



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Dissertation



Flammenausbreitung in Großbehältern
innerhalb von Staub/Luft-Gemischen mit
geringer Anfangsturbulenz

Dipl.-Ing. Katja Ulrike Hüttenbrenner, BSc MEng

November 2020



EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 02.11.2020

Unterschrift Verfasser/in
Katja Ulrike, Hüttenbrenner

Danksagung

Im Ziel angelangt möchte ich kurz inne halten, um all jenen zu danken, die zum Gelingen dieser Dissertation durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung beigetragen haben. Kritisches Hinterfragen und konstruktive Kritik machten mir es erst möglich die wissenschaftliche Fragestellung zu bearbeiten und diese Arbeit meinem Anspruch nach zu erstellen. Oft steckt man in einer Sackgasse fest, aber durch einen „kleinen Schubs“ in die richtige Richtung löst sich der bekannte „Knoten im Hirn“. Vielen Dank dafür! Neben der fachlichen Unterstützung ist die persönliche ein wichtiges Stützkorsett, denn Tiefschläge treten am Weg immer wieder auf. Eine helfende Hand, die einen wieder aufrichtet und in die richtige Richtung dreht, ist ein wertvolles Gut, auf das ich mich zu meinem Glück verlassen kann. Danke dafür!

Ein besonderer Dank gilt all jenen Personen, die bei der Planung und dem Aufbau der Versuchsanlage tatkräftig mitgeholfen haben. Ohne euch wäre dies nie durchführbar gewesen. Die Begeisterung mit der ihr dabei seid ist unglaublich! Es war eine anstrengende Zeit, aber gemeinsam lassen sich Ziele mit viel mehr Freude und Spaß erreichen. Vielen Dank! Die letzten sechs Jahre waren für mich eine herausfordernde Zeit, aber neben der fachlichen Horionterweiterung habe ich einen großen persönlichen Erfahrungsschatz gesammelt, auf den ich mich mein weiteres Leben stützen kann. Danke!

Kurzfassung:

Um den Mechanismus der Flammenfortpflanzung in einem Staub/Luft-Gemisch genauer zu verstehen und mathematisch beschreiben zu können, ist die Untersuchung der Zündung und des im Anschluss stattfindenden Fortschreitens der Flammenfront essentiell. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung der Flammenausbreitung in der Nähe des Zündortes in einem Staub/Luft-Gemisch mit niedrigen Turbulenzbedingungen um mit diesem Wissen weitere Grundlagen für die modelltechnische Beschreibung von Staubexplosionen in Großbehältern zu liefern. Hierzu wurde eine Versuchsanlage im Großmaßstab entwickelt, welche es im Gegensatz zu den bisher bekannten Anlagen ermöglicht die Flamme in größeren Dimensionen unter Bedingungen mit niedriger Anfangsturbulenz beobachten zu können. Durch den gewählten Aufbau werden Wandeinflüsse so gering wie möglich gehalten, um so die Ausbildung der Flammenfront besser studieren zu können. Durch das unterschiedliche Abbrandverhalten der verwendeten Versuchsstäube zeigten sich Auswirkungen auf die Flammenstruktur. Bei den durchgeführten Untersuchungen bildete sich eine klar abgrenzbare Flammenfront aus, welche sich auftriebsgetrieben vom geschlossenen unteren Ende nach oben hin ausbreitete. In den Versuchsserien konnte ein gleichmäßiger Fortschritt der Front und ein homogenes Abbrandverhalten der Partikeln beobachtet werden.

Abstract:

Knowledge of the flame propagation mechanism and the ignition process in a dust/air mixture is essential for understanding and mathematical description of dust explosions. Aim of the present work is the description of the flame propagation in a dust/air mixture near the ignition point under conditions of low initial turbulence. Therefore, a large-scale testing rig for experimental purpose was designed, which allows to study flame formation and flame propagation in larger dimensions under conditions with low initial turbulence. Caused by the set-up, wall-effects are minimized and the flame front can propagate through the test rig under reduced external influencing factors. Conducted investigations show a clear flame front, which propagates from the closed end to the top of the tube. The structure of the flame varies depending on the chosen material. A smooth and regular propagation of the flame front and a uniform combustion of the particles could be observed by the experimental series.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Allgemeine Formelzeichen	IV
Akronyme.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Forschungsgebiet	2
1.2 Forschungsfrage.....	3
2 Grundlagen.....	4
2.1 Flammenfortpflanzung in einem Staub/Luft-Gemisch.....	4
2.1.1 Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit	15
2.1.2 Löschabstand	19
2.1.3 Breite der Verbrennungszone.....	23
2.1.4 Flammentemperatur	25
2.1.5 Flammengeschwindigkeit	29
2.1.6 Experimentelle Bestimmung der Flammengeschwindigkeit.....	30
2.2 Einflussparameter auf die Flammenausbreitung	38
2.2.1 Korngröße	39
2.2.2 Korngrößenverteilung	41
2.2.3 Kornform	42
2.2.4 Feuchte des Staubes.....	44
2.2.5 Staubkonzentration im Staub/Luft-Gemisch.....	46
2.2.6 Initiale Turbulenz um den Zündort.....	50
2.2.7 Sauerstoffkonzentration im Staub/Luft-Gemisch.....	52

2.2.8	Initiale Temperatur.....	55
2.2.9	Initialer Druck.....	57
2.2.10	Zündung.....	60
2.2.11	Geometrie der Apparatur.....	62
2.2.12	Turbulenz nach der Zündung	64
2.2.13	Wandeffekte.....	67
2.2.14	Einflussfaktoren auf die Versuchsplanung	70
3	Experimenteller Aufbau.....	75
3.1	Laborversuchsapparatur.....	75
3.2	Großversuchsanlage	77
3.2.1	Staubeintrag	78
3.2.2	Zündung.....	83
3.2.3	Optische Messung.....	84
3.2.4	Temperaturmessung	86
3.3	Versuchsstaub.....	88
3.4	Messaufbau	91
4	Ergebnisse	95
4.1	Flammenausbreitung in einem Lycopodium/Luft-Gemisch.....	95
4.2	Flammenausbreitung in einem Maisstärke/Luft-Gemisch.....	106
4.3	Flammenausbreitung in einem Lycopodium/Zeolith/Luft-Gemisch	115
5	Schlussfolgerung	121
6	Ausblick.....	123
7	Literaturverzeichnis.....	126
Anhang A - Charakterisierung Lycopodium		139
Anhang B - Charakterisierung Maisstärke		145
Anhang C - Charakterisierung <i>Lycopodium casuarinoides</i>		151
Anhang D -Charakterisierung Zeolith.....		155
Anhang E - Versuchsergebnisse		158
	Ergebnisse Flammengeschwindigkeit Lycopodium	158
	Ergebnisse Flammengeschwindigkeit Maisstärke	162
	Ergebnisse Flammengeschwindigkeit Lycopodium mit 10 % Zeolith	164

Allgemeine Formelzeichen

K_{ST}	Sicherheitstechnische Kenngröße für Stäube
p_{MAX}	maximaler Explosionsüberdruck
$(dp/dt)_{MAX}$	maximaler zeitliche Druckanstieg
s_l	laminare Verbrennungsgeschwindigkeit
s_f	Flammengeschwindigkeit (engl. <i>flame speed</i>)
v_B	Verbrennungsgeschwindigkeit (engl. <i>burning velocity</i>)

Akronyme

BIA	Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit
CFD	Computational fluid dynamics
DDT	Deflagration to detonation transition
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSC	Differential-Scanning-Kalorimetrie
DTG	Differenzierte Thermogravimetrie
EN	Europäische Norm
KGV	Korngrößenverteilung
MZE	Mindestzündenergie
MZT	Mindestzündtemperatur
OEG	Obere Explosionsgrenze
OPV	Operationsverstärker
PIV	Particle Image Velocimetry
REM	Rasterelektronenmikroskop
STK	Sicherheitstechnische Kenngröße
TGA	Thermogravimetrische Analyse
UEG	Untere Explosionsgrenze

1 Einleitung

Um möglichen auftretenden Staubexplosionen mit Hilfe von Sicherheitseinrichtungen entgegen zu wirken bzw. deren Auswirkungen so gering wie möglich zu halten, ist es notwendig geeignete Auslegungsparameter für die Planung und Ausführung von Sicherheitseinrichtungen zur Verfügung zu haben. Brennbare Stäube werden anhand genormter Laborverfahren (EN ISO 80079-20-2 [1], EN 13821 [2], EN 14034 Teil 1 bis 4 [3–6]) charakterisiert. Die so erhaltenen sicherheitstechnischen Kenngrößen (STK) liefern die Grundlage zur Berechnung und Auslegung von sicherheitstechnischen Einrichtungen für Apparaturen und Anlagen, wie Berstscheiben udg. Probleme bei der Übertragbarkeit von diesen sicherheitstechnischen Kenngrößen auf Anlagen im Realmaßstab sind jedoch vorhanden. Die Charakterisierung von Stäuben bezüglich deren Explosionsfähigkeit und der bei einer möglichen Zündung zum Tragen kommenden Heftigkeit der Staubexplosion erfolgt im Allgemeinen durch Druckverlaufsmessungen in genormten Laborapparaturen. Diese sind aber immer vom Prüfverfahren und der Prüfapparatur abhängig [7] und können daher nicht ohne weiteres auf andere (Groß-) Anlagen übertragen werden. Einen anderen schwer zu übertragenden Parameter stellen die Turbulenzbedingungen dar. Diese werden bei der sicherheitstechnischen Charakterisierung klar definiert und reproduzierbar hergestellt. Eine Übertragung auf abweichende Geometrien ist jedoch auch in diesem Fall sehr schwierig, da weder der Zündort noch Zündzeitpunkt und somit die vorherrschende Turbulenz zum Zeitpunkt der Zündung bekannt sind. [8] Festgelegte Untersuchungsbedingungen wie Temperatur und Druck aber auch Luftfeuchte sowie Feuchtegehalt der Materialprobe geben oft nicht die realen Prozessbedingungen wieder. Abweichende Prozessbedingungen können sicherheitstechnisch vollkommen andere Voraussetzungen schaffen. Sicherheitstechnische Kenngrößen und die dazugehörigen Bestimmungsverfahren sind daher stark konservativ

angelegt. Dies kann zur Überdimensionierung von Sicherheitseinrichtungen und somit zu hohen Kosten führen. Sicherheitstechnische Kenngrößen beschränken sich im Allgemeinen auf makroskopische Untersuchungen [9], mikroskopische Untersuchungen des Verbrennungsprozesses selbst fehlen.

1.1 Forschungsgebiet

Aufgrund der angeführten Probleme bei der Charakterisierung von brennbaren Stäuben und Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen bestehen in der Wissenschaft Überlegungen bezüglich Einführung einer neuen Kenngröße für die Charakterisierung von Explosionen von Staub/Luft-Gemischen. Hierbei wäre die Verbesserung der Informationslage über den zeitlichen Ablauf einer Staubexplosion auf Ebene der Verbrennungsreaktion hilfreich. Informationen hierzu könnten sich durch die Bestimmung der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit gewinnen lassen. [8] Bei dieser Größe ist der Einfluss des turbulenten Stoff-, Energie- und Impulsaustausches auf die Verbrennung eliminiert. [8] Dadurch kommen die Eigenschaften des Stoffes stärker zum Tragen und das Verfahren zur Bestimmung tritt in den Hintergrund. Neben der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit (engl. *laminar burning velocity*) zählt die Stärke der laminaren Verbrennungszone (engl. *laminar flame thickness*) zu den grundlegenden Verbrennungsparametern. [10] Die Kenntnis dieser Parameter würde so eine verstärkt stofflich bezogene sicherheitstechnische Einschätzung liefern.

Eine Methode zur Ermittlung dieser Parameter ist die Bestimmung der Flammengeschwindigkeit und der anschließenden Berechnung der Verbrennungsgeschwindigkeit. Die Flammengeschwindigkeit ist zwar noch immer an die vorherrschenden Umgebungsbedingungen gekoppelt, liegt aber näher am Verbrennungsvorgang selbst. Weiters kann die Flammengeschwindigkeit als Maß für die Reaktionsrate verstanden werden. Anstatt der apparateabhängigen Spezifizierung von Staubexplosionen durch bekannte sicherheitstechnische Kenngrößen ist durch genannte Vorgehensweise die Charakterisierung des Verbrennungsprozesses selbst besser möglich. Für die Charakterisierung der Flammenfortpflanzung fehlen nach Gao et al. [9] jedoch noch einige Grundlagen, welche in der Wissenschaft noch erarbeitet werden, bzw. gerade studiert werden. Die Fortpflanzung der Flamme in einem Staub/Luft-Gemisch ist im Gegensatz zu Gasgemischen immer unstetig, da Interaktionen zwischen den Staubpartikeln auftreten. [9] Während die Verbrennung von Gas/Luft-Gemischen auf einer einfachen Verbrennungsreaktion beruht, tritt bei Staub/Luft-Gemischen ein stufenweiser

Verbrennungsvorgang auf. Der Verbrennungsprozess ist durch die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Brennstoffes, der Partikelgröße und Partikelform, der Verteilung der Partikeln, dem initialen Druck, der Sauerstoffkonzentration und der initialen Turbulenz bestimmt. [9]

1.2 Forschungsfrage

Zur experimentellen Bestimmung der Flammengeschwindigkeit wird vorwiegend eine Rohrapparatur im Labormaßstab verwendet, in der ein Staub/Luft-Gemisch erzeugt wird und nach dessen Zündung die Flammenausbreitung detektiert werden kann. Bei einem hohen Oberfläche zu Volumen Verhältnis (wie bei kleinen Apparaturen) steigt der laterale Wärmeverlust über die Rohrwand. [7] Dadurch sinkt die Verbrennungsgeschwindigkeit. Der gemessene Wert der Verbrennungsgeschwindigkeit in einer großen Rohrapparatur ist daher näher am wahren Wert. [7] Vorteil einer größeren Apparatur sind neben den genannten Wärmeverlusten auftretende Wandeffekte, welche auf die Flammenausbreitung einwirken. Um diesen entgegen zu wirken wäre ein größerer Querschnitt ideal, die Ausbreitung der Flamme könnte so über einen längeren Zeitraum ungeachtet von diesen Einflussparametern studiert werden und so die noch benötigten Grundlagen für das genaue Verständnis von Verbrennungsprozessen in Staub/Luft-Gemischen geschaffen werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erarbeitung der Grundlagen zur Entwicklung einer Großapparatur zur Bestimmung der Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch unter Bedingungen geringer initialer Turbulenz sowie der Analyse des Zündvorganges und der anschließenden Ausbreitung der Flammenfront in dieser Rohrapparatur. Dies soll es ermöglichen die Flammenausbreitung mit stark reduzierten Wandeffekten zu Beginn der Flammenausbreitung untersuchen zu können.

2 Grundlagen

Notwendige Grundlage für die Untersuchung der Flammenausbreitung um den Ort der Zündung in einem Staub/Luft-Gemisch bei niedrigen initialen Turbulenzbedingungen ist einerseits die theoretische Erarbeitung des Wissens um die Flammenfortpflanzung in einem Staub/Luft-Gemisch. Andererseits ist die Identifikation der Einflussparameter der Versuchsmethode auf die Flammenausbreitung essentiell, um eine Versuchsanlage im Großmaßstab passend für die gewünschte Studie auslegen zu können. Im Folgenden ist eine Zusammenfassung der Stand der Forschung in diesem Bereich abgebildet.

2.1 Flammenfortpflanzung in einem Staub/Luft-Gemisch

Die Zündung eines Staub/Luft-Gemisches und die darauffolgende Ausbreitung der Flamme in diesem kann neben dem chemischen Reaktionsverhalten des Brennstoff/Luft- Gemisches anhand der thermodynamischen Zusammenhänge im System erklärt werden. In Übereinstimmung mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik bleibt die innere Energie in einem Brennstoff/Luft-System bei einer adiabaten Verbrennung konstant. Die durch die chemische Reaktion freiwerdende Energie wird in Wärme umgewandelt, die Temperatur des Systems steigt und dies führt zu einer höheren Reaktionsrate. Dieser Kreislauf läuft bis zum Erreichen der theoretischen maximalen adiabaten Verbrennungstemperatur. Im Gegensatz treten bei einem nicht-adiabaten System Energiesenken, u.a. Strahlungsverluste oder Wärmeverluste durch die Wand, auf. [11] Mit Hilfe der Wärme-Explosions-Theorie (vgl. hierzu das Diagramm in Abbildung 1 nach Semenov [12]) kann das Durchgehen einer Reaktion (engl. *thermal run-away*) durch die Betrachtung der Wärmebilanz erklärt werden. Werden in dem System nur die Wärmeverluste der Wand betrachtet, so ist die Menge der an die Wand pro Sekunde abgegebene Wärme in erster Annäherung $\dot{q}_{ab} = \alpha(T - T_0)$, mit α als ein gewisser konstanter Koeffizient [12]. Die produzierte Wärmemenge \dot{q} ist in Abhängigkeit der Temperatur aufgetragen, mit verschiedenen Werten des Produktes ab als Kurven \dot{q}_1 , \dot{q}_2 und \dot{q}_3 . In der

Kurve \dot{q}_1 ist die Wärmeabfuhr in die Umgebung höher als der Energieeintrag, das System wird bis zur Temperatur T_1 erwärmt, eine langsame, gemäß dem Zusammenhang von Arrhenius entsprechende Reaktion geht vor sich [12]. Ist hingegen der Energieeintrag in das System höher als die Wärmeabfuhr (Kurve \dot{q}_3) beschleunigt sich die Reaktion durch den hohen Energieinhalt selbst. Durch die steigende Temperatur erhöht sich laut Arrhenius die Reaktionsrate, dies wiederum führt zu höherer Temperatur. [12] Im Falle eines dispergierten brennbaren Staubes in Luft ist eine Staubexplosion die Folge. Den Übergang aus dem Gebiet der stationären Reaktion in das Gebiet der Explosion wird von Semenov durch die Kurve \dot{q}_2 dargestellt [12].

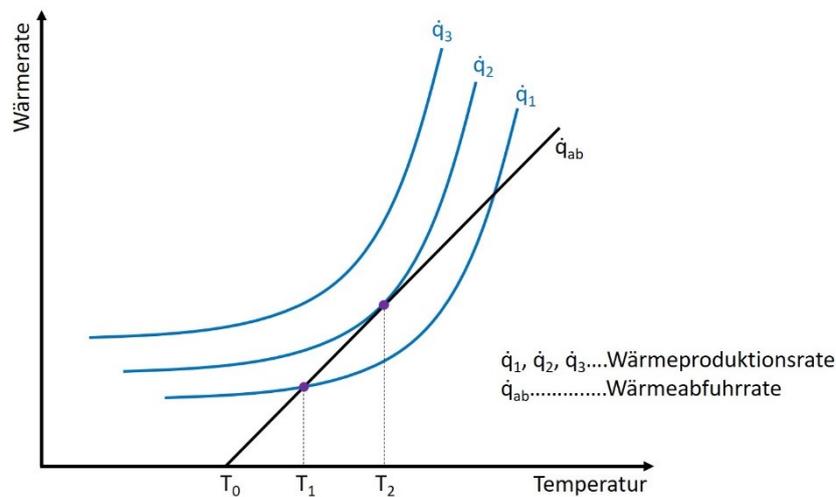


Abbildung 1: Darstellung der Wärmebilanz nach Semenov in einem System zur Beschreibung der Wärme-Explosions-Theorie [12]

Ist der Wärmezustrom in ein Staub/Luft-Volumen höher als die Wärmeabfuhr an die Umgebung, steigt die Temperatur im System. Ist dieser Temperaturanstieg stark genug, so kann das System in den instabilen Punkt laut der Wärme-Explosions-Theorie gelangen. Die Energieverhältnisse führen zu einem thermischen Durchgehen der Oxidationsreaktion und ein Volumenzuwachs der Flamme erfolgt. [13] Die Flammenfortpflanzung in einem Staub/Luft-Gemisch erfolgt nach der Zündung als Deflagration. Bei diesem Typ von Explosion ist die Geschwindigkeit der Reaktionsfront geringer als die Schallgeschwindigkeit und der entstehende Druck liegt bei rund 10 bar und darunter. Im Gegensatz zur Deflagration wird unter einer Detonation eine Oxidationsreaktion verstanden, bei der sich die Reaktionsfront schneller als der Schall fortbewegt und Drücke weit über 10 bar messbar werden. [14] Die bei Staubexplosionen auftretenden Wärme- und Stofftransportprozesse molekularer und turbulenter Art bestimmen die Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit innerhalb der Reaktionsfront. Unter turbulenten Strömungsbedingungen laufen diese Transportvorgänge

schneller ab als bei laminarer Strömung, welche rein auf den diffusiven Vorgängen auf molekularer Ebene beruhen. [15] Durch die Interaktion der Partikeln in der Staub/Luft-Wolke ist die Flammenfortpflanzung immer ein unstetiger Prozess. Dieser wird durch physikalische und chemische Eigenschaften des Brennstoffes, die durchschnittliche Partikelgröße, Form, Verteilung der Partikeln, der initiale Druck vor der Zündung, die Sauerstoffkonzentration und die initialen Turbulenzbedingungen vor der Zündung beeinflusst. [16]

Der Verbrennungsprozess von Staub/Luft-Gemischen kann in drei Hauptzonen eingeteilt werden: Das unverbrannte Brennstoff/Luft-Gemisch, das verbrannte Brennstoff/Luft-Gemisch und die dazwischen liegende Flammenfront (vgl. hierzu Abbildung 2). [17] Durch die auftretende Wärmeübertragung und damit zusammenhängender Reaktionsbeschleunigung bis zur Entzündung erfolgt die Flammenfortpflanzung. Charakteristische Parameter für das Fortschreiten sind neben der Höhe der Flammentemperatur die Wärmeübertragung sowie die Reaktionsgeschwindigkeit. [18]

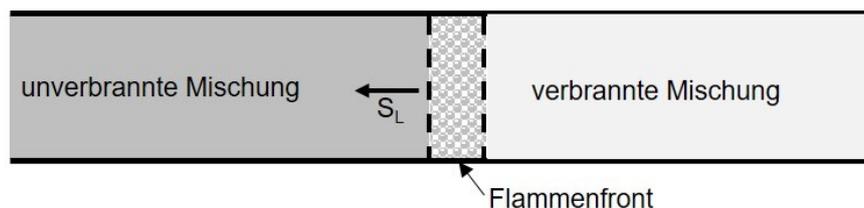


Abbildung 2: Idealvorstellung der laminaren Flammenfortpflanzung in einem Brennstoff/Luft-Gemisch [17]

Vor der Flammenfront befindet sich im unverbrannten Brennstoff/Luft-Gemisch die Vorwärmzone, in diese erfolgt der Wärmeeintrag aus der Flamme, die Brennstoff-Partikeln werden aufgeheizt. Ist die Partikel-Temperatur hoch genug, beginnen flüchtige Bestandteile auszugasen, Pyrolysevorgänge setzen ein. Die freiwerdenden gasförmigen Produkte mischen sich mit dem Sauerstoff in der Luft. Durch steigenden Wärmestrom aus der Flamme bildet sich eine primäre Reaktionszone, welche durch die Verbrennung in der Gasphase charakterisiert ist. [19] Weitere Wärme entsteht, welche in die unverbrannte Mischung geleitet wird. Die Geschwindigkeit des Fortschreitens dieses Ablaufes ist durch die Pyrolyse-Rate, die Mischungsrate, der Wechselwirkung zwischen Partikeln und Gasphase sowie des Wärmeaustausches zwischen Flamme und unverbrannter Mischung bestimmt [19]. Bei genügend hoher Sauerstoffkonzentration bildet sich eine sekundäre Reaktionszone, in der die darauffolgende Verbrennung des Pyrolyserückstandes der Partikeln erfolgt [19]. Diese Feststoff-Verbrennung führt zu einer weiteren Wärmefreisetzung, der Wärmeeintrag in die Vorwärmzone wird erhöht. Der soeben beschriebene Ablauf kann durch den Masseabbau anhand des organischen Staubes Lycopodium (Sporen des Bärlappgewächses) gezeigt

werden, welcher in drei Schritten abläuft. Der erste Schritt des Masseabbaus betrifft die Ausgasung der leicht flüchtigen Bestandteile, im Fall von Lycopodium beträgt dies laut Han et al. ca. 7 % [20]. Die zweite Stufe des Gewichtverlustes ist durch die Bildung von Pyrolysegase bestimmt, bei Lycopodium beträgt dieser mehr als die Hälfte des Partikelgewichtes [20]. Die vollständige Pyrolyse bzw. die Verbrennung der restlichen Zellulosestruktur zählt zum letzten Schritt des Masseabbaus.

Energie aus der Reaktionszone gelangt in die Vorwärmzone eines Gemisches. Aus der Reaktionsfront diffundieren diejenigen Spezies und Radikale in die unverbrannte Mischung, die dort nicht vorhanden sind. Mit dem Erreichen der Flammenfront steigt die Temperatur des Gemisches auf ein Maximum, während die Dichte abfällt und die Strömungsgeschwindigkeit ansteigt (Abbildung 3, a bis c). Infolge von Wärmeverlusten kann die theoretische adiabate Flammentemperatur nicht erreicht werden [21]. Die Reaktionsrate steigt in der Reaktionszone auf den Maximalwert an. Aufgrund der dort stattfindenden Reaktionen werden Zwischenprodukte gebildet, deren Auftreten in der Reaktionszone am stärksten ist. Durch den abreagierenden Brennstoff wird dessen Konzentration niedriger, da sich die Reaktionskinetik auf Seite der Produkte verlagert, während die Konzentration der Reaktionsprodukte über die Flammenfront ansteigt (siehe Abbildung 3, d bis f). Die Flammenfront kann durch das Gemisch mit der für die Zusammensetzung, den Brennstoff und die Bedingungen typischen Geschwindigkeit fortschreiten. [21]

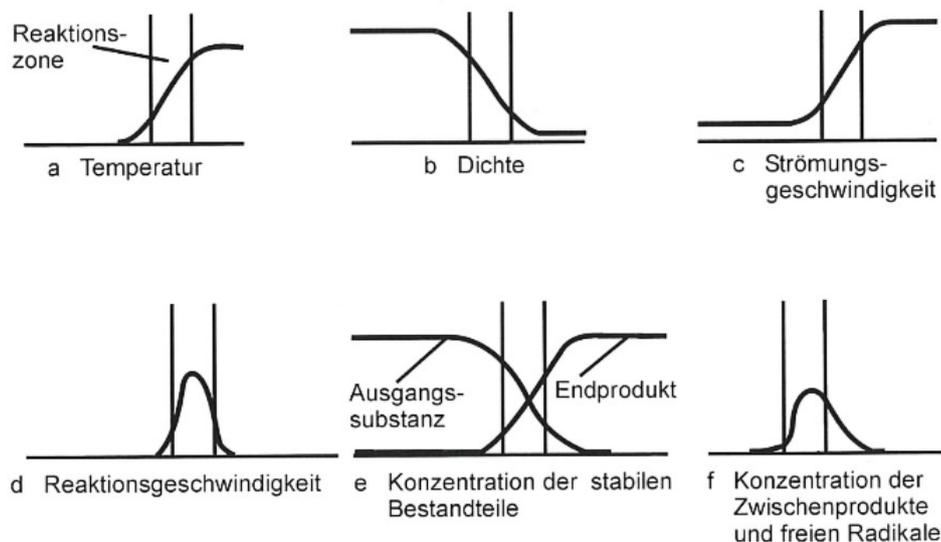


Abbildung 3: Verlauf der wichtigsten Zustandsgrößen und der Zusammensetzung des Gemisches auf dem Weg durch die Flammenfront [21]

Bei der Betrachtung der entstehenden Flamme selbst konnten von Proust und Veysi re [22] unter Laborbedingungen drei Flammenstrukturen charakterisiert werden, welche bei

Variation der Versuchsbedingungen auftreten können. Dazu zählen die zelluläre Flamme (Abbildung 4, a), die laminare Flamme (Abbildung 4, b) und die turbulente Flamme (Abbildung 4, c). Unter der zellulären Flamme versteht man eine Flammenstruktur, bei der die Flammenfront aus kleinen Kämmen besteht, die „Zellen“ genannt werden. Die Bildung dieser Zellen erfolgt erst nach Ausbildung der Flammenfront und Tests zeigten, dass die mittlere Größe dieser Zellen bei ca. 1,5 cm liegt. Die Bewegung der zellulären Flammen findet ruckartig statt und das Auftreten kann an akustische Störimpulse gekoppelt sein. Aufgrund der ruckartigen Bewegungen konnte ein Flackern festgestellt werden, welches sich durch die Änderung der Leuchtkraft zeigte. [22]

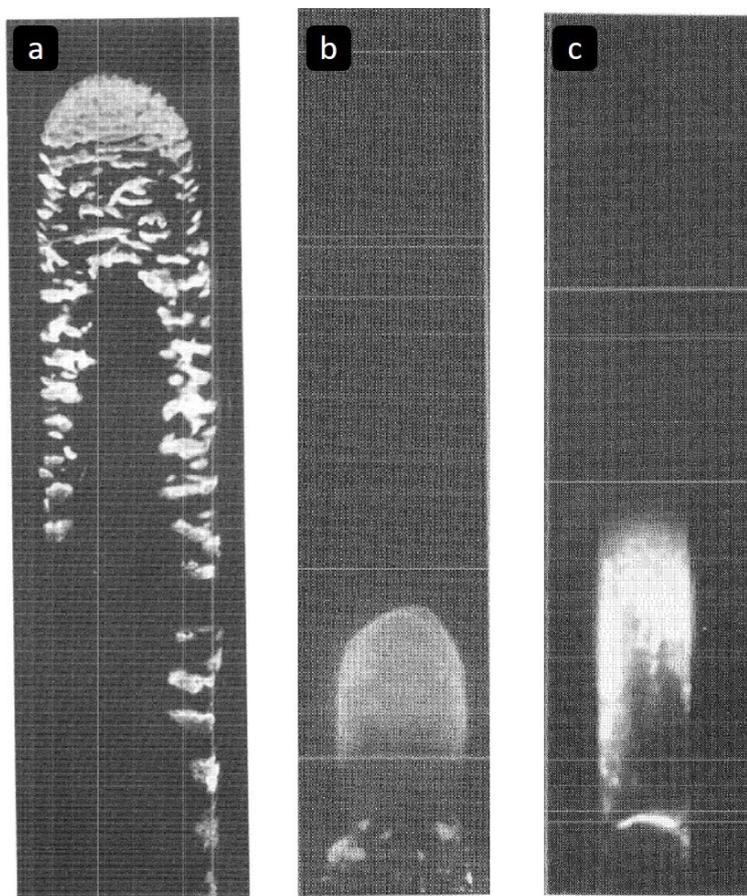


Abbildung 4: Verschiedene Flammenstrukturen, aufgenommen von Proust und Veysi re in einer Rohrapparatur [22]; (a) Zelluläre Flammenstruktur (b) Laminare Flammenstruktur und (c) Turbulente Flammenstruktur

Eine weiche Flammenfront mit einer parabolischen Grenze bezeichnet man als laminare Flammenfront (Abbildung 4, b). Erkennbar bei dieser Flammenstruktur sind die leuchtenden Zonen im hinteren Teil der Flammenfront, welche aber sichtbar von der Flammenfront getrennt auftreten. Diese sind vor allem auf die unvollständige Verbrennung von Staubpartikeln

zurückzuführen. Die räumliche Flammengeschwindigkeit laminarer Flammen ändert sich nur geringfügig bei wechselnden Konzentrationen des Staubes im Staub/Luft-Gemisch und erreicht bei stöchiometrischer Verbrennung ein Maximum. [22]

Die dritte Möglichkeit der sich ausbreitenden Flammenstruktur stellen turbulente Flammen dar, welche sich durch ihre Unregelmäßigkeiten auszeichnen (Abbildung 4, c). Die Struktur ist schwer zu beschreiben, da sich die Flamme ständig ändert und sich schneller als bei den beiden anderen Flammenarten fortbewegt. Durch die hohe Durchmischung breitet sich die Flammenfront über eine Länge von mehreren Zentimetern Breite aus [22].

Bestrebungen im Bereich der Untersuchung der Flammenentstehung und –ausbreitung gehen vielfach in die Richtung der laminaren Flammenfortpflanzung, bzw. hin zu Strömungsbedingungen mit sehr geringer Turbulenz, um die Flammenausbreitung beobachten zu können. Vorteil der laminaren Strömungsbedingungen ist die Reproduzierbarkeit der herrschenden Bedingungen im Strömungsfeld gegenüber der turbulenten Strömung. Messmethoden im Labor erheben den Anspruch der Wiederholbarkeit der Ergebnisse, wodurch für die Anwendung laminare Bedingungen empfehlenswert sind. Um diesem Ideal so nahe wie möglich zu kommen werden Strömungsbedingungen mit geringer Turbulenz angestrebt.

Im Vergleich zu einer ideal ausbreitenden Flamme (Abbildung 2) erscheint die Flammenfront in einer Rohrapparatur, wie sie neben anderen Methoden zur Untersuchung der Flammenausbildung und Flammenfortpflanzung angewendet wird, diffiziler (Abbildung 5). Wandeffekte und durch die Flammenausbreitung hervorgerufene Turbulenzerscheinungen lassen die Front eine parabolische Form annehmen. [17, 23]

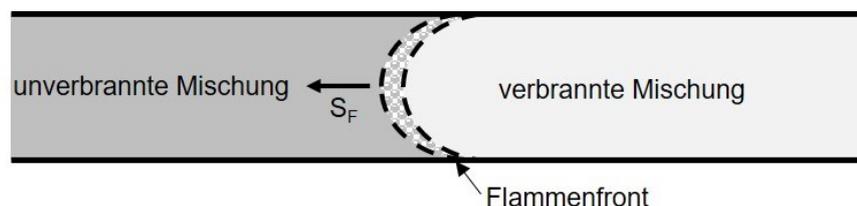


Abbildung 5: Graphische Darstellung einer Flammenfront in einer Rohrapparatur (S_F entspricht der Flammengeschwindigkeit) [17]

Der Ablauf der Reaktion in einem Maisstärke/Luft-Gemisch wurde von Zhang et al. [24] mikroskopisch untersucht. Ein Temperaturanstieg zeigt die Vorwärmzone an, in welcher die Partikeln erwärmt werden. Durch das Absinken der Partikeln in einer senkrechten Rohrapparatur gelangen diese näher zur Flammenfront und beginnen zu entgasen. Diese flüchtigen Bestandteile mischen sich mit dem Sauerstoff in dem Bereich und werden von der

Flamme entzündet. Die Reaktionszone, in der die thermische Zersetzung und Verbrennung stattfindet, ist durch den Anstieg der Ionisationskurve gekennzeichnet. Nach dem Abreagieren der flüchtigen Mischung verbrennt die produzierte Kohle langsam hinter der Flammenfront ab. Das Modell zu dieser Beschreibung von Zhang et al. [24] ist in Abbildung 6 zu sehen

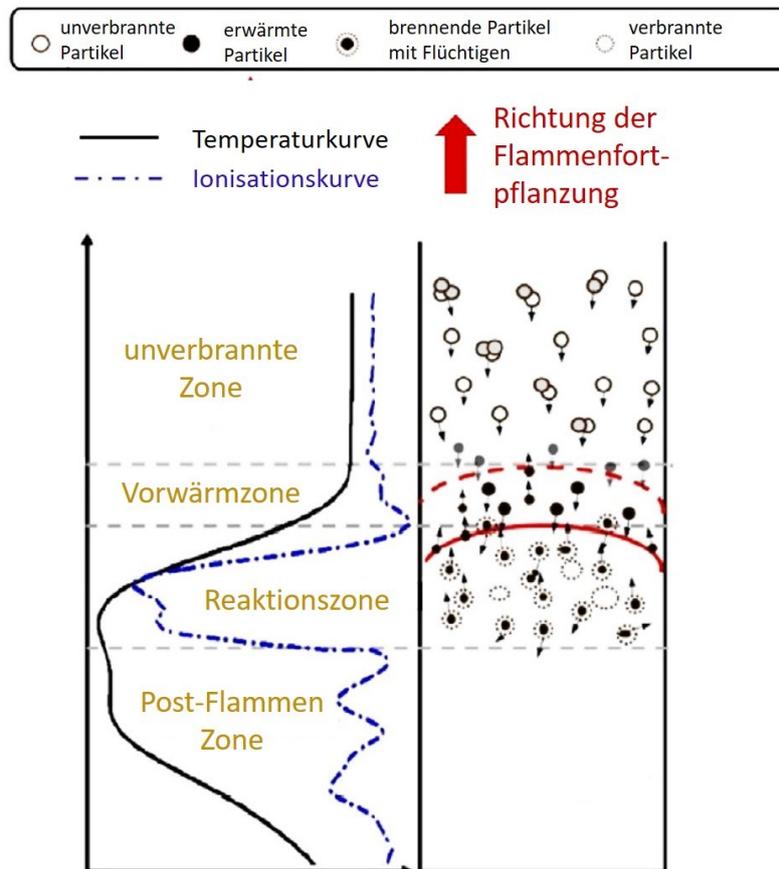


Abbildung 6: Physikalisches Modell der Flammenfortpflanzung in einem Stärke/Luft-Gemisch von Zhang et al. [24]

Die Ausbreitung von Flammen in einem Staub/Luft-Gemisch erfolgt sphärisch vom Zündort ausgehend. Im Zentrum befindet sich ein leuchtend heller Bereich, um welchen sich durch pyrolysierende Partikeln blaue Flammen-Spots ausbilden (Abbildung 7, a). Diese diffuse Flammen formen die nur einige Millimeter breite Verbrennungsfrent (Abbildung 7, b). Die Flammenfortpflanzung erfolgt von einem Spot zum nächsten unter gleichbleibender Geschwindigkeit durch den sequentiellen Zündprozess. Dabei wird ein brennbares Partikel durch die diffuse Flamme, welche vom Nachbarpartikel gebildet wird, entzündet. Das Partikel bildet daraufhin selbst eine diffuse Flamme, welche ein weiteres Staubpartikel zündet. Bekannt ist dieser Mechanismus unter der Bezeichnung „*Relay Ignition Mechanism*“. [25]

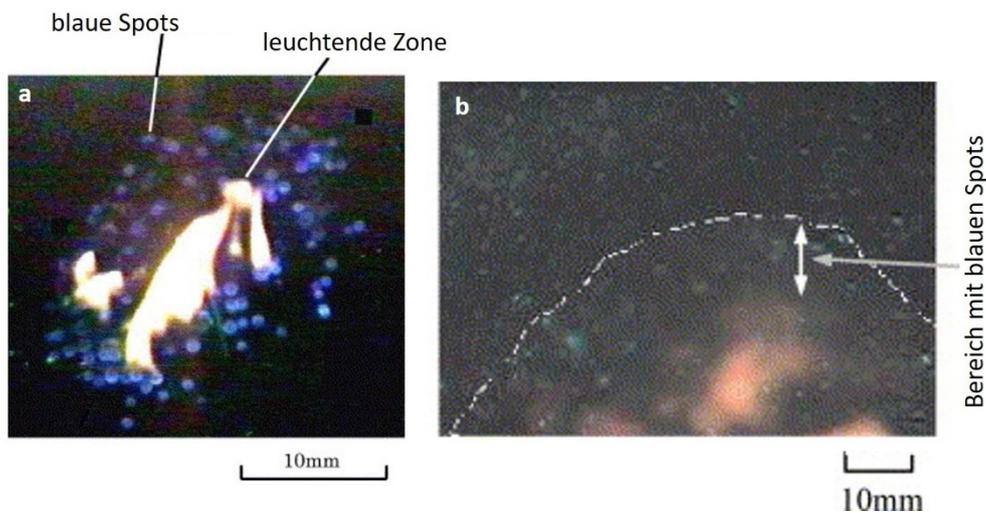


Abbildung 7: Verbrennungsvorgang von Stearinsäurepartikel, aufgenommen von Dobashi und Senda; (a) Mikroaufnahme, (b) Videoaufnahme [25]

Bei einer Erweiterung der Betrachtungszone um die Flammenfront sind Staubpartikeln vor der gut sichtbaren hellen Flammenfront erkennbar. In der hellen Schicht finden unter hohen Temperaturen die Oxidationsreaktionen der Verbrennung statt, direkt davor eine dunkle Zone von wenigen Millimetern (Proust und Veyssi re maßen zwei Millimeter bei ihren Versuchen mit Maisstärke [22]). Durch die Schlieren-Fotographie konnte die Grenze dieser Zone von Chen et al. [26] durch die Schlieren-Front vier bis acht Millimeter vor der Leuchtzone vermessen werden. Die Staubpartikeln bewegen sich auf diese Zone zu, verschwinden optisch in der dunklen Zone, nehmen Wärme in diesem dunklen Bereich auf und pyrolysieren. Nach Abgabe der Pyrolysegase tritt das fertig pyrolysierte Staubpartikel in die Verbrennungszone ein und emittiert durch die Oxidationsreaktion das charakteristische Leuchten der Flammenfront. [22] In Abbildung 8 ist eine soeben beschriebene Flammenfront ersichtlich, welche sich von unten nach oben ausbreitet. Vor der leuchtenden Front erkennt man die dunkle Zone, in der sich keine Staubpartikeln befinden. Vor dieser Schicht finden sich Staubpartikeln wieder.

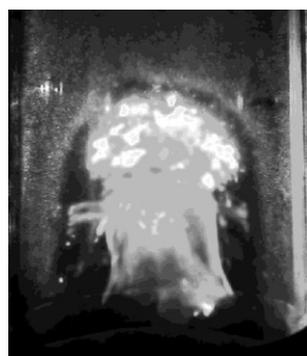


Abbildung 8: Aufnahme der Flammenfront in einer Rohrapparatur [17]

Treten Partikeln mit verschiedenen Durchmessern in diese Zone ein, werden unterschiedliche Abläufe detektiert. Kleinere Partikeln (10 bis 20 μm) pyrolysieren und verschwinden sofort, während die Pyrolyse großer Partikeln ($> 80 \mu\text{m}$) verzögert stattfindet. [26] Die Gase dieser Partikeln bilden Dampfschwaden aus, welche sich weiter aufheizen und in Form blauer Flammen abbrennen. [26] Eine schematische Darstellung dieser Beschreibung ist in Abbildung 9 ersichtlich. Die Flammenfortpflanzung wird durch kleine Partikeln erreicht, jedoch wird sie durch große Partikeln beeinflusst.

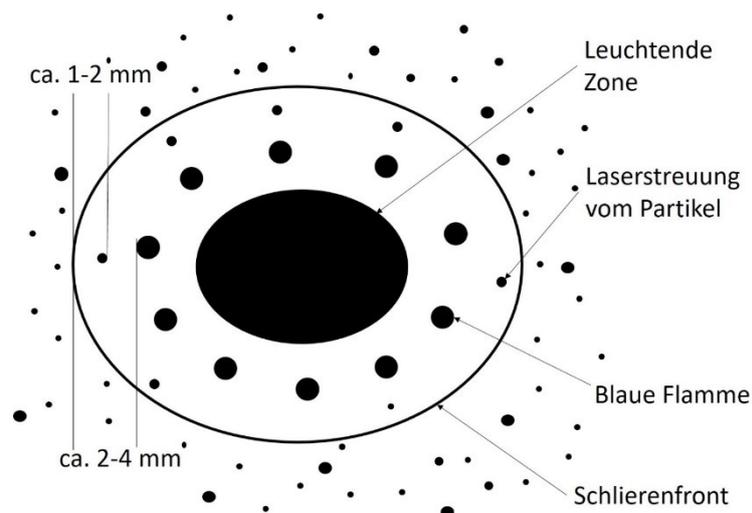


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Ausbildung der Flammenstruktur nach Chen, Dobashi und Hiramio [26]

Der Flammenfortpflanzungs-Mechanismus in einer Lycopodium-Wolke wurde von Han et al. [20] beschrieben (vgl. hierzu Abbildung 10), wobei die Staubwolke aus Einzelpartikel sowie Agglomeraten besteht (d_a ist der Abstand zwischen den Agglomeraten). Die einzelnen Partikel zünden durch die schnelle Erwärmung vor den Agglomeraten und formen Spots, welche die Flamme aufrecht halten. Pyrolysegase um die Partikelagglomerate brennen in Form blauer Flammen ab (A in Abbildung 10), diese Gase trennen die Partikeln voneinander, woraufhin diese Pyrolysegase in einer unabhängigen Flamme abbrennen (B in Abbildung 10). Die Partikeln pyrolysieren vollständig und die Flamme zeigt von starker Leuchtkraft, bis diese verschwinden (C in Abbildung 10). Hohe Staubkonzentrationen resultieren in höheren Verbrennungswärmen und somit in höheren Flammgeschwindigkeiten. Die Distanz zwischen den Staubpartikeln wird geringer und die sich bildenden Spots und die unabhängige Flamme verbinden sich zu einer kontinuierlichen dicken Flamme (D in Abbildung 10). Den benötigten Sauerstoff gewinnt die unabhängige Flamme hinter der kontinuierlichen Flammenfront von der unverbrannten Mischung vor der Flammenfront. Diese Zwei-Phasen-

Struktur der Flamme ist vor allem für Lycopodium/Luft-Gemische charakteristisch. [20] In Abbildung 11 ist ein Bild dieser Beschreibung von Han et al. ersichtlich.

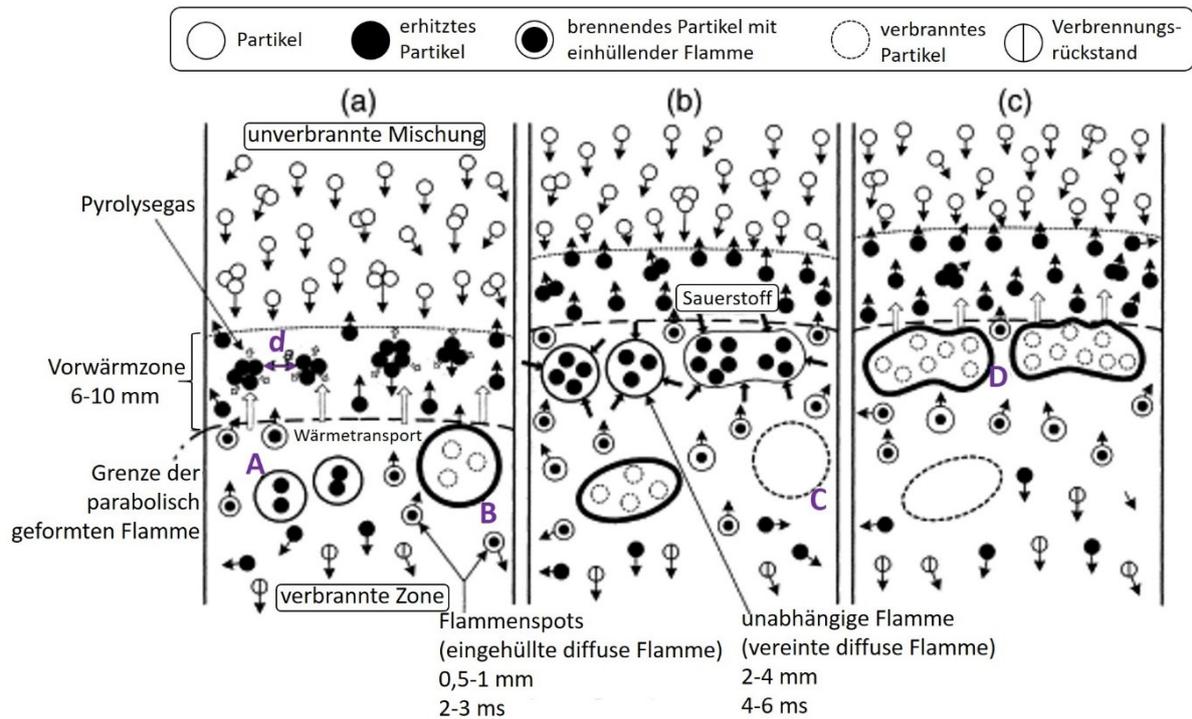


Abbildung 10: Schematische Erklärung des Flammenfortpflanzungs-Mechanismus in einem Lycopodium/Luft-Gemisch nach Han et al. [20]

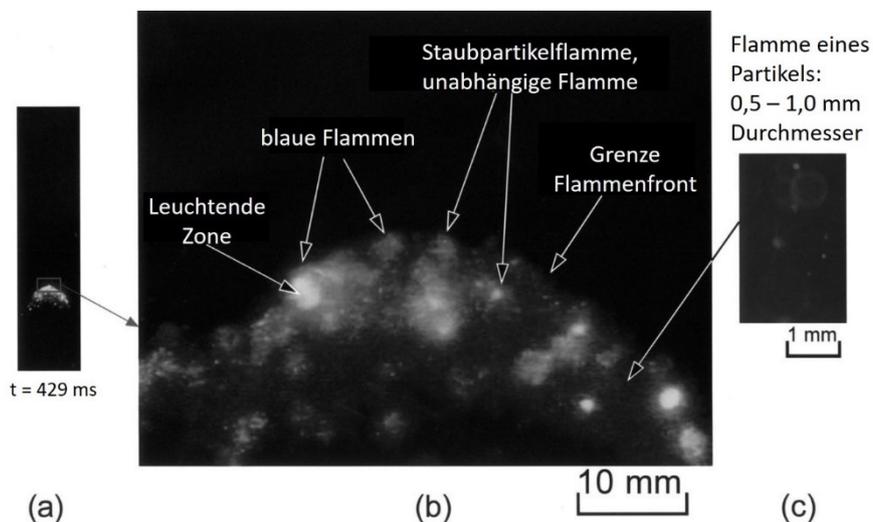


Abbildung 11: Aufnahme von Han et al. [20] einer laminaren Flammenfortpflanzung mit (a) Verbrennungszone und (b) Flammen eines Partikels

Optische Untersuchungen verschiedener Brennstoffe von Gao et al. [9] zeigten deutlich, dass es zwei unterschiedliche Modelle zur Beschreibung der Flammenfortpflanzung gibt. Ein

Typ – das Kinetik-kontrollierte Regime aufgrund der Gasreaktion – wird durch eine gleichmäßige Form und durch eine räumlich durchgehende Verbrennungszone charakterisiert (Abbildung 12). Die Kinetik-kontrollierte Flammenfront ist von glatter Form, in der blaue Spots in der Front erscheinen, welche von einer vollständigen Verbrennung zeugen. Der zweite Typ – das Pyrolyse-kontrollierte Regime – ist durch eine komplizierte Struktur mit aufleuchtenden blauen Spots, umgeben von einer gelben Leuchtschicht, gekennzeichnet (Abbildung 13). Bei diesem zweiten Typ spielen neben der Pyrolyse auch Gasbildung und die Verdampfung eine Rolle. An der vorderen Flammenfront erscheinen blaue Spots, welchen leuchtende Flammen nachkommen. Die Flammenfront selbst scheint diskret zu sein. [9] Hohe Verbrennungsgeschwindigkeiten oder große Partikelgrößen zeugen von einem Pyrolyse-kontrollierten Regime. [27]

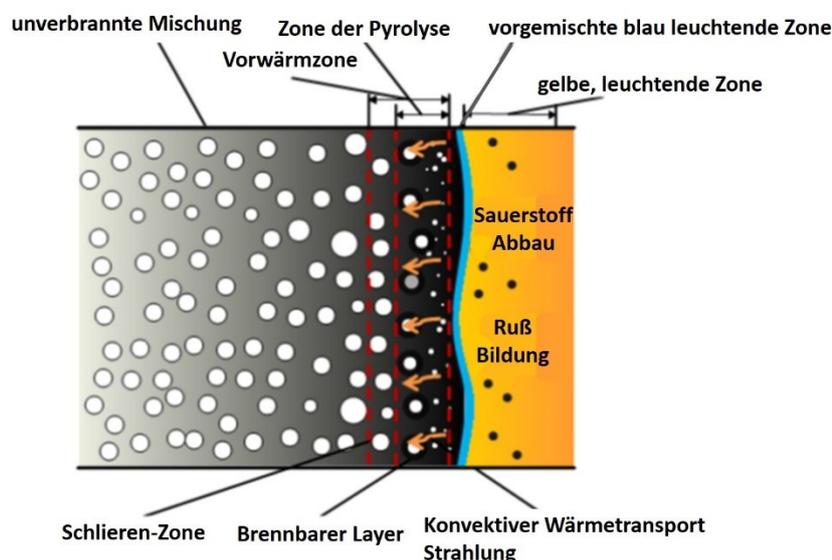


Abbildung 12: Darstellung des Kinetik-kontrollierten Regimes bei der Flammenfortpflanzung gemäß Gao et al. [9]

Die leuchtend gelbe Zone in den beiden Regimen kann durch die Art der Partikelverbrennung erklärt werden. Lokale Brennstoffspitzen treten in der Umgebung der Partikeln auf. Werden diese Partikeln unter Sauerstoffmangel verbrannt, bilden sich Rußpartikel, welche gelbes Licht emittieren. Durch die Verteilung der einzelnen Partikel treten die benötigten Brennstoffkonzentrationen ungleichmäßig auf, wodurch das ungleiche Auftreten der leuchtenden Zone erklärt werden kann [9].

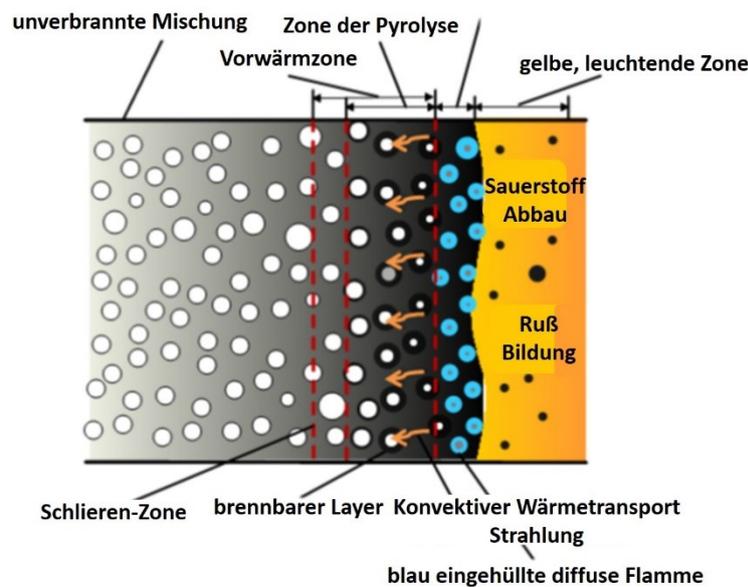


Abbildung 13: Darstellung des Pyrolyse-kontrollierten Regimes bei der Flammenfortpflanzung gemäß Gao et al. [9]

Zur Klassifizierung von Stäuben nach den beiden oben genannten Regimen kann die Damköhler-Zahl angewendet werden. Diese dimensionslose Kennzahl beschreibt für den Fall einer Staubexplosion das Verhältnis zwischen der charakteristischen Zeit für Erhitzung und Pyrolyse (τ_{dv}) und der charakteristischen Zeit der Verbrennungsreaktion (τ_{cr}). [9]

$$Da = \frac{\tau_{dv}}{\tau_{cr}} \quad (2-1)$$

Ist die Flammenfortpflanzung durch die Gasreaktion Kinetik-kontrolliert wird die Damköhler-Zahl kleiner 1, bei einer Damköhler-Zahl größer 1 läuft die Flammenfortpflanzung im Pyrolyse-kontrollierten Regime ab. [9] Dies impliziert bei einer Staub/Luft-Mischung mit großen Partikeln, dass der Verbrennungsprozess Pyrolyse-kontrolliert sei, falls die Verdampfungsrate (Pyrolyse der flüchtigen Bestandteile) geringer als die Reaktionsrate ist. [16] Die Damköhler-Zahl ist umgekehrt proportional zur Flammenfortpflanzungsrate. [16]

2.1.1 Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit

Zur Analyse und Beschreibung einer Staubexplosion ist das Wissen um die Verbrennungsrate, mit der sich die Verbrennung von der schon verbrannten Brennstoff/Luft-Mischung zu der unverbrannten Mischung fortpflanzt, essentiell. Diese Verbrennungsrate hängt vom Mechanismus der Verbrennungsreaktion ab, welcher durch chemische Eigenschaften (Art und Beschaffenheit des Brennstoffes, Zusammensetzung der Gasphase) und physikalische Eigenschaften (Partikelgröße, Partikelkonzentration) charakterisiert wird.

Als Parameter für die Beschreibung der Verbrennungsleistung wird die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit s_l herangezogen. [7] Die Verbrennungsgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit welcher sich eine glatte, eindimensionale Flammenfront relativ zum unverbrannten Gas normal auf ihre Oberfläche fortpflanzt. Sie ist der Eigenwert der eindimensionalen Flammgleichung [28]. Die vom Beobachter registrierte Flammenfront-Geschwindigkeit ergibt sich aus der Überlagerung der Verbrennungsgeschwindigkeit und der lokalen konvektiven Geschwindigkeit des Frischgases, welche durch den Expansionsprozess des verbrennenden Frischgases bedingt wird. [15]

Theoretische Überlegungen zur Verbrennungsgeschwindigkeit stammen u.a. von Andrews und Bradley, welche sich mit der Berechnung der Verbrennungsgeschwindigkeit aus der gemessenen Flammengeschwindigkeit s_f beschäftigten. Die Verbrennungsgeschwindigkeit kann nach den beiden Autoren mit folgender Gleichung (2-2) beschrieben werden und nimmt einen konstanten Wert für die Verbrennungsgeschwindigkeit s_l über den gesamten Querschnitt an. [28]

$$\frac{\partial \rho_u * V_u}{\partial t} = -\rho_u * A_f * s_l \quad (2-2)$$

Die Dichte des unverbrannten Gases wird mit ρ_u beschrieben, das spezifische Volumen des unverbrannten Gases mit V_u , die Flammenoberfläche mit A_f und die Zeit mit t . Ist die Dichte des Gases konstant, kann Gleichung (2-2) zu Gleichung (2-3) vereinfacht werden.

$$\frac{\partial V_u}{\partial t} = -A_f * s_l \quad (2-3)$$

Wird dazu die Vereinfachung getroffen, dass die Flammengeschwindigkeit über den gesamten Rohrquerschnitt konstant ist, so kann Gleichung (2-4) angegeben werden, in welcher x die zurückgelegte Distanz des Rohres in Richtung der Flammenfortpflanzung und a der Flammenquerschnitt sei.

$$\frac{\partial V_u}{\partial x} = -a \quad (2-4)$$

Wird die Flammengeschwindigkeit s_f mit dem zurückgelegten Weg über die Zeit beschrieben (2-5), so kann durch Umformung der Gleichung die Verbrennungsgeschwindigkeit s_l nach Gleichung (2-6) angegeben werden.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = s_f \quad (2-5)$$

$$\frac{\partial V_u}{\partial t} * \frac{\partial x}{\partial V_u} = -A_f * s_l * \frac{1}{-a}$$

$$s_l = \frac{a}{A_f} * s_f \quad (2-6)$$

Da sich die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit zu allen Punkten der Flammenfront gleichmäßig für diese Annahme bewegen müsste, muss dieser Annahmefehler in die Betrachtung miteinfließen. [29] Durch aerodynamische Veränderungen der Flamme verliert die Annahme einer konstanten Flammengeschwindigkeit über den gesamten Querschnitt ihre Gültigkeit, ebenso ist die Flammenoberfläche variabel. Durch Einbeziehung dieser Fehler und der Beobachtung der Gasgeschwindigkeit der unverbrannten Mischung (s_g) wird Gleichung (2-6) zu Gleichung (2-7) erweitert. [28]

$$s_l = \frac{a}{A_f} * (s_f * s_g) \quad (2-7)$$

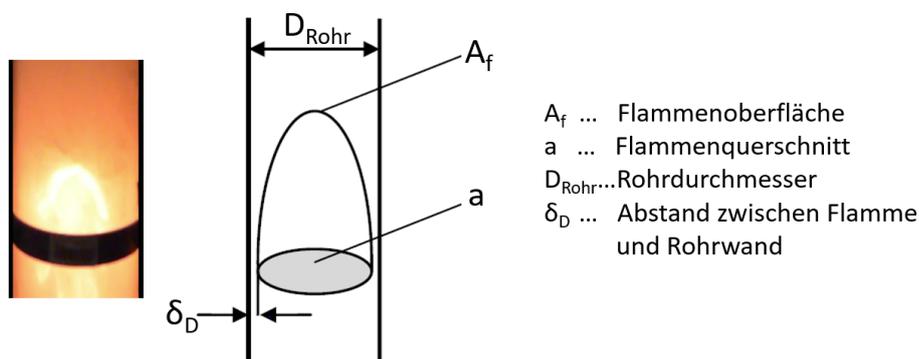


Abbildung 14: Darstellung der Parameter zur Berechnung der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit nach Andrews und Bradley [17]

Die Berechnung der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit s_l kann auf zwei Arten erfolgen. Einerseits kann die Geometrie für die Berechnung herangezogen werden. Dazu wird die Flamme geometrisch ausgewertet und über die Fläche sowie die räumliche Flammengeschwindigkeit auf die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit rückgeschlossen. [22] Andererseits kann die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit durch die Differenz der räumlichen Flammengeschwindigkeit und der Geschwindigkeit der Strömung vor der Flammenfront berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass diese Beziehung nur an der Spitze der Flammenfront Gültigkeit besitzt. [22] Experimentell bestimmte laminare Verbrennungsgeschwindigkeiten in einem Lycopodium/Luft-Gemisch bei unterschiedlicher Staubkonzentration, ermittelt von Han et al. [30], sind in Abbildung 15 zu sehen. Bei einer Staub-Konzentration von ca. 170 g/m^3 tritt der Maximalwert der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit auf, die stöchiometrische Staubkonzentration liegt bei diesem Material jedoch zwischen 110 und 120 g/m^3 .

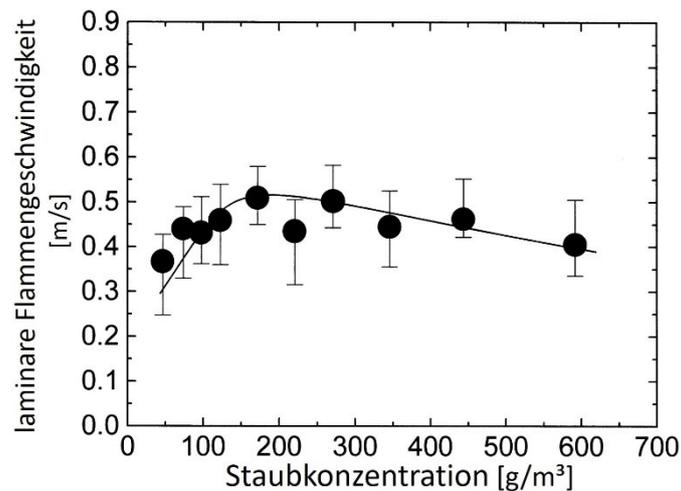


Abbildung 15: Versuchsergebnisse von Han et al. zur laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Staubkonzentration in einem Lycopodium/Luft-Gemisch [30]

Die Flammenoberfläche wird einerseits als lokale Senke für Reaktanten wirksam, andererseits als lokale Wärmequelle. Die Bewegung der Reaktanten zur Flamme hin führt zu einer erhöhten Diffusionsrate, diese wiederum lässt die Wärmefreisetzungsrates steigen. Die Temperatur der Flamme erhöht sich. [19] Der Wärmestrom von der Flamme zur unverbrannten Mischung steigt, da der Temperaturgradient steiler ausgeprägt ist. Durch die so erhöhte Wärmeleitung von Flamme zur unverbrannten Mischung hin wird mehr Wärme abgeführt, die Temperatur der Flamme sinkt. [19] Diese Änderung des Wärmeleitungsstromes impliziert eine Änderung in der Diffusion der Reaktanten in der Flammenoberfläche. [19] Durch diese Bewegungsänderungen entstehen Schwankungen in der Flammenstruktur. Die Flammenoberfläche ist nicht mehr plan, sondern gewellt. Im konvexen Teil der Flamme wird die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit im lateralen Bereich erhöht, im Zentrum verlangsamt. [19] Im konkaven Teil der Flammenfront ist dies genau umgekehrt. (vgl. Abbildung 16).

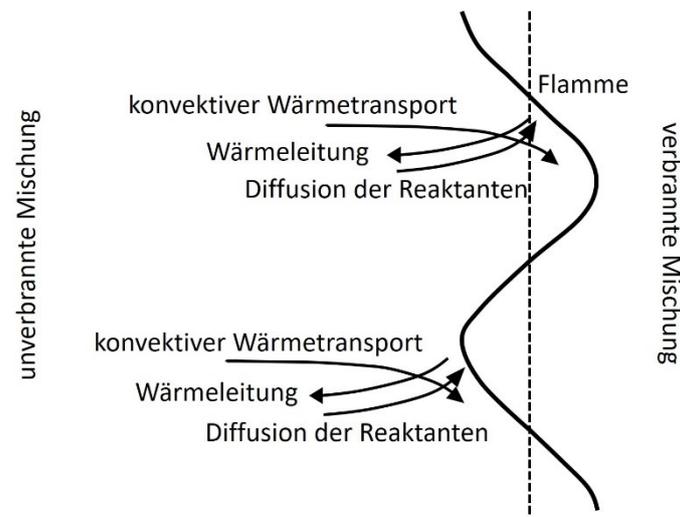


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Wärmeleitung, Diffusion der Reaktanten und konvektiver Wärmetransport in die Vorwärmzone einer gewellten Flammenfront (Abb. gemäß [19] nach [31])

Führen solche Instabilitäten der Flamme zu stark gewellten Flammen im Vergleich zu planen Flammenfronten, sollte die Flammendehnung (engl. *flame stretch*) bei der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit mit in Betracht gezogen werden. [19]

$$s_l = \left[1 + \frac{L}{R} \right] * s_l^0 \quad (2-8)$$

Mit der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit einer ungedehnten Flamme s_l^0 , der Markstein-Länge L sowie mit R als der Radius der Krümmung der Flamme. Die Markstein-Länge ist ein spezifischer Parameter der Mischung, liegt im Größenbereich der Stärke der Verbrennungszone und beschreibt die Einflussnahme der Flammenform-Krümmung auf die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit. [19] Je höher L , desto größer ist der Einfluss der Flammenkrümmung auf die lokale Verbrennungsgeschwindigkeit. Die dazugehörige dimensionslose Kennzahl ist die Markstein-Zahl, welche den Quotienten aus Markstein-Länge und Breite der Verbrennungszone beschreibt. [19]

$$Ma = \frac{L}{\delta_l^0} \quad (2-9)$$

2.1.2 Löschabstand

Einer sich ausbreitenden Flamme ist es nicht möglich sich durch einen beliebig schmalen Kanal fortzupflanzen, auch wenn sich die Brennstoff/Luft-Mischung im Raum im explosionsfähigen Bereich befindet. Unter einem kritischen Rohrdurchmesser bzw. einem kritischen Plattenabstand erlischt die Flamme. [8] Bekannt ist dieser Abstand als

Löschabstand (engl. *quenching distance*), welcher zu den Charakteristiken der Flammenausbreitung [22] in einem Brennstoff/Luft-Gemisch gehört. Der Löschabstand ist durch die Verluste an Wärme und Radikale an die Umgebung bestimmt. Solange diese Verlustströme die Flamme nicht stören, kann sich diese ausbreiten, ansonsten erlischt sie. [8] Eine Möglichkeit den Löschabstand experimentell zu bestimmen ist die sogenannte „Plattenmethode“, bei der überwacht wird bis zu welchem Plattenabstand sich eine vorgemischte Flamme im Spalt zwischen den beiden Platten fortpflanzen kann [21]. Aber auch Untersuchungen mit anderen räumlichen Anordnungen (Rohr, Platte, Spalt) sind bekannt. [8] Ein Einfluss der Versuchsmethode zur Bestimmung des Löschabstandes wurde in der Vergangenheit festgestellt. So konnte experimentell der Zusammenhang zwischen zylindrischen Rohren ($d_{ii,z}$) wie auch zwischen zwei Platten ($d_{ii,p}$) bestimmt werden. Der Löschabstand entspricht $d_{ii,p} = 0,65 \cdot d_{ii,z}$ [8].

Arrhenius folgend hängt die Reaktionsgeschwindigkeit in einer Flamme stark von der Temperatur ab, die Energie- bzw. Wärmeerzeugung ist an den Stoffumsatz in der Flamme gebunden. Durch den Wärmeverlust an die Wand erfolgt eine Erniedrigung der Flammentemperatur und somit eine Verringerung der Flammengeschwindigkeit. Der Zusammenhang von Flammengeschwindigkeit, Breite der Verbrennungszone, Zündenergie und Flammenfläche gibt einen Wert, den Löschabstand d_{ii} , an, der für die Flammenausbreitung nicht unterschritten werden kann. [8] Die Bedingung für den kritischen Rohrdurchmesser, also den Löschabstand für Rohre, kann durch die Péclet-Zahl beschrieben werden. Die Péclet-Zahl Pe ist eine dimensionslose Kennzahl für den Transport von Wärme (Wärmeleitung/Konvektion) [8] und kann nach [22, 32] folgend angeschrieben werden.

$$Pe = \frac{s \cdot d_{ii}}{a} \quad (2-10)$$

Mit der Verbrennungsgeschwindigkeit s , dem Löschabstand d_{ii} und a als die Temperaturleitfähigkeit (engl. *thermal diffusivity*) der unverbrannten Mischung.

Zur Ermittlung des Löschabstandes eines Maisstärke/Luft-Gemisches wählten Proust und Veysi re [22] den Aufbau mit einem Plattenpaar aus Edelstahl (200 x 200 x 0,5 mm) in einem quadratischen Rohr (200 x 200 mm) mit einer Lange von zwei Metern. Die durchgefuhrten Versuche zeigten einen Loschabstand von ca. einen Zentimeter (7 mm) bei einer Partikelkonzentration zwischen 100 und 400 g/m³ (siehe Abbildung 17). Die Loschkurve (Loschkurve – ABCD in Abbildung 17) zeigt keine typische U-Form mit einem Minimalwert an der stochiometrischen Mischung. [22] Die Berechnung der Verbrennungsgeschwindigkeit über die Péclet-Zahl ist bei Staub/Luft-Gemischen nicht anwendbar, da Strahlungsverluste bei Staub/Luft-Gemischen starker ausgepragt sind als bei Gas/Luft-Gemischen, fur welche dieser

Zusammenhang bestimmt wurde. [22] Die berechnete Péclet-Zahl für ein stöchiometrisches Maisstärke/Luft-Gemisch liegt bei $Pe = 120 \pm 25$ [22].

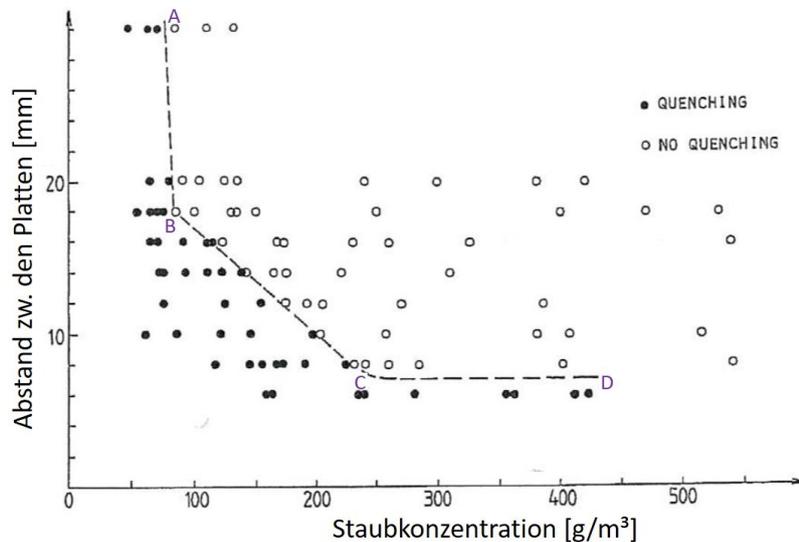


Abbildung 17: Löschatstand eines Maisstärke/Luft-Gemisches als Funktion der Staubkonzentration in der Mischung (inkl. Löschkurve – ABCD), Versuche durchgeführt von Proust und Veysiére [22]

Die numerische Berechnung des Löschatstandes erfolgt durch die Energiebilanz der Wärmeerzeugung der Flamme und dem Wärmeleitungsverlust durch die Wände des betrachteten zylindrischen Rohres ($q''_{\text{Erzeugung}} = q''_{\text{Verlust}}$) [13] (vgl. Abbildung 18).

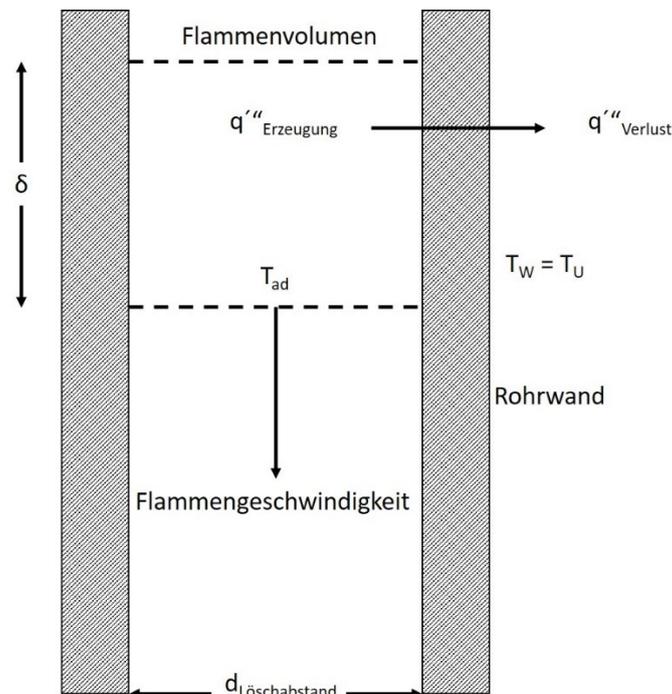


Abbildung 18: Darstellung der Parameter zur Berechnung des Löschatstandes gemäß Ogle [13]

Mit der Anwendung des Ansatzes von Spalding zur Berechnung der Breite der Verbrennungszone und der Annahme einer voll entwickelten laminaren Strömung und einer konstanten Wandtemperatur beträgt der Löschabstand in etwa die zweifache Breite der Verbrennungszone (für weiterführende Informationen sei auf Kapitel 2.1.3 hingewiesen). [13]

$$\delta = \frac{d_{ii}}{2} \quad (2-11)$$

Mit in der Formel als Symbol angeführten δ für die Breite der Verbrennungszone und d_{ii} als Löschabstand. [33] Bei der theoretischen Herleitung ergibt sich ein Wert von [13]:

$$d_{ii} \cong 1,91 * \delta \quad (2-12)$$

Durch vergleichende Untersuchungen von Jarosiński [32] und Jarosiński et al. [34] konnte ein Unterschied zwischen der Flammenauslöschung von sich nach oben ausbreitende Flammen und nach unten bewegende Flammenfronten festgestellt werden. Die sich nach unten bewegendes Flammen erfahren eine Auslöschung bei kritischen Rohrdurchmessern. Neben Wärmeverlusten an die Wand ist dies auch durch sinkende Verbrennungsprodukte erklärbar (Flamme bewegt sich durch die zuvor verbrannte Gasmischung). Ein Ausbreiten ist somit nicht mehr möglich. Bei sich nach oben ausbreitenden Flammen führt auch die hervorgerufene Flammendehnung (engl. *flame stretch*) neben den Wärmeverlusten zu geringeren Löschabständen. [13, 32, 34] Studiert wurde dieses Verhalten in einem vertikalen 50 x 50 mm² Rohr mit einer Länge von einem Meter und einem mageren Methan/Luft-Gemisch [32] (siehe Abbildung 19, a). Mit Hilfe eines variabel eingebauten Blocks wurde der Löschabstand durch Variation des Kanals zwischen Rohrwand und Block bestimmt und die Versuche bei einem Abstand von 9,2 mm mit in unterschiedlichen Richtungen ausbreitenden Flammen durchgeführt. Durch die Variation des Mischungsverhältnisses von Methan zu Luft konnte die Abhängigkeit des Löschabstandes von der Brennstoffkonzentration nachgewiesen werden (siehe Abbildung 19, b).

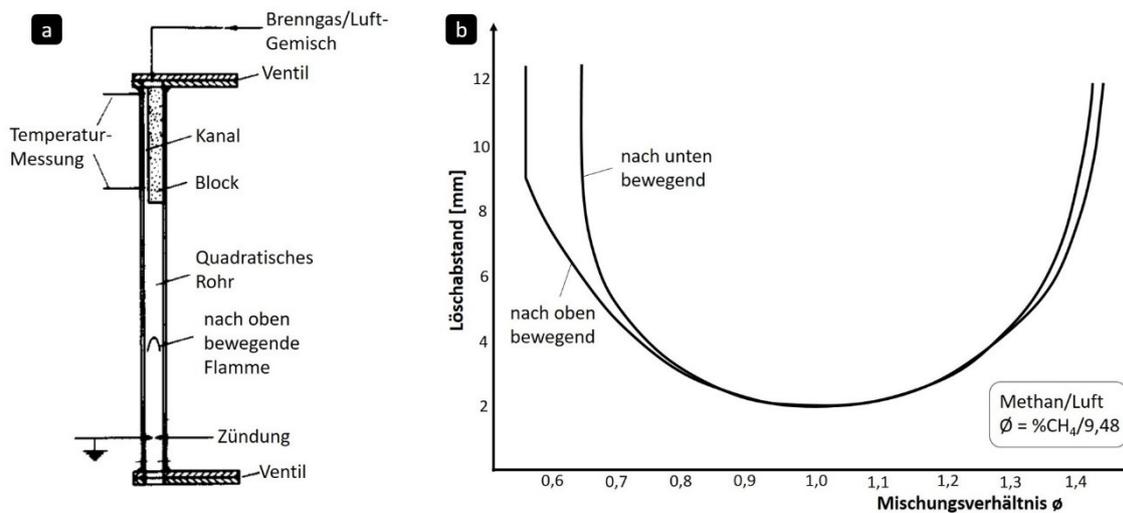


Abbildung 19: Versuchsergebnisse zum Löschabstand in Methan/Luft-Gemische, durchgeführt von Jarosiński [32], mit (a) dem Aufbau und (b) den Ergebnissen dieser Versuche

2.1.3 Breite der Verbrennungszone

Ein wichtiger Parameter der Verbrennung für die Beschreibung eines deflagrativen Prozesses in einem Staub/Luft-Gemisch ist neben der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit die Breite der Verbrennungszone. Zur Untersuchung und Bestimmung dieser ist die Kenntnis des Temperaturprofils essentiell. Dieses wurde von Jarosiński [33] über die Energiegleichung einer eindimensionalen stationären Flamme unter laminaren Bedingungen beschrieben. Die Energiegleichung kann dabei folgendermaßen nach Jarosiński [33] angeschrieben werden,

$$\frac{d}{dz} \left(\lambda * \frac{dT}{dz} \right) - c_p * \rho_u * s_l \frac{dT}{dz} + Q * w = 0 \quad (2-13)$$

bei der λ die thermische Leitfähigkeit, ρ_u die Dichte der unverbrannten Mischung, c_p die spezifische Wärmekapazität unter konstantem Druck, s_l die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit, Q die chemische Reaktionswärme pro Brennstoffverbrauch und w die konsumierte Brennstoffmenge pro Zeit und Volumen ist. Das dazugehörige Temperaturprofil, bei der die z -Koordinate normal zur Flammenfront angesetzt wird, ist in Abbildung 20 ersichtlich. Die vertikale Achse trennt die Vorwärmzone von der Reaktionszone und schneidet die Temperaturkurve in der mittleren kinetischen Temperatur T_m (engl. *mean kinetic temperature*). Der Temperaturanstieg in der Vorwärmzone ist durch Wärmeleitung beschreibbar, während der Anstieg in der Reaktionszone durch freiwerdende Reaktionswärme charakterisiert wird.

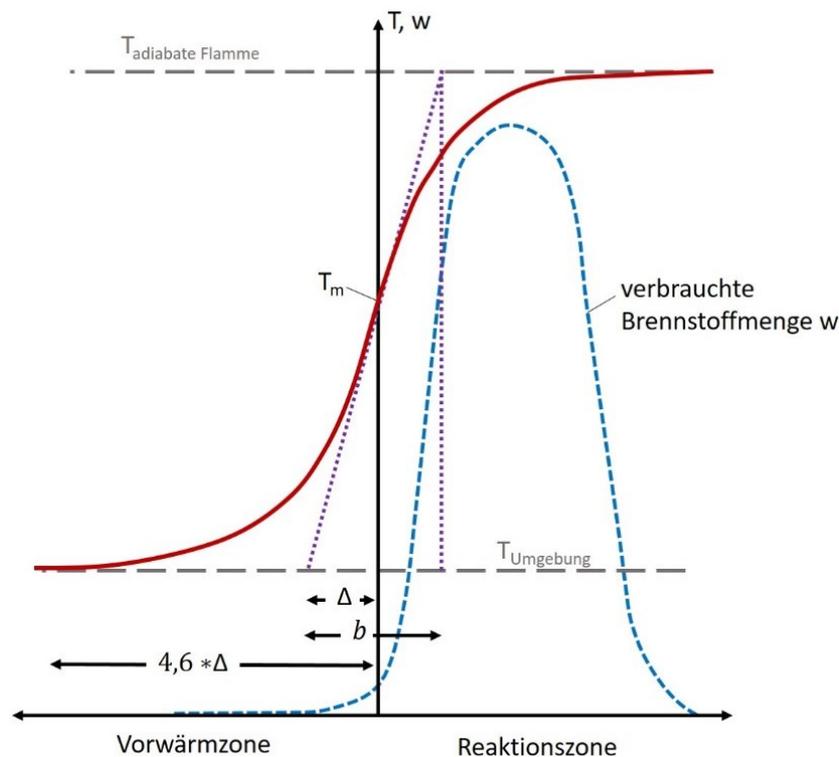


Abbildung 20: Temperaturprofil einer adiabaten Flamme unter laminaren Bedingungen [33]

Da die Breite der Verbrennungszone nicht eindeutig abgrenzbar ist, gibt es in der Literatur verschiedene Bezeichnungen und Definitionen. Zeldovich [35, 36] führte die sogenannte „*characteristic thickness*“ ein, welche den Bereich der Erwärmung des unverbrannten Gemisches bis zur Zündtemperatur beschreibt, durch die Gleichung (2-14) berechnet wird und immer einen geringeren Wert in Bezug auf die reale Breite der Flamme annimmt. [33]

$$\Delta = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho_u \cdot s_l} \quad (2-14)$$

Den Bereich zwischen der Zündtemperatur und der Temperaturerhöhung um 1 % untersuchten Gaydon und Wolfhard [37], bei welchen durch diese Betrachtung die Vorwärmzone 4,6-mal die „*characteristic thickness*“ von Zeldovich ist. [33]

Einen anderen Ansatz wählte Spalding [38], der die Breite der Verbrennungszone als das Verhältnis zwischen maximaler Temperaturdifferenz zwischen verbrannten (T_b) und unverbrannten (T_u) Gemisch und dem maximalen Temperaturgradienten verstand. [33]

$$b = \frac{T_b - T_u}{\left(\frac{dT}{dz}\right)_{max}} \quad (2-15)$$

Durch die experimentelle Untersuchung des Temperaturprofils definierte Jarosiński [33] die Breite der Verbrennungszone durch den Parameter δ mit der Temperaturdifferenz und dem maximalen Temperaturgradienten und korrigierte so den Ansatz von Spalding.

$$\delta = \frac{2 \cdot (T_b - T_u)}{\left(\frac{dT}{dz}\right)_{max}} \quad (2-16)$$

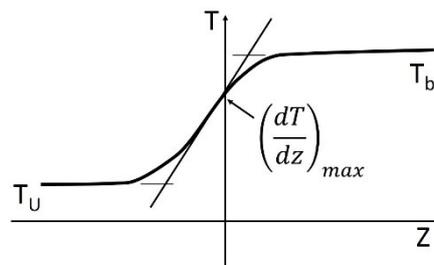


Abbildung 21: Prinzip der Berechnung der Breite der Verbrennungszone [22]

Die experimentelle Bestimmung der Breite der Verbrennungszone lösten Andrews und Bradley [39] mit Hilfe eines Gayhart-Prescott Schlieren-Interferometers, durchgeführt in einem Methan/Luft-Gemisch, in der Nähe des Zündortes, um Wandeffekte durch die Versuchsanordnung zu verhindern. Änderungen der Dichte durch die Zonen in der Flamme erzeugen Indifferenzen und werden so aufgezeichnet. Anhand des Temperaturprofils einer Flamme in einem Methan/Luft-Gemisch erkannte Jarosiński, dass die durch die beschriebene Methode gemessenen Breiten der Verbrennungszonen etwas höher als die rechnerisch ermittelten durch den mittleren Temperaturgradienten sind, ein Korrekturfaktor von 0,66 ist daher zu beachten. [33] Mit dem bekannten Zusammenhang von Löscharstand und Breite der Verbrennungszone, eingeführt von Jarosiński [33], konnten Proust und Veyssiére [22] durch die experimentelle Bestimmung des Löscharstandes die Breite der Verbrennungszone einer Flamme in einem Maisstärke/Luft-Gemisch (Median $20 \mu\text{m}$) mit einem Wert von $3 < \delta < 4 \text{ mm}$ beziffern.

2.1.4 Flammentemperatur

Theoretische sowie auch experimentelle Untersuchungen zur Flammentemperatur sind in der Literatur bekannt und zeigen, dass die experimentelle Bestimmung dieser sich sehr schwierig gestaltet. Versuchsergebnisse verschiedener Autoren [7, 40, 41] zeigten, dass gemessene Temperaturwerte aufgrund von Wärmeverlusten durch Strahlung niedriger als theoretisch berechnete (adiabate Rechnung) sind. Obwohl die Flammenausbreitung durch Konvektion bestimmt wird, können Strahlungsverluste bei der Temperaturmessung nicht vernachlässigt werden [7], da diese zu hohen Abweichungen führen. Theoretische

Berechnungen weichen immer von experimentellen Messungen ab, da die Verbrennung nicht-adiabat stattfindet und Strahlungsverluste sowohl von Gasphase als auch Partikeln an die Umgebung auftreten. [40] Thermoelemente führen daher zu geringeren Werten (400 bis 700 °K [40]). Die durch Smoot und Horton [40] veröffentlichten Messergebnisse, aufgenommen durch Thermoelemente, im Vergleich zu berechneten adiabaten Temperaturwerten ist in Abbildung 22, a ersichtlich. Neben den erwähnten Strahlungsverlusten führen Kohle- und Ascheschichten auf den eingesetzten Thermoelementen zu einer Messwertverzerrung.

Ein weiteres Problem bei der Messung der Flammentemperatur ist der vorhandene Temperaturunterschied zwischen Partikeltemperatur und Gastemperatur. Einen Lösungsansatz lieferte Cashdollar und Hertzberg [41], welche die Temperaturmessung einerseits mit Platin/Rhodium-Thermoelementen (25 µm Drahtdurchmesser, 50 µm Verbindungsperle) und andererseits mit Infrarot-Pyrometer durchführten (Ergebnisse siehe Abbildung 22, b). Es zeigte sich, dass die Partikeltemperaturen immer deutlich unter den Gastemperaturen liegen, Werte der Thermoelemente sind wiederum geringer (ca. 200 °K) im Vergleich zu den Partikeltemperaturen, was mit der fortlaufenden endothermen Pyrolyse der Partikel an den Thermoelementen erklärt werden kann. Ein Korrekturfaktor von bis zu 800 °K bei geringen Staubkonzentrationen aufgrund von Strahlungsverlusten wird daher von Cashdollar und Hertzberg [41] angedacht.

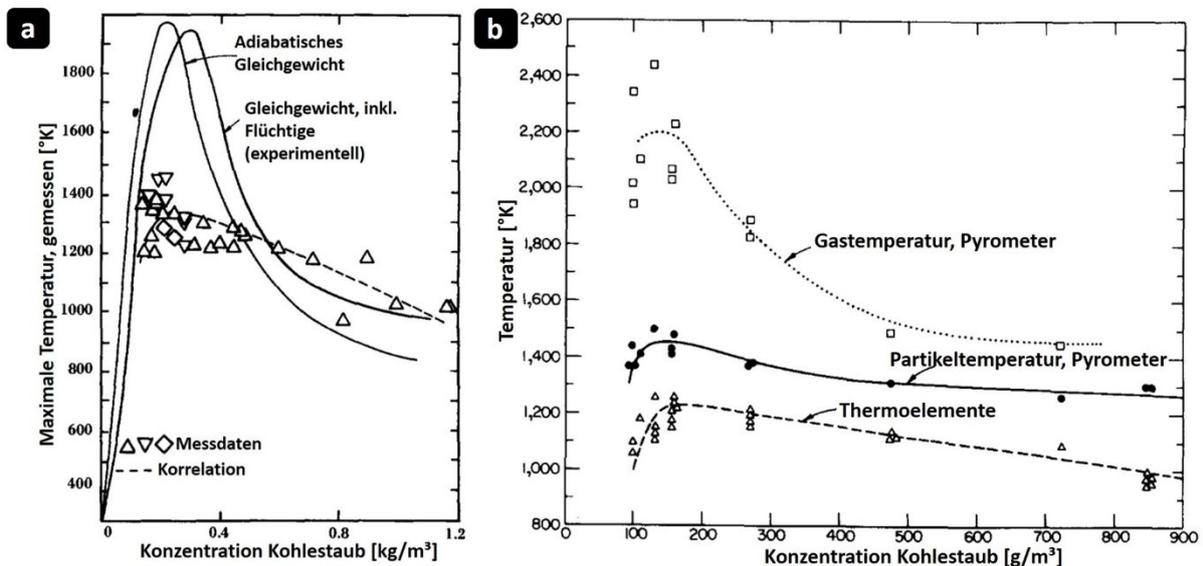


Abbildung 22: Ergebnisse von Temperaturmessungen in Kohlestaub/Luft-Mischungen; durchgeführt von (a) Smoot und Horton [40] und (b) Cashdollar und Hertzberg [41]

Auch Veysi re [7] erhielt bei seinen experimentellen Versuchen Werte von Thermoelementmessungen, welche 500 K unter den theoretischen Berechnungswerten lagen und führte vergleichende Versuche von Lemos und Bourianne [42] an, bei deren Messungen mit Emissions-Absorptions-Pyrometer sich Temperaturabweichungen von 500 bis 600 K zwischen Thermoelement und Pyrometer zeigten. Gemessene Flammentemperaturen in einer Rohrapparatur von Proust [43] mit Thermoelementen (50 μm Verbindungsperle) sind nach Ogle [13] für Stärke und Lycopodium Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Maximale Flammentemperaturen bei isobarer Verbrennung mit geringer initialer Turbulenz [13]

	Staubkonzentration [g/m³]	Gemessene Flammentemperatur [K]	Berechnete Flammentemperatur [K]
Stärke	250	1.500	2.300
Lycopodium	100	1.500	2.200

Die Abweichungen von experimentell bestimmten Werten und berechneten maximalen Flammentemperaturen in Abhängigkeit der Partikelkonzentration in einem Staub/Luft-Gemisch ist in Abbildung 23 ersichtlich. Die zunehmende Flammentemperatur mit steigender Staubkonzentration fällt bei den experimentell bestimmten Werten geringer aus als beim berechneten Zusammenhang. Ein Grund könnte sich in Verlustw rmestr men finden, welche bei steigender Temperatur durch den höheren Temperaturgradienten höher ausfallen.

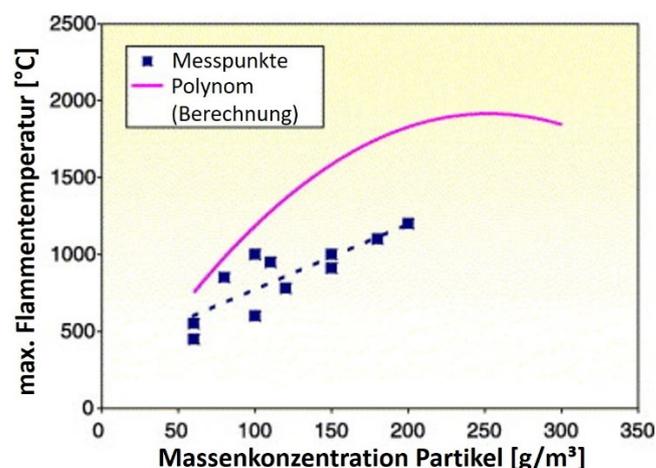


Abbildung 23: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Berechnungen der Flammentemperatur in einem Stärke/Luft-Gemisch, durchgeführt von Proust [43]

Beim Abgleich von Temperaturwerten ist stets zu beachten, dass Thermoelemente nur die Gasphasen-Temperatur messen und somit ein direkter Vergleich zwischen Partikeltemperatur und Gastemperatur nicht möglich ist. [13, 44] Der Einfluss der Partikelgröße auf die Flammentemperatur wurde bei bekannten Versuchsdurchführungen vernachlässigt, könnte aber auftreten, da die beobachtete Temperaturdifferenz bei verschiedenen Stäuben verschieden groß ausfällt (vgl. hierzu [13]).

Theoretische Überlegungen zum Strahlungsverlust der Flammenfront in einer Rohrapparatur stammen von Proust [43], und sind Abbildung 24 zu entnehmen. Zum unverbrannten Staub/Luft-Gemisch hin emittiertes Licht wird durch die Partikeln zurück zur Flammenfront gestreut, da diese wie Spiegel wirken und die Strahlung nicht absorbieren. Das gesamte Licht, welches nicht auf diese Weise reflektiert wird, zählt zur Verluststrahlung und somit zum Temperaturdefizit. Bei den gegebenen Temperaturdifferenzen könnte dabei davon ausgegangen werden, dass der Energieverlust aufgrund der Strahlung im Bereich von 20 bis 30 % liegt. Ein Einfluss auf die Größe der Differenz der Querschnittsfläche und somit eine Energieabsorption durch Wände ist jedoch nicht nachweisbar. [43] Dies bedingt aber einen weiteren Effekt, der die Temperaturmessung beeinflusst, da Strahlungsverluste durch diese Diskrepanz geringer scheinen als angenommen. [43] Proust [43] entwickelte den Ansatz der unvollständigen Verbrennung als Erklärung. Rußpartikel, welche bei der unvollständigen Verbrennung entstehen, sind einerseits für die Leuchtkraft der Flamme verantwortlich, andererseits zeugen genau diese von der Unvollständigkeit der Verbrennung und somit vom Enthalpie-Defizit zwischen berechneter Flammentemperatur und experimentell bestimmten Werten.

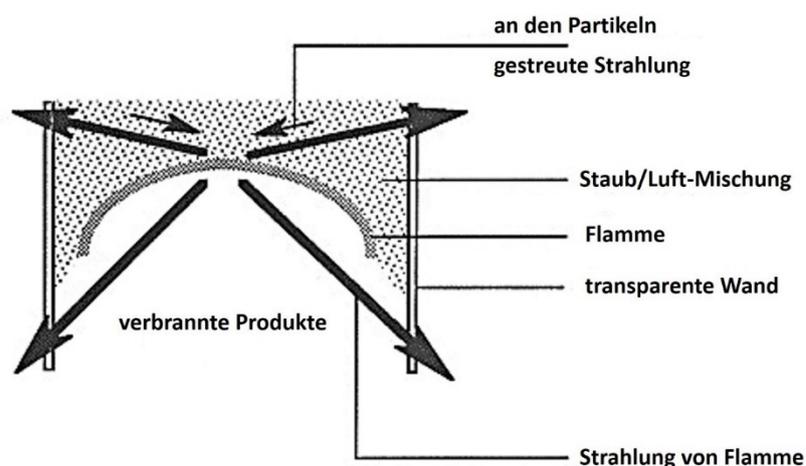


Abbildung 24: Wärmeverlust der Flammenfront aufgrund von Strahlung nach Proust [43]

Jarosiński [33] beschäftigte sich mit der Berechnung der Flammentemperatur und erkannte, dass die Flammenfortpflanzung bei Erreichen einer Temperatur unter 1.000 bis 1.200 °C unterbunden wird. Die Flammengeschwindigkeit erreicht im Moment des Auslöschens einen finiten Wert von einigen Zentimetern pro Sekunde, zu gering um den Verbrennungsvorgang weiter zu führen. Ist der Energieeintrag in die Reaktionszone der Flamme hoch genug, kann sich die Flamme selbstständig fortpflanzen. Sinkt die *mean kinetic temperature* T_m auf den Minimalwert $T_{m,lim}$ kann sich die Flamme nicht mehr selbstständig fortpflanzen [45] und erlischt. Die Berechnung der *mean kinetic temperature* (T_m) erfolgt nach Glg. 2-17 mit der Flammentemperatur (T_f) und der Gastemperatur vor der Zündung (T_0) [45].

$$T_m = T_0 + 0,74 * (T_f - T_0) \quad (2-17)$$

2.1.5 Flammengeschwindigkeit

Wie schon vorhergehend beschrieben, wird zwischen der Flammengeschwindigkeit (engl. *flame speed*) und der Verbrennungsgeschwindigkeit (engl. *burning velocity*) unterschieden. Die Flammengeschwindigkeit ergibt sich aus dem zurückgelegten Weg der Flammenfront über die Zeit. Sie berücksichtigt Geometrie-, Druck- und Temperatureinflüsse sowie die stoffliche Zusammensetzung des Brennstoffes. Die Flammengeschwindigkeit s_f in einem Staub/Luft-Gemisch kann experimentell bestimmt werden. Bekannte Versuchsaapparaturen zur Bestimmung dieser sind im folgenden Unterkapitel und im Kap. 2.1.6 beschrieben. Die Berechnung der Flammengeschwindigkeit s_f erfolgt durch das Zeitintervall (Δt) zwischen zwei Messpunkten und der Distanz zwischen den beiden Punkten (Δs).

$$s_f = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2-18)$$

Die gemessene Flammengeschwindigkeit ist nie die Verbrennungsgeschwindigkeit, sondern die Überlagerung von Verbrennungsgeschwindigkeit und der Gasgeschwindigkeit des Systems. [15, 28, 39] In Abbildung 25 sind Messergebnisse von Bradley und Hundy in einem Methan/Luft-Gemisch bei verschiedenen Mischungsverhältnissen ersichtlich, welche den Zusammenhang von Flammengeschwindigkeit (s_f) und Gasgeschwindigkeit (s_g) zeigt. Die Messwerte der Flammengeschwindigkeit und Gasgeschwindigkeit wurden in einer Laborapparatur aufgezeichnet, wobei die Gasgeschwindigkeit mit Hilfe eines Hitzedrahtanemometers mit sehr geringen Drahtdurchmessern erfasst wurde. Die Verbrennungsgeschwindigkeit ergibt sich aus der vertikalen Differenz zwischen den beiden Kurven. [46]

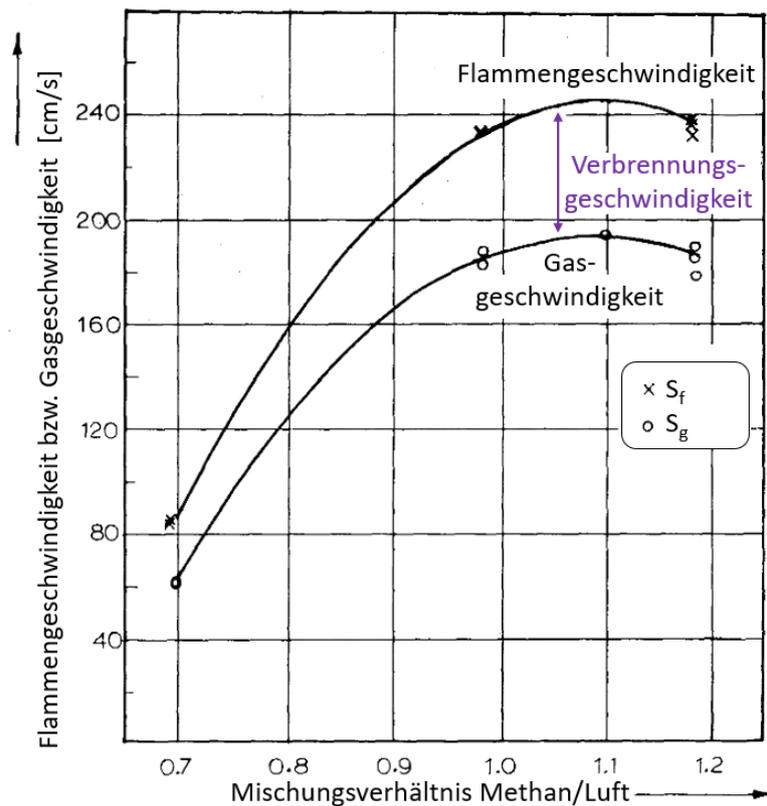


Abbildung 25: Flammengeschwindigkeit (s_f) und Gasgeschwindigkeit (s_g) bei verschiedenen Methan/Luft-Mischungen, durchgeführt von Bradley und Hundy [46]

2.1.6 Experimentelle Bestimmung der Flammengeschwindigkeit

Für die experimentelle Bestimmung der Flammengeschwindigkeit in brennbaren Staub/Luft-Gemischen sind verschiedene Methoden zur Anwendung im Labor bzw. Kleinmaßstab in der Literatur bekannt. Das Problem der gleichmäßigen Verteilung des Versuchsstaubes mit geringer Turbulenz im Versuchsraum wird verschieden behandelt und stellt eines der Hauptkriterien für die gewählte Methode dar. Als Versuchsaufbau hat sich im Allgemeinen die Verwendung einer Rohrapparatur etabliert, in welcher nach der Zündung an einem Ende der Flammenfortschritt entlang des Rohres untersucht wird. Zurückzuführen ist diese Methode (auch als *Tube Method* bekannt) auf Mallard und Le Chatelier (1883). Die lineare Flammenfortpflanzung entlang eines Rohres mit Zündung am offenen Ende und die Ausbreitung zum geschlossenen Ende hin wurde hierbei optisch erfasst. [7, 39] Durch diesen Versuchsaufbau erfolgt die Flammenausbreitung unter konstantem Druck. [7]

Angelehnt an dieser Methode veröffentlichten Joshi und Berlad [47] 1986 Ergebnisse zu Untersuchungen in einem 154 mm langen und 96 mm im Durchmesser großen Quarzrohr. Der Einfluss der schwerkraftgetriebenen Partikelbewegung wurde hierbei durch den freien Fall der

Apparatur vom NASA Lewis Research Center in Cleveland, Ohio, (2,2 Sekunden Schwerelosigkeit) untersucht. Der Versuchstaub Lycopodium wurde von oben durch Schneckenförderung in den Versuchsraum gefördert und die Apparatur bei gleichmäßiger Staubverteilung von der Schwerkraft entkoppelt. Die Zündung erfolgte durch Erhitzung eines mit Nitrocellulose umwickelten Drahtes. Die entstehende Flamme wurde durch feine Thermoelemente mit hoher Auflösung detektiert und die Strahlung als größter Wärmeverlust ermittelt. In Abbildung 26 ist eine schematische Zeichnung der Versuchsapparatur abgebildet.

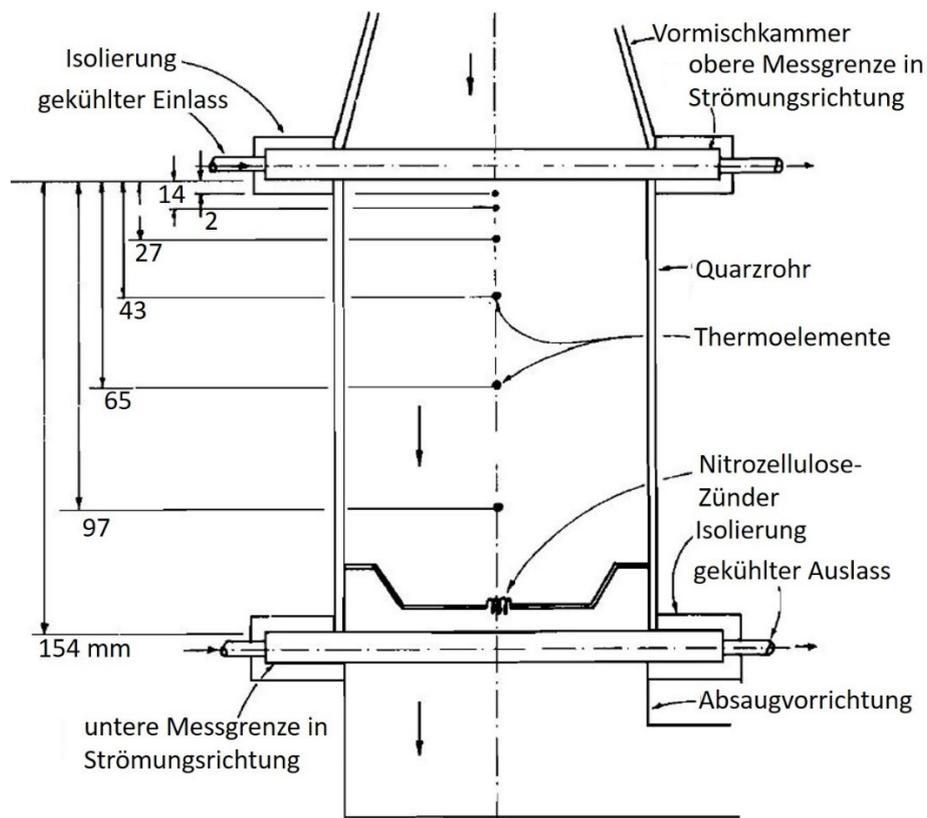


Abbildung 26: Versuchsapparatur von Joshi et al. zur Untersuchung von Gravitationseffekten auf die Flammenausbreitung in einem Lycopodium/Luft-Gemisch [47]

Die Versuchsapparatur von Proust und Veysi re [22] (Abbildung 27) wurde aus einem 3.000 mm langen quadratischen Rohr (200 mm x 200 mm) aufgebaut, in welches der Staub, mit Hilfe einer Wirbelschicht im unteren Bereich, verteilt wird. Zum Zeitpunkt der Zündung durch einen elektrisch erhitzten Wolfram-Draht wird zeitgleich der Luftstrom beendet und die poröse Membran am unteren Ende der Rohrapparatur entfernt. Die Flamme breitet sich durch das entzündliche Brennstoff/Luft-Gemisch vom offenen unteren Ende nach oben hin zum geschlossenen Ende aus. Durch die gewählte Versuchsmethode können sowohl turbulente, als auch laminare Bedingungen geschaffen werden. Die Bestimmung der Flammenausbreitung erfolgt durch Ionisationsproben zur Messung der räumlichen

Flammengeschwindigkeit, durch Thermoelemente zur Messung der Flammentemperatur und durch Photodioden zur Messung des emittierenden Lichts der Flammenfront.

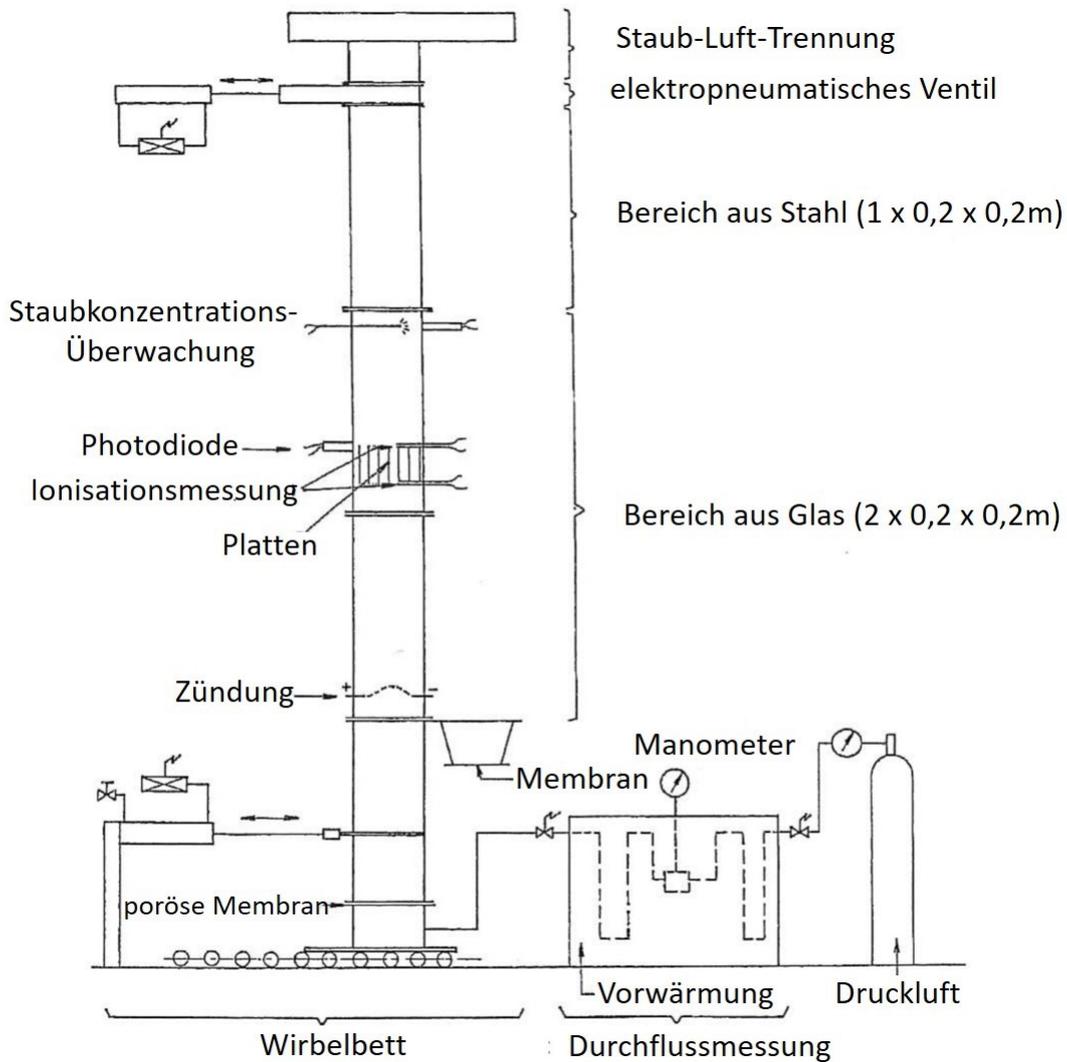


Abbildung 27: Experimentelles Setup nach Proust und Veysi re [22]

Eine ähnliche Methode zur Bestimmung der laminaren Flammenfortpflanzung erwählte Han et al. [30], welche ebenfalls eine Wirbelschicht zur Erzeugung einer gleichmässigen Staubverteilung im Versuchsraum nutzten. Der Hauptteil der Apparatur besteht aus einem vertikalen quadratischen (150 mm x 150 mm) Rohr mit einer Höhe von 1.800 mm (siehe Abbildung 28). Der brennbare Staub wird auf eine feinpor se Platte am unteren Ende der Rohrapparatur aufgebracht und durch ein fluidisiertes Bett mit Luftstrom verteilt. Die Funkenzündung erfolgt zwischen zwei Elektroden, die Flamme bewegt sich aufwärts im Rohr und wird bildlich durch Videoaufzeichnungen (30 bis 2.000 frames/s) erfasst. Weitere Untersuchungen wurden mithilfe einer *particle image velocimetry* (PIV)-Messung [20]

durchgeführt, um genauere Daten zur Partikelbewegung zu erhalten. Die Partikelbewegung wird dabei in einer belichteten Ebene optisch aufgenommen und das vorherrschende Geschwindigkeitsfeld ausgewertet.

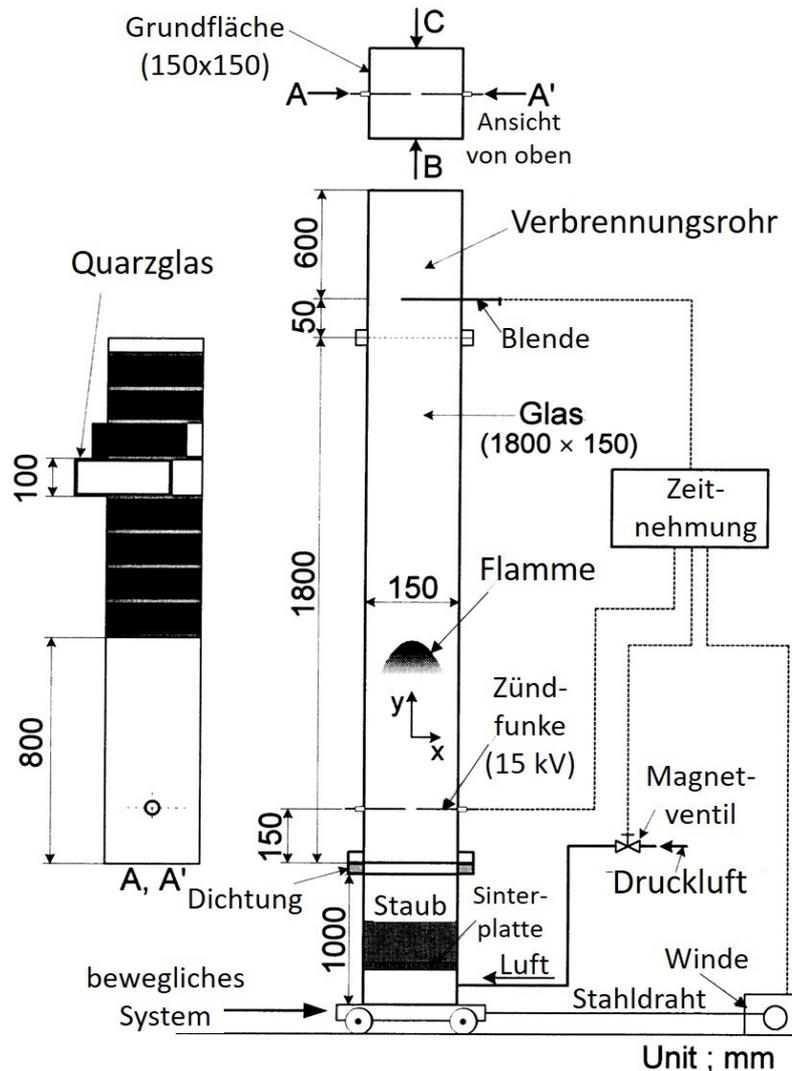


Abbildung 28: Schematische Darstellung des experimentellen Setups von Han et al. [30]

Krause [48] wählte für die experimentelle Untersuchung der Flammenausbreitung in laminar strömenden Staub/Luft-Gemischen die Anordnung eines 2.000 mm langen vertikalen Glasrohres mit einer feinporösen Glasfilterplatte als Staubaufgabe am unteren Ende, durch welche ein eingestellter Luftstrom strömt (vgl. Abbildung 29). Versuchsserien wurden mit einem Rohrdurchmesser von 60 mm und 100 mm durchgeführt. Die Zündung erfolgte per Hochspannungsfunken im Bereich des voll ausgebildeten laminaren Profils und die Flammengeschwindigkeit wurde mittels Bildverarbeitungs-Software durch die Auswertung der Videoaufzeichnungen berechnet. Bei seinen Untersuchungen mit Maisstärke und Lycopodium

konnte Krause eine Beschleunigung der Flamme durch das Rohr nach oben hin beobachten und bezifferte diese um das Zwei- bis Vierfache bis zum Erreichen des oberen Rohrendes.

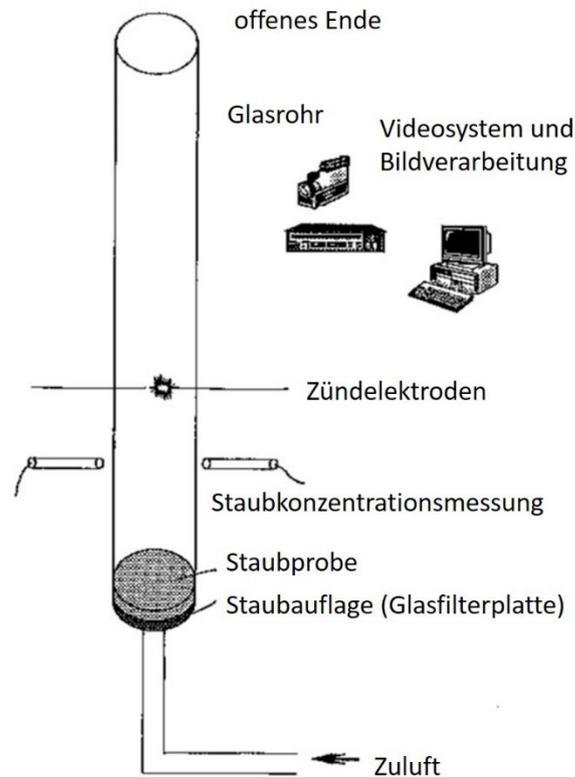


Abbildung 29: Versuchsaufbau nach Krause zur Untersuchung der Flammenausbreitung in laminar strömenden Staub/Luft-Gemischen [48, 49]

Untersuchungen zum Einfluss der Turbulenzbedingungen auf die Flammenausbreitung führten Wang et al. [23] in einer Apparatur mit quadratischem Rohrquerschnitt (160 x 160 mm) mit einer Höhe von 780 mm durch. Um die Flamme optisch studieren zu können wurde der Hauptteil der Apparatur aus Glas gefertigt (vgl. Abbildung 30). Die Verteilung des Versuchsmaterials erfolgt vom Boden durch eine poröse Platte per Luftstoß. Die Staubwolke wird nach oben hin zum offenen Ende eingetragen und bei vollständiger Ausfüllung des Rohrvolumens wird die Eintragsvorrichtung entfernt. Zeitgleich wird das offene Ende am oberen Teil geschlossen. Durch die Variation der Zündverzögerungszeit können sowohl turbulente als auch laminare Bedingungen eingestellt werden. Die Zündung erfolgt im unteren Teil der Apparatur durch eine kleine Butan/Luft-Flamme. Nach der Entzündung breitet sich die Flammenfront vom offenen unteren Ende nach oben hin zum geschlossenen Ende aus.

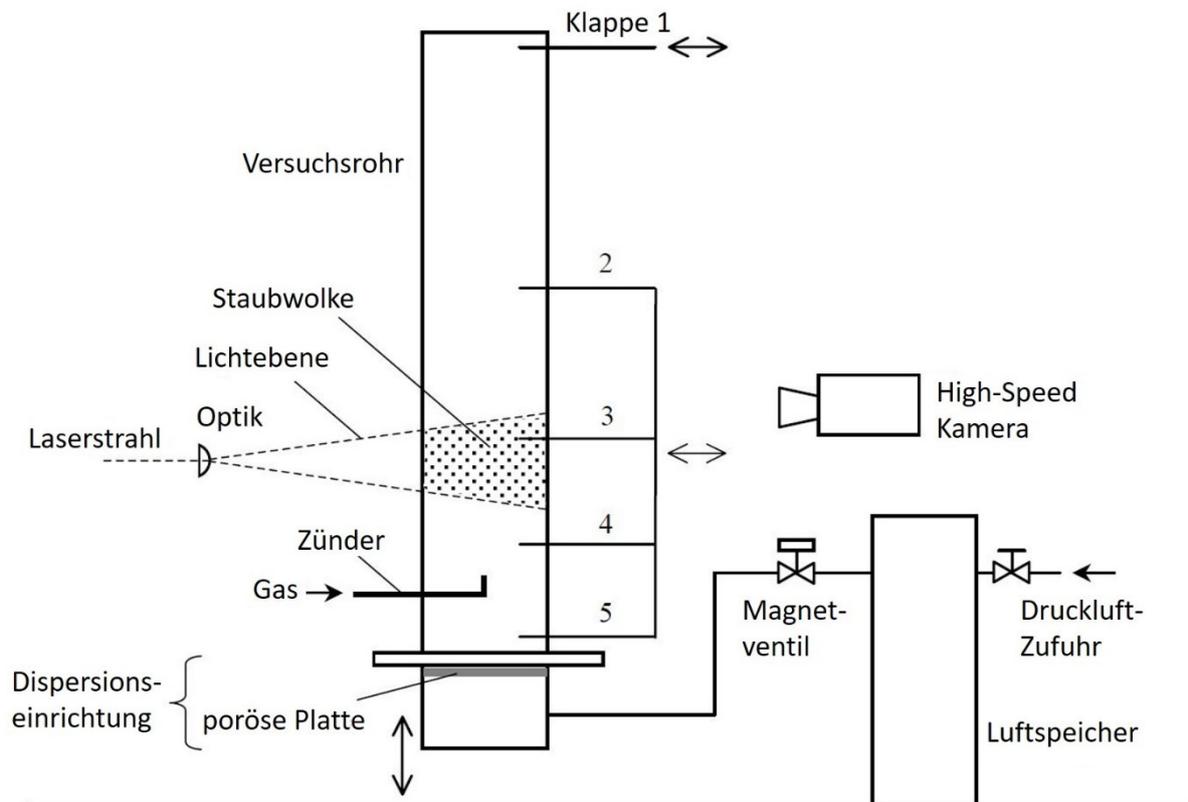


Abbildung 30: Experimentelles Setup nach Wang et al. [23]

Eine andere Methode zur Erzeugung einer Staubwolke in einer Rohrapparatur zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit unter laminaren Bedingungen wählte Kern [17], welcher die schwerkraftgeriebene Partikelströmung ausnutzte, um eine gleichmäßige Staubverteilung im Explosionsraum zu erhalten. Die genaue Beschreibung dieses experimentellen Versuchsaufbaus kann Kap. 3.1 entnommen werden.

Ein Anstieg der Flammengeschwindigkeit entlang der Längsachse der Apparaturen konnte von Krause [48] festgestellt werden, die Untersuchung in einem längeren Rohr wäre somit die Konsequenz. Palmer und Tonkin [50] realisierten dies in einem 5.200 mm langen vertikalen Explosionsrohr mit einem Durchmesser von 254 mm. Der Staubeintrag erfolgte über eine Förderschnecke und eine Vibrationsplatte von oben (siehe Abbildung 31). Die Staubpartikel können durch diese Methode mit geringer Turbulenzerzeugung in den Versuchsraum eingebracht werden und sinken schwerkraftgetrieben nach unten. Die Zündung erfolgte im unteren Drittel, die Flamme breitete sich zu den geschlossenen Enden hin aus. Vorteil ist die geringe Turbulenz der Partikel um den Zündort, Nachteil hingegen ist der nicht vorhandene Druckabbau aufgrund beider geschlossenen Enden.

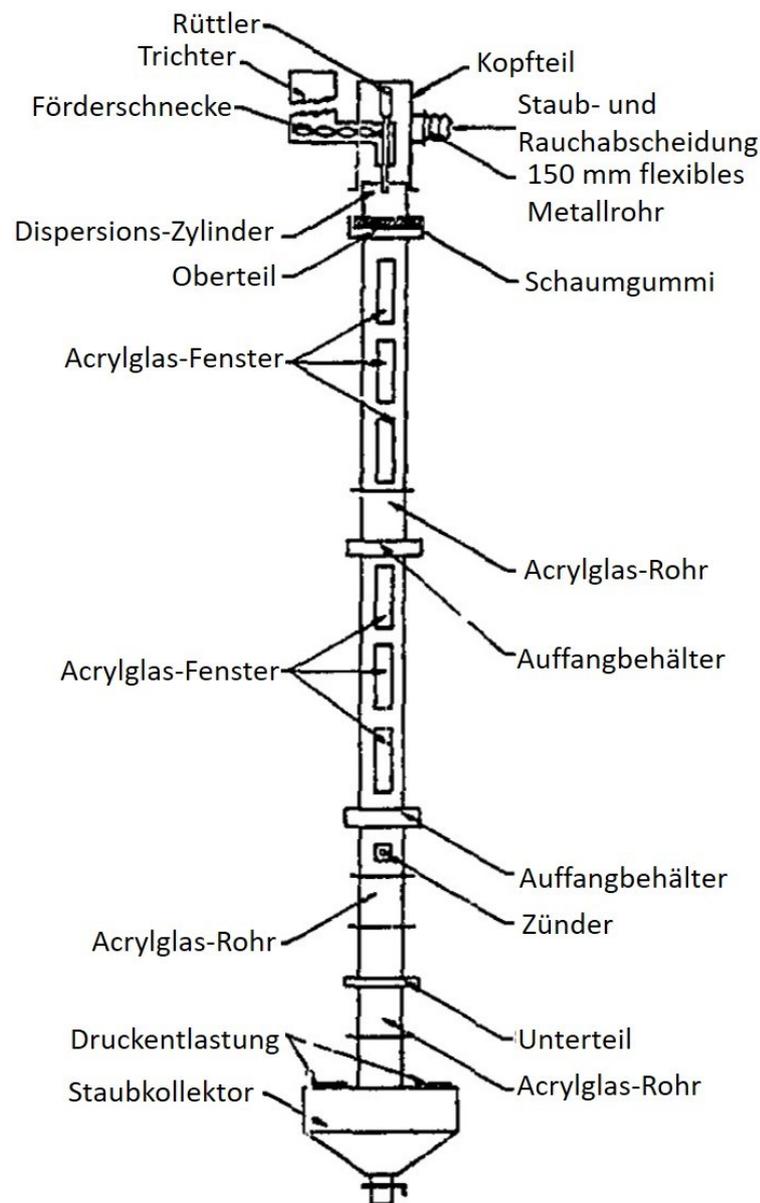


Abbildung 31: Vertikales Explosionsrohr nach Palmer und Tonkin [50]

Andere Versuchsaufbauten mit Rohrapparaturen zur experimentellen Bestimmung der Flammengeschwindigkeit sind in der Literatur dokumentiert, dienen aber der Untersuchung der Flammenausbreitung in turbulenten Staub/Luft-Gemischen (u.a. [10, 51]). Des Weiteren gibt es andere Versuchsmethoden, bei welchen der Explosionsraum sphärisch, rechteckig oder eine andere Form besitzt (u.a. [52]).

Nicht nur der Labormaßstab bietet die Möglichkeit die Flammenausbreitung in Staub/Luft-Gemischen studieren zu können, auch experimentelle Untersuchungen im Großmaßstab (u.a. [53–61]) sind bekannt (als Bsp. ist in Abbildung 32 ein Versuchs-Silo von Eckhoff et al. [54] abgebildet). Der Staubeintrag erfolgt zumeist unter Druckdifferenz. Aufgrund der Art der

Staubverteilung gelingt es in diesen bekannten Großapparaturen nur turbulente Bedingungen zu erzeugen. Die dabei angewendete Versuchsmethode und der Aufbau erlauben ausschließlich Untersuchungen unter turbulenten Bedingungen. Strömungsberuhigte oder laminare Bedingungen sind bei diesen daher nicht realisierbar. Neben Versuchsapparaturen sind auch full-scale Bergbaustrecken für Versuchsreihen mit hybriden Gemischen oder für Untersuchungen zu Inertisierungsmaßnahmen im Bergbau (vgl. [62]) vorhanden. In bekannten Apparaturen im Großmaßstab sind weder strömungsberuhigte, noch laminare Versuchsbedingungen erzeugbar und die Möglichkeit die Flammenausbreitung unter geringen turbulenten Bedingungen zu studieren ist nicht gegeben.

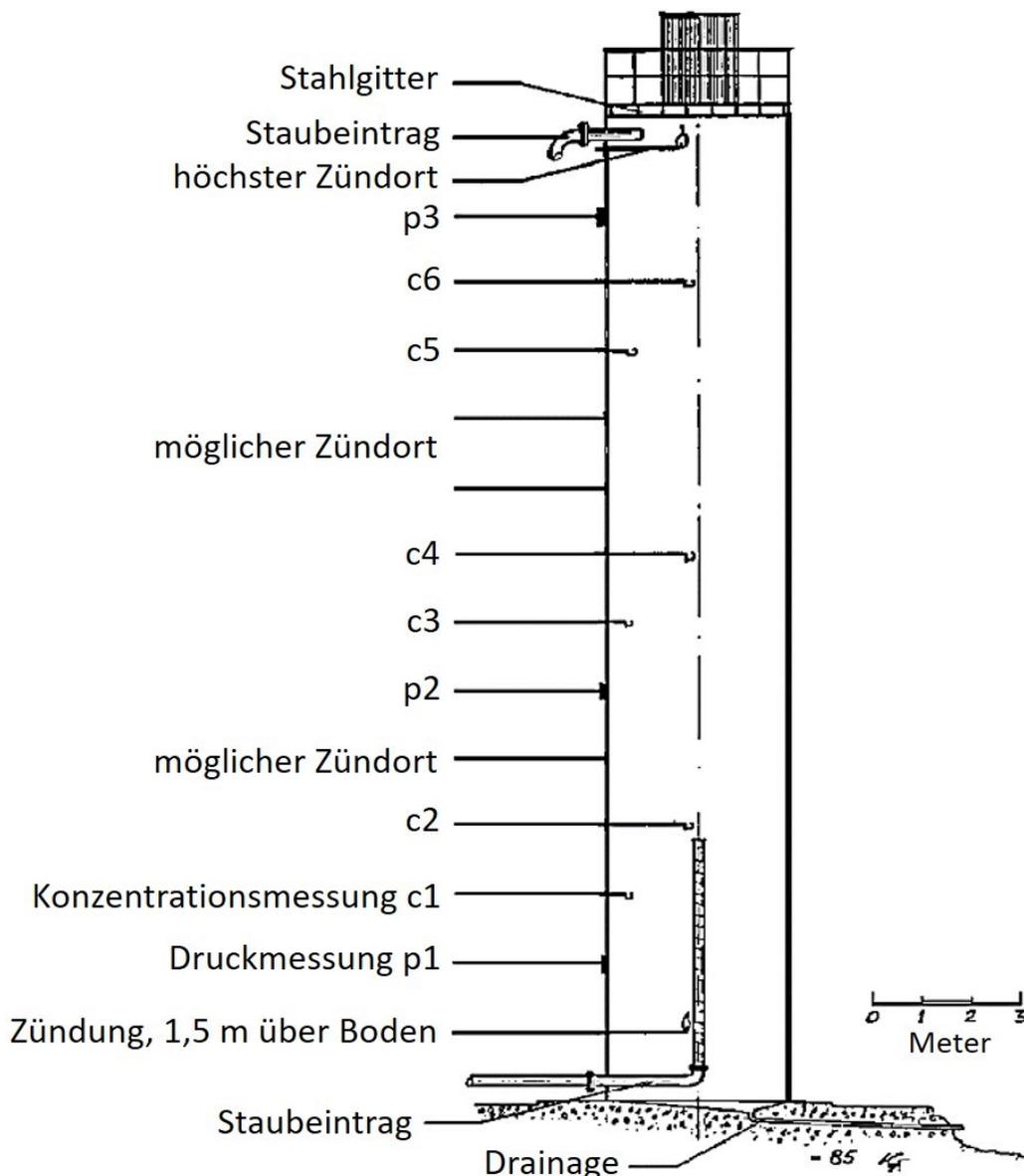


Abbildung 32: Abbildung eines 236 m³ großen Silos für experimentelle Untersuchungen in Bergen von Eckhoff et al. [54]

2.2 Einflussparameter auf die Flammenausbreitung

Für die Planung von Versuchen im Rahmen der vorliegende Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde das System „Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch“ charakterisiert und Eingangsgrößen sowie Einflussparameter definiert, um so einen Überblick zu erhalten. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch unter geringer Turbulenz vor der Zündung in einer eigens dafür konstruierten Apparatur im Großmaßstab untersuchen zu können, um so weitere Erkenntnisse über die Ausbreitung und Fortpflanzung der Flammenfront zu erhalten. Als Qualitätsmerkmal des Systems wird die Flammenfortpflanzung ausgehend vom Zündort festgelegt. Unter dem Qualitätsmerkmal wird das „messbare positive Ereignis“ [63], eine kontinuierliche Größe, welche den Erfolg der Effektberechnung maßgeblich ausmacht, verstanden. Zu den Parametern der Versuchsplanung zählen neben den Steuergrößen und Signalgrößen die Störgrößen [63], Einflussfaktoren, welche das Ergebnis der durchgeführten Versuchsserien beeinflussen. Störgrößen sind Eingangsparameter, die auf das System wirken und nicht gezielt verändert werden können oder unbekannt sind [63]. Sie beschreiben unkontrollierbare Einwirkungen auf das System. Die Vermeidung dieser ist durch die gewählte Versuchsmethode jedoch nie möglich. Die für das System „Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch“ gewählte Darstellung in Form eines Parameterdiagramms nach Siebertz et al. ist in Abbildung 33 ersichtlich. Auf das zu untersuchende System wirkende Parameter werden im Einzelnen nachfolgend beschrieben.

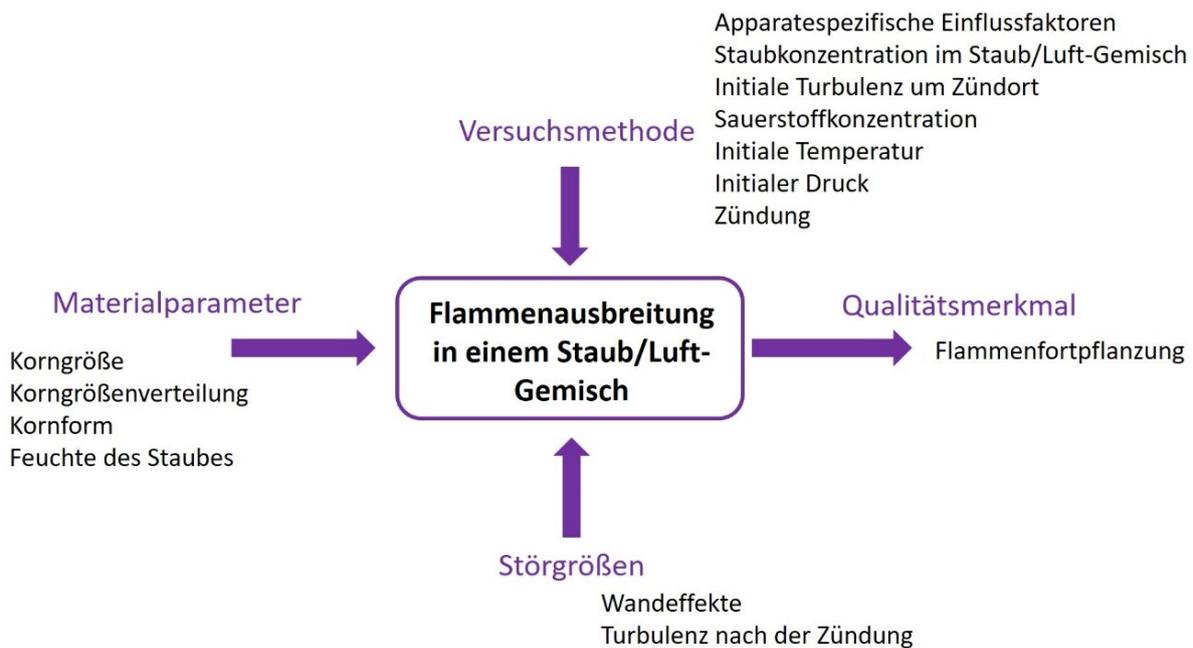


Abbildung 33: Parameterdiagramm für die Versuchsplanung der vorliegenden Arbeit

2.2.1 Korngröße

Die Korngröße eines Materials gibt Auskunft darüber, ob beim vorliegenden Stoff von Staub gesprochen wird. Beträgt die Korngröße eines Feststoffgemisches 100 bis 500 μm wird das Material als Staub bezeichnet, Feinstaub wird dieses bei Korngrößen von 100 bis 300 μm bezeichnet und Partikeln unter 100 μm werden als Feinststäube bezeichnet. [64] Partikel in der Größenordnung 1 bis 100 nm werden den Nanostäuben zugeordnet. Die Gesetze der Quantenphysik spielen bei dieser Klasse eine stärkere Rolle und das Oberflächenverhalten wird wichtiger als das Mengenverhalten. [65] Eine sicherheitstechnische Charakterisierung inkludiert immer die Analyse der Partikelgröße der Staubwolke. Umso größer die spezifische Oberfläche pro Masse ist, desto höher ist die potentielle Gefährdung, da feine Partikeln durch ihre hohe spezifische Oberfläche schneller reagieren als größere Partikeln desselben Materials und effektivere Verbrennungsvorgänge zeigen. [66] Explosionskenngrößen werden wesentlich von der Korngröße des Staubes beeinflusst, wobei feine Stäube heftiger reagieren als grobe. Besonders die Heftigkeit der Explosion (K_{ST} -Wert), weniger der maximale Explosionsüberdruck, steht hier im Zusammenhang. [64] Erklärungen finden sich in der höheren zur Verfügung stehenden Partikeloberfläche, an der einerseits durch direkte Oxidation die Staubexplosion abläuft (vgl. Metallstäube). [67] Andererseits ermöglicht die große Oberfläche einen höheren Wärmeeintrag in das Partikel, wodurch das Partikel schneller erhitzt wird und Pyrolysegase schneller frei werden. [27] Dies wiederum erhöht im Falle eines

Pyrolyse-limitierten Regimes die Verbrennungsgeschwindigkeit in der Staub-Wolke. Die Verbrennungsgeschwindigkeit korreliert mit steigender Partikelgröße negativ, da die spezifische Oberfläche sinkt und der Wärmeeintrag in das Partikel abnimmt. Der limitierende Schritt ist die Pyrolyse, welche nur langsam abläuft. [27] Die Korngröße kann nur die Rate der Pyrolyse beeinflussen, nicht aber die Mischungsrate der Gasphase oder die Verbrennung dieser. [68] Ein weiterer Grund für die höhere Reaktionsneigung kleiner Partikel liegt in der leichteren Dispergierbarkeit dieser in Luft und der niedrigeren Sinkgeschwindigkeit im Vergleich zu großen Partikeln desselben Materials, wodurch feine Partikel über einen längeren Zeitraum in einer explosionsfähigen Atmosphäre vorliegen. [66, 69] Die hohe Reaktionsfreude kleiner Partikel geht so weit, dass Nanostäube oft schon durch die Eintragsmethode in eine Explosionskammer zünden. [70, 71] Die Abhängigkeit der Zündenergie von der Korngröße (angeführt ist der Medianwert) ist in Abbildung 34 ersichtlich, in welcher die Versuchsergebnisse und die theoretische Berechnung (Gerade) von Pellmont eingetragen wurden. [72] Der starke Einfluss auf die Zündenergie ist durch den beinahe sprunghaften Anstieg (vertikale Achse) erkennbar.

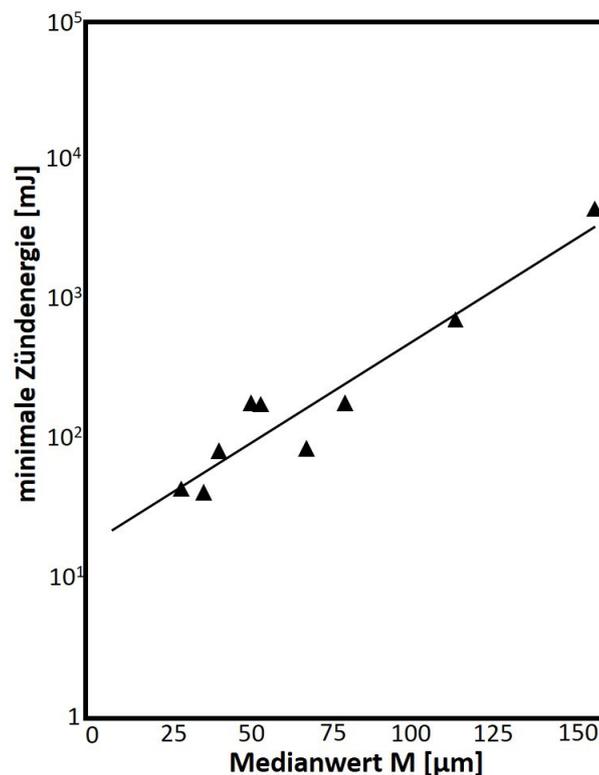


Abbildung 34: Einfluss des Medianwertes auf die minimale Zündenergie von Polyäthylenstäuben, Versuchsergebnisse von Pellmont [72]

Nicht immer kann von schnelleren Reaktionsfortschritten bei kleineren Partikeln ausgegangen werden. Die Neigung zur Agglomeratbildung ist bei verschiedensten Materialien

gegeben und steigt bei diesen auch mit sinkender Partikelgröße. Je nachdem wie hoch die Fähigkeit zur Bildung von Agglomeraten ist, kann dies so weit gehen, dass sich Agglomerate ausbilden, deren Größe über 500 μm steigt und das Gemisch nicht mehr zündfähig ist. [69] Durch dieses Verhalten ändert sich nicht nur die Korngrößenverteilung des Staubes, Änderungen in der Zündempfindlichkeit und der Explosionsfähigkeit treten auf, da sich das Agglomerat wie ein Einzelpartikel verhält. Die Tendenz zur Agglomeratbildung tritt vor allem ab einer Partikelgröße kleiner 10 μm auf. [68] In Abbildung 35 sind neben (a) Maisstärkepartikeln auch (b) stabile Agglomerate aus Maisstärkekörnern (10 bis 15 μm Primärpartikel) abgebildet, welche sich aus kommerziell erhältlicher Stärke bilden können.

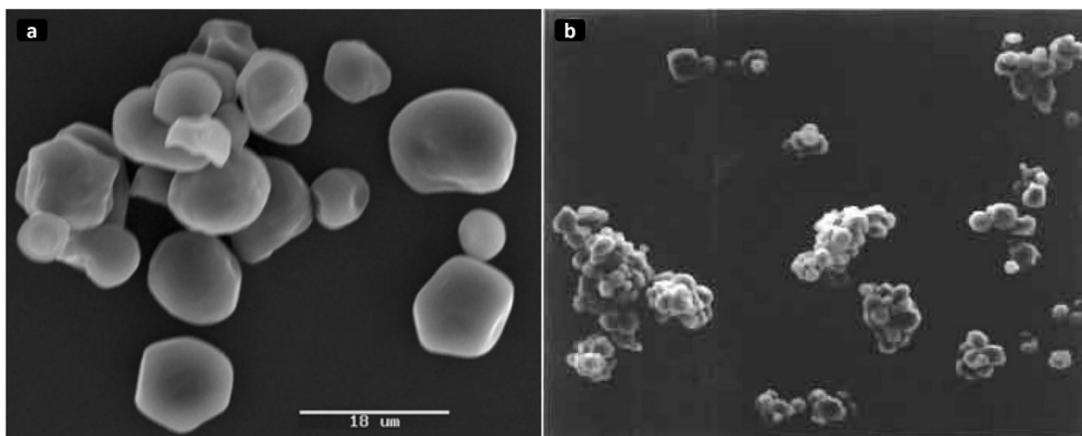


Abbildung 35: Mikroskop-Aufnahmen von (a) Maisstärke [58] und (b) stabile Agglomerate aus Maisstärkepartikel (10 bis 15 μm Primärpartikel) [68]

2.2.2 Korngrößenverteilung

Organische Stäube liegen im Allgemeinen nicht in einer einheitlichen Korngröße vor, sondern bestehen aus einer Mischung mannigfaltiger Partikelfractionen, welche verschiedenen Anteile in der Mischung haben. Aus diesem Grund ist nicht immer nur die Partikelgröße zu beachten, sondern auch die Korngrößenverteilung, welche einen erheblichen Einfluss auf den Verbrennungsvorgang hat. Mit steigendem Partikeldurchmesser sinkt der zu erwartende Explosionsdruck langsam, der zeitliche Druckanstieg merklich schneller. [66] Eine breite Korngrößenverteilung eines Staubes kann als Kombination aus engen Korngrößenverteilungen angesehen werden, wodurch es klar wird, dass die feine Partikelfraktion einer breiten Korngrößenverteilung die Gefährlichkeit der Staubmischung bestimmt, da diese Partikel am reaktionsfreudigsten sind. [66]

Statt der Korngrößenverteilung wird oft der Medianwert angegeben, der 50 %-Wert der Summenverteilungskurve für die unterschiedlichsten Korngrößen. [64] Die

Korngrößenverteilung der für die vorliegende Arbeit verwendeten Versuchsstäube ist dem Anhang A bis C zu entnehmen.

Beim Eintrag von Material in einen Versuchsaufbau ist stets zu beachten, dass durch die Verteilungsmethode des Staubes in den Versuchsraum durch Abrieb udg. größere Partikeln zerkleinert werden könnten und so eine feinere Fraktion entstehen würde.

2.2.3 Kornform

Die Erscheinungsform von organischen Stäuben ist vielfältig, sie reicht von körnig (z.B. Lycopodium), flach oder faserig (z.B. Cellulosestaub) über spitz, eckig, gezackt udg.. [64] Neben anderen Faktoren hat die Kornform des brennbaren Staubes Auswirkung auf den Verbrennungsprozess. Wie schon unter dem Punkt Korngröße beschrieben, trägt die zur Verfügung stehende Oberfläche des Partikels maßgeblich zur Verbrennungsreaktion bei. Eine hohe spezifische Oberfläche begünstigt den Verbrennungsprozess des Partikels. Aus diesem Grund beeinflussen die Partikelform und die Porosität der Partikeln durch die sich so ändernde spezifische Oberfläche die Reaktionsrate. Kornformen mit höherer spezifischer Oberfläche reagieren im Allgemeinen mit höherer Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit. [66] Der Einfluss der spezifischen Oberfläche eines Staubes auf den zeitlichen Druckanstieg wurde von Eckhoff [68] untersucht und zeigte eine positive Korrelation zwischen zeitlichem Druckanstieg und der spezifischen Oberfläche. Durchgeführt wurden die Versuche in der geschlossenen 1,2 Liter fassenden Hartmann-Apparatur. Der abgebildete Zusammenhang (Abbildung 36) wurde durch eine empirische Gleichung auf Grundlage einer linearen Interpolation erstellt und für verschiedene Stäube (Kartoffelstärke, Maisstärke, Fischpulver) durch Versuchsserien bestätigt. [68]

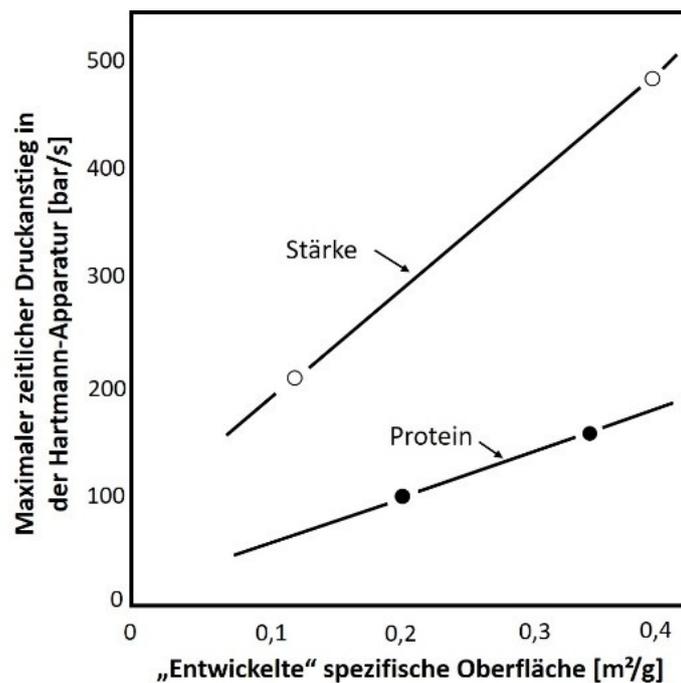


Abbildung 36: Einfluss der spezifischen Oberfläche von organischen Stäuben auf den zeitlichen Druckanstieg einer Staubexplosion, gemäß Eckhoff [68]

Durch das ideale Verhältnis von Oberfläche zu Volumen bietet die Kugelform Idealvoraussetzungen für eine Staubexplosion. Im Forschungsbereich wird daher für Untersuchungen *Lycopodium* verwendet, da die Sporen des Bärlappgewächses eine annähernd sphäroidische Form, neben ihrem monodispersen Verhalten, zeigen. Ähnlich verhält sich Maisstärke.

Kurze Fasern, welche beim Verarbeiten von Faserstoffen anfallen, zählen ebenfalls zu Stäuben, können im aufgewirbelten Zustand verbrennen und werden als „Flock“ bezeichnet. Die Charakterisierung erfolgt durch das Grammgewicht je 10 km Faserlänge (Titer oder dtex-Zahl) und der Schnittlänge. Der maximale Explosionsdruck bei optimaler Flockkonzentration erhöht sich mit zunehmendem Titer. Die optimale Konzentration von Flock in Abhängigkeit von Titer verhält sich somit ähnlich wie die optimale Konzentration brennbarer Stäube vom Medianwert (vgl. hierzu den Punkt Korngröße). [64] In Abbildung 37 sind beispielhaft zwei verschiedene Kornformen organischer Stäube dargestellt.

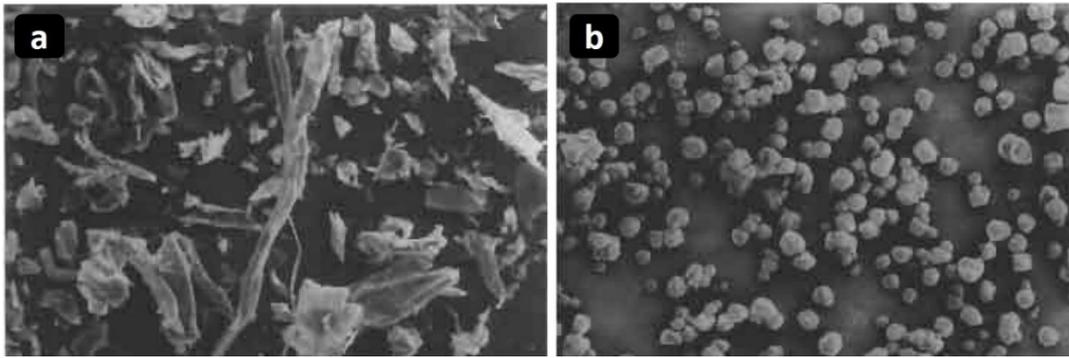


Abbildung 37: REM-Aufnahmen von (a) Holzstaub und (b) Maisstärke als Beispiel für (a) ungleichmäßige Partikelformen und (b) klar abgrenzbare, beinahe einheitliche sphärische Kornformen [68]

2.2.4 Feuchte des Staubes

Die Feuchte eines Stoffes gibt den Anteil an adsorbierter Flüssigkeit durch die Partikel an. Stark hygroskopische Materialien ziehen Feuchte aus der Umgebung, andere Stoffe adsorbieren nur sehr geringe Mengen. Der Verbrennungsprozess in einer Staub/Luft-Mischung wird von der Feuchte des Staubes stark beeinflusst. Dies hat mehrerlei Gründe. Die Erhitzung bei der Verbrennung des feuchten Staubes mit anschließender Verdampfung des Wassers stellt eine Wärmesenke dar [68], welche die Temperatur der Flammenfront herabsetzt und so den Verbrennungsprozess verlangsamt. Ein weiterer Grund findet sich in der Gasphase der Vorwärmzone, in der sich der Wasserdampf mit den Pyrolysegasen durchmischt und so die Reaktivität der Gasphase herabsetzt. [68] Die interpartikuläre Kohäsion wird ebenfalls durch steigende Feuchte des Stoffes erhöht. [68] Die Partikeln agglomerieren leichter und eine gleichmäßige Dispersion der Einzelpartikel in der Staubwolke ist nicht mehr möglich. Erklärungen zu diesem Verhalten finden sich in den Anziehungskräften, welche schon bei sehr geringer Feuchteadsorption zwischen den Partikeln steigen. Bei einem idealen kugelförmigen Partikel mit einem Durchmesser von 1 μm würde eine 3 nm-Schicht aus Wasser 2 % des Partikelvolumens einnehmen. Dies kann die effektive Distanz zwischen den Einzelpartikeln stark verringern, die Aufwirbelung dieser wird erschwert. Bei steigender Feuchte beginnt die Wasserstoffbrückenbildung, steigt diese weiter, wird ein Übergangsbereich erreicht, in dem sich Hohlräume zwischen den Partikeln mit Wasser füllen. Die Kapillarwirkung zieht weiter zur Verfügung stehendes Wasser in die Partikel. Dieser Prozess würde bei genügender Umgebungsfeuchte so lange vonstattengehen, bis sich aus dem kohäsiven Staub eine Partikelsuspension geformt hat. [73] Ab einer Produktfeuchte von 10 % lassen sich viele Materialien schlechter aufwirbeln, wodurch in diesem Fall oft der

Staubeintrag in den Versuchsraum adaptiert werden muss. Die Gefahr der Aufwirbelung von abgelagerten Stäuben sinkt dementsprechend auch. [64]

Die Auswirkung der Feuchte ist nicht nur in der Dispersion des Staubes erkennbar, sondern auch in der Zündempfindlichkeit des Staubes sowie in der Heftigkeit der Explosion. [68] Es zeigt sich aber, dass eine Verringerung der Explosionsheftigkeit erst bei relativ hohem Wassergehalt eintritt. [64] In Abbildung 38 sind Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Feuchte von organischen Stäuben auf deren Mindestzündenergie ersichtlich (eine kurze Beschreibung der Sicherheitstechnischen Kenngrößen MZE, $(dp/dt)_{max}$ und p_{max} sind im Anhang zu finden). Die starke Auswirkung ist durch die logarithmische vertikale Achse erkennbar, die den Anstieg der Zündenergie schon bei geringer Feuchte beschreibt. [68] Im Gegensatz zur Zündenergie ist der Einfluss auf die minimale Zündtemperatur geringer, wie Untersuchungen von van Laar und Zeeuwen [74] an Maisstärke zeigen. Die minimale Zündtemperatur steigt von 400 °C der getrockneten Maisstärke auf 460 °C bei einem Feuchtegehalt von 13 %.

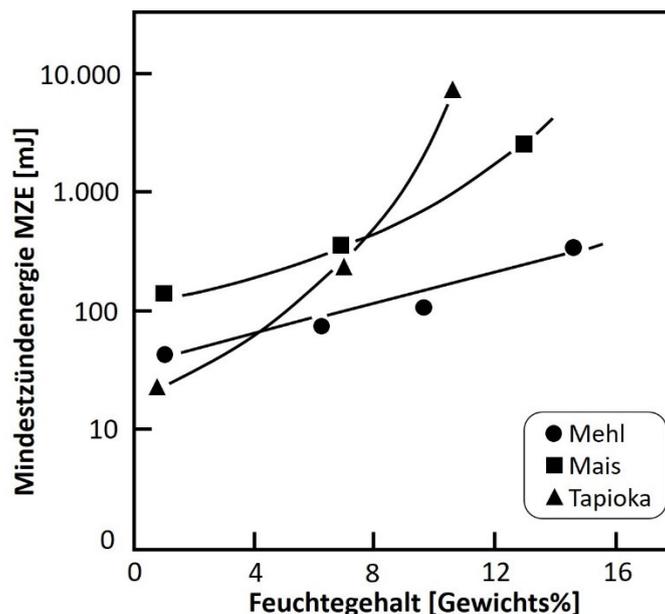


Abbildung 38: Einfluss der Feuchte verschiedener organischer Stäube auf deren Mindestzündenergie, Versuchsergebnisse von van Laar und Zeeuwen [74]

Die Inertisierungswirkung von inerten partikulären Additiven auf Lycopodium/Luft-Gemische aber auch die Wechselwirkung zwischen Staub-Wolke und mit Wasser beladenen Inertstaub wurden in früheren Versuchsserien untersucht. Hierfür wurde das Gestein Zeolith gemahlen, bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und mit 2 % bzw. 4 % Wasser beladen. Die Auswirkung der Feuchte des Inertstaub/Lycopodium/Luft-Gemisches auf die Mindestzündenergie ist umso stärker, je höher der Anteil an Inertstaub (folglich die Feuchte) in der Mischung ist. Bei einem

Inertstaubanteil von 75 Gew% sinkt die MZE von 540 mJ (trockener Zeolith) auf 220 mJ (2 % Feuchte) bzw. 241 mJ (4 % Feuchte). Die Auswirkungen von wasserbeladenen Additiven auf die Flammgeschwindigkeit wurden mittels *computational fluid dynamics* (CFD)-Simulation untersucht (vgl. [75]). Es zeigte sich, dass das verdampfende Wasser die Flammenfront weiter nach vorne in den Bereich der unverbrannten Mischung auf Grund des zunehmenden Volumens schiebt. Die Breite der Verbrennungszone steigt an und ein höherer Wärmestrom ist kalkulierbar. Die Flammgeschwindigkeit erhöht sich. [76] Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 ersichtlich. Diese Versuchs- und Berechnungsergebnisse deuten darauf hin, dass eine geringe Feuchte in der Brennstoff/Luft-Mischung die Zündempfindlichkeit herabsetzt und die Flammgeschwindigkeit erhöht wird. Zu beachten ist aber in diesem Fall, dass die Feuchte durch den Inertstaub in das System eingebracht wurde und nicht durch den brennbaren Staub. Für eine detailliertere Darstellung sei auf die Veröffentlichungen [76–78] verwiesen.

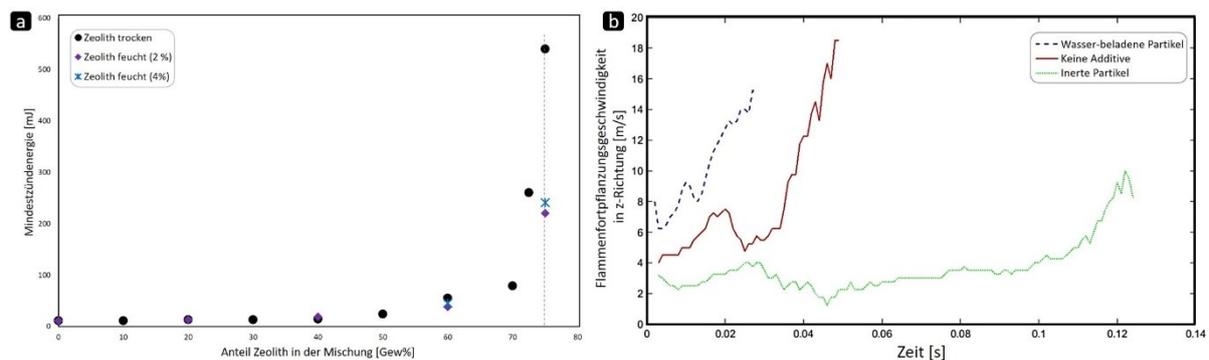


Abbildung 39: Ergebnisse zum Einfluss der Feuchte von Inertstäuben auf (a) die Mindestzündenergie (MIKE III) [77] und (b) die Flammgeschwindigkeit [78]

Alle hier beschriebenen Beobachtungen beziehen sich auf eine Feuchte des Materials durch Wasser. Lösungsmittelhaltige Materialien zeigen abweichendes Verhalten. Beim Einsatz von ethanolhaltigen Produkten bildet sich im Explosionsraum ein explosionsfähiges Ethanol/Luft-Gemisch, aber auch bei acetonhaltigen Stäuben wurde ein ähnliches Verhalten beobachtet. [64] Einerseits gibt es Materialien, welche durch Agglomeratbildung nicht mehr wirbelfähig sind und sich dadurch lediglich ein brennbares Dampfgemisch bildet [64], andererseits kann es zur Bildung eines hybriden Gemisches kommen.

2.2.5 Staubkonzentration im Staub/Luft-Gemisch

Damit sich eine Flamme in einem Staub/Luft-Gemisch selbstständig nach dessen Zündung fortpflanzen kann, muss neben anderen Voraussetzungen ein genügend hoher

Brennstoffanteil in der Mischung vorliegen (hierzu sei auf das Explosions-Pentagon hingewiesen). Im Allgemeinen wird der Konzentrationsbereich, in dem sich die Flamme fortpflanzen kann, durch die untere Explosionsgrenze (UEG) und obere Explosionsgrenze (OEG) eingegrenzt. Wobei im Falle von Stäuben die OEG nicht immer klar abgrenzbar ist, da das unvollständige Reaktionsverhalten der Staubpartikeln zu verschwommenen Grenzen führt. Als Richtwert kann für die untere Konzentration 50 bis 100 g/m³ [69] angegeben werden und für die maximale Konzentration 2 bis 3 kg/m³ [69]. Für Maisstärke wird in der Literatur eine UEG von 30 g/m³ angegeben. [79] Die maximale Partikelkonzentration steht im Zusammenhang mit der minimalen Sauerstoffmenge, die zur Aufrechterhaltung der Verbrennungsreaktion nötig ist. [69] Im Gegensatz hierzu wird die minimale Staubkonzentration von der minimalen Anzahl an Brennstoffpartikeln beeinflusst, welche es der Flammenfront durch Ausdampfen der flüchtigen Bestandteile ermöglicht sich weiter fortzupflanzen. [27] Zu Zwecken der Charakterisierung von Stäuben mit Hilfe der sicherheitstechnischen Kenngrößen wird zur Bestimmung dieser ein breiter Konzentrationsbereich getestet, um so die je nach Art des Staubes individuell passende Brennstoffkonzentration in der Mischung zum Erreichen der Maximalwerte zu erhalten (sowohl Explosionsdruck und zeitlicher Druckanstieg als auch Mindestzündenergie). In Abbildung 40 sind Versuchsergebnisse verschiedener Stäube für die sicherheitstechnische Untersuchung auf den maximalen Explosionsüberdruck ersichtlich. Wie aus der Abbildung erkennbar ist, gibt die stöchiometrische Konzentration nicht die Konzentration des Maximalwertes für den Explosionsdruck an (berechnete stöchiometrische Konzentration von Maisstärke liegt bei 240 g/m³, also zweimal geringer als die Konzentration beim maximalen Explosionsdruck bei 750 g/m³).

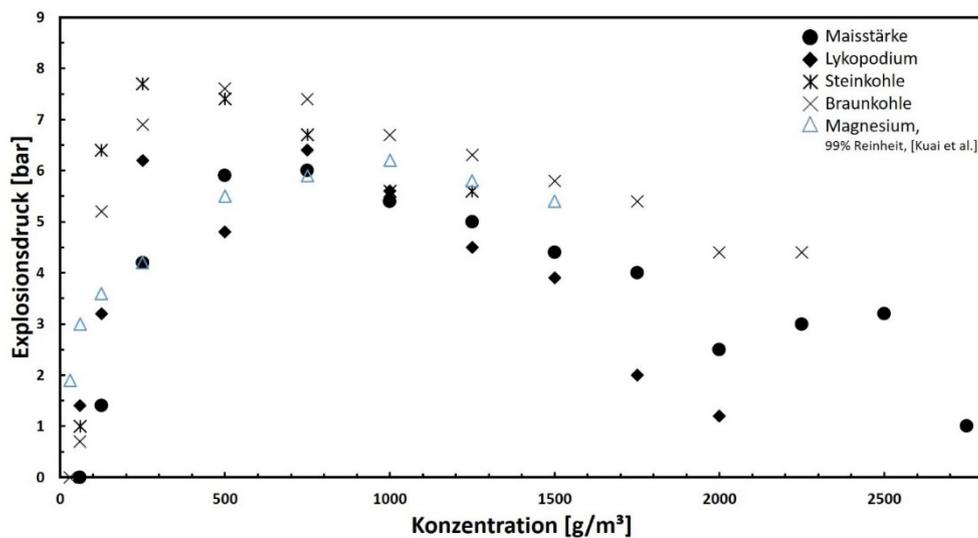


Abbildung 40: Entwicklung des Explosionsdruckes in Abhängigkeit der Konzentration des untersuchten Materials in der Staub/Luft-Mischung, untersucht in der 20-Liter Siwek Apparatur (Werte für Magnesium stammen von Kuai et al. [80])

Eine erhöhte Staubkonzentration in der Luft führt zu einer höheren Wärmefreisetzung durch die Reaktion. Aufgrund der erhöhten Wärmeproduktion wird die Vorwärmzone vor der Flammenfront schneller erhitzt und dies führt zu einer höheren Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit. [20] Bei immer höher werdenden Partikelkonzentrationen bleibt die Verbrennungsgeschwindigkeit hoch, jedoch ist durch diese hohe Geschwindigkeit eine vollständige Pyrolyse nicht mehr möglich. Die Verbrennung wird von kleineren Partikeln bzw. von oberflächennaher Pyrolyse größerer Partikeln genährt. Ascherückstände und Partikeln mit unvollständiger Pyrolyse absorbieren den durch die Verbrennung erzeugten Wärmestrom der Flamme. Nicht alle Partikeln tragen zum Verbrennungsprozess bei und so sinkt der Wärmestrom, der die Vorwärmzone erwärmt. Durch diesen Ablauf sinkt die Pyrolyserate, kompensiert wird dies aber wiederum durch die große Anzahl an Partikeln. Die Verbrennungsreaktion verläuft nahe der stöchiometrischen Konzentration der Pyrolysegase, obwohl die nominelle Partikelkonzentration höher ist. Dieser Verlauf ist charakteristisch für heterogene Staubflammen, welche auch bei hohen Partikelkonzentrationen hohe Explosionsdrücke und Temperaturen zeigen. [27]

Staubwolken mit geringeren Partikelkonzentrationen führen zu niedrigen Verbrennungsgeschwindigkeiten, die Zeit der Pyrolyse ist hoch und somit erfolgt keine Limitierung des Pyrolysevorgangs. Es scheint als wären alle Pyrolyseprodukte im Verbrennungsvorgang beteiligt. [27]

Abbildung 41 zeigt die Abhängigkeit der Flammengeschwindigkeit von der Staubkonzentration in einem Staub/Luft-Gemisch. Die Versuche wurden von Krause und Kasch [81] in einem vertikalen 100 mm Rohr mit einer von unten nach oben laufenden Strömung (Reynoldszahl liegt bei 2.000) durchgeführt und die daraus berechnete laminare Verbrennungsgeschwindigkeit ebenfalls eingetragen. Bei der Betrachtung der Kurven fällt auf, dass zu Beginn von der unteren Explosionsgrenze beginnend bis zum Erreichen der „optimalen“ Konzentration ein sehr steiler Anstieg existiert. Dies entspricht einem „mageren“ Brennstoff/Luft-Gemisch. Oberhalb der optimalen Konzentration sinkt die Kurve der Flammengeschwindigkeit schwach ab, ein „fettes“ Brennstoff/Luft-Gemisch liegt vor und unverbrannte Bestandteile bleiben im Gemisch. [81] Die maximale Flammengeschwindigkeit tritt bei der 1,5 bis 2,5-fachen rechnerisch ermittelten stöchiometrischen Mischung auf. [48]

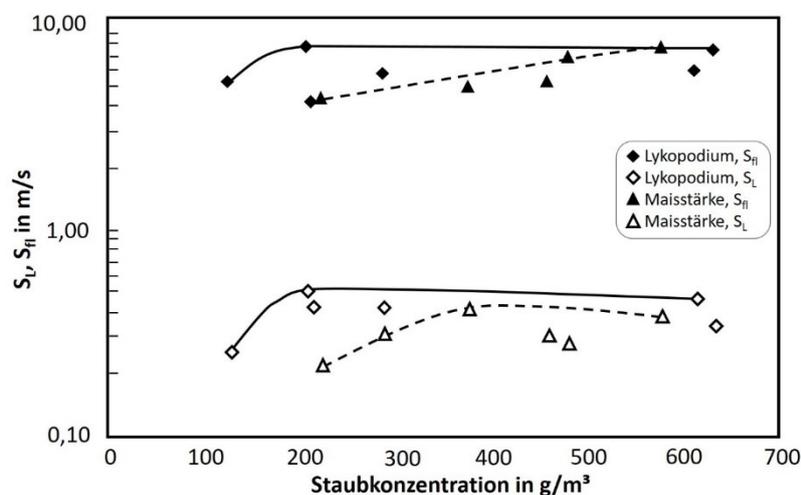


Abbildung 41: Abhängigkeit der Flammengeschwindigkeit (s_f) und der laminare Verbrennungsgeschwindigkeit (s_L) von der Staubkonzentration, Versuche durchgeführt von Krause und Kasch in einer Rohrapparatur [48, 81]

Neben den direkten Auswirkungen der Partikelkonzentration auf den Ablauf einer Staubexplosion nimmt die Konzentration in einer Staub/Luft-Mischung Einfluss auf die Ausbildung der Flamme. Die Partikeln in der Vorwärmzone werden durch die Flamme aufgewirbelt und diese Bewegung führt zu einer Umverteilung der Konzentration, zu einer dynamischen Variation vor der Flammenfront, welche sich über eine geringere Staubkonzentration hin fortpflanzt. [20] In Abbildung 42 ist eine schematische Darstellung der Partikelbewegung ersichtlich, welche von Han et al. [20] aufbauend auf einer *particle image velocimetry* (PIV) Messung ermittelt wurde. Die Partikelbewegung wird bei diesem Messverfahren in einer belichteten Ebene aufgenommen und das Geschwindigkeitsfeld ausgewertet. [82] Die schwerkraftgetriebene Partikelbewegung werden einerseits vom

konvektiven Strom seitwärts gezogen, andererseits ändern sie ihre Bewegung hin zu maximalen Werten vor der Flammenfront. Diese Partikeln erreichen die sinkenden Partikeln (s_a in Abbildung 42) und formen zusammen die Grenze der parabolischen Flammenfront, wo die mittlere vertikale Geschwindigkeit den Wert Null erreicht. Die Stagnation der Partikelbewegung führt zu einer erhöhten Partikelkonzentration vor der Flamme.

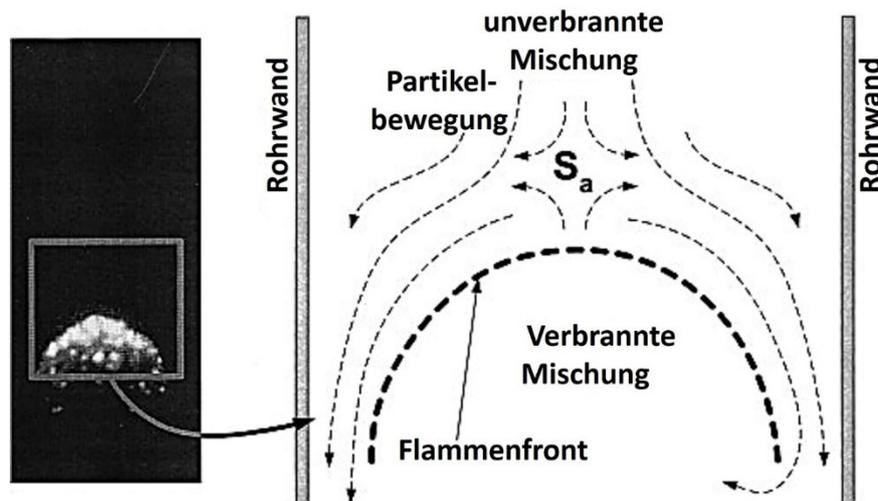


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Partikelbewegung im Bereich der Flammenfront während der Flammenfortpflanzung in einer Rohrapparatur [20]

2.2.6 Initiale Turbulenz um den Zündort

Unregelmäßige Schwankungen von Erhaltungsgrößen (u.a. Druck, Temperatur, Geschwindigkeit) in allen drei Raumrichtungen werden als Turbulenz verstanden [79]. Die Turbulenz wurde von Bradshaw untersucht und in Folge von ihm beschrieben und definiert:

“Turbulence is a three-dimensional time-dependent motion in which vortex stretching causes velocity fluctuations to spread to all wavelengths between a minimum determined by viscous forces and a maximum determined by the boundary conditions of the flow. It is the usual state of fluid motion except at low Reynolds numbers.” [83]

Bradshaw definierte die Turbulenz als eine dreidimensionale zeitabhängige Bewegung, die zu Schwankungen der Geschwindigkeit führen. Minimale Schwankungen können schon durch Viskositätskräften entstehen, stärkere Schwankungen können nur durch Strömungsbedingungen hervorgerufen werden. [83]

Der Verbrennungsprozess wird durch Turbulenzbedingungen vor bzw. beim Zündvorgang um den Zündort beeinflusst, da diese direkte Auswirkungen auf das herrschende Regime haben. Messbar werden diese Effekte durch einen Anstieg der Flammengeschwindigkeit und

des zeitlichen Druckanstieges, der eine höhere Heftigkeit der Verbrennungsreaktion inkludiert. Hayes et al. [84] zeigten dies durch einen Versuchsaufbau mit einem Lüfter, welcher die Turbulenz in einer Rohrapparatur ($0,034 \text{ m}^3$) vor der Zündung verschieden stark beeinflusste. Die Flammengeschwindigkeit stieg kontinuierlich bis zu einem Maximalwert, danach sank diese aufgrund des Löschabstandes [85] (vgl. hierzu Löschabstand-Theorie der Gas-Phase von Chomiak und Jarosiński [86]). Eine ähnliche Zunahme zeigte sich bei der Verbrennungsgeschwindigkeit eines Maisstärke/Luft-Gemisches, untersucht in einem sphärischen 1 m^3 Versuchsbehälter (siehe Abbildung 43). Kauffmann et al. [87] konnten bei gleichbleibender Staubkonzentration (Mehl, $0,6 \text{ kg/m}^3$, $75 \mu\text{m} < d_p < 212 \mu\text{m}$, 12 % Feuchte) und unterschiedlichen Strömungsbedingungen (2 m/s und 4 m/s) einen Anstieg der Verbrennungsgeschwindigkeit von 1,5 m/s auf 2,7 m/s feststellen. Bei einer berechneten laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit für diese Konzentration von 0,24 m/s ist der hohe Einfluss der Strömungsbedingungen und somit der Turbulenz um den Zündort auf die Flammengeschwindigkeit klar ersichtlich.

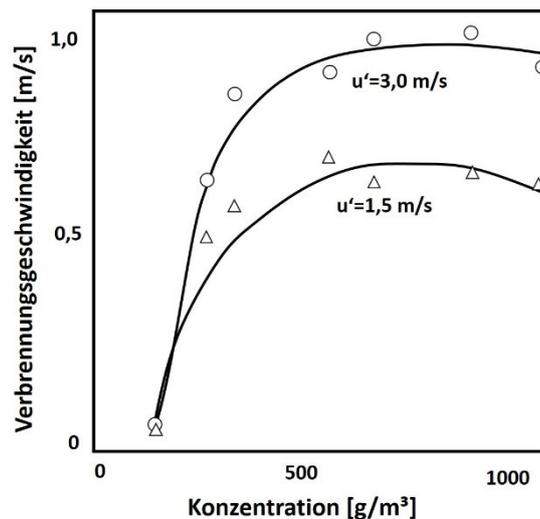


Abbildung 43: Versuchsergebnisse zum Einfluss der initialen Turbulenz und Staubkonzentration auf die Verbrennungsgeschwindigkeit, durchgeführt von Kaufmann et al. (1 m^3 Behälter) [87]

Bedingungen mit hoher Turbulenz vor der Zündung führen zu höheren Verbrennungsraten, der zeitliche Druckanstieg steigt daher ebenfalls an. Da der maximale Explosionsüberdruck weniger von der Verbrennungsrate abhängt, ist dieser Einfluss geringer. Untersuchungen in einer sphärischen Versuchsapparatur (1 m^3) von Kauffmann et al. [87] zeigten Turbulenzeinflüsse auf die Heftigkeit der Staubexplosion in einer Maisstärke/Luft-Mischung (4 % Feuchte, $d_p < 75 \mu\text{m}$). Die Turbulenz wurde durch eine feste Bewegungsgeschwindigkeit der Partikeln eingestellt, verschiedene Staubkonzentrationen abefahren und die Auswirkung auf den Explosionsdruck überprüft (siehe Abbildung 44). [85] Ähnliche Resultate lieferten

Untersuchungen von Scheid [79], der den Einfluss von Turbulenzbedingungen auf druckentlastete Staubexplosionen in einer Rohrapparatur für Maisstärke/Luft-Gemische studierte.

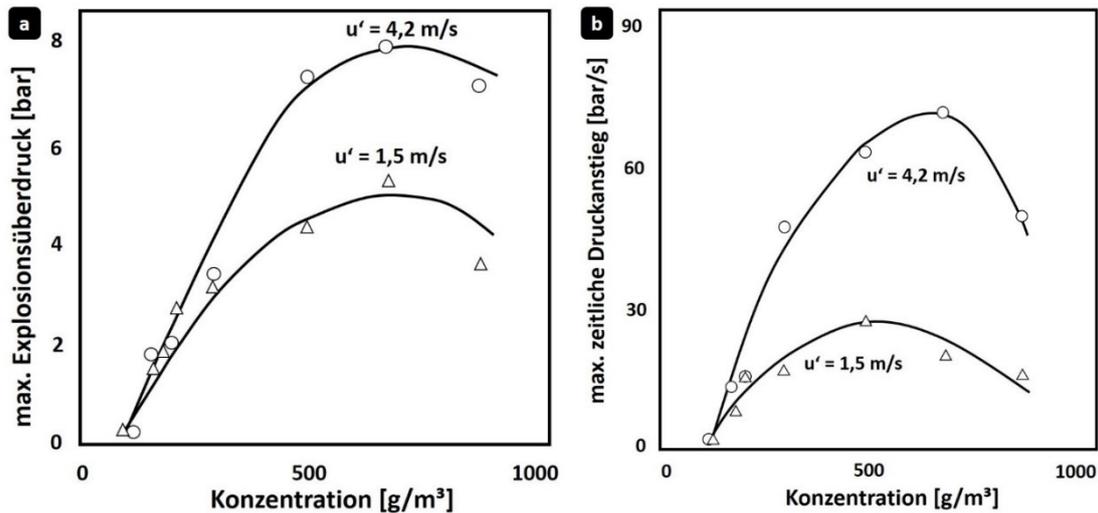


Abbildung 44: Versuchsergebnisse zum Einfluss der initialen Turbulenz und Staubkonzentration auf den (a) maximalen Explosionsüberdruck p_{\max} und (b) maximalen zeitlichen Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$, durchgeführt von Kaufmann et al. (1 m^3 Behälter) [87]

2.2.7 Sauerstoffkonzentration im Staub/Luft-Gemisch

Zu den großen Einflussparametern auf Verbrennungsprozesse kann die Konzentration des Oxidationsmittels gezählt werden (vgl. Explosions-Pentagon). Meist wirkt Sauerstoff als Oxidator, aber auch andere Stoffe können wirksam werden. [66] Der Brennstoff verbraucht den Sauerstoff durch die Oxidationsreaktion, wodurch die Sauerstoffkonzentration sinkt. Sowohl die Heftigkeit der Staubexplosion als auch die Zündempfindlichkeit sinkt mit sinkendem Sauerstoffgehalt im Brennstoff/Luft-Gemisch. [68] Untersuchungen von Wiemann [88] im 1 m^3 Behälter spiegeln dieses Verhalten wieder (siehe Abbildung 45). Der Autor führte mit Braunkohlestaub und verschiedenen Sauerstoff-Stickstoff-Mischungen Versuche zum maximalen Explosionsüberdruck und maximalen zeitlichen Druckanstieg durch. Bei einer Reduktion der Sauerstoffkonzentration auf 11,5 % zeigte sich eine Reduktion des Explosionsdrucks um den Faktor 10 und mehr, beim zeitlichen Druckanstieg war die Reduktion um einen Faktor kleiner zwei geringer. Dies kann durch den starken Einfluss des Sauerstoffgehaltes auf die Kinetik der Verbrennungsreaktion erklärt werden. Aus thermodynamischer Betrachtung kann von einer proportionalen Reduktion des maximalen Explosionsdruckes mit der Reduktion der Sauerstoffkonzentration ausgegangen werden. [68]

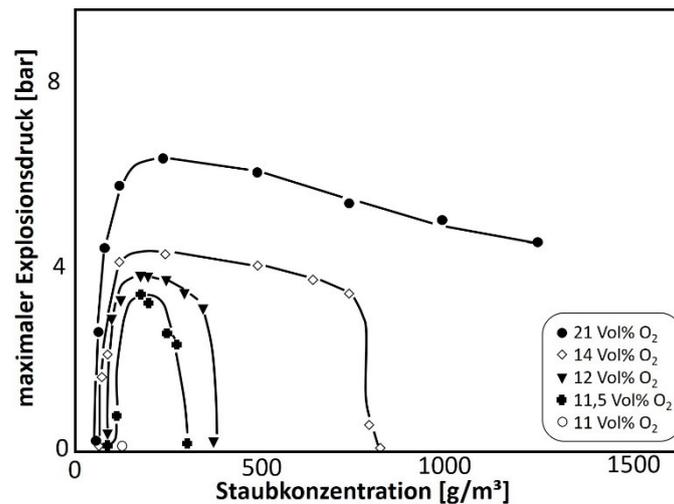


Abbildung 45: Versuchsergebnisse zum Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf den maximalen Explosionsdruck von Braunkohle, durchgeführt von Wiemann im 1 m³ Behälter bei 150 °C (E = 10 kJ)

[88]

Die minimale Sauerstoffkonzentration in einer Staubwolke steht im Zusammenhang mit den Grenzen der minimalen und maximalen Partikelkonzentration, da als Voraussetzung für eine Verbrennungsreaktion das Verhältnis zwischen Brennstoff und Oxidator ausschlaggebend ist. Hierbei ist wiederum die Partikelgröße maßgeblich, da feine Partikel schneller und heftiger aufgrund der höheren spezifischen Oberfläche reagieren. Sweis und Sinclair [89] studierten den Zusammenhang zwischen Partikelgröße und minimaler Sauerstoffkonzentration, indem sie weitgehend uniforme Partikelfractionen in einer kleinen Rohrapparatur (ähnlich der Hartmann-Apparatur) untersuchten. Dabei zeigte sich, dass die minimale Sauerstoffkonzentration mit sinkenden Partikeldurchmessern bis 100 µm sinkt. Bei geringeren Durchmessern (kleiner 100 µm) ist der Einfluss sehr viel geringer. Dies gilt aber nur für enge Korngrößenverteilungen, bei einer Mischung von mehreren Partikeldurchmessern gilt dieser Zusammenhang nicht. [68]

Ein ähnlicher Zusammenhang wurde bei der Mindestzündenergie durch Versuchsserien festgestellt (vgl. Abbildung 46). Mit sinkender Sauerstoffkonzentration steigt die Mindestzündenergie, die Zündempfindlichkeit sinkt merklich. [68] Diese Korrelation ist sehr stark im Grenzbereich der selbstständigen Flammenfortpflanzung ausgeprägt. [90] Die Versuchsserien wurden mit Sauerstoff in Stickstoff durchgeführt, daher kann bei der Minderung der Zündempfindlichkeit (höhere MZE) davon ausgegangen werden, dass der Stickstoff als Ballaststoff wirkt. [90] Ein Überschuss an Sauerstoff (größer 21 %) führt zu einer Reduktion der Mindestzündenergie, das Gemisch zündet leichter.

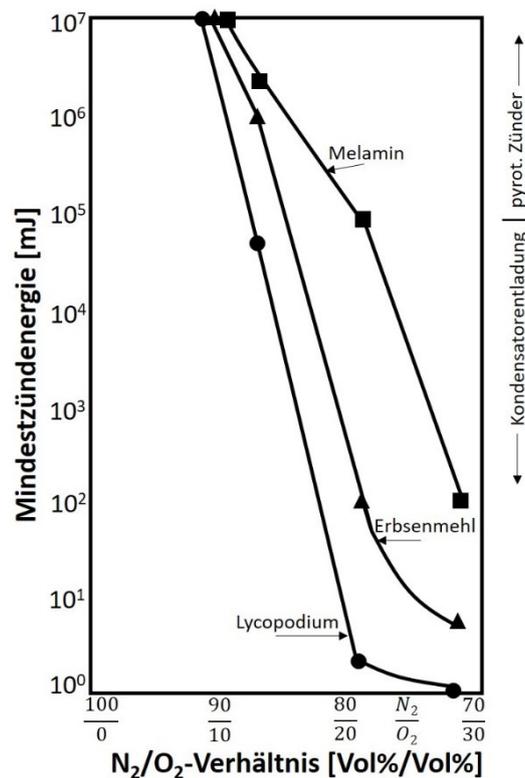


Abbildung 46: Versuchsergebnisse zum Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Mindestzündenergie, durchgeführt von Glarner in der 20-Liter-Apparatur [90]

Durch den Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Kinetik der Verbrennungsreaktion wirken sich abweichende Sauerstoffgehalte auf die Verbrennungsgeschwindigkeit aus. Sauerstoffkonzentrationen über 21 % führen zu höheren Verbrennungsgeschwindigkeiten, Konzentrationen unter 21 % bewirken verringerte Verbrennungsgeschwindigkeiten. [66, 69] Die Verbrennungsreaktion verbraucht Sauerstoff, dies führt zu einem Sinken der Sauerstoffkonzentration und die Reaktionsrate sinkt daher. [69] Versuchsergebnisse zu Untersuchungen der Flammengeschwindigkeit in einem Lycopodium/Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch sind Abbildung 47 zu entnehmen. Durchgeführt wurden diese in einer Rohrapparatur (Beschreibung siehe Kap. 3.1) mit einer Zündenergie von 200 mJ (Funkenzündung) und die Sauerstoffkonzentration wurde variiert. Die Ergebnisse der Flammengeschwindigkeit sind in Abhängigkeit zur Sauerstoffkonzentration im Diagramm aufgetragen und zum Wert $s_f = 0$ m/s extrapoliert. Es zeigt sich, dass ein Sinken der Flammengeschwindigkeit bei Verringerung der Sauerstoffkonzentration bei höheren Staubkonzentrationen in der Mischung signifikant stärker ausgeprägt ist. [17] Die Sauerstoffkonzentration, bei der keine selbstständige Flammenausbreitung mehr möglich ist, befindet sich für das getestete Lycopodium-Gemisch im Bereich 7 bis 8 Vol%, ähnlich dem Wert im BIA Report 12/97 (7,5 Vol% [91]). [17]

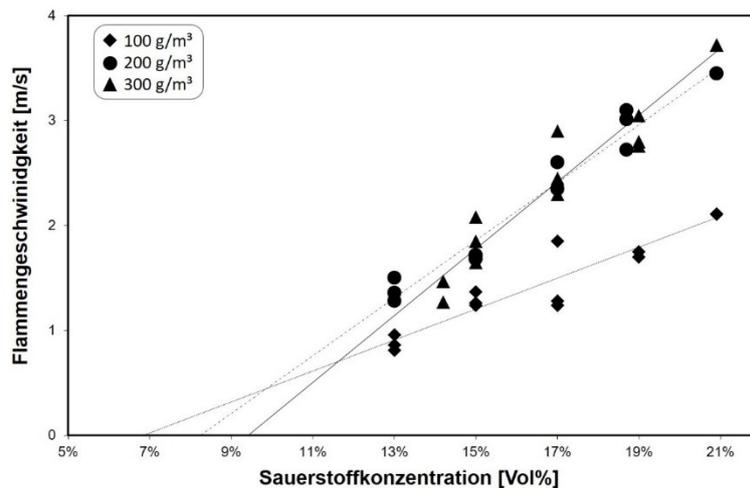


Abbildung 47: Versuchsergebnisse zur Abhängigkeit der Flammengeschwindigkeit zur Sauerstoffkonzentration (Flammenausbreitung in Rohrapparatur mit Stickstoff-Inertisierung), durchgeführt von Kern [17]

2.2.8 Initiale Temperatur

Mit der Temperaturabhängigkeit sicherheitstechnischer Kenngrößen beschäftigte sich neben Wiemann [88] und anderen auch Glarner [90], welcher im Labor der Fa. CIBA GEIGY AG Basel, geleitet von W. Bartknecht, Versuche durchführte. In der 20-Liter-Siwiek Apparatur wurden Versuchsserien mit verschiedenen Stäuben (Korngröße kleiner $63\ \mu\text{m}$) durchgeführt und der Temperaturbereich zwischen $20\ ^\circ\text{C}$ und $200\ ^\circ\text{C}$ variiert. Dabei beobachtete Glarner eine lineare Abnahme des maximalen Explosionsdruckes mit steigenden Umgebungsbedingungen. Denselben Zusammenhang erkannte Wiemann [88], dieser führte seine Versuche in einem $1\ \text{m}^3$ Behälter (Medianwert der untersuchten Stäube kleiner $65\ \mu\text{m}$) durch. Die Erklärung für die Temperaturabhängigkeit des maximalen Explosionsdruckes findet sich in der veränderten Sauerstoffkonzentration (kalkulierbar durch die ideale Gasgleichung), welche allein entscheidend für den sich einstellenden maximalen Explosionsüberdruck in einem geschlossenen Behälter ist (Versuche wurden mit Sauerstoff in Stickstoff durchgeführt). [64] In Abbildung 48 sind Versuchsergebnisse zum Explosionsdruck verschiedener Staubmischungen in Abhängigkeit von den Umgebungstemperaturen zum Zeitpunkt der Zündung ersichtlich. Der zeitliche Druckanstieg sowie der volumenunabhängige K_{ST} -Wert zeigen einen anderen Zusammenhang mit einer Temperaturerhöhung, wobei Stäube mit K_{ST} -Werten kleiner $100\ \text{bar m/s}$ heftiger bei erhöhten Temperaturen reagieren, Stäube mit K_{ST} -Werten größer $150\ \text{bar m/s}$ in ihrer Explosionsheftigkeit abnehmen. Im Zwischenbereich ließ sich keine signifikante Änderung unter erhöhten Umgebungstemperaturen feststellen. [90]

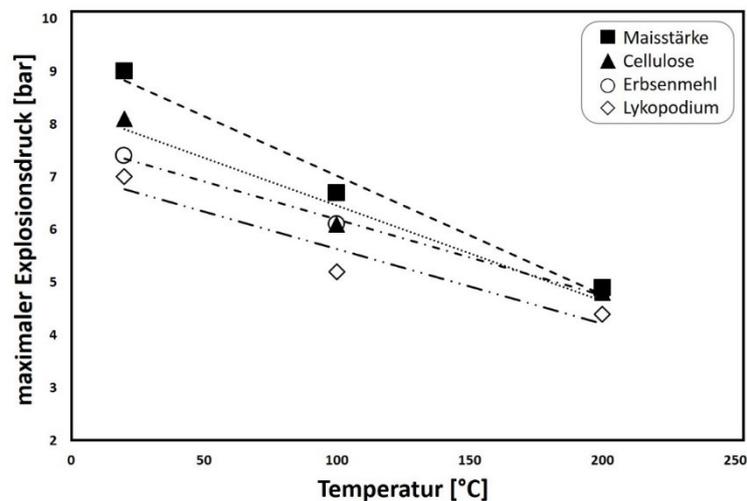


Abbildung 48: Einfluss der Umgebungstemperatur auf den maximalen Explosionsdruck verschiedener organischer Stäube, Versuchsergebnisse von Glarner (20-Liter-Siwiek Apparat, Zünder 10 kJ, $t_v = 60$ ms) [90]

Bei Staubexplosionsuntersuchungen unter erhöhten Temperaturen (20 bis 200 °C) zeigte sich im Bereich der unteren Explosionsgrenze (UEG) ein signifikanter Temperatureinfluss. Steigende Umgebungstemperaturen führten zu einer Abnahme der UEG. [88, 90] Die Minderung der unteren Explosionsgrenze ist umso stärker, je höher die Explosionsgrenzwerte des Staubes bei Raumtemperaturen sind. [64]

Gu et al. [92] untersuchten die Verbrennungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperatur in einem Methan/Luft-Gemisch. Das Model einer eindimensionalen adiabatischen Flamme wurde mit dem Sandia PREMIX-Code durch Implementierung des CHEMKIN-Codes und des GRI-Mech 1.2 berechnet (für ausführlichere Informationen sei auf die Quelle [92] verwiesen). Im Temperaturbereich zwischen 300 K und 400 K zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen steigender Temperatur und steigender Verbrennungsgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 49).

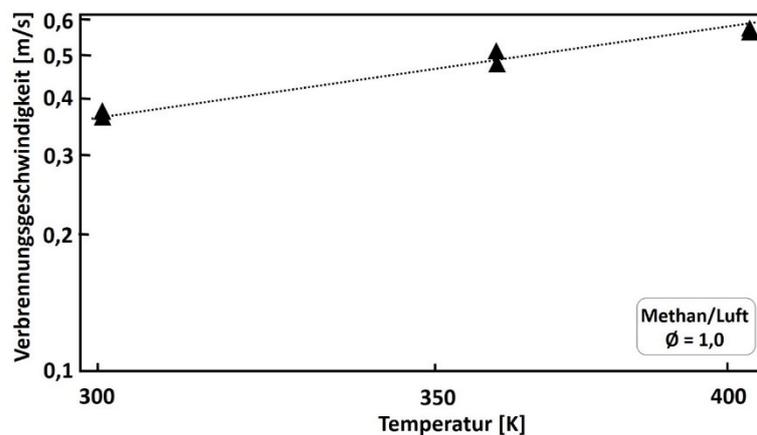


Abbildung 49: Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Verbrennungsgeschwindigkeit in einem Methan/Luft-Gemisch, Ergebnisse berechnet von Gu et al. [92]

2.2.9 Initialer Druck

Der Einfluss von atmosphärischen Bedingungen abweichenden Anfangsdrücken zum Zeitpunkt der Zündung auf die Flammenausbreitung wurde von verschiedenen Autoren in der Vergangenheit studiert. Hierbei zeigte sich, dass es einen klaren Zusammenhang zwischen dem Ausgangsdruck (Vordruck p_V) und dem sich entwickelnden maximalen Explosionsdruck (p_{MAX}) gibt. Glarner erkannte diesen Zusammenhang bei Untersuchungen in der 20-Liter-Siwiek Apparatur, bei denen er das Verhalten von Lycopodium, Erbsenmehl und Melamin Polymer mit Korndurchmessern kleiner $63 \mu\text{m}$ im Druckbereich zwischen 0,65 bar abs. und 1,6 bar abs. beobachtete (vgl. Abbildung 50, ungefüllte Punkte). [90] Weitere Versuchsserien wurden in einem 1 m^3 Behälter mit Steinkohle von Conde Lázaro und García Torrent durchgeführt, welche bei von atmosphärischen Bedingungen abweichenden Anfangsdrücken bis 15 bar abs. arbeiteten (vgl. Abbildung 50, gefüllte Quadrate). [93] Neben den genannten Autoren gibt es weitere Veröffentlichungen zu diesem Thema (hierzu sei auf die Quellen [80, 88, 94] u.a. verwiesen), alle Studien haben gemein, dass sie eine proportionale Zunahme des maximalen Explosionsdruckes vom Ausgangsdruck zum Zeitpunkt der Zündung zeigen.

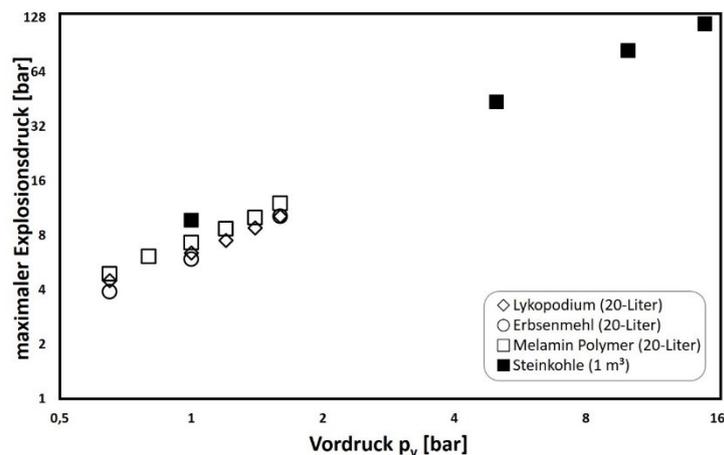


Abbildung 50: Einfluss des Vordruckes auf den maximalen Explosionsdruck verschiedener Stäube, Versuchsergebnisse von Glarner (20-Liter-Siwiek Apparatur, 10 kJ, $t_v = 60$ ms) [90] sowie von Conde Lázaro und García Torrent (1 m³ Behälter, 10 kJ, $t_v = 600$ ms) [93]

Braunkohlestaub mit einem Medianwert von 52 μm wurde in einem 1 m³ Behälter in einem Druckbereich bis 4 bar abs. von Wiemann [88] untersucht (vgl. hierzu Abbildung 51). Bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse fällt auf, dass sich durch ändernde Druckbedingungen vor der Zündung auch die optimale Staubkonzentration zum Erreichen des maximalen Explosionsdrucks zu höheren Werten hin verschiebt. Dies zeigt sich neben dem maximalen Explosionsdruck auch beim maximalen zeitlichen Druckanstieg.

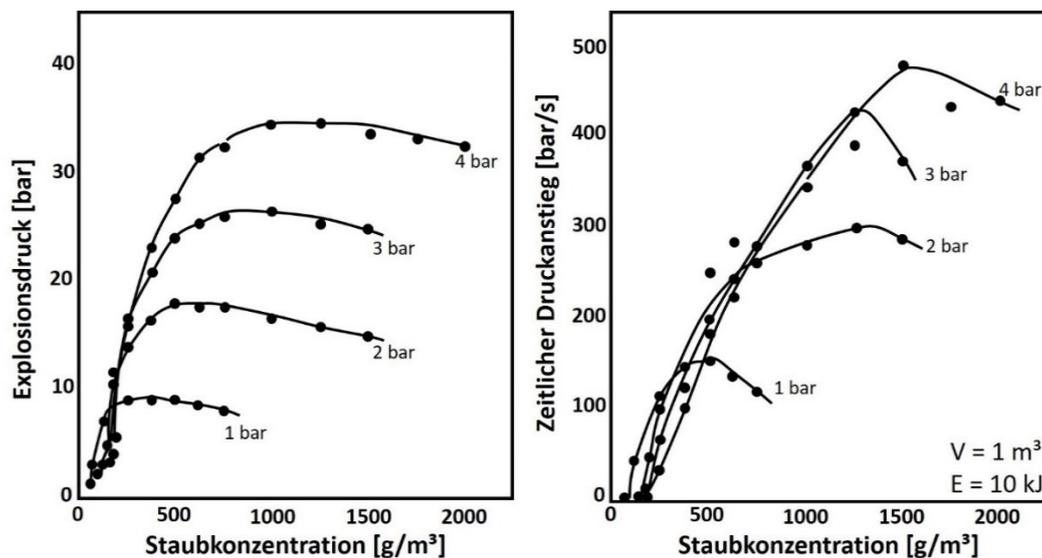


Abbildung 51: Versuchsergebnisse von Wiemann mit Braunkohlestaub unter von atmosphärischen Bedingungen abweichenden Anfangsdrücken (1 m³ Behälter) [88]

Die Verbrennungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Druckbedingungen vor der Zündung wurde von Gu et al. [92] für Methan/Luft-Gemische berechnet. Hierzu wurde ein Berechnungsmodell für eine eindimensionale adiabate Flamme mit Hilfe des Sandia CHEMKIN-Codes aufgesetzt (für ausführlichere Informationen sei auf die Quelle [92] verwiesen). Bei der Verbrennungsgeschwindigkeit zeigten sich abweichende Ergebnisse im Vergleich zum Explosionsdruck, mit sinkenden Anfangsdrücken steigt die Verbrennungsgeschwindigkeit in dem berechneten Methan/Luft-Gemisch (vgl. Abbildung 52)

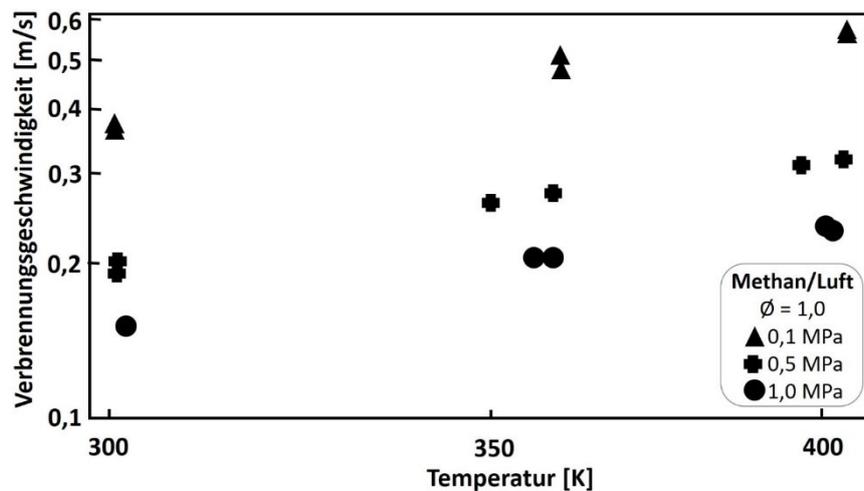


Abbildung 52: Einfluss des Ausgangsdruckes auf die Verbrennungsgeschwindigkeit in einem Methan/Luft-Gemisch, Ergebnisse berechnet von Gu et al. [92]

Ein Einfluss von atmosphärischen Bedingungen abweichenden Drücken zum Zeitpunkt der Zündung im Hinblick auf den vorherrschenden Unterdruck auf den Explosionsverlauf ist ebenfalls erkennbar. Untersuchungen in einer Rohrapparatur zur Flammenausbreitung (Beschreibung dieser siehe Kap. 3.1) zeigen eine ändernde Geschwindigkeit der Flammenfront in Abhängigkeit zum im Explosionsraum herrschenden Unterdruck. Mit sinkendem Umgebungsdruck steigt die Flammengeschwindigkeit in einem Staub/Luft-Gemisch bis zu einem Maximalwert, danach sinkt diese bis zu einem Nicht-Zünden der Brennstoff/Luft-Mischung. [17] Der Punkt der Nicht-Zündung steht dabei im Zusammenhang mit der Versuchsmethode und daher mit der eingebrachten Energie durch den Funken. Neben der Änderung der Flammengeschwindigkeit konnte auch eine Änderung in der Flammenform beobachtet werden. Mit sinkendem Druck verliert die Flammenfront ihre parabolische Erscheinungsform. Bei Unterdruckbedingungen von 250 mbar besteht die Flamme nur mehr aus einzelnen Flammen-Spots mit geringer Leuchtkraft. [17]

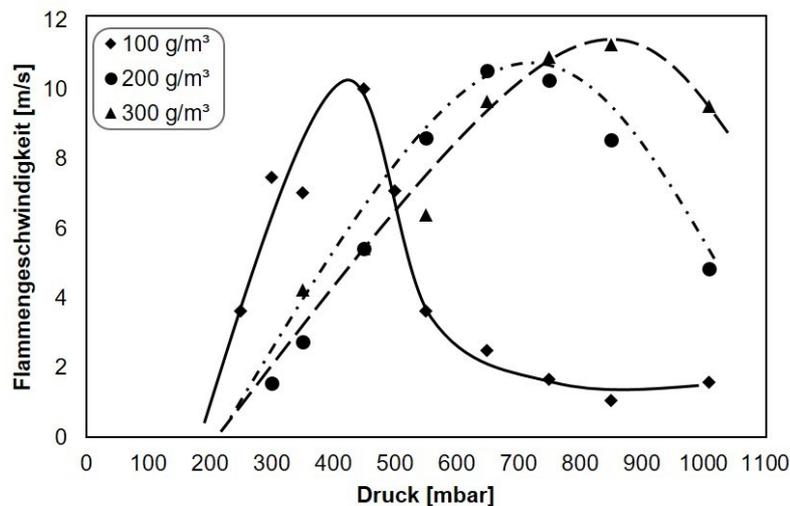


Abbildung 53: Flammengeschwindigkeit in einem Staub/Luft-Gemisch in Abhängigkeit der vorherrschenden Druckbedingungen zum Zeitpunkt der Zündung [17]

2.2.10 Zündung

Die Zündung eines Staub/Luft-Gemisches kann erfolgen, wenn die Wärmezufuhr in das reaktive Gasvolumen die Wärmeverluste an die Umgebung übersteigt. Dieser initiale thermische Energieeintrag führt zu einem thermischen Durchgehen der Reaktion und somit zu einem Volumenzuwachs der Flamme und deren Flammenfortpflanzung durch das Brennstoff/Luft-Gemisch. [13] Die Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch erfolgt sphärisch vom Zündort weg. Der initiale Energieeintrag in das System für die Entzündung mit anschließender selbstständiger Flammenfortpflanzung ist daher ein Einflussparameter auf die Art und Weise der Ausbreitung der Flammenfront. In der Literatur werden neben anderen Zündquellen chemische Zünder (pyrotechnische Zünder) und elektrische Funken im Bereich der Untersuchung der Flammenausbreitung angewendet. Vor allem die Verwendung der in standardisierten Verfahren (EN ISO 80079-20-2 [1]) angewendeten pyrotechnischen Zünder mit einer Energie von 10 kJ ist diskutierbar, da der Einfluss auf die Flamme scheinbar zu groß ist. Zhen und Leuckel [95] führten hierzu Versuche durch, in denen sie die Zündenergie variierten und die Druckentwicklung aufnahmen (Ergebnisse siehe Abbildung 54, a). Die Druckentwicklung unterscheidet sich stark zwischen verschiedenen hohen Energien der chemischen Zünder. Der zeitliche Druckanstieg in der frühen Phase der Explosion ist je höher je größer die eingebrachte initiale Energie ist. Die Ausbreitung erfolgt nicht sphärisch vom Zündort weg, die Zünder geben die Richtung und Form der Flammenfront vor. [95] Im Gegensatz hierzu erfolgt die Flammenfortpflanzung bei einem Zündfunken mit geringer

Energie sphärisch und deckt sich mit dem typischen Verhalten der Druckentwicklung einer laminaren Explosion. [95]

Untersuchungen zur Verbrennungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Zündenergie zeigen ähnliche Resultate. Durchgeführt wurden diese ebenfalls in einem sphärischen Explosionsgefäß mit verschiedenen energiereichen pyrotechnischen Zündern sowie ein elektrischer Zündfunke mit geringer Energie. Bis zu einem Radiusverhältnis von $r/R = 0,25$ (mit r als Flammenfrontradius und R als Radius der Explosionskammer) sind die gemessenen Werte der Verbrennungsgeschwindigkeit übereinstimmend mit der Messung dieser bei laminaren Brennern. [95] Die Autoren der Studie wählten dieses Verhältnis als Vergleichswert aus, da einerseits kein Einfluss der Flammenstreckung sowie der Flammenbeschleunigung und andererseits der Einfluss der Kompression durch Wände vernachlässigbar sind. Bei der Betrachtung von Abbildung 54, b wird der vierfache Wert der Verbrennungsgeschwindigkeit bei dem Radiusverhältnis $r/R = 0,25$ bei energiereichen chemischen Zündern im Gegensatz zum Zündfunken sofort ersichtlich, der hohe Energieeintrag in das System führt zu einer starken Überschätzung der Verbrennungsgeschwindigkeit.

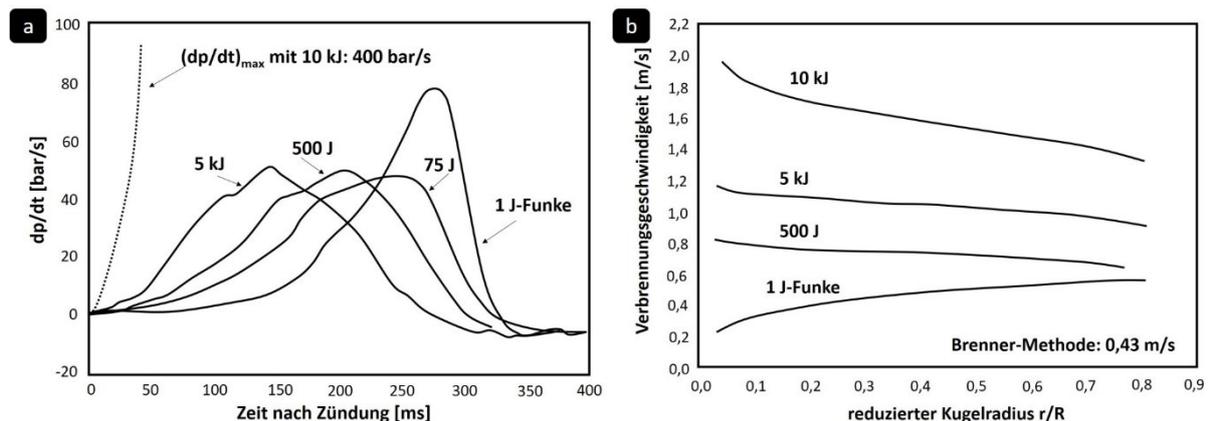


Abbildung 54: Versuchsergebnisse zum Einfluss der Zündquelle auf den (a) zeitlichen Druckanstieg und (b) auf die Verbrennungsgeschwindigkeit, durchgeführt von Zhen und Leuckel in der 1 m^3 Explosionskammer mit 9,5 % Methan in Luft [95]

Neben zu hohen Zündenergien kann auch die Verwendung von zu geringen Zündenergien zu einem Einfluss auf die Flammenform und Flammenausbreitung führen. Gostintsev et al. [96] erkannten, dass laminare freie Flammen bei der Verwendung von zu geringer Zündenergie auch frei von Einflussparametern, wie Wandeffekte, Hindernisse udg. sich abweichend verhalten. Durch den geringen Energieeintrag wird die Flamme instabil, Turbulenzen bilden sich aus und die Flamme beschleunigt sich selbst. Gu et al. [92] untersuchten die Flammengeschwindigkeit unter Variation der Flammenradien in einem Methan/Luft-Gemisch (Ergebnisse siehe Abbildung 55). Dabei zeigte sich, dass es einen

Bereich um den Zündfunken gibt, in dem der Energieeintrag die Flammenfortpflanzung beeinflusst. Im Grenzbereich (bei Funkenzündung ca. 5 mm Flammenradius) sinkt die Flammengeschwindigkeit auf einen Mindestwert, da der Funken Einfluss erlischt und sich die chemische Reaktionsschicht erst entwickelt. Danach beeinflusst die chemische Reaktionskinetik die Flammenausbreitung.

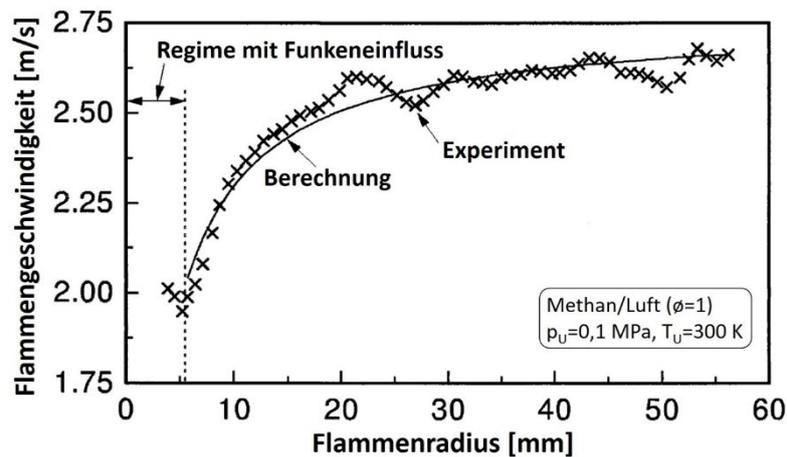


Abbildung 55: Flammengeschwindigkeit in einem Methan/Luft-Gemisch in Abhängigkeit des Flammenradius, Versuchsergebnisse von Gu et al. [92]

2.2.11 Geometrie der Apparatur

Bei Untersuchungen zur Flammenausbreitung werden meist Messwerte herangezogen, bei denen es sich nicht um stoffspezifische Kenngrößen handelt, die Versuchsmethode und die verwendete Apparatur tragen zum Entstehen dieser Werte bei. Die Beschaffenheit der Apparatur ist daher ein entscheidender Einflussparameter. In der Literatur sind sphärische Behälter oder Rohrapparaturen, selten auch rechteckige Bauten im Großmaßstab, bekannt. Von Ecken und spitzen Verbauungen wird meist abgesehen, da die Strömungsmechanik zu Wirbelbildung und somit zu ungewollter Turbulenz führt. Die Größe des Querschnitts ist entscheidend, wie lange sich die Flamme bei einer mittigen Zündung ungestört von Wandeinflüssen ausbreiten kann. In der Literatur werden stets Versuchsanordnungen mit im Querschnitt mittigem Zündort besprochen.

Die Flammenfront nimmt in einer Rohrapparatur eine parabolische Form an. Dies entsteht neben anderen Faktoren durch die Ausbildung eines Geschwindigkeitsgradienten zwischen dem Stagnations-Effekt an der Spitze der Flammenfront und der Wandreibung. Die Flamme wird gedehnt (engl. *flame stretch*). [43] Proust [43] erkannte, dass die Flammenkrümmung und der Geschwindigkeitsgradient proportional zum Verhältnis $1 / \text{Rohrdurchmesser}$ ist. Die

Flammendehnung ist umso stärker ausgeprägt, je kleiner der Rohrdurchmesser der Versuchsapparatur ist. Hohe Flammendehnungen führen zu geringeren Verbrennungsgeschwindigkeiten. [43] Somit ist der Einfluss des Rohrquerschnitts auf Grund der dadurch beeinflussten Flammendehnung auf die Messung der Verbrennungsgeschwindigkeit klar ersichtlich.

Aus oben genannten Gründen wirkt sich neben dem Querschnitt auch die Länge der gewählten Versuchsapparatur auf die Ausbreitung der Flamme und die ermittelten Messwerte aus. Wandeffekte udg. beeinflussen die Flamme und haben je nach Länge der Rohrapparatur verschieden lange Zeit um auf den Verbrennungsprozess einzuwirken. In einem vertikalen Rohr konnte Krause [48] bei Versuchen mit Lycopodium und Maisstärke eine moderate Beschleunigung der Flamme durch das Rohr zum oberen Ende hin beobachten (zwei- bis vierfache Beschleunigung [48]).

Der Einfluss des Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisses auf den Explosionsablauf ist in der Literatur ungenügend beschrieben (wenige Studien, u.a. von Radandt [97], sind bekannt). Vielfach werden zwei L/D-Verhältnisse verglichen oder dieses Verhältnis erwähnt, Aussagen über den Einfluss auf die Flammengeschwindigkeit oder Flammenausbreitung werden jedoch nicht gemacht. Im Gegensatz hierzu wurde das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis auf den Explosionsdruck genauer studiert (vgl. hierzu Arbeiten von Bartknecht [64, 98], Siwek [99] u.a.). Dies liegt aber vor allem auch an der Entwicklung der 20-Liter-Siwek Apparatur und der dahingehend benötigten Untersuchungen.

Ein weiterer apparatespezifischer Einflussfaktor auf die Ausbreitung einer Flamme ist der Ort und die Art des Staubeintrages. Zur Erzeugung einer Partikelströmung unter geringen Turbulenzbedingungen sind derzeit zwei Methoden in Anwendung. Einerseits kann der Staubeintrag von oben in die Apparatur erfolgen (wie bei der vorliegenden Arbeit) [17, 47, 50], andererseits gibt es die Möglichkeit der Erzeugung einer Wirbelschicht, bei der der Staub von unten über eine luftdurchströmte Sinterplatte in die Rohrapparatur eingetragen und gleichmäßig verteilt wird [22, 30, 48]. Der Ort der Staubeinbringung bestimmt die Richtung der Flammenfortpflanzung, da sich die Flammenfront nach oben hin ausbreitet (wie bei der vorliegenden Arbeit), bzw. nach unten hin bewegt. Abhängig von der gewählten Methode muss der Ort der Zündung passend für den Versuchsablauf angebracht werden.

Der Einfluss des Zündortes auf die Flammenausbreitung in einer Rohrapparatur wurde neben anderen Autoren von Scheid [79] untersucht, welcher in einer 1.420 mm langen vertikalen Rohrapparatur (100 Liter Volumen) Versuche mit Entlastungsquerschnitten (Berstscheiben) am oberen Ende durchführte. Der Zündort wurde 220 mm und 500 mm vom Behälterboden gewählt. Es zeigte sich, dass sich unabhängig vom Entlastungsquerschnitt für

den Zündort näher am Behälterboden höhere reduzierte Explosionsüberdrücke einstellten. Der zeitliche Druckanstieg nach Entlastungsbeginn zeigte nur wenig Veränderung, maßgeblich war hier der Ansprechdruck der Entlastungsfläche und nicht der Zündort. Die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit ist bei einer Zündung in Bodennähe (220 mm) höher. [75] Bei der Messung der Flammengeschwindigkeit ist aber immer das Rohrende miteinzubeziehen, da ein offenes oder geschlossenes Ende unterschiedlich auf die Flammenausbreitung (durch die Entlastungsströmung) wirkt.

2.2.12 Turbulenz nach der Zündung

Turbulente Bedingungen nach der Zündung einer Staub/Luft-Wolke werden durch Mischungseffekte und Expansionseffekte, also Effekte durch die Expansion der Verbrennungsgase, hervorgerufen. Die heiße verbrannte Zone, die Flammenzone und die Zone der unverbrannten Brennstoffmischung werden dreidimensional vermischt. Entstehen in der unverbrannten Zone hohe Turbulenzen, führt dies zu einer höheren Heftigkeit der Explosion, ist die Turbulenz gering, so wird die eingebrachte Zündenergie punktuell konzentriert (durch die fehlende Durchmischung), die Dissipationsenergie ist gering und der Verbrennungsprozess schreitet langsamer voran. [69] Durch die thermische Gasexpansion aufgrund der Verbrennung steigt die Turbulenz hinter der Flammenfront, diese hat wiederum einen Turbulenzeinfluss auf die Zone vor der Flammenfront. [85] Findet die Staubexplosion nun in einer Rohrapparatur mit einem geschlossenen Ende statt, so führt diese Gasexpansion zu einer Beschleunigung, da das verbrannte Gas die Flammenfront nach vorne wegschiebt und so die Flammengeschwindigkeit erhöht wird. [85] Ein Anstieg bis zur Detonation wäre möglich und führt bei langen Rohren mit geringen Querschnitten zu sogenannten DDT (*deflagration to detonation transition*)-Effekten. Neben der Geometrie können auch Einbauten im Weg der Flammenfront die Turbulenz verändern und so höhere Flammengeschwindigkeiten hervorrufen, aber auch Änderungen im Rohrquerschnitt. [100] Wechselwirkungen zwischen der Flammenfront und der reflektierten Druckwelle von der Umgebung führen zu Taylor-Instabilitäten der Grenzschicht zwischen diesen beiden Fronten, welche zu höheren Turbulenzbedingungen führen und somit die Flammenfortpflanzung begünstigen (vgl. [100]).

Untersuchungen zur Partikelströmung und somit zu den Turbulenzbedingungen vor und nach der Zündung wurden mit einem Lykopodium/Luft-Gemisch in eine 2.000 mm langen vertikalen Rohrapparatur durchgeführt (Beschreibung dieser siehe Kap. 3.1). Das Geschwindigkeitsfeld der Partikeln wurden mit Hilfe einer *particle image velocimetry* (PIV) Messung ausgewertet. Die Partikelbewegung wird bei diesem Messverfahren in einer

belichteten Ebene aufgenommen und das Geschwindigkeitsfeld ausgewertet. [82] In Abbildung 56 sind die Ergebnisse ersichtlich. Erkennbar ist die Änderung der Bewegungsrichtung der Partikeln von einer schwerkraftgeleiteten nach unten gerichteten Bewegung zu einer höheren chaotischen nach oben hin gerichteten Bewegung der Partikeln. Vor allem die höheren turbulenten Bedingungen an der Rohrwand sind erkennbar.

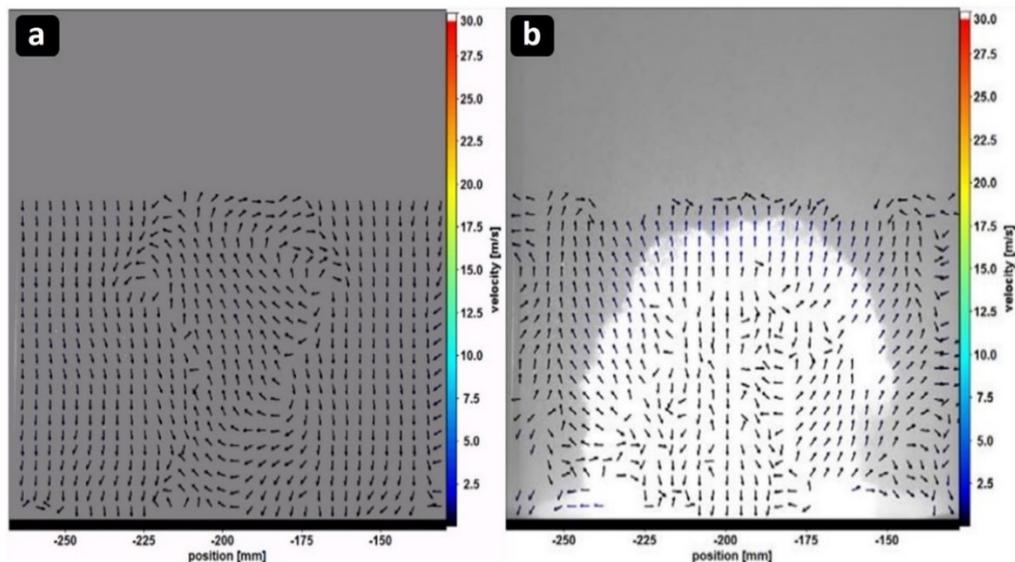


Abbildung 56: Geschwindigkeitsfeld der Lycopodium-Partikeln (a) vor und (b) nach der Zündung in einer Rohrapparatur (Staubkonzentration zwischen 150 und 250 g/m³) [101]

Turbulente Bedingungen in einem gezündeten Staub/Luft-Gemisch führen wie oben erwähnt zu besserer Durchmischung, was in einer höheren Verbrennungsrate resultiert und somit der zeitliche Druckanstieg steigt. Im Gegensatz dazu sollte der maximale Explosionsdruck wenig beeinflusst werden, da dieser vorwiegend von der Menge des verbrannten Brennstoffs abhängt. [85] Der dennoch messbare Anstieg kann durch die kürzere Dauer der Explosion und somit geringeren Wärmeverlust (also näher an adiabaten Idealbedingungen) erklärt werden. [85] Tamanini [52] führte hierzu Versuchsserien mit Maisstärke in einem 63,7 m³ großen rechteckigen Versuchsraum mit 16 Einspeißventilen für den Staub durch. Bei der Variation der Turbulenzbedingungen zeigte sich ein Anstieg des K_{ST} -Wertes (normalisierter volumenunabhängiger maximaler zeitliche Druckanstieg) bei höheren Turbulenzen (siehe Abbildung 57).

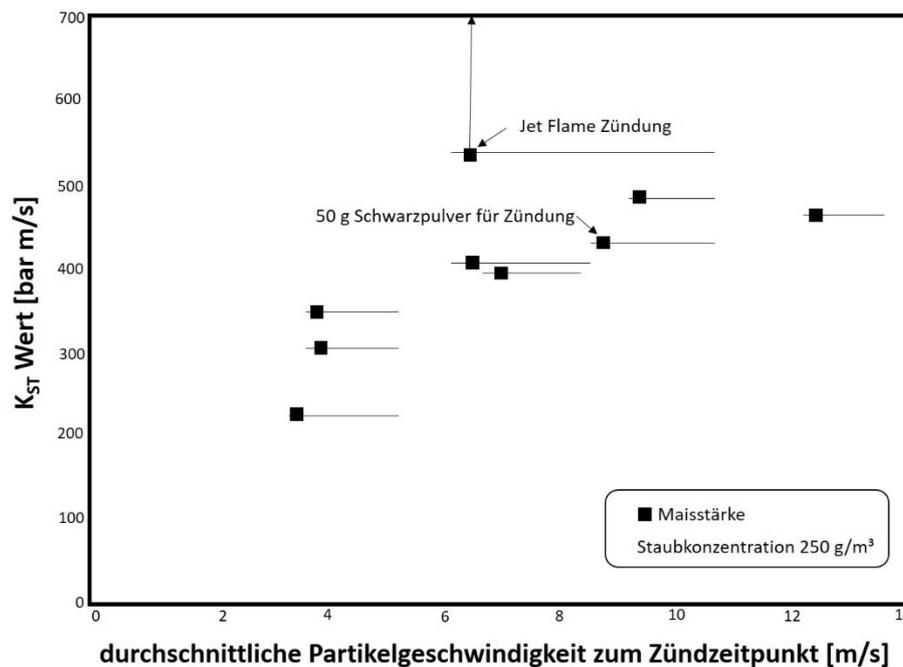


Abbildung 57: Versuchsergebnisse von Tamanini zum Einfluss der Turbulenzbedingungen auf die Heftigkeit der Staubexplosion [52]

Hertzberg und Cashdollar [102] erkannten durch ihre Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen Turbulenz und Korngröße. Die hohe Durchmischung, hervorgerufen durch hohe Turbulenzbedingungen, führt bei feinen Partikeln zu einer hohen Verbrennungsrate. Bei größeren Partikeldurchmessern führt die Turbulenz zu einer Änderung im Verbrennungsvorgang. Brennende Partikeln werden in Regionen unverbrannter Zonen gemischt und diese rufen nachfolgende Zündungen hervor (multiple Zündquellen der Flammenfortpflanzung).

Ein weiterer Einflussparameter auf die Turbulenzbedingungen nach erfolgreicher Zündung einer Staubwolke sind Flammen-Instabilitäten. Hierzu zählen die Landau-Darrieus-Instabilität und thermodynamische Instabilitäten. [103] Die Landau-Darrieus-Instabilität rührt von der thermischen Gasexpansion her. Durch ungleichmäßige Gasdichten entsteht eine zunehmende Wellung der Flammenfront. [103, 104] Die Wärme- und Massendiffusion charakterisieren thermodynamische Instabilitäten, welche zur Zellbildung der Flammenfront führen, ähnlich wie bei Landau-Darrieus-Instabilitäten. [104] Diese Instabilitäten kommen bei Lewis-Zahlen kleiner eins vor, wenn die Massendiffusion die Wärmeleitung überwiegt. [104] Ist die Lewis-Zahl größer eins ist die Flamme stabil, ist sie kleiner eins ist die Flamme instabil. [103] Dieser Effekt führt zum Spalten der Flamme und zur zellularen Flammenstruktur (vgl. Abbildung 4). [92, 96] Zellulare Flammen besitzen eine höhere Oberfläche, an der die Reaktionen ablaufen, dies wiederum führt zum weiteren Flammenwachstum bzw. Aufspalten

der Flamme und somit zu einer selbst erzeugten Turbulenz. [92, 96] Bilden sich keine selbstständigen Flammen aus, kommt es dennoch zum Spalten der Flammenfront. Dies wirkt sich vor allem in der Flammgeometrie aus, anstatt einer glatten Front entstehen einzelne Erhebungen, in denen durch die gebildete Turbulenz die Flamme schneller fortschreitet (siehe Abbildung 58). [96]

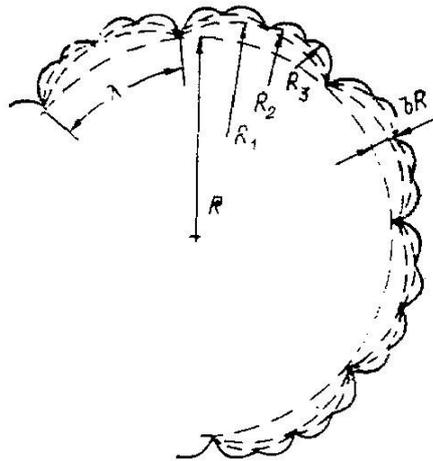


Abbildung 58: Schematische Darstellung der nacheinander auftretenden Störungen der Flammenfront einer Gasflamme, welche zur Ausbildung einer instabilen sphärischen Flammenfront führen (R – Radius ungestörte Front; R_1, R_2, R_3 – Krümmungsradien der 1., 2. und 3. Störung; δR – Amplitude) [96]

2.2.13 Wandeffekte

Unter dem Begriff Wandeffekte werden alle Einflussfaktoren zusammengefasst, welche auf Grund der vorhandenen Wand der Versuchsapparatur auf die Flammenausbreitung wirken. Im Allgemeinen kann zwischen thermischen Wandeffekten (Wärmeverluste udg.), mechanischen Wandeffekten (u.a. Reibungsverluste) sowie chemischen/physikalischen Wandeffekten (z.B. elektrostatische Aufladungen) unterschieden werden.

Die Begrenzung der Flamme durch die Apparategeometrie führt zu einer Einengung dieser, der Verbrennungsvorgang wird in eine andere Richtung hin verschoben. Die in der Strömungsmechanik als Idealvorstellung bekannte Pfropfenströmung kann durch auftretende Turbulenzen im Wandbereich nicht auftreten. Stattdessen nimmt die Flamme in einer Rohrapparatur eine parabolische Form an. Strömungsbedingungen in der Versuchsapparatur können sich durch die auftretende Wandreibung verändern und zu einer veränderlichen Flammenausbreitung führen. Die Wandrauigkeit beeinflusst somit die Turbulenz der Strömung

im Versuchsraum und könnte somit die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung sowie das Flammenbild und die Ausbildung der Flammenfront prägen.

Die, in der für die vorliegende Arbeit verwendete Rohrapparatur, nach unten sinkenden Partikeln werden vom konvektiven Strom seitwärts zur Wand gezogen, es erfolgt eine dynamische Variation der Staubkonzentration vor der Flammenfront, welche durch die Wand begrenzt wird. [20] Die strömungsbedingte Partikelwanderung zur Grenze der Apparatur hin wird durch die Wand gestoppt bzw. abgelenkt. Das Geschwindigkeitsfeld ändert sich, die Partikeln ändern ihre Richtung. Durch diese Bewegungsänderungen entstehen an der Wand Turbulenzen. Einerseits wird die Staub/Luft-Mischung durch diese Wandturbulenzen direkt vor der Flammenfront turbulenter, andererseits wird die Mischungsrate höher, die Verbrennungsreaktion kann schneller ablaufen. Dieser Vorgang beschleunigt sich selbst, messbar wird dies durch eine beschleunigende Flammengeschwindigkeit entlang der Rohrgeometrie (vgl. [48]). Aufnahmen des Geschwindigkeitsfeldes der Staubpartikeln in einem Lycopodium/Luft-Gemisch bei einer Staubkonzentration zwischen 150 und 250 g/m³ in einer Rohrapparatur durch eine *particle image velocimetry* (PIV) Messung sind in Abbildung 59 zu sehen. Der linke Ausschnitt zeigt die Partikelbewegung vor der Zündung an der Rohrwand. Die Partikeln sinken gleichmäßig schwerkraftgetrieben nach unten. Nach der Zündung bewegt sich die Flammenfront nach oben (rechter Ausschnitt), die Partikeln im Strömungsfeld ändern ihre Bewegungsrichtung und die Strömungsbedingungen in Wandnähe werden turbulent.

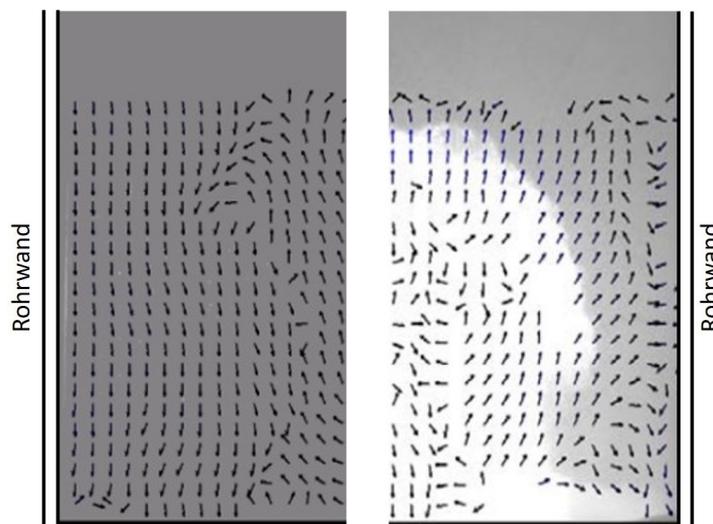


Abbildung 59: Änderung des Geschwindigkeitsfeldes von Lycopodium-Partikel durch die Zündung dieser (Staubkonzentration 150 bis 250 g/m³) [101]

Eine sich ausbreitende Flamme wird durch die Strömungsbedingungen vor dieser beeinflusst. Bei einer Deflagration pflanzt sich die Druckwelle vor der Flammenfront fort. Trifft diese nun auf die Apparategeometrie, z.B. auf die Rohrwand, wird die Druckfront an der Wand

reflektiert und wandert der Flammenfront entgegen. Wechselwirkungen zwischen der Flammenfront und der reflektierten Druckwelle führen zu thermodynamischen Instabilitäten (Taylor-Instabilitäten), die Strömungsbedingungen werden turbulenter. [100] Untersuchungen in einem Brenngas/Luft-Gemisch zur Wechselwirkung zwischen Flammenfront und reflektierter Druckwelle wurden von Lee und Moen [100] in einer geschlossenen Rohrapparatur durchgeführt, Berechnungsgrundlagen für die theoretische Betrachtung lieferte u.a. Spalding [38]. Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Flammenfront durch Einwirkung der Druckwelle einerseits gedehnt (engl. *flame stretch*), andererseits zusammengedrückt (engl. *flame folding*) wird. Durch die dadurch entstehende höhere Flammen-Oberfläche steigt die Wärmefreisetzungsrate pro projizierte Flammenfläche, dies führt wiederum zu einer höheren effektiven Verbrennungsrate. Aber auch andere Auswirkungen sind erkennbar. Kleine Wechselwirkungen zwischen Flammenfront und reflektierter Druckwelle führen zu höheren Turbulenzbedingungen im Nahbereich der Verbrennungszone, Transportraten (u.a. Diffusion) von Wärme und Masse steigen. [100] Diese Betrachtungen in der Literatur beziehen sich auf parallel zur Flammenfront reflektierte Wellen. Da sich die Druckwelle aber gleichmäßig vor der Flamme ausbreitet, trifft ein Teil dieser auch auf die Rohrwand, an der diese auftrifft, reflektiert wird und in Wechselwirkung mit der Flammenfront tritt. Diese sind sicher um ein vielfaches geringer, jedoch haben schon kleine Änderungen in den Strömungsbedingungen Einfluss auf die Reaktionszone durch abweichende Mischungsverhältnisse und Transportraten.

Ein weiterer Parameter, welcher aufgrund des Wandeinflusses tragend wird und die Flammenausbreitung beeinflusst, ist der Wärmeverlust der Flamme durch die Apparatewand. Die freiwerdende Wärmestrahlung der Flamme hat wenig Einfluss auf die Flammenfortpflanzung, muss aber als Energiesenke betrachtet werden. [22] Proust [43] konnte feststellen, dass an die 90 % der Wärmestrahlung an der Rohrwand seiner Versuchsanlage (Material: Glas) abgeleitet und absorbiert wird (vor allem ab einer Wellenlänge von 2 μm), das bedeutet, dass beinahe das gesamte Licht, das auf die Wand fällt, dem Wärmeverlust der Flamme zuzuordnen ist. Des Weiteren konnte der Autor beobachten, dass der Wärmeverlust durch Strahlung bei kleineren Set-Ups höher als bei großen ausfällt (bei 10 cm Rohrdurchmesser um 45 % höher als bei 20 cm Durchmesser). [43] Ein Scale-Up reduziert daher den Einfluss von Wärmeverlusten durch Strahlung. [10] Dies könnte durch die ungleichmäßige Verteilung der Verlustenergie entlang der Flammenfront erklärt werden. Wird die vertikale mittige Ebene einer Flamme in einer Rohrapparatur untersucht, scheint es, dass der Punkt nahe der Wand einen höheren Energieverlust durch Strahlung aufweist als ein Punkt an der Spitze der Flammenparabel. Bei Untersuchungen mit Maisstärke beträgt dieser Unterschied bis zu 70 %. [43]

An einer Wand treten nicht nur Wärmeverluste auf, Effekte im Zusammenhang mit dem Löschabstand wirken auf die Ausbreitung der Flamme ein. Eine Unterdrückung der Flammenfortpflanzung, also eine Auslöschung, tritt auf, wenn der Wärmeverlust an die Umgebung die Wärmezufuhr in das reaktive Gasgemisch übersteigt. [13] Untersuchungen von Proust und Veyssi re [22] zum Löschabstand eines Maisstärke/Luft-Gemisches zeigen einen Löschabstand von ca. einem Zentimeter bei einer Partikelkonzentration zwischen 100 und 400 g/m³. Diese führt in einer Rohrapparatur zu der Ausbildung der Flammenfront ein bis zwei Zentimeter von der Rohrwand entfernt.

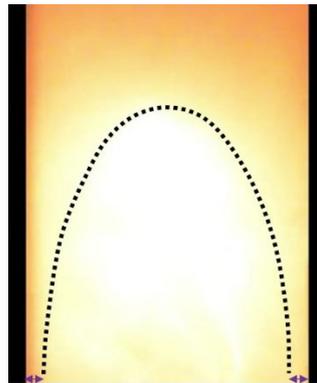


Abbildung 60: Bildaufnahme einer Flammenfront in einer Rohrapparatur mit erkennbarem Abstand dieser zur Rohrwand

Neben der Wirkung als Wärmesenke kann eine Rohrwand auch als Wärmequelle wirksam werden. Untersucht wurde der Einfluss einer heißen Apparatwand auf die Flammenausbreitung schon früh, u.a. von Pannetier und Laffitte [105]. Experimentelle Untersuchungen von Jarosi nski [32] führten zu denselben Annahmen. Die Versuche des Autors zeigten mit Methan/Luft-Gemischen in einer Rohrapparatur (25 x 50 mm) bei einer Temperaturerhöhung der Wand um 10 °C einen Anstieg der Flammengeschwindigkeit von fünf bis neun Zentimeter pro Sekunde über einen breiten Mischungsbereich des Gases.

2.2.14 Einflussfaktoren auf die Versuchsplanung

Die Einflussfaktoren auf das System „Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch“ konnten durch die Methoden der Versuchsplanung systematisch erhoben werden. Dadurch ist es möglich einen Versuchsaufbau zu erstellen und die durchgeführten Versuche besser beurteilen und die Auswertung der Versuchsergebnisse im Hinblick auf die Einflussfaktoren diskutieren zu können. Grundlage der Methode der Versuchsplanung ist die stufenweise Einstellung der auf das System wirkenden Faktoren. Je Faktor sind mindestens zwei unterschiedliche Einstellungen der Stufen zu unternehmen, um den Einfluss dieses Faktors

auf das System messbar zu machen. Abhängig von der Einstellungsvariation, also der Stufenvariation, ergibt sich der Effekt eines Faktors. [63] Geringe Stufenabstände gehen mit kleinen Effekten einher [63]. Die Stufenvariation sollte so hoch wie nötig, so gering als möglich gehalten werden. Bei den zuvor beschriebenen Einflussfaktoren (13 Faktoren) auf das System (siehe Abbildung 33) und einer Stufenwahl von zwei pro Faktor („hoch“ und „nieder“) könnte die Anzahl der Kombinationen nach Gleichung (3-1) mit 8.192 Kombinationsmöglichkeiten berechnet werden.

$$\text{Versuchsaufwand} = \text{Stufen}^{\text{Faktoren}} \quad (3-1)$$

Um die Auswirkung, also den Effekt, der Faktoren auf die Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch beschreiben zu können, wurden theoretische Überlegungen hierzu angestellt. Die Ergebnisse dieser sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Hierbei wird die Änderung des Faktors bzw. Parameters, unter Konstanthaltung der restlichen Einflussfaktoren, in den beiden Stufen „hoch“ und „nieder“ erörtert. Diese Maßnahme ist in der Literatur als *Faktor Screening* bekannt, bei der der qualitative Einfluss von Faktoren (Eingangsvariablen) auf eine Ausgangsvariable ermittelt wird. [63] Ziel ist die Unterscheidung von signifikanten und nicht signifikanten Eingangsfaktoren, mit deren Hilfe die Interpretation der Ergebnisse, der für die vorliegende Arbeit durchgeführte Versuchsserie, durchgeführt wurde.

Tabelle 2: Ergebnisse der theoretischen Überlegung zu den Auswirkungen („Effekt“) der Eingangsparameter auf das Qualitätsmerkmal (Teil 1)

Faktor	Auswirkung der Stufe „hoch“	Auswirkung der Stufe „niedrig“
Korngröße	Reaktionsverhalten träge;	Hohes Reaktionsverhalten bei geringer Korngröße; Anzahl der Partikeln bei gleicher Masse höher; Hohe Zündempfindlichkeit
Korngrößenverteilung	Die KGV kann nicht in zwei Stufen eingestellt werden. Bei einer breiten KGV ergeben sich andere Effekte als bei einer sehr engen. Bei allen Variationen spielt der Anteil der feinen Fraktion eine große Rolle. Auch kann die KGV gleichmäßig verteilt oder mit Bereichen großer Anzahl und Bereichen ohne Körner.	

Tabelle 3: Ergebnisse der theoretischen Überlegung zu den Auswirkungen („Effekt“) der Eingangsparameter auf das Qualitätsmerkmal (Teil 2)

Faktor	Auswirkung der Stufe „hoch“	Auswirkung der Stufe „niedrig“
Kornform	Hohe Oberfläche begünstigt explosionsartigen Abbrand; Runde Form bietet hohe Oberfläche	Ungleichmäßige Formen führen zu ungleichmäßigem Abbrand;
Feuchte des Staubes	Dispergierbarkeit sinkt; Explosionsheftigkeit und Zündempfindlichkeit sinkt	Geringe Neigung zur Agglomeratbildung; Hohe Explosionsheftigkeit und Zündempfindlichkeit
Staubkonzentration	Hohe Flammengeschwindigkeit bei optimaler Konzentration; bei zu hoher Konzentration sinkt die Flammengeschwindigkeit; Hoher Brennstoffgehalt im Explosionsraum	Gleichmäßiger Abbrand; Hohe Flammengeschwindigkeit bei optimaler Konzentration; bei zu niedriger Konzentration sinkt die Flammengeschwindigkeit stark; Bei zu geringem Brennstoffgehalt ist keine Flammenfortpflanzung mehr möglich
Initiale Turbulenz um den Zündort	Turbulente Bedingungen führen zu höherer Durchmischung; Schneller Abbrand durch hohe Durchmischung; Hohe Flammengeschwindigkeit; Hoher zeitliche Druckanstieg	Annäherung an laminare Bedingungen; Geringere Flammengeschwindigkeit; Geringer zeitliche Druckanstieg

Tabelle 4: Ergebnisse der theoretischen Überlegung zu den Auswirkungen („Effekt“) der Eingangsparameter auf das Qualitätsmerkmal (Teil 3)

Faktor	Auswirkung der Stufe „hoch“	Auswirkung der Stufe „niedrig“
Sauerstoffkonzentration	Veränderung der Flamme; Höhere Verbrennungsgeschwindigkeit; Höhere Flammengeschwindigkeit	Veränderung der Flamme; Geringer max. Druck; MZE steigt; Geringere Verbrennungsgeschwindigkeit; Geringere Flammengeschwindigkeit
Initiale Temperatur	Reaktion wird begünstigt, da weniger Energie in das System gebracht werden muss; Geringerer max. Druck; Höhere Verbrennungsgeschwindigkeit; Abnahme UEG	Mehr Energieeintrag nötig; Höherer max. Druck; Sinkende Verbrennungsgeschwindigkeit
Initialer Druck	Steigender max. Druck; Optimale Konzentration verschiebt sich zu höheren Werten	Steigende Verbrennungsgeschwindigkeit
Zündung	Starke Zündquellen können Form und Richtung der Flammenausbreitung vorgeben; Hoher max. Druck; Steigende Verbrennungsgeschwindigkeit	Geringe Turbulenz durch Zündung; Flamme wird instabil bei zu geringer Energie; Sinkende Verbrennungsgeschwindigkeit

Tabelle 5: Ergebnisse der theoretischen Überlegung zu den Auswirkungen („Effekt“) der Eingangsparameter auf das Qualitätsmerkmal (Teil 4)

Faktor	Auswirkung der Stufe „hoch“	Auswirkung der Stufe „niedrig“
Apparat	<p>Apparatespezifische Konstruktionsparameter haben hohen Einfluss auf die Art und Weise der Flammenausbreitung und der Richtung und Form der Flammenfont;</p> <p>Ergebnisse sind nicht mit anderen Versuchsmethoden reproduzierbar;</p> <p>Apparatespezifische Parameter werden gemessen</p>	<p>Ergebnisse sind durch andere Versuchsmethoden reproduzierbar;</p> <p>Stoffspezifische Parameter werden gemessen;</p>
Turbulenz nach der Zündung	<p>Flamme wird beschleunigt;</p> <p>Instabilität der Flamme;</p>	<p>Verbrennungsprozess läuft langsamer ab;</p> <p>Stabile Flamme;</p>
Thermische Wandeffekte	<p>Wand wirkt als Wärmesenke;</p>	<p>Näher an adiabaten Bedingungen;</p>
Mechanische Wandeffekte	<p>Erzeugung von Turbulenzen;</p>	<p>Flamme breitet sich gleichmäßig aus;</p>
Chemische/ Physikalische Wandeffekte	<p>Erzeugung von Turbulenzen;</p> <p>Beschleunigung der Flamme;</p>	<p>Flamme breitet sich gleichmäßig aus;</p>

3 Experimenteller Aufbau

Um die Flammenausbreitung um den Ort der Zündung in einem Staub/Luft-Gemisch bei niedrigen Turbulenzbedingungen experimentell untersuchen zu können, wurde eine neuartige Versuchsapparatur entwickelt. Basis hierfür war eine Rohrapparatur, welche von Kern [17] zur Bestimmung der Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit herangezogen wurde. Ziel sollte bei der neu entwickelten Apparatur sein, die Ausbreitung der Flamme in der Staubwolke über einen längeren Zeitraum frei von Einflussfaktoren, wie Wandeffekte udg. studieren zu können. Um ungestört dieser Einflussparameter die Flammenausbreitung beobachten zu können, wurde ein größerer Maßstab gewählt. Das experimentelle Setup wurde in einer Weise modifiziert, in der einerseits Versuchsserien angepasst an die Großversuchsanlage durchgeführt, andererseits vergleichende Untersuchungen zwischen den beiden Apparaturen in Klein- und Großmaßstab angestellt werden konnten. Der Fokus der experimentellen Betrachtung liegt in der Ausbreitung der Flamme sowie in der Untersuchung der entstehenden Flammenform und –geometrie bei niedriger Anfangsturbulenz.

3.1 Laborversuchsapparatur

Einer der größten Einflussfaktoren auf die Ausbreitung der Flamme in einem Staub/Luft-Gemisch sind vorherrschende Turbulenzbedingungen im Gemisch. Während turbulente Bedingungen die Ausbreitungsgeschwindigkeit erhöht, würden laminare Bedingungen einen idealen Untersuchungsrahmen bieten. Da dies zum derzeitigen Stand experimentell nicht erreicht werden kann, gehen die Anstrengungen in die Richtung einer homogenen Staubverteilung und einer Turbulenz, die so gering wie möglich gehalten wird. Erreicht wurde dies neben anderen Autoren (vgl. 2.1.6) von Kern [17] in einer Apparatur, welche in der vorliegenden Arbeit ebenfalls für experimentelle Untersuchungen verwendet wurde (vgl. Abbildung 61). Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus einer Rohrapparatur, welche eine Länge von 2.000 mm und einen Durchmesser von 140 mm besitzt, in welcher die

Verbrennungsreaktion abläuft. Das geschlossene untere Ende beinhaltet Elektroden zur Erzeugung des elektrischen Zündfunken. Im oberen Teil der Rohrapparatur erfolgt der Staubeintrag mittels Schneckenförderung, über dieser sind eine Flammensperre und eine Entlastungsklappe angebracht. Der Staub wird über die Förderschnecke in den Reaktionsraum eingebracht und verteilt sich schwerkraftgetrieben über die Länge des Rohres. Die Fördermenge sollte einerseits hoch genug sein, um ein explosionsfähiges Gemisch zu erzeugen, andererseits so gering wie möglich, um Turbulenzbedingungen niedrig zu halten. Die Zündung erfolgt im unteren Bereich durch einen Funken, mit einem Energieniveau genügend hoch, um die Staubwolke zu zünden, woraufhin sich die Flammenfront aufgrund der Versuchsmethode nach oben hin ausbreitet. [17] Die für die vorliegende Arbeit benötigten (Vor-)Versuchsserien wurden in der vorgestellten Rohrapparatur mit adaptierten Mess- und Auswertmethoden durchgeführt.

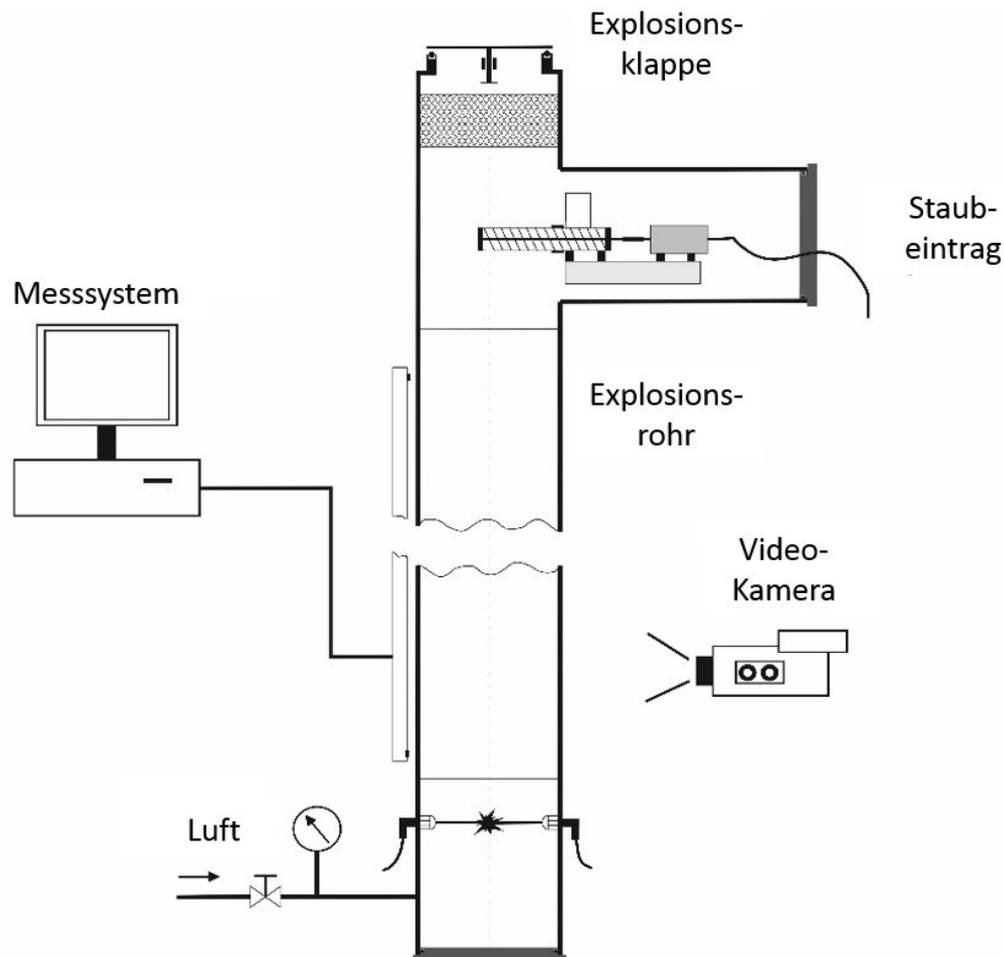


Abbildung 61: Versuchsapparatur zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit nach Kern [17]

3.2 Großversuchsanlage

Aufbauend auf der oben beschriebenen Versuchsapparatur wurde eine Rohrapparatur im Großmaßstab mit einem Explosionsraum von $2,2 \text{ m}^3$ entwickelt. Hierbei kam eine Stahlkonstruktion zum Einsatz, welche ein vertikales Reaktionsrohr mit einer Höhe von 4.156 mm und einem Durchmesser von 813 mm , eine Staubeintragseinrichtung, eine Zündquelle sowie die entsprechende Steuerungs-, Mess- und Auswertetechnik umfasst. Entlang der vertikalen Achse wurden Messadapterstücke angebracht, um die Flammenfortpflanzung im Versuchsraum beobachten und untersuchen zu können. Das untere Ende der Apparatur wurde geschlossen ausgeführt, worin die Zündquelle mittig angebracht ist. Die Flamme kann sich somit nach der Funkenzündung gleichmäßig ohne Störeinflüsse über einen großen Querschnitt in alle Richtungen ausbreiten. Erst nach Überwindung der ersten Wegstrecke treten Wandeffekte auf und die Flammenfront breitet sich entsprechend der Versuchsmethode nach oben hin aus. Durch das offene obere Ende wird jede geringste Druckerhöhung sofort abgeführt, jegliche Einflüsse durch verändernde Druckbedingungen können so unterbunden werden. Die Versuchsanlage ist aufgrund der Dimension im Freibereich zu betreiben, Wettereinflüsse müssen daher mitbedacht werden, da Umgebungsbedingungen wie Temperaturschwankungen, Luftfeuchteänderungen udg. signifikante Auswirkungen auf die Messergebnisse haben könnten. Windeinflüsse, welche die Staubpartikelverteilung im Explosionsraum der Apparatur stark ändern würden, wurden durch die Anbringung von sensibel ausbalancierten Verschlussklappen am oberen Ende der Rohrapparatur verhindert. Diese schützen einerseits den Versuchsraum von Windverwirbelungen, andererseits geben sie durch die einstellbare Gewichtslagerung beim Ankommen der Druckwelle den Querschnitt sofort frei und erlauben somit eine Deflagration mit nur sehr geringem Druckanstieg. Das Prinzip eines punktuellen Staubeintrages in den Versuchsraum von oben und der Verteilung dieses unter Ausnutzung der Schwerkraft wurde vom vorhergehenden Versuchsaufbau im Labor übernommen und an die Großanlage adaptiert. Die Untersuchungen der Fortpflanzung der Flammenfront durch das brennbare Staub/Luft-Gemisch erfolgt neben der Temperaturlaufzeichnung photooptisch und bildgebend. Der reale Versuchsaufbau und die CAD-Zeichnung der Versuchsanlage kann Abbildung 62 entnommen werden.



Abbildung 62: Entwickelte Versuchsapparatur im Großmaßstab (Foto und 3D-Grafik) [106, 107]

3.2.1 Staubeintrag

Grundlage für nachstehende Überlegungen bezüglich der Konstruktion einer Rohrapparatur zur Messung der Flammengeschwindigkeit ist die gleichmäßige Partikelverteilung der Staubpartikel im Reaktionsraum. Da eine Messung dieser nicht adäquat durchführbar wäre, wurde auf eine numerische Modellierung für die Beschreibung der Partikelverteilung in einer schwerkraftgetriebenen Zweiphasenströmung zurückgegriffen. Hierzu wurde eine *computational fluid dynamics* (CFD)-Simulation mit Hilfe der open source Software OpenFOAM® (*Field Operation and Manipulation*) durchgeführt. Da beim Fördervorgang keine nennenswerten Druckgradienten oder Machzahlen größer als 0,2 auftreten, wurde der transiente inkompressible Löser *pimpleFOAM* als Basis herangezogen. [108] Dieser löst

mittels Finite-Volumen-Methode (FVM) die Erhaltungsgleichungen für den Impuls (Navier-Stokes Gleichung) und die Masse (Kontinuitätsgleichung) [109]. Für die Modellierung der Partikel wurde der Lagrange-Ansatz des *kinematic Parcels* gewählt. Dieser besitzt eine Zweiwegkoppelung für den Impuls. Für die Modellierung der Turbulenz wurde aufgrund der geringen Turbulenzintensität in Teilen des Strömungsfeldes das *k-ε-Lauder Sharma* Turbulenzmodell [110] gewählt. Hierbei handelt es sich um ein Zweigleichungsmodell, bei welchem die turbulente kinetische Energie k und deren Dissipation ε mit Erhaltungsgleichungen beschrieben werden um die Reynoldsspannungen mittels Boussinesq approximiert zu schließen. Der Einfluss der Fluidturbulenz auf die Partikeln wurde mittels *Discrete Random Walk* (DRW) abgebildet [111]. Zur Senkung der Rechenzeit der Lagrange Phase, wurden die Partikeln in „Parcels“ (Paketen) zusammengefasst.

Die Erstellung des Finite-Volumen-Netzes erfolgte in ICEM CFD durch die Extrusion eines 2D O-Netzes. Die Injektionspunkte wurden im Anschluss in OpenFOAM® definiert. Hierbei erfolgte eine Inkretion von insgesamt 10^5 Partikeln pro Sekunde über eine Dauer von 10 Sekunden.

Als Modellstaub wurde *Lycopodium clavatum* mit einer einheitlichen Korngröße von $30 \mu\text{m}$ und einer Dichte von 800 kg/m^3 gewählt. Für die Modellierung der Turbulenz wurde die Strömungsgrenzschicht durch die jeweiligen Wandfunktionen, basierend auf dem dimensionslosen Wandabstand für die turbulente kinetische Energie k , deren Dissipation ε und die Wirbelviskosität hinterlegt.

Die durchgeführte Simulationsstudie führte bei einem Flammenrohr von 4 m Höhe, einem Durchmesser von 800 mm und vier Staubeintragspunkten bei kontinuierlichem Staubeintrag von 10 s zu unten stehenden Ergebnis (vgl. Abbildung 63 und Abbildung 64).

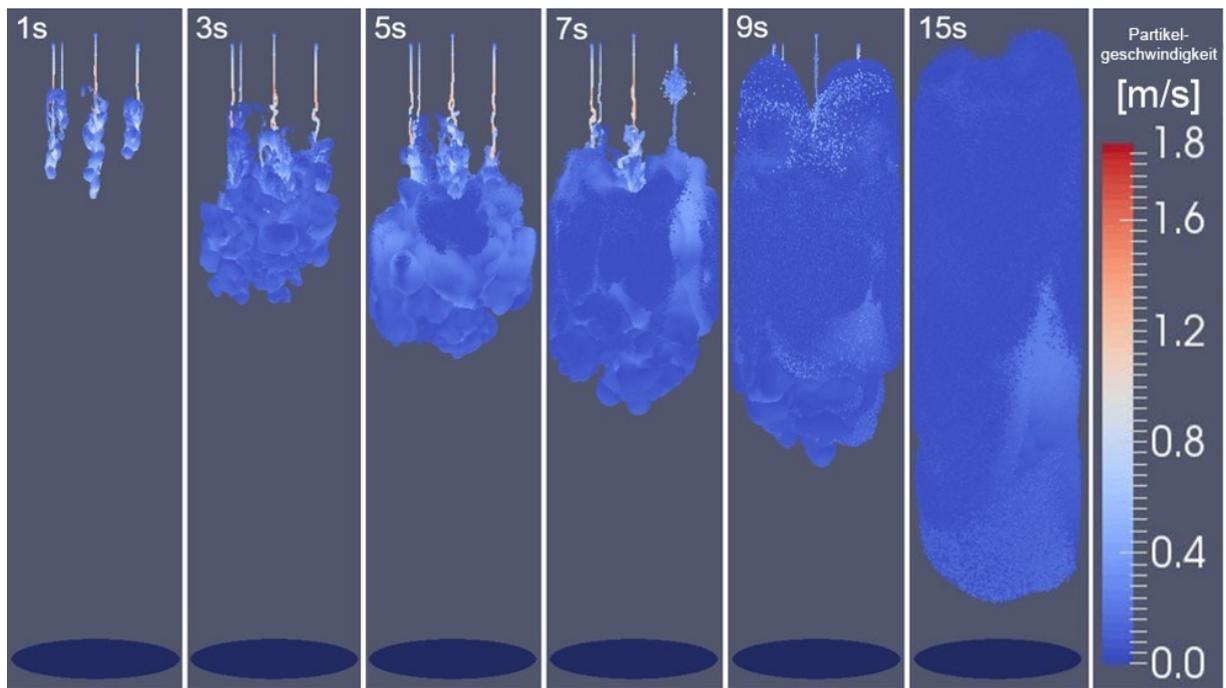


Abbildung 63: Simulationsergebnis der Verteilung von Lycopodium in der Großversuchsanlage (Partikelgeschwindigkeit) [107, 108]

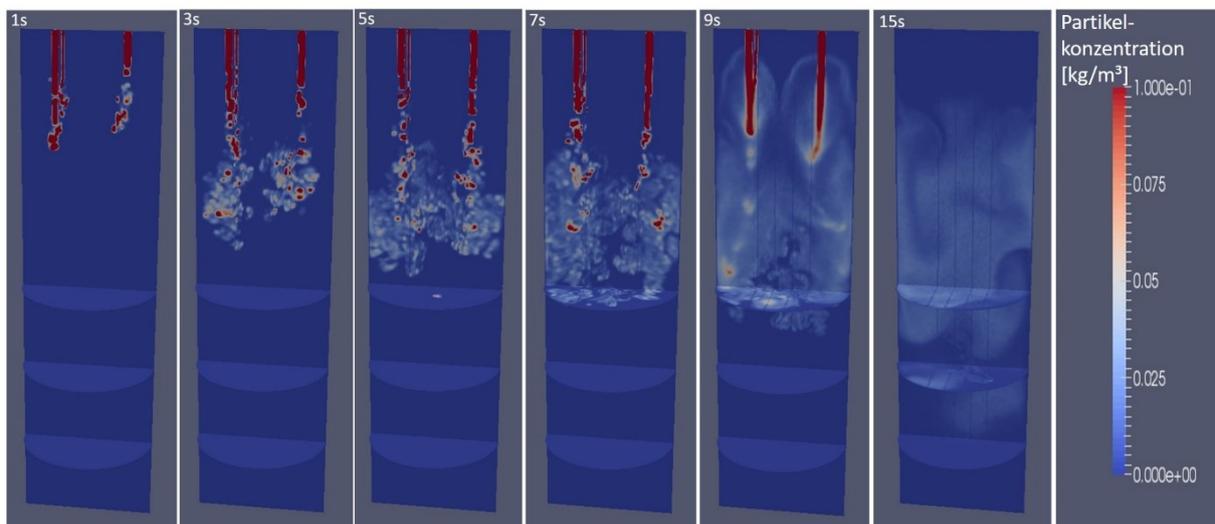


Abbildung 64: Simulationsergebnis der Verteilung von Lycopodium in der Großversuchsanlage (Partikelkonzentration) [107, 108]

Bei einem 10 sec andauernden kontinuierlichen Staubeintrag von Lycopodium zeigt sich, dass nach 5 sec auf halber Höhe des Zylinders der Querschnitt mit Staub bedeckt ist. In weiterer Folge kommt es zu einer Druckerhöhung im unteren Teil und einem anschließenden Druckabbau, welcher zu einer erneuten Aufwirbelung des Staubes führt und folglich zu einer

homogenen Staubpartikelverteilung von 200 g/cm^3 . Dies entspricht einer überstöchiometrischen Staubkonzentration von Lycopodium (stöchiometrisch 120 g/cm^3).

Anforderungen für das gewählte Verfahren zum Eintrag des brennbaren Staubes in die Rohrapparatur sind neben einer geringen Querschnittsverkleinerung im Rohr durch den Eintrag selbst eine Verteilungsform, welche Agglomeration der Staubpartikel vermeidet, um so eine homogene Partikelverteilung zu erhalten. Eine kontinuierliche Förderrate muss laut den CFD-Simulationsergebnissen gewährleistet sein, um eine möglichst stetige Verteilung der Staubpartikeln über die Fallhöhe zu erreichen. Diese Förderrate sollte einerseits reproduzierbar sein, andererseits an allen vier gewählten Eintragungspunkten der gleiche Massenstrom garantiert werden. Die stöchiometrische Mischung der meisten organischen Stäube in Luft liegt im Konzentrationsbereich zwischen 50 und 500 g/m^3 . [8] Als Staubeintrag wurde ein druckloses Rührverfahren über eine Siebplatte aus einem Vorratsbehälter gewählt. [106] Hierbei kann über die Maschenweite auf die Korngröße des Versuchsstaubes eingegangen werden. Der federgelagerte Rührer ist mit weichen Bürsten ausgestattet, um die Partikeln voneinander am Einbringungsort zu trennen, nicht aber die Partikelstruktur selbst zu beschädigen. Die Massenförderrate wird so durch die Sieb-Maschenweite und der Drehzahl bestimmt. Der Antrieb erfolgt über einen bipolaren Hybrid-Schrittmotor, welcher bürstenlos arbeitet und aus diesem Grund während des Betriebes keine Funken erzeugt [112] und daher nicht als Zündquelle wirksam werden kann. Der Motor liefert beim Anlauf sein höchstes Moment [112], die Lagerung erfolgt über eine Klauenkupplung mit dämpfender Funktion. In Abbildung 65 ist ein erarbeitetes Staubeintragsgerät ersichtlich.

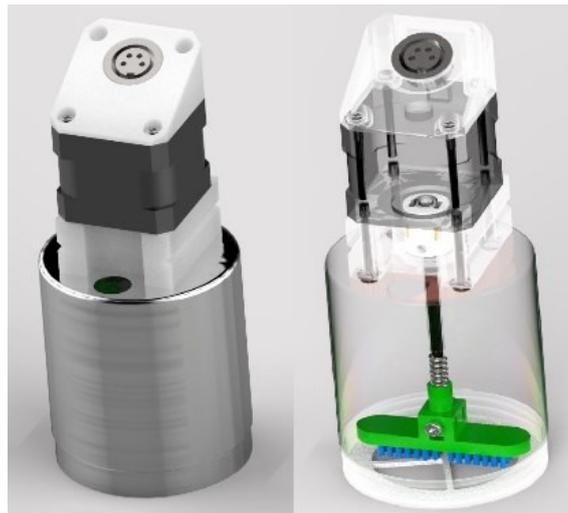


Abbildung 65: 3D-Grafik des entwickelten Aufbaus zum Staubeintrag in die Versuchsapparatur

[106, 107]

Experimentelle Aufbauten von Autoren mit ähnlichen Methoden zur Bestimmung der Flammgeschwindigkeit zeigten bei einer schwerkraftgetriebenen Verteilungsmethode der Partikeln vom oberen Ende einer Rohrapparatur die Notwendigkeit der Überprüfung der Partikelkonzentration. Palmer und Tonkin [50] stellten bei ihrem vertikalen 5.200 mm langem Explosionsrohr (Durchmesser 254 mm) einen starken Massenanstieg an Staubpartikeln zur Rohrwand hin fest (Staubverteilung siehe Abbildung 66). Die Messung der Partikelkonzentration ist somit vor jedem Versuch maßgeblich zur Durchführung von reproduzierbaren Versuchsserien. Die genannten Autoren lösten dieses Problem mit der Reinigung des Versuchsraumes und durch die Messung der Konzentration vor jedem Versuch.

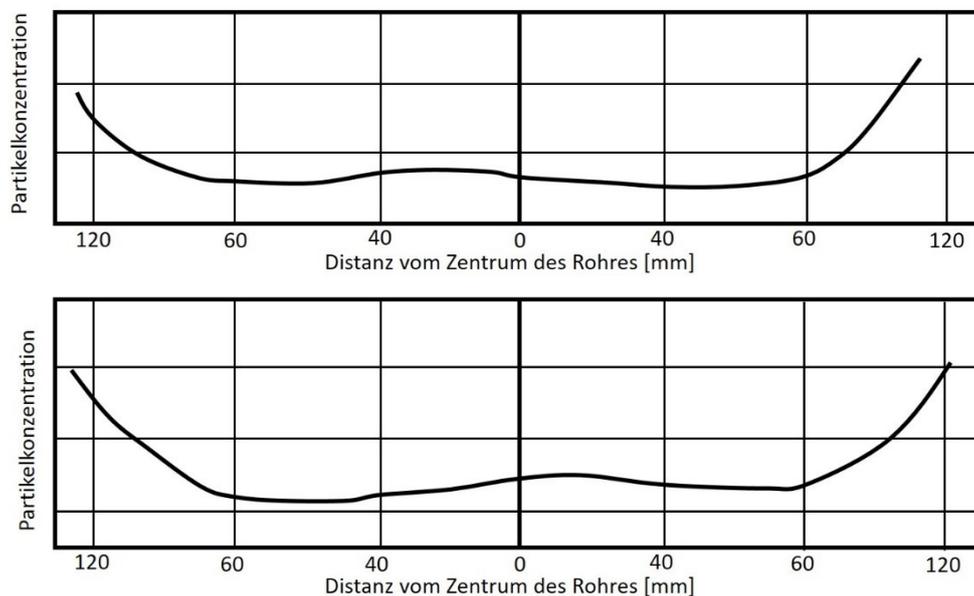


Abbildung 66: Partikelverteilung des Kohlestaubes über den Querschnitt des Explosionsrohres in der Versuchsapparatur von Palmer und Tonkin [50]

Die Partikelkonzentration von strömenden Staub/Luft-Gemischen kann mit Hilfe zweier Methoden bestimmt werden. Einerseits kontinuierlich (optische Messung) und andererseits diskontinuierlichen (gravimetrische Bestimmung). [113–115] Die gravimetrische Konzentrationsmessung ermittelt durch Abzug eines definierten Volumens aus dem Partikelstrom mittels Messung des Gewichtes direkt die Partikelkonzentration, optische Methoden stellen eine indirekte Messmethode dar. In der Literatur sind verschiedene Aufbauten und Anwendungen der gravimetrischen Bestimmung (u.a. [116, 117]) sowie zur optischen Messung bekannt (u. a. [79, 113, 114, 116, 118–121]). Um bei den in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuchsserien die Staubkonzentration im Versuchsraum messen zu können, wurde die Methode der optischen Transmissionsbestimmung angewendet. Die VDI-Richtlinie 2066-Blatt 4 [121] beschreibt das Verfahren zur Messung der

optischen Transmission. Deren Grundlage ist ein Lichtstrahl, welcher eine bestimmte Distanz in einem Staub/Luft-Gemisch überwindet und eine Abschwächung erfährt, welche auf Absorption und Streuung an den Partikeln beruht. Das Verhältnis von abgeschwächtem und ausgesandtem Licht wird als Transmission T bezeichnet. Ein Laserdiodenmodul wurde in der vorliegenden Arbeit als Lichtquelle mit einer Wellenlänge von 650 nm [122] eingesetzt, als optischer Sensor eine pin-Photodiode [123], welche sich durch eine hohe Geschwindigkeit und Strahlungssensitivität auszeichnet. [106] Eine Kalibrierung jedes Versuchsmaterials ist obligat und für die Auswertung der Lichtschwächung essentiell.

3.2.2 Zündung

Um der Anforderung einer punktuellen Zündung gerecht zu werden wurde die Variante einer elektrischen Zündung gewählt. Die zur Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen verwendeten chemischen Zünder nach EN ISO 80079-20-2 [1] können für die in der vorliegenden Arbeit angestrebte Versuchsmethode nicht verwendet werden, da der Energieeintrag in das System einerseits zu hoch ist und andererseits würden die Turbulenzbedingungen um den Zündort stark verändert werden. Gewählt wurde als Zündquelle ein Hochspannungs-Plasmabogen [106], welcher punktuell einen Hotspot erzeugt und dadurch die Zündtemperatur des zu untersuchenden Staub/Luft-Gemisches deutlich überschreitet und der Energieeintrag hoch genug für eine Zündung des Staubgemisches ist. Der Funkenüberschlag kann im Allgemeinen gewährleistet werden, wenn die Potentialdifferenz zwischen den beiden Zündelektroden größer als die absolute Durchschlagsfestigkeit des Umgebungsmaterials ist. Die relative Durchschlagsfestigkeit (engl. *dielectric strength*) von bodennaher Luft beträgt ungefähr 2,4 kV/mm [124, 125] (3 MV/m nach [126]). Der Betrieb der gewählten Zündquelle erfolgt aus sicherheitstechnischer Überlegung mit einer 12 Volt Gleichspannungsversorgung. Zur Verstärkung der verhältnismäßig niedrigen Quellenspannung wurde ein Zeilentransformator verschaltet, welcher neben Hilfswicklungen sekundärseitig mit Hochspannungsdioden und –kondensator zum Gleichrichten der Hochspannung ausgestattet ist. [127] Für die benötigte Umwandlung der Quellenspannung in Wechselstrom zur Erzeugung eines sich ständig ändernden Magnetfeldes kam eine kommerziell erhältliche selbstschwingende Mazzilli ZVS (*Zero-Voltage-Switching*)-Schaltung zum Einsatz. Diese Schaltung schwingt aufgrund ihrer Bauweise immer optimal mit einer Frequenz von zirka 40 kHz. [128] Für den eingeschwungenen Zustand kann eine primärseitige Spitzenspannung V_P von 37,7 V nach Gleichung (4-1) berechnet werden.

$$V_P = \pi * V_{in} \quad (4-1)$$

Nach dem grundlegenden Transformatorgesetz (vgl. 4-2) ergibt sich für eine Windungszahl von 1.200 [106] an der Sekundärwicklung sekundärseitig eine ungefähre Ausgangsspannung V_S von 9 kV.

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \quad (4-2)$$

Durch den Einsatz eines Einweggleichrichters handelt es sich hierbei um Gleichspannung, was dazu führt, dass sich ein stehender Funke ausbildet der nicht abbricht.

Die eingebrachte Leistung des Lichtbogens beträgt ungefähr 30 W [106]. Durch diesen hohen Energieeintrag in ein relativ kleines Zündvolumen wird der für die Versuche verwendete brennbare Staub mit einer MZE kleiner 40 mJ sicher gezündet (vgl. Anhang A bis C). Neben der zeitlich eingebrachten Energie ist die Temperatur ausschlaggebend für die Zündwirksamkeit der Zündquelle. [8] Die Messung der Temperatur des Plasmabogens ergab ein Temperaturmaximum über 1.200 °C [106]. Diese Temperatur liegt klar über der MZT der für die Versuche verwendeten brennbaren Stäube (vgl. Anhang A bis C).

3.2.3 Optische Messung

Basierend auf optischen Messungen der Flammenfortpflanzung und Flammgeometrie nach Scheid [79] wurde diese Variante als Grundlage zur Vermessung der Flammenfront herangezogen. Kern [17] verwendete in seiner Arbeit fünf BPW34 Silizium-Photodioden zur Messung der Flammengeschwindigkeit, welche im Abstand beginnend 100 mm zum Zündort entfernt in 400 mm Schritten angeordnet wurden. Das Problem des relativ großen Einstrahlwinkels und der damit verbundenen zu frühen Detektion der Flammenfront löst der Autor durch die Anwendung der sogenannten 3-Sigma-Methode. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Addition vom arithmetischen Mittelwert und dreifacher Standardabweichung die Schwelle darstellt, bei deren Überschreitung von einem Signal gesprochen werden kann. Die Berechnung (Glg. 4-2) der Flammengeschwindigkeit s_f erfolgte über die Zeitspanne zwischen Erreichen des Schwellenpunktes und der ersten und zweiten Messstelle (Δt) und der Distanz zwischen den beiden Photodioden (Δs). [17]

$$s_f = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (4-2)$$

Durchgeführte Versuchsserien zeigten aber immer wieder auftretende qualitativ schlechte Messsignale, da die verwendeten Dioden sehr sensibel auf Umgebungslicht aufgrund der vorgebauten Optik reagierten, und daher zu einem Rauschen des Ausgangssignals führten. Ein Lösungsansatz stellt die Trennung von Messstelle und Messsignalerfassung dar. Der Lichtimpuls wird an der Messstelle gezielt erfasst, ausgeleitet und zur Messeinrichtung geführt.

Vorteil dieser Variante ist neben der punktuellen Lichtaufnahme der Schutz der verwendeten Dioden, die nicht mehr direkt an der Messstelle angebracht werden müssen, sondern separat in einem Gehäuse verbaut werden können und so geschützt vor Hitze und Staub reinere Messsignale liefern. Der Lichtimpuls wird mit Hilfe eines Lichtwellenleiters detektiert. Zum Einsatz kam das weitverbreitete Material $1.000\ \mu\text{m}$ *single mode core*, da der Kerndurchmesser mechanisch stark belastbar ist. Vorversuche zeigten, dass erst bei nahezu orthogonalem Auftreffen des Lichtes auf die Faserendoberfläche dieses den Lichtwellenleiter passiert und ein signifikanter Strom gemessen werden kann. Erst bei richtigem Beleuchtungswinkel tritt ein Lichtstrahl aus dem Lichtwellenleiter, die dadurch entstehende Unempfindlichkeit gegen Streulicht bedeutet einen großen Vorteil.

Der so eingefangene Lichtimpuls an der Messstelle wird durch die Faser des Lichtwellenleiters zur Detektion an eine Diode geleitet. Verbaut wurde die Photodiode IF-D91, welche in einem Spektrum von 450 bis $1.100\ \text{nm}$ [129] Licht absorbiert und daher nahezu das gesamte sichtbare Lichtspektrum und einen Teil des IR-Bereiches abdeckt. Diese ist daher zur Detektion des Flammenspektrums, welches vom gelben bis in den IR-Bereich reicht, bestens geeignet.

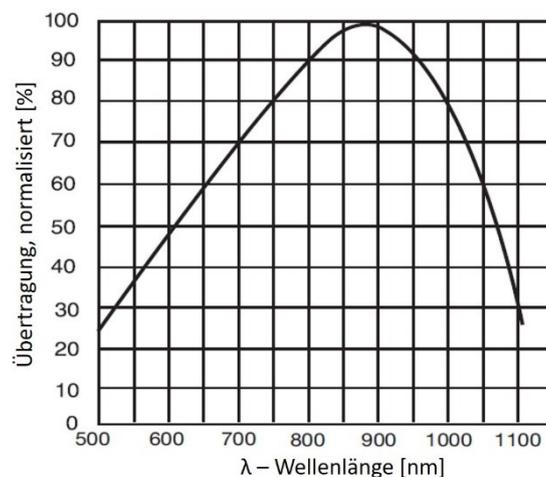


Abbildung 67: Absorptionsbereich Photodiode [129]

Die Antwortzeit des Sensors der Photodiode beträgt $1\ \text{ns}$. Das Spannungssignal wird zeitlich sehr genau am Messpunkt erzeugt, was eine hohe Präzision der Messung mit sich zieht.

Der auf die Photodiode auffallende Lichtimpuls erzeugt einen Photostrom, welcher mittels Messverstärker verarbeitet wird. Als Verstärker fungiert ein Transimpedanzwandler, welcher aus einer invertierenden Operationsverstärkerschaltung mit Rückkopplung aufgebaut wurde. Basis für die Auslegung dieses war ein Photostrom von $1\ \mu\text{A}$, welcher bei voller Bestrahlung

gemessen wurde. Zur Verbesserung der Signalqualität wird der verwendete OPV L 358 übersteuert und die Ausgangsspannungsflanke mit einem 10 pF Kondensator parallel zum Rückkopplungswiderstand geglättet. Die mit einer Abtastrate von 3.000 Datenpunkten in 600 ms erhaltenen Messwerte (vgl. Abbildung 68) werden anschließend ausgewertet.

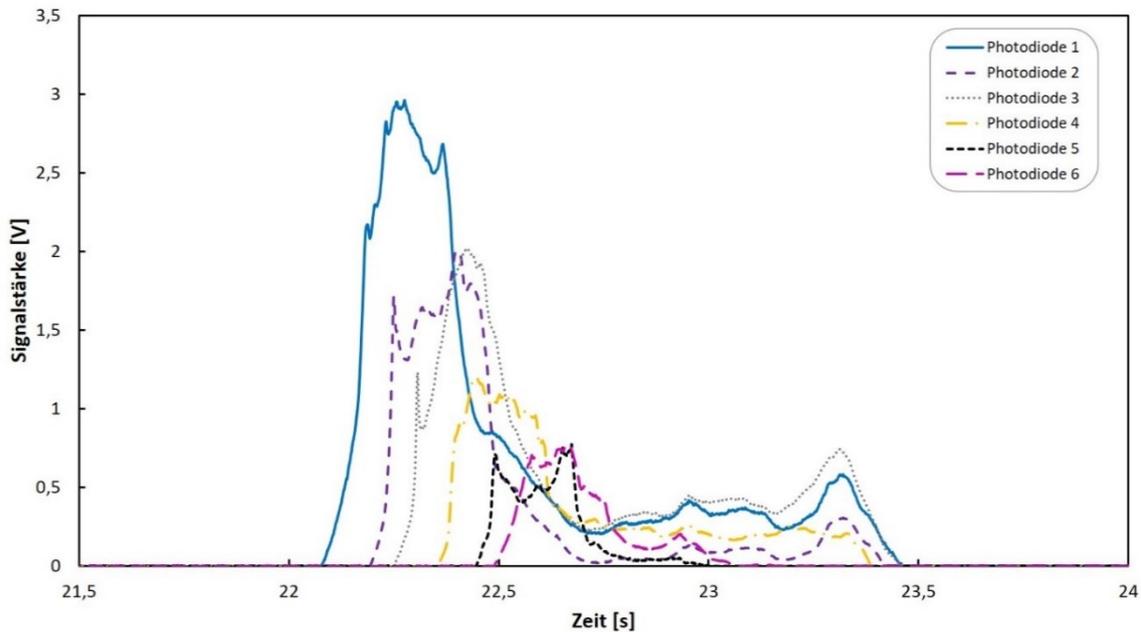


Abbildung 68: Auswertung der Messsignale an sechs Messstellen

3.2.4 Temperaturmessung

Die Messung der Flammentemperatur erfolgte durch Thermoelemente. Für die Auswahl dieser mussten folgende Überlegungen bezüglich Einflussfaktoren der Messqualität gemacht werden. Einerseits führt die höhere Masse durch eine Schutzhülle um das Thermoelement zu einer Steigerung der absoluten Wärmekapazität c_p und damit zu einer höheren Wärmemenge, die aus der Umgebung dem Thermoelement zugeführt werden muss, um dieses aufzuheizen oder abzukühlen. Andererseits stellt sich während dem Aufheizen oder Abkühlen ein Temperaturgradient von der Außenhülle zum Messpunkt des Thermoelements ein. Beide Aspekte führen zu einer verlängerten Zeitspanne, bis das Thermoelement mit der Umgebung im Gleichgewicht ist und die korrekte Temperatur anzeigen kann. Einen weiteren Einflussfaktor stellt der Durchmesser der verwendeten Thermodrähte dar. Je größer dieser gewählt wird, desto größer ist der Durchmesser der Verbindungsstelle (Schweißperle zwischen den beiden Thermodrähten), deren Temperatur als Ausgangssignal erfasst wird. Die mit steigendem Durchmesser erhöhte thermische Trägheit führt zu einem längeren Ansprechverhalten des Sensors.

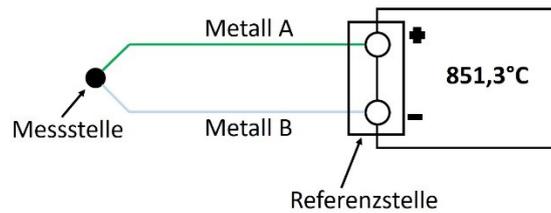


Abbildung 69: Schematischer Aufbau eines Thermoelements

Müssen hohe Temperaturgradienten, wie bei der Messung der Temperaturverläufe von Deflagrationen, erfasst werden, sollten primär Thermoelemente mit dünnen Drahtdurchmessern verwendet werden. Solange der Sensor mit der Umgebung nicht im Gleichgewicht steht, entspricht der angezeigte Messwert nicht dem der Umgebung. Der Effekt der instationären Wärmeleitung muss berücksichtigt werden und die tatsächliche Umgebungstemperatur rechnerisch ermittelt werden. [101]

$$\bar{T} = e^{-Fo \cdot Bi} \quad (4-4)$$

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_S - T_{\infty}} = e^{\frac{-\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \cdot \frac{t}{d^2}} \quad (4-5)$$

Wie in Glg. 4-5 ersichtlich ist, kann der Temperaturgradient in der Schweißperle aufgrund des geringen Durchmessers und daraus folgender kleiner Biot Zahl vernachlässigt werden.

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_S - T_{\infty}} = e^{\frac{-\alpha}{d \cdot c_p \cdot \rho} \cdot t} \quad (4-6)$$

In der Konstante C (Glg 4.-7) werden der Wärmeübergangskoeffizient und Stoffparameter der Schweißperle zusammengefasst.

$$C = \frac{-\alpha}{d \cdot c_p \cdot \rho} \quad (4-7)$$

$$T(t) = T_{\infty}(1 - e^{-C \cdot t}) - T_S \cdot e^{-C \cdot t} \quad (4-8)$$

$$T_S \cdot e^{-C \cdot t} \ll T_{\infty}(1 - e^{-C \cdot t}) \rightarrow T_S \cdot e^{-C \cdot t} = 0 \quad (4-9)$$

$$T_{\infty} = \frac{T(t)}{1 - e^{-C \cdot t}} \quad (4-10)$$

Der Durchmesser der Schweißperle steht, wie in Glg. 4-7 ersichtlich, im Nenner der Konstante C. Somit wird C bei gleichem Wärmeübergangskoeffizient und kleinerem Durchmesser größer und der Term $e^{-C \cdot t} \rightarrow 0$ wenn $d \rightarrow 0$ und daraus folgt:

$$T_{\infty} = T(t) \quad (4-11)$$

Aus diesen Überlegungen wird ersichtlich, dass der Einfluss der instationären Wärmeleitung bei Verwendung sehr kleiner Drahtdurchmesser und beim Verzicht auf zusätzliche

Schutzhüllen (bspw. Mantelthermoelemente) vernachlässigbar wird. Für die durchgeführten Versuchsserien wurden Thermoelementdrähte Typ-K (NiCr-Ni) mit einem Drahtdurchmesser von 80 µm verwendet, welche mit einer sehr kleinen Schweißperle (0,26 mm) verbunden und diese direkt im Versuchsraum platziert wurden. Die Abtastrate der Messung wurde mit 100 Hz gewählt.

3.3 Versuchsstaub

Als brennbarer Staub wurde bei den durchgeführten Versuchsserien einerseits Lycopodium, ein Naturstoff mit hoher Reaktionsheftigkeit [48], andererseits Maisstärke, ein Naturstoff mit mittlerer Reaktionsheftigkeit [48], verwendet. Grund hierfür liegt in den theoretischen Überlegungen zum Einfluss der Materialparameter (Art des Staubes, vgl. hierzu Kap. 2.2). Die gleichmäßige Erscheinungsform sowie das schlagartige Abbrennen der Partikeln und das gleichmäßige Reaktionsverhalten der Verbrennung sollte die Möglichkeit bieten reproduzierbare Versuchsserien zu gestalten und die Flammenausbreitung untersuchen zu können.

Lycopodium, die Sporen des Bärlappgewächses, ist in der Staubexplosionsforschung ein viel verwendetes organisches Material für Versuche aufgrund seiner nahezu monodispersen Erscheinungsform und seiner natürlich auftretenden einheitlichen Korngröße von ca. 30 µm. Die Lycopodium-Sporen zeigen eine netzartige Struktur aus Lignin, in welche Ölsäure eingebaut ist und daher die Partikeln schlagartig abbrennen [130] (50 % Fettöl, 2 % Saccharose, 24 % Sporopollenin [131]). Zu Lycopodium selbst zählen unzählige Unterarten (ca. 200 [130]), welche sich in ihrer Erscheinungsform geringfügig differenzieren. Die in der Staubexplosionsforschung viel verwendete Unterart ist das mit geringer Korngröße und sehr geringem Gewicht bekannte *Lycopodium clavatum*, welches ebenfalls in den Versuchsserien genutzt wurde. Die sicherheitstechnische Charakterisierung nach EN ISO 80079-20-2 [1] führte zu folgenden Ergebnissen. Der maximalen Explosionsüberdruck p_{\max} konnte in der 20-Liter-Siwiek Kugel mit einem Wert von 6,4 bar \pm 10 % und einem maximalen zeitlichen Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$ von 442 bar/s \pm 12 % bestimmt werden, und führt somit zu einer Einordnung nach K_{ST} gleich 120 bar m/s \pm 12 % in die Staubklasse St 1. Die Bestimmung der Mindestzündenergie in der MIKE 3-Apparatur ergab eine statistische MZE von 13 mJ bei einer Feuchte von 2,37 %. Eine genauere Charakterisierung kann Anhang A entnommen werden. Die Ergebnisse der Korngrößenverteilungsanalyse sind in Abbildung 70 ersichtlich und geben einen Medianwert von 44 µm an. Die stöchiometrische Konzentration von Lycopodium in Luft beträgt je nach Zusammensetzung 114 g/m³ [130] / 113 g/m³ [13], bzw. 120 g/m³ bei einer

Berechnung von reiner Asche (1,1 wt%) und Wasser (3,3 bis 3,7 wt%) [130]. Die Verbrennungsreaktion von *Lycopodium clavatum* kann entsprechend der durchgeführten Elementaranalyse für die stöchiometrisch ablaufende Reaktion folgend angegeben werden

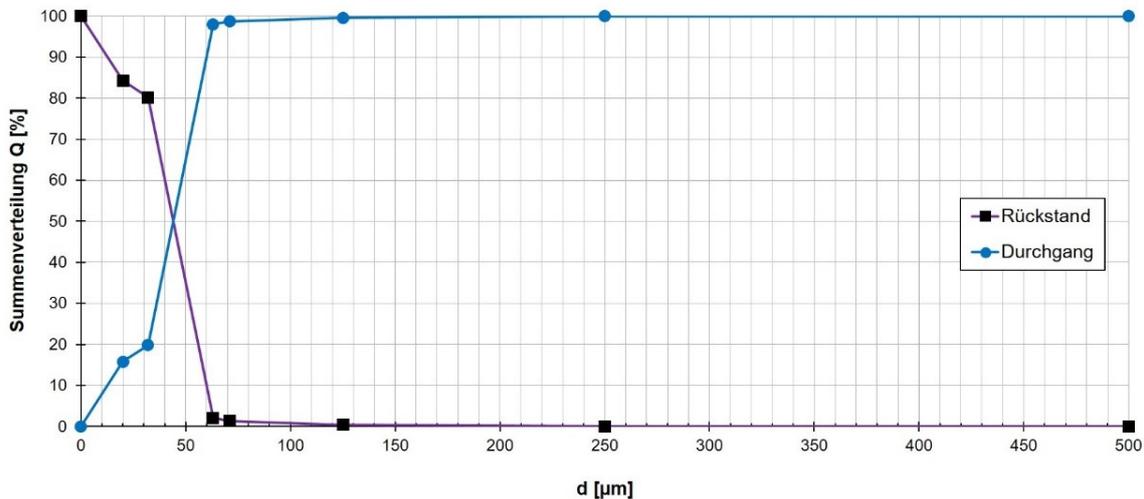
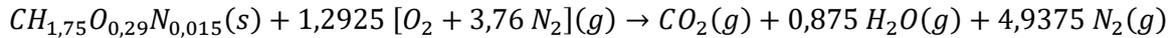


Abbildung 70: Korngrößenanalyse des für die durchgeführten Versuche verwendeten Materials *Lycopodium clavatum*

Maisstärke ist ein Reinstoff, der Reaktionsmechanismus kann daher gut beschrieben werden. Das pflanzliche Polysaccharid Stärke ist aus Glucoseeinheiten aufgebaut und kann durch die Bruttoformel $(C_6H_{10}O_5)_n$ beschrieben werden. Hauptbestandteil sind die linear aufgebaute Amylose (15 bis 20 %) und das verzweigte Amylopektin (75 bis 85 %). [132]

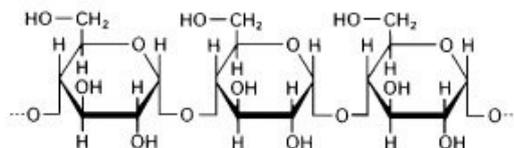


Abbildung 71: Ausschnitt chemische Struktur von Stärke-Molekülketten [132]

Die Verbrennungsreaktion der Stärke läuft über die sogenannte Maillard-Reaktion ab, unter welcher die Umsetzung von reduzierenden Zuckern mit Aminosäuren, Peptiden oder Proteinen verstanden wird. Bei der in zwei Phasen ablaufenden Reaktion entsteht zu Beginn aus den Kohlenhydraten reaktive, polyfunktionelle Zwischenstufen, bei denen es sich um Hydroxylgruppen tragenden Di- und Tricarbonylverbindungen handelt. [133] Die zweite Phase der Reaktion beinhaltet verschiedene weiterführende Prozesse, wie den Strecker-Abbau, Folgereaktionen und die Melanoidin-Bildung. Letztere treten als schwarzbraune Pigmente

auf. [133] Maisstärke wird unter Zusatz von chemischen Mitteln (2,5 % schwefelige Säure) aus Mais gewonnen [132] und ist ein weißes hygroskopisches Pulver. Die stöchiometrische Konzentration von Maisstärke in Luft beträgt 236 g/m^3 . [22] Da Maisstärke zu Agglomeration neigt, musste die für die Versuche verwendete Stärke oberflächenbehandelt werden. Die Staubproben bestanden somit aus chemischer Quervernetzung von Maisstärke mit einem sehr geringen Anteil (kleiner 2 % in TM) von Magnesiumoxid als Fließmittel. Die sicherheitstechnische Charakterisierung des Materials nach EN ISO 80079-20-2 [1] führte in der 20-Liter-Siwex Kugel zu einem maximalen Explosionsüberdruck p_{\max} von $5,9 \text{ bar} \pm 10 \%$ und einem maximalen zeitlichen Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$ von $322 \text{ bar/s} \pm 20 \%$, somit zu einer Einordnung nach K_{ST} gleich $87 \text{ bar m/s} \pm 20 \%$ in die Staubklasse St 1. Die Bestimmung der Mindestzündenergie in der MIKE 3-Apparatur ergab eine statistische MZE von 38 mJ bei einer Feuchte von $8,46 \%$. Die Mindestzündtemperatur nach Normprüfung im Godbert-Greenwald-Ofen lieferte einen Wert von $380 \text{ }^\circ\text{C}$. Die genauen Ergebnisse laut Prüfprotokollen können Anhang B entnommen werden, sowie weitere weiterführende Beschreibungen. Die Ergebnisse der Korngrößenverteilungsanalyse sind in Abbildung 72 ersichtlich und geben einen Medianwert von $42,1 \text{ } \mu\text{m}$ an. Die Verbrennungsreaktion von Stärke kann entsprechend der durchgeführten Elementaranalyse wie folgt angegeben werden.

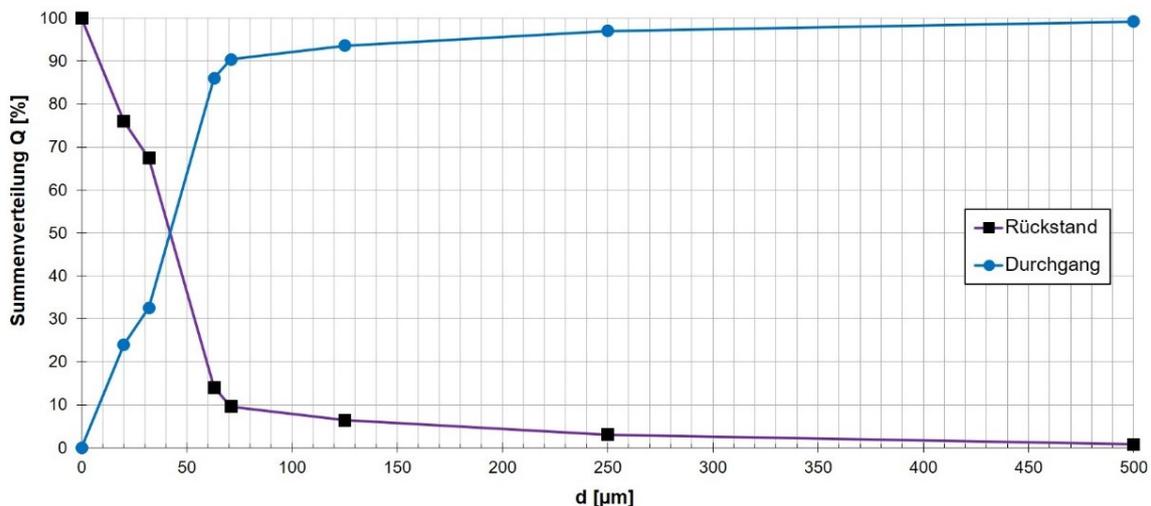
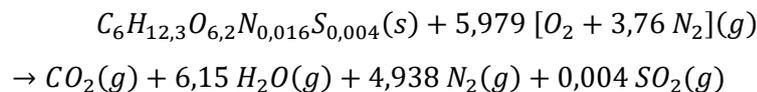


Abbildung 72: Korngrößenanalyse der für die durchgeführten Versuche verwendeten Maisstärke

Da der Einfluss von Inertpartikeln auf die Flammenausbreitung im Zuge der Arbeit untersucht wurde, wurde eine weitere Lycopodium-Art verwendet, welche eine höhere Dichte aufweist. Durch die Auswahl des Staubeintrages sollte das Sinkverhalten der Partikel ähnlich

sein, die verwendeten Inertpartikeln sind jedoch signifikant schwerer im Vergleich zu *Lycopodium clavatum*. Darum wurde eine Lycopodium-Mischung angewendet, welche zu hohem Anteil aus *Lycopodium casuarinoides* besteht. Die sicherheitstechnischen Kenngrößen nach EN ISO 80079-20-2 [1] sind dem Anhang zu entnehmen und zeigen eine Mindestzündenergie von 37 mJ bei einer Feuchte von 4,61 %. Der maximale Explosionsüberdruck p_{\max} konnte in der 20-Liter-Siwiek Kugel mit einem Wert von 6,0 bar \pm 10 % und einem maximalen zeitlichen Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$ von 244 bar/s \pm 20 % ermittelt werden, und führt somit zu einer Einordnung nach K_{ST} gleich 66 bar m/s \pm 20 % in die Staubklasse St 1.

Als Inertstaub wurde für die Versuchsserien ein Gesteinsmehl verwendet, welches aus 95,3 % Klinoptilolith, und geringen natürlichen Beimengungen von Montmorillonit und Feldspat, besteht. Das kristalline Mineral Klinoptilolith gehört zu den Vulkangesteinen und ist durch seine dreidimensionale Struktur aus Siliziumverbindungen ($[\text{SiO}_4]^{4-}$) und Aluminiumverbindungen ($[\text{AlO}_4]^{5-}$) charakterisiert (Gerüstsilikat). [134] In der chemischen Industrie wird auf dieses Mineral in einigen Spezialanwendungen, wie Ionentauscher, katalytische Verfahren und Adsorptionsmethoden zurückgegriffen, da die spezifische Oberfläche durch natürlich gebildete Poren sehr hoch ist. [134] Die Porosität des in den Versuchsserien verwendeten Klinoptilolith liegt bei 44 %, also um ein Vielfaches höher als bei im Allgemein verwendeten Löschpulvern [135], und zeigt einen effektiven Porendurchmesser von 0,4 nm [136]. Bis zu einer Temperatur von 450 °C ist eine thermische Stabilität des Minerals gewährleistet [136].

3.4 Messaufbau

Für die Untersuchung der Flammenausbreitung nach der Zündung eines Staub/Luft-Gemisches in einer Großapparatur unter niedrigen Turbulenzbedingungen wurde ein Versuchsaufbau in einer Rohrapparatur mit geschlossenem unterem Ende gewählt. Die Zündung erfolgte 460 mm über dem Boden, mittig im Querschnitt, die Flammenfront breitete sich auf Grund des gewählten Aufbaues von unten nach oben hin aus. Durch die gewählte Höhe des Zündortes blieb die Zündquelle von Aufwirbelungen des Staubes durch Wandeffekte und Strömungsbedingungen im unteren Bereich unbeeinflusst. Um neben Bildsequenzen der Flammenausbreitung auch weitere Parameter zu erhalten wurde die Flammengeschwindigkeit photooptisch erfasst. Durch die Positionierung der Sensoren 360 mm bis 1.560 mm (vier Messpunkte) über der Zündung konnte die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Flamme durch den Versuchsraum bei homogener Staubverteilung ermittelt werden. Eine Beeinflussung der

Strömungsbedingungen durch die Messsensoren konnte durch die Anbringung im Rohrmantel verhindert werden. Das obere Ende des Versuchsrohres wurde mit einem Deckel mit sehr geringen Widerstand, da ausbalanciert und mit Gegengewicht versehen, ausgeführt. Hierdurch konnte einerseits die Verbrennungsreaktion drucklos ablaufen, andererseits wurden so entstehende Turbulenzen vor der Flammenfront durch reflektierte Druckwellen gering gehalten. Somit konnten Beeinflussungen durch von oben eintretende Strömungen oder durch Umgebungswind udg. verhindert werden. Für die Dokumentation des Flammenbildes wurden Videosysteme einerseits um den Zündort, andererseits 1.160 mm über dem Zündort positioniert.

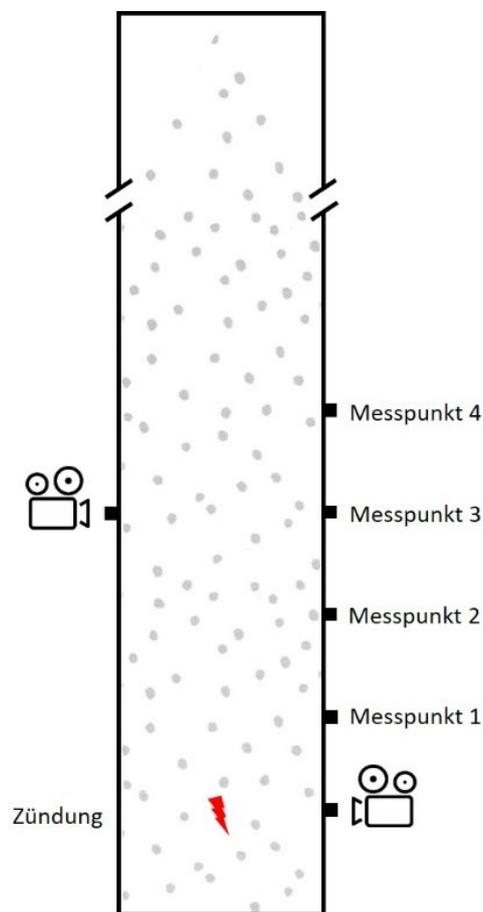


Abbildung 73: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues mit der Positionierung der vier Messsensoren im Rohrmantel

Die Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch wird durch Wandeinflüsse beeinflusst, welche die Turbulenzbedingungen im Gemisch verändern. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Versuchsaufbau realisiert, in welchem die Flammengeschwindigkeit durch mehrere Messsensoren in der Nähe des Zündortes bestimmt wurde. Die Zündung erfolgte übereinstimmend mit dem ersten Aufbau 460 mm über dem Boden. Die sechs Messpunkte

wurden ab 240 mm über die Zündung in einem Abstand von 80 mm mit einer Entfernung von 300 mm von der Rohrwand positioniert. Die Anbringung der Messsensoren ist in Abbildung 74 zu sehen. Der Einfluss des Messaufbaues konnte durch die geringe Bauteilgröße (3 mm Querschnitt pro Messpunkt) niedrig gehalten werden. Durch die versetzte Anordnung wurde die Verteilung des Staubes im Versuchsraum um die Messpunkte wenig verändert. Mit Hilfe dieser Anordnung lassen sich vergleichende Schlüsse bezüglich der Bestimmung der Flammenausbreitung in einer kleinen Rohrapparatur (vgl. Kap. 3.1) und einer Großapparatur ziehen. Die Messung der Flammengeschwindigkeit in der Laborapparatur (vgl. Kap. 3.1) erfolgt im Querschnitt 75 mm vom Zündort entfernt, allerdings direkt an der Wand. Einen ähnlichen Abstand im Querschnitt zur Zündung (105 mm) lieferte der zweite Versuchsaufbau in der Großapparatur.

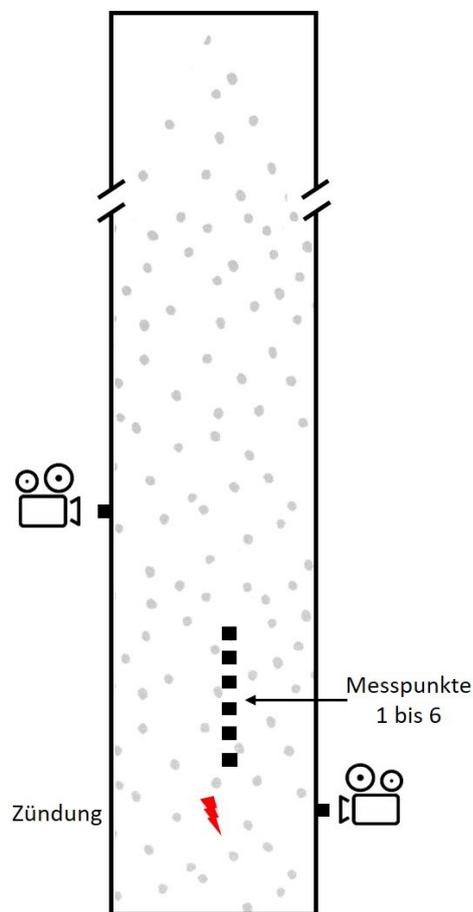


Abbildung 74: Schematische Darstellung des zweiten Versuchsaufbaues und der Positionierung der sechs Sensoren für die Ermittlung der Flammengeschwindigkeit

In Abbildung 75 ist ein Bild der Messsensoren-Anbringung im Versuchsrohr zu sehen. Es wurde von unten aufgenommen und zeigt die Messpunkte eins bis sechs von unten nach oben.

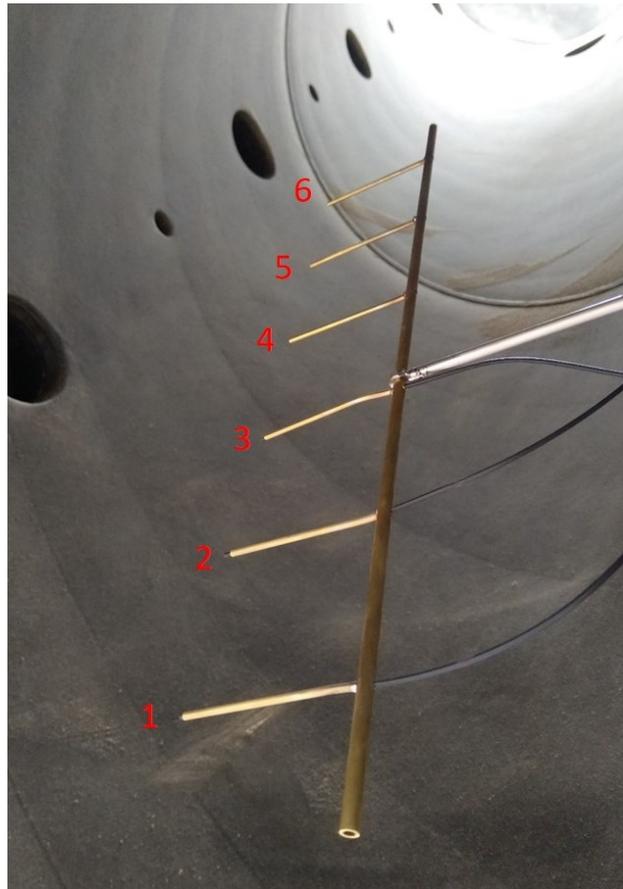


Abbildung 75: Halterung der Messsensoren für den zweiten Messaufbau mit sechs Messpunkten

4 Ergebnisse

Aufbauend auf der Erarbeitung der Einflussparameter (vgl. Kap. 2.2) wurden die Versuche in der entwickelten Versuchsanordnung durchgeführt. Die Basis bildeten die beiden zuvor beschriebenen Versuchsanordnungen, bei welchen die Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch unter geringen turbulenten Bedingungen erfasst werden konnte. Die für die Versuchsserien verwendeten Staubproben wurden konditioniert und weisen folgendgehend konstante Charakteristika auf. Die Durchführung der Versuche erfolgte unter Freiluftbedingungen (950 m Seehöhe), Schwankungen der Temperatur sowie der Luftfeuchte konnten aus diesem Grund nicht verhindert werden, jedoch ist die Schwankungsbreite relativ gering und vergleichbare Umgebungsbedingungen konnten erreicht werden. Insgesamt wurden rund 100 Versuche mit Lycopodium bzw. Maisstärke als Versuchsstaub durchgeführt, 49 waren für die weitere Untersuchung verwertbar. Der Staubeintrag von oben war für die Dauer von 18 Sekunden aktiv, um genügend lange über den Zeitraum der Flammenfortpflanzung Staub in den Versuchsraum fördern zu können. Der Zündfunke wurde nach einer Zündverzögerungszeit ab Start Staubeintrag von 15 Sekunden über einen Zeitraum von 4.000 ms aktiviert, somit konnte eine sichere Zündung gewährleistet werden. Die Beobachtungen sowie die Messergebnisse sind nachfolgend beschrieben.

4.1 Flammenausbreitung in einem Lycopodium/Luft-Gemisch

Mit *Lycopodium clavatum* als Versuchsstaub wurden insgesamt 30 Versuche durchgeführt. Der Staubeintrag von oben lief für die Dauer von 18 Sekunden, der Zündfunke wurde nach einer Zündverzögerungszeit ab Start Staubeintrag gemäß vorhin beschriebener Versuchsstandardisierung aktiviert. Im Gegensatz zur EN ISO 80079-20-2 [1] wird in der vorliegenden Arbeit erst von einer Zündung gesprochen, wenn sich die Flamme selbstständig fortpflanzt und sich im gesamten Versuchsraum entwickelt. Eine Entzündung durch den Funken mit einer Flammenfortpflanzung über eine geringe Distanz mit anschließender

Auslöschung wird als Nicht-Zündung gewertet, da unter diesen Voraussetzungen die Flammenausbreitung nicht studierbar wäre. Die Versuche wurden bei einer Temperatur von 19 °C bei einer Luftfeucht von 67 % r.F. (Echthaarhygrometer) verwirklicht. Die Konzentration des Staubes in der Luft wurde in einer Höhe von 820 mm über dem Boden bestimmt. In Tabelle 6 ist eine Aufstellung der durchgeführten Versuche ersichtlich.

Tabelle 6: Aufstellung der durchgeführten Versuche mit *Lycopodium clavatum*

Staubeintrag [g/s*Rührer]	Zündung	Nicht- Zündung
0,4	0	2
0,5	5	3
0,55	2	2
0,6	1	3
1	3	1
1,2	8	0
1,5	1	0

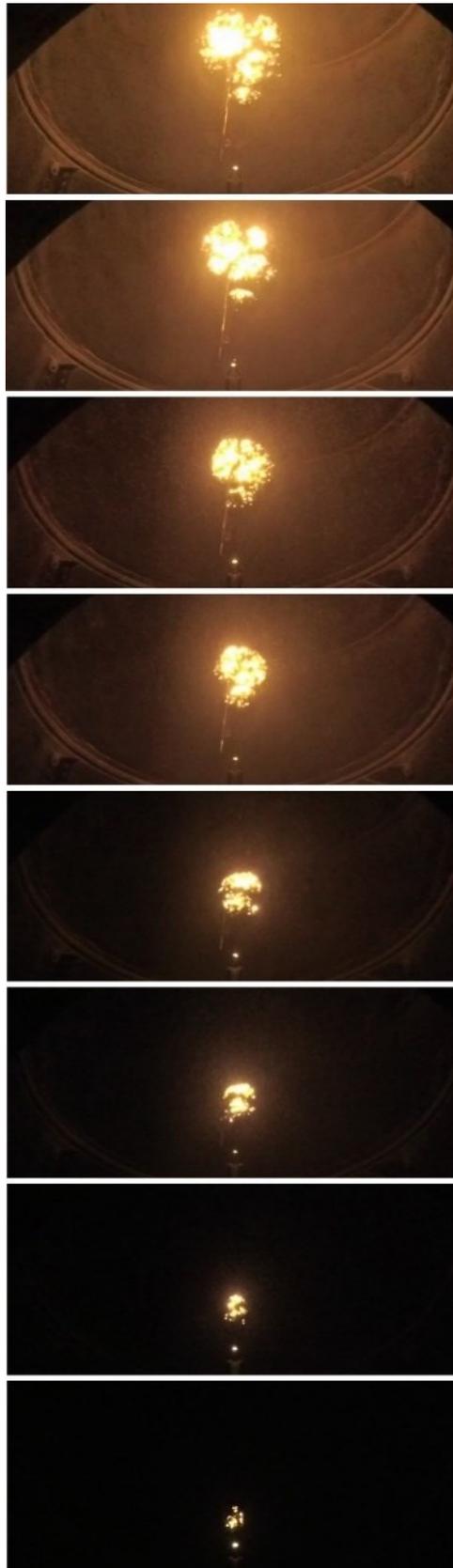


Abbildung 76: Bildserie der Zündung eines Lycopodium/Luft-Gemisches
(Förderrate: 0,5 g/s*Rührer)

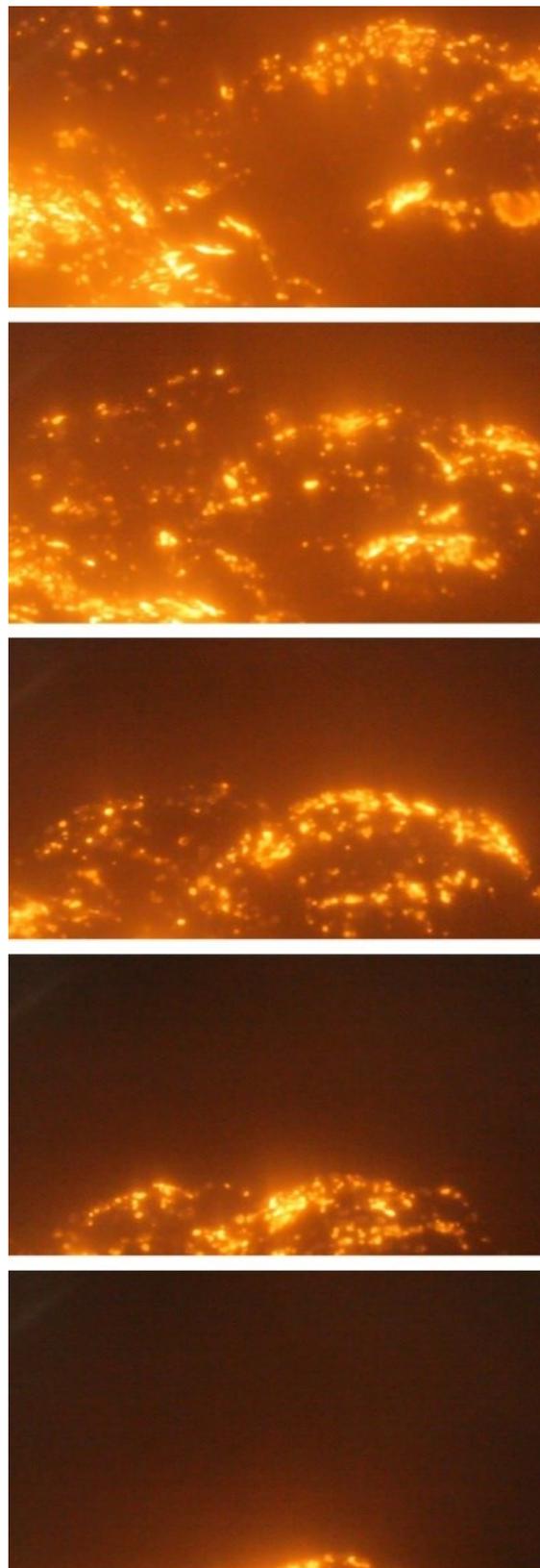


Abbildung 77: Bildserie der Flammenfront in einem Lycopodium/Luft-Gemisch in einer Höhe von 1.160 mm über der Zündung (Förderrate: 0,5 g/s*Rührer)

Eine Fotostrecke einer typischen Flammenausbreitung nach der Zündung des Lycopodium/Luft-Gemisches ist in Abbildung 76 ersichtlich. Eine Bildserie in Höhe von 1.160 mm über der Zündung ist Abbildung 77 zu entnehmen. Durch den Zündfunken bildet sich ein Hot Spot, welcher durch die helle Färbung gut ersichtlich ist und das Gemisch entzündet. Die Verbrennungsreaktion kann sich durch die eingebrachte Energie selbstständig fortpflanzen, eine Flammenfront entsteht. Durch die Ausdehnung der Gasphase durch die Temperaturerhöhung und durch den Auftrieb bedingt breitet sich die Flamme langsam nach oben hin aus. Die Flamme weist eine parabolische Geometrie auf. Die Flammenausbreitung erfolgt einerseits nach oben, andererseits wächst die Flamme auch etwas entlang ihres Querschnittes; das Wachstum ist stets regelmäßig. Die Flamme erfährt wenig Beschleunigung, wodurch auf eine geringe Turbulenz im Versuchsraum geschlossen werden könnte. Reflexionen vom Boden scheinen nicht auf die Flamme zu wirken, einerseits da eine Beschleunigung der Flammenfront optisch nicht erkennbar ist, andererseits lässt das Geometrieverhältnis Versuchsraum zu Flamme wenig Annahmen bezüglich Druckwellenreflexionen zu. Eine Änderung der Flammenform wie in [96] beschrieben kann daher nicht beobachtet werden. Die Flammenfront ist über die erste Zeit geschlossen. Entlang der Ausbreitungsrichtung beginnen sich nach und nach Unregelmäßigkeiten auszubilden, die Flammenfront beginnt allmählich aufzubrechen und regelmäßige Flammenzellen bilden sich. Diese Zellen besitzen wiederum eine ähnliche Flammen-Geometrie. Dieser Verbund breitet sich weiter entlang der Ausbreitungsrichtung aus. Die Flamme bricht weiterhin immer wieder in Zellen auf und nimmt immer mehr Raum ein. Die Ausbreitung ist, vom Auftrieb und der Ausbreitung der Gasphase getrieben, nach oben aber auch im Querschnitt. Nach unten zu den noch unverbrannten Teilen erfolgt keine Flammenfortpflanzung. Die starke Auftriebswirkung ist anhand der Partikelbewegung unter der Flamme gut erkennbar. Die Flamme bewegt sich durch die heißen Gase nach oben, hinter der Flamme findet eine Abkühlung statt, wodurch das Gemisch hin zu diesem Bereich strömt. Durch den entstehenden Sog der Flamme werden unter der Zündung Staubpartikel vom Boden weg nach oben Richtung Flamme gezogen. Diese Partikelbewegung hat einen gleichmäßigen Charakter.

Wandeffekte können zu diesem Zeitpunkt noch vernachlässigt werden bzw. haben wenig Einfluss auf die Flammenausbreitung, da sich die Flamme gleichmäßig entlang des Zentrums des Versuchsraumes ausbreitet und nicht Richtung Wand tendiert. Die Flamme nimmt ein Drittel des Rohrquerschnittes ein. Durch das fortwährende Aufbrechen der Flamme entstehen immer mehr gleichmäßige Zellen bis die gesamte Flammenfront aus großteils einheitlichen Zellen besteht und sich nach oben hin harmonisch ausbreitet. Entgegen den Annahmen aus Vorversuchen in einer kleineren Rohrapparatur (vgl. Abbildung 79) breitet sich die Flamme nicht sofort Richtung Wand aus, sondern breitet sich durch den Auftrieb stärker in der

Rohrmitte nach oben hin aus. In einer Höhe von 1.160 mm über dem Zündort ist eine regelmäßige Flammenfront, bestehend aus kleinen Flammenzellen, erkennbar, welche sich gleichmäßig über den gesamten Rohrquerschnitt nach oben hin ausbreitet (siehe Abbildung 78). Diese Beobachtungen decken sich mit der Beschreibung des Flammenfortpflanzungsmechanismus in einer Lycopodium-Wolke nach Han et al. [20]. Die Staubwolke wird dabei von den Autoren als Mischung von Einzelpartikel und Agglomeraten beschrieben, welche als Flammen-Spots in einer unabhängigen Flamme abbrennen. Eine einhüllende Front, welche Einzelpartikel und Partikelagglomerate beinhaltet, bildet die Grenze der parabolisch geformten Flamme. Dies konnte in den durchgeführten Versuchen bestätigt werden (vgl. Abbildung 78). Die Partikelagglomerate pyrolysieren, in der Gasphase beginnt die Verbrennung. Die Leuchtkraft der Flamme stützt sich vor allem auf das Glühen des unverbrannten Kohlenstoffgerüsts. Verbrennen die Agglomerate, bilden sich so leuchtende Spots in der Flamme. Dies könnte durch den nicht vollständigen Abbrand der Ligninstruktur der Lycopodium-Partikeln erklärt werden. Der sichtbare Rückstand verbrannter Partikeln am Boden der Apparatur nach jedem Versuch könnte diese Vermutung stützen, sowie Ergebnisse in der Literatur [30]. Die unterschiedliche Größe der Agglomerate könnte eine Erklärung für die verschiedenen großen Spots in der Flamme sein.

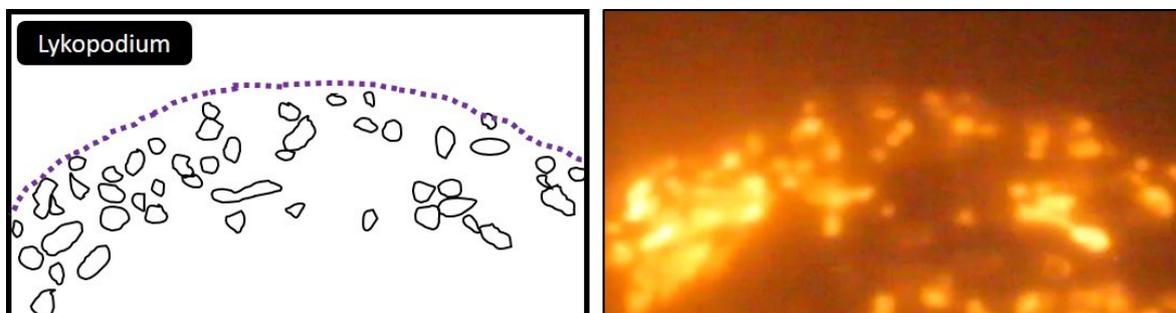


Abbildung 78: Zellen in der Flammenfront (rechtes Bild) mit nachgezeichneter Kontur (linkes Bild)

Die Flamme scheint bei der Ausbreitung wenig Beschleunigung zu erfahren. Turbulenzeffekte udg. scheinen auf Grund dieser Beobachtungen weiterhin gering zu sein. Auftretende Wandeffekte scheinen ebenfalls einen geringen Einfluss auf die Flammenfortpflanzung zu nehmen, da sich die Flamme entlang großer Wegstrecken gleichmäßig ausbreitet. Im Vergleich zu Untersuchungen in einer kleinen Rohrapparatur (Beschreibung dieser ist Kap. 3.1 zu entnehmen) erfährt die Flammenfortpflanzung einen geringeren Geschwindigkeitszuwachs über die Rohrlänge. Die durch Vorversuche in der kleineren Rohrapparatur getroffenen Annahmen über die schnelle horizontale Ausbreitung der Flamme und damit verbundenen benötigten großen Querschnitt konnte bei den Großversuchen nicht bestätigt werden. Durch den geringeren Einfluss der Wandeffekte kann

sich die Flamme langsam nach oben hin ausbreiten. Einfluss auf die Ausbreitung nimmt einerseits die Ausdehnung der Gasphase durch die Temperaturerhöhung aufgrund der Verbrennung. Andererseits ist die Fortpflanzungsrichtung der Flamme Auftrieb-getrieben. Bei einem Rohr mit geringem Querschnitt (140 mm) wirken Wandeffekte stärker auf die Flamme ein, sobald diese die Rohrwand erreicht hat. Die Flamme beschleunigt dadurch entlang der Rohrachse nach oben hin. Dies konnte auch Krause [48] bei seinen Studien in einer Rohrapparatur beobachten. Die Verbrennungszone wirkt stärker zusammengeschoben und Nachverbrennungen sind in der kleinen Apparatur schwerer abzugrenzen. Hierzu sei auf Abbildung 79 verwiesen, in welcher die Flammenausbreitung in einem Lycopodium/Luft-Gemisch in einer kleineren Rohrapparatur (siehe Kap. 3.1) optisch erfasst wurde. Eine solche Beschleunigung konnte zwar in der Großapparatur zum Ende hin ebenfalls beobachtet werden, da aber die Zeitdauer bis zum Erreichen der Rohrwand der Flamme deutlich länger ist, konnte über einen längeren Zeitraum die Flammenfortpflanzung ungestört beobachtet werden.



Abbildung 79: Bildserie der Flammenausbreitung in einem Lycopodium/Luft-Gemisch in einer kleinen Rohrapparatur (140 mm Querschnitt)

Durch die langsame Ausbreitung der Flamme Richtung Rohrwand hin liefert der erste Versuchsaufbau zwar Messergebnisse, da die Flamme aber die Rohrwand zum Messzeitpunkt noch nicht erreicht hat wurde der gewählte zweite Messaufbau zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit die Methode der Wahl. Aufgrund der entsprechenden Struktur der Flamme konnte im zweiten Messaufbau die Flammenspitze erfasst werden. Im Gegensatz hierzu liefert der erste Messaufbau durch den auftretenden *flame stretch* [100] leicht verzerrte Messsignale. Die Messung der Flammentemperatur konnte mit dem gewählten Messaufbau nicht realisiert werden. Da die Messsensoren nicht direkt in die Flammenfront eingebracht waren, sondern stattdessen an der Rohrwand platziert waren, um so wenig Turbulenzen wie möglich zu erzeugen, lieferten diese keine Messwerte zur Flammentemperatur. Die nicht zufriedenstellende Positionierung der Thermoelemente war neben Überlegungen zu

Turbulenzzeugung aus Vorversuchen in einer kleinen Rohrapparatur geschuldet. Aus diesen war von einem schnelleren Flammenwachstum im Querschnitt auszugehen. Bei einem Abgleich der durchgeführten Versuche mit Glühfarben kann ein Temperaturbereich zwischen 950 °C (Hellrotglut) [137] und 1.200 °C (1.300 °C – beginnende Weißglut [137]) erkannt werden. Dieser Bereich deckt sich mit den Literaturwerten und lässt so eine Schätzung der Flammentemperatur zu. Dabei sei jedoch erwähnt, dass bei den Experimenten jedoch kein Weißabgleich stattfand. In Abbildung 80 sind Literaturwerte für die Flammentemperatur in einem Lycopodium/Luft-Gemisch ersichtlich.

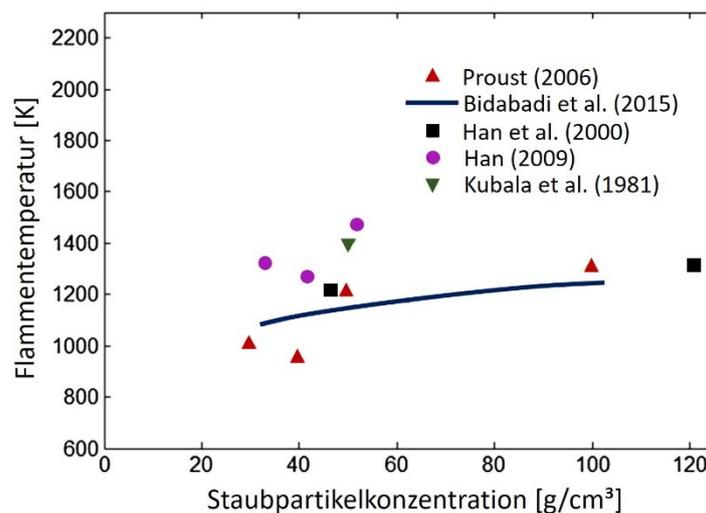


Abbildung 80: Flammentemperatur von Lycopodium/Luft-Gemische [138]

Eine Gegenüberstellung von aufgenommenen Bildern zu den angebrachten Messsensoren in der Rohrapparatur (Aufbau 2 mit innenliegenden Messpunkten) ist in Abbildung 81 für einen durchgeführten Versuch (*Lycopodium clavatum*) ersichtlich. Die Sensoren liegen 300 mm von der Rohrwand entfernt. Ab 240 mm über der Zündung sind sie in einem Abstand von 80 mm vorzufinden. Die Nummerierung der Photodioden erfolgt von unten (Zündung) nach oben. In den Bildern ist die Sensorhalterung eingezeichnet (rot).

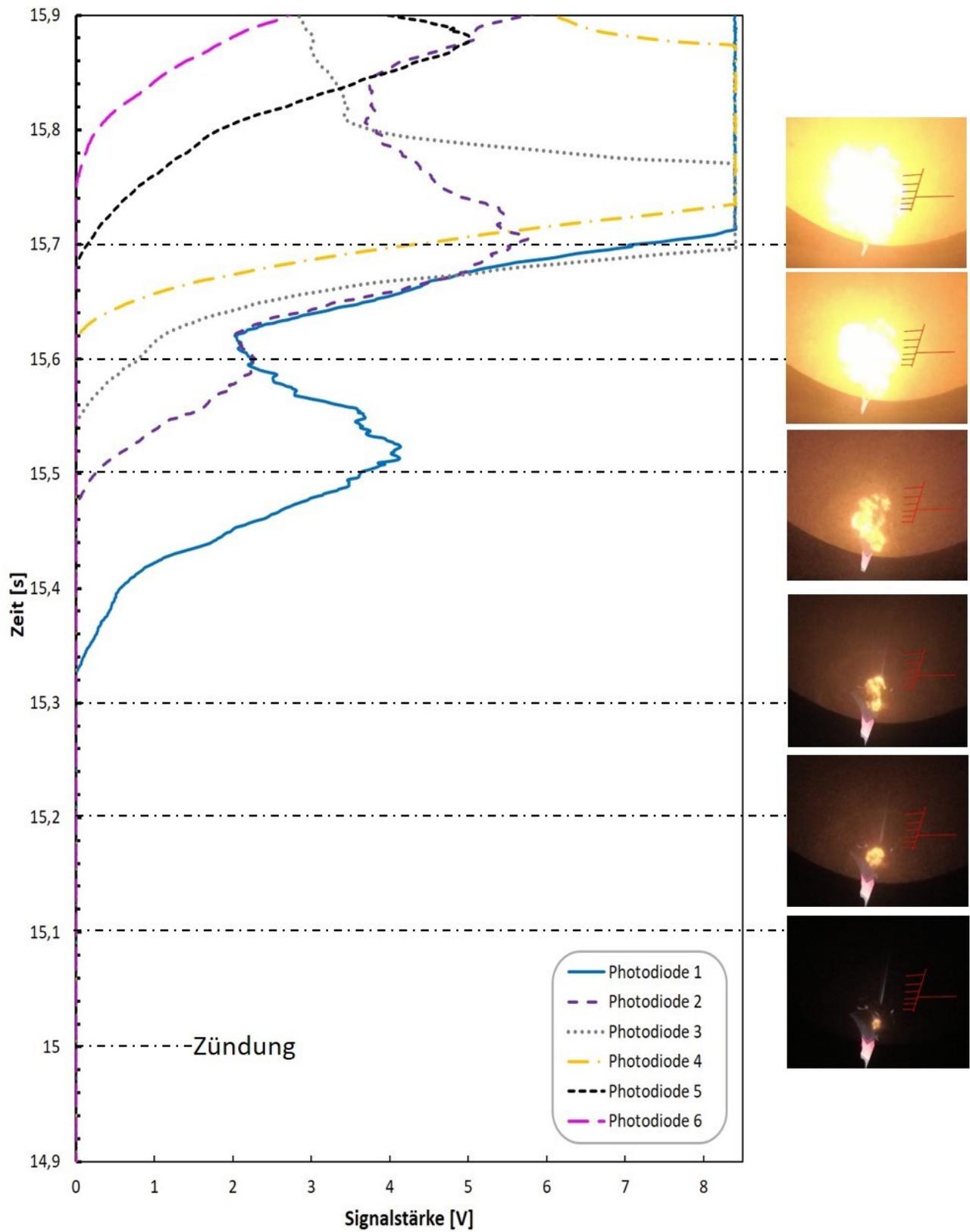


Abbildung 81: Gegenüberstellung optische Erfassung der Flamme und Ansprechverlauf der Messsensoren eines durchgeführten Versuches (*Lycopodium clavatum*, Förderrate: 1,2 g/s*Rührer)

Nach einer Staubeintragsdauer von 15 Sekunden erfolgt durch die Aktivierung der Zündung eine zeitnahe Entzündung des Gemisches. Die dem Diagramm in Abbildung 81 zugefügte Bildserie wurde, vom Schauglas in einer Höhe von 1.160 mm über dem Zündort nach unten zur Zündung hin gerichtet, mit einer Bildrate von 240 fps aufgenommen. Zu Beginn bildet sich ein Spot aus, die Flamme entsteht und ist leicht nach links abgelenkt. Sie steigt langsam nach oben hin auf. Von oben betrachtet kann die anfängliche Ablenkung der Flamme nur schwer erkannt werden. Beim Zeitschritt 15,341 s passiert die Flammenfront den ersten Sensor (siehe Photodiode 1 in Abbildung 81, welche ein Signal größer 0,1 V detektiert (gewählter Schwellwert)). Einzelne Flammenspots, welche durch abbrennende Partikelagglomerate entstehen, sind erkennbar. Die Flamme steigt weiterhin nach oben und richtet sich gut in der Mitte des Rohres aus. Der Schwellwert für den Sensor 2 ist beim Zeitschritt 15,485 s erreicht. Im Diagramm in Abbildung 81, aber auch an der Bildserie lässt sich erkennen, dass sich die Flamme gut ausgebildet hat und nach oben hin steigt. Hinter der Flamme ist der Bereich der verbrannten Mischung, der Bereich ist dunkel, ohne Lichtemission. Dieser Bereich ist im Diagramm zwischen Zeitschritt 15,5 s und 15,6 s erkennbar, in welchem das Signal der Photodiode 1 (blaue Linie) absinkt. Photodiode 3 (graue gepunktete Linie) spricht hier ab 15,556 s an. Die Flamme hat PD 1 passiert und hält sich im Bereich PD 2 und PD 3. Die Flammenfront hat gerade PD 3 erreicht. Beim Ansprechzeitpunkt von PD 4 (15,626 s) sinkt die Signalstärke von PD 2 ab. Die Flamme ist weiter aufgestiegen und hat den Bereich der PD 1 und PD 2 verlassen. Die Bildauswertung der Zündung ist ab diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich. Eine Bildserie von oben aufgenommen, lässt eine Konturauswertung zu, einzelne abbrennende Agglomerate sind aufgrund der verwendeten Kameratechnik bzw. Kameraoptik nicht mehr erkennbar. Nachdem PD 4 ein Signal liefert, ist ebenfalls im Diagramm erkennbar, dass auch wieder PD 1 und PD 2 in der Signalstärke ansteigen. Eine Erklärung hierfür könnten Nachverbrennungen udg. sein. Auch konnte in der Videoauswertungen erkannt werden, dass abgesunkene Partikeln durch den Auftrieb der Flamme wieder vom Boden Richtung Zündbereich gezogen werden. Im verbrannten Bereich können sich so wieder Partikeln und Luft ansammeln, welche zu Nachverbrennungen und Nachzündungen führen könnten. Ab dem Zeitschritt 15,695 s erreicht die Flammenfront Photodiode 5. Die Flamme befindet sich im mittleren Bereich des Rohres. Wandeffekte udg., welche auf die Flammenausbreitung wirken könnten, können aus dieser Beobachtung weitgehend ausgeschlossen werden. Der Sensor 6 liefert ab dem Zeitpunkt 15,775 s ein Signal, die Flamme hat den letzten Messpunkt in einer Höhe von 720 mm über Zündung erreicht. Ein Absinken des Messsignals von PD 6 kann zum Zeitschritt 15,95 s detektiert werden. Dann hat die Flamme den Messaufbau passiert und breitet sich weiter im Rohr nach oben hin aus. Die Auswertung der aufgezeichneten Flammengeschwindigkeiten zeigt, dass die Flammengeschwindigkeit entlang des

Messaufbaues (400 mm Länge) annähernd konstant bleibt (1 m/s) (vgl. Abbildung 82). Dieser Wert deckt sich mit den Beobachtungen der Flammen, welche über diese Distanz keine Beschleunigung aufgrund von Wandeffekten erfahren.

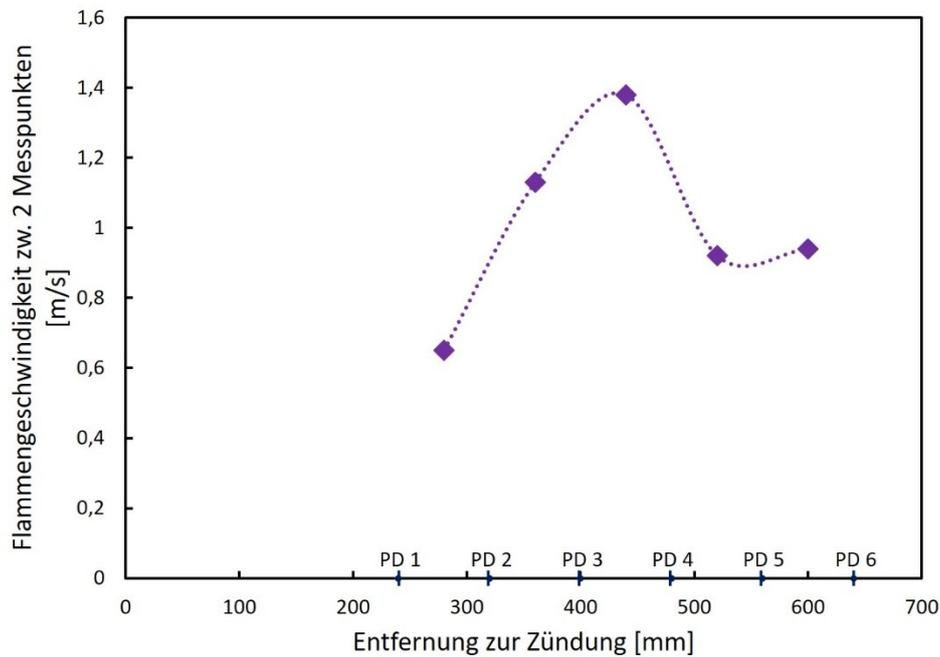


Abbildung 82: Gemessene Flammengeschwindigkeit des beschriebenen Versuches als Beispiel (*Lycopodium clavatum*, Staubböderung pro Rührer: 1,2 g/s)

Eine Änderung der Flammengeschwindigkeit bei sich verändernden Brennstoffkonzentrationen ist erkennbar. Mit steigender Staubkonzentration im Versuchsraum erhöht sich die Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit. Dies konnte durch Variation der Partikelkonzentration und der Detektion der Flammengeschwindigkeit durch die beiden Versuchsaufbauten erfasst werden. Die Form der Flammenausbreitung und die Art der Verbrennung sind bei allen studierten Partikelkonzentrationen gleich. Dies deutet darauf hin, dass die Ausbreitung und Struktur der Flamme vom Material abhängt und weniger stark von der Brennstoffkonzentration. Ergebnisse der optischen Bestimmung sind in Tabelle 7 angeführt, die Einzelergebnisse im Anhang E.

Tabelle 7: Ermittelte Flammengeschwindigkeiten in einem Lycopodium/Luft-Gemisch

Staubeintrag [g/s*Rührer]	Flammengeschwindigkeit [m/s]
0,5	1,67±0,58
0,55	1,19±0,05
0,6	1,3 (n=1)
1	1,75±0,45
1,2	1,84±0,23
1,5	2,5 (n=1)
0,5 (Aufbau 2)	0,82±0,06
1,2 (Aufbau 2)	0,91±0,07

4.2 Flammenausbreitung in einem Maisstärke/Luft-Gemisch

Insgesamt wurden 23 Versuche mit Maisstärke als Versuchsstaub durchgeführt. Der Staubeintrag von oben lief für die Dauer von 18 Sekunden, der Zündfunke wurde nach einer Zündverzögerungszeit ab Start Staubeintrag von 15 Sekunden über einen Zeitraum von 4.000 ms aktiviert. In Tabelle 8 ist eine Aufstellung der durchgeführten Versuche ersichtlich. Die Konzentration des Staubes in der Luft wurde in einer Höhe von 820 mm über dem Boden bestimmt. Die Versuche wurden bei einer Temperatur von 19,5 °C bei einer Luftfeuchte von 69 % r.F. (Echthaarhygrometer) verwirklicht.

Tabelle 8: Aufstellung der durchgeführten Versuche mit Maisstärke

Staubeintrag [g/s*Rührer]	Zündung	Nicht- Zündung
0,7	0	1
1,5	0	1
2,5	0	1
2,8	8	0
3	4	0
3,2	7	0
5	1	0

Die Flammenausbreitung in einem Maisstärke/Luft-Gemisch in der Rohrapparatur wird folgend beschrieben. Die Zündung des Gemisches erfolgt ident mit der Zündung einer Lykopodium/Luft-Mischung, Energie wird in das System eingetragen, ein Hot Spot entwickelt und eine Flamme kann sich sphärisch von Zündort weg ausbreiten. Auftriebskräfte lassen die Flamme nach oben steigen. Die Flamme weist eine sphärische Geometrie auf, Unregelmäßigkeiten treten immer wieder auf und verschwinden wieder, sodass im Großen und Ganzen von einer runden Form gesprochen werden kann. Der Auftrieb wirkt stets ein, ein Wachstum im Querschnitt ist dennoch regelmäßig. Die Flamme erfährt wenig Beschleunigung, wodurch auf eine geringe Turbulenz im Versuchsraum geschlossen werden kann. Auch wird diese Annahme durch das gleichmäßige Wachstum der Flamme bestätigt. Reflexionen vom Boden scheinen nicht auf die Flamme zu wirken, einerseits da eine Beschleunigung der Flammenfront optisch nicht erkennbar ist, andererseits lässt das Größenverhältnis Versuchsraum zu Flamme wenig Annahmen bezüglich Druckwellenreflexionen zu. Solche Druckwellenreflexionen würden auch durch eine stärkere Richtungstendenz der Flamme nach oben hin angezeigt werden. Die Flammenfront scheint stets geschlossen zu sein. Es bilden sich keine Flammzellen wie bei Lykopodium/Luft-Gemischen. Rückzündungen udg. sind nicht sichtbar, es ist aber in dem gewählten Versuchsaufbau nicht erkennbar ob noch unverbrannte Partikeln hinter der Flamme vorhanden sind. Die Farbe der Flamme kann als leuchtend gelb beschrieben werden. Die Lichtstrahlung wird intensiv wahrgenommen. Im Vergleich zum vorher beschriebenen Verbrennungsprozess von Lykopodium wurde die Leuchtkraft von Stärke sehr viel intensiver wahrgenommen. Bei einer Einordnung nach

Glühfarben (ohne Weißabgleich) ergibt sich ein Temperaturbereich von 1.500 °C (Weißglut [137]). Experimentelle Untersuchungen von Proust [43] zeigten, dass bei der Flammenfortpflanzung in einem Maisstärke/Luft-Gemisch die Wärmestrahlung nur einen sehr geringen Teil zum Reaktionsfortschritt beiträgt und somit vernachlässigt werden kann. Die Wärmeübertragung durch die Flamme erfolgt durch Konvektion und führt zu einer theoretischen adiabaten Verbrennungstemperatur in einer stöchiometrischen Mischung (236 g/m³) von 1.930 °C. [22] Im Vergleich hierzu liegt die Verbrennungstemperatur von Lycopodium bei ca. 1.100 °C (vgl. Abbildung 80). Der beobachtete Reaktionsverlauf in der Flamme stimmt gut mit den Ergebnissen von Zhang et al [24] überein. Wandeffekte scheinen gering oder nicht aufzutreten, da die Form annähernd sphärisch bleibt. Die Flamme scheint etwas weniger als die Hälfte des Rohrquerschnittes zu diesem Zeitpunkt einzunehmen. Sie wächst weiter und erst allmählich beginnt sich die Form zu ändern bevor sie etwas abflacht. Die Geometrie kann nicht mehr als kugelähnlich beschrieben werden. Es bildet sich eine parabolische Flammenfront, die sich entlang der Rohrachse nach oben hin ausbreitet. In einer Höhe von 1.160 mm über dem Zündort ist ein weiteres Schauglas in der Apparatur angebracht. Die Flamme wandert an diesem gleichmäßig vorbei. Der gesamte Querschnitt wird nicht von der Flamme eingenommen und die Flammenfront hat eine parabolische Form. Die Beschleunigung scheint gering zu sein, da sich die Flamme entlang großer Wegstrecken gleichmäßig ausbreitet. Turbulenzeffekte udg. scheinen auf Grund dieser Beobachtungen gering zu sein. Auftretende Wandeffekte können anhand dieser optischen Aufzeichnungen nicht beschrieben werden. Eine Fotostrecke einer typischen Flammenausbreitung nach der Zündung des Maisstärke/Luft-Gemisches ist in Abbildung 83 ersichtlich. In einer Höhe von 1.160 mm über der Zündung wurde die Bildstrecke aus Abbildung 84 aufgenommen.

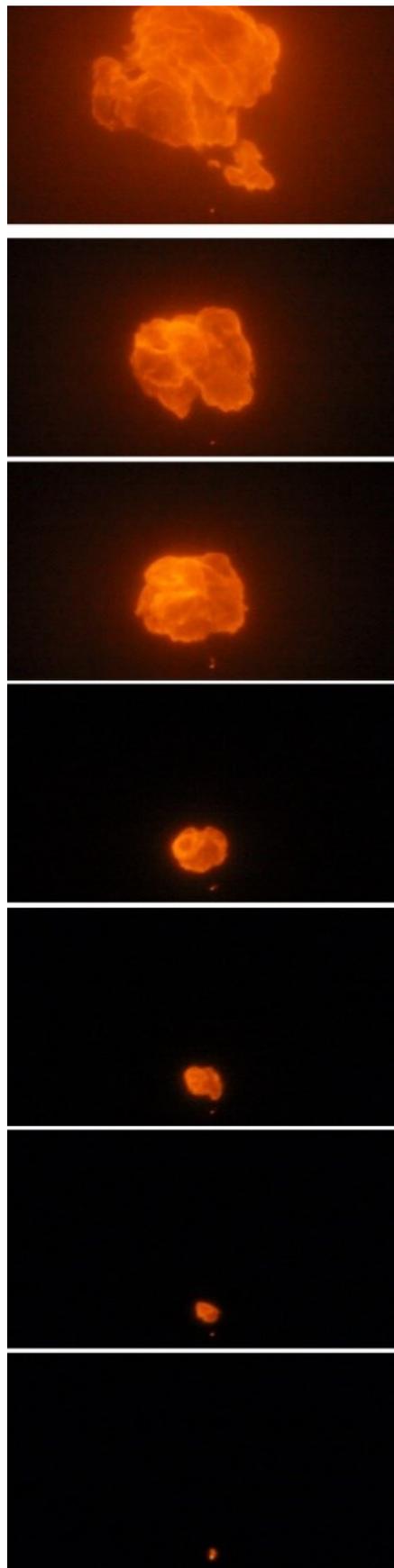


Abbildung 83: Bildserie der Zündung eines Stärke/Luft-Gemisches (Förderrate: 2,8 g/s*Rührer)

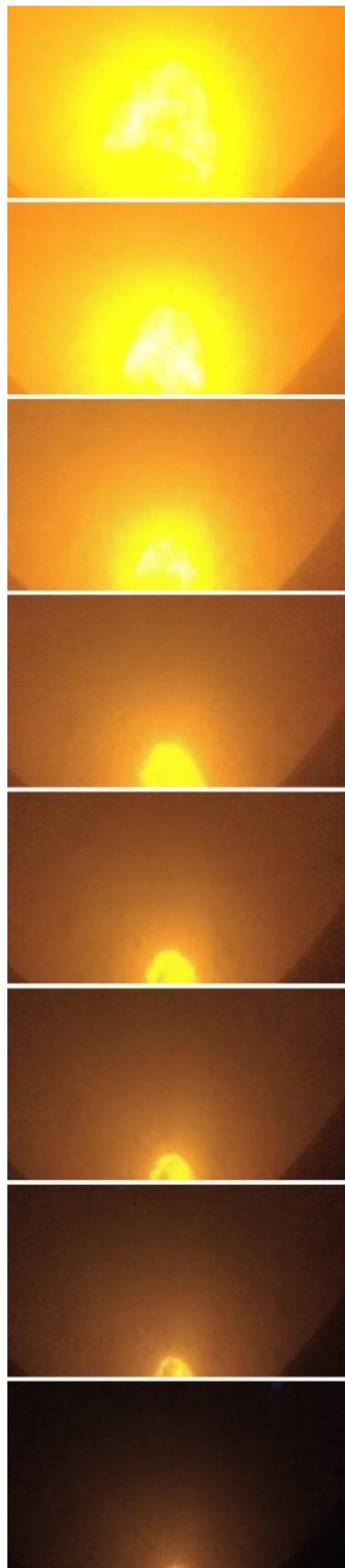


Abbildung 84: Bildserie der Flammenfront in einem Maisstärke/Luft-Gemisch in einer Höhe von 1.160 mm über der Zündung (Förderrate: 0,5 g/s*Rührer)



Abbildung 85: Aufnahme der Flammenfront in einer Höhe von 1.160 mm über der Zündung
(Stärke, Förderrate: 3,0 g/s*Rührer)

Die Flammenfront erscheint stets geschlossen (vgl. Abbildung 85). Ein Unterschied zur Flammenbildung von Lycopodium, welche aus verbrennenden Partikelagglomeraten besteht, ist klar ersichtlich. Bei Stärke scheint es, als ob die Flammenfront geschlossen wäre. Eine Erklärung könnte sich im Reaktionsverhalten der Stärke finden. Bei der Betrachtung von Ergebnissen aus einer thermogravimetrischen Analyse (TGA und DTG; siehe Abbildung 86) ist eine Spitze des Masseabbaus von Stärke zu sehen. Der Reinstoff scheint die flüchtigen Bestandteile abzugeben, aufzuschmelzen und die darauffolgend entstehende Gasphase verbrennt anschließend. [24] Dieses Verhalten unterscheidet sich stark von Lycopodium, bei welchem die DTG-Kurve zwei Spitzen beim Masseabbau aufweist (vgl. hierzu Abbildung 87, in welcher die Ergebnisse einer thermogravimetrischen Analyse von Lycopodium, durchgeführt von Mostafavi et al. [139], abgebildet sind).

Der erste Bereich, in dem die Stärke Reaktionen zeigt, befindet sich nach Zhang et al. [24] in einem Temperaturbereich bis zu 110 °C, bei geringem Gewichtsverlust (vgl. DTG, Abbildung 86, b) und einem scheinbaren endothermen Verdampfen des Wassers in der Probe (vgl. DSC, Abbildung 88). Je nach Feuchte der Stärke ist dieser Gewichtsverlust höher. [140] Ein Einfluss auf die Verbrennungstemperatur durch den Wassergehalt der Probe ist nicht gegeben, da das gesamte Wasser der Probe bis zum Erreichen der Zersetzung verdampft ist. [140] Ab einer Temperatur von ca. 250 °C beginnt bei Stärke der Masseabbau, bis zu einer Temperatur von 300 °C ist nahezu 70 % der Masse abgebaut [141] (bei Liu et al. [140] liegt der maximale

Masseabbau bei 320 °C). Das kurze Temperaturintervall mit dem hohen Masseabbau könnte auf ein schnelles Schmelzen und Verdampfen hindeuten.

Die Kurve der Differential-Scanning-Kalorimetrie (DSC) zeigt zwischen 280 und 500 °C mehrere exotherme Reaktionen (vgl. Abbildung 88) an, was nach Zhang et al. [24] Anzeichen für komplexe exotherme Prozesse sind und auf eine Verbrennung der flüchtigen Bestandteile hindeutet. Ab 510 °C sinkt der gemessene Wärmefluss der Stärke (Abbildung 88, vgl. hierzu auch die Kurve der DTG in Abbildung 86 ab einer Temperatur von 510 °C). Dieser dritte Bereich im Reaktionsablauf deutet auf die Carbonisierung hin, der Masseabbau der Stärke ist nur mehr gering und die Zersetzung der Kohle und der anorganischen Asche findet statt. [24] Ähnliche Messdaten wurden von Wang et al. [142] veröffentlicht. Diese Ergebnisse bedeuten, dass schon ab einer geringen Temperatur, welche in der Vorwärmzone durch die Flamme immer erreicht wird, der Reaktionsprozess startet. Durch die geringe benötigte Temperatur können alle Staubpartikeln erwärmt werden und anschließend am Verbrennungsprozess teilnehmen. Die Flamme in einem Stärke/Luft-Gemisch erscheint heller und leuchtender im Vergleich zu Lycopodium-Flammen.

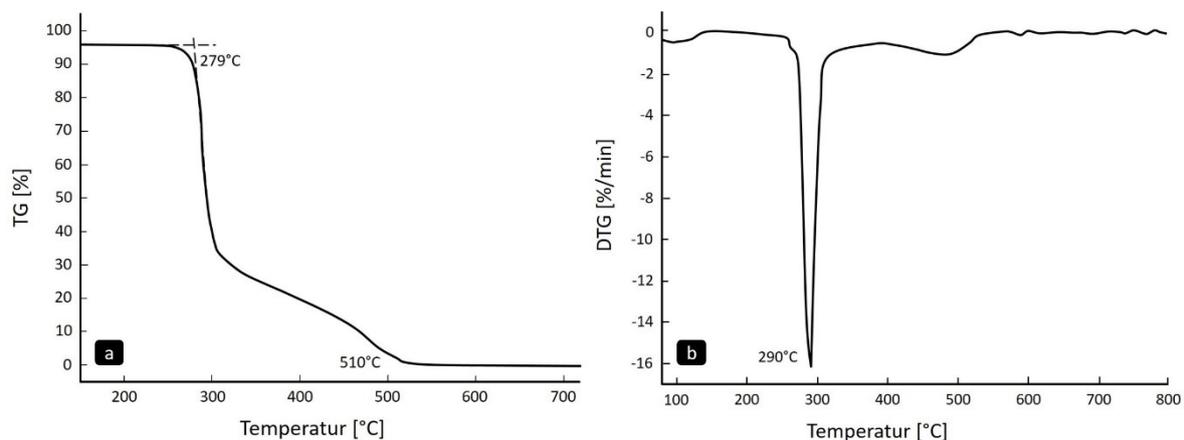


Abbildung 86: Kurve der (a) thermogravimetrischen Analyse (TG) und der (b) Differenzthermoanalyse (DTG) von Stärke in einem Temperaturbereich von 40 bis 850 °C bei einer Heizrate von 5 K/min, durchgeführt von Zhao et al. [141]

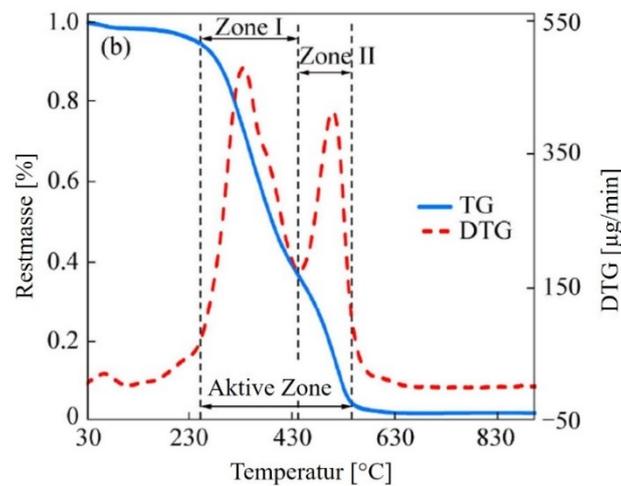


Abbildung 87: Ergebnis einer thermogravimetrischen Analyse (TG) und Differenzthermoanalyse (DTG) von Lycopodium, bei einer Heizrate von 20°C/min bis zu einer Temperatur von 900 °C, durchgeführt von Mostafavi et al. [139]

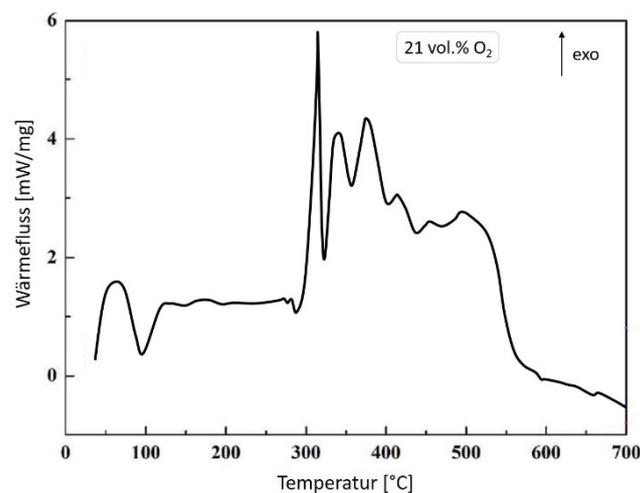


Abbildung 88: Kurve der Differential-Scanning-Kalorimetrie (DSC) von Stärke in einem Temperaturbereich von 40 bis 700 °C bei einer Heizrate von 10 °C/min, durchgeführt von Zhang et al. [24]

Wang et al. [143] ermittelten in einer Studie die Flammentemperatur einer Maisstärke-Flamme experimentell und rechnerisch über einen Konzentrationsbereich von 70 bis 170 g/m³. Ihre Ergebnisse (siehe Abbildung 89) zeigen, dass die benötigte Temperatur bei der Flammenfortpflanzung für ein Aufschmelzen der Stärke-Partikeln und anschließende Verbrennung erreicht wird. Die Bestimmung der Flammentemperatur bei den durchgeführten Versuchen in der Großversuchsanlage lieferte keine verwertbaren Ergebnisse. Aufgrund der Annahme einer ähnlichen Flammenausbreitung wie in einer kleinen Rohrapparatur wurden die

Thermoelemente an der Rohrwand angebracht. Ein ähnliches Verhalten der Flammenbildung trat jedoch nicht auf. Die Flammenfront erreichte erst später (nach einer längeren Strecke) die Rohrwand. Die Thermoelemente konnten so nur die Erwärmung der Gasphase erfassen bzw. traten Nachverbrennungen udg. auf, welche auch den gesamten Versuchsraum einnehmen konnten. Diese Temperatur kann aber nicht als Flammentemperatur der eigentlich untersuchten Flammenfront angesehen werden. Bei der Auswertung der erfassten Temperaturwerte konnte festgestellt werden, dass die gemessene Temperatur der Nachverbrennungen über 300 °C anstieg.

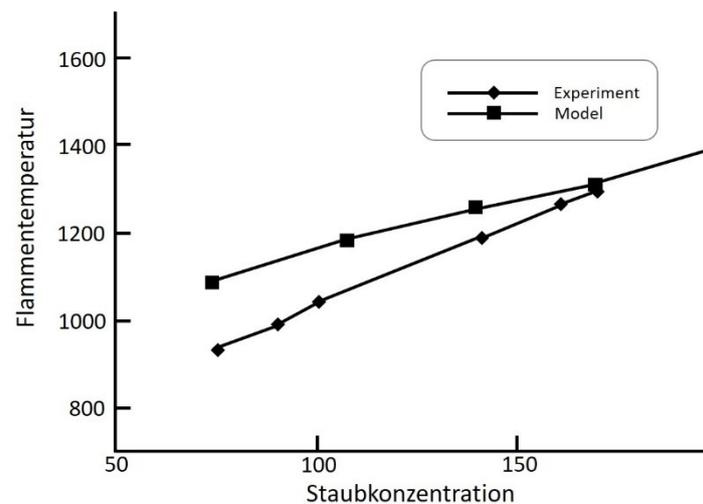


Abbildung 89: Rechnerisch ermittelte Flammentemperatur eines Maisstärke/Luft-Gemisches nach Bo Wang et al. mit eingefügten experimentellen Daten von Proust [143]

Die Ergebnisse der Bestimmung der Flammenfortpflanzung für verschiedene Staubkonzentrationen sind in Tabelle 9 ersichtlich, die Einzelergebnisse sind im Anhang E angeführt. Die unterschiedliche Anbringung der Sensoren begründet den Messunterschied und die damit gezeigte Beschleunigung der Flamme entlang des Rohres.

Tabelle 9: Ermittelte Flammengeschwindigkeiten in einem Maisstärke/Luft-Gemisch

Staubeintrag [g/s*Rührer]	Flammengeschwindigkeit [m/s]
2,8	2,17±0,14
3	2,16±0,27
3,2	2,27±0,28
2,8 (Aufbau 2)	1,23±0,19
3,2 (Aufbau 2)	1,39±0,14
5 (Aufbau 2)	1,94 (n=1)

4.3 Flammenausbreitung in einem Lycopodium/Zeolith/Luft-Gemisch

Zur Untersuchung des Einflusses von Inertpartikeln auf die Flammenausbreitung wurde eine Versuchsserie mit 16 Versuchen für die Mischung *Lycopodium casuarinoides* mit 10 % Zeolith durchgeführt. Die Wahl von 10 % Inertstaub wurde durch Vorversuche in einer kleinen Rohrapparatur getroffen. Die Vorversuchsserie bestand aus verschiedenen Beimengungen des Inertstaubes zu *Lycopodium casuarinoides* und der Bestimmung derer Flammengeschwindigkeit. Die Ergebnisse dieser Studie sind Abbildung 90 bzw. [144] zu entnehmen.

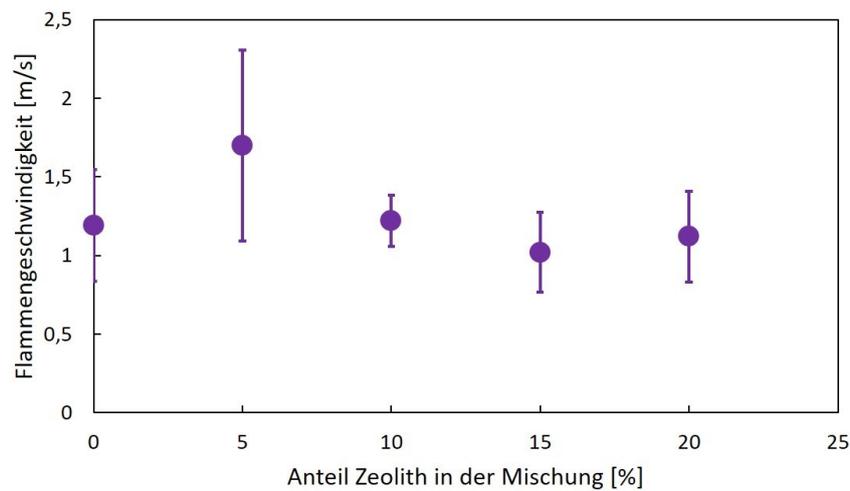


Abbildung 90: Ergebnisse der Voruntersuchungen zu Inertpartikeln (Zeolith) in einem Lycopodium/Luft-Gemisch [144]

Aufbauend auf diesen Vorversuchen wurde eine Staubmischung mit *Lycopodium casuarinoides* und 10 % Zeolith erzeugt. Der Staubeintrag in den Versuchsraum erfolgte für die Dauer von 18 Sekunden, der Zündfunke wurde nach einer Zündverzögerungszeit ab Start Staubeintrag von 15 Sekunden über einen Zeitraum von 4.000 ms aktiviert. In Tabelle 10 ist eine Aufstellung der durchgeführten Versuche mit erfolgreicher Zündung ersichtlich. Die Konzentration des Staubes in der Luft wurde in einer Höhe von 820 mm über dem Boden bestimmt. Die Versuche wurden bei einer Temperatur von 17 °C bei einer Luftfeuchte von 88 % r.F. (Echthaarhygrometer) verwirklicht.

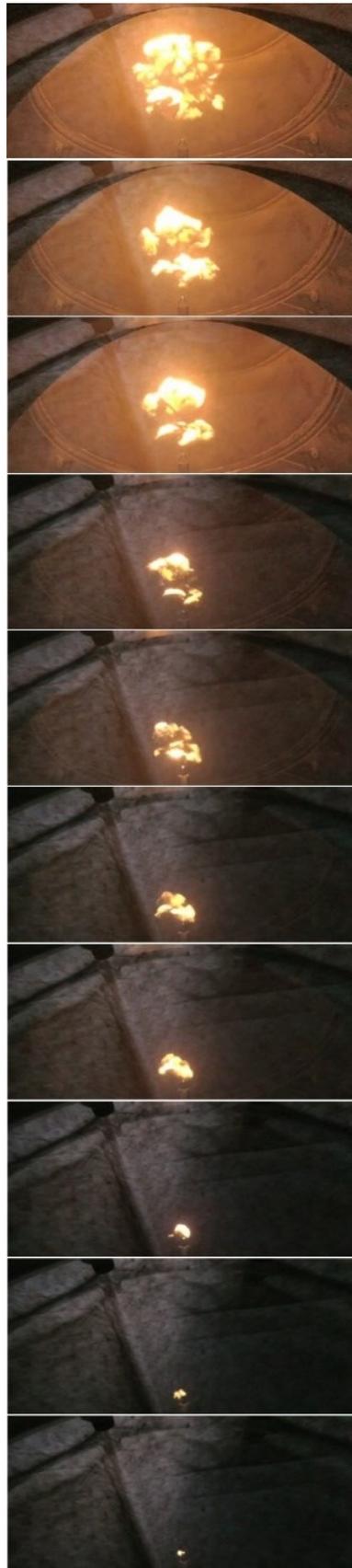


Abbildung 91: Bildserie der Zündung eines Lycopodium/Luft-Gemisches mit 10 % Zeolith in der Mischung (Förderrate: 1,0 g/s*Rührer)

Tabelle 10: Aufstellung der durchgeführten Versuche mit der Lykopodium/Zeolith-Mischung

Staubeintrag [g/s*Rührer]	Zündung	Nicht- Zündung
0,5	0	1
0,6	1	3
0,75	0	2
1	4	0
1,2	4	0
1,5	1	0

Eine Bildsequenz eines durchgeführten Versuches mit der Flammenausbreitung nach der Zündung des Lykopodium/Inertstoff/Luft-Gemisches ist in Abbildung 91 ersichtlich. Eine Bildstrecke der Flammenfortpflanzung in einer Höhe von 1.160 mm über der Zündung ist Abbildung 92 zu entnehmen. Wie auf den aufgenommenen Bildern erkennbar, ist die Flammenstruktur trotz der Zumischung von 10 % Inertstaub ident mit einer Flamme in einer reinen Lykopodium-Wolke. Die Flammenfront ist ebenfalls durch einzelne Flammen-Spots gekennzeichnet, die Einhüllende beschreibt eine parabolische Form. Das Wachstum der Flamme ist ähnlich in einer Lykopodium-Wolke regelmäßig. Auffällig erscheint ein geringeres Wachstum im Querschnitt der Rohrapparatur. Anhand der aufgenommenen Bilddaten lässt sich ein etwas verringertes Wachstum in der Breite erkennen. Dies sei jedoch nur sehr gering, Bestätigungen dieser Annahmen fehlen aber, da hierzu weitere Versuchsserien durchgeführt werden müssten. Aufnahmen von oben, vertikal auf die Flamme gerichtet müssten zur Bestätigung dieser Annahme angefertigt werden. Dies wurde jedoch bei den durchgeführten Versuchen nicht verwirklicht, da bei der Flammenausbreitung von einem gleichmäßig von Inertstäuben beeinflussten Wachstum auszugehen ist. Daher ist ein verringertes Wachstum im Querschnitt bei einer gemessenen verringerten Flammengeschwindigkeit entlang der Rohrlänge gut bestätigbar. Bei einer Zumischung von 10 % Zeolith in eine Lykopodium-Wolke wurde bei den Versuchen eine geringere Flammengeschwindigkeit gemessen. Die Inertpartikeln wirken als Energiesenke, je mehr sich im Versuchsraum befinden, desto mehr Energie der Flamme wird von ihnen aufgenommen. Die Flamme kann sich nur mehr langsamer fortpflanzen, da die Zeitdauer, bis die brennbaren Partikeln erwärmt sind, länger ist. Zwar wurde dieser Vergleich nur für drei Konzentrationen durchgeführt, aber eine gewisse Tendenz

könnte sich aus diesen Ergebnissen ergeben. Weitere Versuchsserien zur genaueren Untersuchung dieser Annahme müssten jedoch noch durchgeführt werden. (Vor-)Untersuchungen zu diesem Verhalten wurden in einer kleinen Rohrapparatur schon teilweise durchgeführt (vgl. [78, 144]).

Die Ergebnisse der Bestimmung der Flammenfortpflanzung für verschiedene Staubkonzentrationen sind Tabelle 11 ersichtlich, die Einzelergebnisse sind im Anhang E angeführt.

Tabelle 11: Ermittelte Flammengeschwindigkeiten in einem Lycopodium/Luft-Gemisch mit 10 % Zeolith

Staubeintrag [g/s*Rührer]	Flammengeschwindigkeit [m/s]
1	1,39±0,03
1,2	1,27±0,22
1,5	1,06 (n=1)

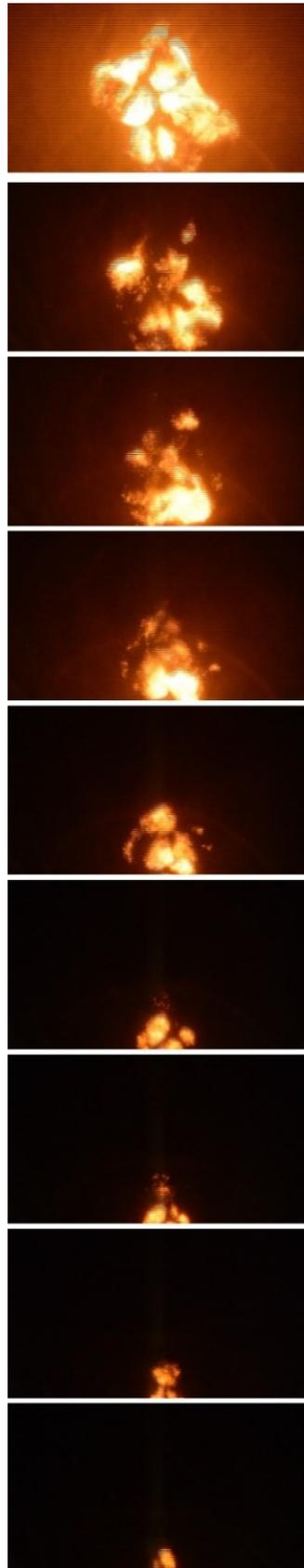


Abbildung 92: Bildserie der Flammenfront in einem Lycopodium/Luft-Gemisch mit 10 % Zeolith in einer Höhe von 1.160 mm über der Zündung (Förderrate: 1,2 g/s*Rührer)

5 Schlussfolgerung

Nach der Zündung des Staub/Luft-Gemisches erfolgt die Flammenausbreitung sphärisch um den Zündort. Temperatur- und Dichteunterschiede beeinflussen jedoch die Flammenform während der Ausbreitung. Die Gasphase dehnt sich durch den Temperaturanstieg aus und heiße Verbrennungsgase steigen mit der Flamme nach oben. Der Dichteunterschied begünstigt den Auftrieb. Die Flamme nimmt mit fortschreitender Zeit entlang der Rohrlänge eine parabolische Form an. Die Leuchtkraft der Flamme kann je nach Material different wahrgenommen werden und legt den Schluss unterschiedlicher Verbrennungstemperaturen nahe. Das Wachstum im Querschnitt ist im Vergleich zur Fortpflanzungsrichtung etwas geringer. Dieses Verhalten unterscheidet sich stark zum Flammenwachstum in einer kleinen Rohrapparatur (140 x 2.000 mm), in welcher sich die Flamme sehr schnell im Querschnitt zur Wand hin ausbreitet und dadurch relativ schnell eine Beschleunigung durch Wandeffekte, Turbulenzen udg. erfährt. Grundsätzlich verhalten sich die Flammenfronten bei den verwendeten Stäuben ähnlich, Unterschiede treten jedoch bei genauerer Betrachtung auf. Makroskopisch ist bei beiden verwendeten brennbaren Stäuben die Flammenfront durch Wölbungen gekennzeichnet. Erklärungen finden sich in der Verbrennungsreaktion und der damit im Zusammenhang stehenden Wärmeübertragung in unverbrannte Bereiche. Durch im Bereich der Flammenfront entstehende Turbulenzen führen zu einer Ausbildung von Zellen bzw. Wölbungen (vgl. Abbildung 93). Diese Erscheinung konnte gut erfasst werden. Die Literatur (vgl. [96]) spricht hierbei von in allen Raumrichtungen gleichmäßig entstehende Flammenwölbungen. Dieses Verhalten konnte in den durchgeführten Versuchsserien nicht beobachtet werden. Die entstehenden Zellen erfuhren über die Zeit ein gewisses optisches Breitenwachstum, welches aber bis zu einem gewissen Maß beschränkt war. In die Richtung der Flammenfortpflanzung, also nach oben im Rohr, erfolgte keine Längenzunahme der

Wölbung. Die Größenordnung der Wölbungen scheint ident zum jeweiligen Zeitschritt bei den durchgeführten Versuchen zu sein. Zur Verdeutlichung dieser Beschreibung sind in Abbildung 93 zwei Konturen von Flammenfronten zu sehen.

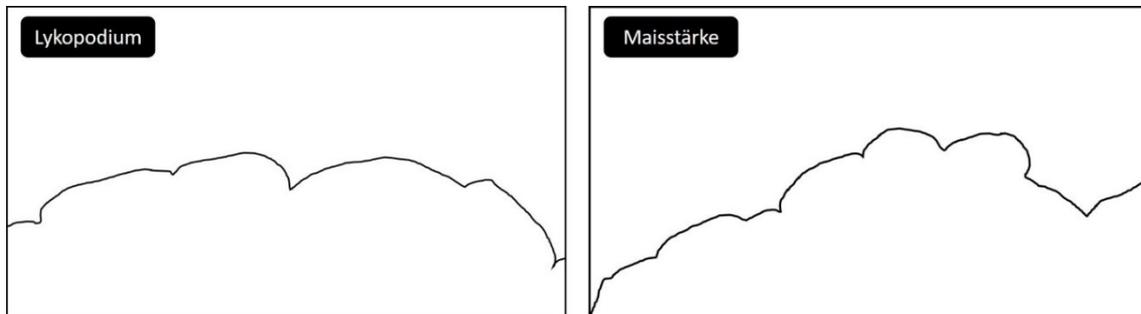


Abbildung 93: Nachgezeichnete Kontur der Flammenfront von einem Lycopodium-Versuch und einem Stärke-Versuch

Im mesoskopischen Bereich verdeutlicht sich der Unterschied zwischen den verwendeten Materialien stärker. Je nach Abbrandverhalten zeigen sich bei Lycopodium Flammenzellen, welche beim Zusammenfassen dieser die Kontur ergibt (vgl. Abbildung 93). Im Gegensatz hierzu ist die Flammenfront bei Maisstärke (Reinstoff) geschlossen. Erklärungen hierzu finden sich im mikroskopischen Bereich. Das Reaktionsverhalten der untersuchten Materialien unterscheidet sich stark. Während Stärke ein Reinstoff ist und so die Partikeln durchgehend abreagieren können ist Lycopodium ein Mischstoff aus Lignin, Ölsäure und anderen Komponenten, welche ein inhomogenes Abbrandverhalten besitzen und so hintereinander abreagieren. Dieses Verhalten zeigt sich neben der veränderten Flammenstruktur auch bei thermoanalytischen Verfahren (TG, DTG, DSC). Aus diesem Grund scheint es naheliegend, dass angewendete Berechnungsmodelle udg. immer im Verbund mit einer zugrundeliegenden eingehenden Materialcharakterisierung angewendet werden sollten. Eine einheitliche Vorgehensweise bei der Berechnung von Staubexplosionen bei Mischstoffen und Reinstoffen erscheint fragwürdig, da sich der Reaktionsprozess nicht deckt. Genauere Ergebnisse wären so durch die Adaptierung der vorhandenen Modelle zu erzielen. Nicht nur bei der Modellentwicklung sollten Ergebnisse aus thermoanalytischen Verfahren die Basis bilden, auch bei der späteren Anwendung dieser ist die Miteinbeziehung der Resultate aus der Thermoanalyse ein wichtiger Punkt. Dies würde aber auch bedeuten, dass die vorhandenen Partikelmodelle angepasst bzw. nicht auf ein einziges Modell reduziert werden sollten und thermoanalytische Verfahren daher immer Basis für die anwendungsbezogene Berechnung bilden würden. Hier stellt sich die Frage, ob sich die Verwendung eines Berechnungsmodelles für z.B. Kohle auch für einen Reinstoff wie Stärke sinnvoll eignet.

6 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Untersuchung und Beobachtung der Flammenausbreitung in einem Staub/Luft-Gemisch unter geringen turbulenten Bedingungen in der hierfür entwickelten Versuchsanordnung in einem größeren Maßstab (813 x 4.156 mm) möglich ist. Die so erhaltenen Untersuchungsdaten können zum besseren Verständnis der Flammenausbreitung vom Zündort weg beitragen. Die Einflussfaktoren auf die Flammenfortpflanzung wurden erhoben, um so ideale Voraussetzungen für die Untersuchungsstudie zu schaffen. Da die Ausbreitung der Flamme stark von den Turbulenzbedingungen abhängig ist, wurde der Staubeintrag so konstruiert, dass sich die schwerkraftgetriebene Partikelströmung gleichmäßig im Versuchsraum verteilt und zum Zündzeitpunkt die Bedingungen so gering turbulent wie möglich vorliegen. Neben der optischen Untersuchung der Flamme wurden Sensoren zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit angebracht. Die Zündung erfolgte im unteren Ende der Rohrapparatur, die Flamme konnte so über einen langen Zeitraum unter geringen Wand- und Turbulenzeinflüssen zum oberen Ende aufsteigen. Die Ausbreitung der Flamme erfolgte sphärisch vom Zündort weg. Durch den von den heißen Verbrennungsgasen und anschließender Abkühlung entstehenden Auftrieb pflanzt sich die Flamme nach oben fort und nimmt mit fortschreitender Zeitdauer entlang der Rohrlänge eine abgeflachte parabolische Form an. Die Leuchtkraft der Flamme konnte je nach Material different wahrgenommen werden.

Als Versuchsstaub wurde einerseits Lycopodium verwendet, um einen Mischstoff mit schlagartiger Verbrennung untersuchen zu können. Andererseits wurden Versuche mit Maisstärke durchgeführt, um die Flammenausbreitung und die Struktur der Flamme eines Reinstoffes studieren zu können. Die Verwendung der gewählten Materialien erwies sich als ideal und bietet die Möglichkeit des Vergleiches einerseits mit in der Literatur bekannten Untersuchungen, andererseits mit Ergebnissen aus bekannten Berechnungsmodellen, welche erst durch Vergleichsmöglichkeiten für die Industrie anwendbar werden. Der Abgleich von

entwickelten Berechnungsmodellen für den Großmaßstab mit Daten aus Versuchen ist bis dato erst für turbulente Versuchsbedingungen in der Literatur bekannt. Die Möglichkeit in der entwickelten Versuchsapparatur nun auch die Flammenausbreitung unter geringen turbulenten Bedingungen studieren zu können, bietet eine neue Möglichkeit der Weiterverarbeitung der gewonnenen Daten. Bei der Anwendung von geringer Turbulenz könnte ein Modell entwickelt und anschließend mit Versuchsserien verglichen werden, mit dem der Verbrennungsprozess gut abgebildet werden kann und dieses weiterführend für Großanlagen angewendet werden. Die sicherheitstechnische Betrachtung könnte so von methodenabhängigen Laboruntersuchungen zu speziell an den Prozess abgestimmten Berechnungen hin verschoben werden.

Die Beschreibung der Ausbreitung der Flamme ist vor allem an optische Verfahren gebunden, da Messergebnisse nur punktuelle Werte liefern können und so das gesamte Bild nicht erfasst werden würde. Aus diesem Grund sollte für die Beschreibung der Flammenausbreitung optische Verfahren die Methode der Wahl sein.

Um die Struktur der Flamme im Fortpflanzungsprozess genauer untersuchen zu können wäre die Anwendung der sogenannten Schattenmethode (engl. *shadow method*) empfehlenswert. Bei diesem Verfahren wird durch die Anwendung zweier optischer Linsen und eines Lasers sowie einer Hochgeschwindigkeits-Kamera der Schatten der Flamme aufgezeichnet. Durch die Änderung des Schattens der Flamme kann auf die Struktur dieser rückgeschlossen werden. Der Abgleich der dadurch entstehenden Bilder mit den schon aufgezeichneten Fotos der Flammenfront würden noch genauere Schlüsse über die Flammenstruktur ziehen lassen und somit eine genauere Beschreibung der Flammenfortpflanzung zulassen.

Trotz durchgeführter Vorversuchsserien im kleineren Maßstab konnte eine Staubkonzentrationsmessung über die gesamte Länge des Querschnittes nicht erfolgreich durchgeführt werden. Die Messung der Lichtschwächung über eine Länge von 800 mm kann als ungeeignet eingestuft werden. Da die Kenntnis der Partikelkonzentration im Versuchsraum jedoch wichtig für weitere Versuchsserien ist, müsste die Methode verbessert werden. Hierzu könnte die Anordnung mehrerer kleiner Sensoren einen Ansatz darstellen, aber auch die Kombination der Messung von Lichtabsorption und Lichtstreuung wäre möglich. Obwohl sich in Vorversuchen mit kürzeren Messtrecken zeigte, dass die Lichtstreuung einen breiteren Schwankungsbereich liefert, könnte eine Kombinationsmethode für lange Messtrecken bessere Ergebnisse erzielen.

Bei den gewählten Versuchsaufbauten für die durchgeführten Versuchsserien zeigte sich, dass die Methode der Flammentemperaturmessung in dieser Anordnung keine

zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Die Anwendung eines Pyrometers zur Messung der Gastemperatur und eine abgeänderte Messanordnung der Thermolemente direkt im Versuchsraum wären anzuraten, um die Temperatur der Flamme genau bestimmen zu können. Nur die Bestimmung von Gastemperatur im Verbund mit der Partikeltemperatur erzielt Messergebnisse, welche zum weiteren Studium der Flammenausbreitung dienlich sind.

Da die gewählten Versuchsparameter gute vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf die Flammengeschwindigkeit lieferten, wäre eine weiterführende Messung der Verbrennungsgeschwindigkeit mit Hilfe einer Schlieren-Photographie von Interesse. Diese im Verbund mit den schon durchgeführten Messungen der Flammengeschwindigkeit könnte der genaueren Beschreibung der Flammenausbreitung nach der Zündung dienen.

Obwohl die Entwicklung der Versuchsapparatur auf Vorversuchen mit einer Laborapparatur fußen, wäre ein Abgleich zwischen Laborapparatur und Großapparatur sicher ein nächster zu tätiger Schritt. Das Durchmesser-zu-Längen-Verhältnis und dessen Einfluss auf die Flammenausbreitung wurden schon in der Literatur untersucht. Jedoch immer nur unter turbulenten Bedingungen, der Einfluss unter geringer Turbulenz zum Zündzeitpunkt würde in der Wissenschaft ein weiteres Puzzleteil für das Verständnis der Flammenausbreitung liefern. Die Möglichkeit der Übertragung von Versuchsergebnissen im Labor auf den Großmaßstab würde durch diesen Abgleich evaluiert werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] International Organization for Standardization: EN ISO/IEC 80079-20-2:2016-12, Explosionsfähige Atmosphären - Teil 20-2: Werkstoffeigenschaften - Prüfverfahren für brennbare Stäube (ISO/IEC 80079-20-2:2016); Deutsche Fassung EN ISO/IEC 80079-20-2:2016.
- [2] Austrian Standards: ÖNORM EN 13821:2003 Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen.
- [3] Austrian Standards: ÖNORM EN 14034-1:2011 Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes p_{max} von Staub/Luft-Gemischen.
- [4] Austrian Standards: EN 14034-2:2011 Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 2: Bestimmung des maximalen zeitlichen Druckanstiegs $(dp/dt)_{max}$ von Staub/Luft-Gemischen.
- [5] Austrian Standards: ÖNORM EN 14034-3:2011 Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 3: Bestimmung der unteren Explosionsgrenze UEG von Staub/Luft-Gemischen.
- [6] Austrian Standards: ÖNORM EN 14034-4:2011 Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 4: Bestimmung der Sauerstoffgrenzkonzentration SGK von Staub/Luft-Gemischen.
- [7] Veyssi re, B.: Developmant an dpropagation regimes of dust explosions, Powder Technology 71 (1992), 171–180.
- [8] Steen, H.: Handbuch des Explosionsschutzes, Wiley-VCH, Weinheim, 2009.
- [9] Gao, W., T. Mogi, J. Yu, J. Sun and R. Dobashi: Flame propagation mechanisms in dust explosions. In : Tenth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, vol. 2014, 31–44.

-
- [10] Skjold, T., D. Castellanos, K. L. Olsen and R. K. Eckhoff: Experimental and numerical investigation of constant volume dust and gas explosions in a 3.6-m flame acceleration tube, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 30 (2014), 164–176.
- [11] Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr., J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M. et al.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Springer, New York, 2016.
- [12] Semenov, N. N.: Zur Theorie des Verbrennungsprozesses, *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 48 (1928), 571–582.
- [13] Ogle, R. A.: *Dust explosion dynamics*, Butterworth-Heinemann an imprint of Elsevier, Amsterdam, Boston, Heidelberg, 2017.
- [14] Crowl, D. A.: *Understanding explosions*, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 2003.
- [15] Leisenheimer, B. and W. Leuckel: Schnelle deflagrative, laminare und turbulente CH₄/Luft-Flammenfront-Ausbreitung in geschlossenen sphärischen Explosionsbehältern, *Chemie Ingenieur Technik* 65 (1993), 749–751.
- [16] Cao, W., W. Gao, J. Liang, S. Xu and F. Pan: Flame-propagation behavior and a dynamic model for the thermal-radiation effects in coal-dust explosions, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 29 (2014), 65–71.
- [17] Kern, H.: *Explosible Dust/Air Mixtures Investigations on flame propagation under non atmospheric conditions*, Dissertation, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2013.
- [18] Selle, H.: *Die chemischen und physikalischen Grundlagen der Verbrennungsvorgänge von Stäuben*. Bd. 19. Edited by Verein Deutscher Ingenieure e.V., 1957 (VDI-Berichte).
- [19] Dahoe, A. E., K. Hanjalic and B. Scarlett: Determination of the laminar burning velocity and the Markstain length of powder-air flames, *Powder Technology* 122 (2002), 222–238.
- [20] Han, O.-S., M. Yashima, T. Matsuda, H. Matsui, A. Miyake and T. Ogawa: A study of flame propagation mechanisms in lycopodium dust clouds based on dust particles' behaviour, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 14 (2001), 153–160.
- [21] Joos, F.: *Technische Verbrennung*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [22] Proust, C. and B. Veyssiere: Fundamental Properties of Flames Propagating in Starch Dust-Air Mixtures, *Combustion Science and Technology* 62 (1988), 149–172.

- [23] Wang, S., Y. Pu, J. Fu and A. Gutkowski: Effect of turbulence on flame propagation in cornstarch dust-air mixtures, *J. of Therm. Sci.* 15 (2006), 2, 186–192.
- [24] Zhang, H., T. Xie, B. Yuan, C. Huang, Q. Zhao, X. Chen and Z. Wang: Effects of partial inerting on flame structures of starch dust deflagration in duct, *Powder Technology* 373 (2020), 46–57.
- [25] Dobashi, R. and K. Senda: Detailed analysis of flame propagation during dust explosions by UV band observations, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19 (2006), 149–153.
- [26] Chen, J.-L., R. Dobashi and T. Hirano: Mechanisms of flame propagation through combustible particle clouds, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 9 (1996), 225–229.
- [27] Hertzberg, M., I. A. Zlochower and K. L. Cashdollar, 1986: Volatility model for coal dust flame propagation and extinguishment, 21th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1986, 325–333.
- [28] Andrews, G. E. and D. Bradley: Determination of Burning Velocities: A Critical Review, *Combustion and Flame* 18 (1972), 133–153.
- [29] Eckhoff, R. K.: Current status and expected future trends in dust explosion research, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18 (2005), 225–237.
- [30] Han, O.-S., M. Yashima, T. Matsuda, H. Matsui, A. Miyake and T. Ogawa: Behavior of flames propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 13 (2000), 6, 449–457.
- [31] Williams, F. A.: *Combustion Theory*, Chapman and Hall/CRC, Boulder, 2018.
- [32] Jarosiński, J.: Flame Quenching by a Cold Wall, *Combustion and Flame* 50 (1983), 167–175.
- [33] Jarosiński, J.: The Thickness of Laminar Flames, *Combustion and Flame* 56 (1984), 337–342.
- [34] Jarosiński, J., R. A. Strehlow and A. Azarbarzin: The mechanisms of lean limit extinguishment of an upward and downward propagating flame in a standard flammability tube, The Combustion Institute (1982), 1549–1557.
- [35] Zeldovich, Y. B.: *Theory of combustion and detonation of Gases*, Publ. Academy of Sciences, USSR, 1944.

-
- [36] Zeldovich, Y. B. and G. I. Barenblatt: Theory of flame propagation, *Combustion and Flame* 3 (1959), 61–74.
- [37] Gaydon, A. G. and H. G. Wolfhard: *Flames. Their Structure, Radiation and Temperature*. A. G. Gaydon and H. G. Wolfhard. Chapman & Hall, London 1953. 340 pp. Diagrams and photographs. 55s. net, *J. R. Aeronaut. Soc.* 57 (1953), 514, 661.
- [38] Spalding, D. B.: *Some Fundamentals of Combustion*, Butterworths Scientific Publications, 1955.
- [39] Andrews, G. E. and D. Bradley: The Burning Velocity of Methan-Air Mixtures, *Combustion and Flame* 19 (1972), 275–288.
- [40] Smoot, L. D. and M. D. Horton: Propagation of laminar pulverized coal-air flames, *Progress in Energy and Combustion Science* 3 (1977), 235–258.
- [41] Cashdollar, K. L. and M. Hertzberg: Infrared Temperatures of Coal Dust Explosions, *Combustion and Flame* 51 (1983), 23–35.
- [42] Lemos, L. T. de and R. Bouriannes, 1991: A New Infrared Emission-Absorption Pyrometer for Dust-Air Explosions Temperature Measurements. In Maria Graça Carvalho, F. C. Lockwood, J. Taine (Eds.): *Heat Transfer in Radiating and Combusting Systems. Proceedings of EURO THERM Seminar No. 17, 8-10 October 1990, Cascais, Portugal*. Berlin, Heidelberg: Springer (EURO THERM Seminars, 17), 287–296.
- [43] Proust, C.: Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19 (2006), 89–100.
- [44] Yin, S., H. Dai, X. Chen, Y. Wang, Q. Zhao, X. Wang et al.: Effect of Obstacles on Flame Propagation Characteristics of Corn Starch Dust, *Combustion Science and Technology* 191 (2019), 11, 2006–2019.
- [45] Dewitte, M., J. Vrebosch and A. van Tiggelen: Inhibition and extinction of premixed flames by dust explosions, *Heterogeneous flame inhibition* 8 (1964), 257–266.
- [46] Bradley, D. and G. F. Hundy: Burning velocities of methane-air mixtures using hot-wire anemometers in closed-vessel explosions. In : *Thirteenth Symposium on Combustion*, vol. 1971, 575–583.
- [47] Joshi, N. D. and A. L. Berlad: Gravitational effects on stabilized, premixed, Lycopodium-air flames, *Combustion Science and Technology* 47 (1986), 55–68.

- [48] Krause, U.: Wärme- und Stofftransportvorgänge bei sicherheitstechnischen Untersuchungsverfahren für Staubbrände und Staubexplosionen, Shaker, Aachen, 2002.
- [49] Krause, U. and T. Kasch: The influence of flow and turbulence on flame propagation through dust-air mixtures, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 13 (2000), 291–298.
- [50] Palmer, K. N. and P. S. Tonkin: Coal Dust Explosions in a Large-Scale Vertical Tube Apparatus, *Combustion and Flame* (1971), 17, 159–170.
- [51] Cao, W., W. Gao, Y. Peng, J. Liang, F. Pan and S. Xu: Experimental and numerical study on flame propagation behaviors in coal dust explosions, *Powder Technology* 266 (2014), 456–462.
- [52] Tamanini, F.: The role of turbulence in dust explosions, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 11 (1998), 1–10.
- [53] Eckhoff, R. K. and K. Fuhre: Dust Explosion Experiments in a Vented 500 m³ Silo Cell, *Journal of Occupational Accidents* 6 (1984), 229–240.
- [54] Eckhoff, R. K., K. Fuhre and G. H. Pedersen: Dust Explosion Experiments in a Vented 236 m³ Silo Cell, *Journal of Occupational Accidents* 9 (1987), 161–175.
- [55] Eckhoff, R. K., F. Alfert, K. Fuhre and G. H. Pedersen: Maize starch explosions in a 236 m³ experimental silo with vents in the silo wall, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 1 (1988), 1, 16–24.
- [56] Vogl, A.: Flame Propagation in Pipes of Pneumatic Conveying Systems and Exhaust Equipment, *Process Safety Progress* 15 (1996), 4, 219–226.
- [57] Farrell, T. M., J. Vingerhoets, J. Snoeys and J. E. Going: Dust Flame Propagation in Industrial Scale Piping. 9th Global Congress on Process Safety, San Antonio, Texas, 2013.
- [58] Skjold, T.: Simulating Vented Maize Starch Explosions in a 236 m³ Silo. In : *Fire Safety Science Proceedings of the eleventh International Symposium*, vol. 2014, 1469–1480.
- [59] Liu, Q., Y. Hu, C. Bai and M. Chen: Methane/coal dust/air explosions and their suppression by solid particle suppressing agents in a large-scale experimental tube, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 26 (2013), 310–316.

- [60] Ajrash, M. J., J. Zanganeh and B. Moghtaderi: The flame deflagration of hybrid methane coal dusts in a large-scale detonation tube (LSDT), *Fuel* 194 (2017), 491–502.
- [61] Fan, W. P., Y. Gao, Y. M. Zhang, C. L. Chow and W. K. Chow: Experimental studies and modeling on flame velocity in turbulent deflagration in an open tube, *Process Safety and Environmental Protection* 129 (2019), 291–307.
- [62] Cashdollar, K. L., E. S. Weiss, N. B. Greninger and K. Chatrathi: Laboratory and large-scale dust explosion research, *Plant/Oper. Prog.* 11 (1992), 4, 247–255.
- [63] Siebertz, K., van Bebber, D. and Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung*, Springer, Heidelberg, 2010.
- [64] Bartknecht, W.: *Staubexplosionen*, Springer, Berlin, 1987.
- [65] Dyrba, B.: Nanostäube und Explosionsschutz, *Chemie-Ingenieur-Technik* 81 (2009), 8, 1182.
- [66] Cashdollar, K. L.: Overview of dust explosibility characteristics, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 13 (2000), 183–199.
- [67] Hertzberg, M., I. A. Zlochower and K. L. Cashdollar: Metal dust combustion: Explosion limits, pressures, and temperatures, *The Combustion Institute 24th Symposium on Combustion* (1992), 1827–1835.
- [68] Eckhoff, R.: *Dust Explosions in the Process Industries*, Elsevier professional, s.l., 2003.
- [69] Abbasi, T. and S. A. Abbasi: Dust explosions - Cases, causes, consequences, and control, *Journal of Hazardous Material* 140 (2007), 7–44.
- [70] Krietsch, A., M. Scheid, M. Schmidt and U. Krause: Explosion behaviour of metallic nano powders, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 36 (2015), 237–243.
- [71] Wu, H.-C., Y.-C. Kuo, Y.-H. Wang, C.-W. Wu and H.-C. Hsiao: Study on safe air transporting velocity of nanograde aluminum, iron, and titanium, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 23 (200), 308–311.
- [72] Pellmont, G.: *Explosions- und Zündverhalten von hybriden Gemischen aus brennbaren Stäuben und Brenngasen*, Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 1979.
- [73] Schubert, H.: Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus kornigen Stoffen, *Chemie Ingenieur Technik* 45 (1973), 396–401.

- [74] van Laar, G.F.M. and J. P. Zeeuwen: On the minimum ignition energy of dust-air mixtures, *archivum combustionis* 5 (1985), 2, 145–159.
- [75] Tomasch, S.: Numerical investigation of the interaction between dust explosions and inert particulate additives using an Euler-Lagrangian approach in OpenFOAM, Master Thesis, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2017.
- [76] Hüttenbrenner, K., H. Kern, S. Tomasch and H. Raupenstrauch: Effects of Inert Particles with High Specific Surface on Ignition and Flame Propagation in Dust/Air Mixtures. In : Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9), vol. 1, 376–385.
- [77] Hüttenbrenner, K. and H. Kern, 2018: Entzündbarkeit von Staub/Luft-Gemischen bei Verwendung von Inertstäuben mit hoher Porosität, *Technische Sicherheit* 8, Januar/Februar 2018, 25–30.
- [78] Hüttenbrenner, K., H. Kern, S. Tomasch and H. Raupenstrauch: Effects of Inert Particulate Additives on Ignition and Flame Propagation in Dust–Air Mixtures, *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 56 (2020), 4, 427–434.
- [79] Scheid, M.: Experimentelle Untersuchungen zum Ablauf von Gas- und Staubexplosionen in druckentlasteten Reaktionsgefäßen, Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), 1973.
- [80] Kuai, N., J. Li, Z. Chen, W. Huang, J. Yuan and W. Xu: Experimental-based investigations of magnesium dust explosion characteristics, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24 (2011), 302–313.
- [81] Krause, U. and T. Kasch: Zum Einfluss des Strömungsfeldes und der Partikelkonzentration auf den Ablauf von Staubexplosionen, *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 57 (1997), 489–494.
- [82] Hüttenbrenner, K., H. Kern and H. Raupenstrauch: Erarbeitung der Grundlagen für eine Prüfapparatur zur Bestimmung der Flammgeschwindigkeit in Staub/Luft-Gemischen, *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* (2020), online.
- [83] Bradshaw, P.: An introduction to turbulence and its measurement, Pergamon, 1975.
- [84] Hayes, T., D. H. Napier and D. A. Roopchand: Effect of turbulence on flame propagation in dust clouds. In : Spring Tech. Meeting Combustion Institute (Canadian Section) 1983, 36.1 - 36.3.

- [85] Amyotte, P. R., S. Chippett and M. J. Pegg: Effects of turbulence on dust explosions, *Progress in Energy and Combustion Science* 14 (1989), 293–310.
- [86] Chomiak, J. and J. Jarosiński: Flame Quenching by Turbulence, *Combustion and Flame* 48 (1982), 241–249.
- [87] Kaufmann, C. W., S. R. Srinath, F. I. Tezok, J. A. Nicholls and M. Sichel: Turbulent and accelerating dust flames. In : Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1984, 1701–1708.
- [88] Wiemann, W.: Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air and dust/air/inert gas mixtures, Symposium on Industrial Dust Explosions [was held in Pittsburg, Pennsylvania on 10 - 13 June 1986]. In, STP / ASTM 958, 33–44.
- [89] Sweis, F. K. and C. G. Sinclair: The effect of particle size on the maximum permissible oxygen concentration to prevent dust explosions, *Journal of Hazardous Material* 10 (1985), 59–71.
- [90] Glarner, T.: Temperatureinfluss auf das Explosions- und Zündverhalten brennbarer Stäube, Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 1983.
- [91] IFA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben BIA-Report 12/97, IFA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 1997.
- [92] Gu, X. J., M. Z. Haq, M. Lawes and R. Woolley: Laminar Burning Velocity and Marstein Lengths of Methane-Air Mixtures, *Combustion and Flame* 121 (2000), 41–58.
- [93] Conde Lázaro, E. and J. García Torrent: Experimental research on explosibility at high initial pressures of combustible dusts, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 13 (2000), 221–228.
- [94] Pilão, R., E. Ramalho and C. Pinho: Influence of initial pressure on explosibility of cork dust/air mixtures, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 17 (2004), 87–96.
- [95] Zhen, G. and W. Leuckel: Effects of ignitors and turbulence on dust explosions, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 10 (1997), 317–324.
- [96] Gostintsev, Y.A. I., A.G. and Y.V. Shulenin: Self-similar propagation of free turbulent flame in mixed gas mixtures, *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 24 (1988), 5, 63–70.

- [97] Radandt, S., J. Shi, A. Vogl, X. F. Deng and S. J. Zhong: Cornstarch explosion experiments and modeling in vessels ranged by height/diameter ratios, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 14 (2001), 6, 495–502.
- [98] Bartknecht, W. and Zwahlen, G.: *Explosionsschutz*, Springer, Berlin, 1993.
- [99] Siwek, R.: Determination of technical safety indices and factors influencing hazard evaluation of dusts, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 9 (1996), 1, 21–31.
- [100] Lee, J.H.S. and I. O. Moen: The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapor cloud explosions, *Progress in Energy and Combustion Science* 6 (1980), 359–389.
- [101] Wieser, G. J., W. Pollhammer and H. Kern: Einflüsse der Temperatur und der Turbulenz auf die Flammenausbreitung in Staub/Luft-Gemischen unter reduzierten Druckbedingungen. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, Magdeburg, Deutschland, 26.03.2015.
- [102] Hertzberg, M. and K. L. Cashdollar: Introduction to dust explosions, *Symposium on Industrial Dust Explosions [was held in Pittsburg, Pennsylvania on 10 - 13 June 1986]*. In, *STP/STM 958*, 5–32.
- [103] Law, C. K.: Dynamics of stretched flames. In : *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1988, 1381–1402.
- [104] Bärow, E.: *Untersuchung thermoakustischer Instabilitäten von Sprayflammen*, Logos Berlin, Berlin, 2018.
- [105] Pannetier, G. and P. Laffitte: Influence de l'état de la paroi sur la vitesse de propagation de la flamme dans les mélanges de méthane et d'air., *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 227 (1947), 1429–1430.
- [106] Glechner, J.: *Entwicklung eines Verfahrens für Staubeintrag und Staubkonzentrationsmessung sowie einer Zündmethode für eine Großversuchsanlage zur Untersuchung der Flammenfortpflanzung in Staub/Luft-Gemischen*, Master Thesis, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2018.
- [107] Hüttenbrenner, K.: *CFD-Simulation und Entwicklung eines Staubeintragverfahrens für die Tube-Methode zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit in Staub/Luft-Gemischen*. 14. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit, Schloss Köthen, 07.11.2019.

- [108] Raonic, Z.: Development of a Discrete Particle Model with chemical reactions, mass and heat transfer, Master Thesis, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2018.
- [109] The OpenFOAM Foundation: Ltd. Openfoam 2.4.x, <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-2.4.x>, abgerufen am 26. November 2019.
- [110] Davidson, L.: An introduction to Turbulence Models, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Schweden, 2018.
- [111] Dehbi, A.: Assessment of a new FLUENT model for particle dispersion in turbulent flows. In : Workshop proceedings on benchmarking of CFD codes for application to nuclear reactor safety(CDF4NRS), Citeseer. 2006, 703–720.
- [112] Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [113] Liebman, I., R. S. Conti and K. L. Cashdollar: Dust cloud concentration probe, Review of Scientific Instruments 48 (1977), 10, 1314–1316.
- [114] Conti, R. S., K. L. Cashdollar and I. Liebman: Improved optical probe for monitoring dust explosions, Review of Scientific Instruments 53 (1982), 3, 311–313.
- [115] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Staubmessung in strömenden Gasen.
- [116] Kukuljzev, I.: Entwicklung einer neuen Kalibriermethode für das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5, Diplomarbeit, Hochschule Mannheim, Mannheim, 2008.
- [117] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Staubmessung in strömenden Gasen, Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung Filterkopfgräte (4m³/h, 12m³/h).
- [118] Rajendran, N.: Grain dust probes - Calibration and measurement. In : Symposium on Industrial Dust Explosions [was held in Pittsburg, Pennsylvania on 10 - 13 June 1986], STP / ASTM 958, 294–309.
- [119] Nicklisch, M.: Verbesserung des Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5, Diplomarbeit, Hochschule Mannheim, Mannheim, 2005.
- [120] Kalvatn, I. B.: Experimental investigation of the optical measurement method for detecting dust and gas flames in a flame acceleration tube Developmant of experimental apparatus, Master Thesis, University of Bergen, Bergen, Norway, 2009.
- [121] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Staubmessung in strömenden Gasen, Bestimmung der Staubbeladung durch kontinuierliches Messen der optischen Transmission.
- [122] Picotronic GmbH: Dot laser, red 650 nm, 0.4 mW, 2019, Koblenz.

- [123] VISHAY INTERTECHNOLOGY: Silicon PIN Photodiode BPV10, 2019. Available online at www.vishay.com, checked on 01.09.2020.
- [124] Aunkofer, B.: Elektrischer Durchschlag/Überschlag, <http://www.der-wirtschaftsingenieur.de/index.php/elektrischer-durchschlag-bzw-uberschlag/>, abgerufen am 05. Mai 2018.
- [125] Hong, A.: Dielectric Strength of Air, <http://hypertextbook.com/facts/2000/AliceHong.shtml>, abgerufen am 05. Mai 2018.
- [126] Glor, M.: Ignition hazard due to static electricity in particulate processes, *Powder Technology* 135-136 (2003), 223–233.
- [127] Hapidin, D. A., I. Saleh and M. M. Munir: Design and Development of a Series-Configuration Mazilli Zero Voltage Switching Flyback Converter as a High-Voltage Power Supply for Needleless Electrospinning, *Procedia Engineering* 170 (2017), 509–515.
- [128] McClusky, S. L.: High voltage resonant self-tracking current-fed converter, California Polytechnic State University, 2010.
- [129] Industrial Fiber Optics, Inc.: Plastic Fiber Optic Photodiode IF D91. Available online at www.i-fiberoptics.com, checked on 31.10.2017.
- [130] Skjold, T.: Selected Aspects of Turbulence and Combustion in 20-litre Explosion Vessels Development of Experimental Apparatus and Experimental Investigation, Master Thesis, University of Bergen, Bergen, Norway, 2003.
- [131] Bidabadi, M., P. Ghashghaei Nejad, H. Rasam, S. Sadeghi and B. Shabani: Mathematical Modeling of Non-Premixed Laminar Flow Flames Fed with Biofuel in Counter-Flow Arrangement Considering Porosity and Thermophoresis Effects: An Asymptotic Approach, *Energies* 11 (2018), 11, 2945.
- [132] Spektrum der Wissenschaft: Lexikon der Biologie: Stärke, <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/staerke/63329>, abgerufen am 20. Januar 2020.
- [133] Angrick, M. and D. Rewicki: Die Maillard-Reaktion, *Chemie in unserer Zeit* 14 (1980), 149–157.
- [134] Dyer, A.: *An Introduction to Zeolite Molecular Sieves*, Wiley, Chichester [u.a.], 1988.
- [135] Hüttenbrenner, K., C. Donner, H. Kern and H. Raupenstrauch: Investigations on the influence of the specific surface on the ignition and flame behavior of combustible

- dust/air-mixtures. In : Brochure of 11th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), 66.
- [136] Zeolithwelt GmbH: Natural Zeolite - Datasheet, 2019. Available online at www.zeolithwelt.de.
- [137] Spektrum der Wissenschaft: Lexikon der Physik, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/gluehfarben/5991>, abgerufen am 14. August 2020.
- [138] Bidabadi, M., H. Beidaghy Dizaji, F. Faraji Dizaji and S. A. Mostafavi: A parametric study of lycopodium dust flame, *J Eng Math* 92 (2015), 1, 147–165.
- [139] Mostafavi, S. A., S. Salavati, H. B. Dizaji and B. Mehdi: Pyrolysis and combustion kinetics of lycopodium particles in thermogravimetric analysis, *J. Cent. South Univ.* 22 (2015), 9, 3409–3417.
- [140] Liu, X., Y. Wang, L. Yu, Z. Tong, L. Chen, H. Liu and X. Li: Thermal degradation and stability of starch under different processing conditions, *Starch/Stärke* 65 (2013), 1-2, 48–60.
- [141] Zhao, M., B. Li, J.-X. Cai, C. Liu, K. G. McAdam and K. Zhang: Thermal & chemical analyses of hydrothermally derived carbon materials from corn starch, *Fuel Processing Technology* 153 (2016), 43–49.
- [142] Wang, Y., G. Tang, J. Zhao and Y. Han: Investigation on the Explosion and Combustion of Various Carbon–Starch Blended Dust, *Starch/Stärke* 72 (2020), 3-4, 1900136.
- [143] Wang, B., S. Sharifian, A. Surendar, L. K. Ilyashenko and E. Yaghoubi: Analytical Simulation of the Cloud Combustion of Corn Starch Microparticles, *Chem. Eng. Technol.* 42 (2019), 12, 2485–2492.
- [144] Hüttenbrenner, K., H. Kern, M. Stockinger and H. Raupenstrauch: Effects of melting inert particulate additives on ignition and flame propagation in dust/air mixtures. In : HAZARDS30.
- [145] Austrian Standards: ÖNORM EN 15414-3:2011 Feste Sekundärbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes unter Verwendung des Verfahrens der Ofentrocknung - Teil 3: Wassergehalt in gewöhnlichen Analysenproben.
- [146] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 66165-2:2016-08 Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Teil 2: Durchführung.

- [147] Kongoi, C., R. Go, R. S. Pungga and H. M. Kader: Variations in spore and sporangium surface structure of the fern-allies lycopodiaceae p. beauv. ex mirbel in Malaysia, *Jurnal Biosains* 18 (2007), 2.

Anhang A - Charakterisierung Lykopodium

Chem. Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung des für die vorliegende Arbeit verwendeten *Lycopodium clavatum* ist in Tabelle 12 zu entnehmen. Die Bestimmung des Wassergehaltes wurde mit Hilfe des Verfahrens der Ofentrocknung nach ÖNORM EN 15414-3:2011 [145] bestimmt. Diese bezieht sich auf den Anlieferungszustand der Probe.

Tabelle 12: Chemische Zusammensetzung *Lycopodium clavatum*

Chemische Zusammensetzung	
C	64,84 Massen%
H	9,46 Massen %
N	1,15 Massen %
Brennwert H _o	31.168 kJ/kg
Flüchtige Bestandteile	91,77 %
Wassergehalt	2,37 %

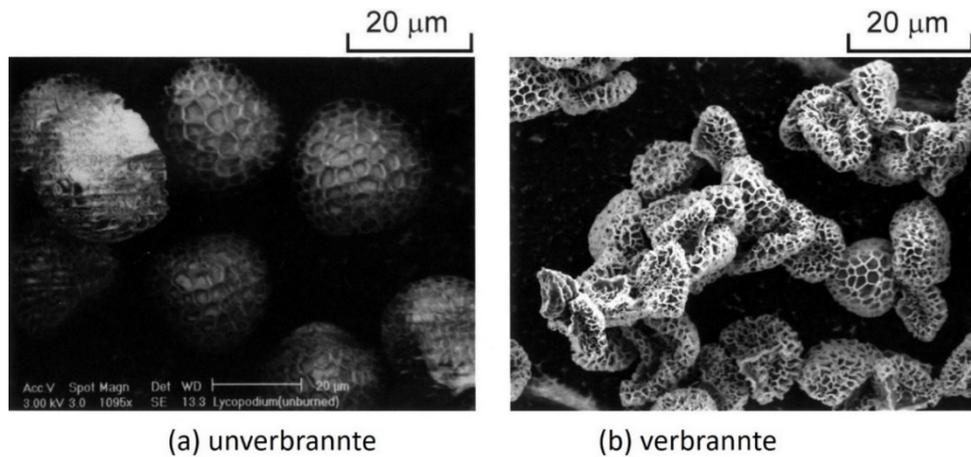


Abbildung 94: Lycopodium-Partikeln vor und nach der Verbrennung, aufgenommen von Han et al. [30]

Um die Feuchtaufnahme nach der Trocknung des verwendeten Staubes feststellen zu können, wurde die Feuchtaufnahme auf Grundlage einer getrockneten Probe erfasst. Hierzu wurde einerseits die Feuchtaufnahme einer geringen Staubschicht in einer Petrischale aufgezeichnet, andererseits in einer Zylinderschale (Durchmesser 21,8 mm, Höhe 41,3 mm) mit ca. 2 cm Schichtdicke. Ergebnisse der Untersuchungen zur Feuchtaufnahme der trockenen Probe ist in Abbildung 95 ersichtlich. Die Versuchsserie wurde bei einer Umgebungstemperatur von 24,5 °C, einer Luftfeuchte von 35 %rF und einem Luftdruck von 1015 mbar durchgeführt.

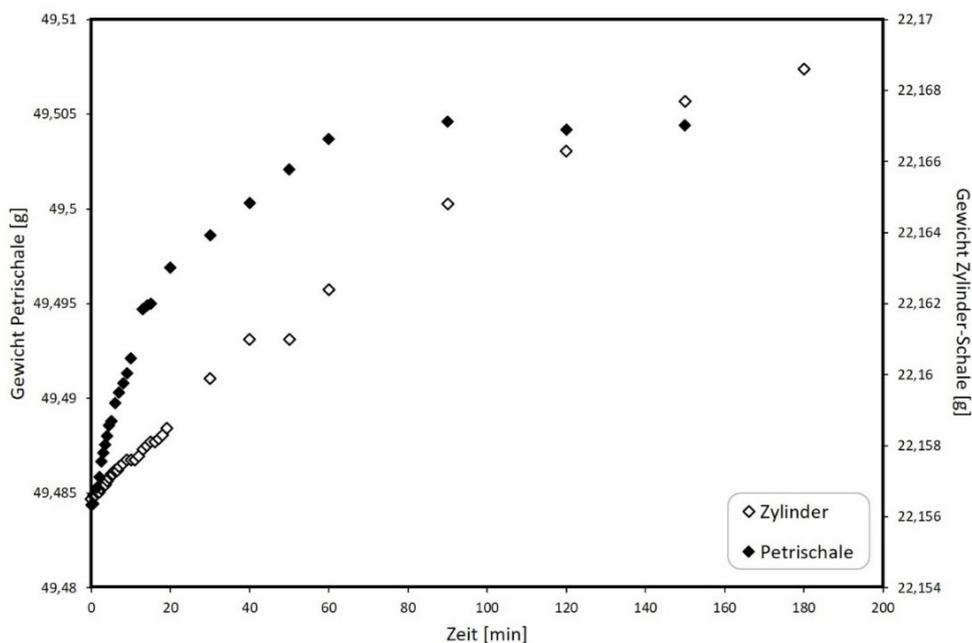


Abbildung 95: Ergebnisse der Untersuchungen zur Feuchtaufnahme von trockenen *Lycopodium clavatum*-Proben, in der Petrischale (gefüllte Quadrate) und im Zylinder-Behälter (leere Quadrate)

Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung des verwendeten Staubes wurde durch eine Siebanalyse nach DIN 66165-2: 2016 [146] bestimmt. Das Ergebnis der Summenverteilung ist in Abbildung 96 ersichtlich, die Verteilungsdichte in Abbildung 97.

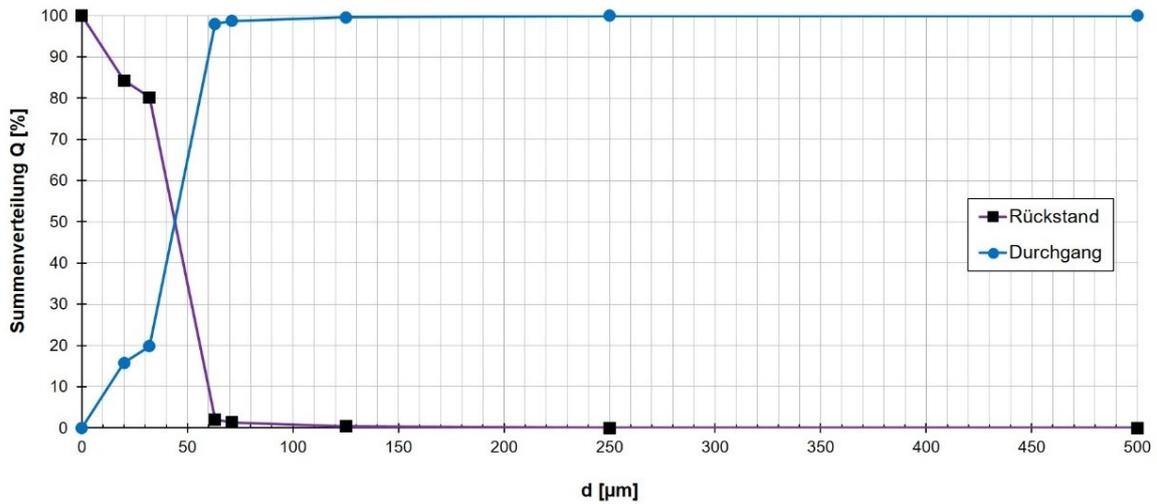


Abbildung 96: Summenverteilung *Lycopodium clavatum*

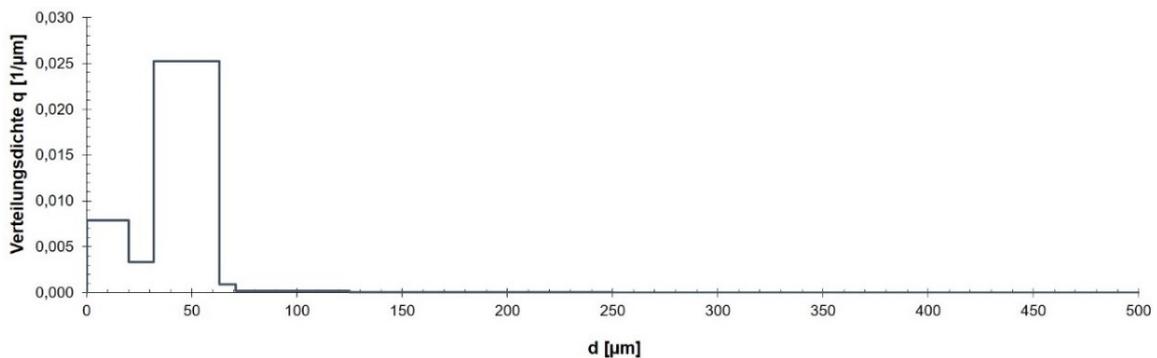


Abbildung 97: Verteilungsdichte *Lycopodium clavatum*

Mindestzündenergie

Prüfergebnis zur MZE von Lycopodium findet sich anschließend.



Montanuniversität Leoben - Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Produkt: **Lycopodium clavatum**

Kunde: Hüttenbrenner

Prüfgrund: MZE

Produktherkunft:

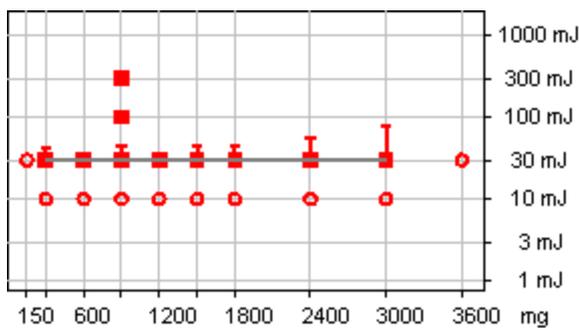
Vorbereitung: Anlieferungszustand

Medianwert:

Mindestzündenergie

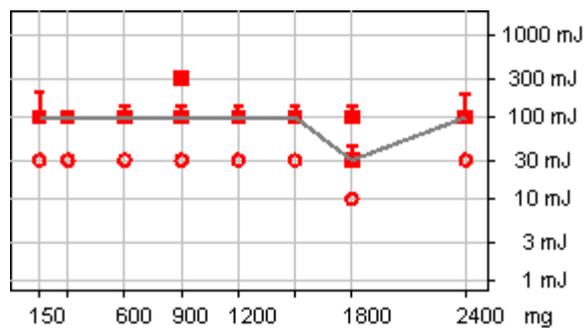
Resultat mit Induktivität L = 1 mH

10 mJ < MZE < 30 mJ / Es = 13 mJ



Resultat ohne Induktivität L = 0 mH

10 mJ < MZE < 30 mJ / Es = 27 mJ



E2 [mJ]:	30	E2 [mJ]:	30
Es [mJ]:	13	Es [mJ]:	27
E1 [mJ]:	10	E1 [mJ]:	10
tv [ms]:	120	tv [ms]:	120

K_{ST}-Wert

Prüfergebnis zum K_{ST}-Wert von Lycopodium findet sich anschließend.

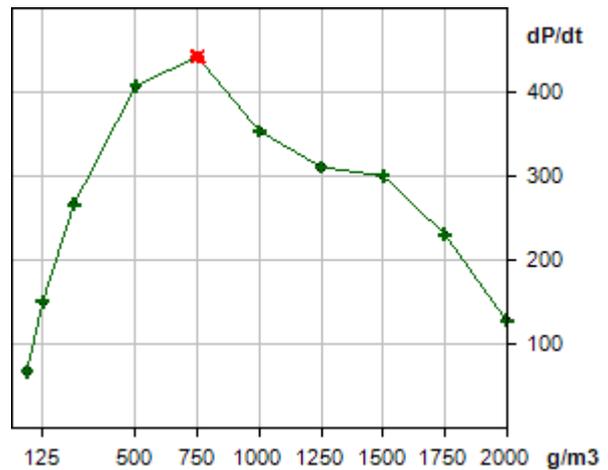
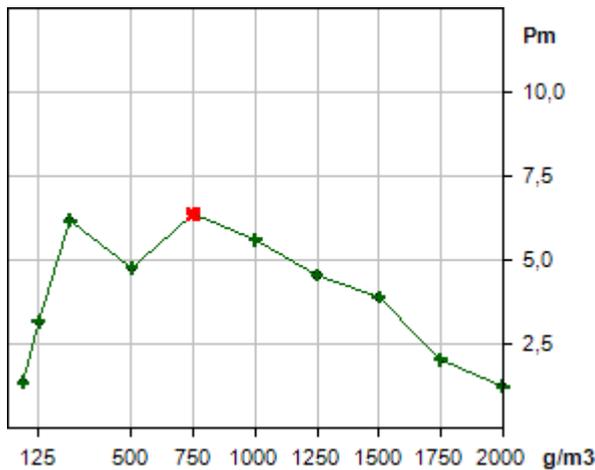


Montanuniversität Leoben - Thermoprozesstechnik

Sample:	<i>Lycopodium clavatum</i>
Customer:	Hüttenbrenner
Reason:	K _{ST} -Wert, P _{max} , (dp/dt) _{max}
Data to sample origin:	
Preparation of sample:	Anlieferungszustand
Median value:	

Explosion Characteristics

Max. explosion pressure:	P _{max}	=	6,4 bar	± 10%
Max. rate of pressure rise:	(dP/dt) _{max}	=	442 bar / s	± 12%
Product specific constant:	K _{max}	=	120 m·bar / s	± 12%



Mindestzündtemperatur

Die Mindestzündtemperatur von Lykopodium mit einer Korngröße kleiner $63 \mu\text{m}$ wird in der GESTIS-STAU-EX Datenbank der IFA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung – zwischen 390° und 440°C , untersucht im BAM-Ofen, angegeben. [91]

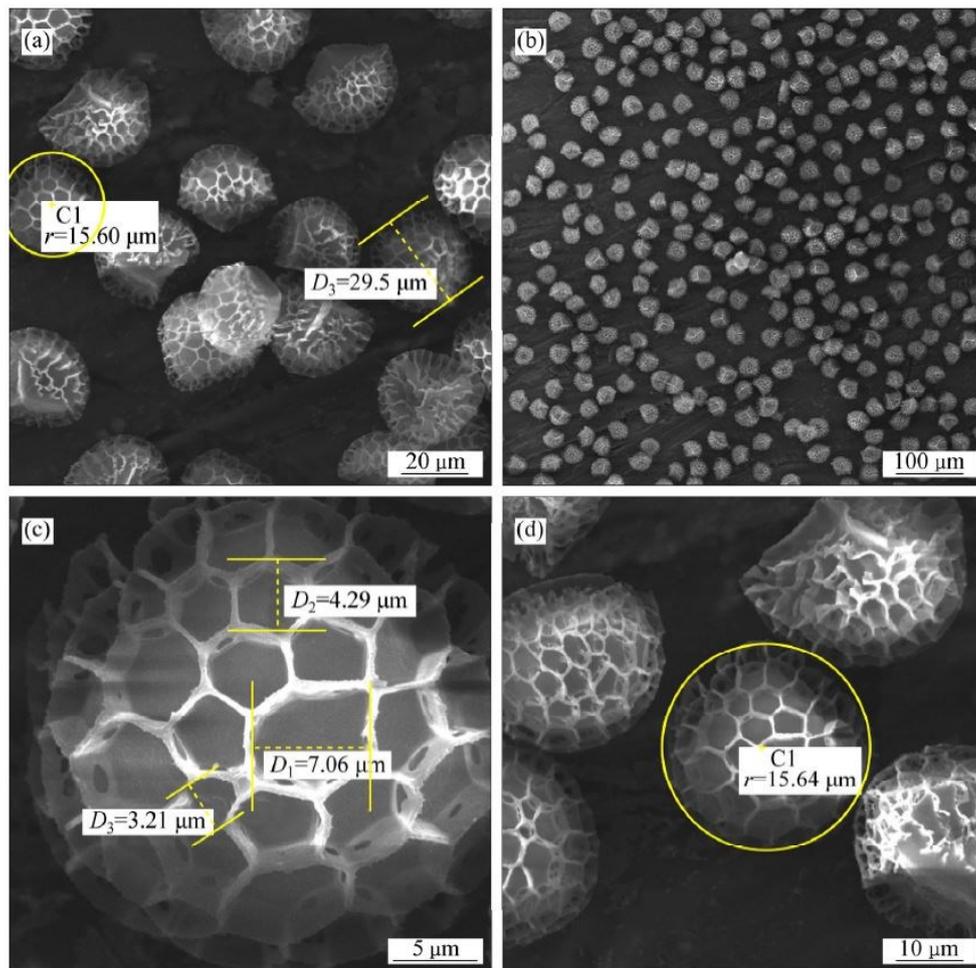


Abbildung 98: REM-Aufnahmen von Lykopodium bei 25°C , aufgenommen von Mostafavi et al. [139]

Anhang B - Charakterisierung Maisstärke

Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung der für die vorliegende Arbeit verwendeten Maisstärke ist Tabelle 13 zu entnehmen. Die Bestimmung des Wassergehaltes wurde mit Hilfe des Verfahrens der Ofentrocknung nach ÖNORM EN 15414-3:2011 [145] bestimmt. Diese bezieht sich auf den Anlieferungszustand der Probe.

Tabelle 13: Chemische Zusammensetzung Maisstärke

Chemische Zusammensetzung	
C	39,2 Massen%
H	6,70 Massen%
N	0,12 Massen%
S	0,07 Massen%
Brennwert H _o	9.400 J/g
Wassergehalt	8,46 %

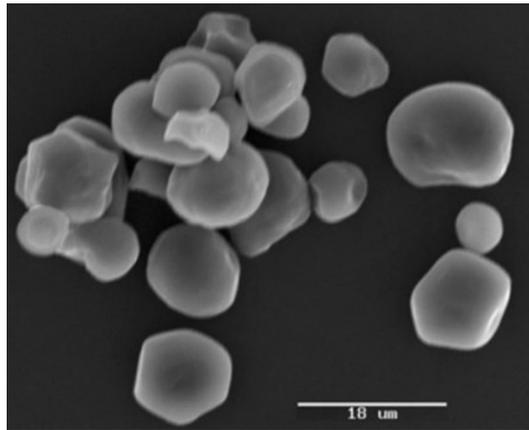


Abbildung 99: REM-Aufnahme von Maisstärke-Partikeln der Type Meritena A nach Skjold [58]

Um die Feuchtaufnahme nach der Trocknung des verwendeten Staubes feststellen zu können, wurde die Feuchtaufnahme auf Grundlage einer getrockneten Probe erfasst. Hierzu wurde einerseits die Feuchtaufnahme einer geringen Staubschicht in einer Petrischale aufgezeichnet, andererseits in einer Zylinderschale (Durchmesser 21,8 mm, Höhe 41,3 mm) mit ca. 2 cm Schichtdicke. Ergebnisse der Untersuchungen zur Feuchtaufnahme der trockenen Probe ist in Abbildung 100 ersichtlich. Die Versuchsserie wurde bei einer Umgebungstemperatur von 24,5 °C, einer Luftfeuchte von 35 %rF und einem Luftdruck von 1015 mbar durchgeführt.

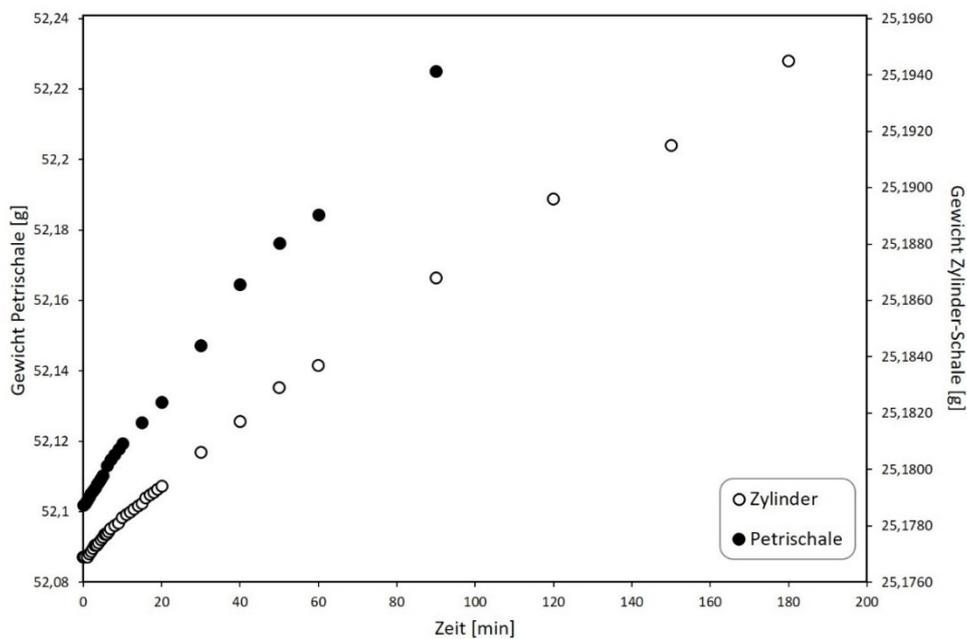


Abbildung 100: Ergebnisse der Untersuchungen zur Feuchtaufnahme von trockenen Maisstärke-Proben, in der Petrischale (gefüllte Kreise) und im Zylinder-Behälter (leere Kreise)

Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung des verwendeten Staubes wurde durch eine Siebanalyse nach DIN 66165-2: 2016 [146] bestimmt. Das Ergebnis der Summenverteilung ist in Abbildung 101 ersichtlich, die Verteilungsdichte in Abbildung 102.

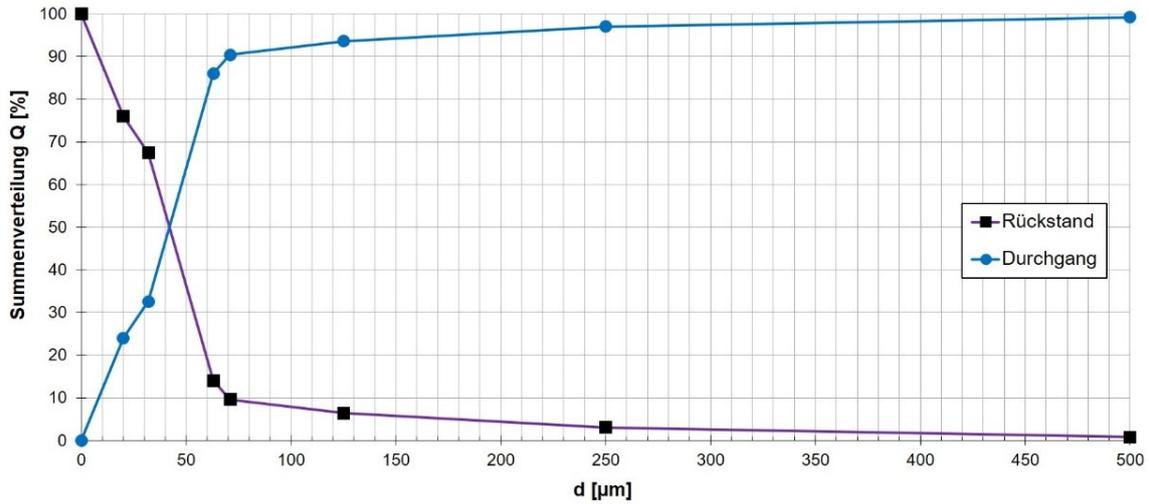


Abbildung 101: Summenverteilung Maisstärke

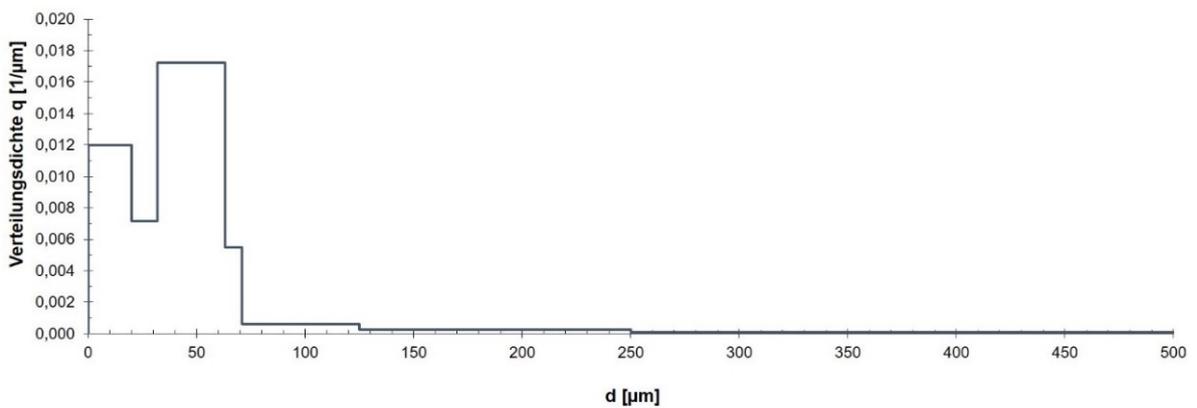


Abbildung 102: Verteilungsdichte Maisstärke

K_{ST}-Wert

Prüfergebnis zum K_{ST}-Wert von Maisstärke findet sich anschließend.

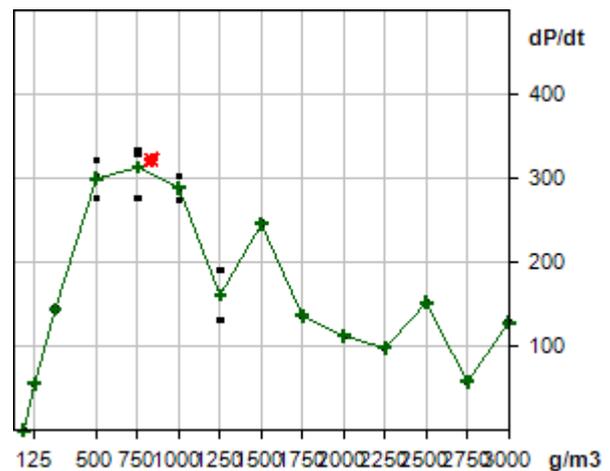
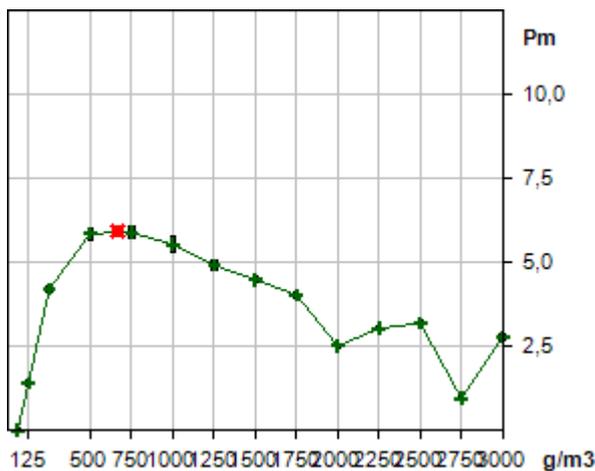


Montanuniversität Leoben - Thermoprozesstechnik

Sample:	Maisstärke Agenasorb P020
Customer:	Hüttenbrenner
Reason:	K _{ST} -Wert, P _{max} , (dp/dt) _{max}
Data to sample origin:	
Preparation of sample:	Anlieferungszustand
Median value:	

Explosion Characteristics

Max. explosion pressure:	P _{max}	=	5,9 bar	± 10%
Max. rate of pressure rise:	(dP/dt) _{max}	=	322 bar / s	± 20%
Product specific constant:	K _{max}	=	87 m·bar / s	± 20%



Mindestzündtemperatur

Die Mindestzündtemperatur nach Normprüfung im Godbert-Greenwald-Ofen wurde von der Universität Magdeburg durchgeführt und lieferte einen Wert von 380 °C bei Durchführung der Versuche im Anlieferungszustand (Wassergehalt 8,46 %, Korngrößenverteilung nach Abbildung 101).

Anhang C - Charakterisierung *Lycopodium casuarinoides*

Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung des für die vorliegende Arbeit verwendeten Lycopodiums *casuarinoides* ist Tabelle 14 zu entnehmen. Die Bestimmung des Wassergehaltes wurde mit Hilfe des Verfahrens der Ofentrocknung nach ÖNORM EN 15414-3:2011 [145] bestimmt. Diese Bezieht sich auf den Anlieferungszustand der Probe.

Tabelle 14: Chemische Zusammensetzung *Lycopodium casuarinoides*

Chemische Zusammensetzung	
C	55,50 Massen %
H	8,54 Massen %
N	0,84 Massen %
Brennwert H _o	25.320 kJ/kg
Flüchtige Bestandteile	88,81 %
Wassergehalt	4,62 %



Abbildung 103: Struktur von *Lycopodium casuarinoides* [147]

Um die Feuchtaufnahme nach der Trocknung des verwendeten Staubes feststellen zu können, wurde die Feuchtaufnahme auf Grundlage einer getrockneten Probe erfasst. Hierzu wurde einerseits die Feuchtaufnahme einer geringen Staubschicht in einer Petrischale aufgezeichnet, andererseits in einer Zylinderschale (Durchmesser 21,8 mm, Höhe 41,3 mm) mit ca. 2 cm Schichtdicke. Ergebnisse der Untersuchungen zur Feuchtaufnahme der trockenen Probe ist in Abbildung 104 ersichtlich. Die Versuchsserie wurde bei einer Umgebungstemperatur von 24,5 °C, einer Luftfeuchte von 35 %rF und einem Luftdruck von 1015 mbar durchgeführt.

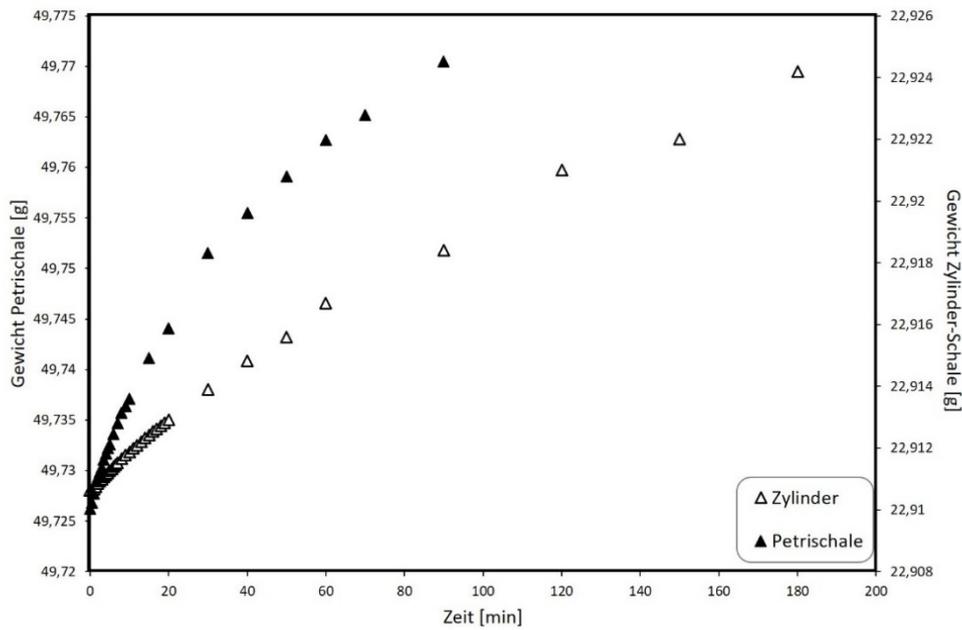


Abbildung 104: Ergebnisse der Untersuchungen zur Feuchtaufnahme von trockenen *Lycopodium casuarinoides*-Proben, in der Petrischale (gefüllte Dreiecke) und im Zylinder-Behälter (leere Dreiecke)

Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung des verwendeten Staubes wurde durch eine Siebanalyse nach DIN 66165-2: 2016 [146] bestimmt. Das Ergebnis der Summenverteilung ist in Abbildung 105 ersichtlich, die Verteilungsdichte in Abbildung 106.

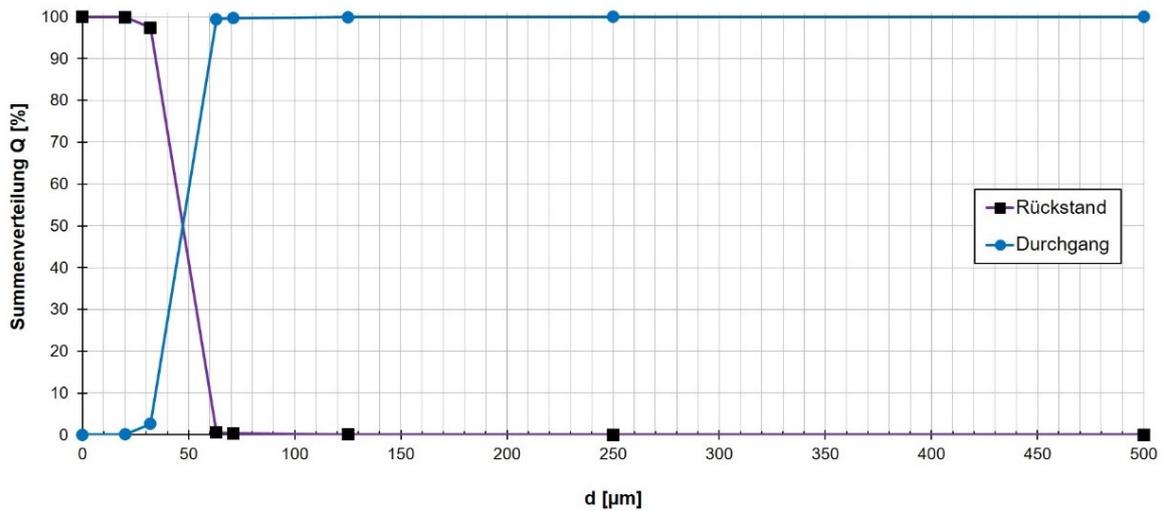


Abbildung 105: Summenverteilung *Lycopodium casuarinoides*

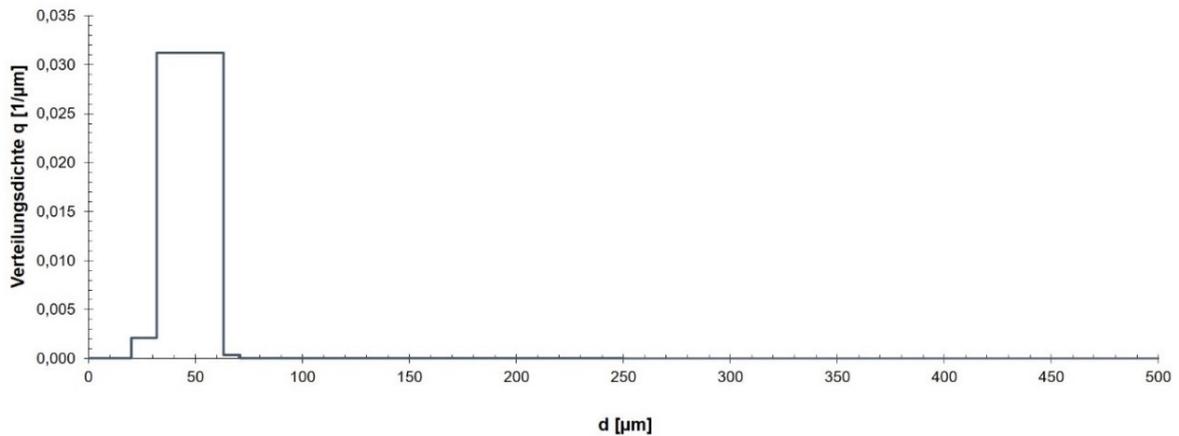


Abbildung 106: Verteilungsdichte *Lycopodium casuarinoides*

Mindestzündenergie

Prüfergebnis zur MZE von *Lycopodium casuarinoides* findet sich anschließend.



Montanuniversität Leoben - Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Produkt: ***Lycopodium casuarinoides***

Kunde: Hüttenbrenner

Prüfgrund: MZE

Produktherkunft:

Vorbereitung: Anlieferungszustand

Medianwert:

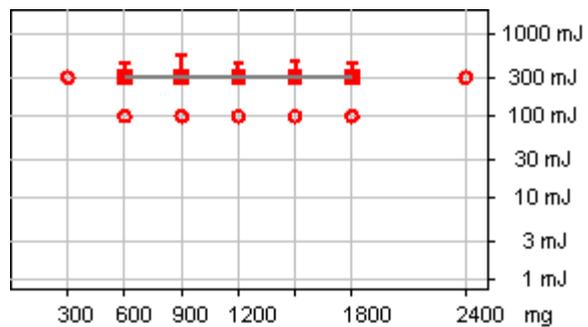
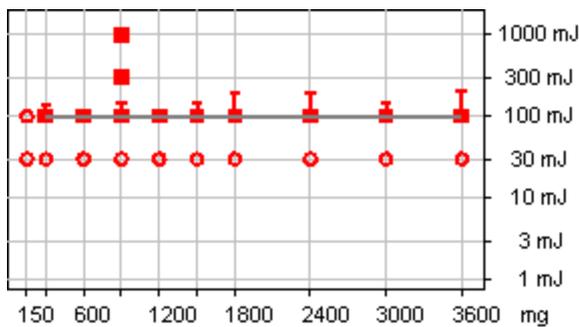
Mindestzündenergie

Resultat mit Induktivität L = 1 mH

Resultat ohne Induktivität L = 0 mH

30 mJ < MZE < 100 mJ / Es = 37 mJ

100 mJ < MZE < 300 mJ / Es = 150 mJ



E2 [mJ]:

100

E2 [mJ]:

300

Es [mJ]:

37

Es [mJ]:

150

E1 [mJ]:

30

E1 [mJ]:

100

tv [ms]:

120

tv [ms]:120

Anhang D -Charakterisierung Zeolith

Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung der für die vorliegende Arbeit verwendeten Zeolithen ist Tabelle 15 und Tabelle 16 zu entnehmen. Die Bestimmung des Wassergehaltes wurde mit Hilfe des Verfahrens der Ofentrocknung nach ÖNORM EN 15414-3:2011 [145] bestimmt. Dieser bezieht sich auf den Anlieferungszustand der Probe und beträgt 4,31 %.

Tabelle 15: Chemische Zusammensetzung Zeolith (Teil 1) [136]

Empirische Formel	(Ca,K ₂ ,Na ₂ ,Mg) ₄ Al ₈ Si ₄₀ O ₉₆ ·24H ₂ O
Fraktion	0,00 – 0,05 mm (0 -50 µm)
Chemische Zusammensetzung	
SiO ₂	67,07 %
Al ₂ O ₃	12,40 %
CaO	2,09 %
K ₂ O	2,80 %
Fe ₂ O ₃	0,90 %
Na ₂ O	2,05 %
TiO ₂	0,19 %
MnO	0,04 %
P ₂ O ₅	0,014 %
MgO	0,72 %
Mineralogische Zusammensetzung	
Clinoptiloith	95,3 %
Feldspat	3 - 4,7 %

Tabelle 16: Chemische Zusammensetzung Zeolith (Teil 2) [136]

Physikalische und Mechanische Eigenschaften	
Porosität	44 %
Effektive Porendurchmesser	0,4 nm (4 Angstrom)
Relative Dichte	70 %
Wasser-Absorptionsfähigkeit	34 – 36 %
pH-Wert	6,8 – 7,2
Ionenaustauschfähigkeit, gesamt	175 meq / 100 g
Reaktivität	
Thermische Stabilität	Bis 450 °C
Toxizität	nontoxic

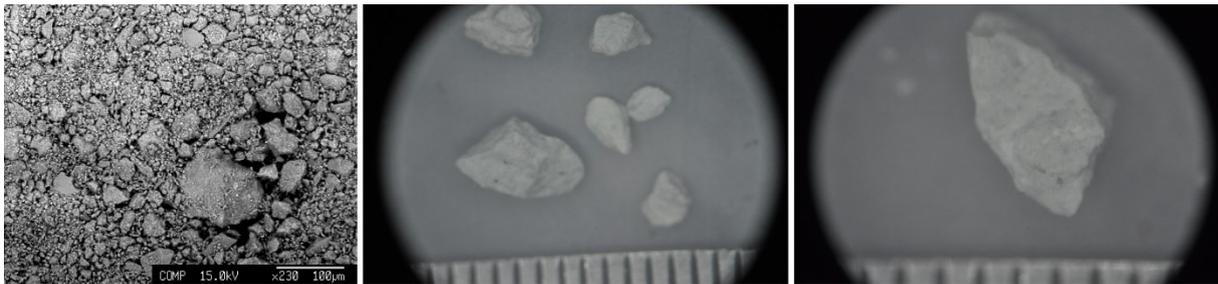


Abbildung 107: Aufnahmen aus dem Rasterelektronenmikroskop von der Firma Paltentaler Splitt & Marmor Werke GmbH

Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung des verwendeten Staubes wurde durch eine Siebanalyse nach DIN 66165-2: 2016 [146] bestimmt. Das Ergebnis der Summenverteilung ist in Abbildung 108 ersichtlich, die Verteilungsdichte in Abbildung 109.

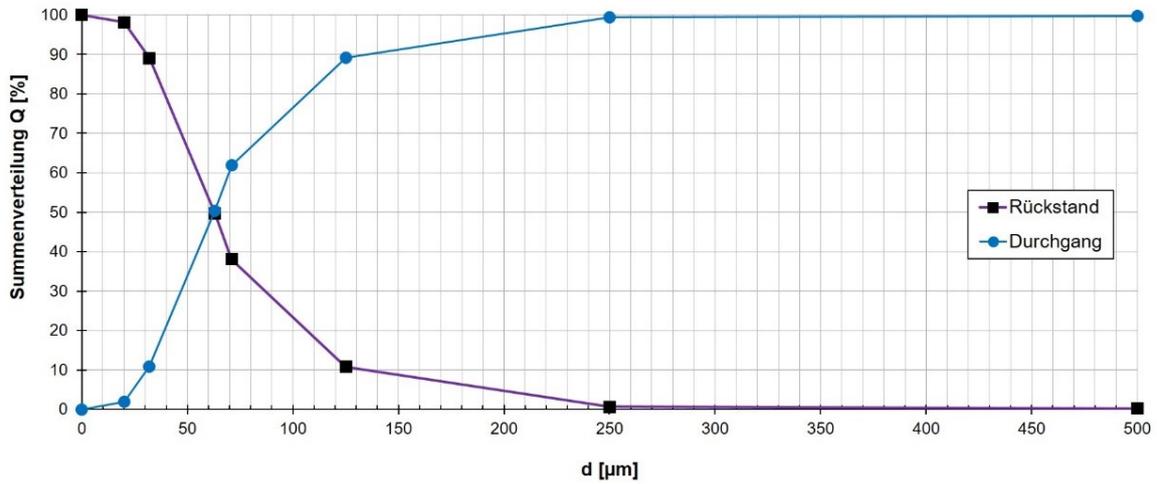


Abbildung 108: Summenverteilung Zeolith

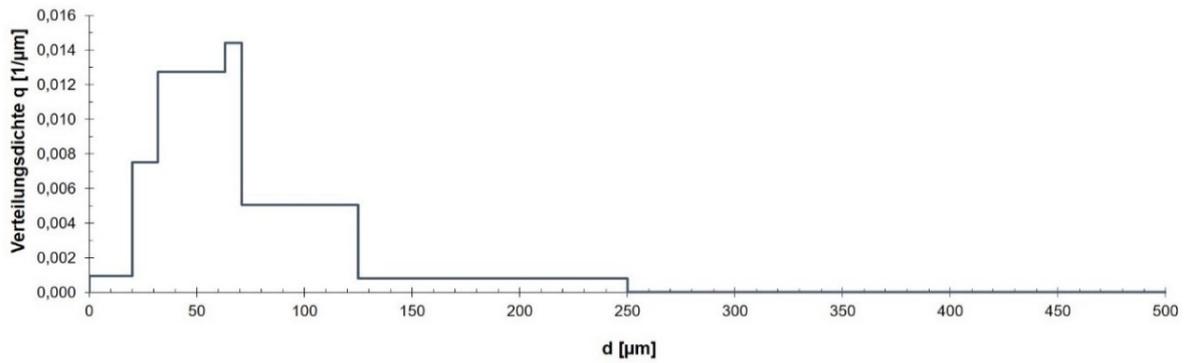


Abbildung 109: Verteilungsdichte Zeolith

Anhang E - Versuchsergebnisse

Ergebnisse Flammengeschwindigkeit Lycopodium

Folgend sind die Messergebnisse der durchgeführten Versuchsserien mit *Lycopodium clavatum* als Versuchsstaub ersichtlich.

Tabelle 17: Versuchsergebnisse *Lycopodium clavatum*, Teil 1

Material:	Lykopodium
Temperatur:	20°C
Luftfeuchte:	70 %rF

Aufbau:	Nr. 1
Datum:	17.06.2020

Versuchsnummer	Förderrate [g/s*Rührer]	V₍₁₂₎ [m/s]	V₍₂₃₎ [m/s]	V₍₃₄₎ [m/s]	arith. Mittel [m/s]
16	0,5	0,35	2,55	4,6	2,5
17	0,5	0,7	1,08	2	1,26
30	0,5	1,31	0,91	1,58	1,27
25	0,55	1,65	0,72	1,35	1,24
26	0,55	1,05	1,06	1,35	1,15
19	0,6	F	1,23	1,37	1,3
11	1	1,57	2,15	1,33	1,68
12	1	1,02	0,95	1,75	1,24
14	1	4,21	1,16	1,65	2,34

Tabelle 18: Versuchsergebnisse *Lycopodium clavatum*, Teil 2

Material:	Lykopodium
Temperatur:	18°C
Luftfeuchte:	73 %rF

Aufbau:	Nr. 1
Datum:	18.06.2020

Versuchsnummer	Förderrate [g/s*Rührer]	$v_{(12)}$ [m/s]	$v_{(23)}$ [m/s]	$v_{(34)}$ [m/s]	arith. Mittel [m/s]
71	1,2	1,77	1,18	2,86	1,94
72	1,2	1,85	1,25	2,56	1,89
73	1,2	0,86	1,56	1,94	1,45
75	1,2	1,87	1,14	3,2	2,07
76	1,5	1,41	1,22	4,88	2,5

Tabelle 19: Versuchsergebnisse *Lycopodium clavatum*, Teil 3

Material:	Lykopodium
Temperatur:	20°C
Luftfeuchte:	58 %rF

Aufbau:	Nr. 2 (Rechen)
Datum:	18.06.2020

Nr.	Förderrate [g/s*Rührer]	V₍₁₂₎ [m/s]	V₍₂₃₎ [m/s]	V₍₃₄₎ [m/s]	V₍₄₅₎ [m/s]	V₍₅₆₎ [m/s]	arith. Mittel [m/s]
82	0,5	0,48	1,25	F	F	F	0,87
84	0,5	0,67	1,18	0,8	0,38	F	0,76
77	1,2	0,76	0,75	1,23	0,82	1,19	0,95
78	1,2	0,65	1,13	1,38	0,92	0,94	1
79	1,2	0,54	0,82	0,95	0,82	0,93	0,81
80	1,2	0,43	F	F	F	1,33	0,88

Ergebnisse Flammengeschwindigkeit Maisstärke

Folgend sind die Messergebnisse der durchgeführten Versuchsserien mit Maisstärke als Versuchsstaub ersichtlich.

Tabelle 20: Versuchsergebnisse Maisstärke, Teil 1

Material:	Maisstärke
Temperatur:	20°C
Luftfeuchte:	70 %rF

Aufbau:	Nr. 1
Datum:	17.06.2020

Versuchsnummer	Förderrate [g/s*Rührer]	V₍₁₂₎ [m/s]	V₍₂₃₎ [m/s]	V₍₃₄₎ [m/s]	arith. Mittel [m/s]
41	2,8	1,76	1,94	2,65	2,12
42	2,8	2,44	2,12	2,68	2,41
43	2,8	1,8	1,65	2,76	2,07
44	2,8	1,88	1,59	2,76	2,07
35	3	3,51	1	3,25	2,59
36	3	2,45	1,81	2,26	2,17
37	3	1,84	1,65	2,13	1,87
40	3	1,75	1,75	2,56	2,02
45	3,2	2,19	1,47	2,17	1,94
46	3,2	2,08	1,57	3,03	2,23
47	3,2	2,6	2	3,28	2,63

Tabelle 21: Versuchsergebnisse Maisstärke, Teil 2

Material:	Maisstärke
Temperatur:	19°
Luftfeuchte:	67 %rF

Aufbau:	Nr. 2 (Rechen)
Datum:	18.06.2020

Nr.	Förderrate [g/s*Rührer]	V₍₁₂₎ [m/s]	V₍₂₃₎ [m/s]	V₍₃₄₎ [m/s]	V₍₄₅₎ [m/s]	V₍₅₆₎ [m/s]	arith. Mittel [m/s]
86	2,8	0,79	1,25	0,9	0,82	1,13	0,98
87	2,8	0,79	2,16	0,84	0,86	2,76	1,48
88	2,8	0,93	1,03	0,89	0,99	1,7	1,11
89	2,8	0,68	1,63	0,84	0,9	2,67	1,34
90	3,2	0,8	1,67	0,92	0,96	2,76	1,42
91	3,2	0,73	1,57	0,93	1,16	1,74	1,22
92	3,2	0,95	2,16	1,11	1,14	2,58	1,59
93	3,2	0,81	2,35	0,76	F	F	1,31
94	5	0,92	4,21	0,77	2,29	1,51	1,94

Ergebnisse Flammengeschwindigkeit Lycopodium mit 10 % Zeolith

Folgend sind die Messergebnisse der durchgeführten Versuchsserien mit einer Mischung aus *Lycopodium casuarinoides* mit 10 % Zeolith als Versuchsstaub ersichtlich.

Tabelle 22: Versuchsergebnisse Lycopodium mit 10 % Zeolith

Material:	10 % Zeolith und Lycopodium	Aufbau:	Nr. 1
Temperatur:	15°C	Datum:	17.06.2020
Luftfeuchte:	80 %rF		

Versuchsnummer	Förderrate [g/s*Rührer]	V ₍₁₂₎ [m/s]	V ₍₂₃₎ [m/s]	V ₍₃₄₎ [m/s]	arith. Mittel [m/s]
54	0,6	Fehler			
60	0,75	Fehler			
49	1	1,4	0,89	1,83	1,38
50	1	Fehler			
51	1	1,39	1,22	1,67	1,43
52	1	1,11	1,17	1,75	1,35
62	1,2	1,88	0,72	0,27	0,96
66	1,2	1,22	1,29	1,42	1,31
68	1,2	1,23	1,33	1,1	1,22
69	1,2	1,41	0,84	2,48	1,58
70	1,5	1,27	1,14	0,78	1,06