out, products can perform strangely. It is important to note that if you test metal very dense powders then you may need higher dispersion pressure to get the product up past the electrodes. Similarly if you have an extremely fine white "fluffy" powder, for example, and even when placing it gently into the dispersion cup a mist or cloud of powder appears above the cup then you may have to reduce the air pressure so that on the first dispersion you do not lose all your product up on the filter paper. You may also find yourselves testing a very "static" product and these can have a tendency to stick and "track the voltage" around the tube. My suggestion is to try various products e.g dried icing sugar, lycopodium, Niacinamide etc etc just to get a feel for how various powder perform.

Due to the fact that we test so many wide and varied powders we like the versatility of being able to alter the pressure, the voltage, the capacitance and the gap. All these can be used to research product ignition characteristics.

I hope this is of some help to you Dieter

Best regards

Declan

From: Dieter Gabel [<mailto:dieter.gabel@ovgu.de>]
Sent: 30 August 2013 12:26
To: Declan Cowhig
Subject: Questions

Dear Declan,

I have some doubts operating the MIR III.

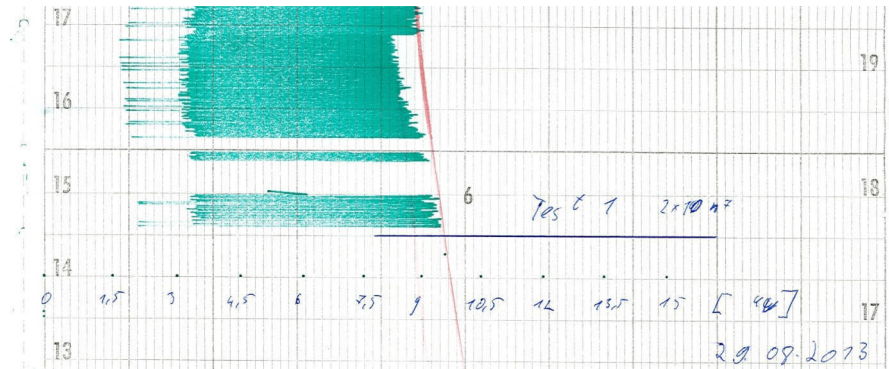
Could you please answer the question in the document attached to this email or forward them to someone who could help.

Thank You!

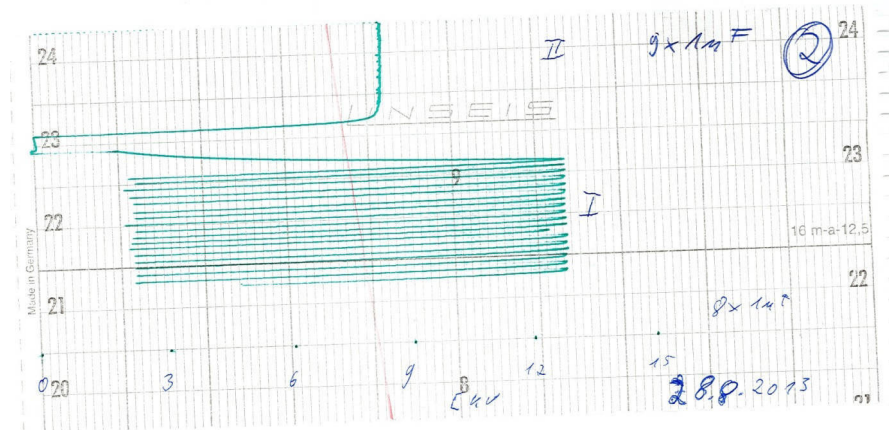
Best regards

Dieter Gabel

- The first picture is showing that the measured voltage is constantly dropping; no dust was blow through the tube, just the sparks were generated
Set-up values: $2 \times 10 \text{ nF}$; $9,6 \text{ kV}$
Is this a normal behavior?



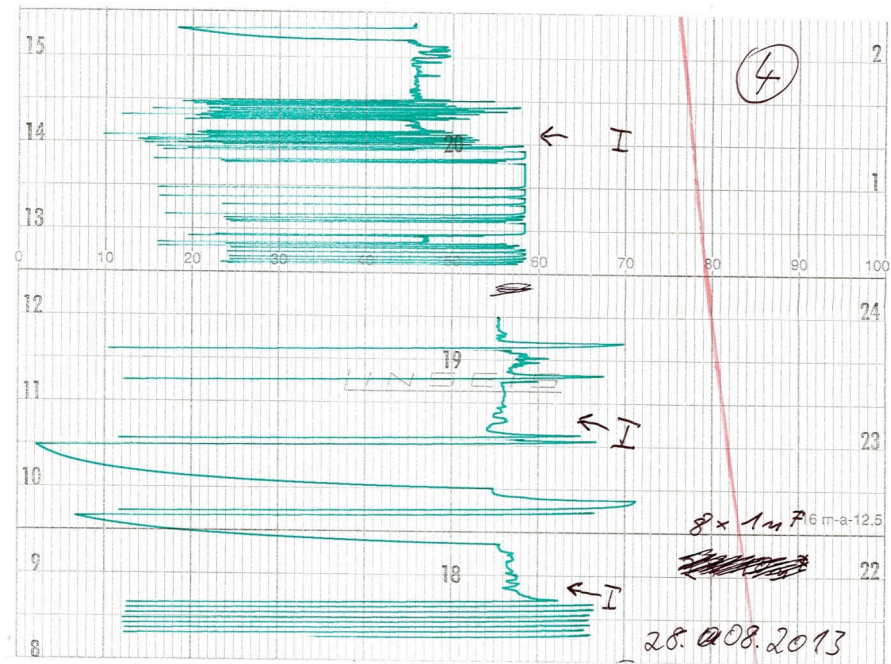
- If the ninth 1 nF capacitor is activated the voltage is dropping and no sparks are generated any more.
Set-up values: $8 \times 1 \text{ nF}$ at Point I; $9 \times 1 \text{ nF}$ at Point II; $12,6 \text{ kV}$



- There is sometimes a significant difference between the voltage displayed by the analogues device and the value of the chart recorder.
Is this just due to the inertia of the pointer?

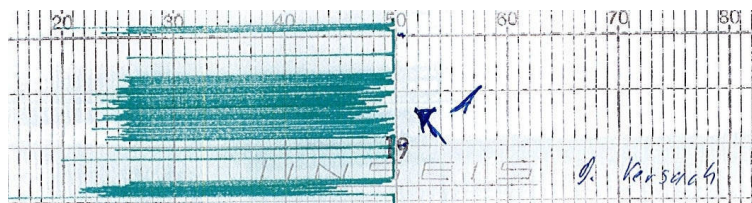
4. Sparks are generated at the given values. After whirling up dust in the tube the capacitors are not charged to the set-up voltage any more (points indicated with I) and no sparks are generated.

Set-up values: $8 \times 1 \text{ nF}$; 14,2kV



Switching On/Off and cleaning does not always recover “normal” behavior. How could this be?

5. After whirling up the dust, sparks are generated at lower voltages for several seconds

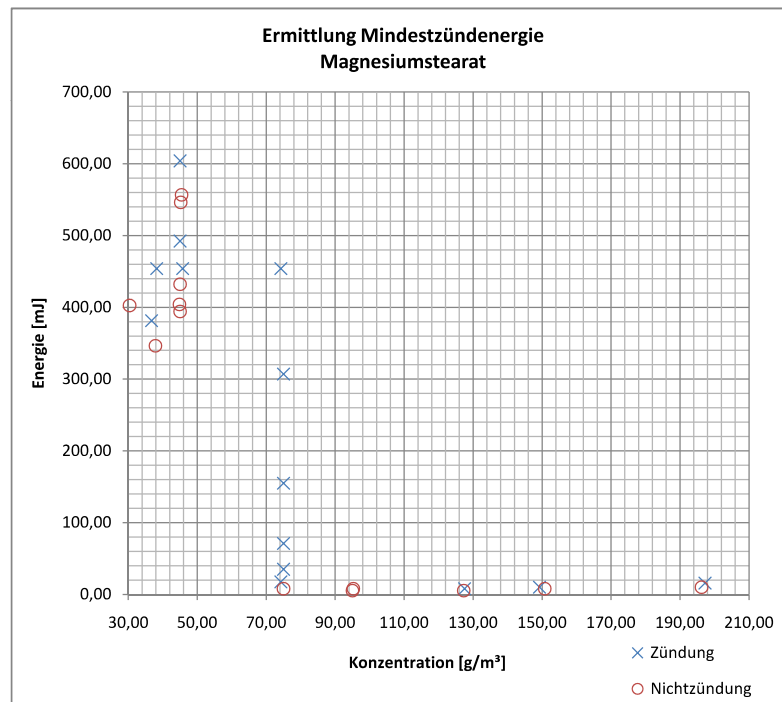


How could this behavior be explained?

D Anhang Protokolle Versuchsergebnisse

D.1 Versuchsergebnisse Mindestzündenergie von Magnesiumstearat

Energie Zündung [mJ]	Konzentration Zündung [g/m ³]	Energie nicht Zündung [mJ]	Konzentration nicht Zündung [g/m ³]
604,00	45,00	404,00	44,81
492,35	45,00	546,25	45,19
454,00	45,75	556,75	45,45
454,00	38,25	394,23	45,00
446,70	29,25	432,10	45,00
381,40	36,75	402,58	30,38
454,00	74,25	346,35	37,88
307,00	75,00	7,93	75,00
155,00	75,00	5,36	127,25
71,00	75,00	5,36	95,00
35,00	75,00	7,99	95,25
17,48	74,25	7,93	150,75
7,93	127,50	10,05	196,25
10,05	149,25		
15,70	197,25		

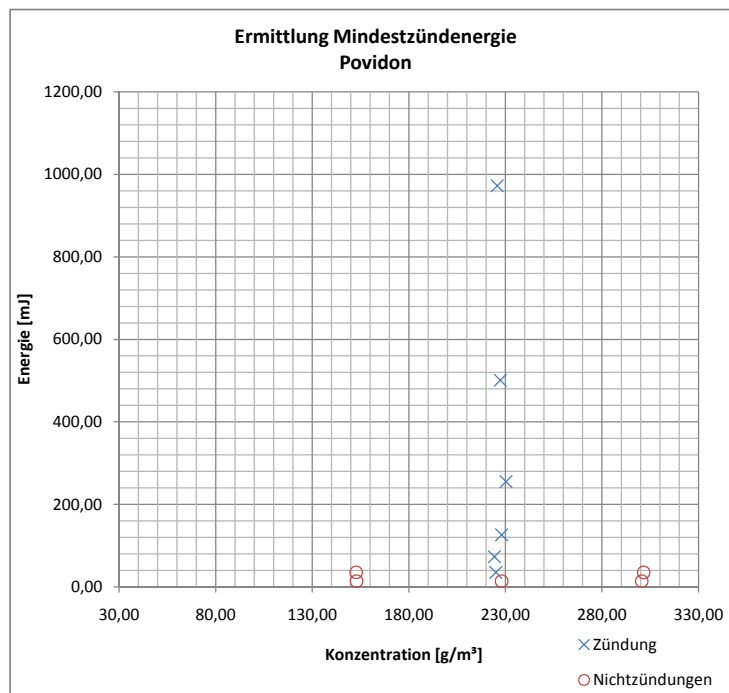


Mindestzündenergie MZE1 7,93 mJ
Mindestzündenergie MZE2 5,36 mJ

MZE1: Kleinste ermittelte Energie, bei der eine Zündung möglich ist
 MZE2: Größte ermittelte Energie, bei der keine Zündung erfolgt

D.2 Versuchsergebnisse Mindestzündenergie von Povidon

Energie Zündung [mJ]	Konzentration Zündung [g/m ³]	Energie nicht Zündung [mJ]	Konzentration nicht Zündung [g/m ³]
972,40	225,75	14,18	228,00
500,80	227,25	14,18	300,50
255,00	230,25	14,18	152,85
126,40	228,00	35,17	152,70
73,39	224,25	35,06	301,50
35,06	225,00		

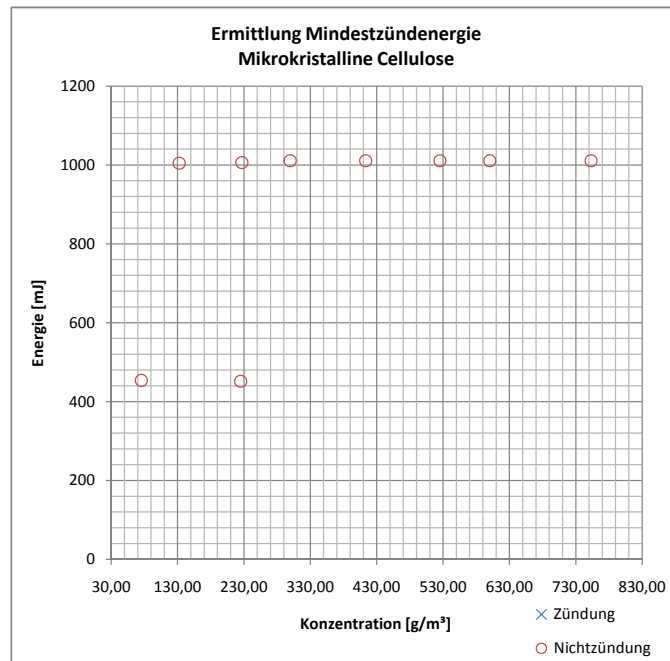


Mindestzündenergie MZE1 35,06 mJ
Mindestzündenergie MZE2 14,18 mJ

MZE1: Kleinste ermittelte Energie bei der eine Zündung möglich ist
MZE2: Gröste ermittelte Energie bei der keine Zündung erfolgt

D.3 Versuchsergebnisse Mindestzündenergie von Mikrokristalline Cellulose

Energie Zündung [mJ]	Konzentration Zündung [g/m ³]	Energie nicht Zündung [mJ]	Konzentration nicht Zündung [g/m ³]
		454,00	75,50
		451,57	225,00
		1011,00	525,38
		1011,00	299,63
		1011,00	413,50
		1006,18	226,88
		1004,57	132,50
		1011,00	600,45
		1011,00	753,00

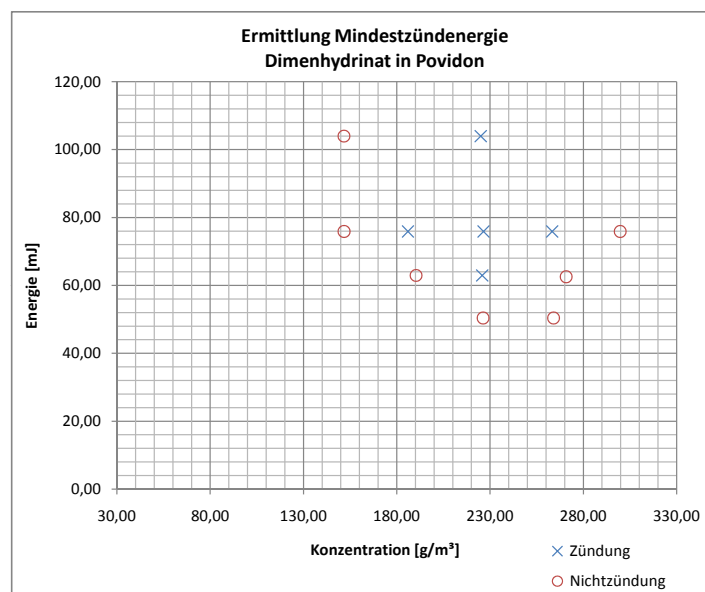


Mindestzündenergie MZE1 ---- mJ
 Mindestzündenergie MZE2 ---- mJ

MZE1: Kleinste ermittelte Energie, bei der eine Zündung möglich ist
 MZE2: Größte ermittelte Energie, bei der keine Zündung erfolgt

D.4 Versuchsergebnisse Mindestzündenergie von Staubgemisch Dimenhydrinat / Povidon

Energie Zündung [mJ]	Konzentration Zündung [g/m ³]	Energie nicht Zündung [mJ]	Konzentration nicht Zündung [g/m ³]
104,00	225,00	104,00	151,65
75,90	226,50	50,40	226,25
75,90	263,25	50,40	264,00
75,90	186,00	75,90	299,75
62,92	225,75	62,54	270,75
		62,92	190,31
		75,90	151,75

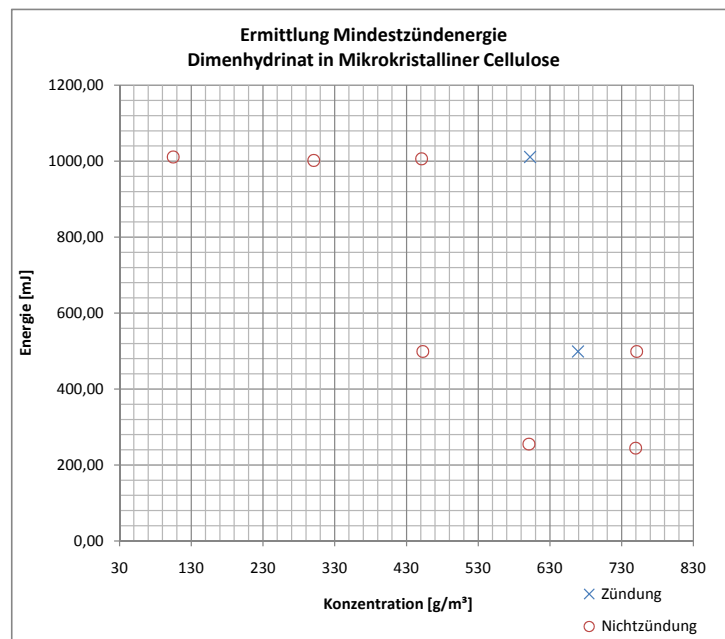


Mindestzündenergie MZE1 62,92 mJ
Mindestzündenergie MZE2 50,40 mJ

MZE1: Kleinste ermittelte Energie, bei der eine Zündung möglich ist
MZE2: Größte ermittelte Energie, bei der keine Zündung erfolgt

D.5 Versuchsergebnisse Mindestzündenergie von Staubgemisch Dimenhydrinat / Mikrokristalliner Cellulose

Energie Zündung [mJ]	Konzentration Zündung [g/m ³]	Energie nicht Zündung [mJ]	Konzentration nicht Zündung [g/m ³]
1011,00	602,25	1011,00	104,80
499,00	669,23	1001,80	300,75
		1006,18	451,13
		255,00	600,75
		244,40	749,50
		499,00	751,00
		499,00	452,81



Mindestzündenergie MZE1	499,00	mJ
Mindestzündenergie MZE2	244,40	mJ

MZE1: Kleinste ermittelte Energie, bei der eine Zündung möglich ist
MZE2: Größte ermittelte Energie, bei der keine Zündung erfolgt

E Anhang Fehlerermittlung

In den folgenden Tabellen ist der Fehler ermittelt, welcher durch die Interpolation der Energiewerte innerhalb der Energietabellen [22] entstanden ist. Dazu wurde zunächst der Energiewert aus den Energietabellen mit dem Energiewert, welcher durch die Angabe der genauen Kapazitäten der Kondensatoren errechnet wurde, verglichen. Im unteren Teil einer jeden Tabelle ist für jeden Kondensator aufgezeigt, bei welcher Spannung der Fehler des interpolierten Energiewertes, im Vergleich zum errechneten Energiewert, maximal wird. Dieser Fehler wurde dabei als absoluter und relativer Wert angegeben. Ferner ist der maximale Fehler der jeweiligen Kondensatorzeile ersichtlich.

In der Tabelle der 100 pF ist zu sehen, dass der maximale Fehler 9,06 % beträgt. Dieser Fehler tritt bei einer Energie von 24,6 mJ auf. Da diese Energie vorwiegend mit der 25 pF Kondensatorzeile erzeugt wird, ist eine Umgehung diese Fehlers auf einfache Art und Weise möglich. Eine gesonderte Betrachtung bzw. der Versuch diesen Fehler zu beheben, ist daher nicht nötig.

Da in den Energietabellen bei der 1 nF und 10 nF Kondensatorzeile keine Streukapazität (Stray Rail) angegeben war, fand die Streukapazität der genannten Kondensatorzeilen während der Experimente infolgedessen keine Anwendung. Insofern konnte in diesem Fall auf eine Fehlerbetrachtung verzichtet werden.

E.1 Fehler durch Interpolation 25 pF Kondensatorzeile

25 pF Range		Energy in mJ														
Kondensator Bezeichnung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	182	Stray	Stray				
Kondensatoren [pF]	209	235	262	285	314	339	367	390	418	418	25pF	25pF				
Kapazität *1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
S	5	2,61	2,94	3,28	3,61	3,93	4,24	4,59	4,88	5,23	5,23	2,28				
p	6	3,76	4,23	4,72	5,20	5,13	5,65	6,10	6,61	7,02	7,52	3,28				
a	7	5,12	5,76	6,42	7,08	6,98	7,69	8,31	8,99	9,56	10,24	4,46				
n	8	6,69	6,69	7,52	8,38	9,12	10,05	10,85	11,74	12,48	13,38	5,82				
n	9	8,46	8,46	9,52	10,61	11,70	12,72	13,73	14,86	15,80	16,93	7,37				
u	10	10,45	11,75	13,10	14,45	15,70	17,24	18,35	19,50	20,90	20,90	9,10				
n	11	12,64	14,22	15,85	17,48	19,00	20,51	22,20	23,60	25,29	25,29	11,01				
g	12	15,05	16,92	18,86	20,81	22,61	24,41	26,42	28,08	30,10	30,10	13,10				
	13	17,66	19,86	22,14	24,42	26,53	28,65	31,01	32,96	35,32	35,32	15,38				
[kV]	14	20,48	23,03	25,68	28,32	30,77	33,22	35,97	38,22	40,96	40,96	17,84				
	15	23,51	26,44	29,48	32,51	35,33	38,14	41,29	43,88	47,03	47,03	20,48				
Spannung [kV]		4,70	4,70	1,70	0,90	8,00	8,00	0,70	2,10	6,00	6,00	4,10				
Energie [mJ]		2,45	2,46	1,00	0,59	9,25	9,12	0,55	1,78	6,61	0,68	4,29				
Abweichung		0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50				
Abweichung [%]		0,10	0,09	0,15	1,41	0,13	0,06	0,06	0,10	0,10	0,10	0,00				
Maximaler Fehler [%]		1,41														

Energie nach Tabelle *1

Errechnete Energie (E=0,5xCxU²)

*1, nach dem Prüfprotokoll des:

Minimum Ignition Energy III Apparatus Calibration Certification for MIE Serial Number 2012110036, Chilworth, November 2012

E.2 Fehler durch Interpolation 100 pF Kondensatorzeile

100 pF Range		Energy in mJ													Stray						
Kondensator Bezeichnung	Kapazität *1	285	383	492	597	700	800	904	1002	1004	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Stray 100pF	
	Kapazität [pF]	285	383	492	597	700	800	904	1002	1004	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Stray 100pF	
S	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	6	3,56	3,56	4,86	4,79	6,15	6,15	7,46	7,46	8,75	8,75	10,00	10,00	11,30	11,30	12,53	12,53	13,80	12,55	2,25	2,25
	7	6,98	6,98	9,38	9,38	12,05	12,05	14,63	14,63	17,15	17,15	19,60	19,60	22,15	22,15	24,55	24,55	27,05	24,60	3,24	3,24
	8	9,12	9,12	12,45	12,26	15,74	15,74	19,10	19,10	22,40	22,40	25,60	25,60	28,93	28,93	32,06	32,06	35,33	32,13	5,76	5,76
	9	11,54	11,54	15,75	15,51	19,93	19,93	24,18	24,18	28,35	28,35	32,40	32,40	36,61	36,61	40,58	40,58	44,71	40,66	7,29	7,29
	10	14,25	14,25	19,45	19,15	24,60	24,60	29,85	29,85	35,00	35,00	40,00	40,00	45,20	45,20	50,10	50,10	55,20	50,20	9,00	9,00
	11	17,24	17,24	23,53	23,17	29,77	29,77	36,12	36,12	42,35	42,35	48,40	48,40	54,69	54,69	60,62	60,62	66,79	60,74	10,89	10,89
	12	20,52	20,52	28,01	27,58	35,42	35,42	42,98	42,98	50,40	50,40	57,60	57,60	65,09	65,09	72,14	72,14	79,49	72,29	12,96	12,96
	13	24,08	24,08	32,87	32,36	41,57	41,57	50,45	50,45	59,15	59,15	67,60	67,60	76,39	76,39	84,67	84,67	93,29	84,84	15,21	15,21
	14	27,93	27,93	38,12	37,53	48,22	48,22	58,51	58,51	68,60	68,60	78,40	78,40	88,59	88,59	98,20	98,20	108,19	98,39	17,64	17,64
	15	32,06	32,06	43,76	43,09	55,35	55,35	67,16	67,16	78,75	78,75	90,00	90,00	101,70	101,70	112,73	112,73	124,20	112,95	20,25	20,25
Spannung [kV]		1,90	1,90	8,00	8,00	6,00	6,00	6,00	6,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Energie [mJ]		1,35	1,35	12,45	12,26	8,86	8,86	10,75	10,75	0,18	0,18	0,20	0,20	16,27	16,27	3,26	3,26	27,05	24,60	0,05	0,05
Abweichung		0,00	0,00	0,19	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,45	0,00	0,00
Abweichung [%]		0,07	0,07	1,56	1,56	0,05	0,05	0,04	0,04	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	9,06	0,00	0,00
Maximaler Fehler [%]		9,06																			

Energie nach Tabelle *1

Errechnete Energie ($E=0,5 \times C \times U^2$)

*1 nach dem Prüfprotokoll des:

Minimum Ignition Energy III Apparatus Calibration Certification for MIE Serial

Number 20121110036, Chilworth, November 2012

E.3 Fehler durch Interpolation 1 nF Kondensatorzeile

		Energy in mJ									
1 nF Range		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Kondensator Bezeichnung	Kapazität *1	1,21	2,23	3,25	4,27	5,29	6,30	7,32	8,35	9,34	
S	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p	6	15	28	28	41	41	53	53	66	66	79
a	7	30	40	40	59	59	77	77	95	95	113
n	8	39	39	71	71	104	104	137	137	169	202
n	9	49	49	90	90	132	132	173	173	214	255
u	10	61	61	112	112	163	163	214	214	265	315
n	11	73	73	135	135	197	197	258	258	320	381
g	12	87	87	161	161	234	234	307	307	381	454
	13	102	102	188	188	275	275	361	361	447	532
[kV]	14	119	119	219	219	319	319	418	418	518	617
	15	136	136	251	251	366	366	480	480	595	709
Spannung [kV]		7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Energie [mJ]		29,65	54,64	54,64	5,69	11,74	129,61	113,4	71,37	39,66	86,40
Abweichung		0,36	0,37	0,37	0,05	-0,08	0,39	-0,40	0,39	-0,14	0,19
Abweichung [%]		1,18	0,66	0,66	0,91	0,71	0,30	0,35	0,54	0,36	0,21
Maximaler Fehler [%]		1,18									

Energie nach Tabelle *1

Errechnete Energie ($E=0,5 \times C \times U^2$)

*1 nach dem Prüfprotokoll des:

Minimum Ignition Energy III Apparatus Calibration Certification from MIE Serial Number

2012110036, Chilworth, November 2012

E.4 Fehler durch Interpolation 10 nF Kondensatorzeile

		Energy in mJ	
		1	2
10 nF Range		9,98	20,2
Kondensator Bezeichnung	Kapazität *1		
S	0	0	0
P	5	125	253
a	6	180	364
n	7	245	495
n	8	319	646
u	9	404	818
n	10	499	1011
g	11	604	1222
	12	719	1454
	13	843	1707
	14	978	1980
	15	1123	2273
Spannung [kV]		6,70	2,10
Energie [mJ]		225,05	106,05
Abweichung		0,45	0,21
Abweichung [%]		0,20	0,20
Maximaler Fehler [%]		0,20	

Energie nach Tabelle *1
 Errechnete Energie ($E=0,5 \times C \times U^2$) ohne Streukapazität

*1 nach dem Prüfprotokoll des
 Minimum Ignition Energy III Apparatus Calibration Certification for MIE Serial Number 2012110036, Chilworth,
 November 2012