



Department Umwelt- und Energieverfahrenstechnik
Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

MASTERARBEIT

Sicherheitstechnische Charakterisierung von Stäuben
aus mechanischen Abfallaufbereitungsanlagen

Vorgelegt von: Claudia Kerschbaumer, BSc

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch
Dipl.-Ing. Kerstin Held

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Sicherheitstechnische Charakterisierung von Stäuben aus mechanischen Abfallaufbereitungsanlagen

Immer wieder ist es in der Vergangenheit durch die Entzündung von explosionsfähigen Staub-Luft-Gemischen zu schwerwiegenden Betriebsunfällen mit Verletzten und beträchtlichem Sachschaden gekommen. Neben Bereichen mit großen Staubdichten, wie Filteranlagen oder Lagertanks, stellen auch Ablagerungen potentielle Gefahrenquellen dar. Werden diese z.B. durch eine vorausgehende Explosion aufgewirbelt, besteht Entzündungsgefahr, was zu einer Fortpflanzung der Explosion in weite Bereiche der Anlage führen kann.

Da jedes Staub-Luft-Gemisch aus brennbarem Material bei bestimmter Korngröße, Konzentration und Zündenergie explosionsfähig ist, darf die Gefahr der Staubexplosion in abfallbehandelnden und -aufbereitenden Anlagen nicht vernachlässigt werden. Es gibt jedoch kaum Daten aus diesem Bereich, weshalb sich die vorliegende Masterarbeit mit der Quantifizierung der Explosionsfähigkeit unterschiedlicher Stäube aus der mechanischen Abfallaufbereitung beschäftigt.

Um Aussagen darüber treffen zu können, ob und unter welchen Bedingungen ein im Betrieb vorliegender Staub im Gemisch mit Luft eine explosionsfähige Atmosphäre bildet, und wenn ja, wie stark eine solche Explosion abläuft, muss eine sicherheitstechnische Charakterisierung durchgeführt werden. Diese erfolgt im Rahmen dieser Arbeit über die sicherheitstechnischen Kenngrößen (STK) maximaler Explosionsdruck, maximaler zeitlicher Druckanstieg, Mindestzündenergie und untere Explosionsgrenze. Ausgehend von diesen STK kann einerseits die Gefahr einer Explosion abgeschätzt werden und andererseits können, den sicherheitstechnischen Eigenschaften des Staubes angepasste, Explosionsschutzmaßnahmen getroffen werden.

Als Basis für die Kenngrößenbestimmung im Labor dient die Literaturrecherche, mittels derer die rechtlichen Verpflichtungen von Anlagenbetreibern in den Grundzügen sowie die theoretischen Grundlagen zu den STK erläutert werden. Außerdem werden Vergleichswerte für die Untersuchungsergebnisse recherchiert.

Die Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass es sich bei den untersuchten Proben um schwach reagierende Stäube handelt, die der niedrigsten Staubexplosionsklasse zuzuordnen sind. Auch die unteren Explosionsgrenzen sowie die Mindestzündenergien sind verhältnismäßig groß. Dies liegt hauptsächlich an den erheblichen Anteilen an inertem, anorganischem Material sowie der groben Körnung. In zukünftigen Arbeiten soll untersucht werden, wie Faktoren wie die chemische Zusammensetzung und die Korngröße das Explosionsverhalten beeinflussen. Das langfristige Ziel besteht darin, ausgehend von einer großen Anzahl an Versuchsergebnissen einen Zusammenhang mit den Staubeigenschaften zu finden, um schließlich eine Abschätzung der Explosionsfähigkeit zu ermöglichen.

Abstract

Safety-related characterisation of dusts from mechanical waste treatment plants

In the past many serious industrial accidents with casualties as well as massive property damage were caused by the ignition of explosive mixtures of dust and air. In addition to areas with naturally occurring high dust concentrations, like the inside of filtration devices or elevators, dust deposits pose a significant risk. These dust deposits may rise due to primary explosions which can lead to a chain reaction resulting in the propagation of the explosion throughout wide areas of the plant.

Basically every dust/air mixture formed by combustible material with a certain particle size at a certain dust concentration is explosive in the presence of an adequate ignition source. On this account the hazard regarding explosions originating from dusts at waste-treating and -recycling plants is not to be neglected. Because there is hardly any data for this branch of industry the thesis at hand addresses the quantification of the explosibility of different dusts from mechanical waste treatment plants.

A safety-related characterisation is carried out in order to assess if a certain dust forms an explosive atmosphere when mixed with air and which conditions are to be met for this to happen. In this paper the characterisation is achieved by determination of the safety-related parameters maximum pressure of explosion, maximum rise in explosion pressure, minimum ignition energy and lower explosion limit. Based on these parameters questions concerning the risk of an explosion can be answered and appropriate protective measures may be taken.

The literature research is the basis for the determination of the safety-related parameters in the laboratory. The legal obligations of plant operators as well as the theoretical background of the safety-related parameters are summarized. Furthermore data serving as reference values for the test results is researched.

The determined parameters imply that the examined samples will only show a light reaction so that they are to be assigned to the lowest dust explosion class. Also the lower explosion levels as well as the minimum ignition energies are comparatively high. This is partly because of a high percentage of inert anorganic material and partly due to relatively high mean particle sizes. Future studies should focus on determining how other factors like chemical composition and grain shape are influencing the explosion behavior. The goal is to provide a large number of test results and link them to the properties of the dust so that a theoretical estimation of the explosibility is possible.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Rechtliche Grundlagen	6
2.1	Ermittlung und Beurteilung der Explosionsgefahren	7
2.1.1	Zoneneinteilung	7
2.1.2	Gefahrenanalyse [9]	9
2.2	Festlegung von geeigneten Schutzmaßnahmen	9
2.2.1	Primärer Explosionsschutz [9]	10
2.2.2	Sekundärer Explosionsschutz [9]	10
2.2.3	Konstruktiver Explosionsschutz	11
2.2.4	Organisatorischer Explosionsschutz [9]	13
2.3	Explosionsschutzdokument	14
3	Sicherheitstechnische Kenngrößen	15
3.1	Mindestzündenergie	16
3.1.1	Zündquellen	17
3.1.2	Einflussgrößen auf die Mindestzündenergie	18
3.1.3	Bestimmung der Mindestzündenergie	23
3.2	Untere Explosionsgrenze	26
3.2.1	Einflussgrößen auf die untere Explosionsgrenze	28
3.2.2	Bestimmung der unteren Explosionsgrenze	32
3.3	Maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert	35
3.3.1	Einflussfaktoren auf den maximalen Explosionsdruck und den K_{St} -Wert	37
3.3.2	Bestimmung des maximalen Explosionsdrucks und des K_{St} -wertes	42
3.4	Literaturdaten	43
4	Versuchsdurchführung	47
4.1	Probenaufbereitung	48
4.1.1	Wassergehalt	48
4.1.2	Aschegehalt	48
4.1.3	Korngrößenverteilung	48
4.2	Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen	50
4.2.1	Maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert	50
4.2.2	Untere Explosionsgrenze	54
4.2.3	Mindestzündenergie	55
5	Ergebnisdiskussion	59
5.1	Interpretation der Ergebnisse	59
5.1.1	Maximaler Explosionsdruck, K_{St} -Wert	59
5.1.2	Untere Explosionsgrenze	73
5.1.3	Mindestzündenergie	79

5.2 Fehlerdiskussion	84
5.2.1 Fehlerquellen bei der Probenahme und -aufbereitung	85
5.2.2 Fehlerquellen bei der Bestimmung des maximalen Explosionsdrucks sowie des K_{St} -Wertes und der UEG	86
5.2.3 Fehlerquellen bei der Bestimmung der Mindestzündenergie	88
5.2.4 Probleme bei der Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Industriepraxis	90
6 Ausblick	92
7 Anhang	103

1 Einleitung

Schon seit Ende des 18. Jahrhunderts sind Staubexplosionen, vor allem von Mehl oder Kohlenstaub, als Gefahrenquellen bekannt. Durch die Industrialisierung hat sich die Auswahl an potentiell gefährlichen Stäuben vervielfacht. Die National Fire Protection Association (NFPA) legte im Jahr 1957 einen Bericht über insgesamt 1123 Explosionen, die im Zeitraum zwischen 1900 und 1956 stattgefunden haben, vor. Die dokumentierten Explosionen forderten insgesamt 676 Menschenleben, mehr als zweieinhalb so viele Verletzte und verursachten einen geschätzten, nicht inflationsbereinigten, wirtschaftlichen Schaden durch Materialverlust von 100,5 Millionen US-Dollar. Über die Hälfte der Explosionen fand in nahrungs- und futtermittelverarbeitenden Betrieben, etwa ein Achtel in holzverarbeitenden und der Rest in metall-, kunststoff-, kohlen- und papierverarbeitenden Betrieben statt. Auf Basis der vom Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit erhobenen Daten, wird die Zahl der in der Bundesrepublik Deutschland im Zeitraum zwischen 1965 und 1980 stattgefundenen Explosionen auf 2400 geschätzt. Ein Drittel der dokumentierten 357 Explosionen fand mit Holzstaub als Ausgangsmaterial statt, ein Viertel mit Staub aus Nahrungs- und Futtermitteln, gefolgt von Metallstäuben, Kunststoffen, Kohlenstaub und Papierstaub (siehe Abbildung 1.1).[1]

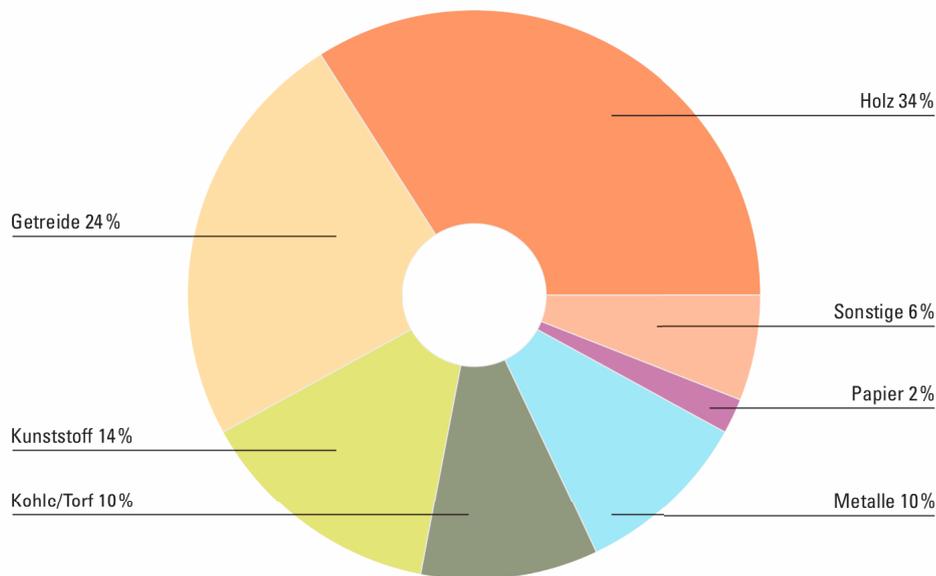


Abbildung 1.1: Anteil unterschiedlicher Arten von Staub als Ausgangsmaterial von Staubexplosionen [2]

Die 357 Staubexplosionen hatten 103 Todesopfer und 492 Verletzte zur Folge. Als Zündquellen dienten in einem Viertel der Fälle mechanische Funken, in einem Achtel der Fälle Glutnester. Als weitere Auslöser für Staubexplosionen wurden mechanische Erhitzung und Reibung, elektrostatische Entladungen, Feuer, spontane Selbstentzündung, heiße Oberflächen, Schweißarbeiten

sowie elektrische Anlagen identifiziert. Für Explosionen von Getreidestaub aus den USA wurden in der Statistik Hinweise darauf gefunden, dass sich die Anzahl an Staubexplosionen für den Zeitraum zwischen 1979 und 1988 auf etwa 20 Explosionen pro Jahr erhöht hat. Im Vergleich dazu wurden für den Zeitraum zwischen 1900 und 1956 jährlich nur 8,6 Getreidestaubexplosionen dokumentiert.[1]

So schrieb das Chemical Safety Board in einer Risikobetrachtung zu brennbaren Stäuben aus dem Jahr 2006, dass „*Staubexplosionen eine ernstzunehmende Gefahr in der amerikanischen Industrie darstellen und die derzeitigen Maßnahmen unzureichend sind*“. Dieser Bericht erfasst 281 durch brennbare Stäube ausgelöste Störfälle, die sich in den USA von 1980 bis 2005 ereigneten. Insgesamt kamen bei diesen Explosionen 119 Personen ums Leben, 718 wurden verletzt und der entstandene wirtschaftliche Schaden ging in die Millionenhöhe.[3]

Die Gefahren, die von brennbaren Stäuben ausgehen, gehören also keineswegs der Vergangenheit an, sondern sind durch den stetigen Ausbau der Industrie und steigende Anlagengrößen aktueller denn je.

Da grundsätzlich jeder Staub aus brennbarem Material unter bestimmten Voraussetzungen als explosionsfähig bezeichnet werden muss, ist auch die abfallverarbeitende und -behandelnde Industrie von dieser Problematik betroffen. Es gibt jedoch kaum Daten über die in diesen Bereichen anfallenden Stäube, weshalb eine Abschätzung von deren Explosionsgefährlichkeit anhand von Literaturdaten nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist. Hier setzt die vorliegende Arbeit an, indem Stäube aus Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen untersucht und hinsichtlich ihrer Gefährlichkeit über die sogenannten sicherheitstechnischen Kenngrößen (STK) bewertet werden.

Begriffserklärung Eine Explosion ist allgemein definiert als „*plötzliche Oxidations- oder Zerfallsreaktion mit Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beider gleichzeitig*“ [4].

Damit es zu einer Explosion kommt, müssen folgende Faktoren zusammentreffen:[5]

- Brennbarer Stoff in Form eines Gases, Dampfes, Nebels oder Staubes
- Oxidationsmittel (meist Luftsauerstoff)
- Wirksame Zündquelle, wie elektrisch oder mechanisch erzeugte Funken, heiße Oberflächen, elektrostatische Entladungen oder Flammen
- Bildung eines Gemisches aus brennbarem Stoff und Oxidationsmittel in einem bestimmten Konzentrationsbereich. Die Konzentration des brennbaren Stoffes liegt zwischen unterer und oberer Explosionsgrenze. Ist die Konzentration des brennbaren Stoffes zu gering, sodass es nicht zur Entzündung kommen kann, wird das Gemisch als mager bezeichnet. Ist die Konzentration zu groß, kann dieses sog. fette Gemisch ebenfalls nicht entzündet werden, da der Anteil an Oxidationsmittel zu gering ist. Aufgrund des Absetzverhaltens von Staub ist die Überschreitung der oberen Explosionsgrenze für längere Zeit als Schutzmaßnahme nicht geeignet.
- Bei Staubexplosionen ist auch die Korngröße des Staubes ein bestimmender Faktor für die Explosionsfähigkeit. Nur Staub in einem Korngrößenbereich unter 400 µm kann entzündet werden [2]. Staubteilchen größer 400 µm stellen also keine Gefahr in Bezug auf die

Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre dar. Meist kann aber das Vorkommen kleiner Korngrößenfraktionen nicht ausgeschlossen werden, da es oft zu Mahleffekten im Zuge von Aufbereitungsschritten oder Transport und Lagerung kommt.

In Abbildung 1.2 sind die grundlegenden Voraussetzungen für das Entstehen einer Staubexplosion in Form eines Explosionspentagons dargestellt. Wenn eine der Bedingungen ausgeschlossen werden kann, gilt die Explosionsgefahr als gebannt.



Abbildung 1.2: Voraussetzungen für die Entstehung einer Staubexplosion

Nicht nur Bereiche mit naturgemäß hohen Staubkonzentrationen, wie z.B. in Mühlen, Filteranlagen oder Silos, sondern auch abgelagerte Stäube stellen ein Sicherheitsrisiko dar. Zwar ist die Entzündung von Staubablagerungen durch Funkenschlag im regulären Arbeitsumfeld eher unwahrscheinlich. Eine Gefahr kann sich jedoch dann ergeben, wenn die Ablagerungen durch die Druckwelle einer primären Explosion aufgewirbelt werden, die so entstandene Staubwolke durch die ausbreitende Flammenfront entzündet wird und es zu einer sog. sekundären Explosion kommt.

Um die Gefahr, die von den im Betrieb anfallenden Stäuben ausgeht, quantifizieren zu können, bedarf es der sicherheitstechnischen Kenngrößen. Ausgehend vom Explosionspentagon, (Abb. 1.2), müssen folgende Fragen für die sicherheitstechnischen Charakterisierung beantwortet werden:

- Ist der Staub grundsätzlich explosionsfähig?

Diese Frage muss mit „Ja“ beantwortet werden, wenn der Staub aus brennbarem Material unter einer Korngröße von etwa 400 μm besteht.

- Wie stark reagiert der Staub im Falle einer Explosion?

Die Heftigkeit einer Explosionsreaktion ist zentral für die Auslegung von betroffenen Anlagenteilen und für die Gestaltung von Schutzmaßnahmen. Sie wird durch den maximalen Explosionsdruck sowie den maximalen Druckanstieg beschrieben.

- Ab welcher Staubkonzentration kommt es zur Explosion?

Die untere Explosionsgrenze (UEG) gibt an, wie viel Staub im Gemisch mit dem Oxidationsmittel vorhanden sein muss, damit es zur selbstständigen Ausbreitung der Flammenfront kommt.

- Welche Energie muss die Zündquelle mindestens haben, um das zündwilligste Staub-Luft-Gemisch zu entzünden?

Durch die Mindestzündenergie (MZE) kann beurteilt werden, welche Zündquellen in Verbindung mit der vorliegenden Staubwolke eine Gefahr darstellen.

Um diese Fragen beantworten zu können, wurden im Zuge dieser Arbeit die STK maximaler Explosionsdruck und -anstieg, untere Explosionsgrenze und Mindestzündenergie von Staubproben aus abfallbehandelnden Betrieben ermittelt.

Versuchsbedingungen Die Versuche zur Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurden ausschließlich bei Luftsauerstoffgehalt, Umgebungstemperatur und Atmosphärendruck durchgeführt. Wird die Temperatur T erhöht, so hat dies, bei konstantem Vordruck p_v und Explosionsvolumen V , gemäß des idealen Gasgesetzes (Gleichung 1.1), eine Verringerung des Sauerstoffgehalts n_{O_2} in der Luft zur Folge.[6]

$$p_v \cdot V = n_{O_2} \cdot T \cdot R_{id} \quad (1.1)$$

Stehen weniger Sauerstoffmoleküle zur Verfügung, läuft die Explosion weniger heftig ab.

Der maximale Explosionsdruck sinkt annähernd linear mit dem Anstieg der Temperatur, während der Einfluss auf den K_{St} -Wert bis zu Temperaturerhöhungen von 300°C sehr gering ist und für praktische Zwecke vernachlässigt werden kann.[7]

Aus dem idealen Gasgesetz (Gleichung 1.1) folgt außerdem, dass eine Druckerhöhung bei konstant bleibender Temperatur und Volumen, mit einer Erhöhung der Stoffmenge an Sauerstoff einhergeht. Folglich ist der maximale Explosionsdruck direkt proportional zum Vordruck des Staub-Luft-Gemisches.[7]

Wird eine explosionsfähige Staubatmosphäre mit Brenngas vermischt, entsteht ein hybrides Gemisch, wodurch es zur Zunahme der bereits bestehenden Explosionsgefahr kommt. Je nach Art des Staubes, sowie des zugefügten Brenngases, kann es zu einer heftigeren Explosionsreaktion, zu Entzündung bei niedrigeren Zündenergien und einer Herabsetzung der explosionsfähigen Mindestkonzentration an Staub kommen. Sogar Zusätze von solch geringen Mengen an Brenngas, bei denen das Gas alleine noch nicht explosionsfähig wäre, können das Explosionsverhalten signifikant verstärken. Die Gefahr der Bildung hybrider Gemische und der damit verbundene

Anstieg der Explosionsheftigkeit muss also bei der Planung und Auslegung des konstruktiven Explosionsschutzes berücksichtigt werden.[7]

Ist mit geänderten Umgebungsbedingungen zu rechnen, müssen die sicherheitstechnischen Kenngrößen unter diesen neu bestimmt werden. In solchen Fällen ist es nicht möglich, bei Standardbedingungen bestimmte Werte zu extrapolieren.

Ziele Die vorliegende Diplomarbeit fußt auf einem eingehenden Literaturstudium zur Ermittlung der derzeit in Österreich geltenden rechtlichen Bestimmungen für Anlagenbetreiber, in deren Betrieben mit potentiell explosionsfähigen Stäuben hantiert wird.

Im Grundlagenteil über die sicherheitstechnischen Kenngrößen sollten anschließend drei wesentliche Fragen beantwortet werden:

- Was beschreibt die sicherheitstechnische Kenngröße, bzw. worin besteht ihre Bedeutung?
- Wovon wird sie beeinflusst?
- Wie kann sie bestimmt werden?

Die Kenngrößen, die behandelt werden, sind Mindestzündenergie, untere Explosionsgrenze und die durch den maximalen Explosionsdruck sowie den K_{St} -Wert beschriebene Explosionsheftigkeit.

Außerdem sollen im Rahmen des Literaturstudiums Vergleichswerte für die im Praxisteil bestimmten Kenngrößen gefunden werden. Die Herausforderung hierbei besteht darin, dass Staub aus Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen meist sehr heterogen ist, wodurch er schwer zu spezifizieren ist. Außerdem sind in der Literatur kaum Untersuchungen von Abfällen vorzufinden.

Die Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben aus der abfallbehandelnden und -bearbeitenden Industrie bildet schließlich den Kern der Arbeit. Neben der sicherheitstechnischen Charakterisierung der einzelnen Stäube ist es ein Ziel, allgemeine Zusammenhänge und Abhängigkeiten zu finden. Konkret sollten die betroffenen Betriebe auf Basis der ermittelten Daten eine Einschätzung des Gefahrenpotentials der Stäube vornehmen können. Als längerfristiges Ziel gilt es, Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften eines Staubes wie z.B. Korngröße, Inertgehalt oder Zusammensetzung und seinem Explosionsverhalten zu finden.

2 Rechtliche Grundlagen

Die rechtlichen Grundlagen sollen dem Anlagenbetreiber einen Überblick über seine Pflichten zur Ermittlung und Vermeidung von Explosionsgefahren geben und auch zeigen, warum, neben wirtschaftlichen und moralischen Überlegungen, die sicherheitstechnische Charakterisierung von Stäuben unerlässlich ist. Nur durch Kenntnis der sicherheitstechnischen Kenngrößen lassen sich Brennstoffe, wie vom Gesetz gefordert, nach ihrem Gefahrenpotential beurteilen, sodass in weiterer Folge entsprechende Schutzmaßnahmen getroffen werden können.

Der Explosionsschutz in Europa wurde von der Europäischen Union durch zwei Richtlinien aus dem Jahr 1994 mit dem Namen Atmosphères Explosibles (ATEX) harmonisiert. Die Richtlinie ATEX 94/9/EG, kurz ATEX 95, ist eine Produktrichtlinie und richtet sich an Gerätehersteller und Inverkehrbringer, die dadurch verpflichtet werden, dass die von ihnen hergestellten bzw. in Verkehr gebrachten Geräte bestimmte Sicherheitsanforderungen erfüllen. Sie wurde in Österreich durch die Explosionsschutzverordnung 1996 (ExSV) in nationales Recht umgesetzt. Parallel dazu beschäftigt sich die Richtlinie ATEX 99/92/EG, kurz ATEX 137, mit dem Schutz von Arbeitnehmern in Bezug auf Explosionsgefahren. Es werden hier gewisse Mindestvorschriften festgelegt, die Anlagenbetreiber zu erfüllen haben, um den Schutz der Sicherheit und der Gesundheit der Arbeitnehmer vor Explosionsgefahren zu gewährleisten. Mit der Verordnung explosionsfähiger Atmosphären (VEXAT) wurde diese zweite ATEX-Richtlinie in österreichisches Recht umgesetzt.[8]

Für Betreiber von Abfallbehandlungs- und -aufbereitungsanlagen in Österreich ist also besonders die Verordnung explosionsfähiger Atmosphären relevant. Die Verordnung ist am 1. August 2004, mit einer Übergangsfrist für bereits bestehende Betriebsanlagen bis 1. Juli 2006, in Kraft getreten.[9]

Sie behandelt die Pflichten der Anlagenbetreiber in Bezug auf den Schutz der Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer. Diese beinhalten die Erfassung und Beurteilung der Explosionsgefahren, die daraus abgeleitete Festlegung geeigneter Schutzmaßnahmen, die umfassende Dokumentation in Form eines Explosionsschutzdokuments und die laufende Überprüfung und Anpassung der Schutzmaßnahmen.[9]

Die VEXAT beschäftigt sich nicht mit der Verwendung explosiver oder chemisch instabiler Arbeitsstoffe. Auch die Verwendung von Gasverbrauchseinrichtungen sowie die Beförderung gefährlicher Güter sind nicht Gegenstand dieser Verordnung.[9]

2.1 Ermittlung und Beurteilung der Explosionsgefahren

Um die in einer Anlage vorhandenen Explosionsgefahren ermitteln und einordnen zu können, ist es notwendig, zwei wesentliche Begriffe zu definieren.

Bei einer explosionsfähigen Atmosphäre im Sinne der VEXAT handelt es sich um ein Gemisch aus einem brennbaren Stoff und einem Oxidationsmittel, in dem sich der Verbrennungsvorgang nach erfolgter Entzündung auf das gesamte unverbrannte Gemisch überträgt [9]. Brennbare Stoffe sind nur in ausreichender Mischung mit einem Oxidationsmittel, meist Luftsauerstoff, und zwischen oberer und unterer Explosionsgrenze entzündlich.

Bereiche, in denen solche explosionsfähigen Atmosphären in gefahrdrohenden Mengen auftreten können, werden als explosionsgefährdete Bereiche bezeichnet. Die VEXAT definiert einen explosionsgefährdeten Bereich, wenn 50 % der UEG erreicht werden können, und verpflichtet den Anlagenbetreiber zu besonderen Schutzmaßnahmen in diesen Bereichen. [9] Bei der Beurteilung, ob ein solcher Bereich vorliegt, gelten in der Praxis die folgenden Richtlinien. Es handelt sich um eine gefahrdrohende Menge, wenn

- unabhängig von der Raumgröße, explosionsfähige Atmosphäre in einer zusammenhängenden Menge von mehr als 10 l entsteht,
- die explosionsfähige Atmosphäre mehr als ein Zehntausendstel des Raumvolumens ausfüllt oder
- der gesamte Boden eines Raumes mit einer weniger als 1 mm dicken Staubschicht bedeckt ist.[10]

2.1.1 Zoneneinteilung

Damit besondere, an die Gefahren und Umgebungsbedingungen angepassten, Schutzmaßnahmen umgesetzt werden können, sieht die Verordnung eine Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche in Zonen vor. Die Einstufung hängt von der Wahrscheinlichkeit und der Dauer des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre ab. Sie bezieht sich nicht auf die Gefahr, die von einem solchen Bereich ausgeht oder dem Risiko, das dieser darstellt, sondern richtet sich nur nach Ausmaß, Häufigkeit und Dauer des Auftretens von explosionsfähiger Atmosphäre.[9]

Bereiche, in denen eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke brennbaren Staubes in Luft ständig, langfristig oder häufig vorhanden ist, werden der Zone 20 zugeordnet. Dies trifft meist nur auf das Innere von Apparaten wie Mühlen, Staubfilter oder Trockner, Behälter oder Rohrleitungen zu. Wenn es durch das Aufwirbeln von abgelagertem Staub kurzzeitig zum Auftreten explosionsfähiger Atmosphäre kommt, wird der betreffende Bereich der Zone 21 zugeordnet. In der Praxis ist diese Zone oft in der näheren Umgebung von Staubentnahme- oder Füllstationen bzw. bei Vorhandensein von Staubablagerungen gegeben. Bei nur seltenem und kurzzeitigem Auftreten explosionsfähiger Atmosphäre wird die Zone 22 eingeteilt. Hierzu zählen vor allem Bereiche, in denen die Möglichkeit besteht, dass Staub aus Undichtheiten austritt und Ablagerungen bildet.[8]

Die Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in die Zonen 20, 21 und 22 richtet sich nach den in Tabelle 2.1 dargestellten Kriterien. Bei der Zoneneinteilung ist nur jener Bereich, in dem die explosionsfähige Atmosphäre in gefährdender Menge auftritt, der entsprechenden Zone zuzuordnen und nicht der gesamte Raum [10].

Tabelle 2.1: Zoneneinteilung für aus Staub-Luft-Gemischen bestehende explosionsfähige Atmosphären [9]

Zonenbezeichnung	Häufigkeit und Dauer des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre
20	Ständig, über lange Zeiträume oder häufig
21	Bei Normalbetrieb gelegentlich
22	Bei Normalbetrieb nicht oder nur kurzzeitig

Begriffe wie „häufig“, „ständig“, „kurzzeitig“ oder „gelegentlich“ sind in der Verordnung nicht näher definiert. In der Industrie wird daher versucht, Zeitwerte festzulegen, um die Einstufung in der Praxis zu erleichtern. Demnach wird vorgeschlagen, dass, wenn damit zu rechnen ist, dass es mehr als 1000 Stunden pro Jahr zum Auftreten explosionsgefährdeter Bereiche kommt, von häufigem und bei weniger als 10 Stunden pro Jahr von seltenem Auftreten gesprochen wird. Diese Annahmen stammen aus einer Studie der British Petroleum Industry und sind in der Fachwelt umstritten.[11]

Wesentlich für die Zoneneinteilung ist es, die charakteristischen Eigenschaften sowie die Kenn-
daten der Arbeitsstoffe, die explosionsfähige Atmosphären bilden können, zu ermitteln. Auch hier wird in der VEXAT nicht näher auf die zu bestimmenden Kenngrößen eingegangen. Vier wesentliche Kenngrößen, nämlich maximaler Explosionsdruck, maximaler Druckanstieg, untere Explosionsgrenze und Mindestzündenergie werden im Zuge dieser Arbeit näher behandelt und experimentell bestimmt.[9]

Wie in Tabelle 2.2 zusammengefasst, bedingen die verschiedenen Zonen ein unterschiedliches Maß an Sicherheit. Die Zone 22 verlangt ein normales Maß an Sicherheit, d.h. Geräte, die in dieser Zone zum Einsatz kommen, müssen für den Normalbetrieb sicher sein. Gemäß Explosionschutzverordnung 1996 (ExSV) trifft dies auf alle Geräte der Kategorie 3D oder höher zu. Bei Geräten, die in Zone 21 verwendet werden, muss die Sicherheit bei häufig zu erwartenden Gerätestörungen, wie z.B. dem Ausfall von einem Bauteil, gewährleistet sein. Dies trifft auf Geräte der Kategorie 2D oder höher zu. In der Zone 20 dürfen nur Geräte der Kategorie 1D verwendet werden, deren Gerätesicherheit selbst bei seltenen Gerätestörungen, z.B. dem Ausfall von zwei Bauteilen gleichzeitig, gewährleistet sein muss.[12]

Für den Fall, dass eine explosionsfähige Atmosphäre mehrere Arten von brennbaren Gasen, Dämpfen oder Stäuben enthält, müssen die Schutzmaßnahmen auf das größtmögliche Gefährdungspotential ausgelegt werden [9].

Tabelle 2.2: Zusammenhang der Zoneneinteilung nach VEXAT mit den Gerätekategorien gemäß Explosionsschutzverordnung 1996 [9][13]

Zone	Sicherheit	Gerätekategorie
20	zweifach fehlersicher	II 1D
21	einfach fehlersicher	II 1D, II 2D
22	normalsicher	II 1D, II 2D, II 3D

2.1.2 Gefahrenanalyse [9]

Sind Arbeitsmittel, Arbeitskleidung etc. nicht eindeutig für den Gebrauch in einer explosionsgefährdeten Zone geeignet, wenn also keine entsprechende Klassifizierung oder Angabe durch den Hersteller vorliegt, muss eine Gefahrenanalyse durchgeführt werden. Damit soll sichergestellt werden, dass von der Verwendung eines Gerätes, Schutzsystems, Arbeitsmittels oder durch das Tragen von Arbeitskleidung und persönlicher Schutzausrüstung im betreffenden explosionsgefährdeten Bereich keine Gefahr ausgeht. Ergibt die Gefahrenanalyse nicht eindeutig, dass die Arbeitsmittel für einen bestimmten explosionsgefährdeten Bereich geeignet sind, dürfen sie in der jeweiligen Zone nicht verwendet werden.

Die Gefahrenanalyse gilt dann als durchgeführt, wenn nachgewiesen wird, dass die Verwendung im Sinne der In-Verkehr-Bringer-Vorschriften bestimmungsgemäß ist, eine schriftliche Bestätigung der Eignung durch den Hersteller oder In-Verkehr-Bringer oder der Nachweis durch einen fachlich qualifizierten Ziviltechniker, eine zugelassene Prüfstelle, eine akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle oder ein zuständiges Ingenieurbüro vorliegt.

2.2 Festlegung von geeigneten Schutzmaßnahmen

Gemäß VEXAT ist der Anlagenbetreiber verpflichtet, entsprechende technische und organisatorische Maßnahmen zum Explosionsschutz zu treffen. Die Schutzmaßnahmen sind dreigeteilt, wobei der primäre immer dem sekundären und dieser stets dem konstruktiven Explosionsschutz vorzuziehen ist.[9]

1. Primärer Explosionsschutz
Dieser hat präventiven Charakter, da hierbei die Entstehung explosionsgefährdeter Bereiche verhindert wird [9].
2. Sekundärer Explosionsschutz
Ist eine Vermeidung von explosionsgefährdeten Bereichen durch die Art der Arbeitsvorgänge nicht möglich, ist der nächste Schritt zur Vermeidung einer Explosion, das Auftreten wirksamer Zündquellen zu verhindern [9].
3. Konstruktiver Explosionsschutz
Kann die Explosionsgefahr durch den primären und sekundären Explosionsschutz nicht gebannt werden, müssen Maßnahmen getroffen werden, die die Auswirkungen einer Ex-

plosion so weit begrenzen, dass die Gesundheit und die Sicherheit der Arbeitnehmer nicht beeinträchtigt werden. Der konstruktive Explosionsschutz wirkt also erst nach erfolgter Explosion und zielt auf eine Schadensbegrenzung ab.[9]

Oberstes Ziel dieser Maßnahmen ist es, explosionsgefährliche Bereiche so zu gestalten, dass die Arbeit gefahrlos ausgeführt werden kann und die Gesundheit der Arbeitnehmer geschützt wird. Alle Maßnahmen sind in regelmäßigen Abständen oder bei wesentlichen Änderungen zu prüfen.[9] Im Folgenden werden die einzelnen Explosionsschutzkategorien näher beschrieben.

2.2.1 Primärer Explosionsschutz [9]

Die Vermeidung der Entstehung explosionsgefährdeter Bereiche soll im Besonderen folgende Maßnahmen umfassen:

- Brandgefährliche Arbeitsstoffe entweder ersetzen oder auf ein notwendiges Mindestmaß reduzieren.
- Vermeidung der Freisetzung von explosionsfähiger Atmosphäre durch die Verwendung geschlossener Betriebseinrichtungen.
- Vollständiges Erfassen sowie Abführen explosionsfähiger Atmosphäre bei unvermeidbarer Freisetzung.
- Vermeidung von Staubablagerungen mittels Entfernung der Ablagerungen durch Verfahren, die nicht zur Aufwirbelung des Staubes führen.

Wenn weder eine Einstufung in Zonen vorgenommen wird, noch die Entstehung explosionsgefährdeter Bereiche im Normalbetrieb ausgeschlossen werden kann, müssen kontinuierliche Messeinrichtungen installiert werden. Diese haben die Aufgabe, die Arbeitnehmer bei Erreichen der Alarmbedingungen, z.B. der Grenzkonzentration, akustisch und falls nötig auch optisch zu warnen.

Kann die Entstehung explosionsgefährdeter Bereiche nicht sicher ausgeschlossen werden, muss durch repräsentative Messungen der Konzentration von explosionsfähigen Atmosphären die Wirksamkeit der Maßnahmen des primären Explosionsschutzes nachgewiesen werden. Wenn jedoch nachgewiesen werden kann, dass die untere Explosionsgrenze mit genügend großer Sicherheit unterschritten wird oder eine Einstufung in Zonen erfolgt, sind solche Messungen nicht erforderlich.

2.2.2 Sekundärer Explosionsschutz [9]

In explosionsgefährdeten Bereichen dürfen keine wirksamen Zündquellen vorhanden sein. Potentielle Zündquellen müssen vermieden oder auf das absolut notwendige Ausmaß beschränkt werden. Es dürfen nur unbedingt erforderliche Arbeitsmittel verwendet werden und die Installation elektrischer Anlagen sollte nach Möglichkeit außerhalb explosionsgefährdeter Bereiche erfolgen.

Beispiele für wirksame Zündquellen, also Zündquellen, die explosionsfähige Atmosphären entzünden können, sind:

- heiße Oberflächen, Flammen, heiße Gase
- mechanisch erzeugte Funken, elektrische Anlagen, Blitzschlag
- statische Elektrizität, kathodischer Korrosionsschutz
- elektrische Ausgleichsströme
- Ultraschall, nichtionisierende und ionisierende Strahlung
- chemische Reaktionen
- adiabatische Kompression, Stoßwellen

Der sekundäre Explosionsschutz erfordert gemäß VEXAT die Vermeidung von Zündquellen. Daraus ergeben sich für elektrische Anlagen und Gegenstände in explosionsgefährdeten Bereichen folgende Anforderungen:

- Arbeitsmittel, Arbeitskleidung und persönliche Schutzausrüstung dürfen nur verwendet werden, wenn sie nach dem Stand der Technik für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen geeignet sind und bestimmungsgemäß verwendet werden.
- Geräte und Schutzsysteme im Sinne der Explosionsschutzverordnung 1996 müssen, abhängig von der Zone, in der sie eingesetzt werden, bestimmten Gerätekategorien entsprechen (siehe Tabelle 2.2).
- Sind Geräte oder Schutzsysteme anders klassifiziert als nach ExSV, dürfen sie dann verwendet werden, wenn entweder durch eine fachkundige Person oder durch die Gefahrenanalyse (siehe Kapitel 2.1.2) festgestellt wurde, dass sie für die Zone, in der sie verwendet werden, geeignet und technisch sicher sind.
- Arbeitsmittel, das sind im Sinne der VEXAT vor allem solche, die eine eigene potentielle Zündquelle aufweisen oder in Verbindung mit Arbeitsvorgängen potentielle Zündquellen darstellen können, dürfen nur verwendet werden, wenn sie laut Herstellerangaben für den betreffenden Arbeitsstoff geeignet sind.

2.2.3 Konstruktiver Explosionsschutz

Diese Art von Explosionsschutz hat die Begrenzung der Auswirkungen von Explosionen zum Ziel. Sie kommt zum Einsatz, wenn es technisch oder organisatorisch nicht möglich ist, wirksame Zündquellen im Inneren von Betriebseinrichtungen, z.B. in Behältern, Silos oder Rohrleitungen, auszuschließen.[9]

Es müssen dann Maßnahmen getroffen werden, die die Auswirkungen von Explosionen auf ein für die Arbeitnehmer unbedenkliches Maß beschränken. Zu solchen Maßnahmen zählen:[9]

- Explosionsfeste Bauweise
- Explosionsunterdrückung
- Explosionsdruckentlastung
- Explosionstechnische Entkopplung

Bei der explosionsfesten Bauweise werden die betreffenden Anlagenteile so gebaut, dass sie einer Explosion im Inneren standhalten ohne aufzureißen. Die Auslegung erfolgt auf den maximalen Explosionsüberdruck. Die Bauweise der Anlagenteile ist entweder explosionsdruckfest, sodass der Behälter dem Explosionsüberdruck standhält, ohne bleibend verformt zu werden oder explosionsdruckstoßfest, wobei der Behälter einem Druckstoß in Höhe des zu erwartenden Explosionsüberdrucks standhält. Bei der zweiten Variante sind bleibende Verformungen zulässig.[5]

Explosionsunterdrückungseinrichtungen verhindern, im Falle einer Explosion, durch schnelles Einblasen von Löschmitteln das Erreichen des maximalen Explosionsdruckes. Die so geschützten Anlagenteile müssen also nur für einen verminderten Explosionsdruck ausgelegt werden. Im Gegensatz zur Explosionsdruckentlastung bleiben die Auswirkungen der Explosion auf das Innere der Apparatur beschränkt [5]. Eine zuverlässige und frühzeitige Erkennung einer sich entwickelnden Explosion ist hierbei unumgänglich. Da sich der Druckanstieg vor allem bei zunächst schwach verlaufenden Explosionen nicht zur Überwachung eignet, sind zusätzliche Maßnahmen wie optische Flammenmelder oder Druckerkenner notwendig.[2]

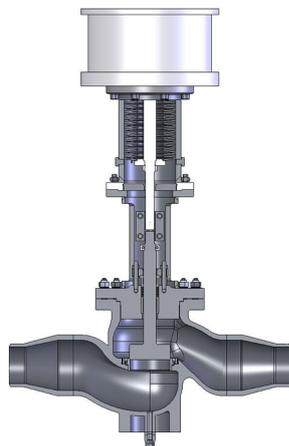
Durch eine Explosionsdruckentlastung wird der Behälter bzw. die Rohrleitung vom entstehenden Explosionsdruck entlastet, indem es zu einer kontrollierten Öffnung der ursprünglich geschlossenen Anlage kommt. Ist ein festgelegter Ansprechdruck erreicht, wird die entstandene Druckwelle in eine ungefährliche Richtung abgeleitet. Dies passiert z.B. durch Explosionsklappen oder Berstscheiben, die bei Überschreiten des Ansprechdruckes einen definierten Querschnitt freigeben. Diese Art des Explosionsschutzes ist nur möglich, wenn durch die freigesetzten Stoffe weder Arbeitnehmer in ihrer Gesundheit und Sicherheit gefährdet werden, noch die Umwelt geschädigt wird.[5]

Bei der explosionstechnischen Entkopplung wird die Ausbreitung der Explosion verhindert, sodass es zu keiner Flammen- oder Explosionsübertragung auf gefährdete Bauteile oder Bereiche kommen kann. Diese Maßnahme ist meist als Unterstützung der zuvor genannten konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen ausgelegt [9]. Das Ziel ist es, die Explosion auf einen Anlagenteil zu begrenzen, um eine Verstärkung der Explosionswirkung durch Beschleunigungseffekte zu verhindern. Bei der Vermeidung der Übertragung von Staubexplosionen wird zwischen vollständiger Entkopplung und Teil-Entkopplung unterschieden. Während bei der vollständigen Entkopplung sowohl die Flammen- als auch die Druckausbreitung verhindert wird, wodurch nachgeschaltete Anlagenteile i.A. nicht mehr explosionsfest ausgeführt werden müssen, wird bei der Teil-Entkopplung nur die Flammen- oder die Druckausbreitung verhindert, was einen weiteren Explosionsschutz der angeschlossenen Aggregate erforderlich macht. Eine Teil-Entkopplung kann sinnvoll sein, wenn keine vollständige explosionstechnische Entkopplung notwendig ist, sondern

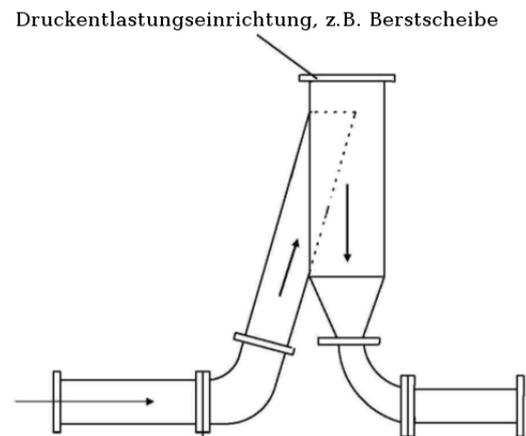
nur eine Isolation der Flammen oder eine Stoppung der sich fortpflanzenden Druckwelle gefordert ist. Folgende Einrichtungen sind Beispiele für Maßnahmen zur explosionstechnischen Entkopplung:[14]

Schnellschlussventil

Das Schnellschlussventil (Abb. 2.1a) schließt, sobald eine bestimmte, durch die Explosionsdruckwelle verursachte Strömungsgeschwindigkeit erreicht ist. Diese Variante der vollständigen Entkopplung ist nur für den Einbau in horizontale Rohrleitungen und für geringe Staubbelastungen, wie z.B. die Reinluftseite von Filteranlagen, geeignet.[14]



(a) Schnellschlussventil [15]



(b) Entlastungsschlot [14]

Abbildung 2.1: Ausführungsbeispiele der explosionstechnischen Entkopplung

Entlastungsschlot

Durch die Richtungsänderung des austretenden Gas-Staub-Stromes um 180° und einer Druckentlastungseinrichtung am höchsten Punkt des Umlenkungsknies (siehe Abbildung 2.1b) kommt es zu einer Teil-Entkopplung. Obwohl eine vollständige Explosionsentkopplung mit dieser Methode nicht immer gewährleistet werden kann, wird die Flammenfront so stark gestört, dass Explosionen in den mit dem Explosionsherd verbundenen Anlagenteilen deutlich langsamer anlaufen. Wie bei der Explosionsdruckentlastung muss auch beim Entlastungsschlot sichergestellt werden, dass durch die im Explosionsfall austretenden Stoffe weder Mensch noch Umwelt gefährdet wird.[14]

2.2.4 Organisatorischer Explosionsschutz [9]

In Kombination mit technischen Explosionsschutzmaßnahmen müssen immer auch organisatorische Maßnahmen getroffen werden, die die möglichen Wechselwirkungen zwischen Explosionsschutzmaßnahmen und Arbeitsabläufen berücksichtigen. Der organisatorische Explosionsschutz hat zum Ziel, Arbeitnehmer über Gefahren und Schutzmaßnahmen in Gegenwart von explosionsfähiger Atmosphäre umfassend zu informieren. Außerdem sollen die Beschäftigten im richtigen Verhalten in explosionsgefährdeten Bereichen sowie im Umgang mit explosionsfähiger Atmosphäre unterwiesen werden. Um die Anforderungen in Bezug auf den organisatorischen

Explosionsschutz zu erfüllen, muss der Arbeitnehmer gemäß VEXAT vor allem folgende Aspekte berücksichtigen:

- Information der Arbeitnehmer über Entstehung und Art der Explosionsgefahren sowie die getroffenen Schutzmaßnahmen und das richtige Verhalten im Falle einer Alarmierung
- Jährliche Unterweisung der Arbeitnehmer
- Erstellung schriftlicher Anweisungen für Arbeiten in und an Behältern, in denen sich explosionsfähige Atmosphäre ansammeln kann
- Festlegung eines Arbeitsfreigabesystems einschließlich der erforderlichen Schutz- und Rettungsmaßnahmen für Inspektion, Instandhaltung, Reparatur, Reinigung und Prüfung von Betriebseinrichtungen, in denen sich explosionsfähige Atmosphäre ansammeln kann
- Veranlassung der notwendigen Prüfungen und Beauftragung geeigneter, fachkundiger Personen

2.3 Explosionsschutzdokument

Zu den Evaluierungspflichten des Anlagenbetreibers im Sinne der VEXAT zählt das Ermitteln sowie die Beurteilung der Explosionsgefahren, die Festlegung und Umsetzung geeigneter Schutzmaßnahmen und deren Dokumentation. Mit dem Explosionsschutzdokument (ExSD) soll der Arbeitgeber den Nachweis zur Erfüllung dieser Pflichten erbringen. Das Explosionsschutzdokument ist vor Aufnahme der Arbeit zu erstellen und ständig auf dem aktuellen Stand zu halten. Werden wesentliche Änderungen mit Auswirkungen auf den Schutz vor explosionsfähiger Atmosphäre vorgenommen, muss es überarbeitet werden.[9]

Es soll Angaben enthalten über die festgestellten Explosionsgefahren bei Normalbetrieb und vorhersehbaren Störungen sowie bei Instandhaltung, Reinigung, Prüfung und Reparatur und Arbeiten an und in Behältern, in denen sich gefährliche explosionsfähige Atmosphäre bilden kann. Weiters werden die zur Vermeidung von Gefahren gewählten Explosionsschutzmaßnahmen und die für zu erwartende Störungen, Reinigung, Reparatur etc. getroffenen Vorkehrungen aufgelistet. Auch die Zoneneinteilung sowie die Eignung der in den verschiedenen Zonen verwendeten Arbeitsmittel ist ein Teil des Dokuments. Ebenfalls erfasst werden der Umfang und die Ergebnisse der in den explosionsgefährdeten Bereichen erforderlichen Prüfungen und Messungen. Im ExSD wird außerdem bestimmt, für welche Arbeiten, außer den in § 6 Abs. 3 VEXAT genannten Arbeiten, schriftliche Anweisungen zu erstellen und ein Arbeitsfreigabesystem festzulegen ist. Weiters werden die Gestaltung und das Ziel der Koordination bei der Beschäftigung betriebsfremder Arbeitnehmer auf dem Betriebsgelände definiert.[9]

Von der Wirtschaftskammer Österreich wurde ein Ratgeber für die Erstellung des Explosionsschutzdokumentes erarbeitet. Zum aktuellen Zeitpunkt sind die entsprechend angepassten Leitfäden für sechs unterschiedliche Branchen unter der Internetadresse www.eval.at verfügbar. Dieser soll den Betrieben mittels ausführlicher Ausfüllhilfen helfen, ein rechtskonformes Explosionsschutzdokument zu erstellen. Für jeden Arbeitsbereich bzw. Arbeitsvorgang wird ein eigenes Datenblatt zur Beschreibung der sicherheitstechnisch relevanten Bereiche erstellt.[10]

3 Sicherheitstechnische Kenngrößen

Der Anlagenbetreiber hat die Pflicht zu ermitteln, ob von den in seinem Betrieb verwendeten, produzierten oder sich ablagernden Stoffen eine Gefahr für die Beschäftigten ausgeht. Solch eine Gefahr im Sinne der VEXAT besteht, wenn ein entzündliches Stoff-Luft-Gemisch gebildet werden kann. Mit Hilfe der sicherheitstechnischen Kenngrößen kann objektiv beurteilt werden, ob und wenn ja, unter welchen Bedingungen ein Stoff eine Explosionsgefahr darstellt. Die wesentlichen Fragen, die für die Beurteilung der von einem Staub ausgehenden Explosionsgefahr beantwortet werden müssen, sind folgende:

1. Ist der Staub grundsätzlich explosionsfähig?

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass jeder Staub, der aus einem brennbaren Stoff besteht, explosionsfähig ist. Jedoch können nur Staubpartikel mit Korngrößen kleiner $400\ \mu\text{m}$ eine zündfähige Staubwolke bilden. Während ein Holzwürfel mit einer Masse von einem Kilogramm bei Entzündung langsam verbrennt, reagiert aufgewirbelter Holzstaub der selben Masse bei geringerer Zündenergie mit einer viel schneller ablaufenden Explosion. Dies liegt daran, dass die Gesamtoberfläche des Staubes, der in starker Vereinfachung als aus tausenden Würfeln mit einer Seitenlänge von zum Beispiel $400\ \mu\text{m}$ bestehend betrachtet werden kann, um das 288-fache größer ist, als die Oberfläche des Würfels. Dieser Umstand wird in Abbildung 3.1 veranschaulicht. Durch die größere Oberfläche kommt es zu einem intensiveren Kontakt mit dem Oxidationsmittel, was zu einer Verringerung der zur Entzündung notwendigen Energie und zur Verstärkung der Reaktionsheftigkeit führt.[16]

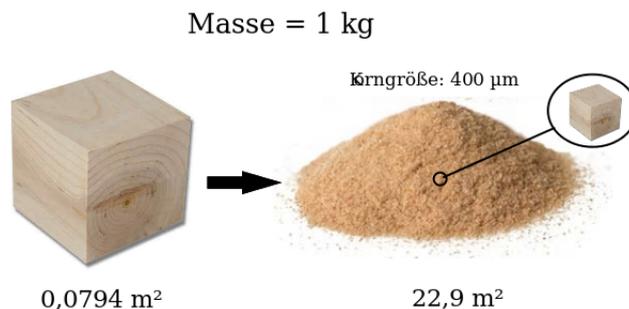


Abbildung 3.1: Vergrößerung der Oberfläche durch Verringerung der Korngröße

2. Wie groß muss die auf die Staubwolke übertragene Energie sein, damit es zur Entzündung kommt?

Mit der Mindestzündenergie wird jene Energie beschrieben, die das zündwilligste Gemisch aus Staub und Luft zur Entzündung bringen kann. Sie ist notwendig, um bewerten zu können, welche Zündquellen als wirksam im Sinne der VEXAT gelten und somit im explosionsgefährdeten Bereich durch die Maßnahmen des sekundären Explosionsschutzes so weit als möglich vermieden werden müssen.

3. In welcher Menge muss der Staub vorhanden sein, um eine explosionsfähige Atmosphäre bilden zu können?

Eine Mischung aus brennbarem Staub und Luft ist dann explosionsfähig, wenn die Konzentration des brennbaren Staubes zwischen unterer und oberer Explosionsgrenze (OEG) liegt (siehe Abbildung 3.2). Unter der UEG ist das Gemisch zu mager, d.h. der Anteil an

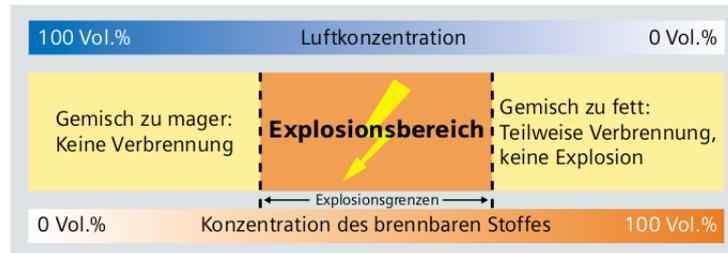


Abbildung 3.2: Explosionsgrenzen [12]

brennbarem Staub in der Luft ist zu gering für eine Explosion, während über der OEG der Anteil des Oxidationsmittels für eine Verbrennung zu gering ist. Die OEG ist bei Stäuben zu vernachlässigen, da aufgrund des Absetzungsverhaltens von Stäuben nicht gewährleistet werden kann, dass sie über längere Zeit überschritten wird.[7] Umso wichtiger ist es, die untere Explosionsgrenze zu kennen. Gemäß VEXAT wird sie einerseits verwendet, um festzustellen, ob es zur Entstehung von explosionsgefährdeten Bereichen kommen kann und andererseits als Grenzwert für den Nachweis der Wirksamkeit primärer Explosionsschutzmaßnahmen [9].

4. Wie stark reagiert der Staub bei Entzündung?

Die Heftigkeit, mit der eine Staubwolke reagiert, wird durch den maximalen Explosionsdruck und den maximalen Explosionsdruckanstieg beschrieben. Diese beiden Kenngrößen sind die Grundlage für den konstruktiven Explosionsschutz.

Aus diesen vier wichtigen Fragen zur Beurteilung des Explosionsverhaltens von Stäuben werden die vier Kennzahlen zur sicherheitstechnischen Quantifizierung abgeleitet. Die Mindestzündenergie, die untere Explosionsgrenze sowie maximaler Explosionsdruck und -druckanstieg wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit für unterschiedliche Stäube aus mechanischen Abfallbehandlungsanlagen im Labor ermittelt.

In den folgenden Abschnitten wird jeweils ein Überblick über die Bedeutung der STK für die sicherheitstechnische Beurteilung der Stäube, ihre Einflussgrößen und die Bestimmungsmethoden gegeben. Nicht behandelt werden die Auswirkungen von geänderten Umgebungsbedingungen oder von Brenngaszusatz, da die Laboruntersuchungen unter Standardbedingungen durchgeführt wurden.

3.1 Mindestzündenergie

Die Mindestzündenergie gibt an, wie groß die von der Zündquelle auf ein brennbares Staub-Luft-Gemisch übertragene Energie sein muss, damit es zur Entzündung kommt. Zur Bestimmung

dieser Kenngröße wird die in einem Kondensator gespeicherte elektrische Energie gemessen, die nach zeitlich gedehnter Entladung über eine Induktivität das zündwilligste Gemisch bei Umgebungsbedingungen entzündet. Die Mindestzündenergie ist notwendig, um beurteilen zu können, welche Gefahr von einer Zündquelle im Bezug auf ein bestimmtes Staub-Luft-Gemisch ausgeht. Der Kennwert schwankt, je nach Zusammensetzung, Korngrößenverteilung und Agglomerationsverhalten, von Staub zu Staub stark. Das zündwilligste Gemisch muss durch Variieren der Konzentration, Zündverzögerungszeit und Turbulenz für jeden Staub eigens experimentell ermittelt werden.

Der Bereich, der in der Literatur angegebenen Werte für die MZE von Stäuben reicht von 0,01 mJ bis über 1 kJ [16]. Stäube mit einer Mindestzündenergie von geringer als 3 mJ gelten als extrem zündempfindlich während bei Werten von 3 bis 10 mJ von besonders zündempfindlichen und bei über 10 mJ von normal zündempfindlichen Stäuben gesprochen wird. Im Vergleich dazu liegen Mindestzündenergien für Gase zwischen 0,009 mJ für Schwefelwasserstoff bis zu 9 J für Dichlormethan.[17] Die Mindestzündenergien normalbrennbarer Gase bewegen sich in einem Bereich zwischen 0,01 und 0,3 mJ [18]. In Abbildung 3.3 sind die Mindestzündenergiebereiche für Stäube und Gase im Vergleich mit den Zündenergien von in der Praxis relevanten Zündquellen dargestellt.

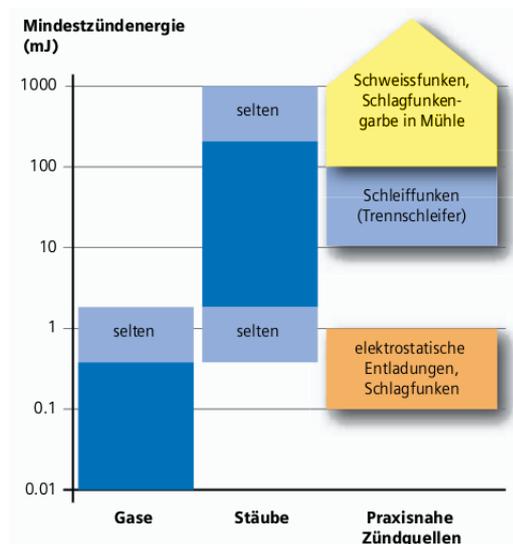


Abbildung 3.3: Mindestzündenergiebereiche von Gasen und Stäuben im Vergleich mit praxisnahen Zündquellen [12]

3.1.1 Zündquellen

Eine Befragung in Nordamerika zur Häufigkeit verschiedener Zündquellen als Auslöser von Staubexplosionen hat, wie in Abbildung 3.4 zu sehen, ergeben, dass mechanische Funken beinahe ein Drittel der Staubexplosionen verursachen. Bei jeweils etwa einer von zehn Staubexplosionen waren Glimmnester, statische Elektrizität, Reibung oder Feuer die Auslöser. Geringere Bedeutung haben heiße Oberflächen, Selbstentzündung und Schweißen als wirksame Zündquellen. Elektrische Betriebsmittel waren nur in 3,5 % der Fälle Ursache für Staubexplosionen.[2]

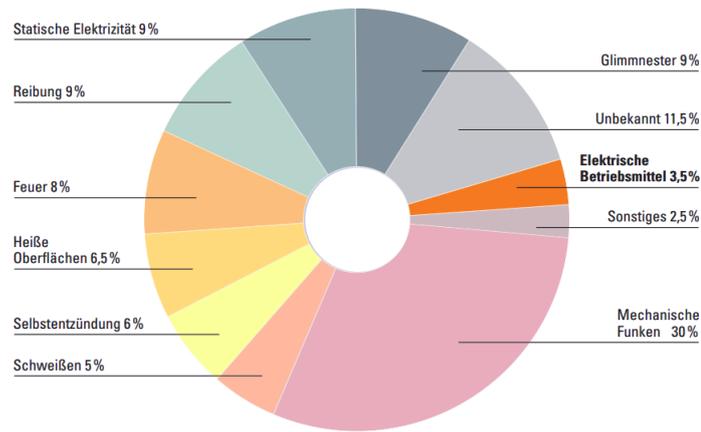


Abbildung 3.4: Prozentualer Anteil unterschiedlicher Zündquellen als Auslöser von Staubexplosionen [2]

Zündquellen können im Hinblick auf ihre Vermeidbarkeit in zwei Gruppen eingeteilt werden: jene, die durch vorbeugende organisatorische Maßnahmen verhindert werden können und jene, die nicht im Vorhinein ausgeschlossen werden können, da sie im Zuge eines Störfalles unerwartet entstehen.[7]

Je nach Zoneneinteilung ist der Anlagenbetreiber gemäß VEXAT verpflichtet, Zündquellen mit einem bestimmten Maß an Sicherheit auszuschließen (siehe Tabelle 2.2). Während also in Zone 22 offensichtliche Zündquellen wie Rauchen, Schweißen oder Hantieren mit offenem Feuer vermieden werden und eingesetzte Geräte für Normalbetrieb sicher sein müssen, müssen in Zone 21 und 20 auch die im Falle eines Störfalles auftretenden Zündquellen vermieden werden. In Zone 20 muss durch ein redundantes Schutzsystem sichergestellt werden, dass auch bei zwei unabhängigen Fehlern keine wirksame Zündquelle entstehen kann.[13]

3.1.2 Einflussgrößen auf die Mindestzündenergie

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, hängt die Mindestzündenergie von vielen Einflussfaktoren ab. In den Versuchen wird durch Variation verschiedener Parameter das Gemisch aus Staub und Luft gesucht, bei dem am wenigsten Energie notwendig ist, um es zu entzünden. Bei der Bestimmung der MZE steht also nicht die Simulation des konkreten Anwendungsfalles im Mittelpunkt, sondern das Nachstellen der für eine Entzündung idealen Bedingungen. Die Faktoren, die einen Einfluss auf die Mindestzündenergie haben, werden im Folgenden behandelt.

Korngröße

Grundsätzlich gilt, dass ein Staub umso leichter entzündet werden kann, je kleiner seine Korngröße ist. Dieser Trend setzt sich jedoch nur bis zu einer Grenzkorngröße fort, ab der die Verbrennungsrate der Staubwolke wieder zunimmt. Für Kohle liegt diese Grenzkorngröße bei ungefähr 50 μm , bei natürlichen, organischen Stoffen wie Stärke oder Proteine bei 10 μm und bei stark reaktivem Staub liegt sie weit darunter [16]. In Abbildung 3.5 ist zu sehen, dass bei der Untersuchung von Stäuben aus Aluminium, Polyethylen und optischem Aufheller in

doppeltlogarithmischer Darstellung ein linearer Zusammenhang zwischen Mindestzündenergie und Medianwert gefunden wurde. Die Mindestzündenergie steigt annähernd mit der dritten Potenz des Partikeldurchmessers. Die ermittelten Kenngrößen für optischen Aufheller weichen jedoch stark von diesem Zusammenhang ab, da sie nicht durch Kondensatorentladung, sondern mittels pyrotechnischer Zünder in abgestuften Energien ermittelt wurden [7].

Laut der Firma Kühner, die Apparaturen zur Bestimmung der Mindestzündenergie herstellt, wird bei Anwendung der Gleichung 3.1 eine bessere Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten erhalten. Mit dieser Gleichung kann die Mindestzündenergie MZE_2 bei einem bestimmten Medianwert M_2 , ausgehend von einer bekannten Mindestzündenergie MZE_1 , abgeschätzt werden.[19]

$$\frac{MZE_2}{MZE_1} = \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{2,5} \quad (3.1)$$

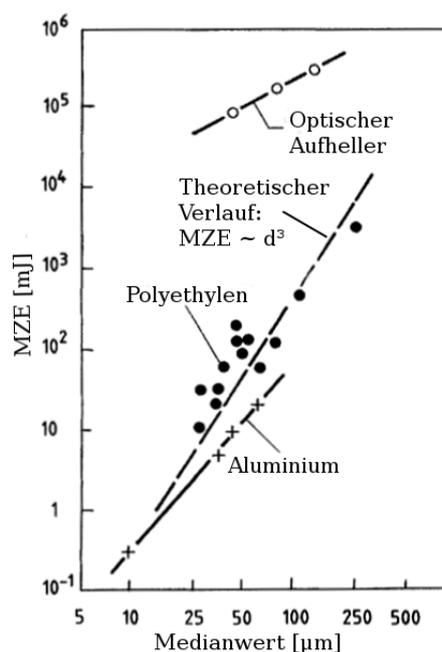


Abbildung 3.5: Mindestzündenergien von Staub-Luft-Gemischen aus Aluminium, Polyethylen und optischem Aufheller in Abhängigkeit vom Medianwert [7]

Um also die Mindestzündenergie eines Staubes zu ermitteln, muss immer seine Feinkornfraktion untersucht werden.

Staubkonzentration

Beim sog. zündwilligsten Gemisch ist die Zündenergie per Definition am geringsten. In den Konzentrationsbereichen darunter und darüber steigt sie an, wodurch von einem in etwa parabelförmigen Zusammenhang zwischen Staubkonzentration und Zündenergie gesprochen werden kann (siehe Abbildung 3.6).

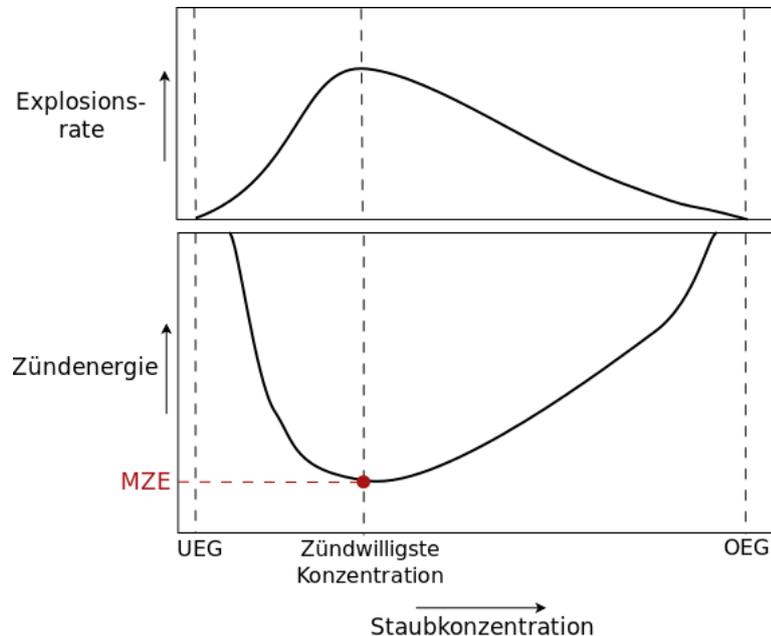


Abbildung 3.6: Exemplarischer Verlauf von Mindestzündenergie und Explosionsrate in Abhängigkeit von der Staubkonzentration [16]

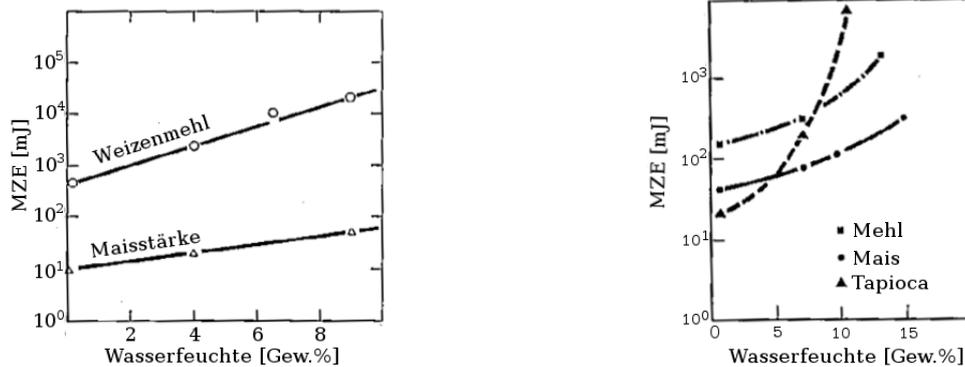
Da das zündwilligste Gemisch von Staub zu Staub unterschiedlich ist, muss die Mindestzündenergie über einen weiten Konzentrationsbereich untersucht werden.

Feuchtegehalt

Feuchte in einer Staubvorlage führt zu einer Erhöhung der Mindestzündenergie und einer Verringerung der Explosionsheftigkeit. Das Wasser wirkt aus drei Gründen reaktionshemmend. Erstens stellen die Erwärmung und Verdampfung des Wassers eine Wärmesenke dar. Zweitens wird das Pyrolysegas in der Vorerwärmungszone der Verbrennungsfront mit Wasserdampf verdünnt, wodurch das Gasgemisch weniger reaktiv wird. Und drittens führt Feuchte im Staub dazu, dass die Partikel agglomerieren, was zur Folge hat, dass der Medianwert steigt.[16]

Untersuchungen von Weizenmehl und Maisstärke haben ergeben, dass bis zu einem Feuchtegehalt von 10 % ein linearer Zusammenhang zur Mindestzündenergie besteht (Abbildung 3.7a), während darüber der Einfluss der Feuchte sogar größer ist, als jener des Medianwertes (Abbildung 3.7b) [18].

Aus den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen kann also der Schluss gezogen werden, dass eine Staubprobe vor der Mindestzündenergiebestimmung getrocknet werden sollte. Generell kann die Anhebung des Wassergehalts eine Schutzmaßnahme darstellen. Dabei muss jedoch



(a) Schwache Abhängigkeit der MZE bis zu einem Wassergehalt von 10%

(b) Starke Abhängigkeit der MZE ab einem Wassergehalt von 10%

Abbildung 3.7: Mindestzündenergie in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt [18]

darauf geachtet werden, dass durch geänderte Umgebungsbedingungen, z.B. bei Sonneneinstrahlung, der kritische Feuchtegehalt nicht unterschritten wird. Eine Anreicherung von Staub mit Feuchtigkeit ist jedoch meist für die Praxis nicht geeignet, da es zu einer Vergrößerung des Massenstroms kommt und Verarbeitbarkeit sowie Transportfähigkeit meist nachteilig beeinflusst werden.

Zündverzögerungszeit

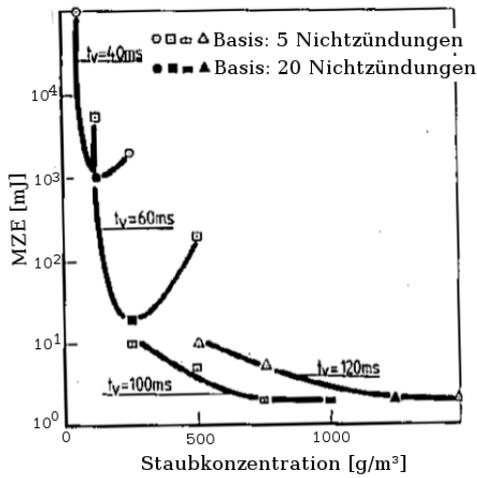
Als Zündverzögerungszeit ist die Dauer zwischen Dispersion des Staubes und Zündung definiert. Durch Veränderung der Zündverzögerungszeit kann die Turbulenz der Staubwolke zum Zeitpunkt der Zündung geregelt werden. Dabei gilt, dass die Turbulenz umso geringer ist, je größer die Zündverzögerungszeit ist. Wie in Abbildung 3.8a zu sehen ist, verschiebt sich die zündwilligste Konzentration mit abnehmender Turbulenz zu höheren Werten, während die Mindestzündenergie gleichzeitig sinkt. Auch die Ergebnisse fünf weiterer Stäube bestätigen, wie in Abbildung 3.8b illustriert, die Annahme, dass die Mindestzündenergie mit der Zündverzögerungszeit annähernd hyperbolisch sinkt.[7]

Für die Bestimmung im Labor bedeutet das also, dass die Mindestzündenergie bei möglichst langen Zündverzögerungszeiten untersucht werden sollte.

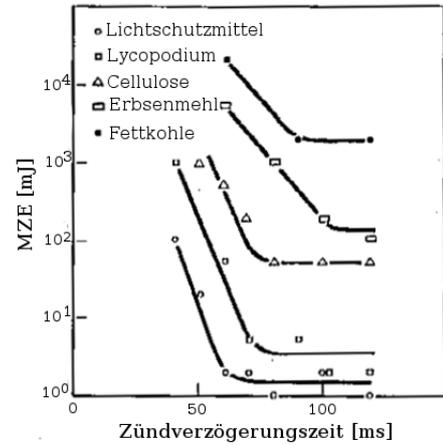
Funkendauer

Das Zuschalten einer Induktivität im Entladekreis bewirkt, dass die kapazitiv gespeicherte Energie langsamer abgegeben wird, d.h. die Funkendauer wird erhöht. Bereits in den 1960er-Jahren wurde durch Versuche mit Fettkohlestaub festgestellt, dass die Zündwirksamkeit eines Funkens umso größer ist, je länger er andauert. Für die Mindestzündenergie bedeutet das, wie in Abbildung 3.9a zu sehen, dass sie mit steigender Funkendauer abnimmt. Ab einer Induktivität von etwa 1 mH kommt es jedoch zu keiner weiteren Absenkung der Mindestzündenergie mehr.[18]

In Abbildung 3.9b sind die Untersuchungen der Firma Kühner dargestellt, welche zeigen, dass der Einfluss der Induktivität nicht immer so eindeutig ist, und auch von der Art des untersuchten

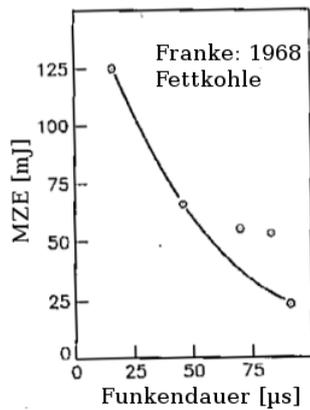


(a) Mindestzündenergie von Lycopodium in Abhängigkeit von der Staubkonzentration bei verschiedenen Zündverzögerungszeiten

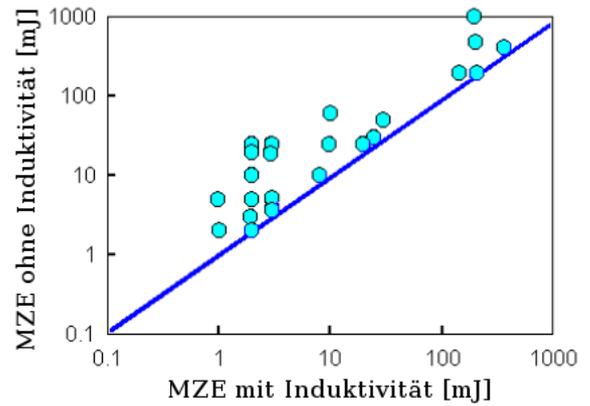


(b) Mindestzündenergie unterschiedlicher Stäube in Abhängigkeit von der Zündverzögerungszeit

Abbildung 3.8: Zusammenhang Mindestzündenergie und Zündverzögerungszeit [7]



(a) Mindestzündenergie von Fettkohlestaub in Abhängigkeit von der Funkendauer [18]



(b) Mindestzündenergie verschiedener Stäube mit und ohne Induktivität [19]

Abbildung 3.9: Zusammenhang Mindestzündenergie und Dauer der Funkenentladung

Staubes abhängt. Generell kann aber davon ausgegangen werden, dass die bei rein kapazitiver Funkenentladung gemessene Mindestzündenergie mindestens gleich groß ist, wie jene bei zeitlich gedehnter Entladung, nie aber kleiner. Daher empfiehlt es sich, die Untersuchung der Mindestzündenergie mit Induktivität im Entladekreis durchzuführen.[19]

3.1.3 Bestimmung der Mindestzündenergie

Aus der Definition der Mindestzündenergie ergeben sich bereits die Grundanforderungen an den Versuchsaufbau. Eine Apparatur zur Bestimmung der Mindestzündenergie umfasst eine Dispergierungseinheit, die den zu untersuchenden Staub homogen in der Luft zu einer Staubwolke verteilt, Elektroden, die die kapazitiv gespeicherte Energie möglichst verlustfrei in Form eines Funkens an die Staubwolke abgeben, eine explosionsfeste Begrenzung, in der sich die entstehende Flamme ausbreiten kann und eine Möglichkeit, die Zündverzögerungszeit einzustellen.

Modifizierte Hartmann-Apparatur

Im Laufe der Zeit hat sich für die Bestimmung der Mindestzündenergie die Versuchsanordnung auf Basis der modifizierten Hartmann-Apparatur durchgesetzt. Die modifizierte Hartmann-

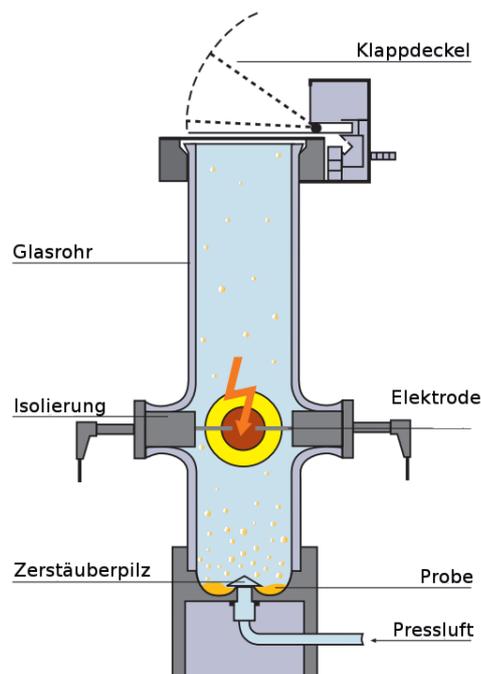


Abbildung 3.10: Modifiziertes Hartmannrohr [2]

Apparatur (Abbildung 3.10) wurde vom US Bureau of Mines entwickelt und besteht im Wesentlichen aus einem Glasrohr mit einem Volumen von 1,2 l, einem Zerstäuberpilz am Boden des Rohres, um den herum die Probe aufgegeben wird, zwei Elektroden und einem Klappdeckel. Der Staub wird am Boden des Rohres eingebracht und durch einen Pressluftstrom im Zylinder dispergiert. Nach einer voreingestellten Zündverzögerungszeit kommt es zu einer zeitlich gedehnten Entladung. Die durch den zwischen den beiden Elektroden überspringenden Funken an die

Staubwolke übertragene Energie kann aus der angelegten Spannung U und der Kapazität C nach der Gleichung

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (3.2)$$

berechnet werden. Damit die übertragene Energie auch wirklich der im Kondensator gespeicherten Energie entspricht, ist es wichtig, dass möglichst wenig Energie verloren geht.[7]

Um die Mindestzündenergie zu bestimmen, wird, ausgehend von einer Energie, bei der es zur Entzündung kommt, die Energie so weit verringert, bis es zehnmal hintereinander zu keiner Zündung mehr kommt. Dies wird bei mehreren Konzentrationen und Zündverzögerungszeiten durchgeführt, um das zündwilligste Gemisch zu finden. Die Mindestzündenergie liegt dann im Bereich zwischen der Energie der Nichtzündung und der Energie, bei der es gerade noch zur Zündung des zündwilligsten Gemisches gekommen ist (Abbildung 3.11). Die Zündenergie hängt jedoch

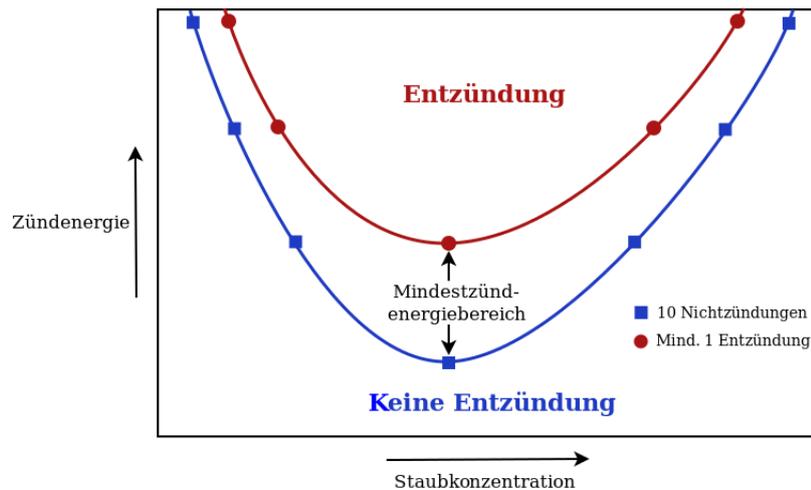
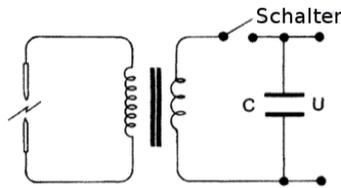


Abbildung 3.11: Mindestzündenergiebereich [19]

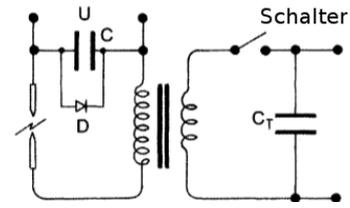
nicht nur von den Eigenschaften des Staub-Luft-Gemisches ab, sondern auch von der Art der Zündquelle. Die Elektrodenkonfiguration der Funkenstrecke sowie die spezifischen Eigenschaften des Entladekreises haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Zündenergie.[7]

Entladekreis

Da beim ursprünglich vom US Bureau of Mines verwendeten Entladekreis (Abbildung 3.12a) unweigerlich Energie über den eingebauten Transformator verloren geht, weicht die tatsächliche Funkenenergie von der im Kondensator gespeicherten Energie ab. Dies kann ein sicherheitstechnisches Problem darstellen, da die mit dieser Methode bestimmten Mindestzündenergien im Allgemeinen höher sind als jene, die mit der derzeitigen Standardmethode bestimmt werden.[1] Die zweite grundlegende Gestaltungsart des Entladekreises wurde vom Chr. Michelsen Institute entwickelt und wird daher CMI-Kreis genannt (Abbildung 3.12b). Bei dieser Methode wird ein Hilfsfunken mit einer Energie von etwa 1 bis 2 mJ verwendet, um den Elektrodenspalt zu überwinden. Die Energie des Entladungsfunkens muss bei der CMI-Methode direkt, als zeitliches Integral der über den Elektrodenspalt abgebauten Leistung, gemessen werden.[1]



(a) Entladung eines Niederspannungskondensators über einen Transformator (US Bureau of Mines)



(b) CMI-Entladungskreis

Abbildung 3.12: Unterschiedliche Ausführungen des Entladekreises bei der Mindestzündenergiebestimmung [1]

Bei der Bestimmung der Mindestzündenergie im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die MIKE-3-Apparatur der Firma Kühner verwendet. Bei dieser ist der Entladungskreis so gestaltet, dass Kondensatorspannungen erzeugt werden, die groß genug sind, um den Elektrodenabstand direkt überwinden zu können (Abbildung 3.13). Der Zündfunke wird mechanisch mit der Staub-

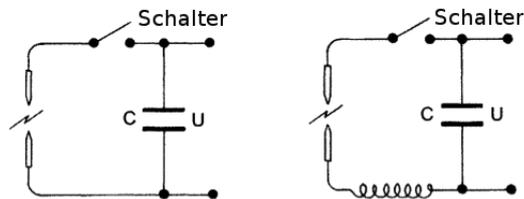


Abbildung 3.13: Direkte Entladung eines Hochspannungskondensators ohne bzw. mit Induktivität [1]

wolke synchronisiert. Hierbei wird der Kondensator vor dem Versuch mit einer genügend hohen Spannung geladen und der Elektrodenabstand so eingestellt, dass ein Funken sprung bei gegebener Spannung nicht möglich ist. Dann wird eine der beiden Elektroden pneumatisch auf einen Abstand zur anderen Elektrode gebracht, bei dem es zum Funken sprung kommt. Der Nachteil dieser Verfahrensweise besteht allerdings darin, dass der genaue Elektrodenabstand zum Zeitpunkt der Entladung nicht bekannt ist. In Abbildung 3.13 wird sowohl die direkte Entladung ohne als auch jene mit Induktivität dargestellt. Wie bereits oben ausgeführt, kann die Anwesenheit einer Induktivität zu einer signifikanten Verbesserung der Zündwilligkeit des Entladungsfunkens führen. Eine solche Induktionsspule ist sowohl im Entladungskreis des US Bureau of Mines (Abbildung 3.12a) als auch im CMI-Entladungskreis (Abbildung 3.12b) integriert. Die Anordnung ohne Induktivität (Abbildung 3.13 links) ist dann geeignet, wenn die Zündwirksamkeit von elektrostatischen Entladungen versehentlich aufgeladener, nicht geerdeter elektrisch leitender Objekte, untersucht werden soll.[1]

Um die sicherheitstechnische Ausführung elektrischer Geräte in explosionsfähiger Atmosphäre zu vereinheitlichen, entwickelte die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) 1994 eine standardisierte Testmethode zur Bestimmung der Mindestzündenergie [1].

Die genaue Ausführung in Bezug auf Explosionsgefäß, Staubverteilungseinrichtung oder Synchronisationsmethode ist nicht vorgeschrieben. Jedoch werden geeignete Apparate, wie z.B. die direkte Hochspannungsentladung oder der CMI-Kreis, genannt. Unabhängig vom verwendeten Apparat muss das funkenerzeugende System folgende Anforderungen erfüllen:[1]

- Induktivität des Entladekreises ≥ 1 mH
- Ohmscher Widerstand des Entladekreises $< 5 \Omega$
- Elektrodenmaterial aus Edelstahl, Messing, Kupfer oder Wolfram
- Elektrodendurchmesser von 2 mm
- Der Abstand zwischen den Elektroden beträgt 6 mm
- Niedrig-induktive Kondensatoren, die gegen Stromspitzen resistent sind
- Möglichst geringe Kapazität der Elektrodenanordnung
- Hoher Isolationswiderstand zwischen den Elektroden, um Verluststrom zu vermeiden

3.2 Untere Explosionsgrenze

Die untere Explosionsgrenze gibt an, in welcher Konzentration Staub mindestens im Gemisch mit Luft vorhanden sein muss, damit die Staubwolke grundsätzlich explosionsfähig ist. Diese Kenngröße wird in der VEXAT als Richtwert angegeben, um zu bestimmen, wann ein explosionsfähiger Bereich vorliegt und entsprechende Maßnahmen zur Verhinderung der Entstehung eines solchen eingeleitet werden müssen. Es handelt sich also um eine sehr wichtige, grundlegende Kenngröße zur Bestimmung des Gefahrenpotentials in staubverarbeitenden Anlagen. Wenn nachgewiesen werden kann, dass die untere Explosionsgrenze mit einem gewissen Sicherheitsfaktor unterschritten wird, erübrigen sich alle Explosionsschutzmaßnahmen in diesem Bereich. Besteht die Gefahr, dass die UEG z.B. durch Aufwirbeln von Ablagerungen erreicht bzw. überschritten wird, stellt die Konzentrationsbegrenzung eine wichtige primäre Explosionsschutzmaßnahme dar.

Der explosionsfähige Konzentrationsbereich ist relativ eng und erstreckt sich von etwa 50 bis $100 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ auf der Seite der UEG bis zu etwa 2 bis $3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ auf der Seite der OEG (Abbildung 3.14)[1].

Für unterschiedliche Stäube können diese Werte jedoch stark streuen. Lycopodium hat z.B. eine untere Explosionsgrenze von etwa $30 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, während Zinkstaub eine sehr hohe UEG von ca. $500 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ aufweist[7].

Explosionsfähige Staub-Luft-Gemische haben, auch schon bei der unteren Explosionsgrenze, eine hohe optische Dichte. Eine Wolke aus Kohlenstaub mit einer Konzentration von $40 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ist beispielsweise so dicht, dass das Licht einer 25 W-Glühbirne aus zwei Metern Entfernung kaum sichtbar ist. Dieser Tatsache wird auch durch die, aus Gründen der Hygiene und zum Schutz der Arbeitnehmer vor gesundheitlichen Schäden durch lungengängigen Staub, um drei bis vier

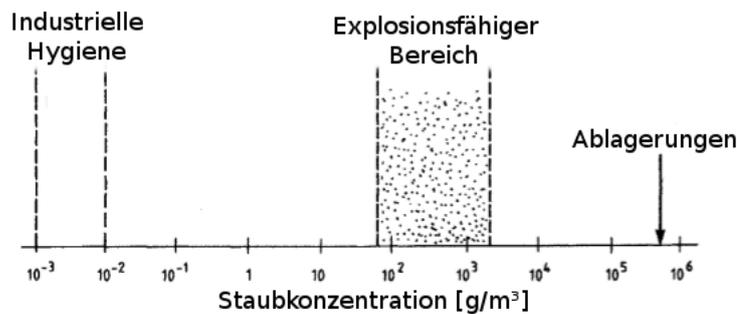


Abbildung 3.14: Vergleich des explosionsfähigen Konzentrationsbereichs eines organischen Staubes (Maisstärke) mit dem Bereich der industriellen Hygiene und der Staubablagerungen [1]

Größenordnungen geringere, erlaubte maximale Staubkonzentration an Arbeitsplätzen, Rechnung getragen.[1] Daraus kann geschlossen werden, dass die am Arbeitsplatz in Betriebsanlagen auftretenden, erlaubte Staubkonzentration um Größenordnungen unter der UEG liegen.

Staubwolken, die als explosionsfähig gelten, haben also eine sehr hohe optische Dichte und kommen nur selten an Arbeitsplätzen in staubverarbeitenden Anlagen vor. Explosionsfähige Staubkonzentrationen bilden sich folglich hauptsächlich im Inneren von Behältern und Apparaten wie Mühlen, Zyklonen, Trocknern, Filtern, Silos oder Rohrleitungen für den pneumatischen Transport.[1]

Durch eine einzelne Zündquelle, wie z.B. Funkenschlag oder heiße Oberflächen, ausgelöste Staubexplosionen werden primäre Explosionen genannt. Diese auf den Bereich, in dem sie entstehen, zu begrenzen, ist ein zentrales Ziel des konstruktiven Explosionsschutzes, da sie durch Aufwirbeln einer Staubschicht außerhalb der Apparatur zu sekundären Explosionen führen können (Abbildung 3.15).[1]

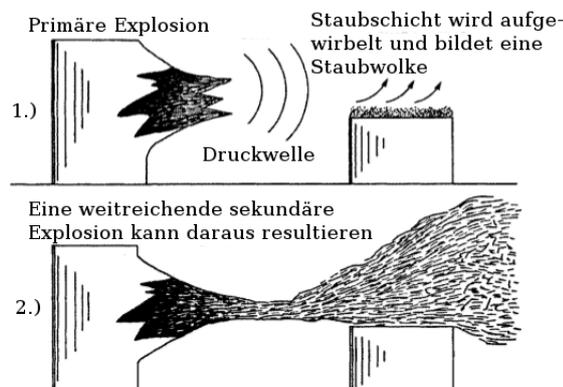


Abbildung 3.15: Druckwelle einer primären Explosion als Grundlage für eine sekundäre Explosion [1]

Wie in Abbildung 3.14 zu sehen, gibt es einen Unterschied von etwa zwei Zehnerpotenzen zwischen dem explosionsfähigen Konzentrationsbereich und dem Konzentrationsbereich von Ablagerungen. Das hat zur Folge, dass bereits Staubschichten geringer Dicke bei Aufwirbelung durch die Druckwelle einer primären Explosion eine explosionsfähige Wolke bilden können. Der Zusammenhang zwischen der Konzentration der aufgewirbelten Staubwolke c , der Schüttdichte

der Ablagerung ρ_{Abl} , der Schichtdicke h , und der Höhe H der Staubwolke wird durch folgende einfache Gleichung beschrieben.[1]

$$c = \rho_{Abl} \cdot \frac{h}{H} \quad (3.3)$$

Es reicht also schon eine 1 mm dünne Staubschicht mit einer Dichte von $500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ aus, um durch Aufwirbelung in einem 5 m hohen Raum eine Staubwolke mit einer potentiell zündwilligen Konzentration von $100 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ zu erzeugen (Abbildung 3.16)[1]. Staubablagerungen müssen daher in Bereichen, in denen die Möglichkeit zur Aufwirbelung besteht, so weit als möglich vermieden werden.

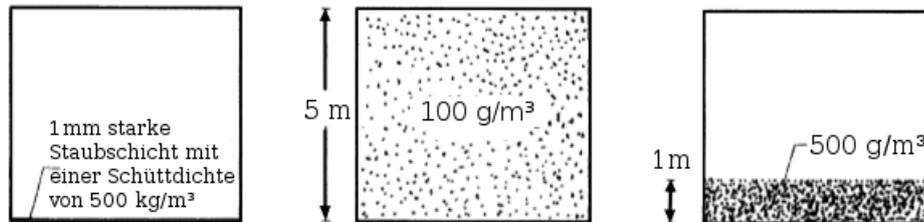


Abbildung 3.16: Zusammenhang von Schüttdichte und Dicke einer Ablagerung mit der Konzentration und Höhe der daraus gebildeten Staubwolke [1]

3.2.1 Einflussgrößen auf die untere Explosionsgrenze

Wie auch die Mindestzündenergie, hängt die UEG von sehr vielen Einflussfaktoren ab. Neben der chemischen Zusammensetzung des Staubes spielen auch physikalische Eigenschaften wie Korngröße und -form, Feuchtegehalt und Umgebungsbedingungen eine wesentliche Rolle. Das Wissen um die Einflussgrößen kann dazu verwendet werden, um den Staub dahingehend auf die UEG-Bestimmung vorzubereiten, dass die tiefstmögliche untere Explosionsgrenze ermittelt werden kann.

Korngröße

In Abbildung 3.17 ist die Abhängigkeit der unteren Explosionsgrenze vom Medianwert dargestellt. Untersucht wurden annähernd monodisperse Stäube, die also eine sehr enge Korngrößenverteilung haben. Da die Korngrößen von in der Praxis vorkommenden Stäuben oft eine viel breitere Verteilung zeigen, können diese Versuchsergebnisse nur mit Vorbehalt übernommen werden. Es lässt sich jedoch feststellen, dass es einen Grenzwert für den Medianwert gibt, ab dem die untere Explosionsgrenze sprunghaft ansteigt. Es gibt einen charakteristischen Durchmesser, über dem der Entgasungsprozess zum geschwindigkeitsbestimmenden Schritt der Verbrennung wird. Da nur die flüchtigen Bestandteile der oberflächennahen Schicht der Partikel zur Flammenfront beitragen, wird von grobkörnigen Stäuben eine größere Menge benötigt, um eine Mindestkonzentration an flüchtigen Bestandteilen zu erreichen. Bei Partikeln kleiner dem charakteristischen Durchmesser ist die Entgasung so schnell, dass die Verbrennung nur durch die Gasmischung und -verbrennung kontrolliert wird.[1]

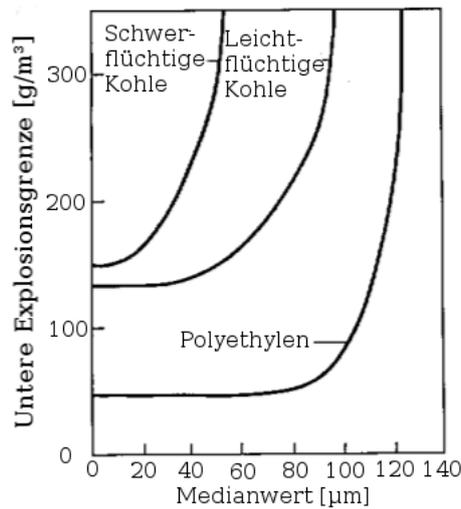


Abbildung 3.17: Einfluss des Medianwerts auf die untere Explosionsgrenze von unterschiedlich flüchtigen Kohlenstäuben und Polyethylen [1]

Versuche, die den Einfluss des Partikeldurchmessers auf die UEG von Kohlenstaubproben mit enger sowie breiter Korngrößenverteilung bestimmen, zeigen, dass sich die Abhängigkeit bei geringen Korngrößen weitgehend deckt (Abbildung 3.18). Bei der breiten Korngrößenverteilung,

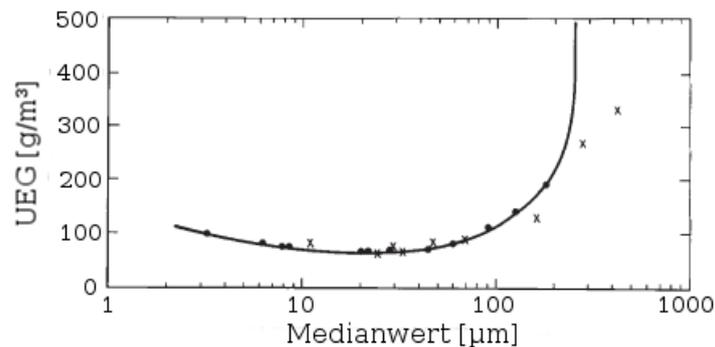


Abbildung 3.18: Einfluss des Medianwerts auf die untere Explosionsgrenze von Kohlenstäuben mit engen () und breiten (x) Korngrößenverteilungen [20]

die sich aus mehreren engen Verteilungen zusammensetzt, wurde festgestellt, dass der Feinanteil wesentlich zur Gefährlichkeit beiträgt. Für die untere Explosionsgrenze bedeutet das, dass sie bei breiterer Korngrößenverteilung weniger stark mit dem Medianwert ansteigt.[20]

Zusammenfassend kann also die Aussage getroffen werden, dass die UEG unter einer staubspezifischen Grenzkorngröße konstant niedrig ist und darüber steil ansteigt. Für die Laboruntersuchung bedeutet dies, dass vor allem der Feinanteil einer Staubgröße zur UEG-Bestimmung herangezogen werden sollte.

Zündenergie

Wie in Abbildung 3.19 zu sehen, ist die UEG der Stäube A bis C über weite Bereiche der Zündenergie konstant. Erst bei Annäherung an die Mindestzündenergie steigt die UEG merklich

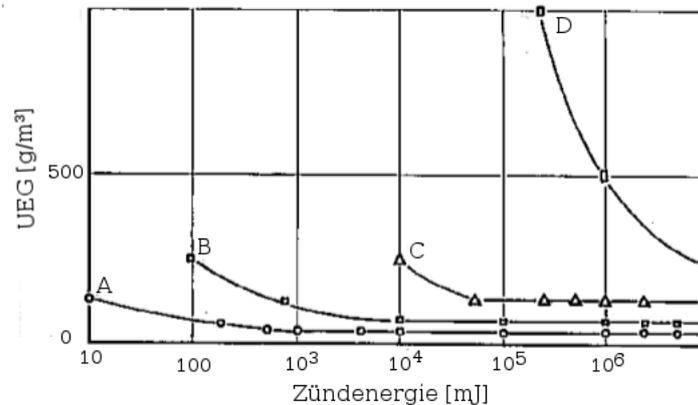


Abbildung 3.19: Verlauf der UEG verschiedener Stäube in Abhängigkeit von der Zündenergie [7]

an. Bei Stäuben mit generell hoher UEG lässt sich jedoch ein starker Anstieg der UEG mit sinkender Zündenergie feststellen (Staub D).[7]

Die in Abbildung 3.20 dargestellten Ergebnisse zeigen die Werte für die UEG von Gilsonit, einer Bitumenart, Pittsburgh-Kohle, Lycopodium, RoRo93, einem Lichtstabilisator, und Eisenstaub bei Bestimmung mittels 20-l-Apparatur und 1-m³-Apparatur und in Abhängigkeit von der Zündenergie.[21]

Da auf die Untersuchungsmethode der UEG an späterer Stelle genauer eingegangen wird, sei hier nur erwähnt, dass sich diese beiden Apparaturen im Wesentlichen durch unterschiedliche Volumina voneinander abgrenzen lassen. Die Untersuchung verschiedener Stäube zeigt demnach, dass die mit der 20-l-Apparatur bestimmte UEG am besten mit jener in der 1-m³-Apparatur bestimmten übereinstimmt, wenn Zünder mit einer Energie von 2,5 kJ verwendet werden. Bei höheren Zündenergien ist zu erkennen, dass die in der 20-l-Apparatur bestimmten Werte für die UEG geringer sind, was darauf schließen lässt, dass es hier bei der kleineren Apparatur zu einer Übersteuerung kommt. Das Ausmaß des Überlagerungseffekts ist von der Art des Staubes abhängig. So wurde bei Gilsonit, RoRo93 und Lycopodium eine geringere Abweichung der UEG unterschiedlicher Apparaturen festgestellt als bei Kohlenstaub, welcher eine vergleichsweise geringe Volatilität hat. Die Ergebnisse für Eisenstaub weichen vom allgemeinen Trend ab. Hier ist die in der 20-l-Apparatur gemessene UEG bei einer Zündenergie von 2,5 kJ wesentlich größer als die in der 1m³-Apparatur gemessene UEG, während die Ergebnisse bei 5 kJ gut übereinstimmen. Daraus lässt sich schließen, dass bei schwer entzündlichen Stäuben mit einer relativ hohen UEG eine Zündenergie von 5 kJ gewählt werden sollte.

Für die Untersuchung der UEG bedeuten diese Erkenntnisse aus der Literatur, dass sie bei einer Zündenergie von 2,5 kJ in der 20-l-Apparatur durchgeführt werden sollte, um eine möglichst genaue Übereinstimmung mit den Ergebnissen der 1-m³-Apparatur zu erzielen. Diese Zündenergie ist einerseits groß genug, um eine Abhängigkeit der UEG von der Zündenergie ausschließen zu können und befindet sich andererseits noch nicht in jenem Bereich, in dem mit einer Übersteuerung zu rechnen ist.

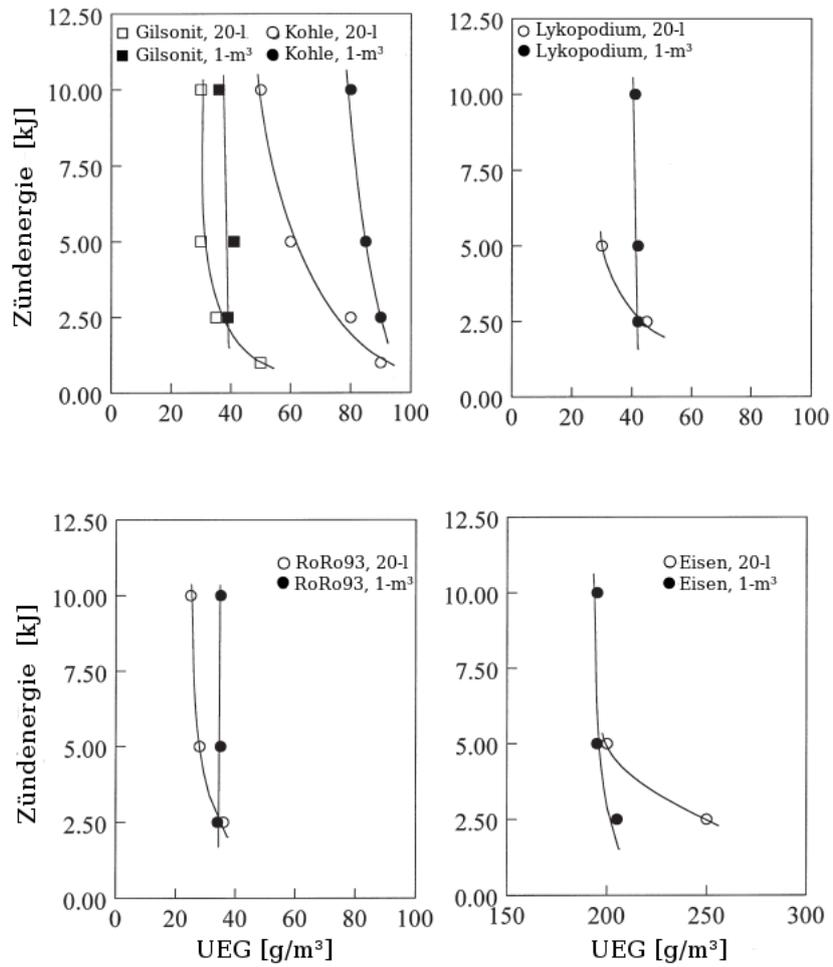


Abbildung 3.20: Messwerte der UEG unterschiedlicher Stäube in Abhängigkeit von der Zündenergie, gemessen jeweils in der 20-l-Apparatur und der 1-m³-Apparatur [21]

Brennwert

Sind sowohl die chemische Zusammensetzung eines Staubes sowie dessen Verbrennungswärme bekannt, kann die untere Explosionsgrenze thermochemisch berechnet werden. Hierbei wird die UEG als jene Menge an Staub definiert, die in einer Volumseinheit vorhanden sein muss, um bei der Verbrennung gerade so viel Wärme freizusetzen, damit die angrenzende Volumseinheit an Staub entzündet wird. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass, um eine selbstständige Flammenfortpflanzung zu erhalten, eine Erhitzung des Staubes von 0°C auf 1000°C stattfinden muss. Diesen Ausführungen folgt die vereinfachte Gleichung 3.4, mit der die UEG über den Brennwert H_0 berechnet wird.[18]

$$UEG = A + \frac{B}{H_0} \quad (3.4)$$

Die empirischen Konstanten A und B hängen von der Gruppe ab, welcher der Staub zugeordnet wird. Es wird z.B. unterschieden zwischen technischen Stäuben, das sind organische Produkte wechselnder Zusammensetzung, Brennstoffstäuben, also Holz, Torf oder Kohle und anorganischen, brennbaren Stäuben, zu welchen vor allem Metallstäube zählen. In Abbildung 3.21 werden experimentell bestimmte untere Explosionsgrenzen von Stäuben der unterschiedlichen Gruppen mit den durch Gleichung 3.4 berechneten Werten verglichen. Es zeigt sich, dass eine gewisse

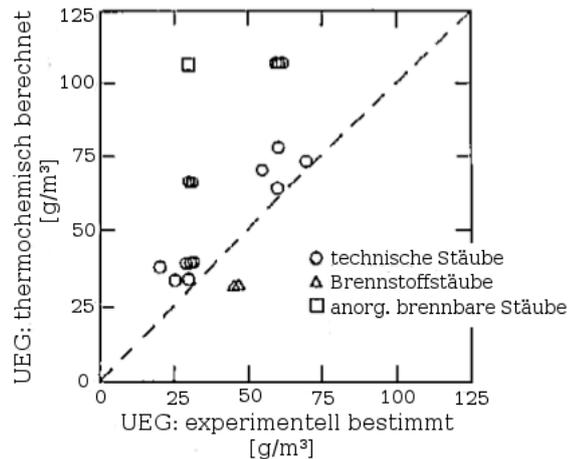


Abbildung 3.21: Vergleich der thermochemisch berechneten UEG mit der experimentell bestimmten UEG unterschiedlicher Stäube [18]

Übereinstimmung der errechneten Werte mit den experimentell bestimmten Werten gegeben ist. Es ist jedoch sicherheitstechnisch problematisch, dass die berechnete UEG einiger Stäube weit über der tatsächlichen UEG liegen. Dies liegt daran, dass bei der Berechnung bloß der Brennwert, nicht jedoch der Reaktionsmechanismus berücksichtigt wird. Die Gleichung 3.4 sollte nur mit Beschränkung auf Stäube mit einem Brennwert von unter $30 \frac{\text{kJ}}{\text{g}}$ und hier auch nur als erste Einschätzung angewandt werden.[18]

3.2.2 Bestimmung der unteren Explosionsgrenze

In den 1970er Jahren entwickelte Bartknecht die 1-m³-Apparatur mit einer Staubverteilungseinrichtung, die es möglich machte, den Staub annähernd homogen im Inneren des Explosionsge-

fäßes zu verteilen. Wie in Abbildung 3.22 schematisch zu sehen ist, besteht sie aus einem Explosionsgefäß mit einem Volumen von einem Kubikmeter, in welches der Staub über einen perforierten Halbring dispergiert wird. Die Apparatur entspricht ISO-Standard und dient als Referenz für alle

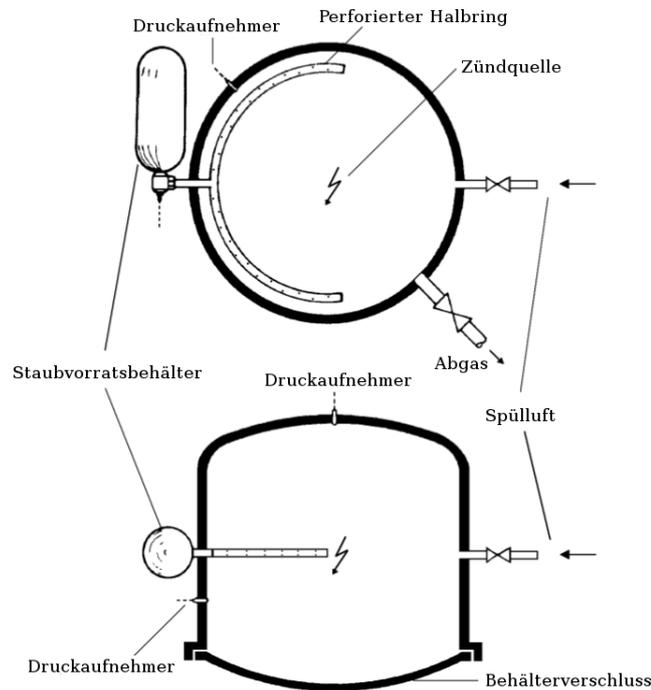


Abbildung 3.22: 1-m³-ISO-Gefäß [6]

anderen Bestimmungsmethoden von UEG, maximalem Explosionsdruck und Druckanstieg. Der Staub wird zu Beginn in den Staubvorratsbehälter mit einem Fassungsvermögen von 5 l gefüllt. Danach wird das Explosionsgefäß evakuiert, und der Staubvorratsbehälter unter einen Druck von 20 bar gesetzt. Durch Öffnen des Sprengkapselventils wird der Staub freigesetzt und tritt durch den perforierten Halbring ins Innere des Explosionsgefäßes ein. Nach 0,6 Sekunden Zündverzögerungszeit und bei einem Umgebungsdruck von 1 atm werden schließlich die chemischen Zünder mit einem Energieinhalt von 10 kJ gezündet. Bei der Standardtestmethode spricht man von einer Explosion, wenn ein maximaler Explosionsdruck von 1,5 bar überschritten wird. Dieser Explosionsdruck umfasst auch den durch die chemischen 10 kJ-Zünder verursachten Druck von etwa 1,1 bar. Die Staubmenge wird in 0,2 g-Schritten so weit reduziert, bis es zu keiner Explosion mehr kommt. Die UEG liegt dann zwischen jener Konzentration, bei der es in drei aufeinanderfolgenden Versuchen zu keiner Explosion gekommen ist und jener, bei der der maximale Explosionsdruck in mindestens einem von drei Versuchen den Wert von 1,5 bar überschritten hat. Auch wenn mit der 1-m³-Apparatur genaue und reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden, hat sie dennoch den Nachteil, dass sie aufgrund ihrer Größe nicht für Routineuntersuchungen geeignet ist.[6]

Aus der Notwendigkeit für eine kompaktere Messmethode im Labormaßstab wurde die 20-l-Apparatur nach Siwek konstruiert (Abbildung 3.23). Sie entspricht in der Funktionsweise der 1-m³-Apparatur, unterscheidet sich von dieser jedoch durch das kleinere, kugelförmige Explosionsgefäß, den ebenfalls kleineren Staubvorratsbehälter, die Staubeinlassvorrichtung und die auf 60 ms verminderte Zündverzögerungszeit.[7]

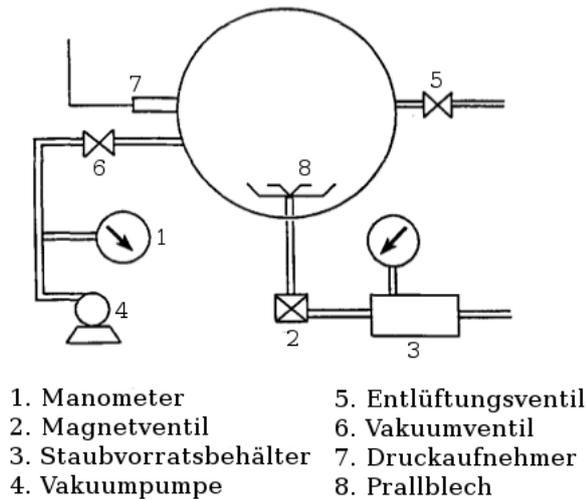


Abbildung 3.23: Skizze des Versuchsaufbaus der 20-l-Apparatur zur Bestimmung von p_{\max} , K_{St} und UEG [22]

In Abbildung 3.24 ist der zeitliche Druckverlauf bei der Explosionskenngrößenbestimmung in der 20-l-Apparatur qualitativ dargestellt. Der Staubvorratsbehälter wird, nachdem er auf einen Druck von 20 bar gebracht wurde, geöffnet. Der Staub wird in die evakuierte Kugel gesaugt und es kommt zu einem Druckausgleich, sodass zum Zeitpunkt der Zündung, 60 ms nach Öffnen des Staubeinlassventils, Atmosphärendruck herrscht. Durch die Zündung sowie eine allfällige Staubexplosion kommt es zu einem raschen Druckanstieg.[7]

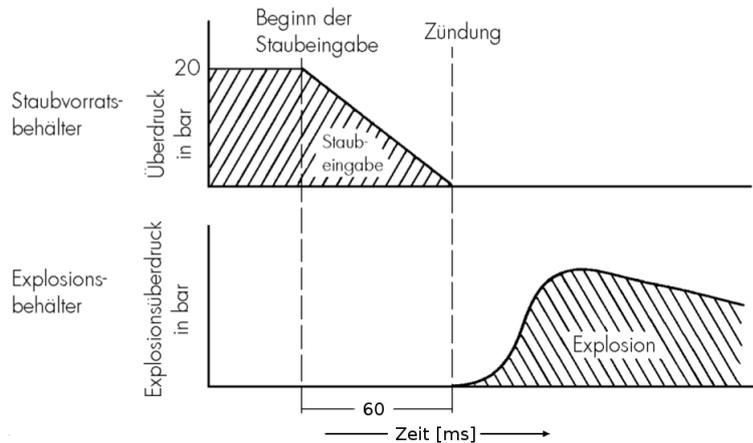


Abbildung 3.24: Zeitlicher Druckverlauf im Staubvorratsbehälter und im Explosionsraum bei der Explosionskenngrößenbestimmung in der 20-l-Apparatur [7]

Bereits geringe Zusätze an Brenngasen können die untere Explosionsgrenze von Stäuben so weit senken, dass auch Stäube, die für sich alleine, z.B. aufgrund ihrer Korngröße, keine Explosionsgefahr darstellen, bei der Zoneneinteilung und der Planung der entsprechenden Schutzmaßnahmen berücksichtigt werden müssen. Es ist also neben der Bestimmung der UEG im Labor immer auch zu untersuchen, ob im Betrieb die Möglichkeit besteht, dass es, z.B. durch Leckagen in angrenzenden Anlagenteilen, zur Vermischung des Staubes mit Brenngas kommt.[7]

Bei der UEG-Bestimmung in der 20-l-Apparatur werden, im Gegensatz zum ISO-Standardverfahren, chemische Zünder einer Energie von 2 kJ verwendet, um eine Überlagerung des Ergebnisses durch eine zu hohe Zündenergie zu verhindern. Die im Rahmen der Arbeit zur Bestimmung der UEG sowie des maximalen Explosionsdruckes und des K_{St} -Wertes verwendete 20-l-Apparatur der Firma Kühner gleicht diesem Versuchsaufbau im Wesentlichen.[1]

3.3 Maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert

Um zu charakterisieren, wie heftig ein Staub reagiert, werden der maximale Explosionsdruck sowie der K_{St} -Wert bestimmt. In Abbildung 3.25 ist die Druckentwicklung bei einer Staubexplosion dargestellt. Der maximale Explosionsdruck eines Staub-Luft-Gemisches mit einer be-

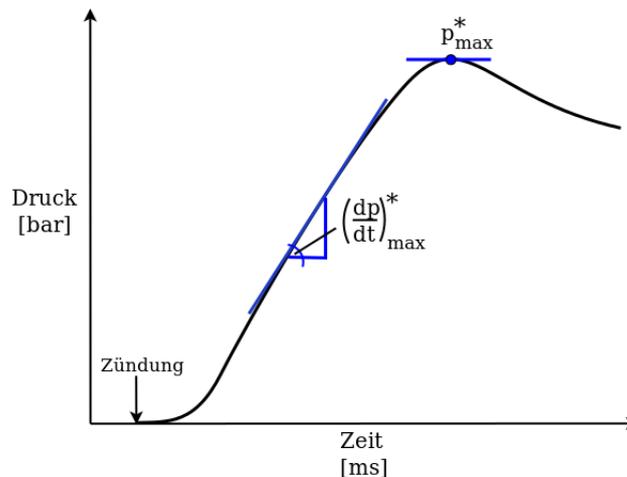


Abbildung 3.25: Zeitlicher Druckverlauf einer Staubexplosion mit maximalem Druckanstieg und maximalem Explosionsdruck

stimmten Staubkonzentration, p_{max}^* , befindet sich am höchsten Punkt des Druckverlaufs, an der Stelle mit der Steigung gleich Null. Der maximale zeitliche Druckanstieg, $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}^*$, stellt die größte Steigung, die der Druckverlauf annimmt, dar.

Sowohl Explosionsdruck als auch Druckanstieg werden über einen weiten Konzentrationsbereich ermittelt. Der maximale Explosionsdruck sowie der maximale zeitliche Druckanstieg werden beim zündwilligsten Staub-Luft-Gemisch gemessen. Explosionsdruck und maximaler Druckanstieg hängen also, wie in Abbildung 3.26 dargestellt, von der Staubkonzentration ab.

Der K_{St} -Wert wird über den maximalen zeitlichen Druckanstieg, nach folgender Gleichung, die als kubisches Gesetz bekannt ist, berechnet [7].

$$K_{St} = \left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} \cdot V^{\frac{1}{3}} \quad (3.5)$$

Im Gegensatz zum maximalen zeitlichen Druckanstieg, ist der K_{St} -Wert unabhängig vom Volumen V des Explosionsgefäßes, in dem die Explosion stattfindet. Zur sicherheitstechnischen Charak-

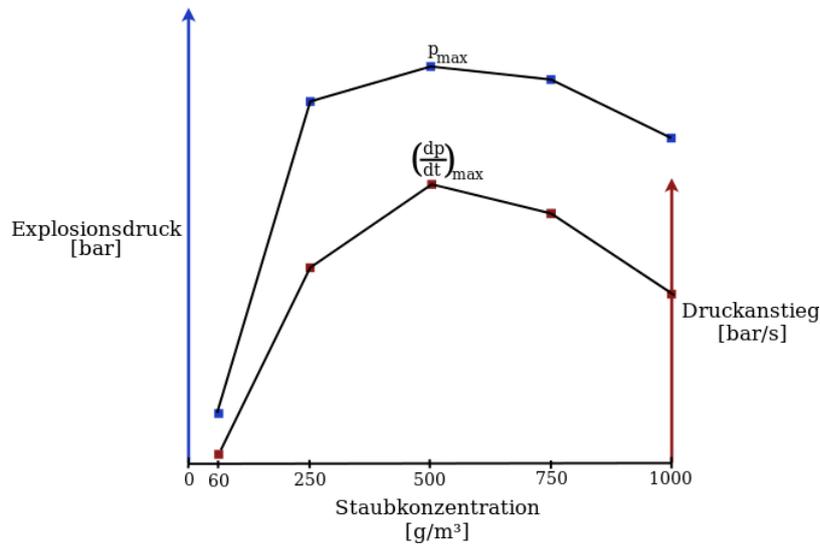


Abbildung 3.26: Verlauf des Explosionsdrucks und des zeitlichen Druckanstiegs in Abhängigkeit von der Staubkonzentration

terisierung von Stäuben wird generell der K_{St} -Wert angegeben, um den Vergleich von in unterschiedlichen Apparaturen bestimmten Kenngrößen zu erleichtern.[7]

Die beiden Kenngrößen sind unerlässlich für die Umsetzung des konstruktiven Explosionsschutzes. Um einen Anlagenteil druckfest auslegen zu können, muss der maximale Explosionsdruck bekannt sein. Zwei weitere Möglichkeiten des konstruktiven Explosionsschutzes bestehen darin, die durch eine Explosion entstehende Flammenfront und die Druckwelle kontrolliert abzuleiten oder zu unterdrücken. Bei der Explosionsdruckentlastung sowie der -unterdrückung ist es wichtig, einen Grenzwert für den Explosionsdruck bzw. den zeitlichen Druckanstieg festzulegen, bei dem die Regeleinrichtungen ansprechen sollen.[14]

Um Stäube besser nach ihrer Explosionsheftigkeit beurteilen zu können, werden sie unterschiedlichen Staubexplosionsklassen zugeordnet (Tabelle 3.1). Diese Einteilung richtet sich nach dem K_{St} -Wert und dient als Anhaltspunkt für die Anwendung der geeigneten konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen. Wichtig ist, dass die Staubexplosionsklasse keine Auskunft über die Entzündlichkeit eines Staubes gibt. So können etwa schwach reagierende Stäube bereits bei geringen Zündenergien reagieren, während heftig reagierende Stäube teils schwer entzündlich sind. Daher ist alleine durch Kenntnis der Staubexplosionsklasse keine Beurteilung des Gefahrenpotentials möglich.[7]

Tabelle 3.1: Staubexplosionsklassen [7]

Staubexplosionsklasse	K_{St} -Wert [$\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$]	Beispiel
St1	0–200	Mehl
St2	201–300	Cellulose
St3	> 300	Aluminium

3.3.1 Einflussfaktoren auf den maximalen Explosionsdruck und den K_{St} -Wert

Das langfristige Ziel der Arbeit ist es, Aussagen über die Explosionsheftigkeit verschiedener Stäube treffen zu können, ohne aufwendige Laboruntersuchungen durchführen zu müssen. Als ein erster Schritt in diese Richtung muss bestimmt werden, inwiefern sich die Eigenschaften des Staubes sowie äußere Einflüsse auf die sicherheitstechnischen Kenngrößen auswirken.

Korngröße

Wie bereits zuvor angemerkt, reagiert ein Staub umso heftiger, je feiner er ist. Diese Tatsache lässt sich darauf zurückführen, dass Stäube, die sich vorwiegend aus Teilchen geringerer Korngröße zusammensetzen, eine größere Kontaktfläche mit dem Oxidationsmittel haben. In Abbildung 3.27 ist zu sehen, dass der Einfluss des Medianwertes auf den maximalen Explosionsdruck nicht so stark ist, wie jener auf die durch den K_{St} -Wert beschriebene Explosionsheftigkeit.[18]

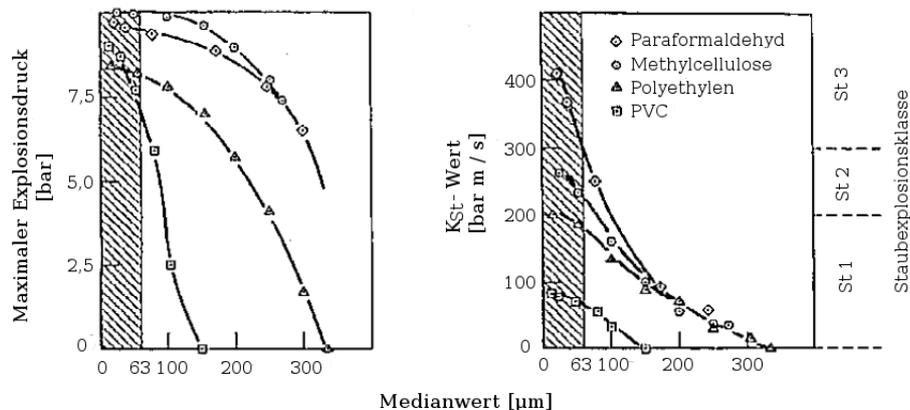


Abbildung 3.27: Maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert in Abhängigkeit des Medianwertes [18]

Um also vergleichbare und optimale Kenngrößen zu erhalten, sollten die untersuchten Stäube einen Medianwert von maximal 63 μm haben [18]. Das heißt, dass 50 % des Gewichts einer Probe aus Partikeln kleiner und 50 % aus Partikeln größer 63 μm bestehen.

Dies ist eine in der Literatur weit verbreitete Empfehlung, die jedoch in der ÖNORM zur Bestimmung von p_{max} und K_{St} nicht vorgeschrieben wird. Laut ÖNORM muss jedenfalls eine Korngrößenverteilung der untersuchten Staubprobe erstellt und dem Prüfbericht beigelegt werden. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass es durch die Staubeinlasseneinrichtung der Bestimmungsapparatur zu Mahleffekten kommen kann. Wenn diese Möglichkeit besteht, sollte zusätzlich die Korngrößenverteilung des eingeblasenen Staubes nach einem Blindversuch, also ohne Zündung, bestimmt werden.[23]

In Abbildung 3.28 werden Explosionskenngrößen für Kohlenstäube mit enger sowie breiter Korngrößenverteilung in Abhängigkeit vom Medianwert gezeigt. Neben dem bereits bekannten Abfall der Kenngrößen mit steigendem Medianwert ist zu erkennen, dass die Explosion bei Stäuben mit breiter Korngrößenverteilung, welche eine Kombination aus mehreren engen Korngrößenver-

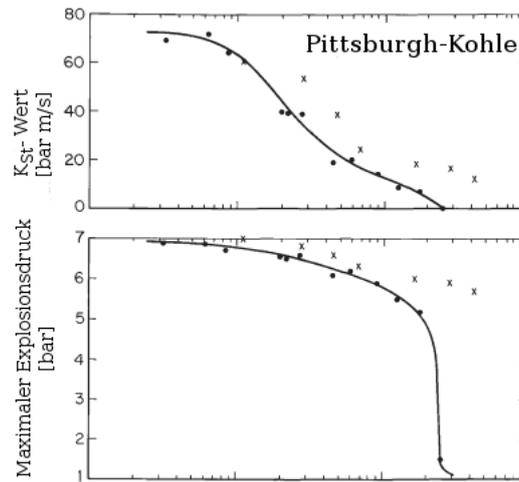


Abbildung 3.28: K_{St} -Wert und maximaler Explosionsdruck von Steinkohlestaub mit enger () sowie breiter (x) Korngrößenverteilung in Abhängigkeit vom Medianwert [20]

teilungen darstellt, heftiger abläuft. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei Stäuben mit breiter Korngrößenverteilung der für die Explosion wesentliche Feinkornanteil größer ist.[20]

Daraus lässt sich also schließen, dass der Medianwert eines Staubes allein keine Rückschlüsse auf die gesamte Korngrößenverteilung zulässt. Die K_{St} -Werte von Stäuben mit nahezu identen Medianwerten weichen teilweise stark voneinander ab. Die Ursache dafür ist, dass die Korngrößenbereiche unter und über dem Medianwert unterschiedlich sind.

Ein direkterer Zusammenhang kann zwischen der spezifischen Oberfläche und dem maximalen Explosionsdruck bzw. dem K_{St} -Wert hergestellt werden. In Abbildung 3.29 ist dargestellt, dass zwischen dem K_{St} -Wert und der spezifischen Oberfläche von Aluminiumstaub eine lineare Abhängigkeit besteht. Je größer also die Kontaktfläche des Staubes zum Oxidationsmittel ist, umso

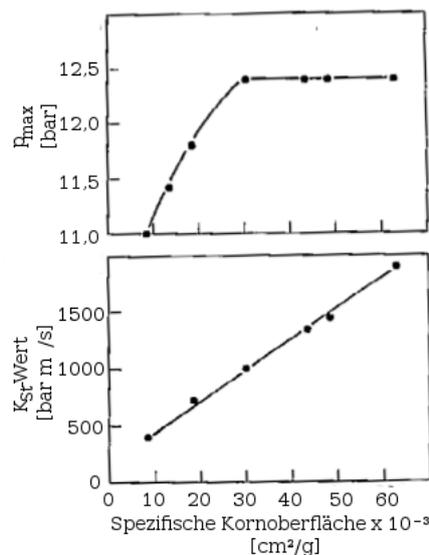


Abbildung 3.29: Explosionskenngrößen von Aluminiumstaub in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche [18]

heftiger läuft die Explosionsreaktion ab. Wie bereits die Ergebnisse für den Medianwert vermuten ließen, ist die Abhängigkeit zwischen dem maximalen Explosionsdruck und der Reaktionsoberfläche nicht so stark wie beim Druckanstieg bzw. K_{St} -Wert. Während der Explosionsdruck im Bereich der geringen spezifischen Oberfläche stark mit der Oberfläche ansteigt, bleibt er nach Überschreiten einer gewissen Grenzoberfläche konstant.[18]

Feuchtegehalt

Dass die Explosionsheftigkeit nicht so stark von geringen Anteilen Wasser im Staub abhängt wie oft angenommen, wird in Abbildung 3.30 veranschaulicht. Die Untersuchung von Torf, Tobias-

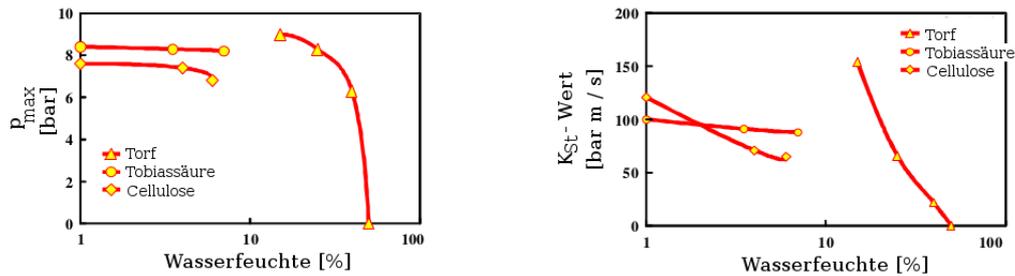


Abbildung 3.30: Maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert von Torf, Tobiassäure und Cellulose in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt [18]

säure und Zellulose zeigt, dass der maximale Explosionsdruck bis zu einem Wassergehalt von etwa 10 % konstant ist und auch der K_{St} -Wert in diesem Bereich nur schwach absinkt.[18]

Bei Feuchtegehalten über 10 % agglomerieren die Staubteilchen zunehmend, sodass die Entstehung explosionsfähiger Atmosphäre durch Aufwirbelung von Staubschichten immer schwieriger wird. Für eine vollständige Inertisierung eines Staubes bedarf es jedoch eines Feuchtegehalts von über 50 %.[24]

Ein abweichender Verlauf wird bei lösungsmittelhaltigen Stäuben beobachtet. Bei diese Stäuben nimmt die Explosionsheftigkeit mit Anheben des Wassergehalts zunächst ab, steigt jedoch bei höherem Feuchteanteil wieder an. Dieser Umstand wird dadurch erklärt, dass sich ein leicht flüchtiges Gemisch aus Lösungsmittel und Wasser bildet, welches entzündlich und explosionsfähig ist. Bei sehr leicht flüchtigen Lösungsmitteln, wie z.B. Aceton, wirkt sich der die Explosionsheftigkeit steigernde Effekt wesentlich stärker aus, als bei schwächer flüchtigen Lösungsmitteln, wie z.B. Ethanol.[18]

Für die Bestimmung der Explosionskenngrößen sollten die Staubproben auf einen Feuchtegehalt von unter 10 % getrocknet werden.

Turbulenz

In einer turbulenten Staubwolke bewegen sich die Staubpartikel sehr schnell und zufällig im dreidimensionalen Raum. Es kommt zur intensiven Durchmischung der Partikel im Oxidationsmittel, wodurch sich die Flamme nach der Entzündung sehr schnell in der Staubwolke fortpflanzen

kann. Die Flammenfront breitet sich in einer turbulenten Staubwolke daher viel schneller aus als in einer ruhenden Wolke. Somit steigt auch die Explosionsheftigkeit eines Staub-Luft-Gemisches mit seiner Turbulenz. Um die höchsten Werte für den maximalen Explosionsdruck und den -druckanstieg zu erhalten, sollte die Turbulenz in der Staubwolke zum Zeitpunkt der Entzündung möglichst groß sein. Die Turbulenz der Staubwolke nimmt mit der Zeit ab, sodass bei geringen Zündverzögerungszeiten maximale Explosionskenngrößen erzielt werden (Abbildung 3.31).[1]

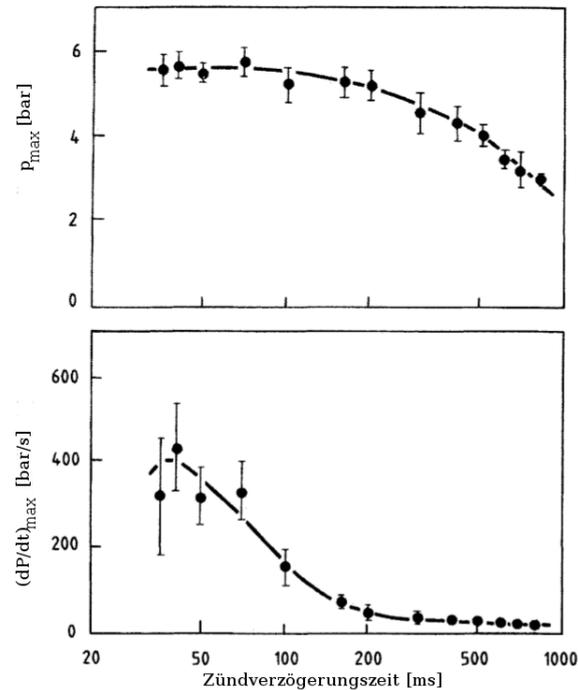


Abbildung 3.31: Einfluss der Zündverzögerungszeit auf den maximalen Explosionsdruck sowie den maximalen Druckanstieg, gemessen in einer 1,2-l-Hartmann-Apparatur; 5 Versuche pro Zündverzögerungszeit [1]

Die Zündverzögerungszeit wird so eingestellt, dass die gesamte Staubmenge homogen im Explosionsbehälter verteilt ist, es aber noch nicht zur Absetzung kommt. Für die Bestimmung von p_{\max} sowie K_{St} -Wert in der 1-m³-Apparatur nach ÖNORM wird eine Zündverzögerungszeit von 0,6 s vorgeschrieben [23]. Die Versuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in der 20-l-Apparatur, bei einer Zündverzögerungszeit von 60 ms durchgeführt. Die Verringerung der Zeit kommt durch die veränderten Größenverhältnisse zustande. Zu dieser Zeit ist die Verteilung des eingblasenen Staubes im Zündpunkt annähernd ideal homogen.

Zündenergie

In der Abhängigkeit der Explosionsheftigkeit von der Zündenergie werden die Stäube in zwei Gruppen unterteilt:

1. Stäube, deren Explosionsheftigkeit unabhängig von der Zündenergie ist.

Zu dieser Gruppe zählen jene Stäube, die durch Kondensatorentladungsfunken leicht oder normal entzündlich sind, also eine Mindestzündenergie von kleiner 1 J haben. Bei ihnen ändern sich weder der maximale Explosionsdruck noch der K_{St} -Wert in Abhängigkeit von der Zündenergie (Abbildung 3.32). [24]

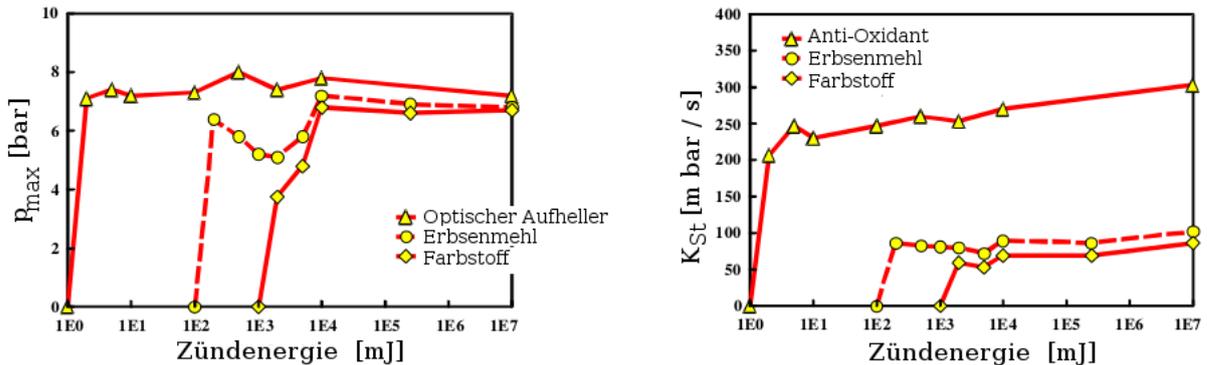


Abbildung 3.32: Explosionskenngrößen unterschiedlicher leicht entzündlicher Stäube in Abhängigkeit von der Zündenergie [24]

2. Stäube, deren K_{St} -Wert von der Zündenergie abhängt.

Vor allem bei schwer entzündlichen Stäuben mit einer Mindestzündenergie von über 1 J kommt es vor, dass der K_{St} -Wert annähernd linear mit der Zündenergie ansteigt. Der maximale Explosionsdruck bleibt in diesem Fall jedoch nahezu konstant, bzw. lässt nur eine leichte Abhängigkeit von der Zündenergie erkennen (Abbildung 3.33).[24]

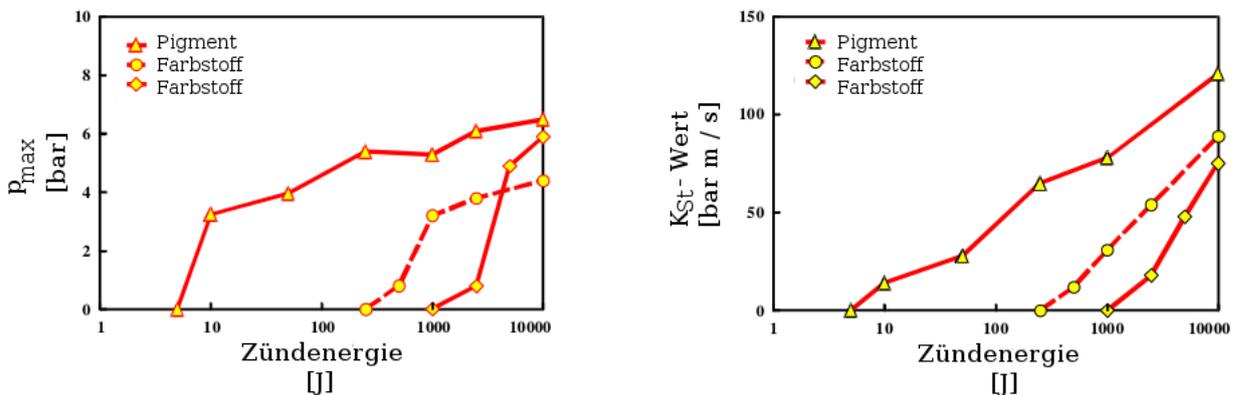


Abbildung 3.33: Explosionskenngrößen verschiedener schwer entzündlicher Stäube in Abhängigkeit von der Zündenergie [24]

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Stäube aus Abfallaufbereitungsanlagen sind eher schwer entzündlich, weshalb mit einer Zundenergieabhangigkeit gerechnet werden muss. Die von der ÖNORM EN 14034-1 [23] vorgeschriebene Zündenergie von 10.000 Joule stellt also einen konservativen Ansatz dar.

3.3.2 Bestimmung des maximalen Explosionsdrucks und des K_{St} -Wertes

Die Bestimmung der Explosionsheftigkeit eines Staubes in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren ist gegenwärtig nur als Abschätzung möglich. Um den maximalen Explosionsdruck sowie den K_{St} -Wert genau ermitteln zu können, bedarf es derzeit in jedem Fall der Laboranalyse. Es ist vor allem bei den in Abfallbehandlungsanlagen vorkommenden heterogenen Stäuben wichtig, jeden Staub eigens zu untersuchen und die Umgebungsbedingungen in die sicherheitstechnische Evaluierung einzubeziehen.

Hartmannbombe

Die Hartmannbombe ist prinzipiell gleich aufgebaut wie das modifizierte Hartmannrohr zur Bestimmung der Mindestzündenergie (Abbildung 3.10). Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass, damit der durch die Explosion entstehende Druck bzw. der Druckanstieg gemessen werden kann, das Explosionsrohr durch den Deckel verschlossen ist. Außerdem ist das Hartmannrohr, anders als bei der Messung der Mindestzündenergie, aus Edelstahl gefertigt. Der Druckaufnehmer ist im Deckel montiert und zeichnet den Druckverlauf über die Zeit auf. Zur Entzündung werden kontinuierliche Strecken elektrischer Funken, einzelne synchronisierte Funken, synchronisierte chemische Zünder oder Gluhwendeln verwendet. Welche Zündquelle verwendet wird, hat auf die Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes keinen Einfluss, da dieser, im Gegensatz zum Druckanstieg, kaum von der Turbulenz der entzündeten Staubwolke abhängig ist. Soll jedoch der maximale Druckanstieg untersucht werden, muss, um die Turbulenz möglichst konstant zu halten, der Zeitpunkt der Zündung genau festgelegt sein. Aufgrund des geringen Volumens sowie der länglichen Form des Explosionsgefäßes, ist der Wärmeverlust an die Wand des Rohres nicht zu vernachlässigen. Das hat zur Folge, dass die mit der Hartmannbombe gemessenen Maximaldrücke generell etwa 25 bis 30 % geringer sind als jene, die in der 1 m³-Apparatur oder der 20-l-Apparatur bestimmt wurden.

20-l-Apparatur

Die Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes sowie des K_{St} -Wertes im Rahmen dieser Arbeit wurden mit der 20-l-Apparatur der Firma Kühner, die im Wesentlichen mit der 1988 von Siwek entwickelten Apparatur übereinstimmt (Abbildung 3.23), durchgeführt. Sie entspricht in Aufbau und Funktionalität der in Abbildung 3.22 dargestellten 1-m³-ISO-Kugel. Versuchsaufbau und -ablauf wurden bereits im Kapitel zur Bestimmung der unteren Explosionsgrenze erläutert.

Im Gegensatz zur Bestimmung der UEG werden bei der Bestimmung der Explosionsheftigkeit chemische Zünder mit einer Energie von 10 kJ verwendet um sicherzustellen, dass auch schwer entzündliche Stäube gezündet werden. Die Druckaufnehmer messen den zeitlichen Druckverlauf,

der durch die Software so ausgewertet wird, dass bereits der um die Zündenergie bereinigte maximale Explosionsdruck sowie der volumsunabhängige K_{St} -Wert ausgegeben werden.

In der ersten Versuchsreihe wird ein breites Spektrum an Konzentrationen untersucht, während im zweiten und dritten Durchgang die Versuche bei Konzentrationen nahe der Maximalwerte wiederholt werden. Der maximale Explosionsdruck und der K_{St} -Wert werden schließlich durch Mittelwertbildung erhalten (Abbildung 3.34).

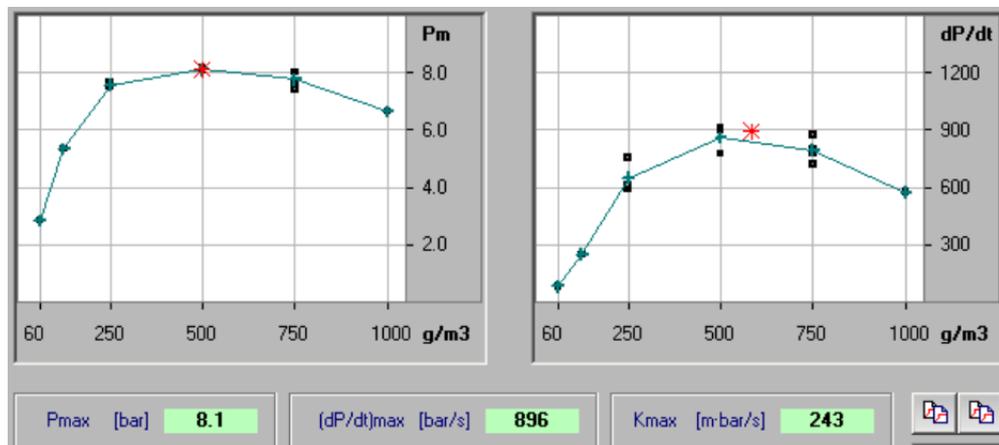


Abbildung 3.34: Maximaler Explosionsdruck und Druckanstieg als Ergebnisse der Untersuchung in der 20-l-Apparatur der Firma Kühner [24]

3.4 Literaturdaten

Bei der Ableitung der Explosionsgefahr eines Staubes aus Literaturdaten sieht man sich folgenden Herausforderungen gegenüber:

- Stäube aus Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen sind heterogen. Dies gilt sowohl für die Zusammensetzung von Stäuben unterschiedlicher Anlagen, als auch für die zeitliche Änderung der Zusammensetzung innerhalb einer Anlage.
- Aufgrund vieler unterschiedlicher Einflussfaktoren kann sich das Explosionsverhalten von ähnlichen Stäuben bei geänderten Umgebungsbedingungen stark unterscheiden.
- Die genaue Probenzusammensetzung und -korngrößenverteilung der Stäube sind bei den derzeit zugänglichen Werten aus Datenbanken und der Literatur oft unbekannt. In den meisten Fällen wird nur eine allgemeine Probenbezeichnung, wie z.B. Holz, Papier oder Kunststoff angegeben. Dies erschwert den Abgleich der vorhandenen Staubprobe mit Literaturdaten.
- Da die Kenngrößen teilweise durch unterschiedliche Bestimmungsverfahren ermittelt werden, ist die Vergleichbarkeit eingeschränkt.

Literaturdaten können also nur als Richtwerte für die Einschätzung der Explosionsgefährlichkeit eines Staubes dienen.

Ausgangsmaterialien für die Produktion von Ersatzbrennstoffen sind Siedlungsabfälle, Gewerbemüll, Produktionsabfälle und Kunststoffe. Basierend auf diesen unspezifischen Bezeichnungen wurden sechs Stoffgruppen gewählt, die in ihrer Gesamtheit die Ausgangsmaterialien repräsentieren. Es sind dies Holz, Papier, Textilien, Abfall, Kunststoffe und Stoffgemische. Die Gruppe Stoffgemische fasst Stäube zusammen, die eine Kombination aus Holz, Papier oder Textilien mit Kunststoff darstellen. Als Quelle diente, neben den Büchern „Dust Explosions in the Process Industries“ von Eckhoff [1] und „Staubexplosionen – Ablauf und Schutzmaßnahmen“ von Bartknecht [7] vor allem die Datenbank GESTIS Staub-Ex der DGUV [25]. Im Zuge der Literaturrecherche wurden Daten unterschiedlicher Stäube gesammelt und den Stoffgruppen zugeteilt. Die Daten der einzelnen Stäube, sortiert nach Stoffgruppen, sind im Anhang zu sehen. In den einzelnen Stoffgruppen werden für die Kennwerte UEG, p_{\max} sowie K_{St} Mittelwerte gebildet. Durch die Berechnung der Standardabweichung s und der Anzahl der recherchierten Literaturdaten einer Stoffgruppe kann abgeschätzt werden, ob die Daten statistisch repräsentativ für die jeweilige Stoffgruppe sind.

Die Mittelwerte der UEG für Holz, Papier, Textilien, Kunststoffe und Stoffgemische sind in Form eines Balkendiagramms in Abbildung 3.35 dargestellt und bewegen sich im Bereich zwischen 50 und $75 \frac{g}{m^3}$. Die teilweise sehr hohen Standardabweichungen lassen darauf schließen, dass die Kennwerte stark um den Mittelwert streuen. Die Datenlage für die untere Explosionsgrenze ist verhältnismäßig gut. Die als Abfall deklarierten Stäube haben generell höhere Explosionsgrenzen als Stäube anderer Stoffgruppen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass es sich bei Stäuben der Abfallbehandlung um Mischstäube handelt, die einen höheren Inertanteil aufweisen als beispielsweise reine Kunststoffstäube.

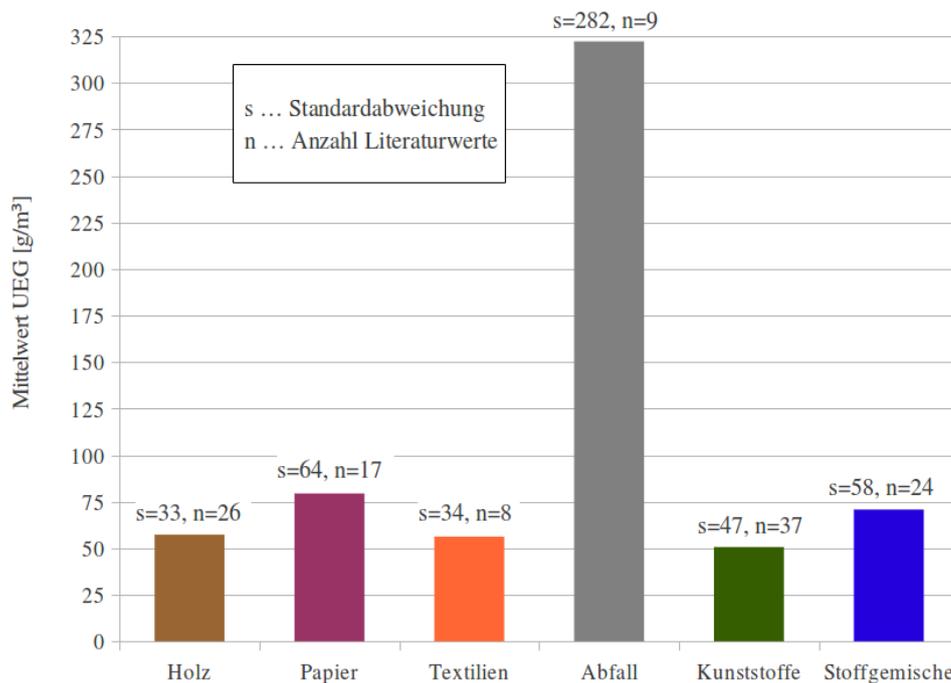


Abbildung 3.35: Mittelwerte der unteren Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stoffgruppen [1][7][25]

Aufgrund einer großen Anzahl an vorhandenen Daten und geringen Standardabweichungen können die Mittelwerte der maximalen Explosionsdrücke der Stoffgruppen Holz, Papier, Kunststoffe

und Stoffgemische als für praktische Zwecke repräsentativ bezeichnet werden (Abbildung 3.36). Der niedrigste Mittelwert ist in der Gruppe der Stoffgemische, bei 7,6 bar, zu finden, während

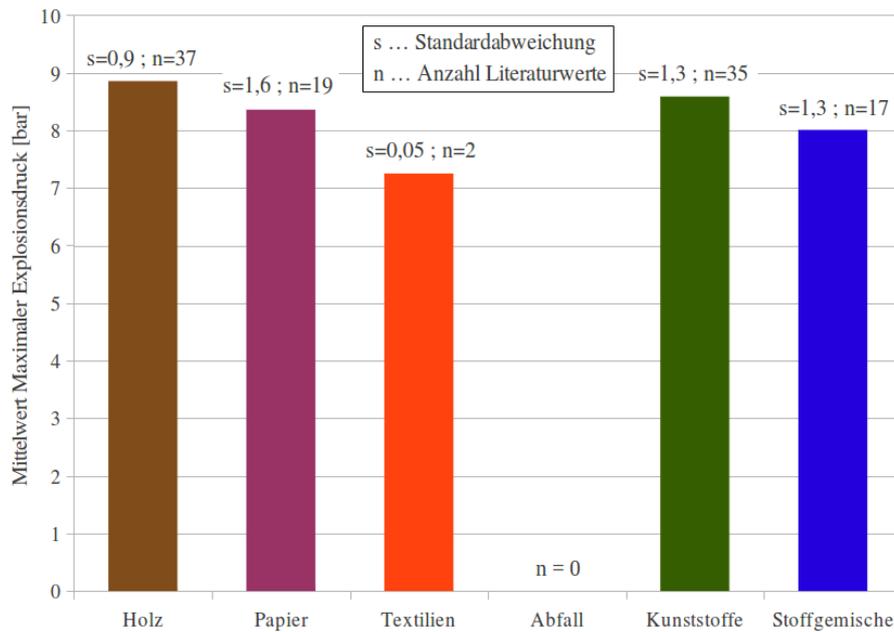


Abbildung 3.36: Mittelwerte der maximalen Explosionsdrücke von unterschiedlichen Stoffgruppen [1][7][25]

die Gruppe der Holzstäube den höchsten Mittelwert, nämlich 8,9 bar, verzeichnet. Daraus kann geschlossen werden, dass auch die Schwankungen zwischen den Gruppen in Bezug auf den maximalen Explosionsdruck nicht allzu groß sind. Da in der Gruppe der Textilien nur zwei Ergebnisse für p_{\max} gefunden werden konnten, ist der Mittelwert von 7,3 bar kaum repräsentativ. In der Gruppe der Abfälle konnten keine Ergebnisse für den maximalen Explosionsdruck recherchiert werden.

Die Werte für den maximalen zeitlichen Druckerhöhung bestätigen die Reihung der Stoffgruppen in ihrer Explosionsheftigkeit (Abbildung 3.37). Demnach reagieren Stäube der Gruppe Holz mit $129 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$ sowie jene der Gruppe Kunststoffe mit $136 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$ etwa ähnlich heftig, während die Gruppen Papier ($97 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$) und Stoffgemische ($106 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$) auf nahezu gleichem Niveau schwächer reagieren. Wie schon zuvor ist die Datenlage für Textilien und Abfall auch für diese sicherheitstechnische Kenngröße schlecht. Obwohl die durchwegs hohen Standardabweichungen darauf hinweisen, dass einzelne Stäube stark vom jeweiligen Mittelwert abweichen, kann davon ausgegangen werden, dass die Stäube der untersuchten Stoffgruppen grundsätzlich explosionsfähig sind, dabei jedoch der ersten Staubexplosionsklasse zuzuordnen sind.

Da die Mindestzündenergie in Energiebereichen angegeben wird, wurde eine Darstellung gewählt, bei der der Anteil der Proben einer Stoffgruppe, der einem bestimmten Mindestzündenergiebereich zuzuordnen ist, ersichtlich wird (Abbildung 3.38). Aufgrund der geringen Anzahl an Literaturwerten lassen sich kaum allgemeine Trends für die Mindestzündenergie ableiten. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Entzündung der Stäube der untersuchten Stoffgruppen bereits bei geringen Zündenergien möglich ist. Daher ist es für eine umfassende sicherheitstechnische Einschätzung unumgänglich, die Mindestzündenergie des betreffenden Staubes in Versuchen zu bestimmen.

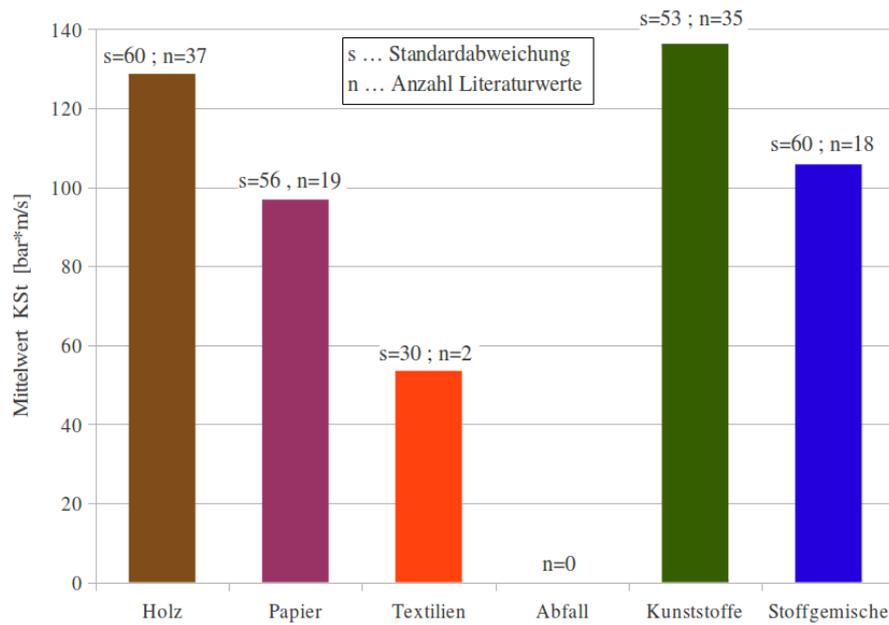


Abbildung 3.37: Mittelwerte der K_{St} -Werte unterschiedlicher Stoffgruppen [1][7][25]

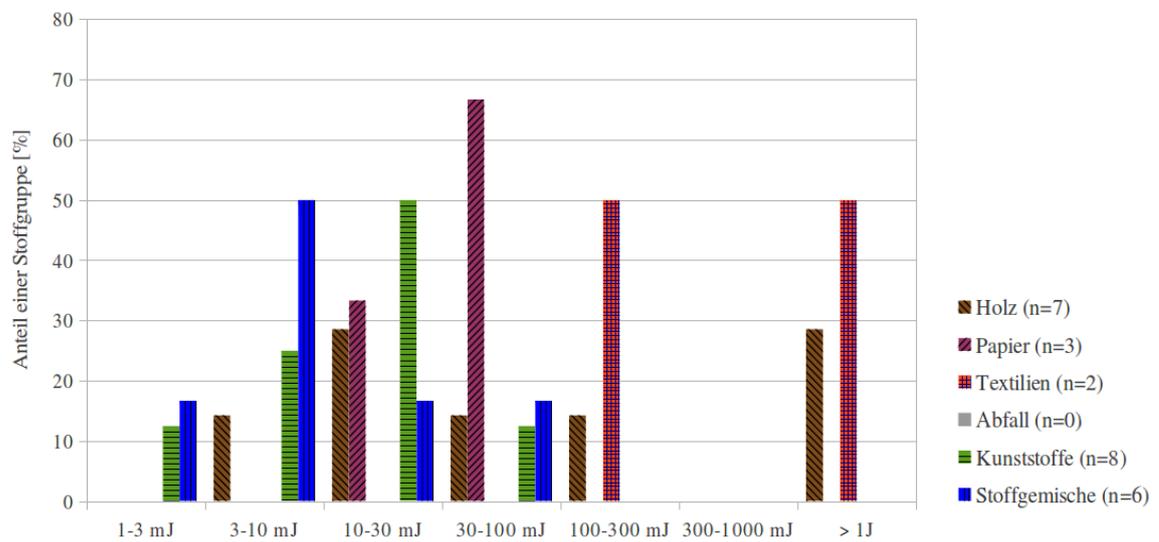


Abbildung 3.38: Häufigkeit der Mindestzündenergiebereiche unterschiedlicher Stoffgruppen [1][7][25]

4 Versuchsdurchführung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Stäube aus abfallaufbereitenden Anlagen untersucht. Wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, durchläuft das Aufgabematerial, das aus Siedlungsabfall, Gewerbemüll oder Produktionsabfällen besteht, mechanische Aufbereitungs- und Sortierschritte. Nachdem Metalle und Störstoffe durch Magnetabscheider, Windsichter und Sortieranlagen aus

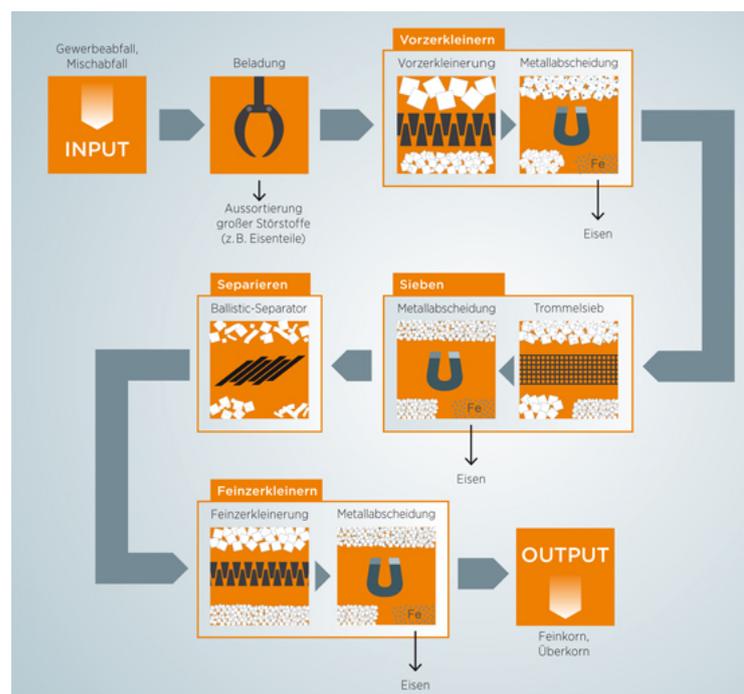


Abbildung 4.1: Aufbereitungsschritte bei der Ersatzbrennstoffherzeugung [26]

dem Abfall entfernt werden, kommt es zur mechanischen Zerkleinerung des heizwertreichen Anteils. Das Endprodukt hat eine Korngröße von kleiner 30 mm und wird in Zementwerken oder Kraftwerken als Brennstoff verwendet. Im Zuge der Aufbereitung entstehen Partikel kleinerer Korngrößen, die sich auf Oberflächen ablagern.

Bei den untersuchten Proben handelt es sich um Ablagerungen und Filterstäube von Betrieben der abfallbehandelnden Industrie. Neben Proben aus verschiedenen Anlagen wurden auch Proben aus unterschiedlichen Bereichen der gleichen Anlage, z.B. Vorzerkleinerer, Nichteisenmetallabscheider etc., genommen. Durch Untersuchungen sollte festgestellt werden, ob die Gefahr besteht, dass durch Aufwirbeln der abgelagerten Stäube explosionsfähige Atmosphären gebildet werden. Außerdem werden, falls Explosionsfähigkeit besteht, die Reaktionsheftigkeit sowie die Mindestzündenergie und die untere Explosionsgrenze bestimmt.

4.1 Probenaufbereitung

Vor der Bestimmung der STK wurden die Proben zuerst auf Luftfeuchtigkeit getrocknet und ihr Wassergehalt im Anlieferungszustand bestimmt. Nach Durchführen der Siebanalyse und Abtrennung des Grobanteils wurde der Aschegehalt der Stäube ermittelt. Der lufttrockene Feinanteil wurde dann in Hinblick auf die sicherheitstechnischen Kenngrößen untersucht.

4.1.1 Wassergehalt

Vor der Siebanalyse werden alle Proben, wie in der Betriebsanleitung zur 20-l-Apparatur vorgeschrieben, mindestens 24 Stunden lang bei 75°C im Trockenschrank getrocknet [24]. Danach werden die Proben auf Raumtemperatur abgekühlt und abgewogen. Durch die Gewichts Differenz vor und nach der Trocknung wird der Feuchtegehalt der Probe im Anlieferungszustand bestimmt. Die getrockneten Proben werden nach der Siebanalyse annähernd luftdicht verschlossen und bis zur Untersuchung der sicherheitstechnischen Kennzahlen in einem Klimaraum bei definierten Umgebungsbedingungen gelagert. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die erneute Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebung vernachlässigbar gering ist.

4.1.2 Aschegehalt

Zur Bestimmung des Aschegehaltes gemäß ÖNORM EN 14775 wird die lufttrockene Staubprobe in einem elektrischen Ofen auf 550°C erwärmt und mindestens eine Stunde lang auf dieser Temperatur gehalten [27]. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur in einem Exsikkator kann durch Differenzwägung der Inertanteil bestimmt werden. Dieser Wert ist aufschlussreich, da die Explosionsheftigkeit stark vom Anteil der nicht reaktiven Partikel abhängt.

4.1.3 Korngrößenverteilung

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung der Proben im Anlieferungszustand erfolgte gemäß DIN 66165 [28], mittels Vibrationssiebmaschine der Firma Retsch. Die verwendeten Analysensiebe hatten folgende Maschenweiten: 9 mm; 6,3 mm; 4 mm; 1 mm; 0,5 mm

In Tabelle 4.1 ist zu sehen, dass nach jedem Siebdurchgang, bei dem das aufgegebene Material 30 Minuten lang gesiebt wurde, die Siebe abgewogen wurden und durch Abzug der Masse der leeren Siebe die Rückstände und in weiterer Folge die Massenanteile der Korngrößenklassen berechnet wurden. Das Ergebnis einer solchen Siebanalyse bildet die Darstellung der Rückstandsanteile der verschiedenen Korngrößenklassen (Abbildung 4.2).

Der Feinanteil des abgeseihten Materials, also jener kleiner 500 µm, wurde anschließend für die Untersuchungen der sicherheitstechnischen Kenngrößen verwendet. Die Abtrennung des grobkörnigen Materials ist notwendig, da Staub erst ab Korngrößen kleiner 400-500 µm explosionsfähig ist und bei größeren Korngrößen außerdem die Gefahr besteht, dass die Versuchsanlage verstopft. Diese Vorgehensweise ist gerechtfertigt, da bei der Bestimmung der STK die im ungünstigsten Fall auftretenden Extremwerte untersucht werden sollen, also der maximale Explosions-

Tabelle 4.1: Tabelle mit den Ergebnissen der Siebanalyse der Probe Nr. 6

Maschenweite		9 mm	6,3 mm	4 mm	1 mm	0,5 mm	Siebboden
Rückstand Durchgang Nr. 1	g	15,0	0,4	0,5	4,0	5,0	43,6
Rückstand Durchgang Nr. 2	g	18,5	0,9	0,9	4,6	5,4	41,7
Rückstand Durchgang Nr. 3	g	15,8	0,4	0,8	4,0	5,6	46,1
Rückstandssumme	g	49,3	1,7	2,2	12,6	16	131,4
Massenanteil	Gew. %	23,1	0,8	1,0	5,9	7,5	61,6

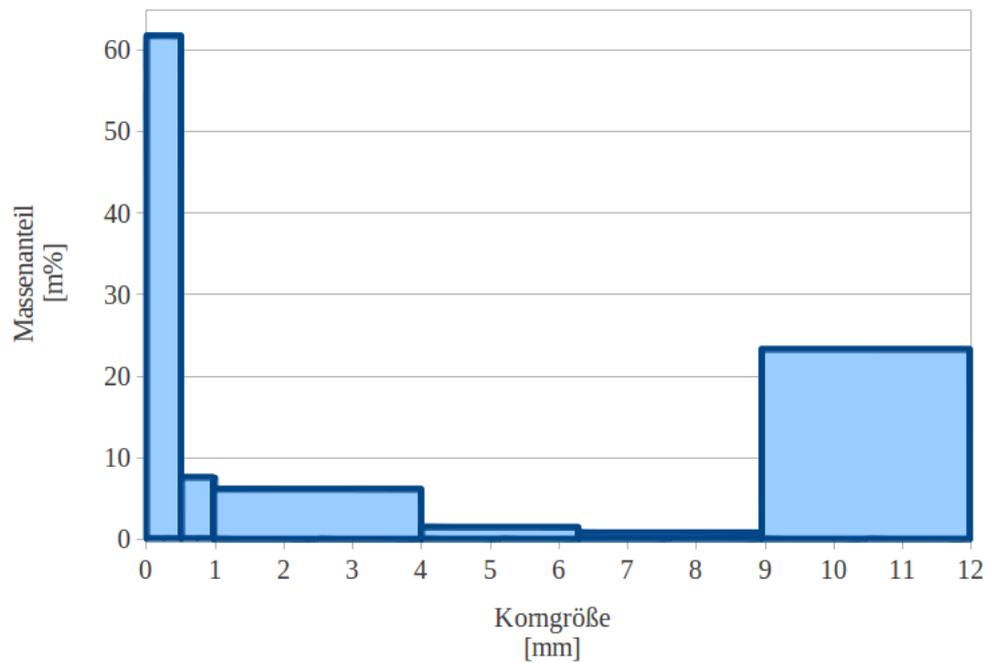


Abbildung 4.2: Rückstandsanteile der Korngrößenklassen der Probe Nr. 6

druck, die minimale UEG oder die geringste MZE. Außerdem kann angenommen werden, dass in der Praxis Partikel mit größeren Korngrößen früher sedimentieren, sodass der Feinstaub in der Luft zurückbleibt und eine Inertisierung durch den Grobanteil unwahrscheinlich ist.

Die Korngrößenanalyse des Feinanteils kleiner 500 μm erfolgte extern, über dynamische Bildanalyse mit dem Qicpic-Sensor der Firma Sympatec. Die Korngrößenverteilungen samt Kenngrößen wurden übermittelt, sodass diese in die Ergebnisauswertung einfließen konnten.

4.2 Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen

Im Folgenden wird auf die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bestimmungsverfahren näher eingegangen. Die Ermittlung des maximalen Explosionsdruckes sowie des K_{St} -Wertes erfolgt zugleich und mittels 20-l-Apparatur der Firma Kühner. Die untere Explosionsgrenze wird mit der gleichen Apparatur bestimmt, während die Mindestzündenergiebestimmung mit der MIKE-3-Apparatur der Firma Kühner durchgeführt wird. Die MIKE-3-Apparatur entspricht im Wesentlichen dem modifizierten Hartmannrohr, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben.

4.2.1 Maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert

Die Untersuchung der Staubexplosionskenngrößen p_{max} und K_{St} wird mit dem in Abbildung 4.3 schematisch dargestellten Versuchsaufbau durchgeführt. Eine definierte Menge an Staub wird

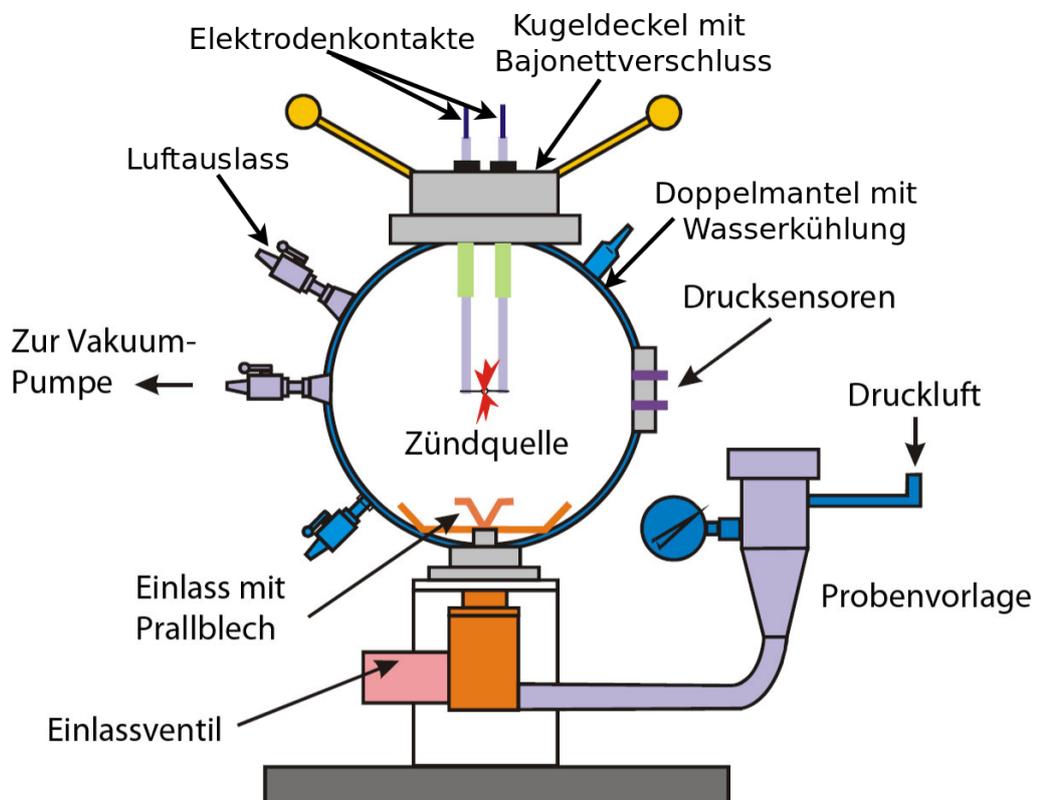


Abbildung 4.3: Aufbau der 20-l-Apparatur zur Bestimmung von p_{max} und K_{St} [29]

in den Staubvorratsbehälter vorgelegt. Nach Evakuierung der 20-l-Kugel wird der Staub mittels Druckluft eingeblasen und durch das Prallblech so in der Kugel dispergiert, dass eine möglichst homogene Staubverteilung entsteht. Nach einer Zündverzögerungszeit von 60 ms werden die chemischen Zünder, die so an den Elektrodenstäben angebracht sind, dass sie sich als annähernd punktförmige Zündquelle im Mittelpunkt der Kugel befinden, gezündet. Die Zündverzögerungszeit, die die Regelgröße für die Turbulenz ist, wird für die Staubexplosionsprüfung in der 20-l-Apparatur mit 60 ms festgelegt, da die Verteilungsverhältnisse in der Kugel zu diesem Zeitpunkt konzentrisch homogen sind. Bei längeren Zündverzögerungszeiten sinkt die Turbulenz und die Partikel beginnen sich zu entmischen, was zur Abschwächung der Explosionsheftigkeit führt. Durch die Druckaufnehmer wird der Druckverlauf über die Zeit gemessen. Je reaktionsheftiger ein Staub der gewählten Konzentration ist, umso stärker sind der Druckanstieg und der maximale Explosionsdruck. Der Doppelmantel mit Wasserkühlung sorgt dafür, dass sich im Versuchsraum eine konstante Temperatur von ca. 20°C einstellt.

Vor Beginn jeder neuen Serie muss ein Kontrollversuch durchgeführt werden, um die Dichtigkeit und Funktionstüchtigkeit des Versuchsaufbaus zu untersuchen. Im Unterschied zum Versuch zur Explosionskenngrößenbestimmung werden keine Zünder montiert und es wird kein Staub vorgelegt. Nach dem Versuch darf beim Öffnen der Luftauslassleitung keine Luft entweichen, da in der Kugel bei korrekter Versuchsdurchführung Atmosphärendruck herrschen muss. Der Druckverlauf wird von zwei Druckaufnehmern gemessen und als gemittelter Verlauf ausgegeben.

Ein beispielhafter Druckverlauf eines Kontrollversuches ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Zuerst

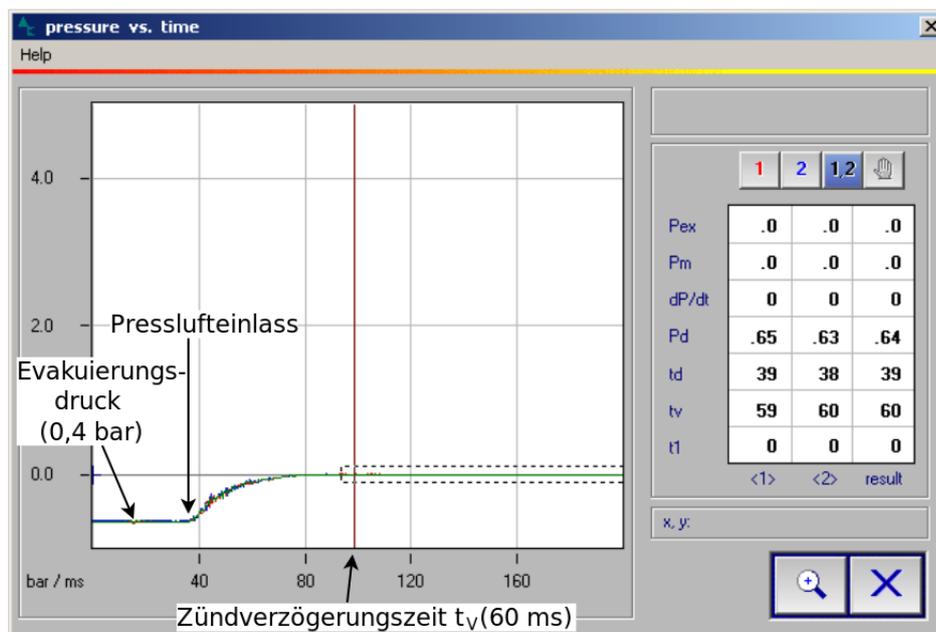


Abbildung 4.4: Beispielhafter Druckverlauf eines Kontrollversuches [24]

herrscht in der Kugel der Evakuierungsdruck von 0,4 bar, dann, nach Einblasen der Pressluft, steigt der Druck auf Atmosphärendruck an. Die Zündung der Zünder würde, bei einem Versuch zur Bestimmung der Explosionskenngrößen, 60 ms nach Drucklufteinlass stattfinden. Das Programm der Apparatur ist so eingestellt, dass es davon ausgeht, dass zum Zeitpunkt der Zündung Atmosphärendruck herrscht. Es handelt sich um eine Differenzdruckmessung, bei der Absolutdrücke nicht gemessen werden können.

Nach dem Kontrollversuch kann mit der Untersuchung von K_{St} und p_{max} begonnen werden. In der ersten Serie werden die Konzentrationen, beginnend bei $60 \frac{g}{m^3}$, wie vom Programm vorgegeben, untersucht. Die Messung der Explosionsheftigkeit erfolgt über einen weiten Konzentrationsbereich, da die sog. Idealkonzentration, bei der Maximalwerte erreicht werden, gefunden werden muss. Es handelt sich meist um einen parabolischen Verlauf des maximalen Explosionsdruckes sowie des Druckanstiegs mit dem Maximum bei der Idealkonzentration des Staubes (siehe Abb. 3.26). In der zweiten und dritten Serie wird der Konzentrationsbereich um das in der ersten Serie gefundene Maximum von K_{St} und p_{max} untersucht. Liegt also der maximale Druck in der ersten Serie z.B. bei einer Konzentration von $500 \frac{g}{m^3}$, werden in der zweiten und dritten Serie die Konzentrationen 125, 250, 500, 750 und $1000 \frac{g}{m^3}$ untersucht. Die Schritte sind so gewählt, dass der relevante Konzentrationsbereich in genügend genauer Auflösung dargestellt wird.

Vor Versuchsbeginn werden die chemischen Zünder mit der Zündenergie von 10 kJ im rechten Winkel zur durch die Elektrodenstäbe aufgespannten Ebene montiert, um eine annähernd punktförmige Zündquelle zu erhalten (Abbildung 4.5). Die Annäherung an eine punktförmige

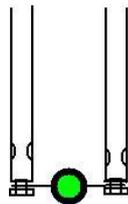


Abbildung 4.5: Vorderansicht der montierten Zünder [24]

Zündquelle ist wichtig, damit die Entzündung der Staubwolke im Mittelpunkt der Kugel stattfindet, sodass sich die Druckwelle gleichmäßig nach allen Seiten ausbreiten kann. Dadurch wird sichergestellt, dass der von den einseitig angebrachten Druckaufnehmern detektierte Druck durch eine sich anders als konzentrisch ausbreitende Druckwelle nicht verfälscht wird.

Beim Öffnen der Luftauslassleitung kommt es, anders als beim Kontrollversuch, zu einem Luftausstoß, da die Zünder und eine mögliche Staubexplosion einen Druckanstieg in der Kugel bewirken. Der maximale Druckanstieg wird ermittelt, indem eine Tangente an den Abschnitt des Druckverlaufs mit der größten Steigung gelegt wird. Bei schwachen Explosionen kann es vorkommen, dass die Druckanstiegsgeschwindigkeit der chemischen Zünder größer ist als die Anstiegsgeschwindigkeit der Staubexplosion selbst. In der Auswertung ergäbe sich dadurch ein Fehler, welcher durch manuelles Anlegen der Tangente an den durch die Explosion verursachten Druckanstieg zu korrigieren ist.

In Abbildung 4.6 ist der Druckverlauf bei der Explosion eines Staubgemisches mit $500 \frac{g}{m^3}$ Lykopodium in der 20-l-Kugel zu sehen. Zu Beginn wird durch die Vakuumpumpe ein Unterdruck P_d erzeugt. Nach der Zündverzögerungszeit t_v stellt sich in der Kugel durch Einblasen der Druckluft aus dem Staubvorratsbehälter Atmosphärendruck ein. Am Ende der Zündverzögerungszeit werden die chemischen Zünder gezündet. Bei einem explosionsfähigen Staub und einer explosionsfähigen Konzentration kommt es zu einem Druckanstieg aufgrund der initiierten Explosion. Sowohl der resultierende Explosionsdruck P_{ex} , als auch der maximale Druckanstieg $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ dienen der Einschätzung der Explosionsheftigkeit. Der Druck P_{ex} wird automatisch zu P_m korrigiert. Dies ist notwendig, da der Explosionsdruck in der 20-l-Apparatur, aufgrund eines durch das ungünstigere Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen verursachten Abkühleffekts, und der Druckentwicklung der chemischen Zünder, geringer ist als im 1-m^3 -Normbehälter [24].

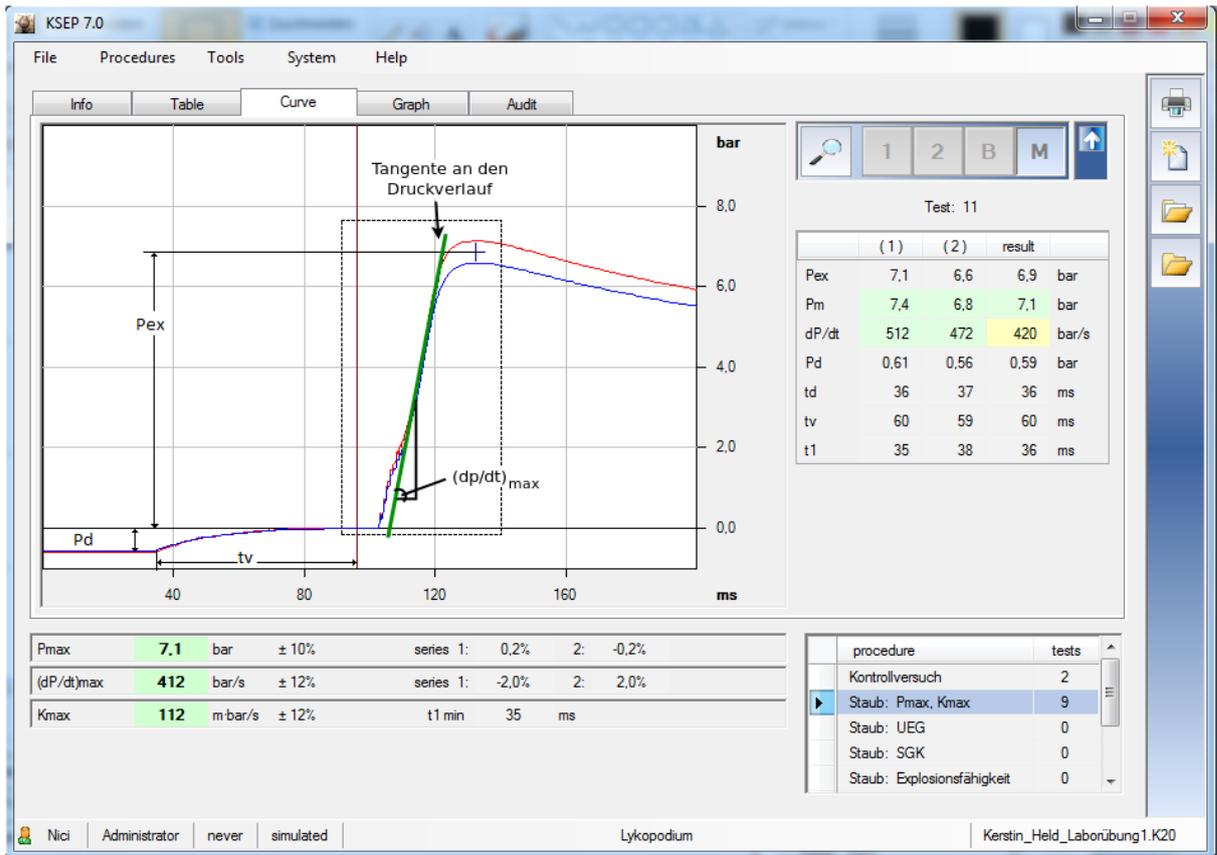


Abbildung 4.6: Druckverlauf einer Staubexplosion von Lycopodium bei $500 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ [24]

In Abbildung 4.6 ist weiters zu erkennen, dass die Tangente mit der höchsten Steigung, $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$, an den Druckanstiegsverlauf gelegt wird. P_{\max} und K_{\max} (gleichbedeutend mit p_{\max} und K_{St}) sind in Abbildung 4.6 in der Tabelle unter dem Diagramm aufgelistet. Üblicherweise werden jeweils drei Versuche pro Konzentration durchgeführt. P_{\max} und K_{\max} sind dann die errechneten Mittelwerte aus den Maxima der drei Serien. Dabei darf jedes der Maxima nicht mehr als 10 % vom gemittelten Explosionsdruck abweichen. Die erlaubte Abweichung des K_{\max} -Wertes von den einzelnen Serien-Maxima ist, wie in Tabelle 4.2 zu sehen, umso größer, je kleiner die Kenngröße ist.

Tabelle 4.2: Tolerierte Abweichungen des K_{\max} -Wertes von den Maximalwerten der einzelnen Serien [24]

$\left(\frac{dp}{dt}\right)$ [$\frac{\text{bar}}{\text{s}}$]	K_{\max} [$\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$]	Abweichung
≤ 185	50	$\pm 30 \%$
186 - 370	51 - 100	$\pm 20 \%$
371 - 740	101 - 200	$\pm 12 \%$
> 740	> 200	$\pm 10 \%$

4.2.2 Untere Explosionsgrenze

Nach der Bestimmung der Explosionsheftigkeit wurde bei einigen Stäuben die untere Explosionsgrenze ermittelt. Der Versuchsaufbau gleicht jenem zur Bestimmung von p_{\max} und K_{St} . Es werden jedoch schwächere chemische Zünder mit einer Energie von 2 kJ verwendet, um eine Beeinflussung des Ergebnisses durch die Zündenergie ausschließen zu können. Es wird bei einer, dem erwarteten Zündverhalten des Staubes angepassten, niedrigen Staubkonzentration begonnen. Kommt es nicht zur Entzündung des Staubes, wird die Konzentration so lange erhöht, bis die Kriterien für eine Entzündung erreicht werden. Wie bei der Bestimmung der Explosionsheftigkeit wird der Druckverlauf aufgenommen und der maximale Explosionsdruck sowie der K_{St} -Wert werden als Ergebnisse ausgegeben. Überschreitet der maximale Explosionsdruck einen gewissen Grenzwert (siehe Tabelle 4.3), handelt es sich um eine Explosion. Die geringste Kon-

Tabelle 4.3: Kriterien für Entzündung bei einer Zündenergie von 2 kJ [24]

P_{ex} [bar]	P_m [bar]	Entzündung
$< 0,5$	$< 0,2$	✗
$\geq 0,5$	$\geq 0,2$	✓

zentration, bei der in drei aufeinanderfolgenden Versuchen keine Explosion festgestellt wird, ist die untere Explosionsgrenze. Bei den meisten Proben wurde die UEG oft bereits nach einmaliger Nichtzündung festgelegt, da dies für eine Abschätzung ausreichend ist.

Bei einigen ausgewählten Stäuben wurde die Bestimmung der UEG zusätzlich mit 10 kJ-Zündern durchgeführt, da viele Proben bei 2 kJ-Zündern nicht zur Explosion gebracht werden konnten. Bei erhöhter Zündenergie liegen die Kriterien für die Entzündung der Staubwolke, wie in Tabelle 4.4 zu sehen ist, bei höheren Werten.

Tabelle 4.4: Kriterien für Entzündung bei einer Zündenergie von 10 kJ [24]

P _{ex} [bar]	P _m [bar]	Entzündung
< 2	< 0,4	✗
≥ 2	≥ 0,4	✓

4.2.3 Mindestzündenergie

Für die Bestimmung der Mindestzündenergie wird die MIKE-3-Apparatur der Firma Kühner, siehe Abbildung 4.7, verwendet. Das Herzstück der Apparatur bildet das modifizierte Hartmann-

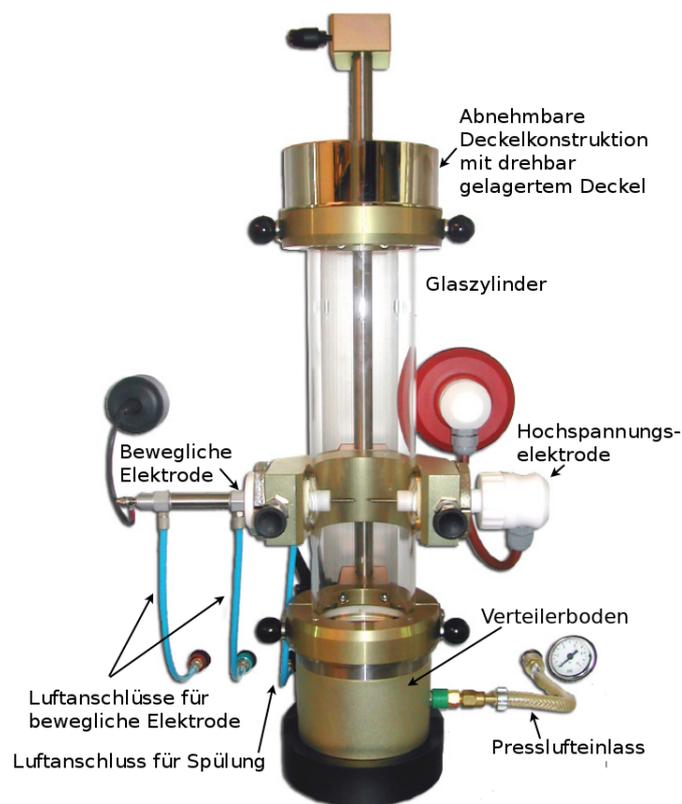


Abbildung 4.7: Bild der MIKE-3-Apparatur ohne Bedienelemente [19]

Rohr, welches aus einem 1,2 l fassenden Glaszylinder besteht, auf das eine abnehmbare Deckelkonstruktion aufgesetzt wird. Der Deckel ist schwenkbar und hat ein Loch in der Mitte, sodass Staub und Rauch entweichen können und es bei Druckentwicklung durch eine Entzündung nicht

zu einem Rückschlag kommt. Die Apparatur ist in einen verschließbaren Schrank mit Glasfront und Luftabzug eingebaut, an dessen Frontseite sich die Bedienungselemente befinden.

Nach Verteilung der Staubprobe am Boden des Glaszylinders wird Pressluft mit einem Druck von 7 bar in den Zerstäuberpils eingeleitet, wodurch es zur Dispersion des Staubes im Explosionsgefäß kommt. Der Funke springt zwischen den beiden Elektroden nach Verstreichen der Zündverzögerungszeit t_v über. Mittels Zündverzögerungszeit wird die Turbulenz des Staub-Luft-Gemisches geregelt. Sie hat einen starken Einfluss auf die Mindestzündenergie. Generell sind Gemische bei hoher Turbulenz, also geringer Zündverzögerungszeit, weniger zündwillig als bei geringer bis mittlerer Turbulenz, also höheren Zündverzögerungszeiten. Die optimale Zündverzögerungszeit ist für jeden Staub unterschiedlich und muss daher durch Variation im Versuch gefunden werden.

Bei geringen Zündenergien (1 mJ und 3 mJ) wird der Funke durch ein Hochspannungs-Relais getriggert, während die Triggerung bei Zündenergien von 10 mJ bis 1 J durch die bewegte Elektrode erfolgt. Bei der zweiten Variante wird die Masse-Elektrode pneumatisch schnell von der Ruhestellung, in der der Abstand zur Hochspannungselektrode etwa 25 mm beträgt, auf den eingestellten minimalen Elektrodenabstand von 6 mm bewegt. Noch bevor die Endposition erreicht ist, springt der Funke über. Es wird nun beobachtet, ob der Funke mit der zuvor definierten Zündenergie das Staub-Luft-Gemisch zur Entzündung bringt. Bei Entzündung ist deutlich eine sich vom Zündfunken aus ausbreitende Flammenfront zu erkennen. Da jedoch die Energie des Zündfunken aus der Anfangsladung im Kondensator berechnet wird, und beträchtliche Ladungsmengen durch Coronastrom, verschmutzte Isolatoren oder eventuell leitfähige Stäube abfließen, ist die tatsächliche Energie des Zündfunken geringer (siehe Fehlerdiskussion, Abschnitt 5.2.3).

Kommt es zur Entzündung, wird die Zündenergie, bei gleichbleibender Staubmenge und Zündverzögerungszeit, so lange abgesenkt, bis zehnmal hintereinander keine Zündung mehr auftritt. Daraufhin wird die Staubmenge variiert und bei jener Energie auf Entzündung untersucht, bei der es mit der Anfangsmenge gerade noch zur Entzündung gekommen ist. Am Ende ergibt sich ein Energiewert, bei dem es bei keiner Staubmenge zur Entzündung kommt (E1) und eine darüberliegende Energie, bei der es teilweise bei einer oder mehreren Konzentrationen zur Zündung kommt (E2).

Die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Mindestzündenergie ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Die gefüllten Quadrate repräsentieren die Entzündungen und die leeren Kreise stehen für zehn aufeinanderfolgende Nichtzündungen. Die Balken, die senkrecht aus den Quadraten ragen, sind Indikatoren für die Anzahl der, einer Entzündung vorangegangenen, Nichtzündungen. Wenn also kein Balken vorhanden ist, kam es bereits beim ersten Versuch zur Entzündung.

Ist die Mindestzündenergie bei einer Zündverzögerungszeit, z.B. 120 ms, bestimmt, wird derselbe Vorgang bei geringerer und höherer Zündverzögerungszeit, z.B. 60 ms und 180 ms wiederholt. Die Mindestzündenergie bezieht sich definitionsgemäß auf eine zeitlich gedehnte Kondensator-entladung, da diese im Allgemeinen zündwilliger ist als eine rein kapazitive Entladung. Da in der Praxis oft elektrostatische Entladungen vorkommen, bietet die MIKE-3-Apparatur die Möglichkeit, die Untersuchung der Mindestzündenergie auch ohne Induktivität durchzuführen. Die Versuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden allerdings ausschließlich mit einer Induktivität von 1 mH durchgeführt, da es sich hierbei um den zündwilligsten Funken handelt.

Bei Entzündung der Staubwolke wird dies manuell im Programm bestätigt und der Versuch wird nach der Reinigung bei geringerer Zündenergie wiederholt. Die weitere Vorgehensweise wurde

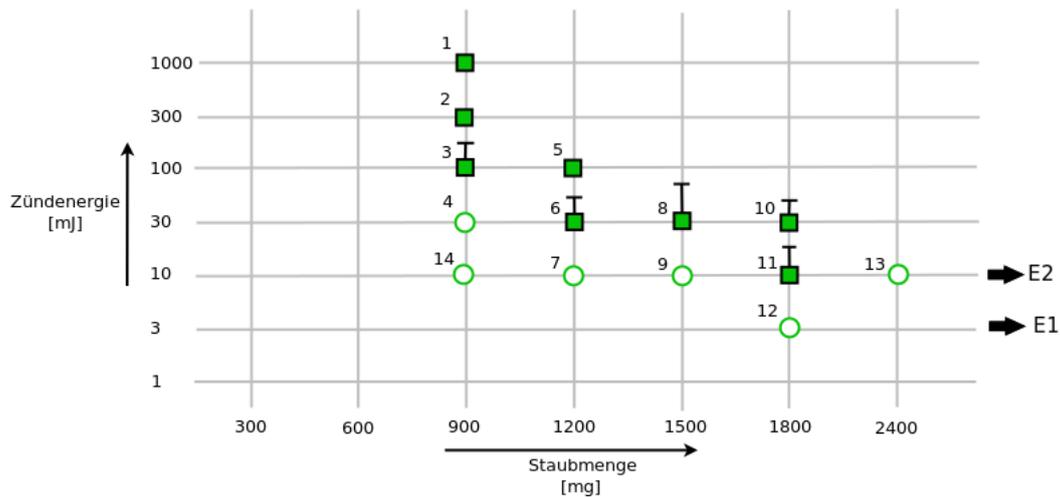


Abbildung 4.8: Vorgehensweise bei der Bestimmung der Mindestzündenergie

bereits mittels Abbildung 4.8 beschrieben. Kommt es nicht zur Entzündung, können mit derselben Staubbefüllung bis zu vier Entzündungsversuche durchgeführt werden, bevor die Apparatur gereinigt und mit neuem Staub beaufschlagt werden muss. Dieses Vorgehen ist möglich, da die Staubmenge bei der Bestimmung der Mindestzündenergie nur eine relative Größe ist und es daher weniger darum geht, die exakte Staubkonzentration einzuhalten, als vielmehr darum, das zündwilligste Gemisch mit der geringsten Mindestzündenergie zu finden.

Besonders bei einer geringeren Zündenergie von unter 10 mJ ist es wichtig, dass die Elektroden sauber sind und der Glaszylinder innen mit Wasser ausgespült wird, um den Funkenübergang durch elektrostatische Aufladung nicht zu behindern. Nach der Reinigung mit Wasser muss der Explosionsraum wieder gründlich getrocknet werden.

Die Mindestzündenergie liegt zwischen jener Energie, bei der es zu keiner einzigen Entzündung und jener Energie, bei der es gerade noch zur Entzündung gekommen ist (vgl. Abbildung 3.11). Da die Angabe eines Energiebereiches jedoch zu ungenau wäre, wird die statistische Zündenergie gemäß Gleichung 4.1 berechnet.

$$\log E_S = \log E_2 - \frac{I_{E_2} \cdot (\log E_2 - \log E_1)}{(NI + I)_{E_2}} \quad (4.1)$$

E_S	Statistische Zündenergie	[mJ]
E_2	Zündenergie, bei der es mindestens bei einer Staubbefüllung mindestens einmal zur Entzündung kommt	[mJ]
E_1	Zündenergie, bei der es innerhalb von 10 Versuchen zu keiner einzigen Entzündung kommt	[mJ]
I_{E_2}	Anzahl der Entzündungen bei der Energie E_2	[-]
NI_{E_2}	Anzahl der Nichtzündungen bei der Energie E_2	[-]

Die statistische Zündenergie liegt also umso näher bei E_2 , je weniger Entzündungen es bei E_2 gibt und näher bei E_1 , wenn es mehrere Entzündungen auf der Ebene E_2 gibt. Der in Abbildung 4.8

dargestellte Staub A wird in Tabelle 4.5 mit einem Staub B verglichen. Die Mindestzündenergien der beiden Stäube liegen im gleichen Bereich, nämlich zwischen 3 und 10 mJ. Sie unterscheiden sich jedoch durch die Anzahl an Entzündungen voneinander. Staub A hat aufgrund der geringeren Anzahl an Entzündungen eine höhere statistische Mindestzündenergie als Staub B.

Tabelle 4.5: Statistische Mindestzündenergie für zwei unterschiedlich reaktive Stäube im gleichen Energiebereich

	Staub A	Staub B
E_1/E_2	3/10	3/10
I_{E_2}	1	3
NI_{E_2}	4	2
E_S	8,2 mJ	5,5 mJ

5 Ergebnisdiskussion

Von den insgesamt 20 untersuchten, in Tabelle 5.1 aufgelisteten, Proben aus unterschiedlichen Betrieben der abfallbehandelnden Industrie, konnte bei 17 Proben die Explosionsheftigkeit bestimmt werden. Ausgewählte Proben wurden in Bezug auf UEG und MZE untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse präsentiert und anschließend bezüglich der Zusammenhänge und Einflussgrößen interpretiert.

Anhand der in Tabelle 5.1 aufgelisteten Medianwerte kann als allgemeiner Trend festgestellt werden, dass es sich durchwegs um eher grobkörnigen Staub handelt. Die Medianwerte beziehen sich nicht auf die angelieferten Staubproben, sondern auf den feinkörnigen Anteil, der abgeseibt wurde. Die in der Literatur vorgeschlagene obere Grenze von $63\ \mu\text{m}$ für den Medianwert von zu untersuchenden Stäuben wird bei allen Proben überschritten. Es ist daher damit zu rechnen, dass sich die hohen Korngrößen abschwächend auf die Explosionsheftigkeit auswirken.

Der in Tabelle 5.1 angegebene Feuchtegehalt bezieht sich auf den Anlieferungszustand. Vor der Untersuchung werden alle Proben getrocknet und gesiebt, sodass nur der trockene, feine Staubanteil kleiner $500\ \mu\text{m}$ untersucht wurde. Da sich der Feuchtegehalt erst ab etwa 10 % mindernd auf die Explosionsheftigkeit auswirkt, kann angenommen werden, dass die Proben im Anlieferungszustand in Bezug auf ihr Explosionsverhalten nicht stark von den untersuchten Proben abweichen.

5.1 Interpretation der Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse werden in Tabellen und Diagrammen präsentiert sowie in ihren Abhängigkeiten und Bedeutungen interpretiert. Durch den Abgleich mit Literaturwerten werden Aussagen über die relative Reaktionsfähigkeit der Stäube und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse geliefert.

5.1.1 Maximaler Explosionsdruck, K_{St} -Wert

Die untersuchten Stäube reagieren im Allgemeinen eher schwach, wie an den Ergebnissen für die maximalen Explosionsdrücke und die K_{St} -Werte abgelesen werden kann (Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3). Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, liegt der Mittelwert für den Explosionsdruck der explosionsfähigen Stäube bei 5,9 bar. Über die Hälfte der untersuchten Proben befindet sich in der Schwankungsbreite von 10 % um den Mittelwert. Bis auf eine Probe, die einen sehr geringen Explosionsdruck von 2,4 bar aufweist, weichen auch die restlichen explosionsfähigen Proben nicht mehr als 22 % vom Mittelwert ab.

Tabelle 5.1: Übersicht Proben

Nr.	Herkunftsort	Probenahmestelle (Art des Staubes)	Medianwert [μm]	Feuchte [%]
1	Thermoteam Retznei	Vorzerkleinerer (AB)	186,8	7,38
2	AVE Hörsching	Gelber Sack (ZS)	431,7	4,6
3	AVE Hörsching	Gelber Sack (FS)	200,6	8,6
4	AVE Wels	Mech. Sortierung (FS)	100,4	5,68
5°	AVE Hörsching	Gelber Sack (FS)	362,6	2,42
6°	Häusle Lustenau	EBS-Aufbereitung (AB)	198,9	3,6
7	Rohstofftechnik Henndorf	EBS-Aufbereitung (AB)	165,8	10,36
8	Thermoteam Retznei	Hauptfilter (FS)	284,7	4,24
9	Thermoteam Retznei	Schwerteilabscheider (FS)	182,4	3,93
10°	Thermoteam Retznei	Werkstättenabfälle, fein	459,6	12,52
11	Saubermacher Unterpremstätten	Glasreinigung (FS)	n.b.	0,02
12	Saubermacher Oberlaa	Vorzerkleinerer (AB)	146,5	0,61
13	Saubermacher Oberlaa	Absauganlage (FS)	125,5	3,34
14	Saubermacher Oberlaa	NE-Abscheider (AB)	196,4	2,41
15	AVE Linz	Aktenvernichtung (FS)	102,9	n.g.
16	CALREC Ing. Puff	EBS-Aufbereitung (FS)	97,0	1,7
17	AVE Redlham	Splitting-Anlage (FS)	176,9	3,09
18	AVE Redlham	EBS-Aufbereitung (FS)	267,2	1,75
19	Saubermacher Oberlaa	Schwergutabscheider (AB)	181,4	1,38
20	Saubermacher Oberlaa	Magnetabscheider (AB)	122,8	1,0

AB Ablagerung

ZS Zellradschleuse

FS Filterstaub

° Staubmenge für eine Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen zu gering

n.b. Medianwert nicht bestimmt

n.g. Probe wurde nicht getrocknet, da bereits vollständig trocken im Anlieferungszustand

Tabelle 5.2: Ergebnistabelle maximaler Explosionsdruck

Nr.	p_{\max} [bar]
1	6,6
2	5,6
3	6,6
4	5,9
7	2,4
8	6,3
9	7
11	0
12	5,5
13	5,7
14	5,1
15	5,9
16	7,2
17	6,1
18	6,6
19	5,6
20	5,6

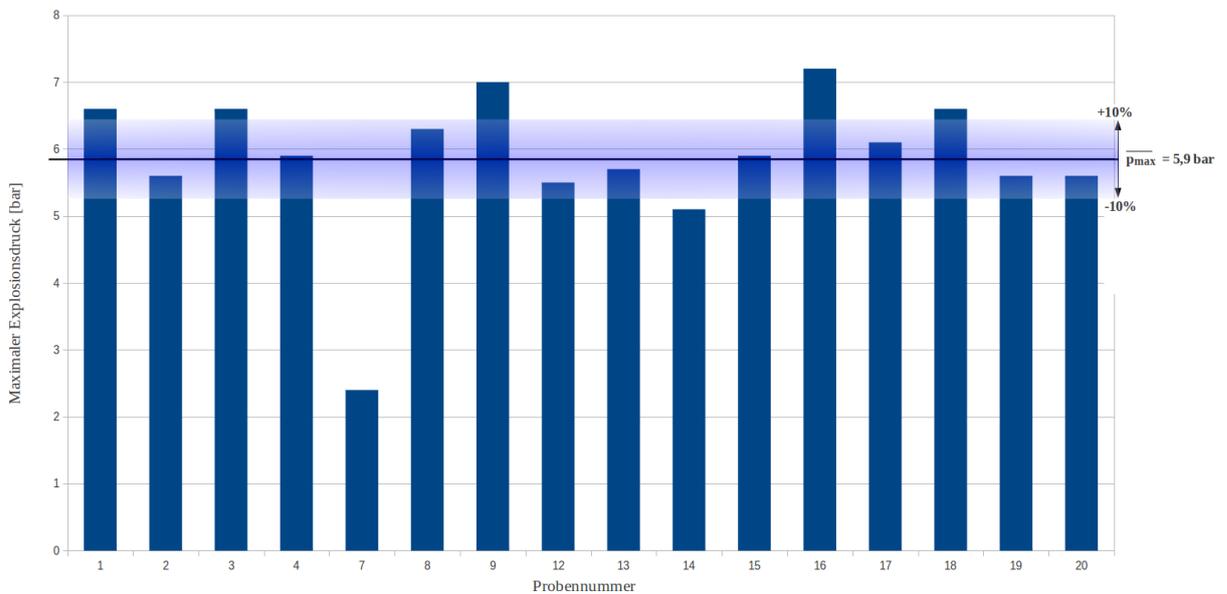


Abbildung 5.1: Graphische Darstellung der maximalen Explosionsdrücke mit Schwankungsbreite um den Mittelwert

Im Vergleich mit den Literaturwerten zeigt sich, dass Stäube, die bei der mechanischen Abfallbehandlung anfallen, weniger stark reagieren als Stäube aus Reinstoffen wie Holz, Kunststoff oder Textilien. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, da der Inertanteil der untersuchten Proben relativ hoch ist.

Die K_{St} -Werte sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst und zeigen eine größere Schwankung als die Explosionsdrücke (Abbildung 5.2). Alle untersuchten Stäube sind der Staubexplosionsklasse 1 zuzuordnen.

Tabelle 5.3: Ergebnistabelle K_{St} -Wert

Nr.	K_{St} [$\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$]
1	58
2	22
3	49
4	40
7	2
8	47
9	80
11	0
12	41
13	39
14	29
15	29
16	123
17	41
18	59
19	31
20	39

Die Hälfte der explosionsfähigen Proben liegt im Messgenauigkeitsbereich von 30 % um den Mittelwert von $45,6 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$. In den Ergebnissen zum volumsunabhängigen Druckenstieg spiegeln sich die Tendenzen der maximalen Explosionsdrücke in stärker ausgeprägter Form wider. Im Vergleich mit Literaturwerten liegen die bestimmten K_{St} -Werte teilweise stark unter den Werten für Reinstoffe.

Werden die beiden sicherheitstechnischen Kenngrößen gegen den Medianwert aufgetragen (Abbildung 5.3), ist nur beim K_{St} -Wert eine Abnahme mit steigendem Medianwert zu erkennen. Der maximale Explosionsdruck ist unabhängig von der durch den Medianwert repräsentierten Korngröße der Proben. In der Literatur findet sich der Trend, wonach der Explosionsdruck schwächer mit steigender Korngröße sinkt als der K_{St} -Wert.

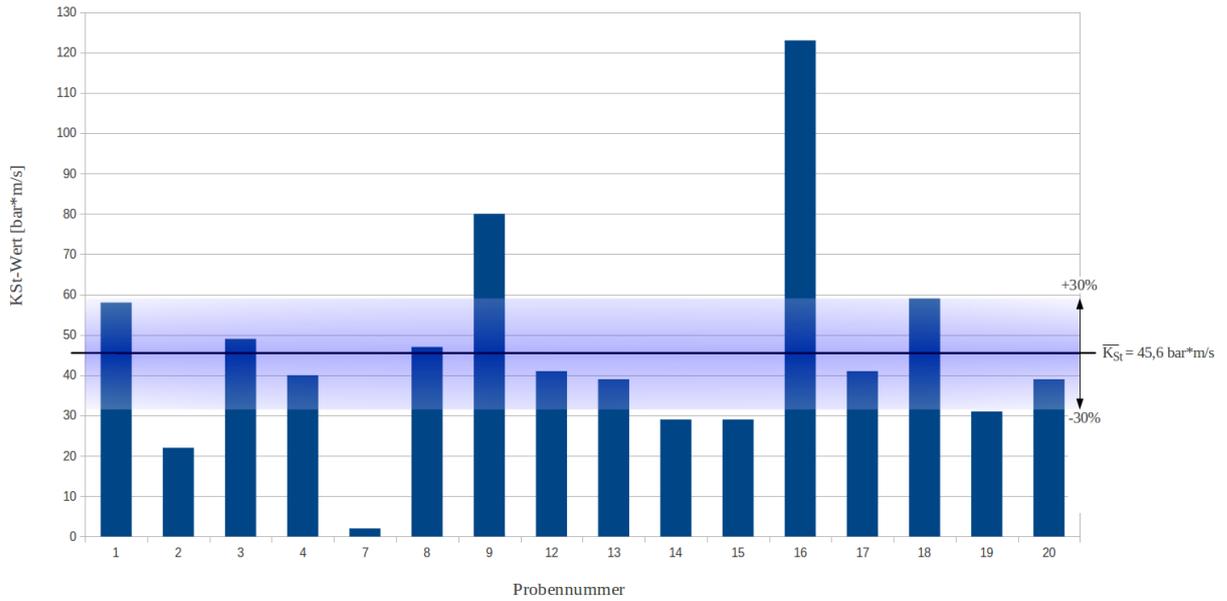


Abbildung 5.2: Grafische Darstellung des volumsunabhängigen maximalen Druckanstiegs mit Schwankungsbreite um den Mittelwert

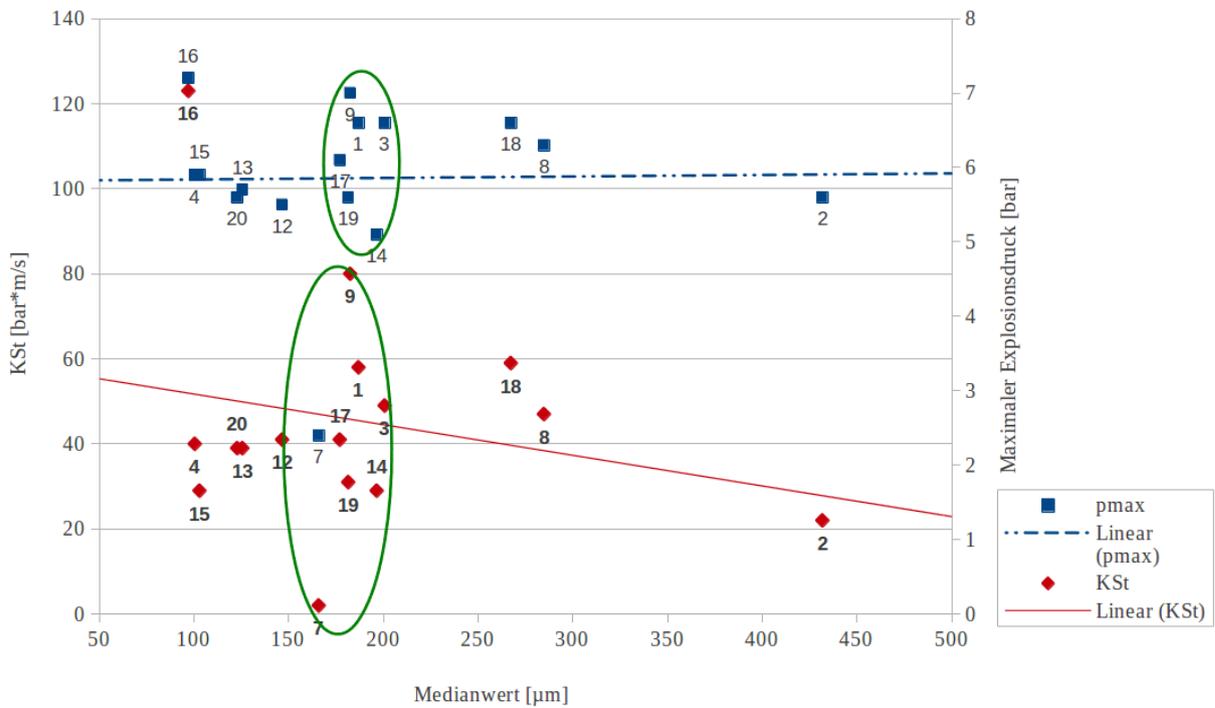


Abbildung 5.3: Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte über Medianwerte

Der Zusammenhang der Explosionsheftigkeit mit dem Medianwert ist nicht so eindeutig wie erwartet. Außerdem zeigen z.B. Stäube mit sehr ähnlichen Medianwerten eine große Bandbreite an Ergebnissen (Ellipsen in Abbildung 5.3).

Wie in Abbildung 5.4 skizziert, erlaubt der Medianwert keine genaue Aussage über die Korngrößenverteilung. Repräsentativ ist der Medianwert nur im Idealfall der engen Korngrößenverteilung

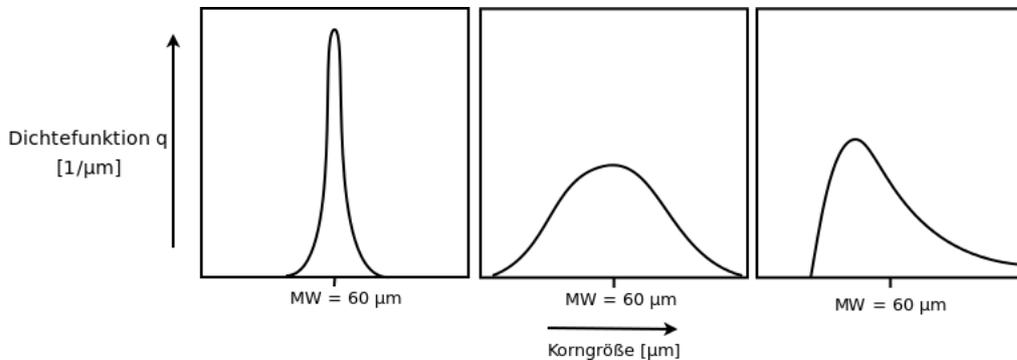


Abbildung 5.4: Unterschiedliche Korngrößenverteilungen mit gleichen Medianwerten

im Stil einer Gauß'schen Normalverteilung (links in Abbildung 5.4). Bei breiter Korngrößenverteilung mit großer Streuung um den Medianwert (Bild in der Mitte, Abb. 5.4) umfasst die Probe einen größeren Anteil an sehr feinem und sehr grobem Staub, welcher sich auf die Explosionsheftigkeit auswirkt. Bei den untersuchten Proben wurden meist der sog. Rosin-Rammler-Sperling-Bennet-Verteilung ähnliche Korngrößenverteilungen gefunden (Bild rechts in Abb. 5.4). Diese empirische Verteilungsfunktion zur Beschreibung von Zerkleinerungsprodukten und Stäuben ist, anders als die Gauß'sche Normalverteilung, nicht symmetrisch um den Medianwert, sondern fällt in Richtung großer Korngrößen flacher ab [30].

Die Verteilungsfunktionen der untersuchten Proben sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

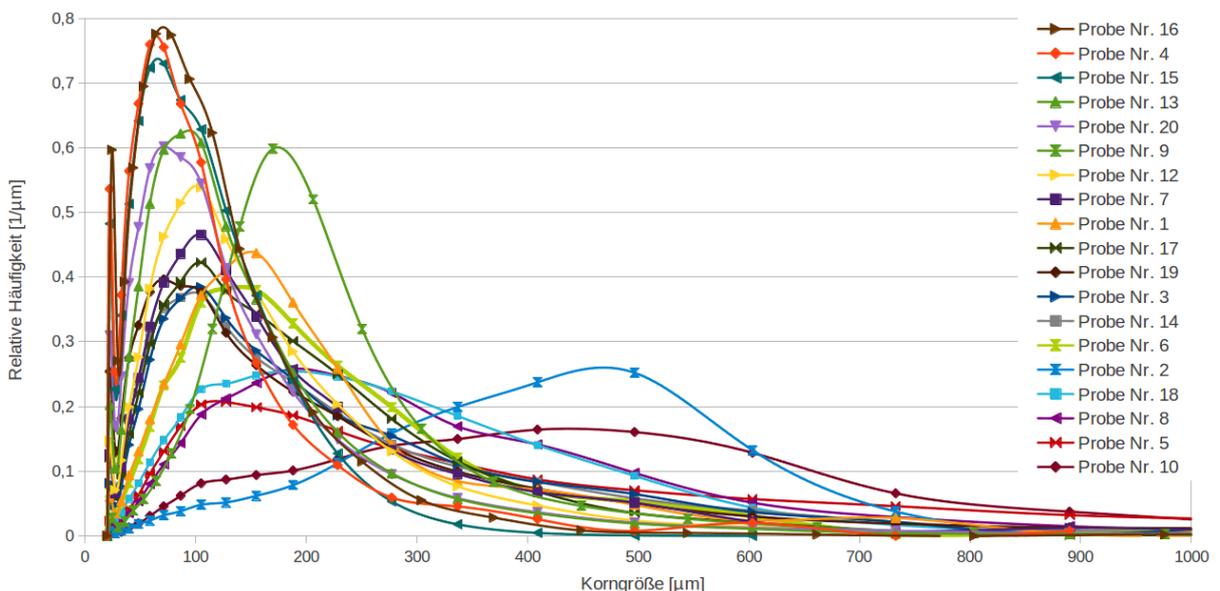


Abbildung 5.5: Korngrößenverteilungen

Auf den ersten Blick wird ersichtlich, dass die Verteilungsfunktionen großteils sehr ähnlich sind. Auf Seiten kleinerer Korngrößen wird ein steiler Anstieg der relativen Häufigkeit verzeichnet, bis hin zu der am häufigsten vorkommenden Korngröße. Der Medianwert ist bei allen Stäuben größer als dieser Maximalwert. In Richtung größerer Korngrößen fallen die Verteilungsfunktionen wesentlich flacher ab. Außerdem gilt generell, dass die Korngrößenverteilung umso breiter ist, je größer der Medianwert ist. Aus diesen Beobachtungen lässt sich also schlussfolgern, dass die häufigste Korngröße kleiner als der Medianwert ist und dass sich auch bei Stäuben mit relativ geringen Medianwerten von etwa 100 μm nicht zu vernachlässigende Anteile an großen Staubpartikeln mit Korngrößen bis über 500 μm finden lassen. Dieser Anteil großer Partikel hat einen gewissen inertisierenden Effekt auf die Stäube. Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, ob durch die Korngrößenverteilungen erklärt werden kann, warum Stäube mit ähnlichen Medianwerten sehr unterschiedliche Explosionsheftigkeiten aufweisen.

Die Proben 4, 15 und 16 haben beinahe gleiche Medianwerte und Korngrößenverteilungen (Abbildung 5.6). Während die Probe Nr. 16 mit 7,2 bar den höchsten Explosionsdruck aller untersuchten Proben hat, haben die Proben 4 und 15 beide einen Explosionsdruck von 5,9 bar (Tabelle 5.4).

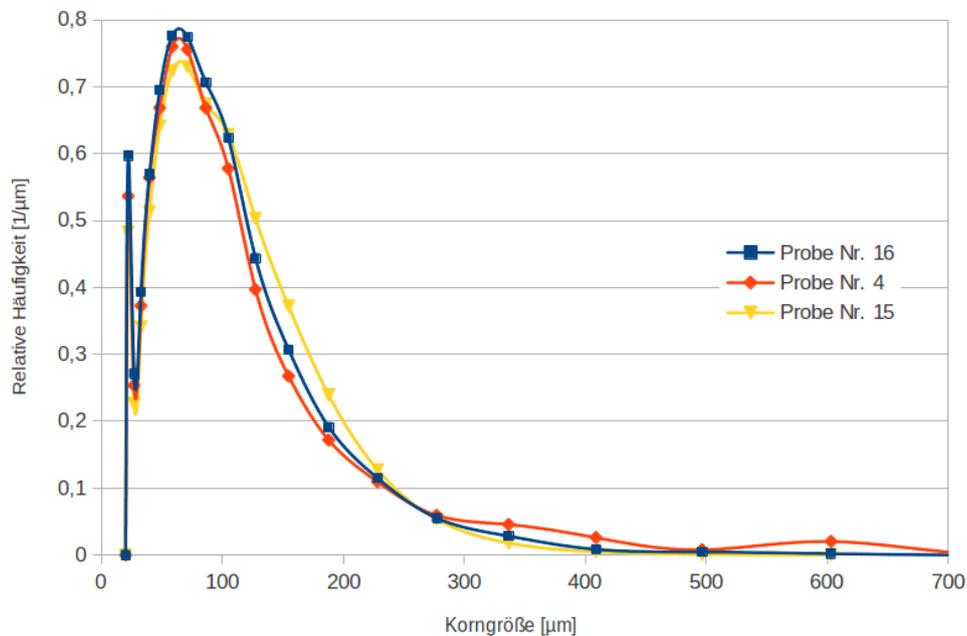


Abbildung 5.6: Korngrößenverteilungen der Proben Nr. 4, 15 und 16

Tabelle 5.4: Tabelle mit Einflussgrößen und Ergebnissen der Proben 4, 15, 16

Nr.	p_{max} [bar]	K_{St} [$\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$]	Medianwert [μm]	Inertanteil [%]
4	5,9	40	100,4	62
15	5,9	29	102,9	42,1
16	7,2	123	97	40,1

Eine Erklärung für die schwächere Reaktion von Staub Nr. 4 könnte der hohe Inertanteil von über 60 % darstellen. Dass jedoch auch Stäube mit nahezu identen Korngrößenverteilungen und In-

Tabelle 5.5: Tabelle mit Einflussgrößen und Ergebnissen der Proben 1, 3, 9, 14, 17, 19

Nr.	p_{\max} [bar]	K_{St} [$\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$]	Medianwert [μm]	Inertanteil [%]
1	6,6	58	186,8	45
3	6,6	49	200,6	44
9	7	80	182,4	21,3
14	5,1	29	196,4	56,7
17	6,1	41	176,9	41,2
19	5,6	31	181,4	62

ertgehalten bei sonst gleichen Untersuchungsbedingungen sehr unterschiedlich reagieren können, zeigt sich am Beispiel der Stäube 15 und 16. Werden die Stäube jedoch in ihrer Herkunft verglichen, findet sich ein Hinweis auf die unterschiedliche Reaktionsfähigkeit. Während die Probe mit der Nummer 15 aus der Aktenvernichtung stammt und sich somit hauptsächlich aus papierähnlichem Staub zusammensetzt, kommt der Staub Nr. 16 aus der Ersatzbrennstoffaufbereitung, in der hauptsächlich hochkalorische Kunststoffe verarbeitet werden. Wie bereits in der Recherche der Literaturdaten festgestellt wurde, reagieren Kunststoffe im Schnitt stärker als Stäube aus Papier und Karton.

In Abbildung 5.7 sind sechs Stäube zu sehen, deren Medianwerte eng beieinander liegen, während die Explosionsdrücke und K_{St} -Werte relativ stark streuen (Tabelle 5.5).

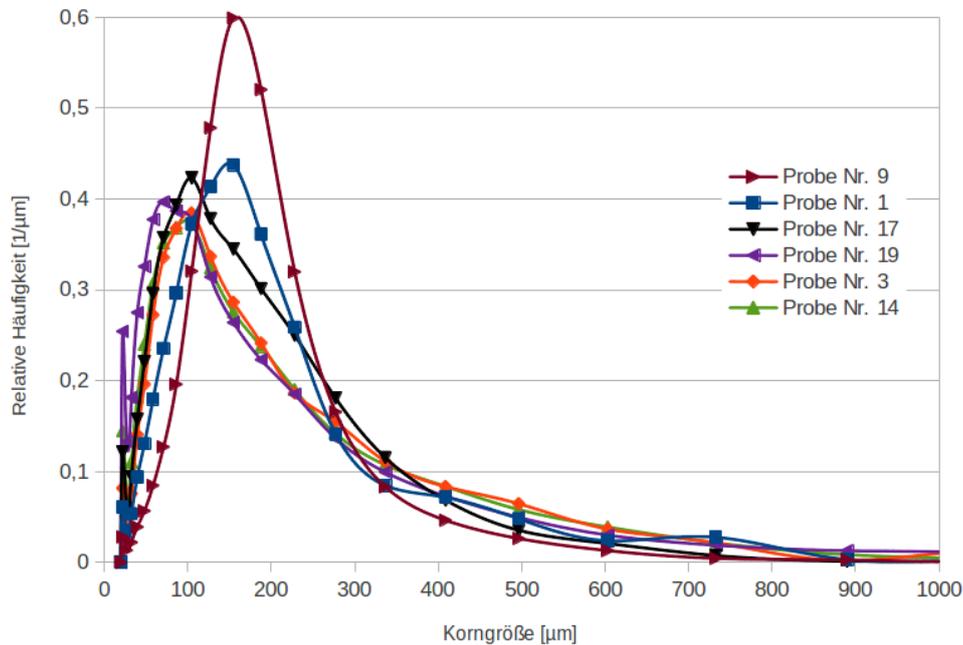


Abbildung 5.7: Korngrößenverteilungen der Proben Nr. 1, 3, 9, 14, 17 und 19

Die am heftigsten reagierende Probe 9 hebt sich durch eine engere Korngrößenverteilung von den anderen Stäuben ab. Da jedoch ebenfalls der Inertgehalt dieses Staubes außergewöhnlich gering ist, kann der Effekt der erhöhten Reaktionsfähigkeit nicht eindeutig zugeordnet werden.

Ebenfalls keinen Hinweis auf den Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Explosionsfähigkeit wird durch den Vergleich der beiden Stäube 3 und 14, die beinahe deckungsgleiche Verteilungsfunktionen haben, gefunden (Abbildung 5.7). Die unterschiedlichen maximalen Explosionsdrücke dürften daher auf andere Einflussfaktoren wie Inertgehalt oder Zusammensetzung zurückzuführen sein. Die Tatsache, dass die drei Stäube 1, 3 und 17, neben sehr ähnlichen Korngrößenverteilungen, ebenfalls sehr ähnliche Gehalte an inertem Material haben, spricht dafür, dass der Inertanteil für die Explosionsheftigkeit eine wichtigere Einflussgröße als die Korngrößenverteilung ist. Dass jedoch auch dieser Zusammenhang nicht immer eindeutig ist, zeigt die Probe 19, die trotz eines höheren Inertgehaltes einen größeren Explosionsdruck aufweist als Probe 14. Der Unterschied der Aschegehalte von 5,3 % dürfte jedoch zu klein sein, um einen eindeutigen Einfluss auf das Ergebnis zu haben. Hinzu kommt, dass die K_{St} -Werte nahezu identisch und auch die maximalen Explosionsdrücke nur 4,6 % um den Mittelwert schwanken. Es kann also keine Aussage darüber getroffen werden, ob die unterschiedlichen Explosionsdrücke aufgrund von Messungenauigkeiten zustande kamen oder ob ihnen tatsächlich unterschiedliche Explosionsverhalten zugrunde liegen.

Der Anstieg der Explosionsheftigkeit mit dem Inertgehalt wird durch diese Ergebnisse tendenziell bestätigt, unterliegt jedoch Schwankungen, sodass die Vorhersage der Explosionsheftigkeit ausgehend vom Inertgehalt nur qualitativ erfolgen kann. Eine Staubprobe mit einem um 20 % geringeren Inertanteil wird merklich stärker reagieren, während bei einem Unterschied von 5 % im Inertgehalt keine Beeinflussung der Explosionsheftigkeit zu erwarten ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Korngrößenverteilungen bei gleichen Medianwerten starke Ähnlichkeiten aufweisen, wodurch der Medianwert als Vergleichswert in Bezug auf die Korngröße gut geeignet ist.

Gleichzeitig legt aber der Vergleich der Probe Nr. 9 mit Nr. 13 bzw. 20, die unterschiedliche Medianwerte haben, dabei aber ähnlich breite Verteilungsfunktionen zeigen, wie in Abbildung 5.8 zu sehen, nahe, dass der Einfluss des Medianwertes für die untersuchten Stäube aus mechanischen Aufbereitungsanlagen überschätzt wird.

Tabelle 5.6: Tabelle mit Einflussgrößen und Ergebnissen der Proben 9, 13 und 20

Nr.	p_{max} [bar]	K_{St} [$\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$]	Medianwert [μm]	Inertanteil [%]
9	7	80	182,4	21,3
13	5,7	39	125,5	54,2
20	5,6	39	122,8	62,2

Staub Nr. 9 hat einen um etwa 60 μm größeren Medianwert und reagiert, mutmaßlich aufgrund des geringeren Inertanteils, trotzdem deutlich stärker (Tabelle 5.6). Eine gute Übereinstimmung trotz unterschiedlicher Inertgehalte zeigen die Proben 13 und 20.

In Abbildung 5.9 ist der Zusammenhang zwischen p_{max} bzw. K_{St} und Inertgehalt dargestellt. Die Inertgehalte des Großteils der untersuchten Stäube bewegen sich zwischen 30 und 66 % und sind damit durchwegs hoch. Nur zwei Proben hatten geringere Inertanteile von 17 und 21 % und damit verbunden auch hohe Explosionsdrücke sowie K_{St} -Werte.

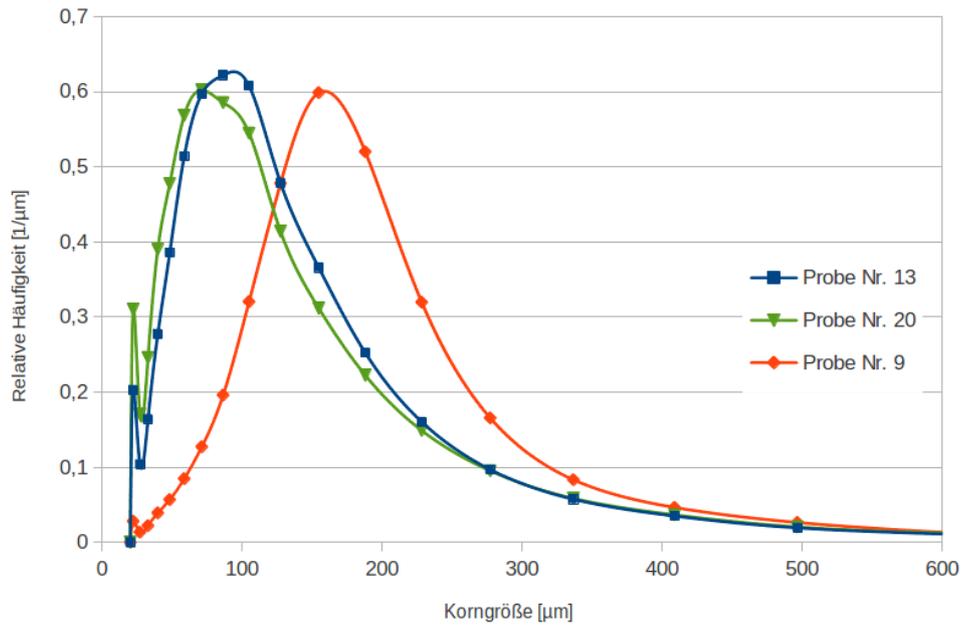


Abbildung 5.8: Korngrößenverteilungen der Proben Nr. 9, 13 und 20

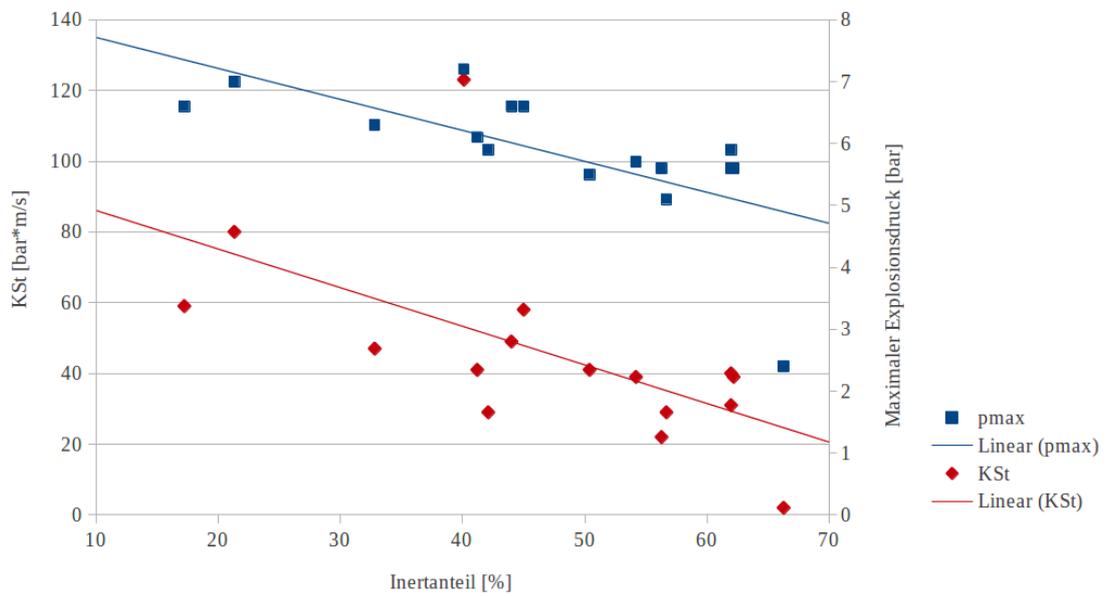


Abbildung 5.9: Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte über Inertanteil

Der Inertanteil besteht aus anorganischem Material, wie Gesteinsabrieb, welches nicht entzündet wird und daher nicht an der Explosionsreaktion teilnehmen kann. Es ist also gut nachzuvollziehen, dass die Explosion eines Staubes direkt von dem Anteil an nicht reaktivem Material abhängt. Interessant ist der sehr regelmäßige Abfall der Explosionsheftigkeit mit dem Inertanteil. Dieser Zusammenhang könnte, bei Bestätigung durch weitere Versuche, verwendet werden, um die Explosionsfähigkeit abzuschätzen.

Auch der Vergleich mit den Literaturwerten zeigt, dass sich die Werte der Reinstoffe gut in die Versuchsergebnisse einfügen (Abbildung 5.10). Die Literaturwerte für p_{\max} streuen von 7,6

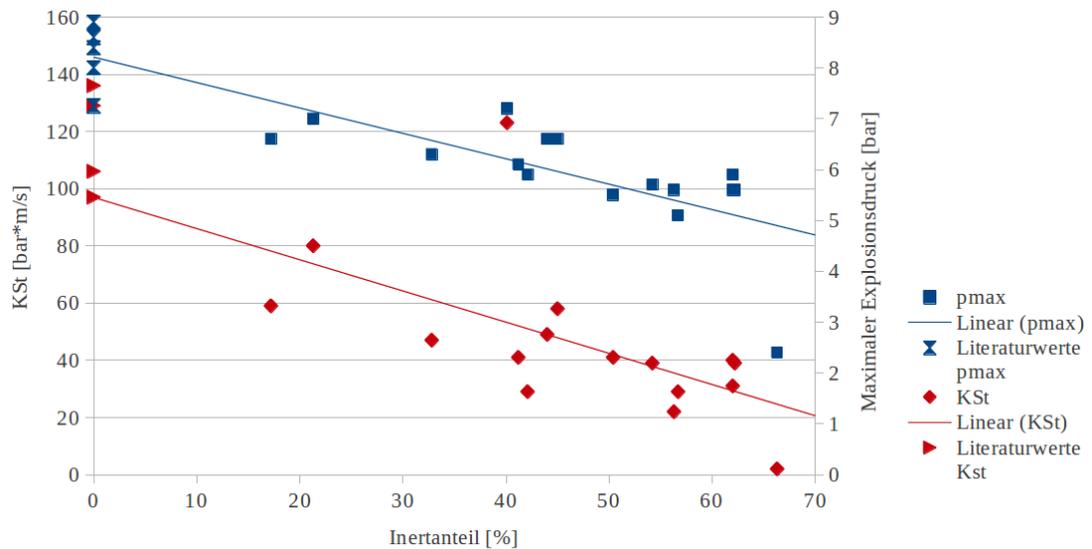


Abbildung 5.10: Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte über den Inertanteil im Vergleich mit den Literaturwerten von Reinstoffen

bis 8,9 bar. Die zu einem Inertgehalt von 0 % verlängerte Ausgleichsgerade der Versuchsergebnisse hat bei etwa 8,1 bar ihren Schnittpunkt mit der Ordinate. Die erlaubte Abweichung von 10 % aufgrund von Messungenauigkeiten wird also von den Literaturwerten nicht überschritten. Werden die Literaturwerte für Textilien aufgrund der unsicheren Datenlage aus der Auswertung genommen, beträgt die Schwankungsbreite für die K_{St} -Werte der restlichen Stoffgruppen 97 bis 136 $\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$. Durch die Verlängerung der linearen Ausgleichsgerade der Versuchsergebnisse ergibt sich für einen Inertanteil von 0 % ein K_{St} -Wert von 100 $\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$. Die Literaturdaten liegen also größtenteils über den extrapolierten Versuchsergebnissen.

Um zu untersuchen, ob sich Proben gleicher Herkunft ähnlich verhalten, wurden die Stäube abhängig vom Probenahmeort in Gruppen eingeteilt (Tabellen 5.7, 5.8, 5.9). Neben den Einflussgrößen Medianwert, Feuchtegehalt und Inertanteil wird auch die Breite der Dichtefunktion, $\frac{x_{90}}{x_{10}}$, in die Ergebnisinterpretation einbezogen. Analog zum Medianwert x_{50} stellen x_{90} und x_{10} die Korngrößen dar, die von 90 bzw. 10 Massenprozent des Staubes unterschritten werden. Je weiter sie auseinander liegen, also je größer ihr Quotient ist, umso breiter ist die Verteilung. Ab einem Quotient von vier gilt eine Korngrößenverteilung als breit, ab zehn als sehr breit.

Die bei der AVE in Hörsching genommenen Staubproben bestehen aus zwei Filterstäuben und einem Staub aus der Zellradschleuse, die im Zuge der Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffverpackungsmaterial angefallen sind (Tabelle 5.7). Der Staub aus der Zellradschleuse reagiert deutlich weniger heftig als jener aus der Filterabsaugung. Da der Medianwert des Filterstaubes

Tabelle 5.7: Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte sowie Einflussgrößen von Stäuben der AVE Hörsching

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	p_{max} [bar]	K_{St} [$\frac{bar \cdot m}{s}$]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
2	AVE Hörsching/Gelber Sack (ZS)	5,6	22	431,7	4,6	56,3	2,9
3	AVE Hörsching/Gelber Sack (FS)	6,6	49	200,6	8,6	44,0	8,2
5	AVE Hörsching/Gelber Sack (FS)	-	-	362,6	2,42	38,5	11,5

um 230 μm geringer und auch der Inertgehalt um 12 % kleiner ist, ist dieses Verhalten zu erwarten. Der zweite Filterstaub mit der Nr. 5 konnte nicht auf seine Explosionsheftigkeit untersucht werden, da die angelieferte Menge für eine Untersuchung nicht ausreichte. Es ist jedoch anzumerken, dass der Medianwert, bei sehr breiter Korngrößenverteilung, um mehr als 80 % größer und der Feuchtegehalt um 6 % geringer als bei Probe Nr. 3 von derselben Probenahmestelle ist, was darauf hindeutet, dass die Stäube in ihrer Beschaffenheit und Zusammensetzung zeitlichen Schwankungen unterliegen. Für betroffene Betriebe bedeutet das, dass die Stäube auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten beprobt werden sollten, um Veränderungen im Explosionsverhalten zu untersuchen. Im Vergleich mit den Literaturwerten für Kunststoffe, deren Mittelwert bei 8,6 bar für den maximalen Explosionsdruck und bei 136 $\frac{m \cdot bar}{s}$ für den K_{St} -Wert liegen, lässt sich erkennen, dass die Explosionsreaktion bei den Stäuben der AVE Hörsching sehr viel weniger heftig abläuft. Dies ist mutmaßlich auf die hohen Medianwerte und Inertanteile zurückzuführen.

In der Anlage des Thermoteam in Retznei wird die heizwertreiche Fraktion von Produktionsabfällen, stofflich nicht verwertbaren Verpackungsmaterialien und Gewerbe- und Siedlungsabfällen so aufbereitet, dass sie dem Zementwerk als Ersatzbrennstoff zugeführt werden kann. Bei den Proben der Nummern 8 und 9 handelt es sich um Filterstäube, einmal aus dem Hauptfilter und einmal aus der Absaugung über dem Schwerteilabscheider (Tabelle 5.8). Der Staub Nr. 1 stammt von Ablagerungen am Vorzerkleinerer. Die Probe 10 besteht aus feinen Werkstättenabfällen, wel-

Tabelle 5.8: Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte sowie Einflussgrößen von Stäuben des Thermoteam Retznei

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	p_{max} [bar]	K_{St} [$\frac{bar \cdot m}{s}$]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
1	TT Retznei/Vorzerkleinerer (AB)	6,6	58	186,8	7,38	45,0	6
8	TT Retznei/Hauptfilter (FS)	6,3	47	284,7	4,24	32,8	5,4
9	TT Retznei/Schwergutabscheider (FS)	7	80	182,4	3,93	21,3	3,5
10	TT Retznei/ Werkstättenabfälle, fein	-	-	459,6	12,5	55,6	4,8

che einen Teil des Inputmaterials der Anlage darstellen. Selbst nach Absiebung des Feinanteils wird ein sehr hoher Medianwert von 460 μm gemessen. Der Anteil an Korngrößen kleiner 500 μm am gesamten Probenmaterial ist außerdem mit 8,6 % sehr gering. Die Untersuchungen konnten aufgrund der geringen Probenmengen nicht durchgeführt werden. Aufgrund des hohen Median-

werts des Feinanteils sowie des geringen Anteils an Feinmaterial im gesamten Material ist die Bildung explosionsfähiger Atmosphäre in der Praxis unwahrscheinlich.

Auffällig sind die geringen Inertanteile von knapp einem Drittel für den Hauptfilterstaub und einem Fünftel für Filterstaub aus dem Bereich des Schwerteilabscheiders. Dies bedingt relativ hohe Explosionskenngrößen trotz der hohen Medianwerte. Im Vergleich dazu, bestehen die Ablagerungen im Bereich des Vorzerkleinerers beinahe zur Hälfte aus inertem Material. Trotzdem fügt sich auch diese Probe im Bezug auf die Explosionsheftigkeit gut in die Gruppe ein. Dies bestätigt die Annahme, dass die chemische Zusammensetzung eine wichtige Einflussgröße darstellt.

In der Splittinganlage der Firma Saubermacher in Wien Oberlaa wird Gewerbemüll nach Heizwert und Qualität getrennt und aufbereitet, damit er in weiterer Folge einer entsprechenden Verwertung zugeführt werden kann. Die Stäube setzen sich aus Ablagerungen unterschiedlicher Aufbereitungsaggregate und zwei Filterstäuben zusammen (Tabelle 5.9). Die maximalen Explo-

Tabelle 5.9: Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte sowie Einflussgrößen von Stäuben von Saubermacher, Wien Oberlaa

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	p_{max} [bar]	K_{St} [$\frac{bar \cdot m}{s}$]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
12	SM Oberlaa/Vorzerkleinerer (AB)	5,5	41	146,5	0,61	50,4	5,8
13	SM Oberlaa/Absauganlage (FS)	5,7	39	125,5	3,34	54,2	5,6
14	SM Oberlaa/NE-Abscheider (AB)	5,1	29	196,4	2,41	56,7	9,0
19	SM Oberlaa/Schwergutabscheider (AB)	5,6	31	181,4	1,38	62,0	10,4
20	SM Oberlaa/Magnetabscheider (FS)	5,6	39	122,8	1,0	62,2	7,3

sionsdrücke sowie die K_{St} -Werte liegen in dieser Gruppe nahe beieinander. Es gibt keinen großen Unterschied zwischen den Stäuben aus den Ablagerungen und den Filterstäuben. Der Medianwert der Filterstäube ist mit 125,5 und 123 μm eher gering. Die Inertanteile der Proben liegen zwischen 50 und 62 % und scheinen aufgrund der geringen Unterschiede in der Explosionsheftigkeit keine eindeutigen Auswirkungen zu haben. So unterscheidet sich die Probe Nr. 12 mit dem geringsten Gehalt an inertem Material in ihrer Explosionsheftigkeit nicht wesentlich von der Probe Nr. 20 mit dem höchsten Inertanteil.

Bei den Proben 7, 9, 11 und 16 werden starke Abweichungen der maximalen Explosionsdrücke vom Mittelwert festgestellt, während bei den Proben 2, 7, 9, 11 und 16 der Unterschied zum Mittelwert der K_{St} -Werte sehr groß ist (Abbildungen 5.1 und 5.2). Bis auf die Probe 2, die nur in Bezug auf den zeitlichen Druckanstieg Besonderheiten aufweist, liegen sonst beide STK außerhalb des Messungenauigkeitsbereiches um den jeweiligen Mittelwert. Um eine Erklärung für die Diskrepanzen zu finden, werden die betreffenden Stäube in Tabelle 5.10 zusammengefasst und auf besondere Merkmale untersucht.

Die Probe mit der Nummer 11 stammt aus der Aufbereitung von Bildschirmglas. Die Untersuchung wurde durchgeführt, da ausgeschlossen werden sollte, dass am Glas anhaftende Substanzen, wie z.B. Lacke, zur Entstehung einer explosionsfähigen Atmosphäre führen. In den Versuchen wurde bestätigt, dass es sich hierbei um nicht explosionsfähigen Staub handelt, weshalb die Probe aus den Ergebnisdarstellungen ausgeschlossen wurde.

Tabelle 5.10: Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte sowie Einflussgrößen von Stäuben mit stark vom Mittelwert abweichenden STK

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	p_{max} [bar]	K_{St} [$\frac{bar \cdot m}{s}$]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
2	AVE Hörsching/Gelber Sack (ZS)	5,6	22	431,7	4,6	56,3	2,9
7	RST Henndorf/EBS-Aufbereitung (AB)	2,4	2	165,8	10,36	66,3	7,2
9	TT Retznei/Schwerteilabscheider (FS)	7	80	182,4	3,93	21,3	3,5
11	SM Unterpremstätten/Glasreinigung (FS)	0	0	n.b.	0,02	-	-
16	CALREC/EBS-Aufbereitung (FS)	7,2	123	97	1,7	40,1	5,2

Der ungewöhnlich geringe K_{St} -Wert der Probe 2 hat seine Ursache möglicherweise in der durch die grobkörnige Struktur bedingten geringen spezifischen Oberfläche. Wie bereits im Grundlagenteil zu den sicherheitstechnischen Kenngrößen erläutert, besteht eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen K_{St} -Wert und spezifischer Oberfläche. Dieser Ansatz bietet auch eine Erklärung dafür, dass sich der maximale Explosionsdruck trotzdem im Mittelwertbereich befindet, da p_{max} laut Literatur einen flacheren Abfall mit dem Medianwert zeigt.

Die Probe 7 stammt aus Ablagerungen einer Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlage der Reststofftechnik Henndorf und fällt, neben der sehr geringen Explosionsheftigkeit vor allem aufgrund des hohen Aschegehalts von zwei Dritteln der Gesamtmasse und des großen Wasseranteils von 10 % der Probe im Anlieferungszustand auf. Eine Beeinflussung der STK durch den Feuchtegehalt ist nicht möglich, da die Probe im lufttrockenen Zustand untersucht wurde. Der Wassergehalt ist dennoch relevant, da ab einem Grenzwert von etwa 10 % mit einer signifikanten Abschwächung des Explosionsvorhaltens vor Ort gerechnet werden kann. Die Probe wurde an einer Stelle zu Beginn der Aufbereitungslinie genommen, an der eine Abtrennung des hochkalorischen Anteils noch nicht stattgefunden hat. Die Ablagerungen in diesem Bereich haben also noch einen hohen Inertgehalt. Insgesamt ist das Gefährdungspotential, das von dieser Probe ausgeht, gering.

Den beiden Filterstäuben 9 und 16 ist der hohe maximale Explosionsdruck gemein. Die K_{St} -Werte unterscheiden sich stärker und unterstreichen die heftigere Reaktion der Probe Nr. 16. Auffallend sind die, im Vergleich zu den übrigen Proben, eher geringen Inertanteile beider Stäube. Jedoch hat der Staub aus der EBS-Aufbereitungsanlage in Retznei einen um beinahe 20 % geringeren Inertanteil und reagiert trotzdem schwächer als der Filterstaub der Aufbereitungsanlage der Firma CALREC. Insofern stellt die Probe 16 tatsächlich eine Besonderheit dar, als sich ihre heftige Explosionsreaktion nicht mit den bekannten Einflussgrößen erklären lässt. In diesem Fall ist es notwendig, die Zusammensetzung in weiteren Arbeiten zu bestimmen.

Allgemein kann also gesagt werden, dass die Explosionsheftigkeit stark vom Inertanteil abhängt, während der Einfluss der Korngrößenverteilung im untersuchten Korngrößenbereich nicht nachgewiesen werden konnte. Die Stäube aus denselben Betrieben zeigen oft ein ähnliches Explosionsverhalten, auch wenn sie sich in Medianwert und Inertanteil unterscheiden. Bis auf wenige Ausreißer bewegen sich die Ergebnisse in einem Bereich zwischen etwa 5 und 7 bar für den maximalen Explosionsdruck und etwa 30 und 80 $\frac{bar \cdot m}{s}$ für den K_{St} -Wert. Dies lässt darauf schließen, dass die Stäube aus der abfallaufbereitenden Industrie im Regelfall explosionsfähig sind, dabei aber eindeutig der Staubexplosionsklasse 1 zuzuordnen sind.

5.1.2 Untere Explosionsgrenze

Die bestimmten unteren Explosionsgrenzen sind Näherungswerte, da sie zwar wie vorgeschrieben ermittelt wurden, die Versuche jedoch bereits nach nur einer, anstatt dreier, Nichtzündungen abgeschlossen wurden. Diese Vorgehensweise ist für eine Abschätzung der UEG zulässig.

Da es sich bei den untersuchten Proben durchgehend um eher schwach reagierende Stäube handelt, kam es bei 7 aus insgesamt 13 untersuchten Stäuben bis zu einer Konzentration von 1750 bzw. $2000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ zu keiner Entzündung durch die 2 kJ Zünder (siehe Abbildung 5.11). Die Un-

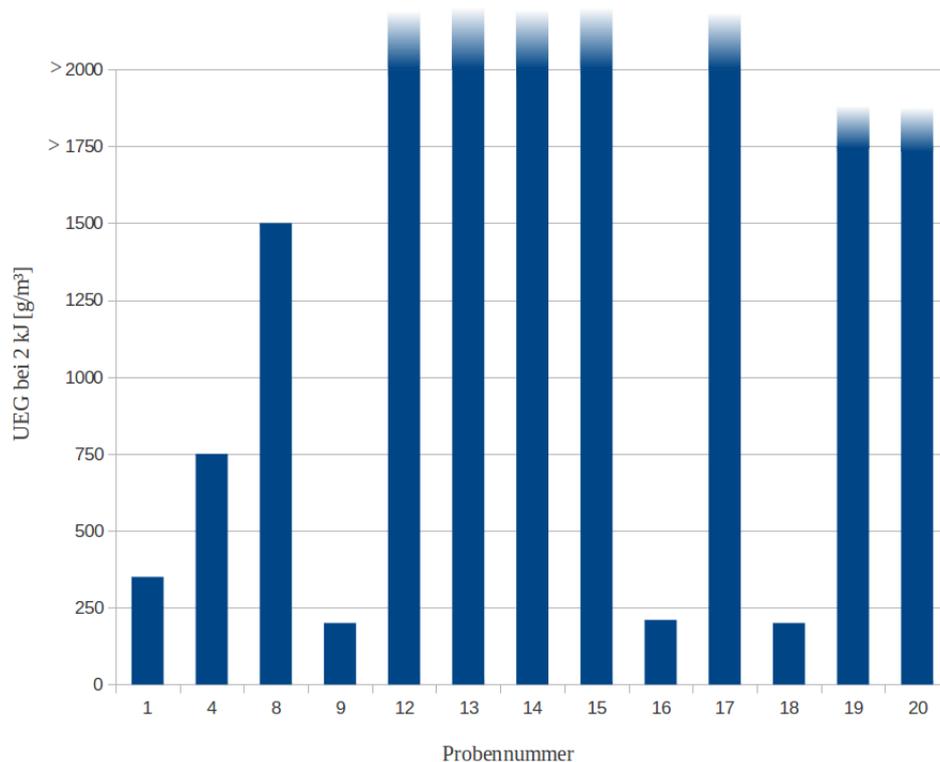


Abbildung 5.11: Versuchsergebnisse untere Explosionsgrenzen

tersuchung von höheren Konzentrationen ist mit der 20-l-Apparatur bei diesen Stäuben nicht möglich, da solch große Staubmengen zu Verstopfungen führen. Hinzu kommt, dass von den meisten Proben nicht genug Material vorhanden war.

Aus diesen Gründen wurden die UEG-Bestimmungen bei insgesamt fünf Stäuben mit stärkeren chemischen Zündern (10 kJ) wiederholt (Tabelle 5.11). Es wurden die UEG von 3 Stäuben, bei denen sich mit 2 kJ-Zündern keine Entzündung feststellen ließ, bestimmt. Zum Vergleich wurden auch 2 Proben, die bei 2 kJ zündeten, mit 10 kJ-Zündern untersucht.

Aufgrund der geringen Probenzahl und der starken Streuung der Ergebnisse, lassen sich keine zuverlässigen, allgemein gültigen Aussagen in Bezug auf den Einfluss der Zündenergie auf die UEG-Bestimmung treffen. Allein ein Trend zur Verringerung der UEG bei Steigerung der Zündenergie von 2 kJ auf 10 kJ lässt sich erkennen (Abbildung 5.12). Die rote Gerade mit der hohen Steigung in Abbildung 5.12 repräsentiert den theoretischen Verlauf, der sich bei von der Zündenergie unabhängigen UEG ergeben würde. Stäube, die bei 2 kJ bis zu $2000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ nicht zur

Tabelle 5.11: Ergebnisse der unteren Explosionsgrenze bei 2 kJ-Zündern und bei 10 kJ-Zündern

Nr.	UEG _{2kJ} [$\frac{g}{m^3}$]	UEG _{10kJ} [$\frac{g}{m^3}$]
1	350	-
4	750	-
8	1500	-
9	200	-
12	> 2000	300
13	> 2000	-
14	> 2000	-
15	> 2000	300
16	210	70
17	> 2000	200
18	200	140
19	> 1750	-
20	> 1750	-

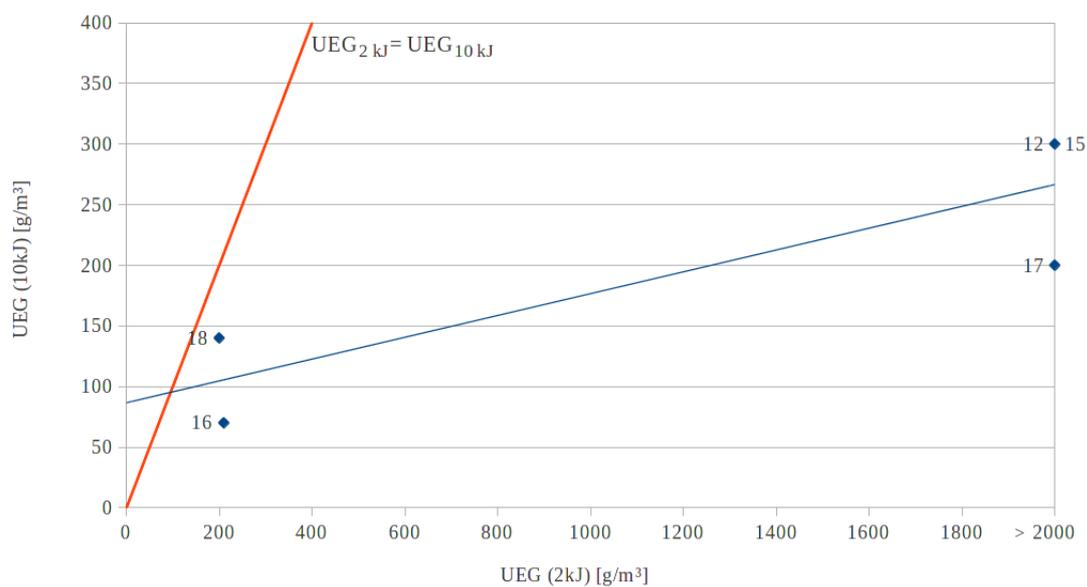


Abbildung 5.12: Vergleich der mit 2 kJ-Zündern und 10 kJ-Zündern bestimmten unteren Explosionsgrenzen

Entzündung gebracht werden konnten, haben, bei Bestimmung mit Zündern einer Energie von 10 kJ, eine UEG von 200 bzw. 300 $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$. Bei zwei Stäuben, deren UEG bei 2 kJ mit 210 bzw. 200 $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ermittelt wurde, verringerte sich die UEG bei der Bestimmung mit 10 kJ Zündern sehr unterschiedlich, nämlich bei einer Probe auf 70 und bei einer anderen auf 140 $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$.

Zumindest tendenziell werden diese Ergebnisse von der Literatur gestützt. Je höher die UEG ist, umso stärker steigt sie mit sinkender Zündenergie an [21]. Ein weiterer Grund für die sehr hohe UEG der untersuchten Stäube könnte sein, dass die durch die chemischen 2 kJ-Zünder übertragene Energie bereits nahe der Mindestzündenergie liegt [7]. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurden die Mindestzündenergien dreier dieser Stäube (Probe Nr. 12, 15 und 17) untersucht.

Über die Bestimmungsverfahren der in der GESTIS-Staub Ex-Datenbank angegebenen UEG ist nur allgemein bekannt, dass die Werte im Regelfall mit der gleichen Methode wie maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert, also in der 1- m^3 -Apparatur oder der 20-l-Apparatur ermittelt wurden. In einzelnen Fällen, in denen maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert nicht untersucht worden waren, erfolgte die Abschätzung der UEG aus den Ergebnissen der modifizierten Hartmann-Apparatur oder durch Berechnung. Angaben zur verwendeten Zündenergie werden nicht gemacht. Dies stellt einen nicht zu vernachlässigenden Unsicherheitsfaktor dar, da der Einfluss der Zündenergie bei der Bestimmung der UEG wesentlich ist.

Die Mittelwerte der recherchierten unteren Explosionsgrenzen der reinen Stoffgruppen liegen zwischen 50 und 75 $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, also tiefer als bei vier der fünf, mit 10 kJ untersuchten, Proben. Der Mittelwert der Stoffgruppe Abfall liegt jedoch bei über 300 $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, was auch besser mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt.

Wie in Abbildung 5.13 zu sehen, streuen die UEG in Abhängigkeit von den Medianwerten stark. Ein genauer Verlauf der Trendlinie über alle durchgeführten Versuche bei 2 kJ kann nicht be-

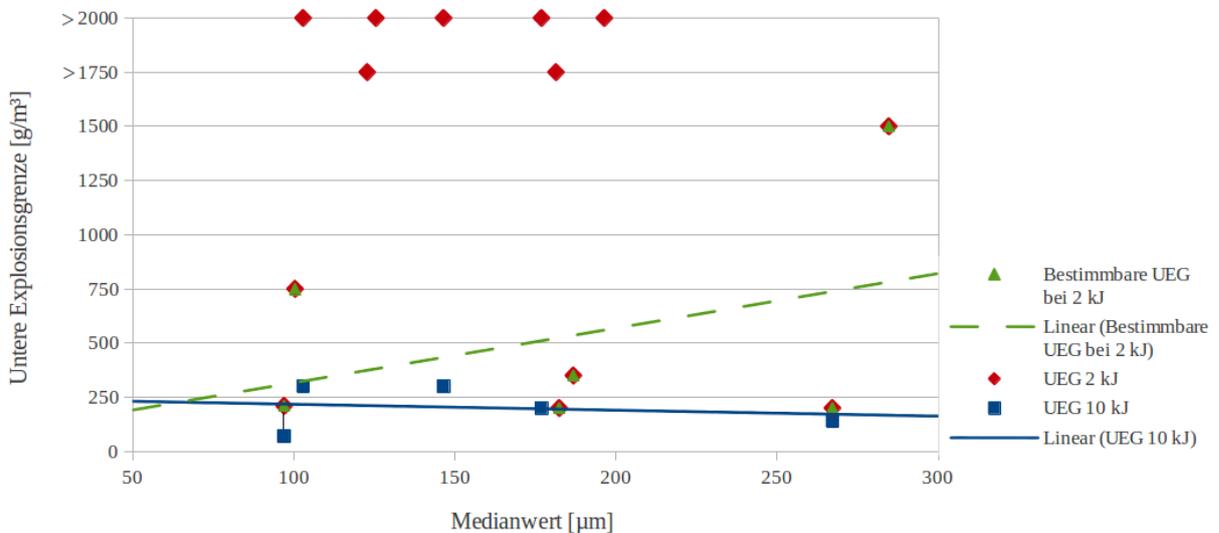


Abbildung 5.13: Untere Explosionsgrenze über Medianwert

stimmt werden, da bei mehr als der Hälfte der Stäube nur bekannt ist, dass ihre UEG über 2000 bzw. 1750 $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ liegt. Wird die Trendlinie nur durch die exakt bestimmten Ergebnisse gelegt, lässt sich ein Anstieg der UEG wahrnehmen. Bei den mit 10 kJ bestimmten UEG ist ein sehr leichter Abfall festzustellen.

Dies bedeutet, dass andere Parameter, wie Zusammensetzung, Inertanteil, Kornform oder Korngrößenverteilung einen größeren Einfluss auf die UEG haben, als der Medianwert.

Es ist außerdem bekannt, dass die UEG bei breiteren Korngrößenverteilungen schwächer mit dem Medianwert ansteigt, da der Feinanteil die Explosionsfähigkeit wesentlich beeinflusst [20]. Wie in Tabelle 5.12 zu sehen ist, weisen, bis auf die Probe 9, alle Stäube breite Verteilungen auf. Dies könnte also ein Grund für die augenscheinliche Unabhängigkeit der UEG von der Korngröße sein.

Tabelle 5.12: Ergebnistabelle Untere Explosionsgrenze mit Quotient $\frac{x_{90}}{x_{10}}$

Nr.	UEG _{2kJ} [$\frac{g}{m^3}$]	UEG _{10kJ} [$\frac{g}{m^3}$]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
1	350	-	6,0
4	750	-	6,9
8	1500	-	5,4
9	200	-	3,5
12	> 2000	300	5,8
13	> 2000	-	5,6
14	> 2000	-	9,0
15	> 2000	300	4,6
16	210	70	5,2
17	> 2000	200	5,9
18	200	140	5,3
19	> 1750	-	10,4
20	> 1750	-	7,3

Der Einfluss des Inertanteils auf die UEG ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Wie zu erwarten, haben die Proben mit den UEG über 2000 $\frac{g}{m^3}$ durchwegs hohe Anteile an Inertstoffen. Bei den mit 10 kJ bestimmten UEG lässt sich der gleiche Trend in abgeschwächter Form feststellen. Diese Abschwächung der Abhängigkeit der UEG vom Inertanteil durch eine höhere Zündenergie weist darauf hin, dass es zu einem Überlagerungseffekt kommt, wodurch die Unterschiede der einzelnen Proben in den Hintergrund treten.

Werden die UEG von Stäuben aus denselben Betrieben verglichen, wird ersichtlich, dass eine Ähnlichkeit besteht. Die drei bestimmten Proben des Thermoteam Retznei liegen zwar mit 200, 350 und 1500 $\frac{g}{m^3}$ weit auseinander (Tabelle 5.13), bewegen sich aber in den Bestimmungsgrenzen, was insgesamt nur bei sechs aus 13 Proben der Fall ist. Der Ablagerungsstaub hat, trotz höherem Inertanteil, eine viel geringere UEG als der Filterstaub aus dem Hauptfilter. Dies lässt sich möglicherweise mit dem geringeren Medianwert der Probe Nr. 1 erklären.

Die UEG der Staubproben aus der Aufbereitungsanlage in Wien Oberlaa konnten mit den 2 kJ-Zündern nicht genau bestimmt werden (Tabelle 5.14).

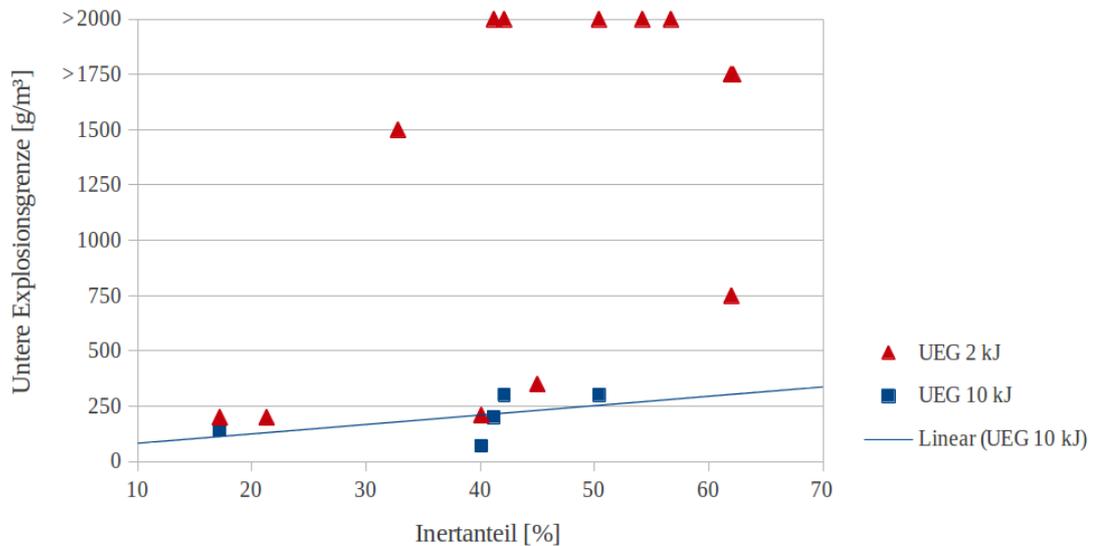


Abbildung 5.14: Untere Explosionsgrenze über Inertanteil

Tabelle 5.13: Untere Explosionsgrenzen sowie Einflussgrößen von Stäuben des Thermoteam Retz-
nei

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	UEG _{2kJ} [$\frac{g}{m^3}$]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
1	TT Retznei/Vorzerkleinerer (AB)	350	186,8	7,38	45,0	6,0
8	TT Retznei/Hauptfilter (FS)	1500	284,7	4,24	32,8	5,4
9	TT Retznei/Schwerteilabscheider (FS)	200	182,4	3,93	21,3	3,5
10	TT Retznei/Werkstättenabfälle, fein	-	459,6	12,52	55,6	4,8

Tabelle 5.14: Untere Explosionsgrenzen sowie Einflussgrößen von Stäuben von Saubermacher,
Wien Oberlaa

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	UEG _{2kJ} [$\frac{g}{m^3}$]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
12	SM Oberlaa/Vorzerkleinerer (AB)	> 2000	146,5	0,61	50,4	5,8
13	SM Oberlaa/Absauganlage (FS)	> 2000	125,5	3,34	54,2	5,6
14	SM Oberlaa/NE-Abscheider (AB)	> 2000	196,4	2,41	56,7	9,0
19	SM Oberlaa/Schwergutabscheider (AB)	> 1750	181,4	1,38	62,0	10,4
20	SM Oberlaa/Magnetabscheider (AB)	> 1750	122,8	1,0	62,2	7,3

Wie bei den sicherheitstechnischen Kennzahlen p_{\max} und K_{St} zeigt sich, dass die Gruppe der Stäube aus Retznei auch bei den UEG-Werten reaktiver ist als jene aus Oberlaa. Dies könnte damit zusammenhängen, dass das Outputmaterial in Retznei einen höheren Brennwert hat und die Inertgehalte der Proben aus Oberlaa höher sind.

Wird nun jene Gruppe der, bei einer Zündenergie von 2 kJ nicht bestimmbar, UEG (Tabelle 5.15) der Gruppe der bestimmbar, UEG (Tabelle 5.16) gegenübergestellt, fällt zuerst auf, dass sich in der zweiten Gruppe, bis auf eine Probe aus abgelagertem Staub, nur Filterstube befinden, während in der ersten Gruppe mehr als die Hälfte der Proben von Ablagerungen stammen. In Prozentanteilen ausgedrückt bedeutet das, dass der Anteil der Ablagerungen unter allen Proben, bei denen die UEG untersucht wurde, 38,5 % beträgt, während die Ablagerungen in der Gruppe der nicht bestimmbar, UEG 57,1 % und in der Gruppe der bestimmbar, UEG 16,7 % repräsentieren.

Tabelle 5.15: Gruppe der Stäube, deren UEG nicht mittels 2 kJ-Zündern bestimmt werden konnten

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	UEG _{2kJ} [$\frac{g}{m^3}$]	UEG _{10kJ} [$\frac{g}{m^3}$]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
12	SM Oberlaa/Vorzerkleinerer (AB)	> 2000	300	146,5	0,61	50,4	5,8
13	SM Oberlaa/Absauganlage (FS)	> 2000	-	125,5	3,34	54,2	5,6
14	SM Oberlaa/NE-Abscheider (AB)	> 2000	-	196,4	2,41	56,7	9,0
15	AVE Linz/Aktenvernichtung (FS)	> 2000	300	102,9	n.g.	42,1	4,6
17	AVE Redlham/Splitting-Anlage (FS)	> 2000	200	176,9	3,09	41,2	5,9
19	SM Oberlaa/Schwergutabscheider (AB)	> 1750	-	181,4	1,38	62	10,4
20	SM Oberlaa/Magnetabscheider (AB)	> 1750	-	122,8	1	62	7,3
MW		> 2000	266,7	150,3	2	52,7	6,9

Tabelle 5.16: Gruppe der Stäube, deren UEG mittels 2 kJ-Zündern bestimmt werden konnten

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	UEG _{2kJ} [$\frac{g}{m^3}$]	UEG _{10kJ} [$\frac{g}{m^3}$]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
1	TT Retznei/Vorzerkleinerer (AB)	350	-	186,8	7,38	45,0	6,0
4	AVE Wels/Mech. Sortierung (FS)	750	-	100,4	5,68	62,0	6,9
8	TT Retznei/Hauptfilter (FS)	1500	-	284,7	4,24	32,8	5,4
9	TT Retznei/Schwerteilabscheider (FS)	200	-	182,4	3,93	21,3	3,5
16	CALREC/EBS-Aufbereitung (FS)	210	70	97,0	1,7	40,1	5,2
18	AVE Redlham/EBS-Aufbereitung (FS)	200	140	267,2	1,75	17,2	5,3
MW		535	105	186,4	4,1	36,4	5,4

Durch die Mittelwertbildung wird klar, dass der Medianwert, zumindest im Bereich von 100 bis knapp 300 μm , kein Indikator für die UEG ist.

Der Abfall der UEG mit steigendem Brennwert [6] wird von den Ergebnissen gestützt. Das äußert sich darin, dass die Stäube aus EBS-Aufbereitungsanlagen tendenziell geringere UEG haben, als jene aus Abfallsortieranlagen. Außerdem ist der Inertgehalt, mit dessen Zunahme der Brennwert sinkt, bei der Gruppe der unbestimmbaren UEG im Schnitt um etwa 16 % höher. Jedoch lässt auch diese Einflussgröße im Einzelfall keine eindeutige Vorhersage der UEG zu, was durch die Proben Nr. 1, 15, 16 und 17 deutlich wird, welche sich in ihren Inertgehalten kaum unterscheiden und doch große Unterschiede in Bezug auf die UEG aufweisen. Die Probe Nr. 4 zeigt, dass auch Stäube mit sehr hohen Anteilen an anorganischem Material von zwei Dritteln vergleichsweise niedrige UEG haben können.

Die UEG ist besonders in Kombination mit dem Feinkornanteil, dem Feuchtegehalt und der Menge an vorhandenem Staub interessant. Kann sichergestellt werden, dass die vorhandene Menge an explosionsfähigem Staub geringer ist als die UEG, ist die Gefahr der Bildung explosionsfähiger Atmosphäre gebannt. Die UEG ist somit auch ein Richtwert zur Bestimmung der erforderlichen Reinigungsmaßnahmen von Oberflächen zur Beseitigung von Ablagerungen. Lagert sich innerhalb kurzer Zeit eine große Menge an Feinanteil mit niedriger UEG ab, so ist ein kürzerer Reinigungszyklus erforderlich als bei Stäuben mit unteren Explosionsgrenzen über $2000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$.

Zusammenfassend kann über die UEG gesagt werden, dass sie bei der Entzündung mittels 2 kJ bei der Hälfte der untersuchten Proben über der Bestimmungsgrenze liegt und, dass sie stark von der Zündenergie abhängt. Außerdem ist der Vergleich von Literaturwerten nur möglich, wenn das Bestimmungsverfahren samt Zündenergie genau angegeben wird. Der Zusammenhang mit der Korngröße war in den Versuchsergebnissen nicht nachzubilden, während die Abhängigkeit vom Inertgehalt bestätigt wurde. In Zukunft muss der Zusammenhang zwischen den bei unterschiedlichen Zündenergien bestimmten UEG untersucht werden. Die Versuchsergebnisse legen nahe, dass die 2 kJ-Zünder zu schwach sind, um reaktionsträge Stäube zur Entzündung zu bringen, während die 10 kJ-Zünder für die Untersuchungen in der 20-l-Apparatur zu stark sind, da sie zu Überlagerungseffekten führen.

5.1.3 Mindestzündenergie

Für die Bestimmung der Mindestzündenergie wurden sechs Proben ausgewählt. Die drei Proben 12, 15 sowie 17 sind der eher schwach reagierenden Gruppe zuzuordnen, deren UEG sich mit den 2 kJ-Zündern nicht bestimmen ließen. Die zweite Gruppe der untersuchten Proben umfasste stark reaktive Stäube mit bei 2 kJ bestimmbaren unteren Explosionsgrenzen. Es sollte untersucht werden, ob, ausgehend von anderen Explosionskenngrößen, Medianwerten oder Inertgehalten Aussagen über die Mindestzündenergie getroffen werden können. Dies ist vor allem von Interesse, da die Bestimmung der Mindestzündenergie mit der MIKE-3-Apparatur im Vergleich zur UEG-Bestimmung sehr zeitintensiv ist.

Wie in Abbildung 5.15 zu sehen, liegen vier der insgesamt sechs Ergebnisse über der Bestimmungsgrenze der MIKE-3-Apparatur. Im Vergleich mit den Literaturwerten, deren Mindestzündenergien hauptsächlich im Bereich zwischen 3 und 300 mJ liegen, zeigt sich ebenfalls, dass die untersuchten Stäube besonders schwer entzündlich sind (Tabelle 5.17). Die ideale Staubkonzentration, bei der die niedrigste Zündenergie gemessen wurde, lag bei Probe Nr. 16 bei 900 g und bei Probe Nr. 18 bei 1500 g pro 1,2 l. Diese Konzentration ist vielmehr als Vergleichswert denn als exakter Wert zu verstehen, da die MIKE-3-Apparatur kein abgeschlossenes System darstellt, einzelne Staubeinwaagen mehrmalig verwendet werden und es zu keiner regelmäßigen Vertei-

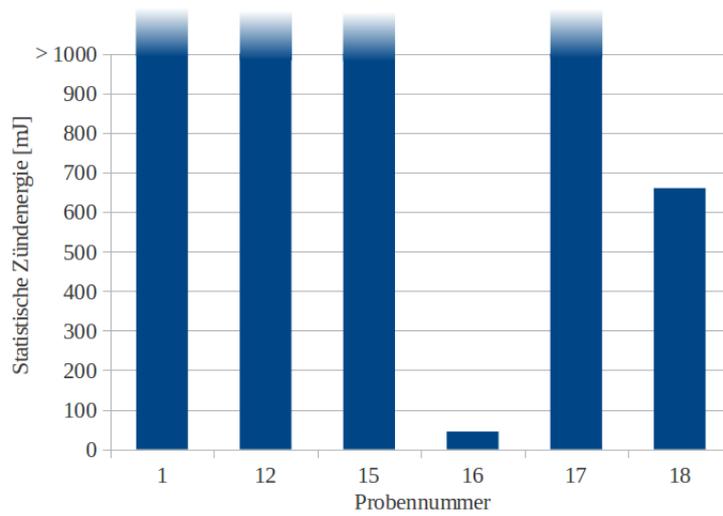


Abbildung 5.15: Versuchsergebnisse Mindestzündenergie

Tabelle 5.17: Tabelle mit den Ergebnissen der statistischen Mindestzündenergie

Nr.	E_S [mJ]	Ideale Staub- konzentration [$\frac{g}{l,2l}$]	Zündver- zögerungszeit [ms]
1	> 1000	-	-
12	> 1000	-	-
15	> 1000	-	-
16	45	900	180
17	> 1000	-	-
18	660	1500	180

lung im Explosionsrohr kommt. Für das Endergebnis und den Prüfbericht hat die aufgebene Menge an Staub also keine Relevanz. Alle Proben wurden bei drei unterschiedlichen Zündverzögerungszeiten, 60, 120 und 180 ms, untersucht, wobei die ideale Zündverzögerungszeit bei den zwei bestimmten Mindestzündenergiewerten jeweils sehr hoch, bei 180 ms, lag. Dieses Ergebnis deckt sich mit den in der Literatur angegebenen Zusammenhängen, wonach die Zündenergie mit sinkender Turbulenz steigt.

Die beiden Proben, die die stärkste Explosionsheftigkeit aufweisen, haben, wie in Abbildung 5.16 zu sehen, auch niedrigere, im Bestimmungsbereich liegende Mindestzündenergien. Doch

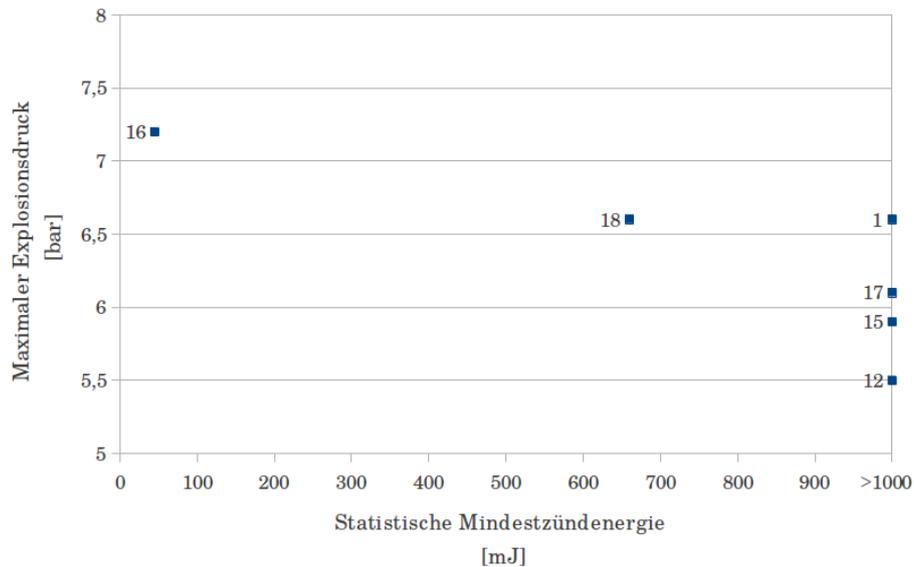


Abbildung 5.16: Vergleich der Explosionsheftigkeit mit der Mindestzündenergie

alleine von dem maximalen Explosionsdruck ausgehend, lässt sich nicht auf die Mindestzündenergie schließen, wie durch den Vergleich der Proben 1 und 18 ersichtlich wird. Obwohl sie gleiche Explosionsdrücke sowie K_{St} -Werte aufweisen, liegt bei dem einen Staub die MZE über der Bestimmungsgrenze, während sie beim anderen mit 660 mJ bestimmt werden konnte.

In Abbildung 5.17 zeigt sich der erwartete Anstieg der MZE mit wachsender UEG. Dies gilt sowohl für die mit 2 kJ-Zündern, wie auch für die mit 10 kJ-Zündern bestimmten UEG. Aufgrund der geringen Anzahl an Daten kann jedoch nicht von einem gesicherten Trend gesprochen werden. Wie bereits in Abschnitt 5.1.2 angemerkt wurde, sollte untersucht werden, ob jene Proben, deren UEG mit 2 kJ-Zündern nicht ermittelt werden konnte, entsprechend geringe Mindestzündenergien haben. Tatsächlich liegen die MZE der Proben 12, 15 und 17 durchwegs über der Bestimmungsgrenze von 1 J. Dies lässt die Möglichkeit zu, dass die MZE der untersuchten Stäube tatsächlich in der Nähe der von den chemischen 2 kJ-Zündern übertragenen Zündenergie liegt und die UEG aus diesem Grund nicht bei 2 kJ, sondern nur bei 10 kJ bestimmt werden kann. Jedoch kann diese Annahme auch nicht mit Sicherheit bestätigt werden, da die Versuchsbedingungen zur Bestimmung von UEG und MZE kaum verglichen werden können. Während bei der Bestimmung der MZE die Zündenergie genau bekannt ist und die Konzentration nur eine Relativgröße darstellt, ist die in der 20-l-Apparatur übertragene Zündenergie unbekannt, während die Konzentration genau bestimmt werden kann.

Die Abhängigkeit der MZE vom Medianwert zeigt einen Anstieg der Zündenergie mit steigender Korngröße (Abbildung 5.18). Es fällt auf, dass die Proben 15 und 16, die beinahe die gleichen Me-

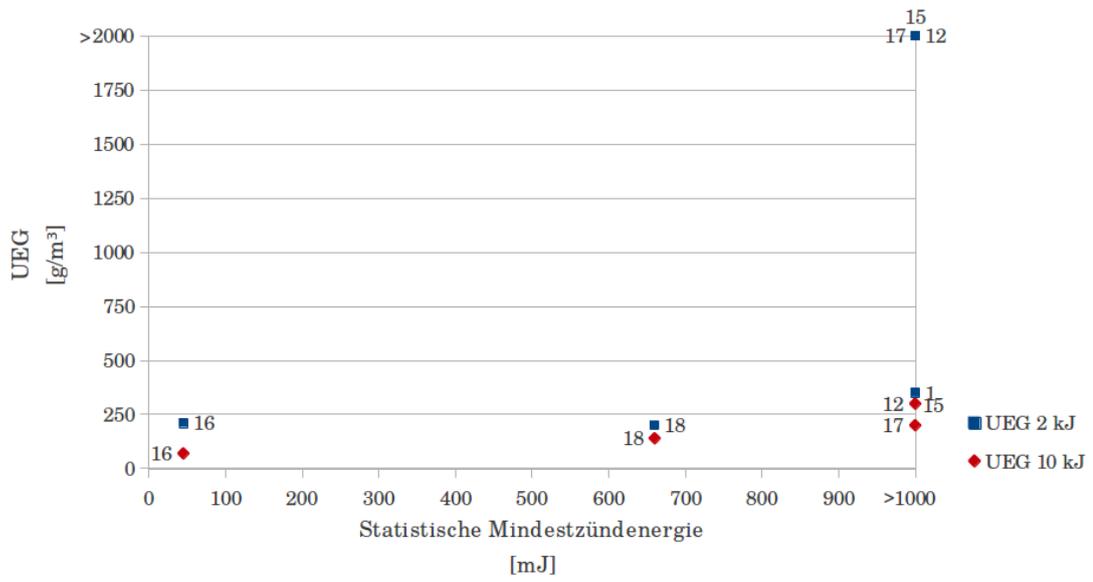


Abbildung 5.17: Mindestzündenergie im Zusammenhang mit der unteren Explosionsgrenze

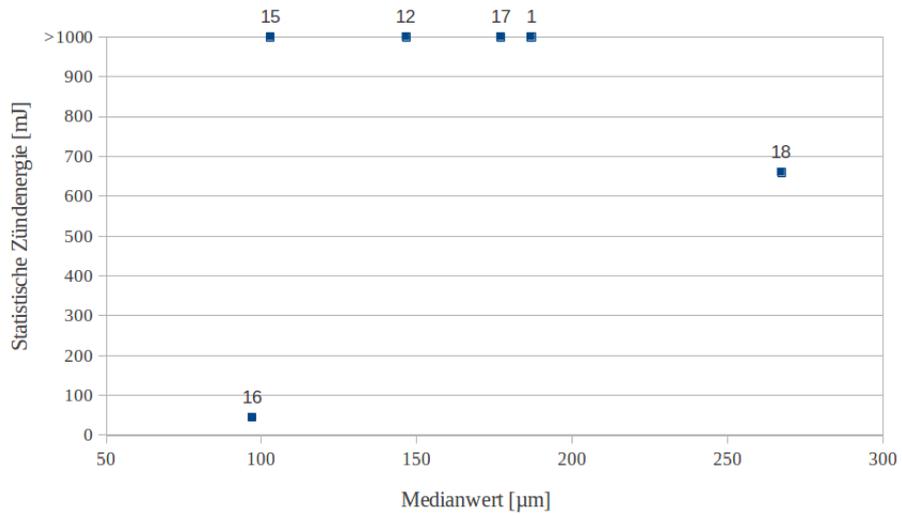


Abbildung 5.18: Mindestzündenergie über Medianwert

dianwerte haben, stark unterschiedliche Mindestzündenergien aufweisen. Ein signifikanter Unterschied lässt sich auch beim Vergleich der anderen sicherheitstechnischen Kenngrößen der beiden Proben finden.

Auch der Inertgehalt (siehe Abbildung 5.19) liefert keine Erklärung für die außergewöhnlich geringe Mindestzündenergie der Probe Nr. 16. Ihr Anteil an nicht reaktivem Material ist mit

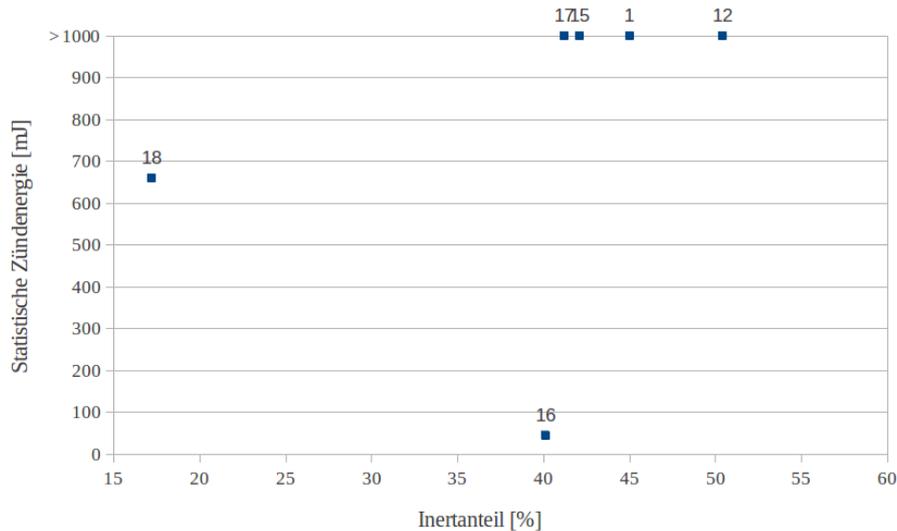


Abbildung 5.19: Mindestzündenergie über Inertanteil

etwa 40 % ungefähr gleich hoch wie bei Stäuben, die nicht zur Entzündung gebracht werden konnten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Mindestzündenergie bei Proben, deren UEG mit 2 kJ-Zündern nicht ermittelt werden konnte, über der Bestimmungsgrenze der MIKE-3-Apparatur liegt. Ob dies als allgemeine Regel gelten kann, muss durch eine größere Anzahl an Untersuchungen eruiert werden. Medianwert und Inertgehalt sind bei den untersuchten Proben keine sicheren Indikatoren für die Mindestzündenergie. Der Vergleich von Proben ähnlicher Medianwerte und Inertgehalte zeigte, dass andere Einflussgrößen wie chemische Zusammensetzung oder Kornform das Entzündungsverhalten stark beeinflussen.

In Tabelle 5.18 werden zwei Proben aus der AVE Redlham verglichen. Der Staub der Nummer 17 ist ein Filterstaub aus der Splittinganlage und hat, trotz geringeren Medianwert, eine höhere MZE als der Filterstaub aus der EBS-Aufbereitung.

Tabelle 5.18: Mindestzündenergien der Stäube aus der AVE Redlham

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	MZE [mJ]	Median [µm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
17	AVE Redlham/Splittinganlage (FS)	> 1000	176,9	3,09	41,2	5,9
18	AVE Redlham/EBS-Aufbereitung (FS)	660	267,2	1,75	17,2	5,3

Eine Begründung für diesen Unterschied ist eventuell darin zu finden, dass in der Aufbereitung zu Ersatzbrennstoffen höher kalorischer Material mit einem größeren Anteil an leichter flüchtigen Bestandteilen verarbeitet wird, als in der Splittinganlage. Die flüchtigen Bestandteile können nach Übergang in die Gasphase und Vermischung mit der Verbrennungsluft zu einer Verminderung der MZE führen.

Im Vergleich der beiden Stäube mit den bestimmmbaren MZE (Tabelle 5.19) und der Gruppe an Proben, deren MZE über 1 J beträgt (Tabelle 5.20), lassen sich, hauptsächlich aufgrund der geringen Anzahl an Proben, keine wesentlichen Unterscheidungsmerkmale finden. Während der

Tabelle 5.19: Stäube mit Mindestzündenergien innerhalb der Bestimmungsgrenzen der MIKE-3-Apparatur

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	MZE [mJ]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
16	CALREC/EBS-Aufbereitung (FS)	45	97	1,7	40,1	5,2
18	AVE Redlham /EBS-Aufbereitung (FS)	660	267,2	1,75	17,2	5,3
MW		352,5	182,1	1,7	28,7	5,3

Inertgehalt bei einer der bestimmten Proben außergewöhnlich gering ist, liegt dieser bei der Probe mit der geringsten MZE, Nr. 16, im durchschnittlichen Bereich.

Tabelle 5.20: Stäube mit Mindestzündenergien über 1000 mJ

Nr.	Betrieb/Probenahmeort	MZE [mJ]	Median [μm]	Feuchte [%]	Inert [%]	$\frac{x_{90}}{x_{10}}$ [-]
1	TT Retznei/Vorzerkleinerer (AB)	> 1000	186,8	7,38	45	6
12	SM Oberlaa/Vorzerkleinerer (AB)	> 1000	146,5	0,61	50,4	5,8
15	AVE Linz/Aktenvernichtung (FS)	> 1000	102,9	n.g.	42,1	4,6
17	AVE Redlham /Splitting-Anlage (FS)	> 1000	176,9	3,09	41,2	5,9
MW		> 1000	153,3	3,7	44,7	5,6

5.2 Fehlerdiskussion

Durch Fehler in der Probenaufbereitung und der Versuchsdurchführung kann es einerseits zu ungültigen Messungen kommen, die dazu führen, dass Versuche wiederholt werden müssen, sowie andererseits zu einer systematischen Verfälschung der Ergebnisse. Im Folgenden werden Fehler behandelt, die im Laufe der Vorbereitung der Proben und der Ausführung der Versuche vorgekommen sind, und dadurch zu falschen Kenngrößen geführt haben könnten.

5.2.1 Fehlerquellen bei der Probenahme und -aufbereitung

Dadurch, dass die Probenahme in Hinblick auf eine möglichst große Menge an feinkörnigem Staub erfolgte, wurde bereits bei diesem ersten Schritt eine Abtrennung des Grob- vom Feinanteil vorgenommen. Die genommene Probe ist aus diesem Grund nicht repräsentativ für den Praxisfall. Diese Vorgehensweise ist jedoch zulässig, da für die Untersuchung der STK ausschließlich der explosionsfähige Staub von Interesse ist. Für die Beurteilung des Risikos der Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre ist es jedoch notwendig zu wissen, wie groß der vor Ort vorliegende Anteil an untersuchtem Staub ist. Bei zukünftigen Probenahmen sollte also das Augenmerk auch auf die Bestimmung des Feinkorngehaltes liegen.

Faserige Proben neigen oft dazu, sich durch die Vibrationen der Siebmaschine zu dichten Matten zusammenzuschließen. Infolgedessen werden kleinere Partikel auf Siebböden größerer Maschenweite zurückgehalten und somit der falschen Korngrößenklasse zugeordnet. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde das Material auf dem obersten Siebboden per Hand aufgelockert. Durch die Anlagerung von feinem Staub an der Oberfläche der Siebböden kommt es zu einer weiteren Verfälschung der Korngrößenverteilung.

Weiters ist darauf hinzuweisen, dass die untersuchten Proben, in Abhängigkeit vom Aufgabematerial, stark heterogen in ihrer Zusammensetzung sind. Das bedeutet, dass sich die einzelnen Partikel stark in ihrer Dichte, Kornform und -größe unterscheiden. Tendenziell haben größere Partikel, da es sich meist um Glas, Metalle oder anorganisches Material handelt, eine höhere Dichte als kleinere Partikel aus Kunststoffen, Textilien oder Papier. Die Aufschlüsselung nach Massenanteilen ist also nicht immer proportional zur mengenmäßigen Häufigkeit der Korngrößenklassen. Diese Problematik betrifft nur die Siebanalyse des Grobanteils. Die Korngrößenanalyse des Feinanteils wurde mittels Bildanalyse durchgeführt.

Bei vier Proben (Nr. 5, 14, 17 und 18) wurde die Bestimmung des Inertgehaltes gemäß DIN 51719 für feste Brennstoffe durchgeführt. Im Gegensatz zur ÖNORM 14775 für die Aschegehaltbestimmung fester Biobrennstoffe, gemäß derer die Inertanteile der restlichen Proben ermittelt wurden, müssen die Stoffe auf 815°C aufgeheizt werden. Durch die um 265°C höhere Veraschungstemperatur könnte es zu niedrigeren Inertgehalten gekommen sein. Dies hat den Grund, dass bei Temperaturen über 550°C flüchtige anorganische Stoffe ausgetrieben werden, eine Aufspaltung von Carbonaten mit anschließender Umwandlung in Kohlendioxid stattfindet und es zur Aufoxidation anorganischer Verbindungen kommt [27]. Zum Vergleich eignen sich die Proben 3 und 5, die beide von derselben Probenahmestelle stammen, jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten beprobt wurden. Während der Aschegehalt der Probe 3 nach ÖNORM 14775, also bei 550°C ermittelt wurde, wurde die Probe 5 bei 815°C verascht. Der bei niedrigerer Temperatur bestimmte Inertanteil beträgt 44 %, bei der höheren Temperatur wurde er zu 38,5 % errechnet. Der Unterschied von 5 % ist nicht mit Sicherheit auf die geänderte Veraschungstemperatur zurückzuführen, da die Zusammensetzung der angelieferten Abfälle auch zeitlichen Schwankungen unterliegt. Selbst wenn die Ursache für die unterschiedlichen Inertgehalte im geänderten Bestimmungsverfahren zu suchen ist, liegt eine Abweichung von 5 % noch in jenem Bereich, bei dem sich keine eindeutige Auswirkung auf die STK feststellen lässt. Während sich die Proben 14 und 17 gut in den mittleren bis oberen Bereich der Inertgehalte einreihen und auch eine erwartete Übereinstimmung mit den STK zeigen, ist der Aschegehalt der Probe 18 außergewöhnlich gering. Der geringe Inertanteil dieses Staubes korreliert auch mit einer leicht überdurchschnittlichen Explosionsheftigkeit, einer geringen UEG, sowie einer verhältnismäßig geringen MZE.

5.2.2 Fehlerquellen bei der Bestimmung des maximalen Explosionsdrucks sowie des K_{St} -Wertes und der UEG

Folgende Fehlereinflüsse sind in Bereiche, in denen sie zu einer Abweichung vom idealen Versuchsablauf führen, gegliedert.

Staubverteilung in der Apparatur

Eine homogene, also möglichst gleichmäßige Verteilung des Staubes in der Luft ist nötig, um in der Kugel überall die gleiche Konzentration zu erlangen. Bei heterogener Staubverteilung gibt es Bereiche größerer und geringerer Konzentrationen, wodurch sich keine reproduzierbaren Versuche durchführen lassen und das Ergebnis verfälscht wird.

- Rückstände an der Innenoberfläche der Kugel können das Verteilungsverhalten verändern und somit die Messung verfälschen. Wenn bei der Reinigung der 20-l-Apparatur nicht gründlich genug vorgegangen wird, kann es dazu kommen, dass die Innenfläche Restfeuchte aufweist, wodurch sich der eingeblasene Staub anlegt, anstatt sich in der Kugel zu verteilen. Bei manchen Versuchen kam es vor, dass Material (z.B. Abdeckung der chemischen Zünder) aus der Kugel auf dem Staubeinlassventil zurückblieb. Dadurch kam es zur Verstopfung des Einlassventils oder zur Behinderung des gleichmäßigen Staubeintrages.
- Es besteht die Gefahr, dass eine größere Menge Staub im Vorratsbehälter zurückbleibt. Vor allem bei sehr feinem Staub kann nicht verhindert werden, dass sich eine Staubschicht an der Innenwand des Staubvorratsbehälters anlegt.
- Besonders bei faserigen Stäuben, die zu Agglomeration neigen, kann es vorkommen, dass das Staubeinlassventil verstopft wird. Außerdem erfahren Staubteilchen unterschiedlicher Kornformen unterschiedlich starke Auftriebskräfte, was zu einer Entmischung des Staubes nach Stoffgruppen führen kann.
- Die wahrscheinlich bedeutendste Fehlerquelle stellt die Beschaffenheit der untersuchten Proben dar. Die Stäube aus Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen sind häufig sehr heterogen in ihrer Zusammensetzung, Kornform und Korngröße. Die Heterogenität der Zusammensetzung stellt eine Herausforderung in Bezug auf eine repräsentative Probenahme dar. Durch unterschiedliche Dichten kann es zur Entmischung während der Probenvorbereitung, sowie zur ungleichmäßigen Verteilung in der 20-l-Apparatur kommen. Die unterschiedlichen Kornformen, von länglich bis sphärisch, bedingen ebenfalls eine Entmischung während der Siebung. Proben mit einem hohen Anteil an länglichen Fasern unterliegen zudem einer Knäuelbildung. Dies verfälscht das Ergebnis einerseits, da es zur Entmischung führt und andererseits, da dadurch die Gefahr der Verstopfung des Einlassventils steigt. Zudem werden die größeren Knäuel mit angelagerten Staubpartikeln in der Kugel anders verteilt als die kleineren, leichteren Staubpartikel. Eine weitere starke Abweichung vom Idealfall stellen die teilweise großen Korngrößen dar. Da die Stäube mit der Siebmaschine nur bis auf kleiner 500 μm gesiebt werden, liegen die Medianwerte einzelner Stäube oft weit über der für die Bestimmung der Explosionskenngrößen empfohlenen 63 μm . Alle diese Eigenschaften der untersuchten Stäube führen dazu, dass die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, verglichen mit jenen von Reinstoffen, wie z.B. Lycopodium, gering ist.

Dichtungen

- Insbesondere muss die Sauberkeit der Dichtungen überprüft werden, da das Ergebnis durch Undichtheit verfälscht werden kann. Nach der Reinigung muss darauf geachtet werden, dass die Dichtungen am Kugeldeckel und am Vorratsbehälterdeckel wieder eingebaut werden.
- Die Dichtung des Staubeinlassventils sollte regelmäßig überprüft und bei Bedarf erneuert werden. Im Falle einer schadhafte Dichtung schließt das Ventil nicht mehr richtig, wodurch im Staubvorratsbehälter nicht der nötige Druck aufgebaut werden kann. Da zu Beginn die Dichtung des Staubeinlassventils nicht regelmäßig überprüft wurde, könnte es, bereits bevor das Einlassventil offensichtlich undicht wurde, zu Druckverlusten gekommen sein.

Zündung

- Die Zünder sollten, in Annäherung einer punktförmigen Zündquelle, im rechten Winkel auf die durch die Elektrodenstäbe aufgespannte Ebene montiert werden und die Hälse der Zünder sollten möglichst nahe beieinander stehen. Selbst im Fall der korrekten Montage der Zünder stellen sie einen möglichen fehlerverursachenden Einfluss dar, da sie, in Proportion zum Innenraum der 20-l-Apparatur, bei weitem keiner punktförmigen Zündquelle gleichen.
- Versuche mit Zündern, die nicht gezündet werden konnten, sog. Blindzündern, mussten wiederholt werden und gehen daher nicht als Fehler in das Ergebnis ein.
- Vor allem bei der Bestimmung der UEG wird ersichtlich, dass es sich bei der Kombination aus Zündquelle und 20-l-Apparatur nicht um ein ideales System handelt. Die unteren Explosionsgrenzen hängen erstens stark von der verwendeten Zündenergie ab und zweitens scheint es bei Verwendung der 10 kJ-Zünder zu starken Überlagerungseffekten zu kommen.

Umgebungsbedingungen

- Es kam zu Temperaturschwankungen von bis zu drei Grad Celsius unter bzw. über die erlaubten Grenzwerte von 20 und 25°C, da die Wasserkühlung nicht entsprechend schnell reagierte und auch nicht exakt adjustiert werden konnte. Der Einfluss auf die Versuchsergebnisse kann jedoch, auch wenn sich der maximale Explosionsdruck linear mit zunehmender Temperatur vermindert, aufgrund der geringen Abweichung vernachlässigt werden. Wenn darauf geachtet wird, dass ein steter Wasserfluss vorhanden ist und somit eine Überschreitung der Kühlwassertemperatur von 25°C verhindert wird, ist eine zusätzliche Thermostatisierung nicht notwendig.
- Der Druck im Staubvorratsbehälter war teilweise etwas zu niedrig, es wurden etwa 18 bis 19 bar statt der erforderlichen 20 bar am Manometer angezeigt. Grund dafür war, dass der Druckminderer defekt und daher im Bereich von 20 bar kaum zu regeln war. Das Aufzeichnungsprogramm geht davon aus, dass zum Zeitpunkt der Zündung in der Kugel Atmosphärendruck herrscht und ermittelt den Druck in der Kugel als Differenzdruck. Damit sich auch wirklich Atmosphärendruck einstellt, muss, bei einer auf 0,4 bar evakuierten

20-l-Kugel, aus dem 600-ml-Staubvorratsbehälter Pressluft mit einem Druck von 20 bar in die Kugel eingelassen werden.

- Bei einigen Versuchen sprang der Zeiger des Manometers an der Evakuierungsleitung schnell auf einen Evakuierungsdruck von -0,2 bar oder weniger an. Die Ursache dafür war meist, dass die Evakuierungsleitung zwischen Kugel und Manometer verstopft war. Der Evakuierungsdruck wurde dann deshalb so schnell erreicht, da nur das Stück von der Evakuierungspumpe bis zur Verstopfung evakuiert wurde. Durch einen zu geringen Unterdruck in der Kugel war der Druck zum Zeitpunkt der Zündung zu groß, sodass der durch Differenzmessung bestimmte Explosionsdruck geringer war als tatsächlich. Der Vordruck, welcher zum Zeitpunkt der Zündung vorherrscht, ist, wie bereits in der Einleitung erläutert, eine wichtige Einflussgröße in der Explosionskenngrößenbestimmung.
- In der Betriebsanleitung wird angegeben, dass der Druckabfall im Staubvorratsbehälter in einer Minute nicht mehr als 1 bar betragen sollte. Dieser Wert wurde beinahe immer überschritten. Der Einfluss auf das Ergebnis kann aber als gering eingeschätzt werden, da die Dauer von der Druckbeaufschlagung des Staubvorratsbehälters bis zur Öffnung des Staubeinlassventils so gering ist, dass es zu keinem wesentlichen Druckverlust kommt.

Fehlerhafte Druckmessung

Ein Fehler in der Druckaufnahme war daran zu erkennen, dass der durch einen der beiden Drucksensoren aufgenommene Druckverlauf stark vom anderen abwich. Die Ursache hierfür war, dass die Silikonschicht, die den Druckaufnehmer vor dem direkten Kontakt mit der Flammenfront in der Kugel schützt, beschädigt oder nicht mehr vorhanden war. Darum müssen beide Druckaufnehmer regelmäßig überprüft und vorsichtig gereinigt werden. Bei Bedarf ist die Silikonschicht zu erneuern. Bei zu starken Abweichungen der Druckverläufe mussten die Messungen verworfen und wiederholt werden.

5.2.3 Fehlerquellen bei der Bestimmung der Mindestzündenergie

Es gibt folgende fehlerverursachenden Einflüsse, die nicht von der Software überwacht werden können:

- Die Verteilung des Staubes im Glasrohr ist nicht immer gleich und auch nicht vollkommen homogen. Hierfür kann es mehrere Gründe geben: Das Produkt an sich ist nicht homogen, da es aus verschiedenen Stoffgruppen unterschiedlicher Korngrößen und -formen besteht. Setzt sich der Staub aus Fraktionen unterschiedlicher Dichten und Formen zusammen, erfahren die schwereren Partikel und jene mit geringeren Schattenflächen einen schwächeren Auftrieb durch die Druckluft. Daher kommt es zu einer gewissen Trennung der Staubbestandteile.
- Die Verteilung im Verteilerboden um die Pilzdüse herum erfolgt nicht immer gleich und auch nicht ausreichend gleichmäßig. Durch Einwaage und Einfüllen des Staubes kann es zu leicht variierenden Mengen und unterschiedlichen Staubverteilungen kommen.

- Bei einzelnen Versuchen wurde vergessen, die Scharniere des Verteilerbodens zu schließen, wodurch in diesem Bereich eine größere Staubmenge austreten konnte.
- Da die originale Dichtung der Elektroden zum Glaszylinder nicht mehr vorhanden war, wurde provisorisch eine Dichtung aus dünnerem Gummi verwendet. Hier war ein verstärkter Austritt der Probe zu bemerken.
- Bei manchen Versuchen wurde es verabsäumt, den Elektrodenabstand mit der Lehre nachzumessen. Aufgrund der Erfahrung und der optischen Kontrolle können wesentliche Fehler jedoch ausgeschlossen werden.
- Auch wenn vom Programm überprüft wird, dass der Druck über einer Mindestgrenze liegt, sind darüber Schwankungen des Pressluftdrucks möglich. Diese Druckschwankungen können ebenfalls dazu führen, dass der Staub nicht bei jedem Versuch den gleichen Auftrieb erfährt. Durch das Leerwerden der Pressluftflasche sank der Druck der Zerstäubungsluft unbemerkt auf etwa 6 bar - statt der erforderlichen 6,5 bar - ab. Die Pressluftflasche wurde ausgetauscht, sobald der Druckabfall ersichtlich wurde.
- Besonders bei großen Staubmengen bleibt ein relativ großer Teil des aufgegebenen Staubes im Verteilerboden zurück und wird nicht aufgewirbelt. Vor allem sehr feine Stäube haften stark und in großer Menge am Glaszylinder an. Dies kann im Besonderen bei geringen Konzentrationen zu Problemen führen, da kaum noch Staub im Verteilerboden zurückbleibt, der beim nächsten Entzündungsversuch aufgewirbelt werden kann. Bei Versuchen, bei denen dies beobachtet wurde, wurde die Apparatur öfters als üblich mit neuem Staub beschickt.
- Die Bestimmung der Mindestzündenergie beruht auf der Beobachtung durch den Versuchsdurchführenden. Hier besteht das Problem, dass es nicht immer eindeutig ist, ob es zu einer Entzündung gekommen ist. Besonders bei hohen Zündenergien mit sehr hellen Zündfunken und feinen, reflektierenden Stäuben kann eine Nichtzündung fälschlicherweise als Entzündung interpretiert werden. Hier hilft es, zwischendurch die Option „spark only“ zu wählen. Dabei kommt es nur zum Funken sprung, ohne dass Staub eingeblasen wird.
- Die gesamte Messung ist den üblichen Schwankungen der Umgebungstemperatur unterworfen. Die Mindestzündenergie nimmt mit steigender Temperatur ab, wobei schwer entzündliche Stäube eine stärkere Abnahme zeigen als leicht entzündliche. Für die Praxis im Labor kann der Temperatureinfluss vernachlässigt werden, da es sich maximal um Temperaturschwankungen von 10°C handelt.
- Dass es zu einem Ladungsabfluss durch Coronastrom, verschmutzte Elektroden oder leitfähigen Staub kommen kann, wurde bereits erwähnt. Die Möglichkeit, dass der Zündfunke in Wahrheit eine geringere Energie hat als eingestellt, ist in der Interpretation und sicherheitstechnischen Umsetzung des Ergebnisses zu berücksichtigen. In Tabelle 5.21 sind die Grenzen angegeben, zwischen denen die tatsächliche Energie des Zündfunken bei jeweiliger eingestellter Zündenergie, dem Nominalwert, schwanken kann. Der Maximalwert bezeichnet die theoretisch errechnete Anfangsladung des Kondensators. Die tatsächlich übertragene Energie liegt immer unter diesem Wert und kann bis zum Minimalwert absinken.[19]

Tabelle 5.21: Nominal-, Maximal- und Minimalwert der durch den Funken übertragenen Energie bei der Mindestzündenergiebestimmung mittels MIKE-3-Apparatur [19]

Nominal [mJ]	Maximal [mJ]	Minimal [mJ]	Triggerung
1	1,8	0,7	Relais
3	4	1,8	Relais
10	13	7	bewegte Elektrode
30	40	18	bewegte Elektrode
100	133	70	bewegte Elektrode
300	400	230	bewegte Elektrode
1000	1330	650	bewegte Elektrode

- Der Staub tritt zu einem nicht geringen Teil über einen Spalt zwischen Verteilerboden und Glasrohr sowie über die Löcher im Glasrohr, durch die die Elektroden eingeführt werden, aus der Apparatur aus. Die Tatsache, dass die Apparatur im unteren Teil nicht dicht ist, führt zu Fehlern, weil dadurch einerseits Staub verloren geht und sich andererseits der Druck der Zerstäubungsluft, mit dem der Staub im Explosionsgefäß aufgewirbelt wird, verringert. Da die Konzentration bei der Bestimmung der MZE in der MIKE-3-Apparatur eine relative Größe ist, ist die Messung indifferent gegenüber geringen Verlusten an Staub. Dennoch besteht die Gefahr, dass durch schlecht abschließende Dichtungen, Nicht-Verschließen der Schaniere am Verteilerboden oder am Klappdeckel mehr Staub als üblich verlorengeht. Wenn der Staub aufgrund von Undichtheit mit geringerem Druck aufgewirbelt wird, hat dies durch veränderte Turbulenzverhältnisse einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Ergebnis.

5.2.4 Probleme bei der Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Industriepraxis

Die im Labor untersuchten sicherheitstechnischen Kenngrößen sollen Aufschluss über das Verhalten eines bestimmten Staubes im Betriebsumfeld geben. Aus den folgenden Gründen ist die Übertragbarkeit jedoch nur mit Einschränkungen gegeben:

- Aufgrund der Heterogenität der Proben ist ein Vergleich der STK aus Datenbanken mit im Betrieb vorhandenen Stäuben schwierig. Der Aufwand, alle unterschiedlichen Einflussfaktoren wie Kornform, Inertgehalt, Medianwert, Korngrößenverteilung, Heizwert, chemische Zusammensetzung, Umgebungsbedingungen etc. und deren Auswirkungen auf die STK in einer Datenbank zu erfassen, wäre enorm. Eine Abschätzung der STK aufgrund von Literaturwerten ist daher nicht zufriedenstellend durchführbar.
- Die Proben wurden vor der Bestimmung der STK gesiebt und der grobe Anteil mit Korngrößen über 500 μm wurde abgetrennt. In der Praxis wird grundsätzlich sämtlicher Staub, ungeachtet der Korngrößen, aufgewirbelt. Wenn der Anteil der großen, nicht an der Explosion teilnehmenden Partikel höher ist, kommt es insgesamt zu einer Abschwächung der

Explosionsheftigkeit. Dies würde bedeuten, dass die im Labor gemessenen maximalen Explosionsdrücke sowie die K_{St} -Werte höher und die UEG sowie die MZE niedriger als bei der Staubwolke vor Ort wären. Diesem Unterschied wird jedoch durch die Tatsache entgegengewirkt, dass sich größere, schwerere Partikel früher absetzen. Es kommt also auch in der Praxis zu einer Entmischung, sodass die explosionsfähige Atmosphäre aus den feinen Partikeln gebildet wird. Ab welcher Grenzkorngröße es zur schnelleren Sedimentation kommt, d.h. aus welchen Partikelgrößen sich die effektiv explosionsfähige Atmosphäre zusammensetzt, ist jedoch von der Aufwirbelung abhängig, wodurch sich jedenfalls Abweichungen zwischen Labor- und Betriebsbedingungen ergeben.

- Da die Proben vor den Versuchen getrocknet wurden, kann es sein, dass die STK in einer Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit von den gemessenen Werten abweichen. Ab einem Wassergehalt von etwa 10 % kommt es zu einer merklichen Abschwächung der Explosionsheftigkeit. Die Trocknung der Proben ist nicht nur aus versuchstechnischen Gründen sinnvoll, sondern auch, um den geänderten Bedingungen in der Praxis Rechnung zu tragen. Es kann durchaus vorkommen, dass Stäube durch hohe Umgebungstemperaturen, Sonneneinstrahlung oder Erwärmung der Aggregate getrocknet werden.
- Im Betrieb kann es durch unterschiedliche Witterungsverhältnisse oder, bei Ablagerungen auf elektrischen Maschinen, durch verschiedene Betriebszustände zu wesentlichen Temperaturschwankungen kommen. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wurden die STK im Rahmen dieser Arbeit bei Standardbedingungen mit Temperaturabweichungen von maximal 5°C ermittelt. Bei höheren Umgebungstemperaturen kommt es zu einer Abschwächung der Explosionsheftigkeit und einer Absenkung der UEG. Die UEG wird bei einem Anstieg der Temperatur umso stärker verringert, je höher ihr Wert bei Raumtemperatur ist [24].
- In den Versuchen zeigte sich, dass die Zündenergie einen starken Einfluss auf die UEG hat. Aufgrund des Absinkens der UEG mit steigender Zündenergie ist es schwierig, diese Kennzahl für die, in der Betriebspraxis unbekannt, Zündenergie zu übernehmen. Da die Bestimmungen jedoch mit sehr hohen Zündenergien von 2000 bzw. 10000 J durchgeführt wurden, ist zu erwarten, dass die UEG bei den in der Regel schwächeren, in der Praxis vorkommenden Zündenergien, geringer sind.
- Vor allem die Turbulenzverhältnisse, die einen wichtigen Einfluss auf die sicherheitstechnischen Kenngrößen haben, können im Labor nicht jenen in der Praxis angepasst werden. Das Zusammenspiel von Zündquelle und Turbulenz kann aufgrund komplexer Anlagengeometrien nicht für jeden Praxisfall eigens untersucht werden. Wichtig ist allerdings, dass die Ergebnisse reproduzier- und vergleichbar sind.

Durch das Bestreben, in den Experimenten stets optimale Bedingungen für eine Staubexplosion zu finden, wird versucht, die fehlende Übereinstimmung mit der Praxis insofern auszugleichen, als Extremwerte ermittelt werden. Das bedeutet, dass im Labor der sicherheitstechnisch ungünstigste Fall simuliert wird und jede Abweichung in der Praxis zu einer Abschwächung führt.

Ausnahmen bilden die Gegenwart von Brenngas, ein erhöhter Umgebungsdruck oder die Verringerung der Korngrößen durch Mahl- oder Absetzeffekte, welche zu einer Verstärkung der Explosionsreaktion führen. Daher dürfen die im Labor bestimmten STK bei der sicherheitstechnischen Einschätzung nicht isoliert betrachtet werden, sondern es müssen immer auch die Bedingungen vor Ort in verschiedenen Betriebsfällen, wie Anfahren, Normalbetrieb oder Störfall berücksichtigt werden.

6 Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass es sich bei den Stäuben aus der abfallbehandelnden Industrie generell um eher schwach reagierende Stäube mit hohen unteren Explosionsgrenzen und Mindestzündenergien handelt. Die Gründe hierfür liegen einerseits in den großen Korngrößen und andererseits in den hohen Inertgehalten. Da es kaum Daten für Stäube aus der mechanischen Abfallaufbereitung gibt, und sich auch die recherchierten Literaturdaten der Reinstäube meist auf den Feinanteil kleiner $63\ \mu\text{m}$ beziehen, ist ein Vergleich schwierig.

Dass die untersuchten Stäube der Staubexplosionsklasse 1 zuzuordnen sind, bedeutet nicht, dass von ihnen generell keine Gefahr ausgeht. Vor allem das Risiko der Entzündung durch eine primäre Explosion muss bei der sicherheitstechnischen Auslegung eines Bereiches mit abgelagertem Staub berücksichtigt werden. Hierbei sind Schutzmaßnahmen, wie regelmäßige Beseitigung der Ablagerungen durch geeignete Reinigungsverfahren, zu treffen.

Die UEG konnte bei mehr als der Hälfte der Proben, die mittels 2 kJ-Zündern untersucht wurden, nicht genau bestimmt werden, da sie über 1750 bzw. $2000\ \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ lag und ein weiteres Anheben der Konzentration zur Verstopfung der Versuchsapparatur geführt hätte. Für zukünftige UEG-Untersuchungen sollte daher die Versuchsdurchführung angepasst werden, indem die Versuche mit stärkeren Zündern durchgeführt werden. Hierbei muss jedoch die Abhängigkeit der UEG von der Zündenergie berücksichtigt werden. Bei jenen Proben, die sowohl mit der vom Hersteller empfohlenen geringeren Zündenergie als auch mit 10 kJ-Zündern untersucht wurden, wurden starke Unterschiede in den Ergebnissen festgestellt. Bei einer hohen Zündenergie besteht außerdem die Gefahr, dass es zu Überlagerungseffekten kommt, die das Ergebnis verfälschen.

Bei der Mindestzündenergiebestimmung lagen die meisten der untersuchten Proben über der Bestimmungsgrenze von 1 J. Dies ist im Bezug auf die Entzündbarkeit der Stäube ein durchaus positives Ergebnis. Aufgrund der geringen Anzahl an untersuchten Proben können jedoch keine zuverlässigen Aussagen über den Zusammenhang der Mindestzündenergie mit anderen STK, Inertanteil oder Medianwert getroffen werden.

Da allgemeingültige Trends und Zusammenhänge nur auf Basis einer großen Anzahl an Versuchsdaten gefunden werden können, sind weitere Untersuchungen sicherheitstechnischer Kenngrößen notwendig.

Der Einfluss des Inertgehalts sollte dahingehend untersucht werden, dass eine grobe Voreinschätzung der STK ausgehend von dieser Einflussgröße möglich ist. Besonders wichtig ist es, den Grenzwert zu finden, ab dem ein Staub nicht mehr explosionsfähig ist. Unter Zugabe von inertem Material sollte das Absenken bzw. Ansteigen der STK ermittelt werden.

Während sich die Abschwächung der Explosionsheftigkeit bei steigendem Inertgehalt wie erwartet in den Versuchsergebnissen widerspiegelt, konnte kein eindeutiger Zusammenhang mit dem Medianwert und der Korngrößenverteilung bestätigt werden. Dies mag an den generell sehr ho-

hen Medianwerten liegen. Bei zukünftigen Untersuchungen sollten zusätzlich die Feinanteile mit Medianwerten von unter $63\ \mu\text{m}$ untersucht werden, um eine bessere Vergleichbarkeit mit Literaturdaten zu ermöglichen, und weil die Reaktionsfähigkeit in diesem Korngrößenbereich einen Höhepunkt erreicht.

Die Versuche ergaben, dass die Explosionsheftigkeit in manchen Fällen unabhängig von Medianwert, Korngrößenverteilung und Inertanteil zu sein scheint. Es müssen also weitere aussagekräftige Einflussgrößen gefunden werden. Besonders wichtig scheint in diesem Zusammenhang die chemische Zusammensetzung der Proben zu sein. Für die Zukunft ist zu untersuchen, welche Bestandteile des Staubes einen wesentlichen Einfluss haben und wie diese auf eine möglichst unkomplizierte Weise bestimmt werden können. Auch den unterschiedlichen Kornformen und ihren Auswirkungen sollte besonderes Augenmerk geschenkt werden.

Die Bestimmung im Labor ist zeit- und kostenaufwendig, weshalb eine Möglichkeit gefunden werden soll, die STK unbekannter Stäube durch Vergleich mit ähnlichen Stäuben aus einer Datenbank abzuschätzen. Dafür ist es wichtig, die Versuchsmethoden und -bedingungen sowie die Eigenschaften der untersuchten Probe und deren Herkunft genau zu kennen und anzugeben. Zuerst müssen also jene Einflussparameter, die in einen eindeutigen Zusammenhang mit der Explosionsfähigkeit gebracht werden können, identifiziert werden. Anschließend werden diese für eine große Anzahl an Proben erfasst, um die Abhängigkeiten quantifizieren zu können. Im Idealfall kann dann eine theoretische Beziehung zwischen Einflussgrößen und sicherheitstechnischen Kenngrößen aufgestellt werden.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Anteil unterschiedlicher Arten von Staub als Ausgangsmaterial von Staubexplosionen [2]	1
1.2	Voraussetzungen für die Entstehung einer Staubexplosion	3
2.1	Ausführungsbeispiele der explosionstechnischen Entkopplung	13
3.1	Vergrößerung der Oberfläche durch Verringerung der Korngröße	15
3.2	Explosionsgrenzen [12]	16
3.3	Mindestzündenergiebereiche von Gasen und Stäuben im Vergleich mit praxisnahen Zündquellen [12]	17
3.4	Prozentualer Anteil unterschiedlicher Zündquellen als Auslöser von Staubexplosionen [2]	18
3.5	Mindestzündenergien von Staub-Luft-Gemischen aus Aluminium, Polyethylen und optischem Aufheller in Abhängigkeit vom Medianwert [7]	19
3.6	Exemplarischer Verlauf von Mindestzündenergie und Explosionsrate in Abhängigkeit von der Staubkonzentration [16]	20
3.7	Mindestzündenergie in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt [18]	21
3.8	Zusammenhang Mindestzündenergie und Zündverzögerungszeit [7]	22
3.9	Zusammenhang Mindestzündenergie und Dauer der Funkenentladung	22
3.10	Modifiziertes Hartmannrohr [2]	23
3.11	Mindestzündenergiebereich [19]	24
3.12	Unterschiedliche Ausführungen des Entladekreises bei der Mindestzündenergiebestimmung [1]	25
3.13	Direkte Entladung eines Hochspannungskondensators ohne bzw. mit Induktivität [1]	25
3.14	Vergleich des explosionsfähigen Konzentrationsbereichs eines organischen Staubes (Maisstärke) mit dem Bereich der industriellen Hygiene und der Staubablagerungen [1]	27
3.15	Druckwelle einer primären Explosion als Grundlage für eine sekundäre Explosion [1]	27
3.16	Zusammenhang von Schüttdichte und Dicke einer Ablagerung mit der Konzentration und Höhe der daraus gebildeten Staubwolke [1]	28
3.17	Einfluss des Medianwerts auf die untere Explosionsgrenze von unterschiedlich flüchtigen Kohlenstäuben und Polyethylen [1]	29

3.18	Einfluss des Medianwerts auf die untere Explosionsgrenze von Kohlenstäuben mit engen (●) und breiten (×) Korngrößenverteilungen [20]	29
3.19	Verlauf der UEG verschiedener Stäube in Abhängigkeit von der Zündenergie [7] .	30
3.20	Messwerte der UEG unterschiedlicher Stäube in Abhängigkeit von der Zündenergie, gemessen jeweils in der 20-l-Apparatur und der 1-m ³ -Apparatur [21] . . .	31
3.21	Vergleich der thermochemisch berechneten UEG mit der experimentell bestimmten UEG unterschiedlicher Stäube [18]	32
3.22	1-m ³ -ISO-Gefäß [6]	33
3.23	Skizze des Versuchsaufbaus der 20-l-Apparatur zur Bestimmung von p_{\max} , K_{St} und UEG [22]	34
3.24	Zeitlicher Druckverlauf im Staubvorratsbehälter und im Explosionsraum bei der Explosionskenngrößenbestimmung in der 20-l-Apparatur [7]	34
3.25	Zeitlicher Druckverlauf einer Staubexplosion mit maximalem Druckanstieg und maximalem Explosionsdruck	35
3.26	Verlauf des Explosionsdrucks und des zeitlichen Druckanstiegs in Abhängigkeit von der Staubkonzentration	36
3.27	Maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert in Abhängigkeit des Medianwertes [18]	37
3.28	K_{St} -Wert und maximaler Explosionsdruck von Steinkohlestaub mit enger (●) sowie breiter (×) Korngrößenverteilung in Abhängigkeit vom Medianwert [20]	38
3.29	Explosionskenngrößen von Aluminiumstaub in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche [18]	38
3.30	Maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert von Torf, Tobiassäure und Cellulose in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt [18]	39
3.31	Einfluss der Zündverzögerungszeit auf den maximalen Explosionsdruck sowie den maximalen Druckanstieg, gemessen in einer 1,2-l-Hartmann-Apparatur; 5 Versuche pro Zündverzögerungszeit [1]	40
3.32	Explosionskenngrößen unterschiedlicher leicht entzündlicher Stäube in Abhängigkeit von der Zündenergie [24]	41
3.33	Explosionskenngrößen verschiedener schwer entzündlicher Stäube in Abhängigkeit von der Zündenergie [24]	41
3.34	Maximaler Explosionsdruck und Druckanstieg als Ergebnisse der Untersuchung in der 20-l-Apparatur der Firma Kühner [24]	43
3.35	Mittelwerte der unteren Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stoffgruppen [1][7][25]	44
3.36	Mittelwerte der maximalen Explosionsdrücke von unterschiedlichen Stoffgruppen [1][7][25]	45
3.37	Mittelwerte der K_{St} -Werte unterschiedlicher Stoffgruppen [1][7][25]	46
3.38	Häufigkeit der Mindestzündenergiebereiche unterschiedlicher Stoffgruppen [1][7][25]	46
4.1	Aufbereitungsschritte bei der Ersatzbrennstoffherzeugung [26]	47
4.2	Rückstandsanteile der Korngrößenklassen der Probe Nr. 6	49
4.3	Aufbau der 20-l-Apparatur zur Bestimmung von p_{\max} und K_{St} [29]	50
4.4	Beispielhafter Druckverlauf eines Kontrollversuches [24]	51

4.5	Vorderansicht der montierten Zünder [24]	52
4.6	Druckverlauf einer Staubexplosion von Lycopodium bei $500 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ [24]	53
4.7	Bild der MIKE-3-Apparatur ohne Bedienungselemente [19]	55
4.8	Vorgehensweise bei der Bestimmung der Mindestzündenergie	57
5.1	Graphische Darstellung der maximalen Explosionsdrücke mit Schwankungsbreite um den Mittelwert	61
5.2	Grafische Darstellung des volumsunabhängigen maximalen Druckanstiegs mit Schwankungsbreite um den Mittelwert	63
5.3	Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte über Medianwerte	63
5.4	Unterschiedliche Korngrößenverteilungen mit gleichen Medianwerten	64
5.5	Korngrößenverteilungen	64
5.6	Korngrößenverteilungen der Proben Nr. 4, 15 und 16	65
5.7	Korngrößenverteilungen der Proben Nr. 1, 3, 9, 14, 17 und 19	66
5.8	Korngrößenverteilungen der Proben Nr. 9, 13 und 20	68
5.9	Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte über Inertanteil	68
5.10	Maximale Explosionsdrücke und K_{St} -Werte über den Inertanteil im Vergleich mit den Literaturwerten von Reinstoffen	69
5.11	Versuchsergebnisse untere Explosionsgrenzen	73
5.12	Vergleich der mit 2 kJ-Zündern und 10 kJ-Zündern bestimmten unteren Explosionsgrenzen	74
5.13	Untere Explosionsgrenze über Medianwert	75
5.14	Untere Explosionsgrenze über Inertanteil	77
5.15	Versuchsergebnisse Mindestzündenergie	80
5.16	Vergleich der Explosionsheftigkeit mit der Mindestzündenergie	81
5.17	Mindestzündenergie im Zusammenhang mit der unteren Explosionsgrenze	82
5.18	Mindestzündenergie über Medianwert	82
5.19	Mindestzündenergie über Inertanteil	83
7.1	Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Holz mit Mittelwertslinie [1][7][25]	103
7.2	Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Kunststoff mit Mittelwertslinie [1][7][25]	104
7.3	Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Papier mit Mittelwertslinie [1][7][25]	105
7.4	Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Stoffgemische mit Mittelwertslinie [1][7][25]	106
7.5	Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Textilien mit Mittelwertslinie [1][7][25]	107
7.6	Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Abfall mit Mittelwertslinie [1][7][25]	108
7.7	Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Holz mit Mittelwertslinie [1][7][25]	108

7.8	Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Kunststoffe mit Mittelwertslinie [1][7][25]	109
7.9	Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Papier mit Mittelwertslinie [1][7][25]	110
7.10	Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Stoffgemische mit Mittelwertslinie [1][7][25]	111
7.11	Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Textilien mit Mittelwertslinie [1][7][25]	112
7.12	K_{St} -Werte unterschiedlicher Stäube der Gruppe Holz mit Mittelwertslinie [1][7][25]	112
7.13	K_{St} -Werte unterschiedlicher Stäube der Gruppe Kunststoffe mit Mittelwertslinie [1][7][25]	113
7.14	K_{St} -Werte unterschiedlicher Stäube der Gruppe Papier, Zellstoff mit Mittelwertslinie [1][7][25]	114
7.15	K_{St} -Werte unterschiedlicher Stäube der Gruppe Stoffgemische mit Mittelwertslinie [1][7][25]	115
7.16	K_{St} -Werte zweier Stäube der Gruppe Textilien mit Mittelwertslinie [1][7][25] . . .	115

Tabellenverzeichnis

2.1	Zoneneinteilung für aus Staub-Luft-Gemischen bestehende explosionsfähige Atmosphären [9]	8
2.2	Zusammenhang der Zoneneinteilung nach VEXAT mit den Gerätekategorien gemäß Explosionsschutzverordnung 1996 [9][13]	9
3.1	Staubexplosionsklassen [7]	36
4.1	Tabelle mit den Ergebnissen der Siebanalyse der Probe Nr. 6	49
4.2	Tolerierte Abweichungen des K _{max} -Wertes von den Maximalwerten der einzelnen Serien [24]	54
4.3	Kriterien für Entzündung bei einer Zündenergie von 2 kJ [24]	54
4.4	Kriterien für Entzündung bei einer Zündenergie von 10 kJ [24]	55
4.5	Statistische Mindestzündenergie für zwei unterschiedlich reaktive Stäube im gleichen Energiebereich	58
5.1	Übersicht Proben	60
5.2	Ergebnistabelle maximaler Explosionsdruck	61
5.3	Ergebnistabelle K _{St} -Wert	62
5.4	Tabelle mit Einflussgrößen und Ergebnissen der Proben 4, 15, 16	65
5.5	Tabelle mit Einflussgrößen und Ergebnissen der Proben 1, 3, 9, 14, 17, 19	66
5.6	Tabelle mit Einflussgrößen und Ergebnissen der Proben 9, 13 und 20	67
5.7	Maximale Explosionsdrücke und K _{St} -Werte sowie Einflussgrößen von Stäuben der AVE Hörsching	70
5.8	Maximale Explosionsdrücke und K _{St} -Werte sowie Einflussgrößen von Stäuben des Thermoteam Retznei	70
5.9	Maximale Explosionsdrücke und K _{St} -Werte sowie Einflussgrößen von Stäuben von Saubermacher, Wien Oberlaa	71
5.10	Maximale Explosionsdrücke und K _{St} -Werte sowie Einflussgrößen von Stäuben mit stark vom Mittelwert abweichenden STK	72
5.11	Ergebnisse der unteren Explosionsgrenze bei 2 kJ-Zündern und bei 10 kJ-Zündern	74
5.12	Ergebnistabelle Untere Explosionsgrenze mit Quotient $\frac{x_{90}}{x_{10}}$	76
5.13	Untere Explosionsgrenzen sowie Einflussgrößen von Stäuben des Thermoteam Retznei	77
5.14	Untere Explosionsgrenzen sowie Einflussgrößen von Stäuben von Saubermacher, Wien Oberlaa	77

5.15 Gruppe der Stäube, deren UEG nicht mittels 2 kJ-Zündern bestimmt werden konnten	78
5.16 Gruppe der Stäube, deren UEG mittels 2 kJ-Zündern bestimmt werden konnten .	78
5.17 Tabelle mit den Ergebnissen der statistischen Mindestzündenergie	80
5.18 Mindestzündenergien der Stäube aus der AVE Redlham	83
5.19 Stäube mit Mindestzündenergien innerhalb der Bestimmungsgrenzen der MIKE-3-Apparatur	84
5.20 Stäube mit Mindestzündenergien über 1000 mJ	84
5.21 Nominal-, Maximal- und Minimalwert der durch den Funken übertragenen Energie bei der Mindestzündenergiebestimmung mittels MIKE-3-Apparatur [19]	90

Literaturverzeichnis

- [1] Eckhoff, R. K.: Dust Explosions in the Process Industries: Gulf Professional Publishing, 2003
- [2] R. STAHL Schaltgeräte GmbH: Grundlagen Staub-Explosionsschutz, <http://www.stahl.de> (5. April 2013)
- [3] Ebadat, V.: Dust explosion hazard assessment, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 23 (2010), S. 907 - 912
- [4] ÖNORM EN 1127 - 1, Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Teil 1: Grundlagen und Methodik, 2008
- [5] Kepplinger W., Friedacher A.: Anlagentechnik I & II, Leoben: Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, 2007
- [6] Steen, H. (Hrsg.): Handbuch des Explosionsschutzes, Weinheim: Wiley-VCH, 2000
- [7] Bartknecht, W.: Staubexplosionen - Ablauf und Schutzmaßnahmen, Berlin (u.a.): Springer, 1987
- [8] Kuhlmei, J.: Explosionsschutz in Europa - Elektrische Betriebsmittel Grundlagen, Richtlinien, Normen, Fulda: JUMO GmbH & Co.KG, 2008
- [9] BGBl. II Nr. 156/2005. Verordnung der Bundesregierung über den Schutz der Bediensteten vor explosionsfähigen Atmosphären (B-VEXAT).
- [10] Wirtschaftskammer Österreich, Bundesinnung der Kunststoffverarbeiter: Leitfaden für die Erstellung eines Explosionsschutzdokumentes (ExSD) für das „Kunststoffverarbeitende Gewerbe“: <http://www.eval.at> (11. April 2013)
- [11] Rangel, E. Jr.: Zoneneinteilung - Normen, Theorie und Praxis, Ex-Zeitschrift 42 (2010), S.16-22
- [12] Siemens AG, Automation and Drives, Low-Voltage Controls and Distribution: Explosionsschutz (ATEX) - Grundlagen: <http://www.siemens.de> (19. April 2013)
- [13] BGBl. Nr. 252/1996. Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (Explosionsschutzverordnung 1996 - ExSV 1996).

- [14] GMBI Nr. 21/2012. TBRS 2152 Teil 4, Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken: <http://www.baua.de> (11. April 2013)
- [15] BOMAFA Armaturen GmbH: <http://www.bomafa.com> (23. April 2013)
- [16] Eckhoff, R. K.: Explosion Hazards in the Process Industries, Houston: Gulf Publishing Company, 2005
- [17] GMBI Nr. 15/16/2009. TBRS 2153, Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen: <http://www.baua.de> (11. April 2013)
- [18] Bartknecht, W.; Zwahlen G.: Explosionsschutz - Grundlagen und Anwendung, Berlin (u.a.): Springer, 1993
- [19] Cesana C., Siwek R.: Handbuch MIKE 3 Mindestzündenergie-Apparatur 3.4, Birsfelden: Kühner AG, 2010
- [20] Cashdollar, K. L.: Overview of dust explosibility characteristics, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13 (2000), S. 183-199
- [21] Going, J. E.; Chatrathi, K.; Cashdollar, K. L.: Flammability limit measurements for dusts in 20-L and 1-m³ vessels, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13 (2000), S. 209-219
- [22] Dastidar, A. G.; Amyotta, P. R.; Pegg, M. J.: Factors influencing the suppression of coal dust explosions, Fuel, 76 (1997), No. 7, S. 663-670
- [23] ÖNORM EN 14034-1, Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes p_{\max} von Staub/Luft-Gemischen, 2005
- [24] Cesana C., Siwek R.: Betriebsanleitung 20-l-Apparatur 6.0, Birsfelden: Kühner AG, 2001
- [25] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: GESTIS-Staub-Ex Datenbank Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben, <http://www.dguv.de> (11. April 2013)
- [26] Doppstadt: Aufbereitung von Ersatzbrennstoff, <http://www.doppstadt.com> (11. April 2013)
- [27] ÖNORM EN 14775, Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes, 2009
- [28] DIN 66165, Partikelgrößenanalyse; Siebanalyse; Teil 1: Grundlagen, Teil 2: Durchführung, 1987
- [29] Held, K.; Kerschbaumer, C.; Spijker, C.; Raupenstrauch, H.: WasteX: Explosionsschutz in Abfallbehandlungsanlagen, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157 (2012), Nr. 8/9, S. 345-353

- [30] Weiß, C.: Stoffbilanzen und Stoffeigenschaften, Leoben: Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, 2010
- [31] ÖNORM EN 15403, Feste Sekundärbrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes, 2011

7 Anhang

In den folgenden Abbildungen 7.1 bis 7.16 sind die in der Literatur recherchierten Daten für die sicherheitstechnischen Kenngrößen unterschiedlicher Stäube dargestellt. Die Stäube sind zum Großteil der GESTIS-Staub-Ex Datenbank der DGUV [25] entnommen. In den Diagrammen sind jene Daten, die aus dem Buch „Dust Explosions in the Process Industries“ [1] entnommen wurden, mit (1), jene aus „Staubexplosionen – Ablauf und Schutzmaßnahmen“ [7] mit (2) gekennzeichnet. Sofern nicht anders angegeben, liegt der Medianwert der Stäube unter $63\ \mu\text{m}$ und der Feuchtegehalt ist vernachlässigbar gering.

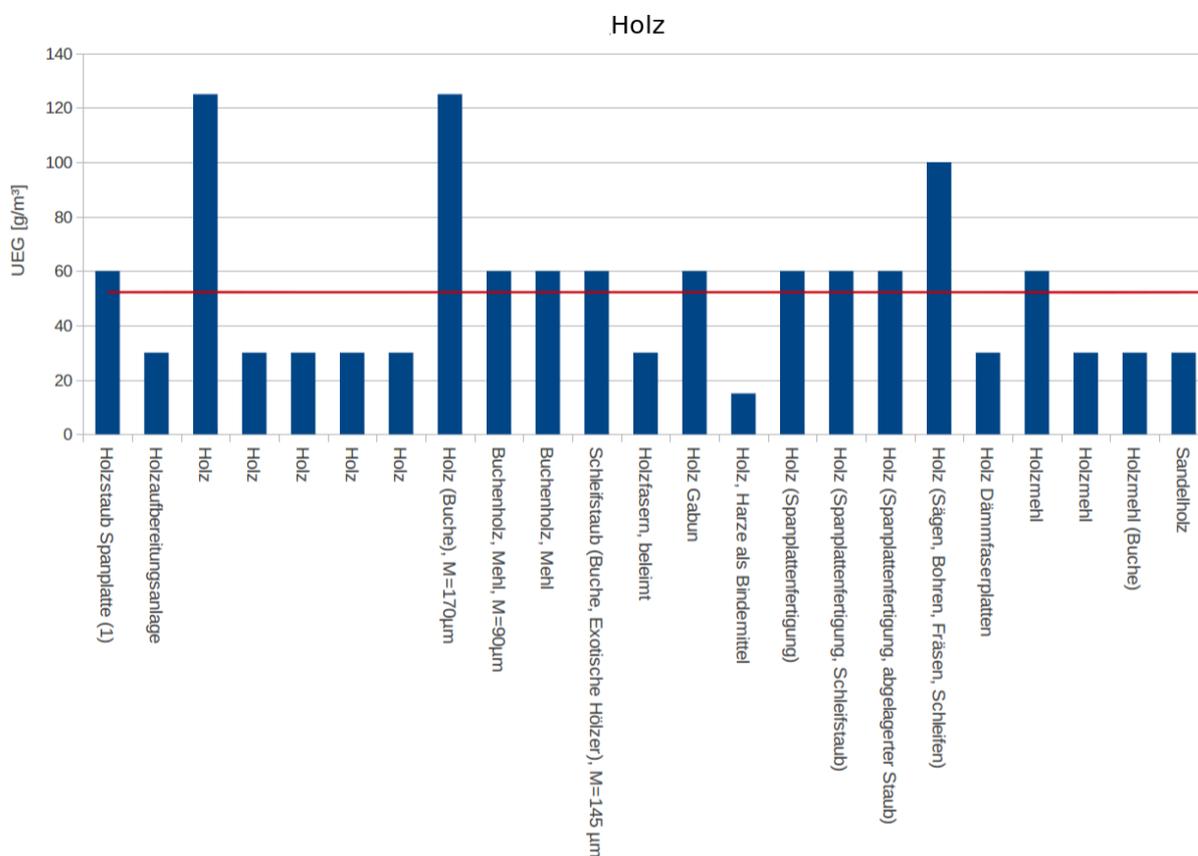


Abbildung 7.1: Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Holz mit Mittelwertslinie [1][7][25]

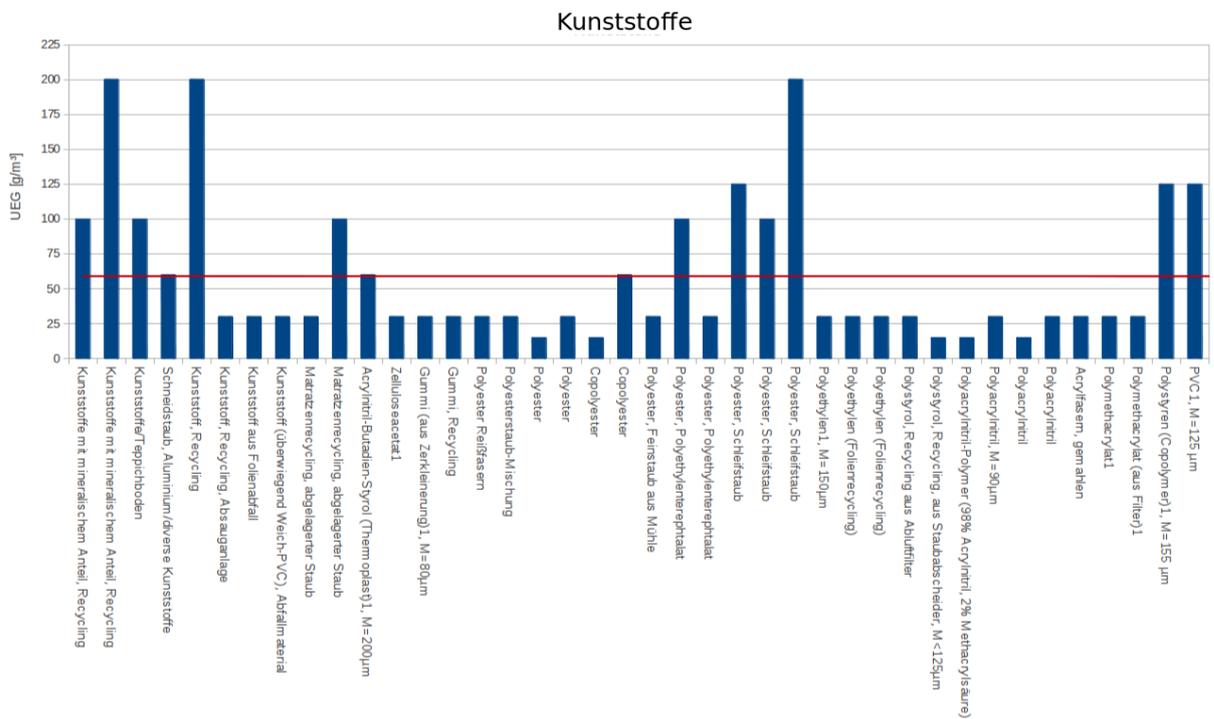


Abbildung 7.2: Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Kunststoff mit Mittelwertslinie [1][7][25]

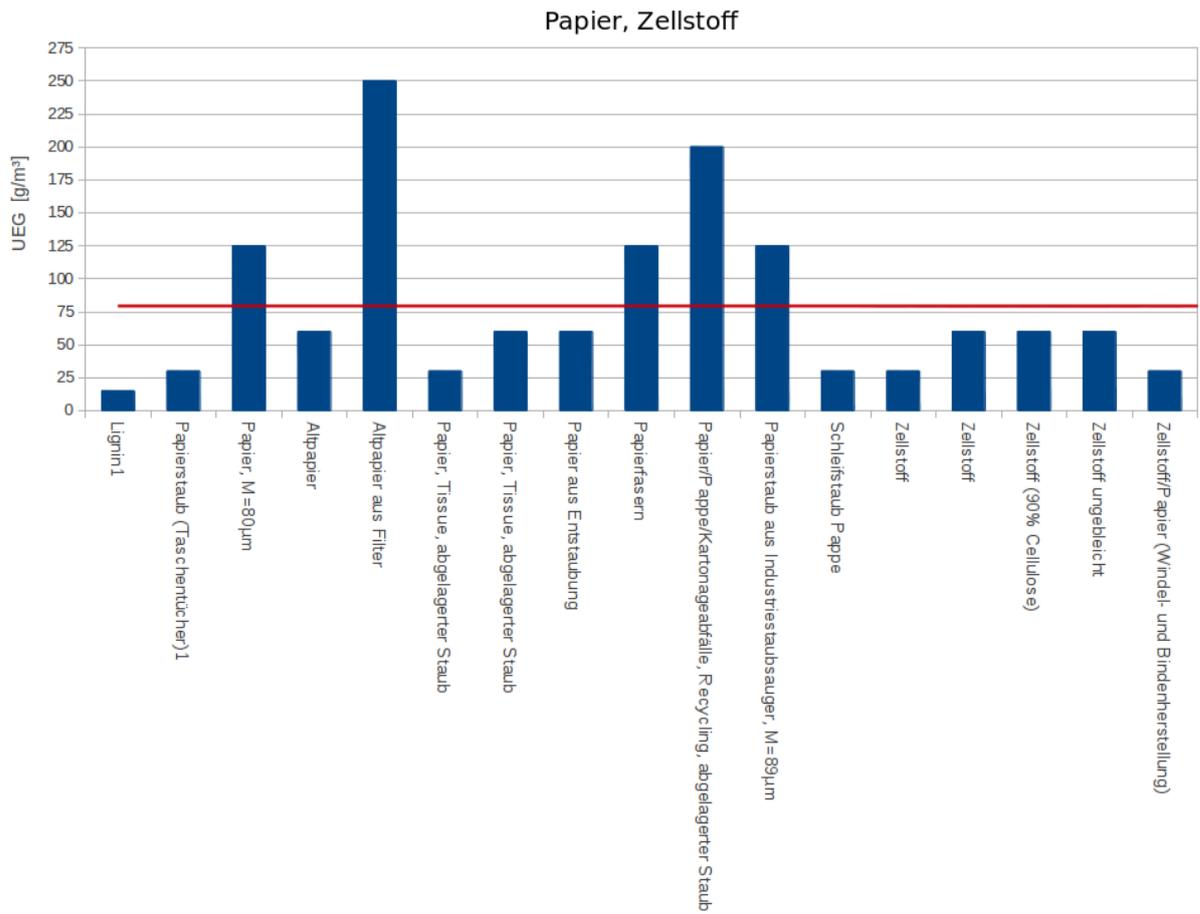


Abbildung 7.3: Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Papier mit Mittelwertlinie [1][7][25]

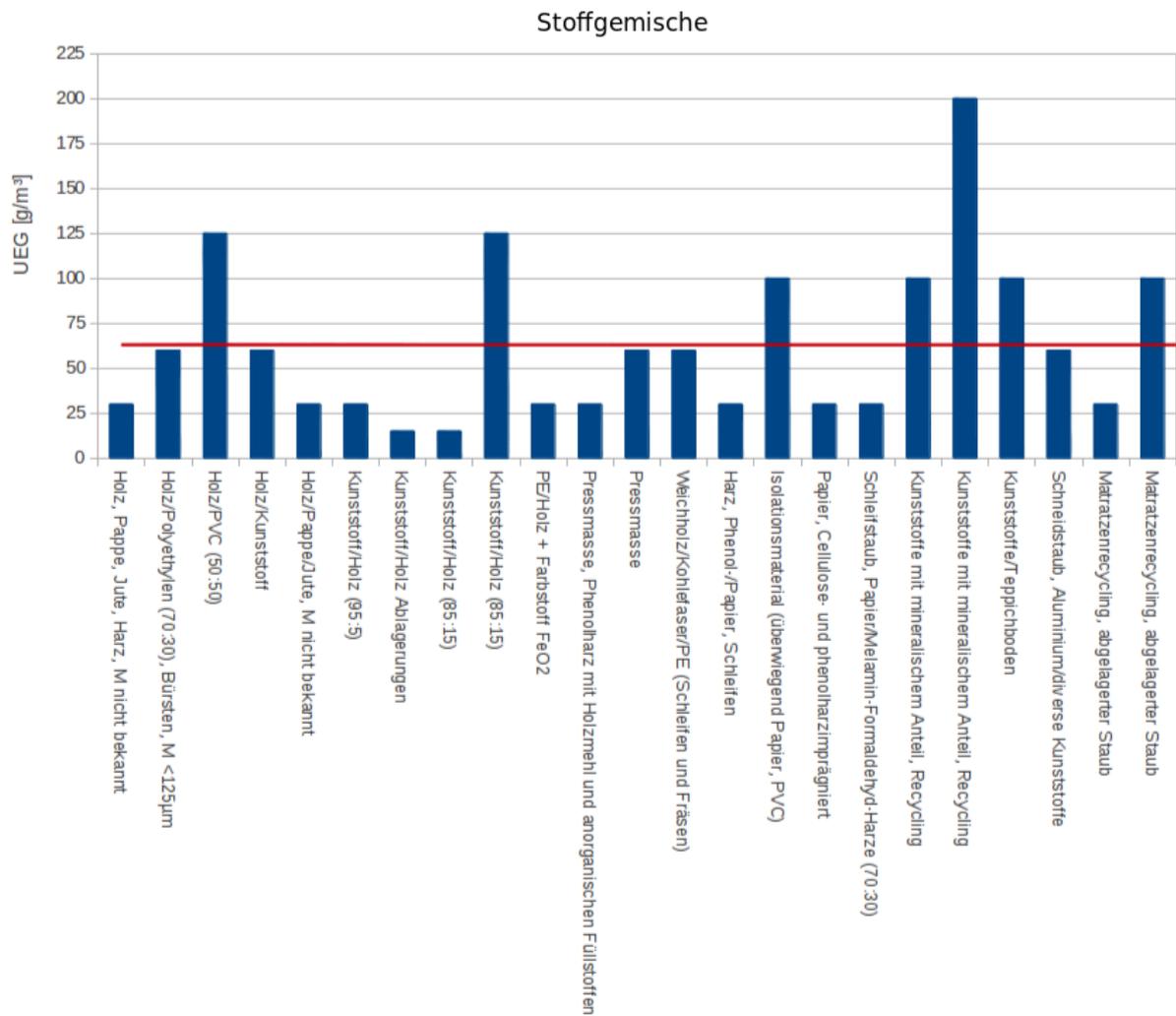


Abbildung 7.4: Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Stoffgemische mit Mittelwertslinie [1][7][25]

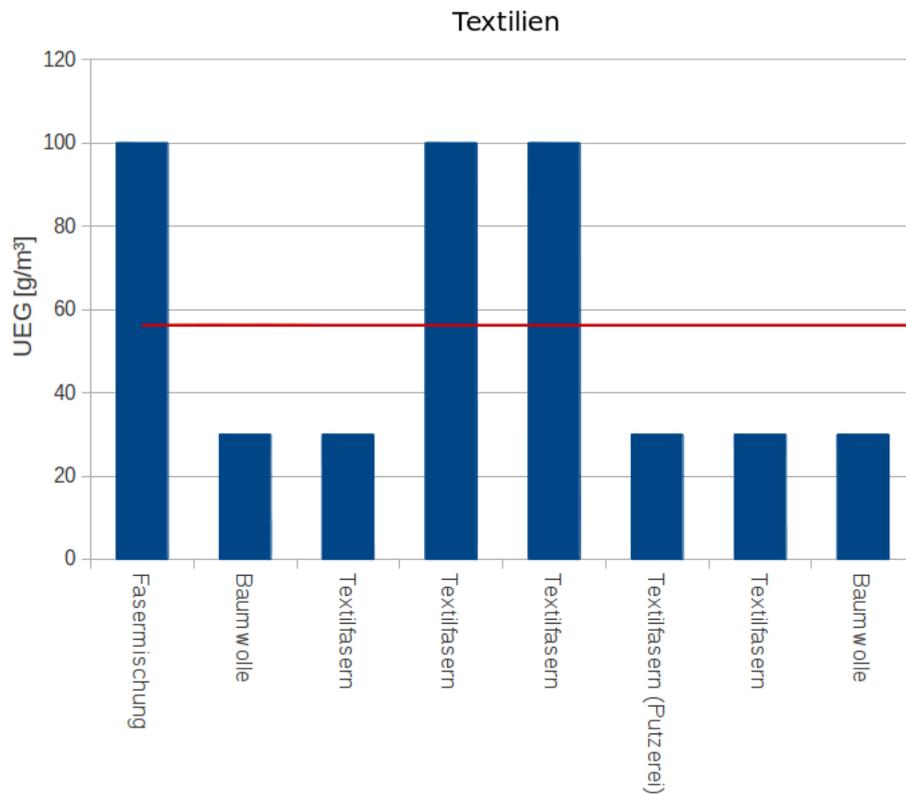


Abbildung 7.5: Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Textilien mit Mittelwertlinie [1][7][25]

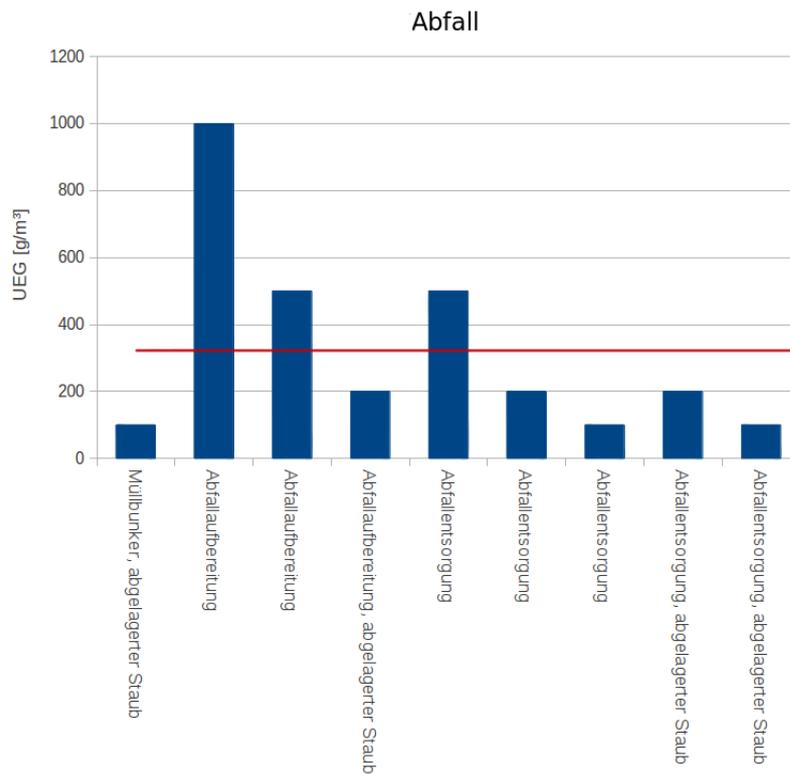


Abbildung 7.6: Untere Explosionsgrenzen unterschiedlicher Stäube der Gruppe Abfall mit Mittelwertlinie [1][7][25]

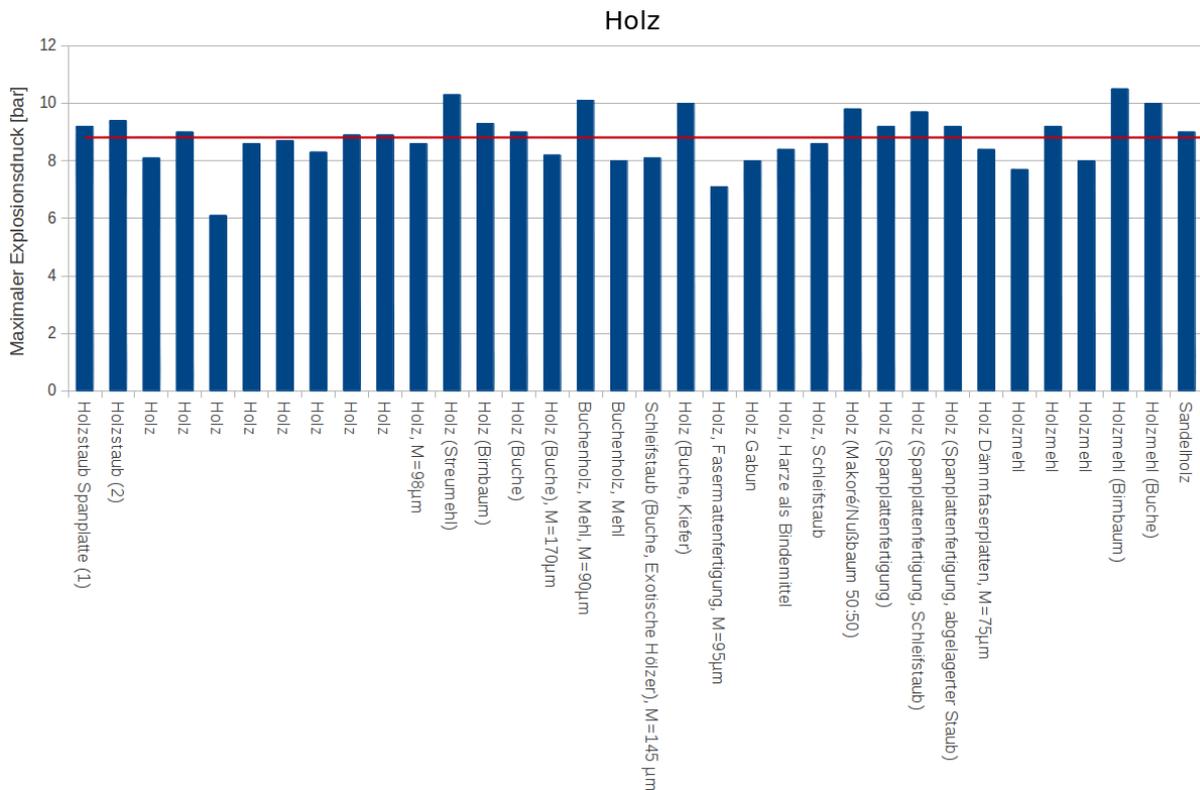


Abbildung 7.7: Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Holz mit Mittelwertlinie [1][7][25]

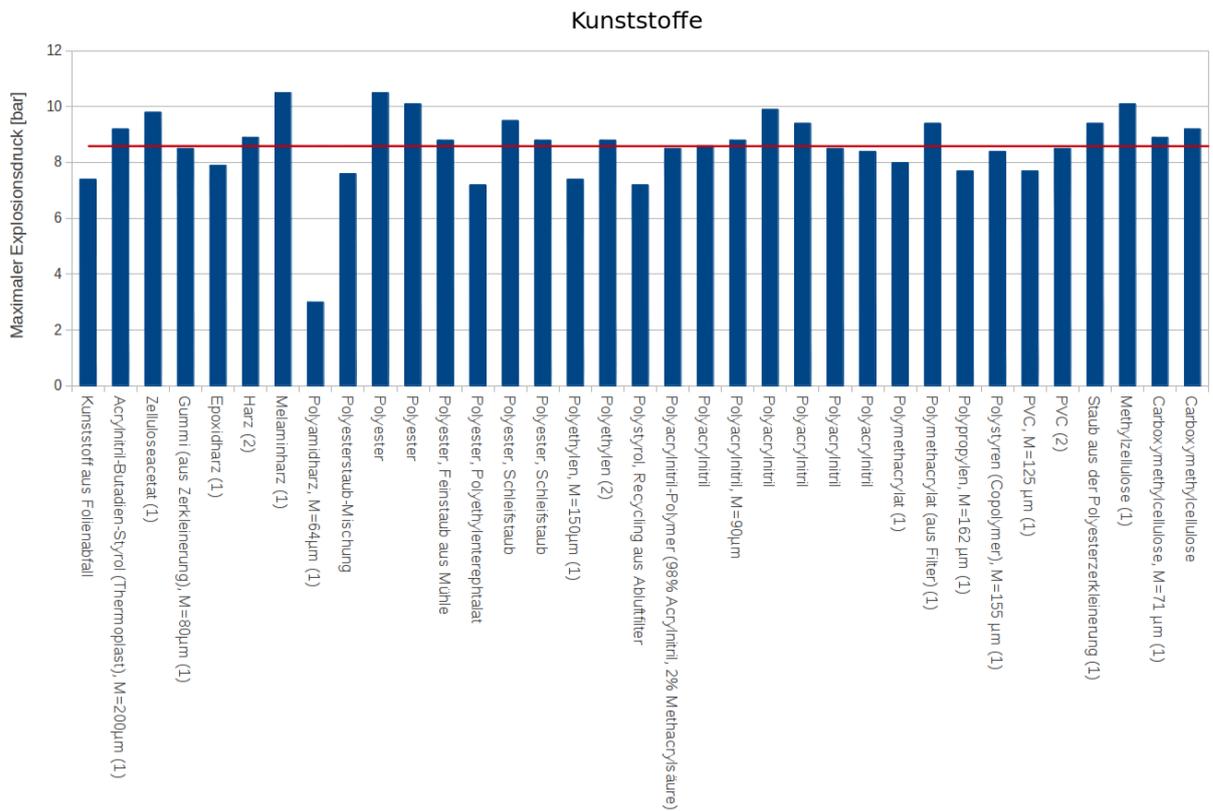


Abbildung 7.8: Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Kunststoffe mit Mittelwertlinie [1][7][25]

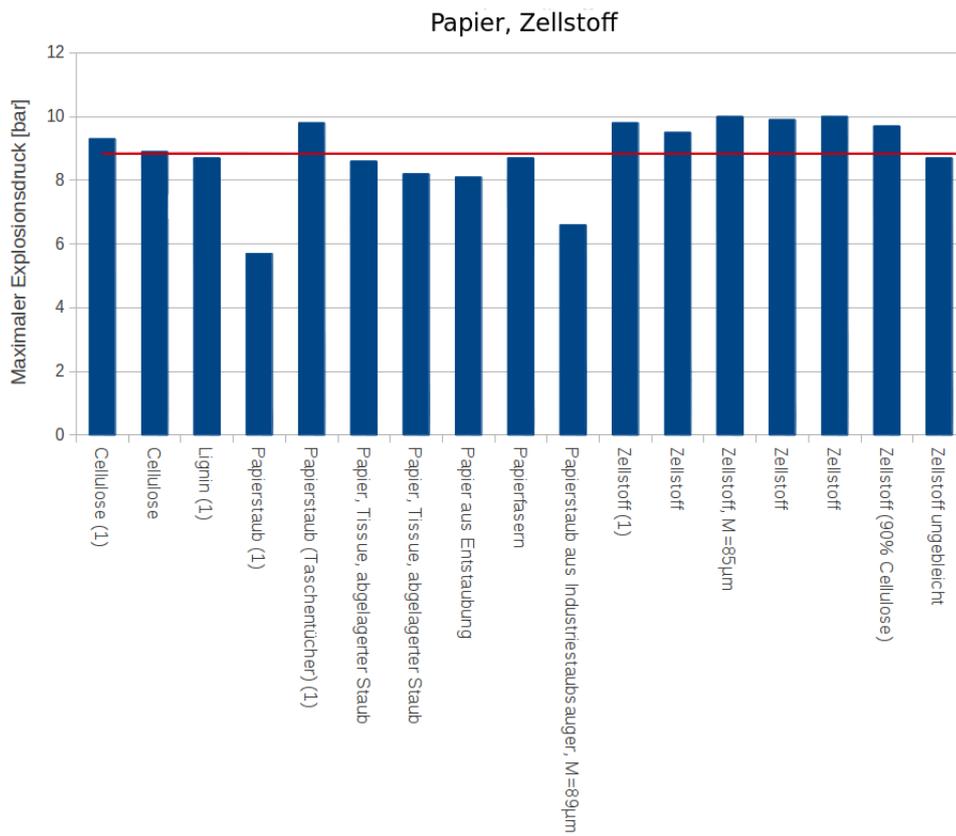


Abbildung 7.9: Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Papier mit Mittelwertlinie [1][7][25]

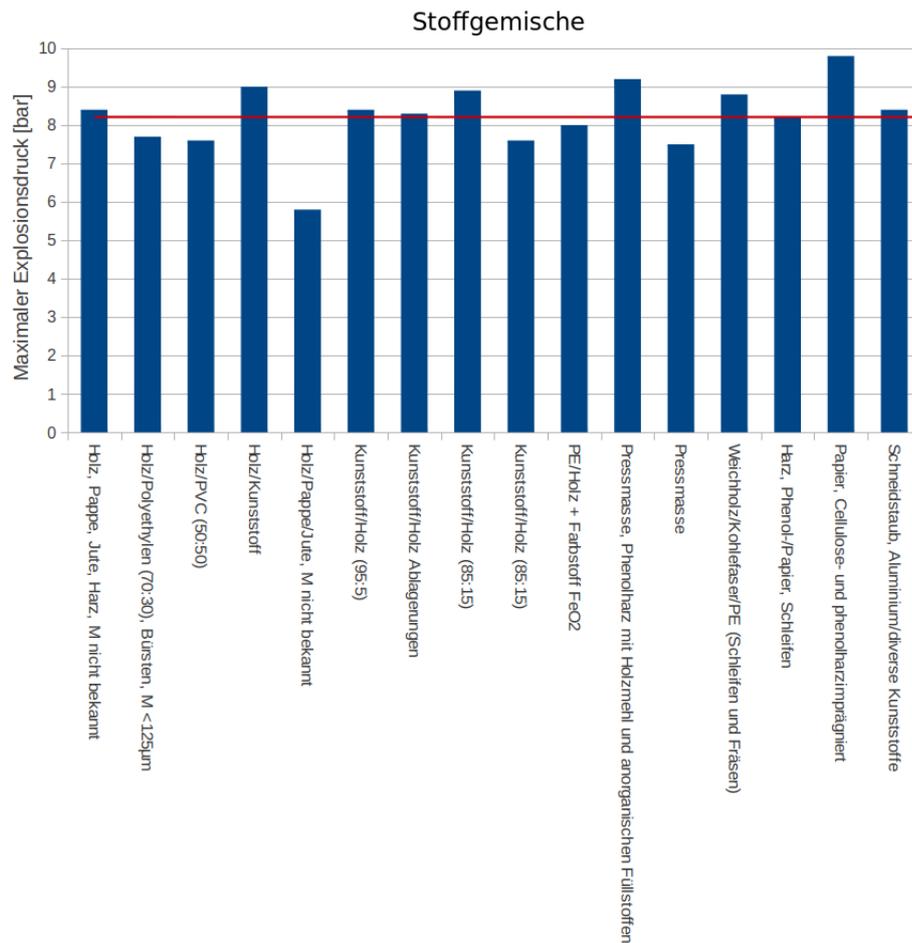


Abbildung 7.10: Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Stoffgemische mit Mittelwertlinie [1][7][25]

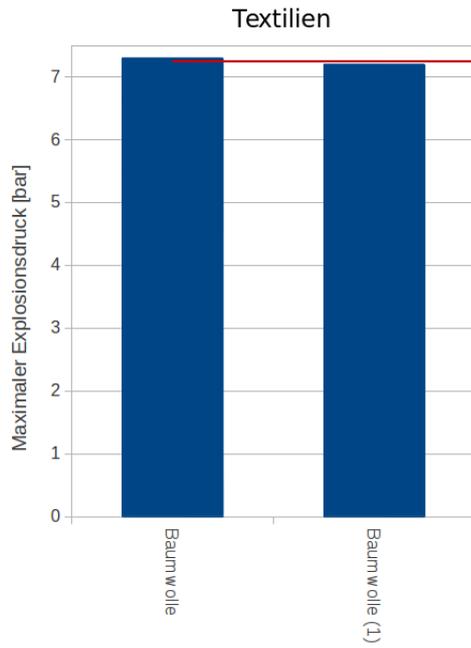


Abbildung 7.11: Maximale Explosionsdrücke unterschiedlicher Stäube der Gruppe Textilien mit Mittelwertslinie [1][7][25]

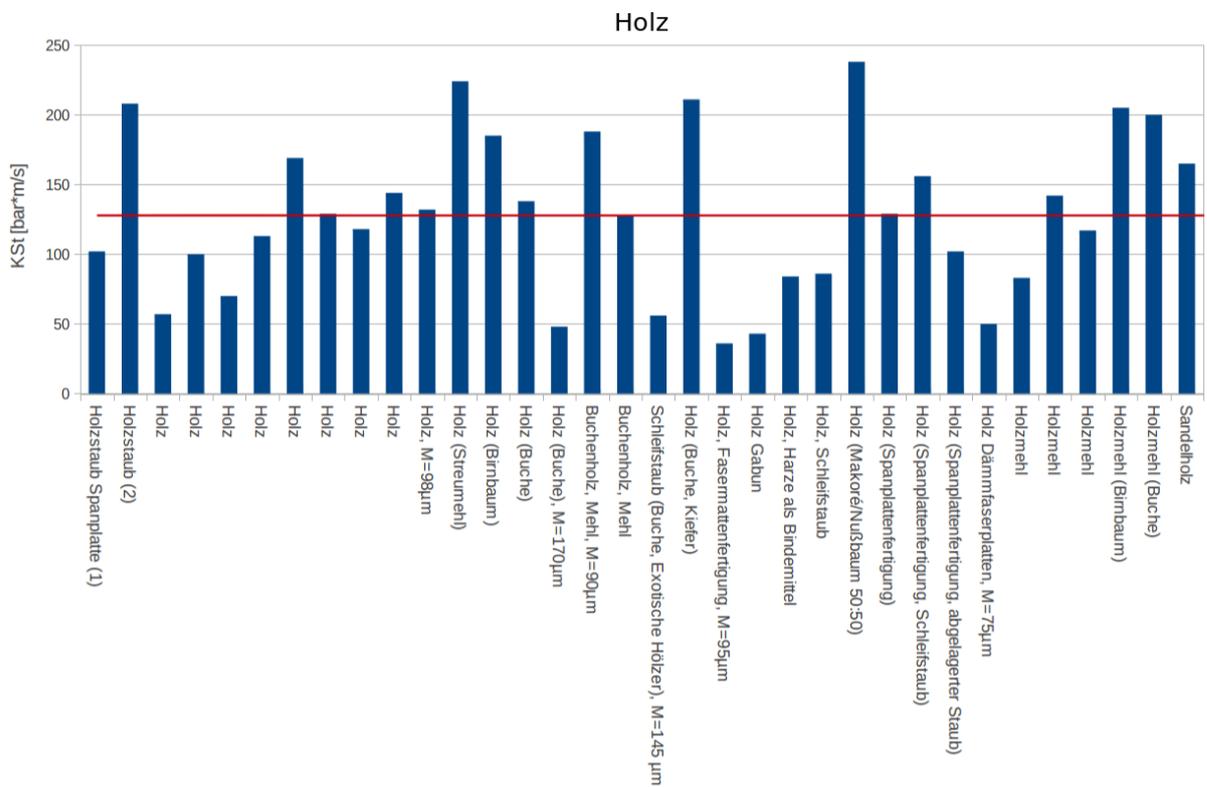


Abbildung 7.12: K_{St} -Werte unterschiedlicher Stäube der Gruppe Holz mit Mittelwertslinie [1][7][25]

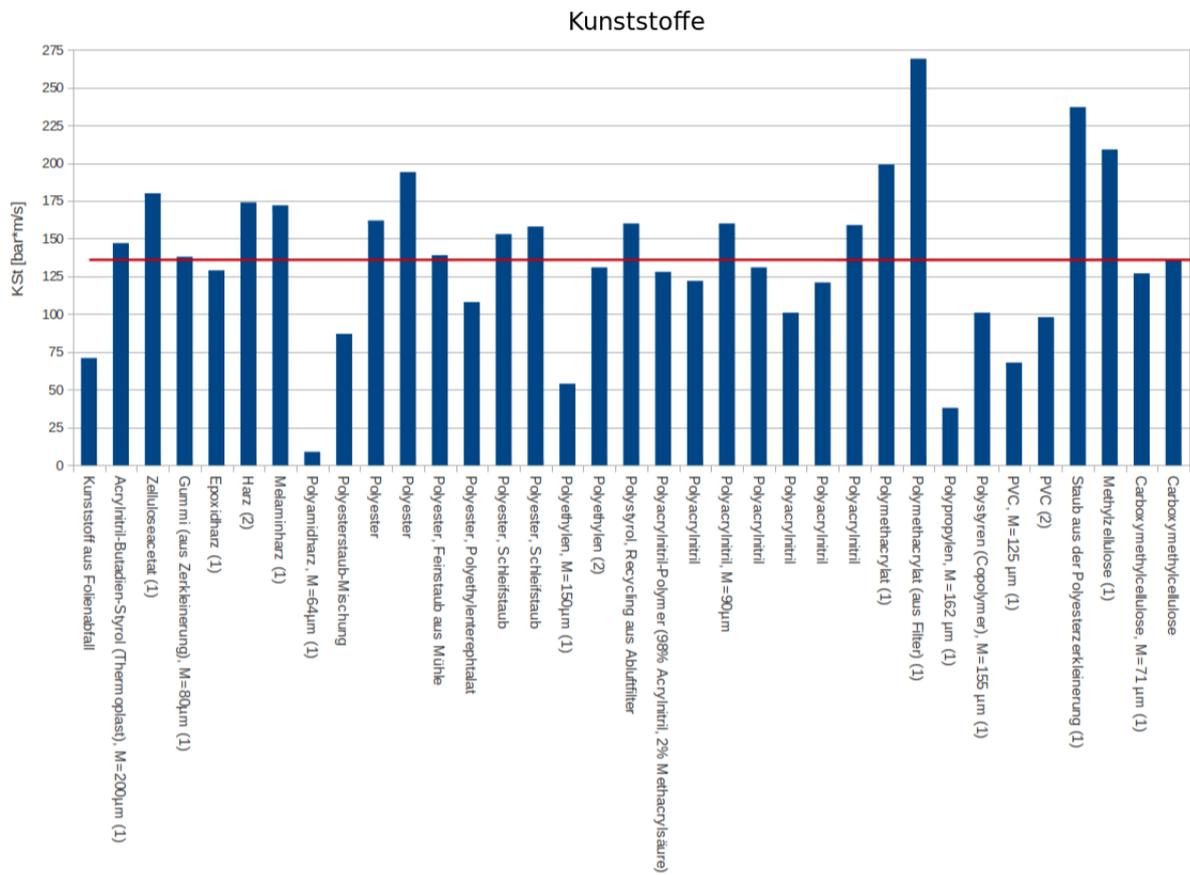


Abbildung 7.13: K_{St} -Werte unterschiedlicher Stäube der Gruppe Kunststoffe mit Mittelwertlinie [1][7][25]

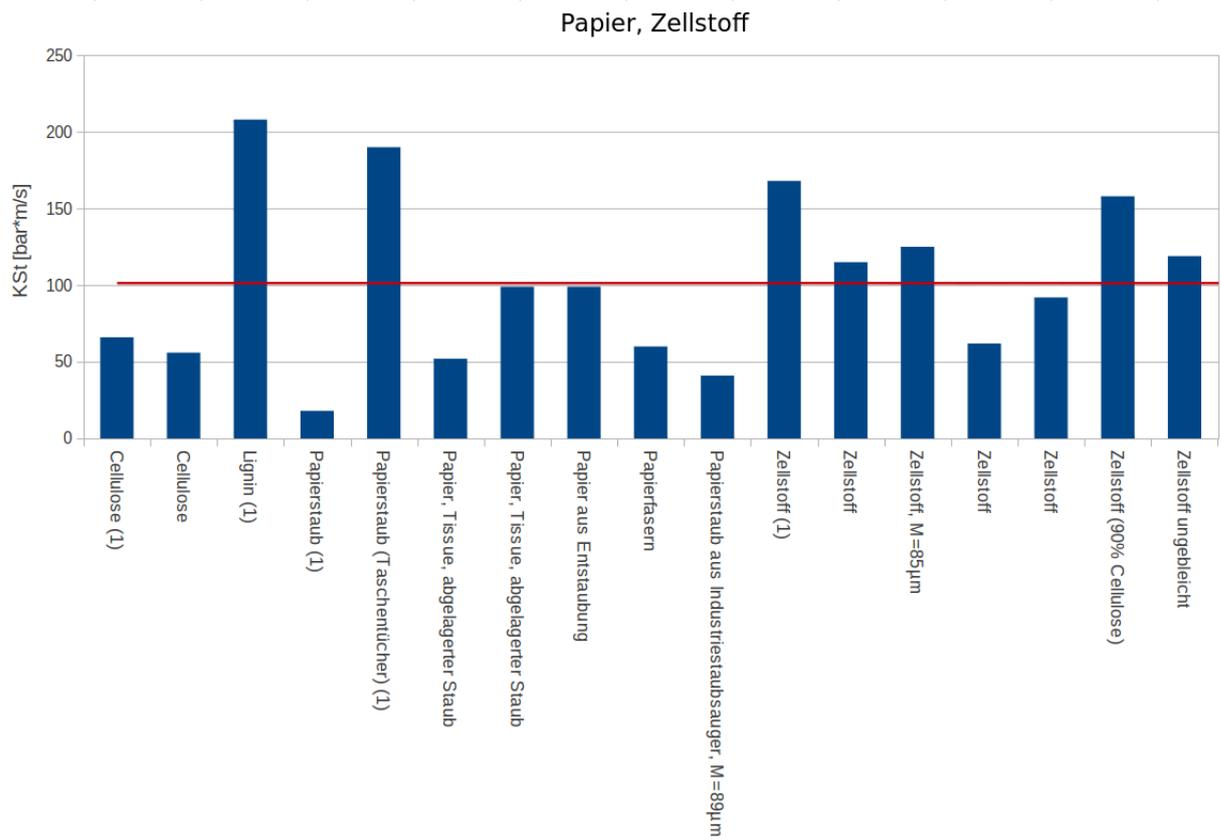


Abbildung 7.14: K_{St} -Werte unterschiedlicher Stäube der Gruppe Papier, Zellstoff mit Mittelwertlinie [1][7][25]

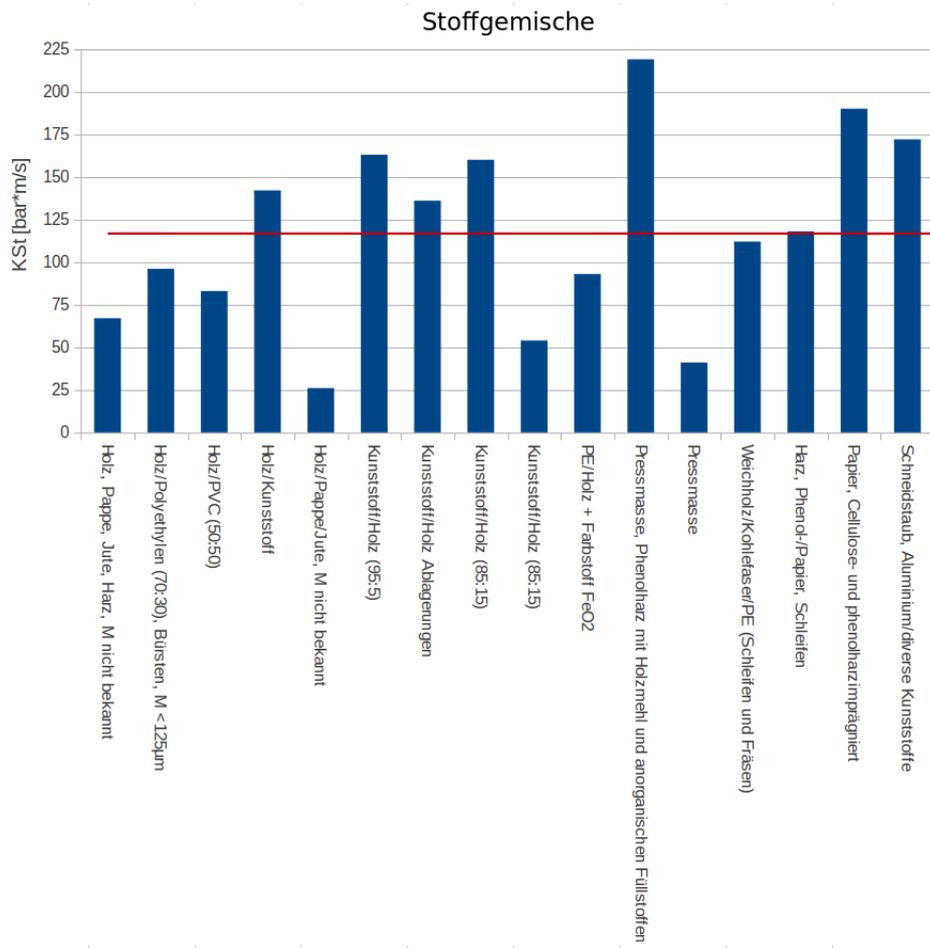


Abbildung 7.15: K_{St} -Werte unterschiedlicher Stäube der Gruppe Stoffgemische mit Mittelwertslinie [1][7][25]

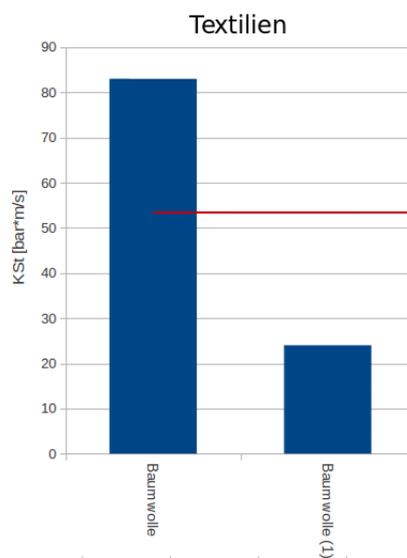


Abbildung 7.16: K_{St} -Werte zweier Stäube der Gruppe Textilien mit Mittelwertslinie [1][7][25]