

**Forschungsgesellschaft
für angewandte
Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin**



**Rückwirkung von Explosions-
entkopplungs-Systemen auf
den reduzierten Explosions-
überdruck in druckentlasteten
Behältern**

F-05-1501

Projekt F-05-1501

Rückwirkung von Explosionsentkopplungs- Systemen auf den reduzierten Explosionsüber- druck in druckentlasteten Behältern

Dipl.-Ing. Peter Schepp

Ulrike Faißt M.Sc.

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin e.V.

Mannheim, 01.02.2024

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	5
2 Experimentelle Untersuchungen	7
2.1 Kennzahlermittlung	7
2.2 Explosionsversuche	9
2.2.1 Versuchsaufbau, Versuchsdurchführung und Messtechnik	9
2.2.2 Vorversuche, Referenzversuche	10
2.2.3 Explosionsversuche mit Rohrleitung und Explosionsentkopplungs-Systemen – Untersuchte Konfigurationen	12
3. Ergebnisse	13
3.1 Projektstufe 1 – 9,6 m ³ -Explosionsbehälter mit unten angeflanschter Rohrleitung	14
3.2 Projektstufe 2 – 9,6 m ³ -Explosionsbehälter mit oben angeflanschter Rohrleitung	18
3.3 Projektstufe 3 – 5,0 m ³ -Explosionsbehälter mit mittig angeflanschter Rohrleitung	23
3.4 Analyse der Ergebnisse aus den ersten drei Projektstufen	27
3.4.1 Zusammenfassung der Beobachtungen und erste Arbeitshypothese	27
3.4.2 Beeinflussende Parameter	31
3.4.2.1 Einbauabstand und Bauart der Entkopplungseinrichtung	32
3.4.2.2 Einfluss der Rohrleitungsposition und des Behälter-L/D	32
3.4.2.3 Einfluss des Druckniveaus	35
3.4.2.4 Einfluss des Verhältnisses von Rohrleitungsvolumen zu Behältervolumen	36
3.4.2.5 Einfluss der Verbrennungsgeschwindigkeit / des K _{St} -Werts	37
3.5 Hypothesen nach Abschluss von 3 Projektstufen	42
3.6 Ergebnisse der Projektstufen 4 und 5	44
3.6.1 Ergebnisse der Projektstufe vier	44
3.6.2 Ergebnisse der Projektstufe 5	46
3.6.3 Auswertung der Projektstufen 4 und 5 und Schlussfolgerungen aus allen Projektstufen	47
4 Kriterien und Werkzeuge zur Worst-Case-Abschätzung	50
4.1 Zahlenwertgleichung zur Abschätzung der Drucküberhöhung durch die Rückwirkungseffekte einer Explosions-Entkopplungseinrichtung	50
4.2 Abschätzung des kleinsten unkritischen Behältervolumens	54
5 Zusammenfassung	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispielhafte Druck/Zeit-Kurven der gemessenen reduzierten Explosionsüberdrücke im Prüfbehälter (10 m ³ -Explosionsbehälter + Rohrleitung DN 800 der Länge 6 m)	6
Abbildung 2:	Prinzipskizze des Versuchsaufbaus.....	10
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der in den Projektstufen untersuchten Behältergrößen mit Entlastungsfläche, Zündort und Position der Rohrleitung	13
Abbildung 4:	Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m ³ -Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung (reduzierte Explosionsüberdrücke im Explosionsbehälter; gemessene Maximalwerte der einzelnen Versuchsreihen)	15
Abbildung 5:	Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m ³ - Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung und EE2 (Mittelwerte).....	16
Abbildung 6:	Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m ³ - Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung und EE1 (Mittelwerte).....	16
Abbildung 7:	9,6 m ³ - Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung und EE2.....	17
Abbildung 8:	9,6 m ³ - Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung und EE2.....	18
Abbildung 9:	Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m ³ -Behälter mit im oberen Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung (reduzierte Explosionsüberdrücke im Explosionsbehälter; gemessene Maximalwerte der einzelnen Versuchsreihen)	19
Abbildung 10:	Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m ³ - Behälter mit im oberen Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung (Mittelwerte)	20
Abbildung 11:	Einfluss einer im unteren Behälterdrittel angeflanschten Rohrleitung der Länge L = 3 m auf den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck im druckentlasteten 9,6 m ³ -Behälter	21
Abbildung 12:	Einfluss einer im unteren Behälterdrittel angeflanschten Rohrleitung der Länge L = 6 m auf den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck im druckentlasteten 9,6 m ³ -Behälter	22
Abbildung 13:	Einfluss von Rohrleitungen unterschiedlicher Längen mit offenem Ende auf den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck im druckentlasteten 5,0 m ³ -Behälter.....	24
Abbildung 14:	Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen) mit Maisstärke K _{St} 235, normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 5 m ³ -Explosionsbehälter ohne Rohrleitung	25

Abbildung 15: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen) mit Weizenmehl $K_{St} 80$, normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 5 m ³ -Explosionsbehälter ohne Rohrleitung	25
Abbildung 16: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen) mit Weizenmehl $K_{St} 50$ bei hohem p_{red} , normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 5 m ³ -Explosionsbehälter ohne Rohrleitung	27
Abbildung 17: Datensatz eines Versuchs mit Weizenmehl am 5 m ³ -Behälter mit der Entkopplungseinrichtung EE2 an der Position $L = 4,5$ m.....	28
Abbildung 18: Druck/Zeitverlauf im 5 m ³ -Explosionsbehälter bei einem Versuch mit Weizenmehl und EE1 bei 4,5 m. Markiert sind der Zündzeitpunkt, das Ansprechen der Entlastungsfläche sowie das Schließen der Entkopplung. Etwa 4 ms nach dem Schließen der Entkopplung beginnen die hochfrequenten Schwingungen.....	29
Abbildung 19: Vergleich der Drucküberhöhungen als Funktion der normierten Druckanstiegsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Rohrleitungspositionen für getrocknete Maisstärke (oben) und Weizenmehl (unten).....	33
Abbildung 20: Auftragung der Ergebnisse der Versuche mit Weizenmehl auf hohem Druckniveau und niedrigem Druckniveau im Vergleich zu den Versuchen mit Maisstärke. Alle Versuche wurden am 5 m ³ -Behälter durchgeführt.	36
Abbildung 21: Vergleich eines Versuchs mit Maisstärke ($PPF = 0,92$) mit einem Versuch mit Weizenmehl ($PPF = 1,36$). Beide Versuche erfolgten am 9,6 m ³ -Behälter mit Einbauabstand 6 m mit EE1	37
Abbildung 22: Anteil des Stoffumsatzes im Zeitraum bis zum vollständigen Schließen der Entkopplungseinrichtung am Stoffumsatz im Zeitraum bis zu Erreichen von $p_{red, max}$,	39
Abbildung 23: Anteil des Stoffumsatzes im Zeitraum bis zum vollständigen Schließen der Entkopplungseinrichtung am Stoffumsatz im Zeitraum bis zu Erreichen von $p_{red, max}$,	40
Abbildung 24: Anteil des Stoffumsatzes im Zeitraum bis zum vollständigen Schließen der Entkopplungseinrichtung am Stoffumsatz im Zeitraum bis zu Erreichen von $p_{red, max}$,	41
Abbildung 25: Hypothese zur Entstehung überhöhter reduzierter Explosionsüberdrücke im gekoppelten druckentlasteten Behälter durch das Schließen einer Entkopplungseinrichtung	42
Abbildung 26: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen mit dem 26,4 m ³ -Explosionsbehälter, normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 26,4 m ³ -Explosionsbehälter ohne Rohrleitung)	45
Abbildung 27: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen mit dem 1 m ³ -Explosionsbehälter, normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 1 m ³ -Explosionsbehälter ohne Rohrleitung)	46

Abbildung 28: Trend des Einflusses des Verhältnisses von Behältervolumen V_B zu Rohrleitungsdurchmesser A_R	48
Abbildung 29: Abschätzung der Drucküberhöhung aufgrund der Rückwirkung eines Explosions-Entkopplungssystems auf den reduzierten Explosionsdruck im verbundenen druckentlasteten Behälter	52
Abbildung 30: Wie Abbildung 30, jedoch in logarithmischer Auftragung	53
Abbildung 31: Abschätzung des "unkritischen Behältervolumens" einer Installation bestehend aus explosionsdruckentlastetem Behälter, Rohrleitung und Explosions-Entkopplungseinrichtung	55

1 Einleitung

Zu den bewährten und weit verbreiteten Schutzmaßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes zählen die Explosionsdruckentlastung und die Explosionsentkopplung. Erstere schützt nicht explosionsfeste Behälter wie z. B. Silos, Trockner oder Filter durch die Reduzierung des im Falle einer Explosion im Gehäuse entstehenden Überdrucks auf ein der Gehäusesfestigkeit angepasstes Maß. Dies geschieht durch die kontrollierte Freisetzung von brennendem und unverbranntem Material sowie der Verbrennungsprodukte über Entlastungsöffnungen, die sich im Explosionsfall bei Überschreitung eines definierten Ansprechdrucks öffnen. Explosionsentkopplungs-Systeme dienen dazu, die Übertragung einer Explosion vom Entstehungsort über Rohrleitungen oder Kanäle in andere Bereiche der Anlage zu verhindern. Ziel kann dabei sein, sowohl die Druckwelle als auch die Flammenfront aufzuhalten, häufig genügt es aber auch schon, nur die Flammenübertragung und damit das Risiko einer energiereichen Flammenstrahlzündung in nachfolgenden Anlagenteilen zu verhindern.

Beide Schutzmaßnahmen werden in der Regel als autonome Schutzsysteme vertrieben und installiert und sind zunächst einmal unabhängig voneinander. In den einschlägigen harmonisierten europäischen Normen [1 bis 4] sind Verfahren und Kriterien beschrieben, mit Hilfe derer in einer EU-Baumusterprüfung der Nachweis geführt werden kann, dass die Anforderungen der ATEX-Produktrichtlinie 2014/34/EU erfüllt werden und die geprüften Geräte die gewünschte Funktionalität aufweisen. Nach erfolgreicher Baumusterprüfung steht der Verwendung dieser Schutzsysteme nichts mehr im Wege, und zwar auch in jeder beliebigen Kombination – im Rahmen der bestimmungsgemäßen Verwendung, versteht sich. Naheliegenderweise finden sich häufig Szenarien, in welchen die beiden Schutzmaßnahmen in Kombination eingesetzt werden.

In der Praxis kann eine derartige Kombination allerdings unerwartete Nebenwirkungen haben. Bei Versuchen mit Explosionsentkopplungs-Systemen, die über eine Rohrleitung mit einem druckentlasteten Behälter verbunden waren, wurde beobachtet, dass sich das System völlig anders verhält, als es die bekannten Eigenschaften der Einzelkomponenten erwarten ließen: Der im druckentlasteten Explosionsbehälter auftretende reduzierte Explosionsüberdruck nahm erheblich höhere Werte an, sobald eine Explosionsentkopplungseinrichtung (hier eine Rückschlagklappe) über eine Rohrleitung mit dem Behälter verbunden war. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Vergleich der zeitlichen Druckverläufe eines derartigen Versuchs. Zusammen aufgetragen sind die Verläufe der reduzierten Explosionsüberdrücke im Prüfbehälter für die drei Fälle:

- druckentlasteter Behälter ohne Rohrleitung,
- druckentlasteter Behälter mit Rohrleitung und offenem Rohrleitungsende,
- druckentlasteter Behälter mit Rohrleitung und Rückschlagklappe.

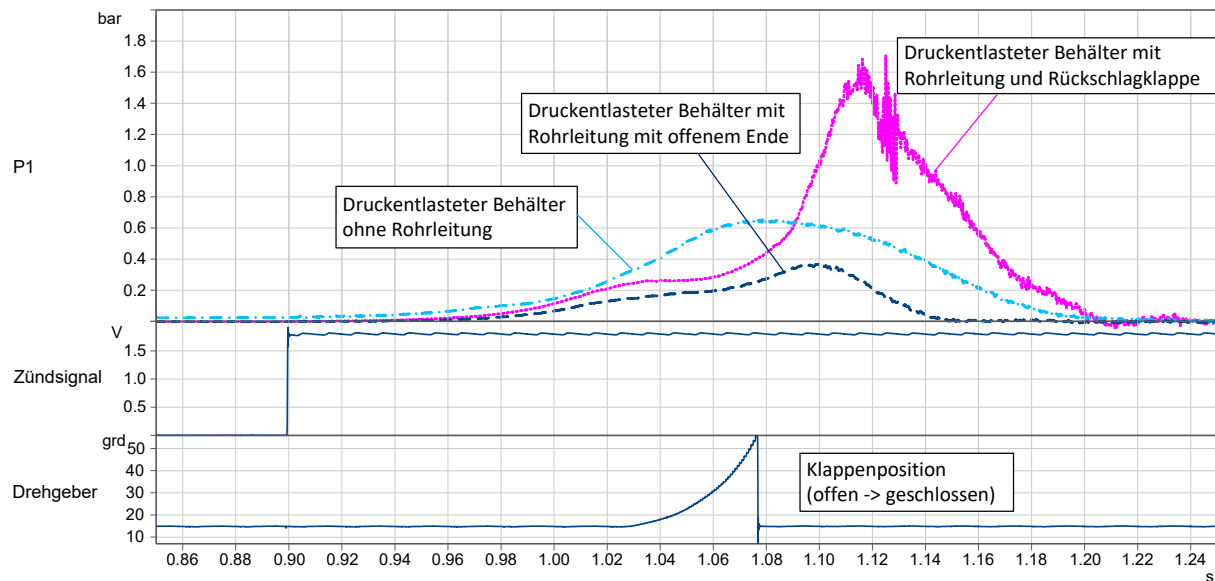


Abbildung 1: Beispielhafte Druck/Zeit-Kurven der gemessenen reduzierten Explosionsüberdrücke im Prüfbehälter (10 m³-Explosionsbehälter + Rohrleitung DN 800 der Länge 6 m)

P1 ist das Signal des Drucksensors im unteren Drittel des Prüfbehälters, das Sprungsignal der Zündspannung gibt den Zeitpunkt an, zu dem die Explosion startet. Ebenfalls aufgetragen ist ein Drehgebersignal, welches die Klappenstellung signalisiert. Der Einfluss der Druckentlastungseinrichtung auf den reduzierten Explosionsüberdruck im druckentlasteten Behälter wird hier eindrucksvoll sichtbar. Im Fall des Versuchs mit Rückschlagklappe folgt der Druckverlauf zunächst erwartungsgemäß demjenigen des Versuchs mit offener Rohrleitung gleicher Länge, wenn auch auf geringfügig höherem Druckniveau aufgrund des Klappendruckverlusts. Ca. 150 ms nach dem Schließen der Rückschlagklappe steigt die Druckanstiegsgeschwindigkeit stark an und auch der maximale Explosionsüberdruck im Behälter nimmt einen deutlich höheren Wert an, und zwar den ca. 2,5-fachen Wert des Explosionsüberdrucks, der im druckentlasteten Behälter ohne Rohrleitung und ohne Rückschlagklappe entstanden war.

Die Auslegung der Druckentlastung eines zu schützenden Behälters erfolgt in der Regel nach EN 14491 auf der Grundlage der staubspezifischen Staubexplosionskonstante K_{St} und dem maximalen Überdruck p_{max} . Damit wird sichergestellt, dass ein definierter reduzierter Explosionsüberdruck $p_{red,max}$ in diesem Behälter nicht überschritten wird. Aus dem beobachteten Geschehen resultiert somit eine erhebliche Gefahrenquelle für die Praxis, wenn dabei die Festigkeit des Behälters und/oder der Entkopplungseinrichtung überschritten werden sollte.

Zur Ergründung der Ursachen dieses Phänomens wurde deshalb ein Forschungsprojekt aufgelegt. Zum besseren Verständnis und ggf. der Berücksichtigung derartiger Drucküberhöhungen bereits bei der Auslegung von Anlagen und Anlagenteilen sollten die Einflussparameter identifiziert und im Experiment auf ihre Wirkung untersucht werden. Dazu zählen u. a. geometrische Parameter, Produkt- und Prozessparameter sowie gerätspezifische Parameter. Mit

Hilfe von explosionstechnischen Untersuchungen sollte erforscht werden, ob für die beobachteten Effekte das Prinzip der Entkopplung allgemein, bestimmte Formen der Entkopplung oder bestimmte Betriebsbedingungen ursächlich sind.

Die Ergebnisse sollen sowohl als Grundlage für die Bewertung bereits umgesetzter Entkopplungsmaßnahmen dienen, als auch in nationales (VDI) und europäisches Regelwerk (CEN/TC/ 305) einfließen. Insbesondere betroffen sind die harmonisierten europäischen Normen EN 15089 "Explosions-Entkopplungssysteme", EN 16447 "Rückschlagklappen zur explosionstechnischen Entkopplung" und EN 14491 "Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen".

2 Experimentelle Untersuchungen

Umfangreiche Vorüberlegungen bildeten die Grundlage für ein Versuchsprogramm mit explosionstechnischen Untersuchungen im Großmaßstab, mit denen das beobachtete Phänomen untersucht wurde. Um den Aufwand für diese Untersuchungen zu reduzieren, ohne die Qualität der Ergebnisse zu mindern, wurde die Anzahl der Versuche auf das notwendige Maß beschränkt.

Derartige Versuche unterscheiden sich von Versuchen im Labormaßstab auch dahingehend, dass ihre Reproduzierbarkeit in der Regel erheblich schlechter ist. Es musste daher immer ein Kompromiss gefunden werden zwischen dem Anspruch auf statistische Absicherung der Ergebnisse und einem vertretbaren Aufwand.

2.1 Kennzahlermittlung

Die Versuche wurden ausschließlich mit sogenannten "organischen" Stäuben durchgeführt, in diesem Fall Maisstärken und Weizenmehl. Diese Stäube repräsentieren viele Anwendungen z. B. in der Lebensmittel- und Futtermittelindustrie. Die gewählten Stäube decken außerdem einen weiten Bereich der explosionstechnischen Kennzahlen K_{St} und Mindestzündenergie MZE ab.

Vor Beginn der eigentlichen Versuche wurden die Explosionskennzahlen der verwendeten Stäube im Staublabor ermittelt. Der maximale Explosionsüberdruck p_{max} und die staubspezifische Kennzahl K_{St} wurden zusätzlich mit dem 1 m³-Prüfbehälter bestimmt, wie in DIN EN 14034-1 und 14034-2 bzw. der VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1 beschrieben.

Aufgrund des ausgedehnten Zeitrahmens des Projektes wurden in den einzelnen Projektstufen Stäube unterschiedlicher Chargen verwendet, welche geringfügig abweichende Kennzahlen aufwiesen. In Tabelle 1 sind die ermittelten Kennzahlen für den jeweilig verwendeten Staub aufgeführt.

In der Projektstufe 1 wurde durch Verlängerung der Zündverzögerungszeit, d. h. Reduzierung der Turbulenz vor der Zündung des Gemisches, zusätzlich ein K-Wert von 70 bar*m/s mit der

Maisstärke simuliert. Dieser Zustand wurde in Anlehnung an die Kennzahlermittlung am 1 m³ bestimmt.

Tabelle 1: Explosionskennzahlen der verwendeten Stäube

	MZE	MZT	UEG	K _{St}
	[mJ]	[°C]	[g/m ³]	[bar m s ⁻¹]
getrocknete Maisstärke	3 < MZE < 10	380	60	230
	3 < MZE < 10	380	125	240
	3 < MZE < 10	n. b.	60	230
	3 < MZE < 10	350	60	225
Weizenmehl	1000	460	125	80
	300 < MZE < 1000	400	n.b.	70
ungetr. Maisstärke	30 < MZE < 100	360	60	150

2.2 Explosionsversuche

2.2.1 Versuchsaufbau, Versuchsdurchführung und Messtechnik

Die Versuche wurden grundsätzlich mit explosionsdruckentlasteten Behältern unterschiedlicher Größe und Geometrie durchgeführt – bei den Vor- und Referenzversuchen ohne bzw. mit angeflanschter Rohrleitung, jedoch ohne Entkopplungseinrichtung. Als Explosionsdruckentlastungseinrichtung diente näherungsweise massenträgheitslose PE-Folie unterschiedlicher Folienstärke, angepasst an die Größe der Entlastungsfläche und den Zielwert des reduzierten Explosionsüberdrucks.

In den Explosionsbehältern wurde eine annähernd homogene, explosionsfähige Staub/Luft-Atmosphäre erzeugt. Die Dispergierung des Materials erfolgte über Kugeldüsen aus mit Druckluft (20 bar) beaufschlagten Staubeintragsbehältern, die mit elektropneumatischen Ventilen ausgestattet waren. Die Zündung erfolgte mit Hilfe pyrotechnischer Zünder mit einem Gesamtenergieinhalt von $2 \times 5000 \text{ J}$ in einem definierten Zeitabstand nach Auslösung des Einblasvorgangs. Diese sogenannte Zündverzögerungszeit bestimmt den Turbulenzzustand des Staub/Luft-Gemischs und beeinflusst damit auch den Ablauf der Staubexplosion maßgeblich. Um die Entstehung eines Vordrucks im Behälter in Folge des Staubeintrags zu vermeiden, waren an den Behältern Einblasdruckentlastungen montiert. Sie wurden in einem zuvor definierten zeitlichen Abstand von 50 ms vor dem Zündzeitpunkt durch Scherkapseln geschlossen.

Zwei Drucksensoren auf unterschiedlichen Höhen dienten der Bestimmung des zeitlichen Explosionsdruckverlaufs im Explosionsbehälter. Die Rohrleitung wurde mit einer Vielzahl näherungsweise äquidistant positionierter Druck- und Infrarotdetektoren bestückt, um die Druckwelle bzw. die Flammenfront möglichst feinauflösend detektieren zu können, Abbildung 2. Die Anzahl der verwendeten Detektoren variierte mit der Länge der Rohrleitung (= Einbauabstand des Explosionsentkopplungs-Systems). Soweit möglich wurden die untersuchten Entkopplungseinrichtungen mit geeigneter Sensorik zur Bestimmung des Schließverhaltens versehen (z. B. Drehgeber auf der Klappenwelle von Rückschlagklappen). Die Aufzeichnung aller Messsignale erfolgte mit einem Transientenrekorder. Zur visuellen Auswertung wurde der Versuchsaufbau mit bis zu drei Kameras (zwei Standardvideokameras mit 50 fps, eine Highspeed-Videokamera mit 1000 fps) unter verschiedenen Blickwinkeln gefilmt.

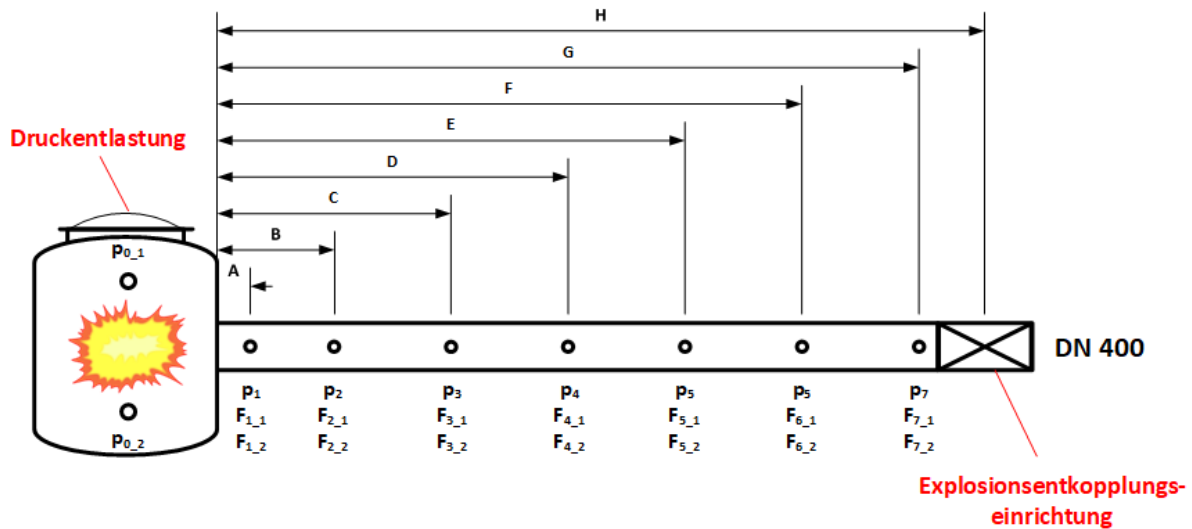


Abbildung 2: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus

2.2.2 Vorversuche, Referenzversuche

Die Vielzahl an Einflussparametern erforderte die sorgfältige Durchführung von Vorversuchen ohne Entkopplungseinrichtungen, um eine belastbare Vergleichsbasis für die Untersuchungen mit den unterschiedlichen Entkopplungseinrichtungen zu erzeugen.

Zunächst mussten die Kombinationen aus Entlastungsfläche A_E , statischem Ansprechdruck p_{stat} der als Entlastungseinrichtung eingesetzten PE-Folie, Staubkonzentration c_{St} und Zündverzögerungszeit t_v ermittelt werden, die benötigt wurden, um die gewünschten Wertepaare (p_{red} , K_{St}) darzustellen. Diese Versuche wurden mit dem jeweiligen druckentlasteten Behälter ohne angeflanschte Rohrleitung durchgeführt. Für die Vergleichbarkeit der Daten wurden die Entlastungsfläche A_E und die Zündverzögerungszeit t_v so gewählt, dass zum Zündzeitpunkt in allen Behältern etwa die gleichen Bedingungen vorlagen, d. h. der auf den jeweiligen Prüfbehälter umgerechnete K_{St} -Wert dem Original- K_{St} -Wert aus der Kennzahlermittlung entsprach. Weiterhin wurden Versuche mit der getrockneten Maisstärke mit einem simulierten K_{St} -Wert, der in etwa dem K_{St} -Wert des verwendeten Weizenmehls entsprach, durchgeführt. Diese Simulation eines Staubes mit niedrigem K_{St} -Wert und niedriger Mindestzündenergie sollte Anhaltspunkte zum Einfluss von K_{St} -Wert und Mindestzündenergie liefern.

Details zur Explosionsdruckentlastung und dem L/D der Explosionsbehälter können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: L/D und Explosionsdruckentlastung der Explosionsbehälter

Behälter- volumen	L/D	Entlastungsfläche A _E (Foliendicke)				
		Getr. Mais- stärke	Maisstärke, niedriger K- Wert simu- liert	Weizenmehl	Weizenmehl, hoher p _{red}	Ungetr. Mais- stärke
[m³]		[m²] ([mm])	[m²] ([mm])	[m²] ([mm])	[m²] ([mm])	[m²] ([mm])
1	1,5	0,071 (2 x 0,04)	-	0,031 (1 x 0,04)	-	0,055 (1 x 0,06)
5	1	0,277 (2 x 0,08)	-	0,17 (1 x 0,15)	0,071 (2 x 0,04)	-
9,6	1,7	0,493 (1 x 0,3)	0,3 (1 x 0,2)	0,3 (1 x 0,2)	-	-
26,4	1,4	0,95 (2 x 0,2)	-	0,534 (1 x 0,2)	-	-

Zu jeder untersuchten Konfiguration wurden Referenzversuche mit dem jeweiligen Explosionsbehälter durchgeführt, und zwar ohne angeflanschte Rohrleitung aber mit Druckentlastung. Der Mittelwert der so ermittelten maximalen reduzierten Explosionsüberdrücke im Prüfbehälter stellt den Bezugswert $p_{red,0}$ dar, auf den die bei den Versuchen mit Rohrleitung und Entkopplungseinrichtung gemessenen maximalen Explosionsüberdrücke $p_{i,max}$ normiert werden, so dass die Erhöhung des reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter aufgrund der Rückwirkungseffekte eines Explosionsentkopplungs-Systems als Vielfaches des Referenzwertes dargestellt werden kann, Tabelle 3.

Tabelle 3: Mittelwerte der in Vorversuchen mit den druckentlasteten Explosionsbehältern ohne angeflanschte Rohrleitung ermittelten Referenzwerte des reduzierten Explosionsüberdrucks $p_{red,0,i}$ [mbar]

K _{St} [bar·m·s ⁻¹]	Weizenmehl		Maisstärke			ungetrocknet
	70/80	50	getrocknet			
Behälter [m³]	p _{red} [mbar]	p _{red} [mbar]	70 (simul.)	180	230/235	125
1,0	350	-	-	-	920	450
5,0	190	710	-	-	770	-
9,6	190	-	250	-	540	-
26,4	250	-	-	530	-	-

Nachdem die grundsätzlichen Einstellparameter gefunden waren, wurden zusätzlich Versuche mit angeflanschten Rohrleitungen unterschiedlicher Längen, sowohl offen als auch blindgeflanscht am Rohrleitungsende, durchgeführt, um den Einfluss der Rohrleitung ohne Entkopplungseinrichtung auf den reduzierten Explosionsüberdruck im Behälter zu bestimmen.

2.2.3 Explosionsversuche mit Rohrleitung und Explosionsentkopplungs-Systemen – Untersuchte Konfigurationen

Die Untersuchungen wurden in mehreren Projektstufen durchgeführt, in denen einzelne Versuchsparameter variiert wurden. Die Gestaltung der insgesamt fünf Projektstufen ergab sich jeweils aus den Untersuchungsergebnissen der vorangegangenen Projektstufen. Grundsätzlich unterscheiden sich die fünf untersuchten Konfigurationen hinsichtlich der Größe der Explosionsbehälter und der Position der angeflanschten Rohrleitung relativ zur Explosionsdruckentlastung und dem Zündort, Abbildung 3. Der Rohrdurchmesser mit $D_R = DN\ 400$ und die Konzentration des brennbaren Staubes im Explosionsbehälter zum Zündzeitpunkt mit $c_{St} = 750\text{ g/m}^3$ waren die einzigen Konstanten über alle Versuche.

Variiert wurden:

- der Typ der Entkopplungseinrichtung
(EE1: Klappenprinzip, EE2: rotationssymmetrisches Axialventil),
- das Volumen des Explosionsbehälters ($26\text{ m}^3 / 9,6\text{ m}^3 / 5\text{ m}^3 / 1\text{ m}^3$),
- die Behältergeometrie ($L/D = 1,0 / 1,4 / 1,5 / 1,7$),
- der Entstehungsort der Explosion im Behälter = Zündort
(Behältermitte bzw. nahe Rohrleitungseintritt),
- die Position der Rohrleitung relativ zum Zündort und zur Druckentlastungsöffnung
(Zündort auf Höhe der Rohrleitung, Zündort zwischen Rohrleitung und Druckentlastungsöffnung, Rohrleitung und Druckentlastungsfläche auf der gleichen Seite relativ zum Zündort; Abbildung 2),
- die Einbauabstände der Entkopplungseinrichtungen
($3\text{ m} / 4,5\text{ m} / 6\text{ m}$, in einer Versuchsreihe 10 m),
- die Explosionscharakteristika der Stäube (p_{max} , K_{St} / MZE),
- das Niveau des reduzierten Explosionsüberdrucks.

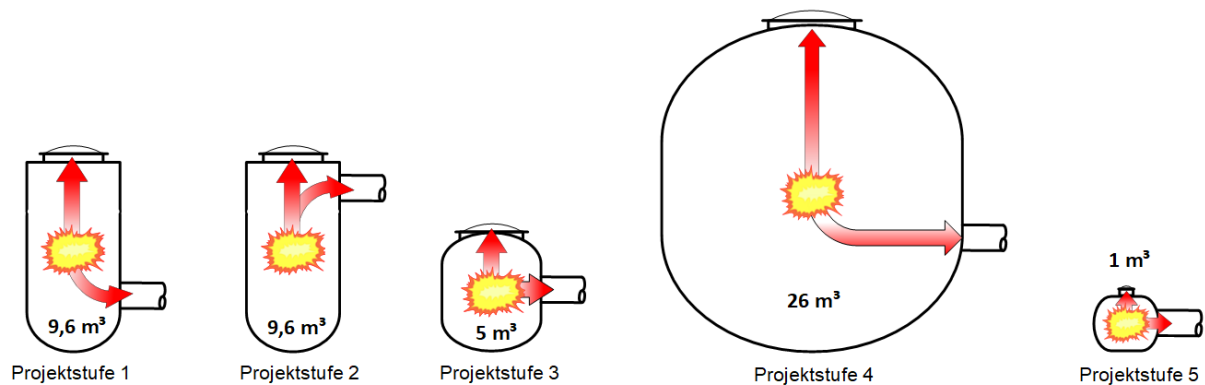


Abbildung 3: Schematische Darstellung der in den Projektstufen untersuchten Behältergrößen mit Entlastungsfläche, Zündort und Position der Rohrleitung

Nach den ersten drei Projektstufen wurde eine Zwischenauswertung vorgenommen. Sie diente der Identifikation möglicher Einflussparameter und dem Aufstellen erster Hypothesen. Die Projektstufen 4 und 5 dienten der Überprüfung und Untermauerung dieser Hypothesen und der Klärung einzelner offener Fragen.

3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse aus den fünf Projektstufen vorgestellt. Wie in Kap. 2.2.2 bereits beschrieben wird in der Regel eine normierte Darstellung der Messwerte gewählt. Die gemessenen maximalen reduzierten Explosionsüberdrücke $p_{i,max}$ in den Prüfbehältern werden auf die in den jeweiligen zugehörigen Vorversuchen ermittelten Referenzwerte $p_{red,0}$ bezogen. Die Erhöhung des reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter aufgrund der Rückwirkungseffekte eines Explosionsentkopplungs-Systems PPF (**P**ressure **P**iling **F**actor) kann dann als Vielfaches des Referenzwertes dargestellt werden:

$$PPF = \frac{p_{i,max}}{p_{red,0}}$$

Diese Vorgehensweise erlaubt den anschaulichen Vergleich des Einflusses der unterschiedlichen untersuchten Konfigurationen auf die beobachteten Rückwirkungseffekte der Entkopplungseinrichtungen und wurde analog auch für Auswertung weiterer potenzieller Einflussparameter verwendet.

Damit ein reduzierter Explosionsüberdruck als Drucküberhöhung aufgrund der Rückwirkungseffekte gewertet werden kann, muss gelten

$$PPF > 1,2$$

Diese Definition wurde gewählt, um der großen Streubreite der Messergebnisse gerecht zu werden, die bei derartigen Explosionsversuchen im Großmaßstab mit $\pm 20\%$ angesetzt werden muss.

3.1 Projektstufe 1 – 9,6 m³-Explosionsbehälter mit unten angeflanschter Rohrleitung

Die Versuche der ersten Projektstufe erfolgten am 9,6 m³-Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung. In 25 von 40 durchgeführten Versuchen konnte eine Erhöhung des maximalen reduzierten Explosionsdruckes gegenüber dem der Vorversuche verzeichnet werden.

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der Maximalwerte der Versuchsreihen aufgetragen über dem Einbauabstand der Entkopplungseinrichtung. Dabei wird hinsichtlich des Staubes und der verwendeten Entkopplungseinrichtung unterschieden. Über alle Versuche wies die Maisstärke K_{St} 70 (simuliert) die höchsten Drucküberhöhungen auf. Bei den Versuchen mit EE1 stieg der reduzierte Explosionsüberdruck im Behälter mit der Lauflänge vom 2,1-fachen bis zum 3-fachen des Referenzwertes an, mit dem Explosionsschutzventil EE2 wurde sogar ein Druckanstieg vom 2,5-fachen bis hin zum 3,9-fachen (Versuch U4) des Referenzwertes detektiert. Auch mit Weizenmehl K_{St} 70 wurden deutliche Drucküberhöhungen festgestellt. Bei den Versuchen mit Maisstärke K_{St} 230 waren die beobachteten Drucküberhöhungen deutlich schwächer ausgeprägt.

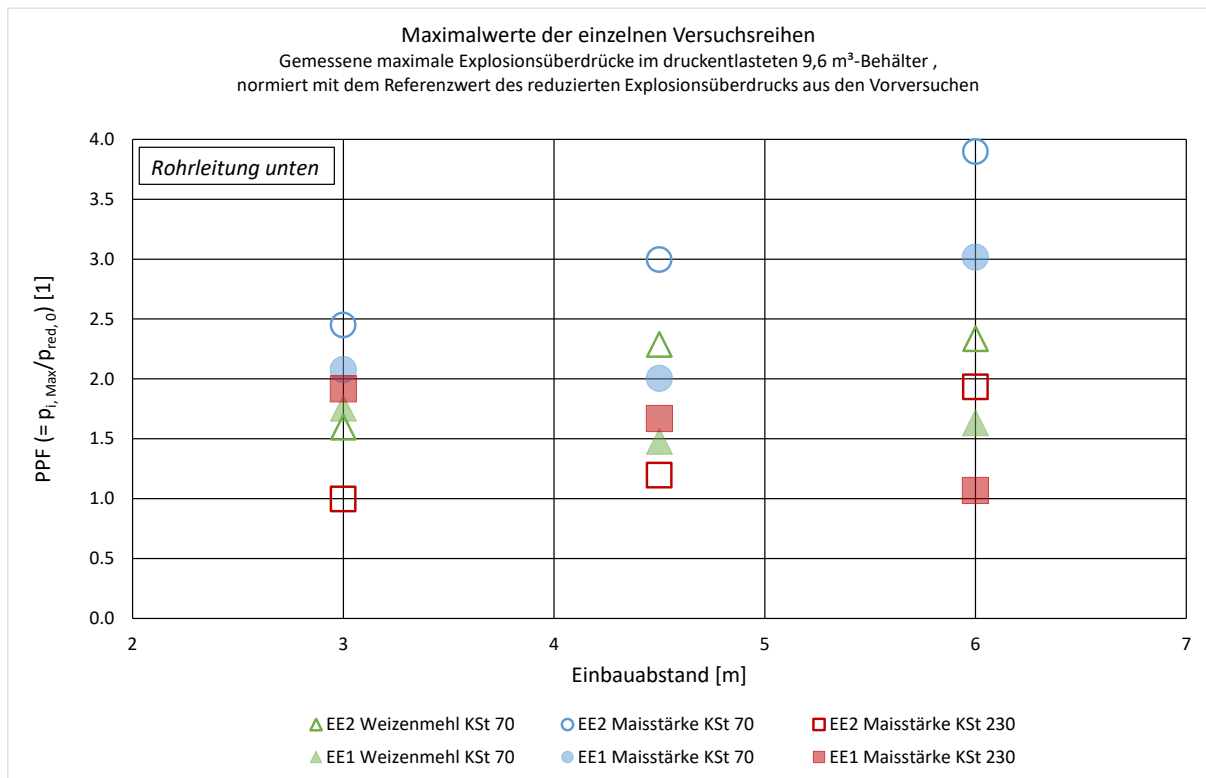


Abbildung 4: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m³-Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung (reduzierte Explosionsüberdrücke im Explosionsbehälter; gemessene Maximalwerte der einzelnen Versuchsreihen)

Betrachtet man die Mittelwerte der gemessenen Maximalwerte der einzelnen Konfigurationen so lässt sich im Fall der EE2 eine klare Tendenz zu stärkeren Drucküberhöhungen mit zunehmendem Einbauabstand erkennen, Abbildung 5. Dieser Effekt ließ sich mit EE1 nicht reproduzieren. Während sowohl bei den Versuchen mit Weizenmehl K_{St} 70 als auch bei den Versuchen mit Maisstärke K_{St} 70 (simuliert) ein Einfluss der Lauflänge erkennbar ist, zeigen die Messwerte der Versuche mit Maisstärke K_{St} 230 überraschenderweise eine gegenläufige Tendenz, Abbildung 6. Eine plausible Erklärung für diese Unterschiede konnte nicht gefunden werden; es deutete sich allerdings damit bereits in einem frühen Stadium der Untersuchungen an, dass ein reproduzierbarer Zusammenhang zwischen den Rückwirkungseffekten und dem Einbauabstand der Entkopplungseinrichtung nicht herzustellen sein würde.

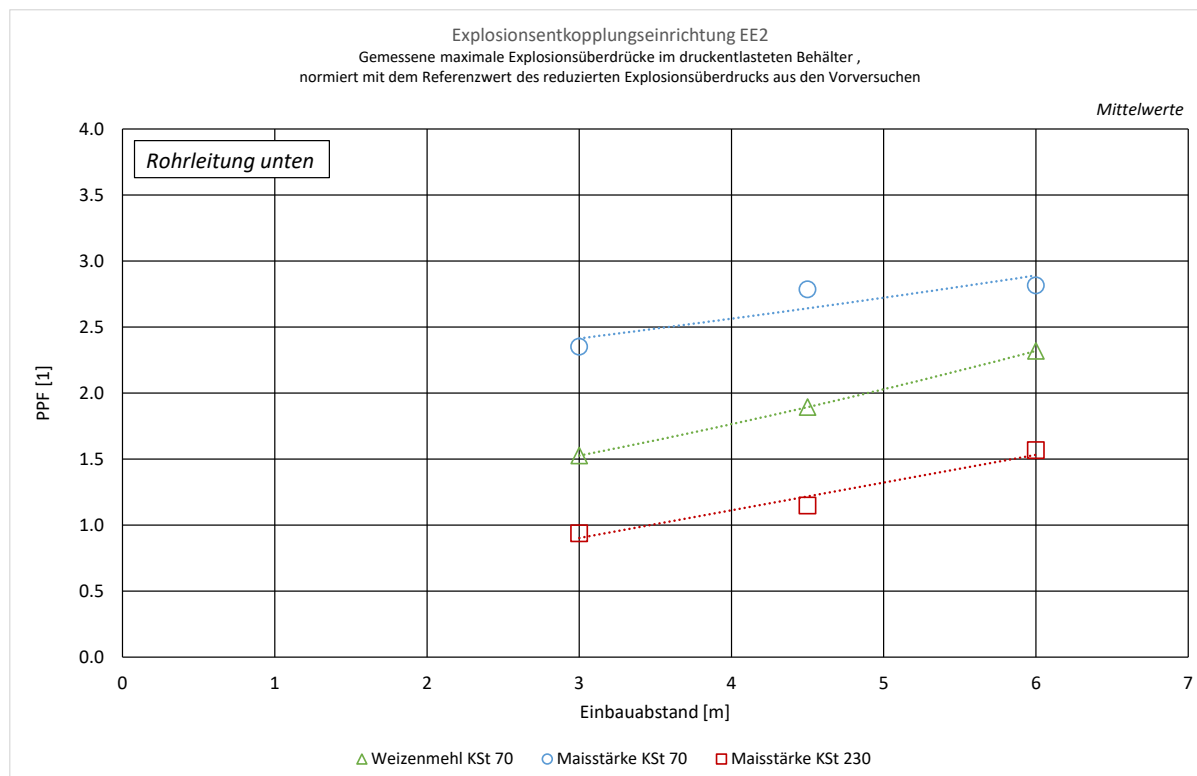


Abbildung 5: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m³- Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung und EE2 (Mittelwerte)

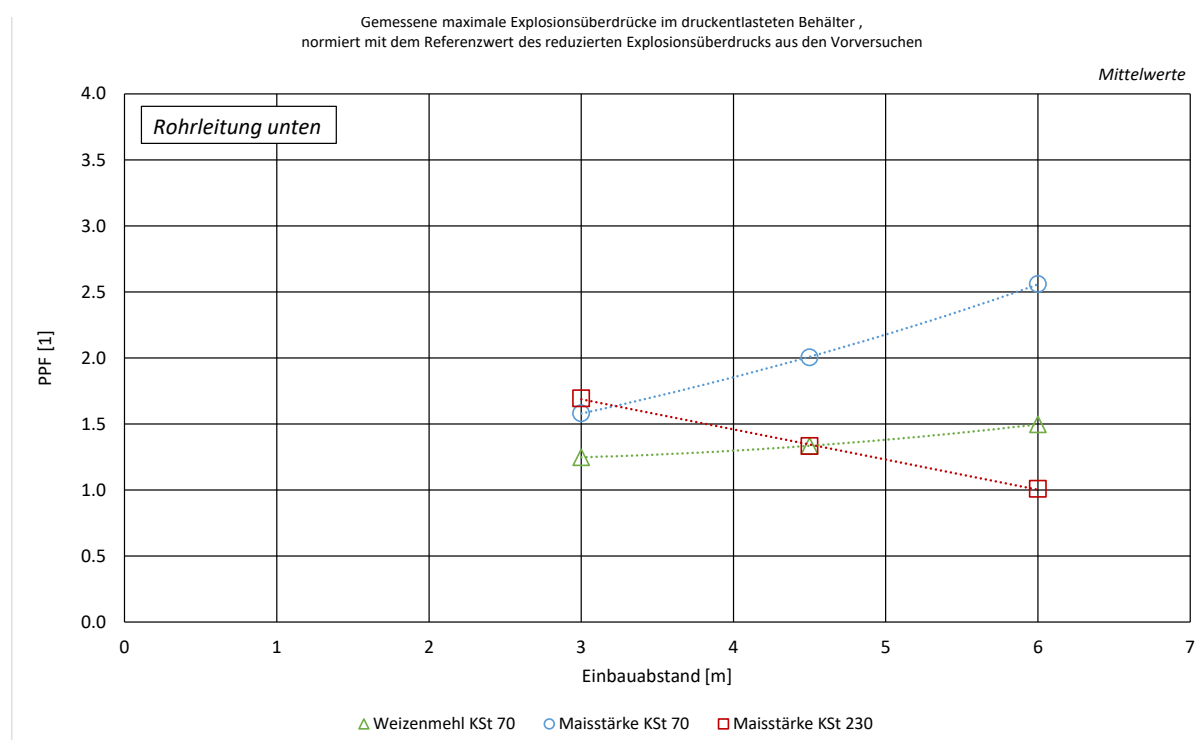


Abbildung 6: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m³- Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung und EE1 (Mittelwerte)

Der Referenzwert des reduzierten Explosionsüberdrucks lag für die Maisstärke mit dem simulierten K_{St} 70 auf einem ähnlichen Niveau wie derjenige für Weizenmehl K_{St} 70. In Abbildung 7 ist er als blaue, gestrichelte Linie dargestellt. Zum Vergleich ist das Referenzniveau für die Maisstärke K_{St} 230 als rote gestrichelte Linie angegeben. In dieser Auftragsung der Maximalwerte der Explosionsüberdrücke aus den Versuchen mit EE2 wird sehr deutlich, dass sich trotz des niedrigeren "Startdrucks" und des nominell deutlich niedrigeren K_{St} -Werts (70 $\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ statt 230 $\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$) die annähernd gleichen Absolutwerte für den reduzierten Explosionsdruck einstellten.

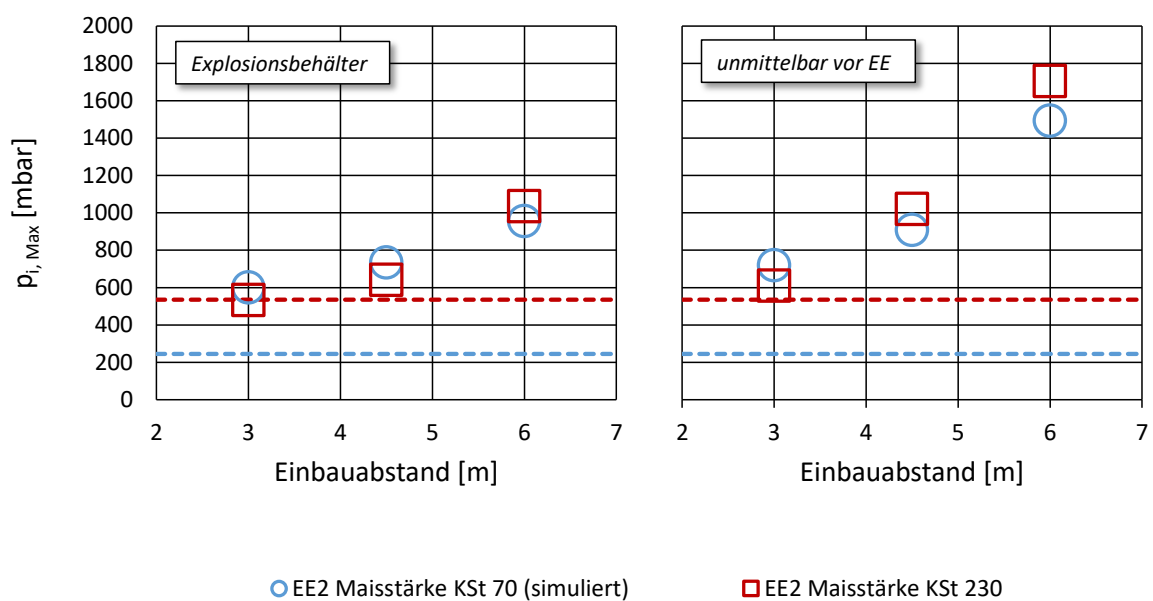


Abbildung 7: 9,6 m³- Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung und EE2
Maximalwerte der einzelnen Versuchsreihen (Absolutwerte)

Relativ betrachtet, bezogen auf den Referenzwert, zeigt sich, dass die Drucküberhöhung PPF mit dem gleichen Staub bei den Versuchen mit dem simulierten K_{St} -Wert erheblich stärker ausfiel als bei den Versuchen mit dem Original- K_{St} -Wert. Auch im Vergleich mit den Ergebnissen der Versuche mit Weizenmehl (Original- K_{St} -Wert: 70 $\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) wurde mit dem "simulierten" Staub eine stärkere Drucküberhöhung beobachtet, Abbildung 8.

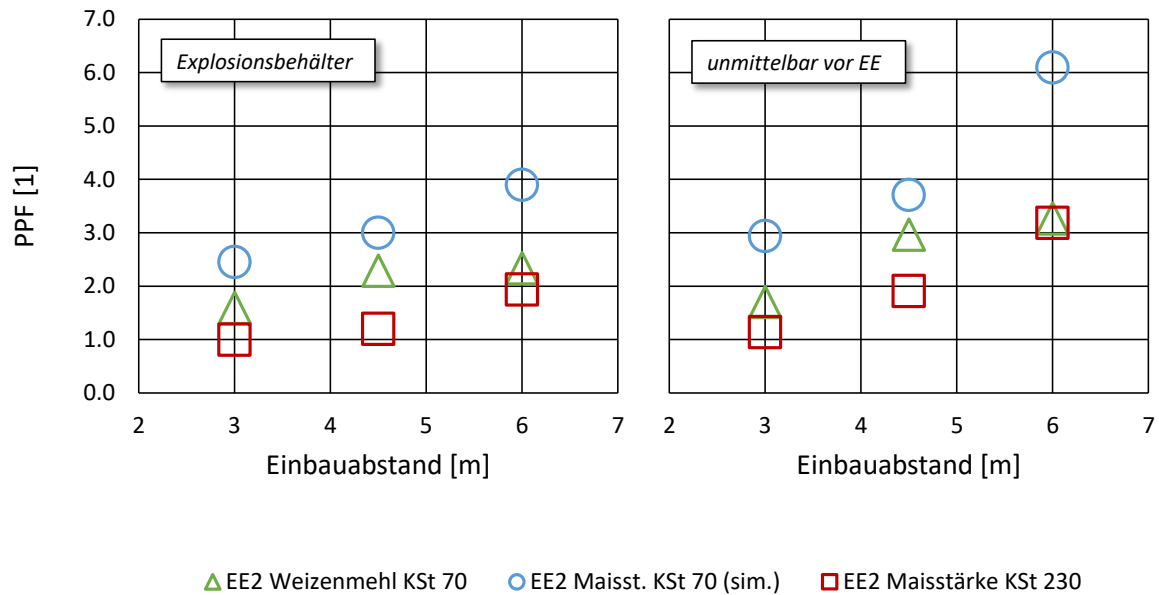


Abbildung 8: 9,6 m³- Behälter mit im unteren Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung und EE2
 Maximalwerte der einzelnen Versuchsreihen, normiert mit dem Referenzwert des reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter aus den Vorversuchen

Daraus lässt sich unmittelbar schließen, dass es für die untersuchten Phänomene unerheblich ist, bei welchem Turbulenzzustand des Staub/Luft-Gemischs die Explosion im Behälter startet. Bestimmend für die Effekte sind vielmehr die Explosionscharakteristika des Staubes, wobei in diesem Fall der K_{St} -Wert tatsächlich als eine Staubeigenschaft betrachtet werden darf. Die "Simulation" eines vom Original- K_{St} -Wert des Staubes abweichenden dp/dt mit Hilfe einer Variation der Zündverzögerungszeit und damit der Anfangsturbulenz des Staub/Luft-Gemischs ist bei der Untersuchung von Explosionsfortpflanzungsvorgängen also nicht zielführend.

3.2 Projektstufe 2 – 9,6 m³-Explosionsbehälter mit oben angeflanschter Rohrleitung

Zur Untersuchung des Einflusses der Rohrleitungsposition mit Entkopplungssystem relativ zur Position der Druckentlastungsfläche wurde die Rohrleitung im oberen Behälterdrittel angeflanscht. Alle übrigen Versuchsparameter wurden unverändert von den bisherigen Versuchen übernommen. Diese Versuchsanordnung differierte damit in zwei wesentlichen Punkten von der bisher untersuchten Situation: Die Eintrittsöffnung in die Rohrleitung lag nahe der Explosionsdruckentlastung und der Zündort (Behältermitte) befand sich nicht mehr zwischen Rohreintritt und Druckentlastungsfläche. Rohrleitung und Druckentlastung waren damit auf der gleichen Seite relativ zum Entstehungsort der Explosion positioniert.

In dieser Konfiguration konnten insgesamt 31 Versuche durchgeführt werden. Von diesen wiesen 10 Versuche eine Drucküberhöhung um mindestens Faktor 1,2 auf. Die weiteren Versuchsergebnisse lagen im Bereich der Referenzversuche oder sogar darunter. Fünf Versuche mit Maisstärke K_{St} 230 erreichten nicht einmal 80 % des Referenzdruckes. Die höchste verzeichnete Drucküberhöhung betrug den Faktor 1,84 bei Versuch AR3 mit Weizenmehl in Kombination mit EE2 in 6 m Einbauabstand, Abbildung 9.

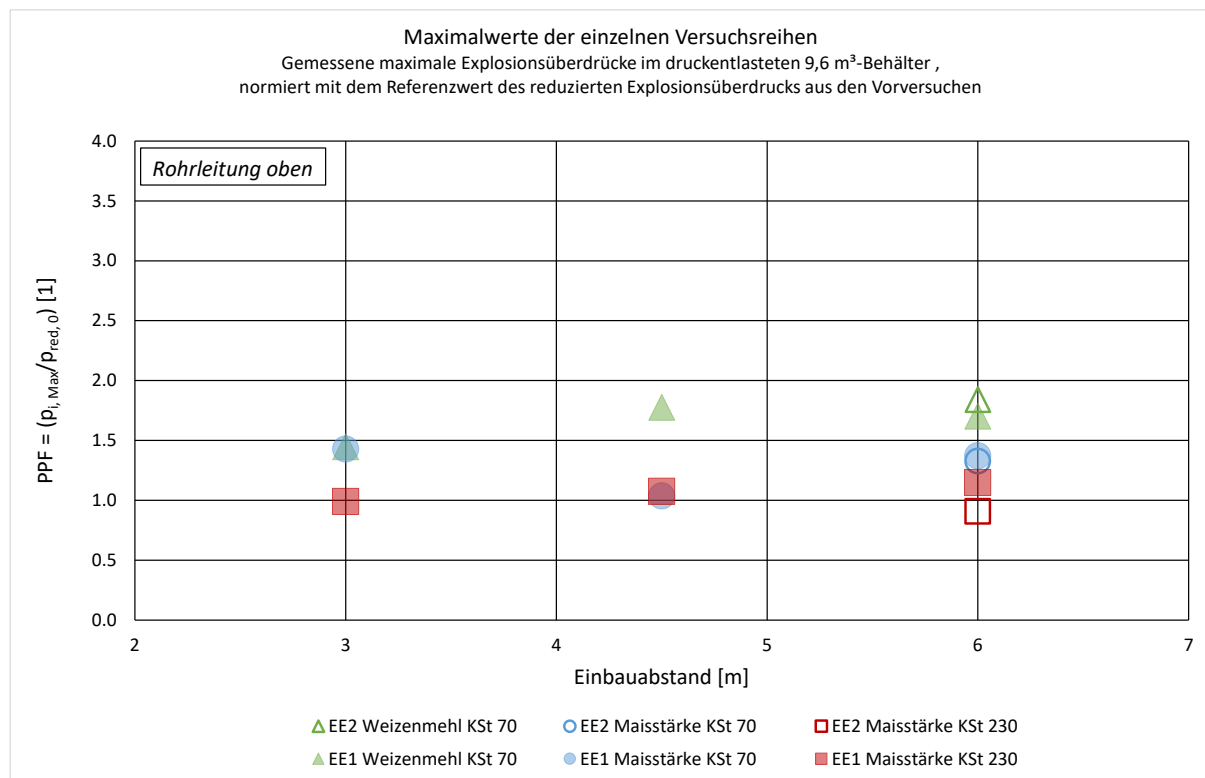


Abbildung 9: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m³-Behälter mit im oberen Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung (reduzierte Explosionsüberdrücke im Explosionsbehälter; gemessene Maximalwerte der einzelnen Versuchsreihen)

In Abbildung 10 sind die Mittelwerte der Versuchsergebnisse mit beiden untersuchten Entkopplungseinrichtungen in den unterschiedlichen Einbauabständen dargestellt. Der Grafik kann entnommen werden, dass mit der oben angeflanschten Rohrleitung im Mittel lediglich die Versuche mit Weizenmehl zu Drucküberhöhungen führten, mit leicht steigender Tendenz bei zunehmendem Einbauabstand.

Die Versuche mit Maisstärke ergaben annähernd die gleichen reduzierten Explosionsüberdrücke wie sie im druckentlasteten Behälter ohne Rohrleitung und Entkopplungseinrichtung auftraten. Ein Einfluss des Einbauabstandes ist für die Maisstärke K_{St} 230 nicht zu erkennen. Für die Maisstärke K_{St} 70 ist er allenfalls geringfügig. Die Ergebnisse dieser Versuche lassen keine Unterschiede in den Rückwirkungen von EE1 und EE2 erkennen.

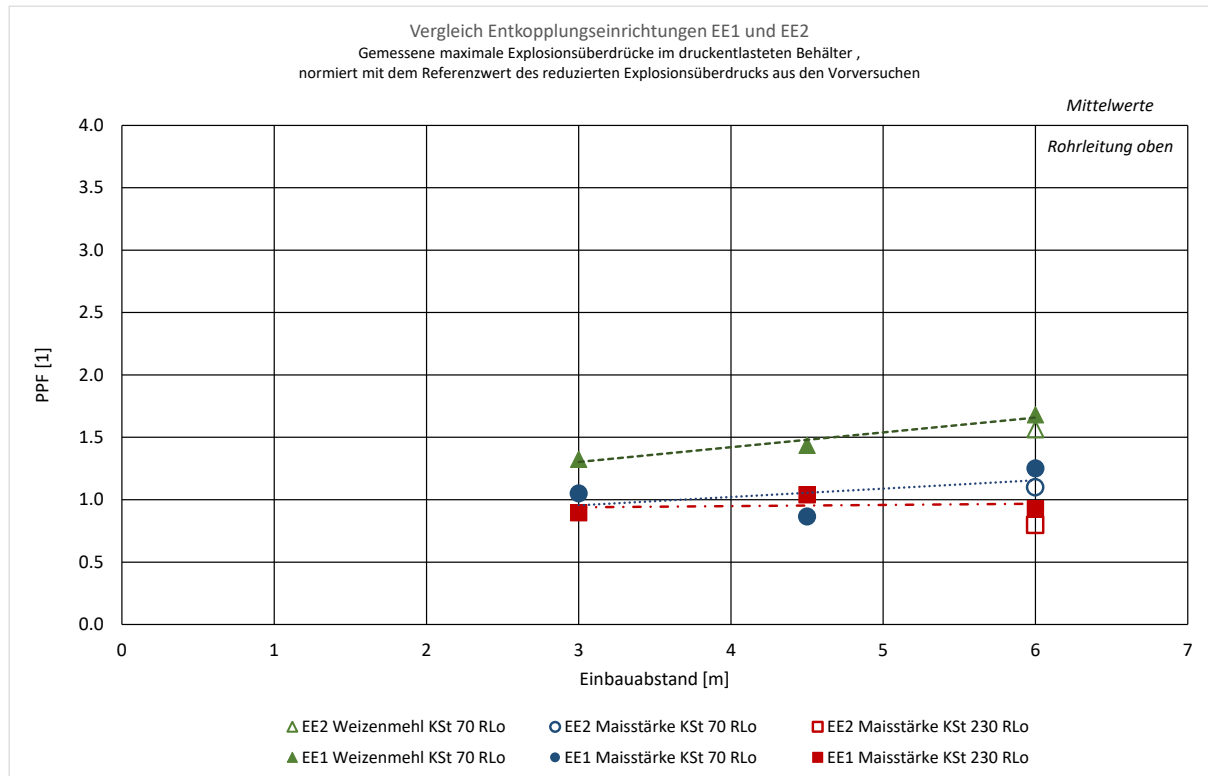


Abbildung 10: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse am 9,6 m³- Behälter mit im oberen Behälterdrittel angeflanschter Rohrleitung (Mittelwerte)

In Projektstufe 2 wurden auch mehrere Vergleichsversuche mit blindgeflanschter Rohrleitung im unteren Behälterdrittel und offener Rohrleitung sowohl im unteren als auch im oberen Behälterdrittel durchgeführt. Mit diesen wurde der Einfluss der bloßen Anwesenheit einer Rohrleitung der Länge $L = 3$ m ohne eine Entkopplungseinrichtung näher untersucht, Abbildung 11.

Weizenmehl ($K_{St} 70$) und Maisstärke $K_{St} 70$ simuliert weisen unter Berücksichtigung der Streubreite sehr ähnliche Ergebnisse für alle vier Situationen auf. Sowohl mit der Rohrleitung im oberen als auch im unteren Behälterdrittel und sogar der blindgeflanschten Rohrleitung (am Behälter unten) sind die Druckwerte sehr ähnlich. Sie liegen im Mittel etwas niedriger als im druckentlasteten Behälter ohne die Rohrleitung. Für die Maisstärke $K_{St} 230$ ist jedoch eine Tendenz bezüglich des Einflusses der Position der Rohrleitung als auch des Zustandes des Rohrendes erkennbar. Mit der blindgeflanschten Rohrleitung im unteren Behälterdrittel wurden höhere Drücke im Behälter gemessen als mit offener Leitung. Für den Fall der im oberen Behälterdrittel angeflanschten Rohrleitung fallen die Werte noch niedriger aus.

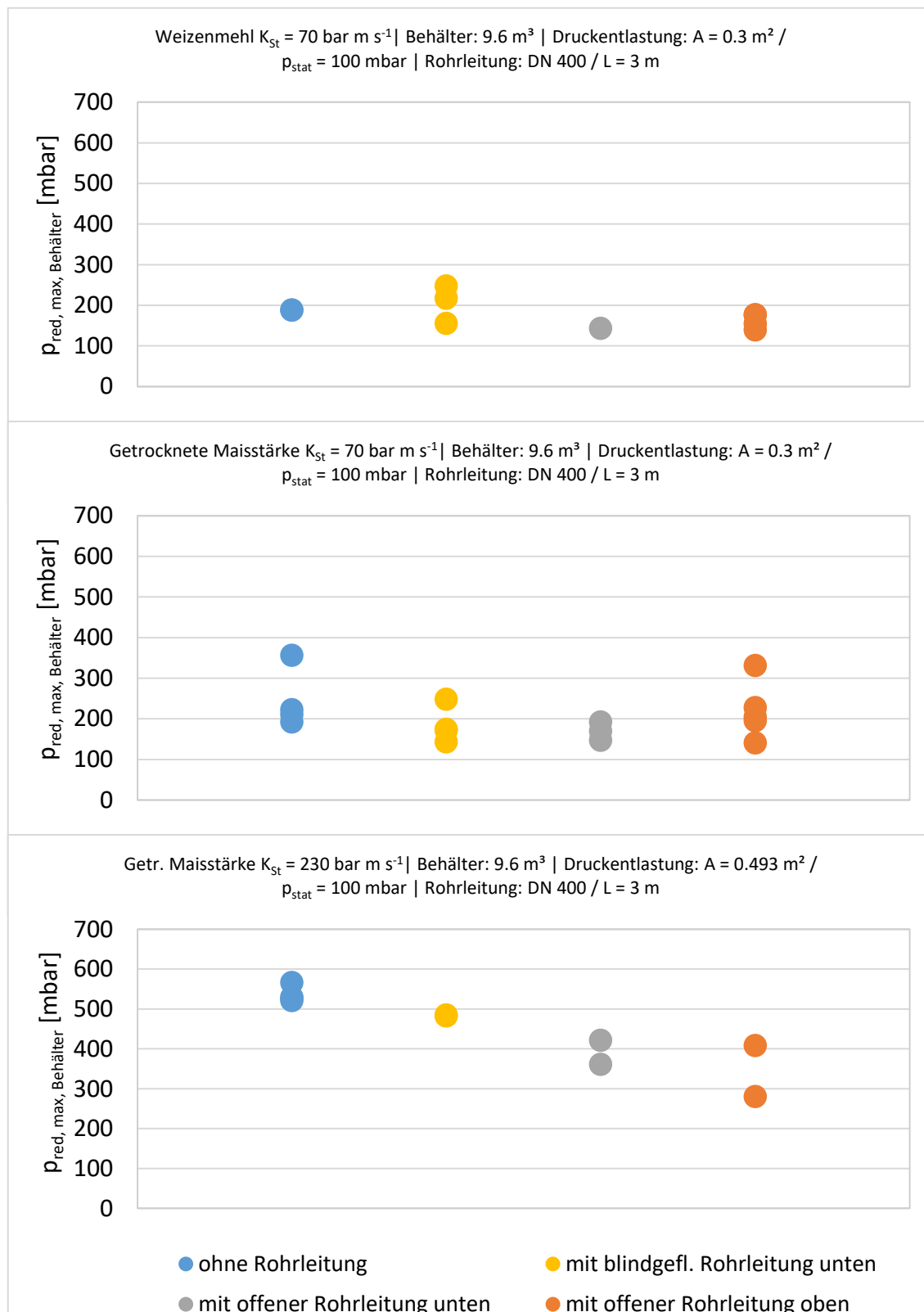


Abbildung 11: Einfluss einer im unteren Behälterdrittel angeflanschten Rohrleitung der Länge $L = 3 \text{ m}$ auf den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck im druckentlasteten 9.6 m^3 -Behälter

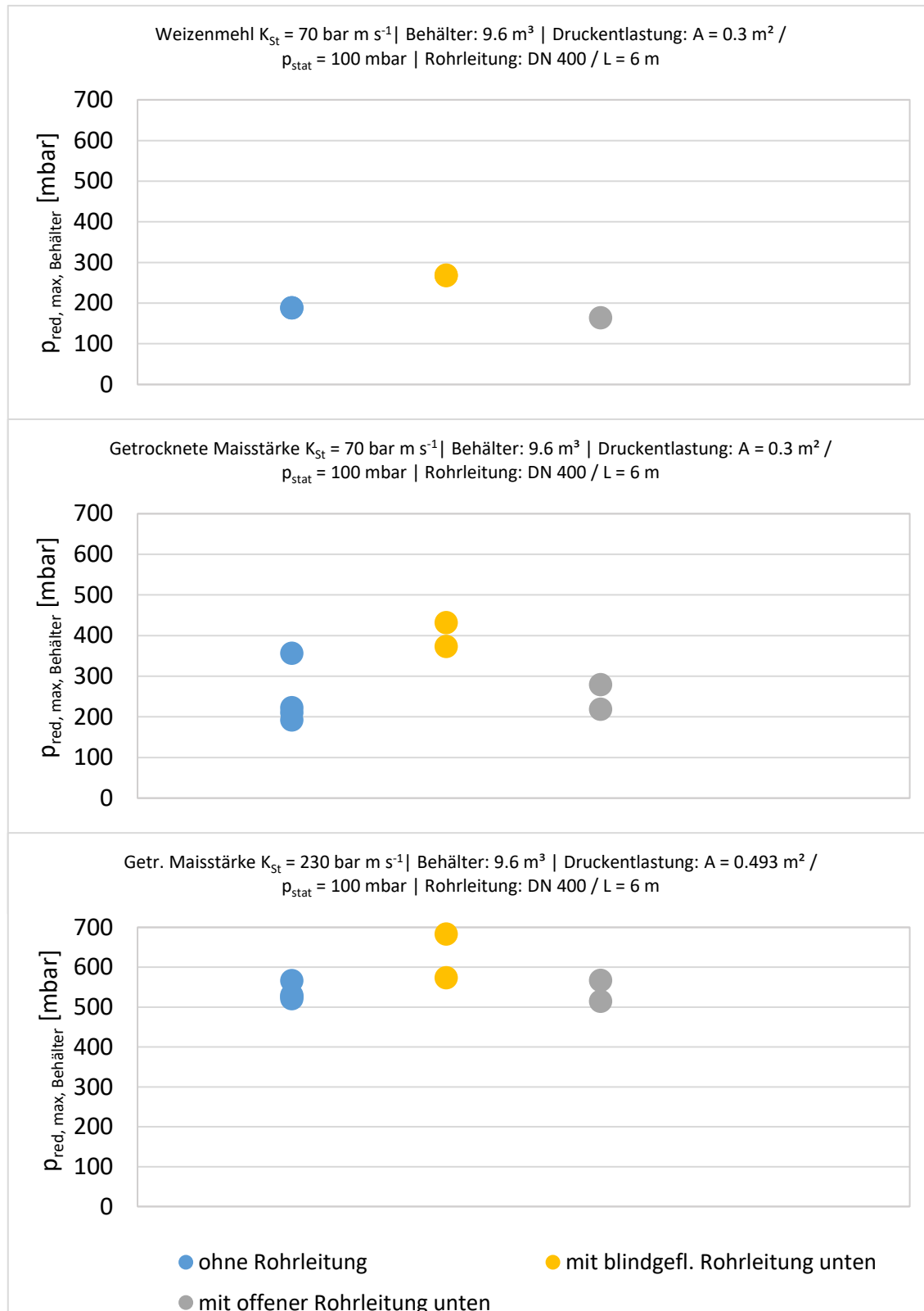


Abbildung 12: Einfluss einer im unteren Behälterdrittel angeflanschten Rohrleitung der Länge $L = 6 \text{ m}$ auf den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck im druckentlasteten $9,6 \text{ m}^3$ -Behälter

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss einer 6 m langen, im unteren Behälterdrittel angeflanschten Rohrleitung untersucht, Abbildung 12. Diese Versuche dienten auch zum Nachweis, dass für die gewählten Parameter eine sichere Explosionsübertragung über eine Lauflänge von 6 m erfolgte. Auch für den Fall der längeren Rohrleitung war allenfalls ein geringer Einfluss der offenen Rohrleitung auf den reduzierten Explosionsdruck im druckentlasteten Behälter zu erkennen. Auffällig ist allerdings, dass im Unterschied zu den Versuchen mit der 3 m Rohrleitung der reduzierte Explosionsüberdruck bei blindgeflanschter Rohrleitung für alle drei Stäube höhere Werte annahm. Es ist nicht auszuschließen, dass dieser Effekt durch eine Reflektion der Expansionsströmung am geschlossenen Rohrleitungsende verursacht wird.

3.3 Projektstufe 3 – 5,0 m³-Explosionsbehälter mit mittig angeflanschter Rohrleitung

In der dritten Projektstufe wurden, im Vergleich zu den beiden vorhergehenden, gleich mehrere Parameter variiert: Das Behältervolumen wurde von den 9,6 m³ auf 5 m³ reduziert, der kleinere Behälter wies zudem ein L/D Verhältnis von rund 1,0 statt dem bisherigen L/D $\approx 1,7$ auf und der Zündort befand sich auf Höhe der Mittelachse der Rohrleitung. Damit wurde auch die dritte Variante der Zuordnung von Zündort, Rohrleitung und Entlastungsfläche zueinander abgedeckt, Abbildung 3.

Als weitere Parametervariation wurden außerdem zwei unterschiedliche Zünderpositionen untersucht:

- Zündort in Behältermitte, auf der Mittelachse der Rohrleitung
- Zündort nahe Rohrleitungseintritt, ebenfalls auf der Mittelachse der Rohrleitung

Außerdem stellte sich im Projektverlauf heraus, dass zusätzlich die Untersuchung eines weiteren "Betriebspunkts" interessant sein könnte, nämlich Explosionen geringer Druckanstiegsgeschwindigkeit ($K \leq 80 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), aber bei ähnlich hohem p_{red} wie bei den Versuchen mit getrockneter Maisstärke ($p_{\text{red}} \geq 700 \text{ mbar}$). Diese Versuche sollten Erkenntnisse über den Einfluss des reduzierten Explosionsdrucks auf die Rückwirkungseffekte liefern. Sie wurden realisiert mit Weizenmehl $K_{\text{St}} 50$ und angepasster (verkleinerter) Druckentlastungsöffnung.

Auch diesmal wurden im Rahmen der Vorversuche Untersuchungen mit druckentlastetem Behälter mit angeflanschter Rohrleitung, jedoch ohne Entkopplungseinrichtung durchgeführt. Diese Versuche zeigten, dass die Rohrleitung als zusätzliche Entlastungsöffnung wirksam wurde, wenn der reduzierte Explosionsüberdruck ohne Rohrleitung bereits vergleichsweise hoch war (im Bereich 700 – 800 mbar). War der reduzierte Explosionsüberdruck im druckentlasteten Behälter ohne angekoppelte Rohrleitung ohnehin schon auf einem niedrigen Niveau wie im Falle "Weizenmehl $K_{\text{St}} 80$ ", war der zusätzliche Entlastungseffekt allenfalls geringfügig. Bei den Versuchen mit Maisstärke $K_{\text{St}} 235$ ist eine Tendenz zu erkennen, dass die reduzierten Explosionsüberdrücke im Behälter bei größeren Rohrleitungslängen zunehmen könnten, Abbildung 13.

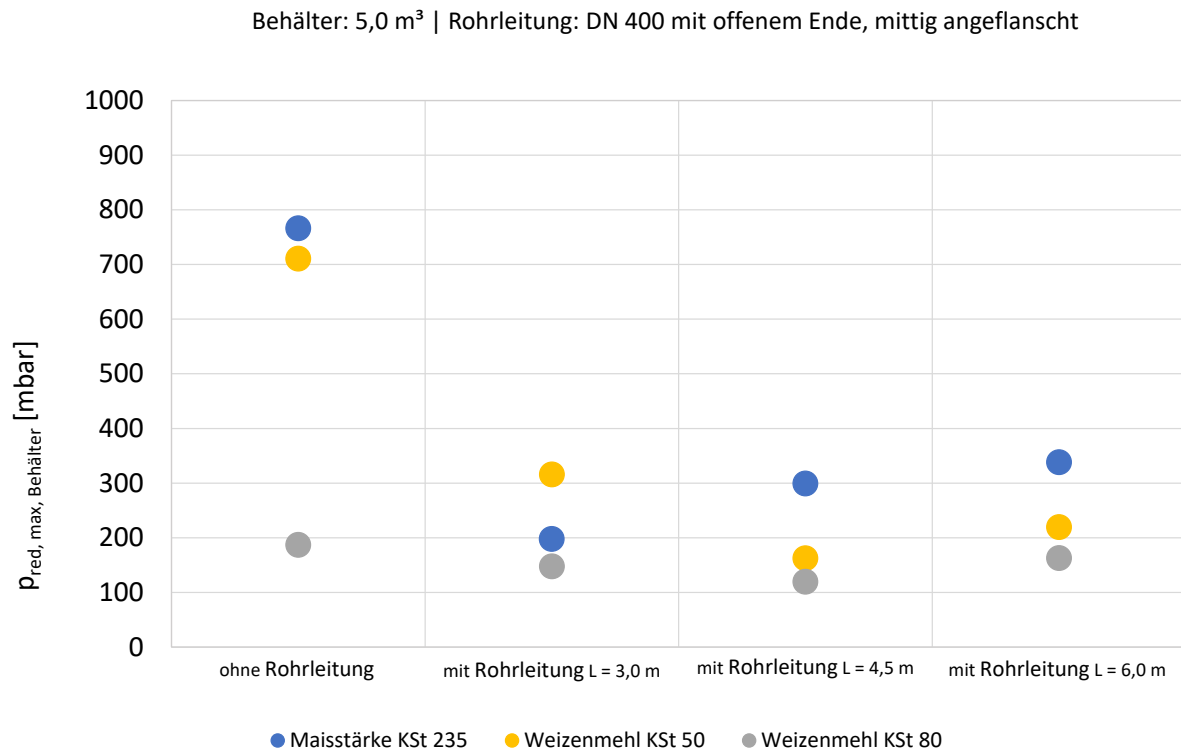


Abbildung 13: Einfluss von Rohrleitungen unterschiedlicher Längen mit offenem Ende auf den maximalen reduzierten Explosionsüberdruck im druckentlasteten 5,0 m³-Behälter

Die Versuche mit Entkopplungseinrichtungen und Zündort "Mitte" ergaben Folgendes:

Bei den Versuchen mit Maisstärke K_{St} 235 traten überraschend niedrige reduzierte Explosionsüberdrücke im Behälter auf. Mit beiden untersuchten Entkopplungseinrichtungen 400 wurden kaum nennenswerte Drucküberhöhungen gegenüber den Referenzversuchen beobachtet, Abbildung 14. In 12 von 16 Versuchen betrug PPF weniger als 0,8. Ein Versuch lag mit PPF = 0,9 nahe dem Referenzniveau, nur ein Versuch überstieg mit PPF = 1,4 den kritischen Wert von 1,2. Die Ergebnisse der Versuche mit Weizenmehl K_{St} 80 zeigten ein gänzlich anderes Bild. 13 von insgesamt 14 Versuchen wiesen hier deutliche Drucküberhöhungen gegenüber den Referenzversuchen auf. Die höchste Überhöhung mit einem Faktor PPF = 3,0 wurde bei einem Einbauabstand von 4,5 m festgestellt. In Abbildung 14 und Abbildung 15 sind die Maximalwerte normiert mit dem Referenzwert der Vorversuche über den Einbauabstand aufgetragen. In beiden Fällen, sowohl bei den Versuchen mit Maisstärke als auch bei den Versuchen mit Weizenmehl, traten die Maxima auf, wenn die Entkopplungseinrichtung in einem Einbauabstand von 4,5 m installiert war.

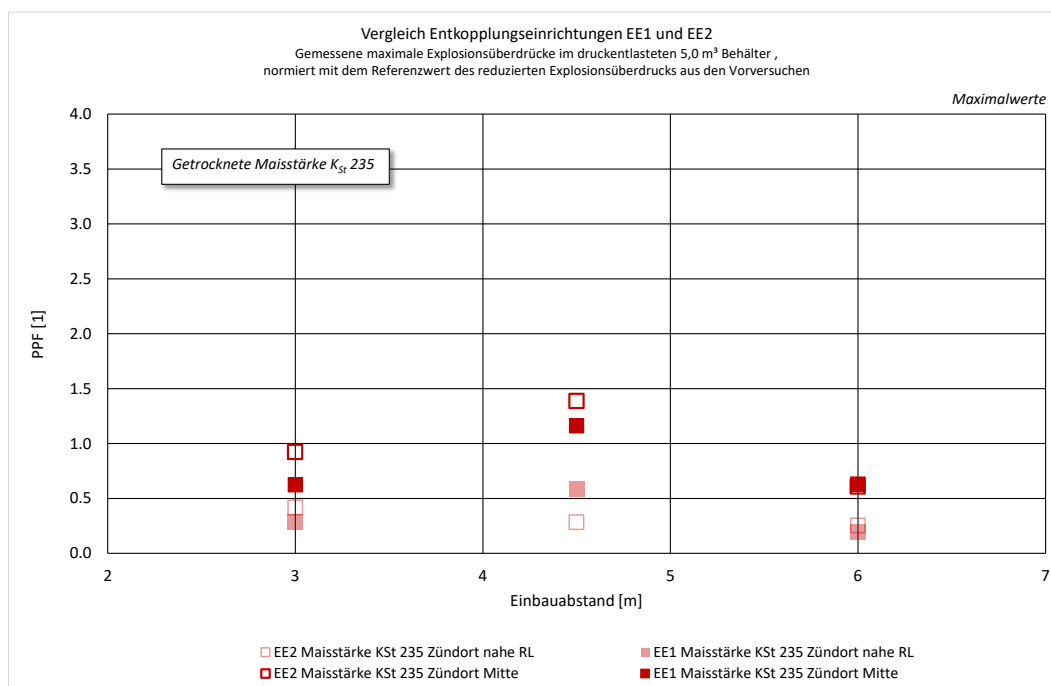


Abbildung 14: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen) mit Maisstärke $K_{St} 235$, normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 5 m³-Explosionsbehälter ohne Rohrleitung

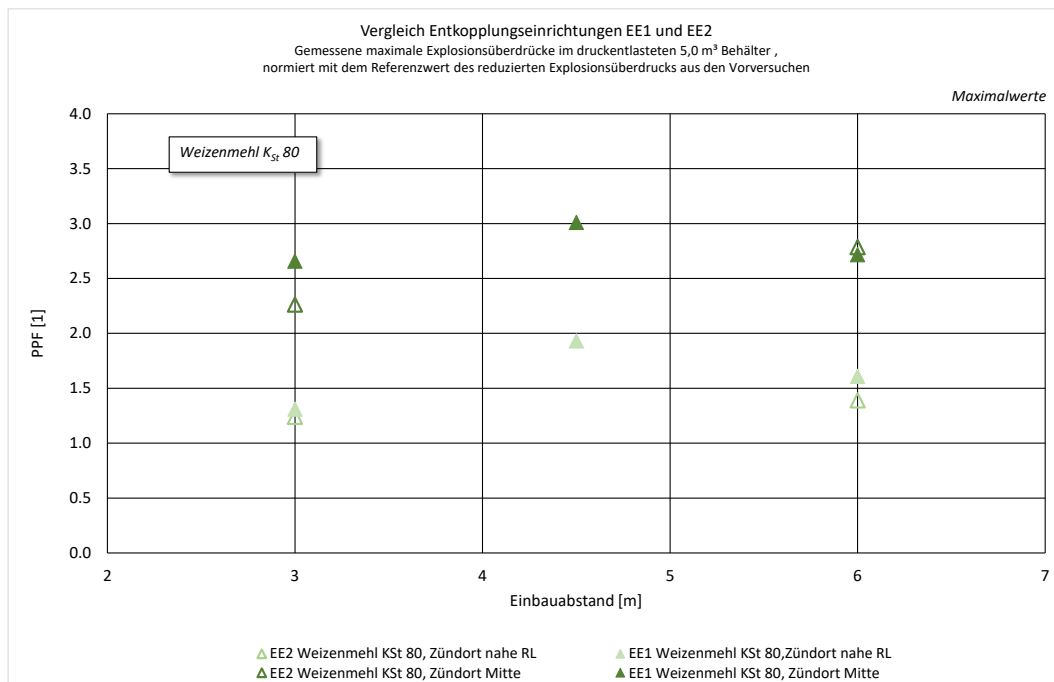


Abbildung 15: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen) mit Weizenmehl $K_{St} 80$, normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 5 m³-Explosionsbehälter ohne Rohrleitung

Neben den Versuchen mit Zündortlage „Mitte“ wurden in dieser Projektstufe auch Versuche mit Zündortlage nahe Rohreingang durchgeführt, analog zu der bei Prüfungen gemäß EN 15089 gängigen Vorgehensweise. Die Ergebnisse dieser Versuche sind ebenfalls in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt. Die Maximalwerte der gemessenen reduzierten Explosionsüberdrücke lagen für diese Parametervariation ausnahmslos – und insbesondere bei den Versuchen mit Weizenmehl auch signifikant – unterhalb der Messwerte aus den Versuchen, bei denen in Behältermitte gezündet wurde. Somit konnte die Zündortlage "Mitte" als Worst-Case für diese Untersuchungen betrachtet werden, weitere Versuche mit einem Zündort nahe der Rohrleitung ließen keine relevanten Erkenntnisse erwarten.

Im Verlauf dieser Projektstufe stellte sich auch die Frage nach dem Einfluss des Druckniveaus des reduzierten Explosionsdruckes der Referenzversuche auf die Rückwirkungseffekte. Daher wurden Explosionen mit Weizenmehl, also mit geringer Druckanstiegsgeschwindigkeit ($K \leq 80 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), aber bei ähnlich hohem reduzierten Explosionsüberdruck wie bei den Versuchen mit getrockneter Maisstärke ($p_{\text{red}} \geq 700 \text{ mbar}$), untersucht. Dafür wurde die Entlastungsfläche auf dem 5 m³-Behälter reduziert. Nachdem die Explosionsüberdrücke der ersten zwei Versuche mit EE1 und die folgenden zwei mit EE2 jeweils bei 6 m Einbauabstand im Bereich von 1 bar (+0,25 bar/ -0,1 bar) lagen und keine nennenswerten Unterschiede im Explosionsablauf erkennbar waren, wurden die folgenden 6 Versuche mit der für höhere Drücke besser geeigneten Explosionsentkopplungseinrichtung EE2 durchgeführt.

Die so erzielten Maximalwerte mit Zündung in der Behältermitte sind in Abbildung 16 dargestellt. Die Drucküberhöhung fiel zwar etwas schwächer aus als bei den Versuchen mit dem gleichen Staub (Weizenmehl) auf niedrigerem p_{red} -Niveau. Die Ergebnisse waren jedoch mit einer Druckerhöhung bis zu einem Faktor 2,5 des Referenzwertes immer noch erheblich höher als bei den Versuchen mit Maisstärke auf dem gleichen p_{red} -Niveau ($\text{PPF}_{\text{max}} \approx 1,4$). Im betrachteten p_{red} -Bereich scheint das Druckniveau kein dominierender Parameter zu sein.

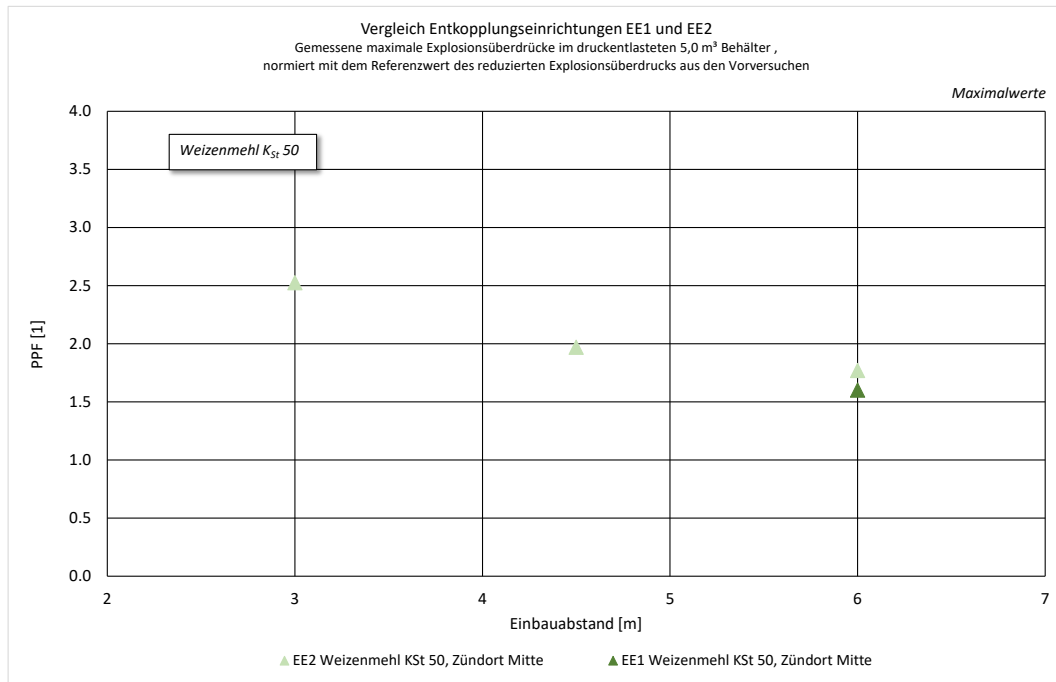


Abbildung 16: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen) mit Weizenmehl KSt 50 bei hohem p_{red} , normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 5 m³-Explosionsbehälter ohne Rohrleitung

3.4 Analyse der Ergebnisse aus den ersten drei Projektstufen

3.4.1 Zusammenfassung der Beobachtungen und erste Arbeitshypothese

Die rein phänomenologische Betrachtung der Versuchsergebnisse der Projektstufen 1 – 3 ergibt folgendes Bild:

- In jeder Versuchsreihe traten Drucküberhöhungen gegenüber den Referenzversuchen auf.
- Die beobachteten Drucküberhöhungen fielen bei den Versuchen mit dem 5 m³-Explosionsbehälter höher aus als bei den Versuchen mit dem 9,6 m³-Explosionsbehälter.
- Die Rohrleitungsposition relativ zum Zündort und zur Lage der Explosionsdruckentlastung beeinflusst die Drucküberhöhung signifikant.
- Es konnte keine Abhängigkeit der beobachteten Effekte vom Typ der untersuchten Entkopplungseinrichtungen festgestellt werden.
- Die Drucküberhöhung wird stark von den Explosionscharakteristika des Brennstoffs beeinflusst.
- Die Dynamik des Schließvorgangs der Entkopplungseinrichtung spielt eine bedeutende Rolle für das Ausmaß der Drucküberhöhung.

Zur detaillierteren Auswertung und Interpretation wurden die Ergebnisse auf Muster oder Auffälligkeiten untersucht, um eine bessere Vorstellung von dem Geschehen im Behälter zu erhalten und mögliche Einflussparameter für die Entstehung der Drucküberhöhung zu identifizieren.

Dafür wurden zunächst die Druckkurven und die Flammensignale der Versuche mit und ohne Drucküberhöhung und auch die der Versuche mit Drucküberhöhungen untereinander verglichen. Drei Aspekte fielen dabei ins Auge: Zum Ersten weisen die Druckkurven über die Rohrlänge charakteristische Schwingungen auf. Zum Zweiten treten hochfrequente Schwingungen unmittelbar nach dem Schließen der Entkopplungseinrichtung in den Druckkurven der Behälter auf. Zum Dritten nimmt die Druckanstiegsgeschwindigkeit unmittelbar nach dem Schließen der Entkopplungseinrichtung erkennbar zu.

In Abbildung 17 sind beispielhaft die Druckverläufe (blaue Kurven) und die dazugehörigen Flammensignale (rote Kurven) vom Behälter (Kurve ganz oben) bis zum Rohrende (dritte Kurve von unten) aufgetragen. Mit dem Schließen der Entkopplungseinrichtung (zweite Kurve von unten) treten in den Druckkurven Oszillationen auf, deren Amplituden über die gemessene Länge der Art versetzt sind, dass der Eindruck entsteht, sie laufen in das Rohr hinein und wieder hinaus. Auch in den Flammensignalen sind diese Schwingungen teilweise wieder zu finden. Für diesen dargestellten Fall betrug die Frequenz etwa 35 Hz, was der Resonanzfrequenz der Grundschiwingung in dieser Rohrleitung (hier: $L = 4,5 \text{ m}$) bei einer mittleren Gas-temperatur von 725 °C und der daraus resultierenden mittleren Schallgeschwindigkeit von 635 m/s entsprechen würde.

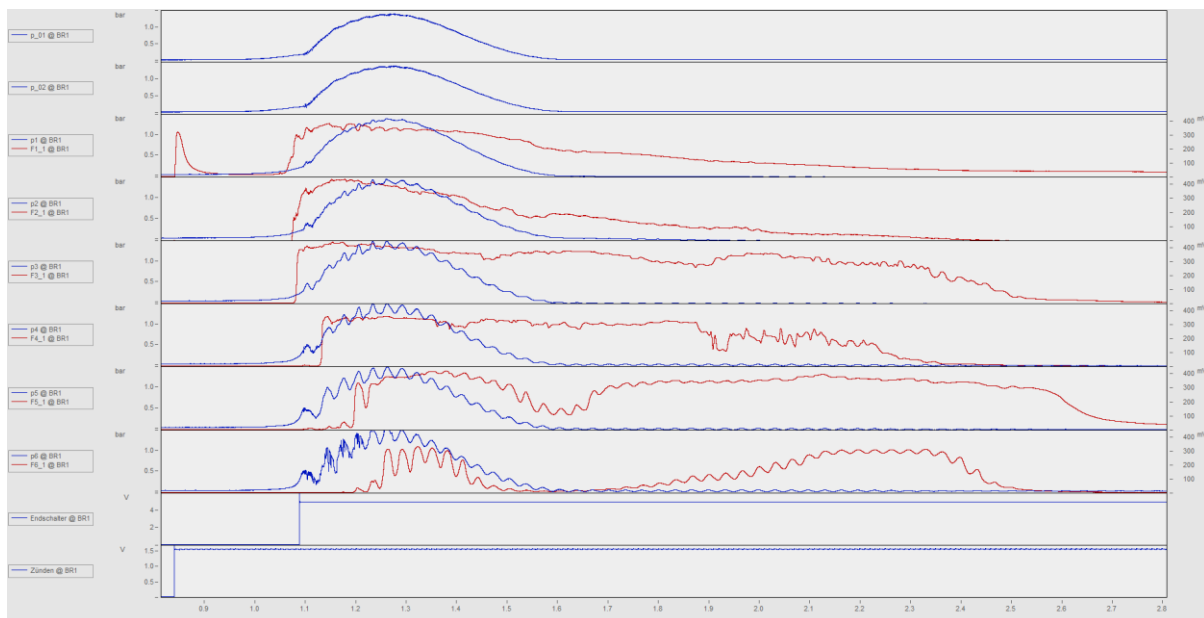


Abbildung 17: Datensatz eines Versuchs mit Weizenmehl am 5 m^3 -Behälter mit der Entkopplungseinrichtung EE2 an der Position $L = 4,5 \text{ m}$.

Das ist ein Indiz dafür, dass das Schließen der Entkopplungseinrichtung akustische Störungen und damit weitere Turbulenzen hervorruft, die das Explosionsgeschehen besonders im Rohr beschleunigen. Mit Hilfe der Flammensignale konnte zudem die Bildung eines Druckstoßes, wie er in detonationsähnlichen Vorgängen auftritt, als Ursache für die Drucküberhöhung ausgeschlossen werden. Die Flammenfrontgeschwindigkeiten waren geringer als die der Druckfronten.

Bei der Mehrzahl der Versuche mit Drucküberhöhung war zudem in einem Abstand von wenigen Millisekunden (zwischen 4 und 14 ms) nach dem Schließzeitpunkt der Entkopplungseinrichtung ein kleiner, negativer Peak in den Druckkurven der Behälter erkennbar, der den Beginn von hochfrequenten Schwingungen markierte, Abbildung 18. Der darauffolgende starke Anstieg der Druckanstiegsgeschwindigkeit trat sowohl bei Versuchen mit Weizenmehl als auch bei solchen mit Maisstärke auf.

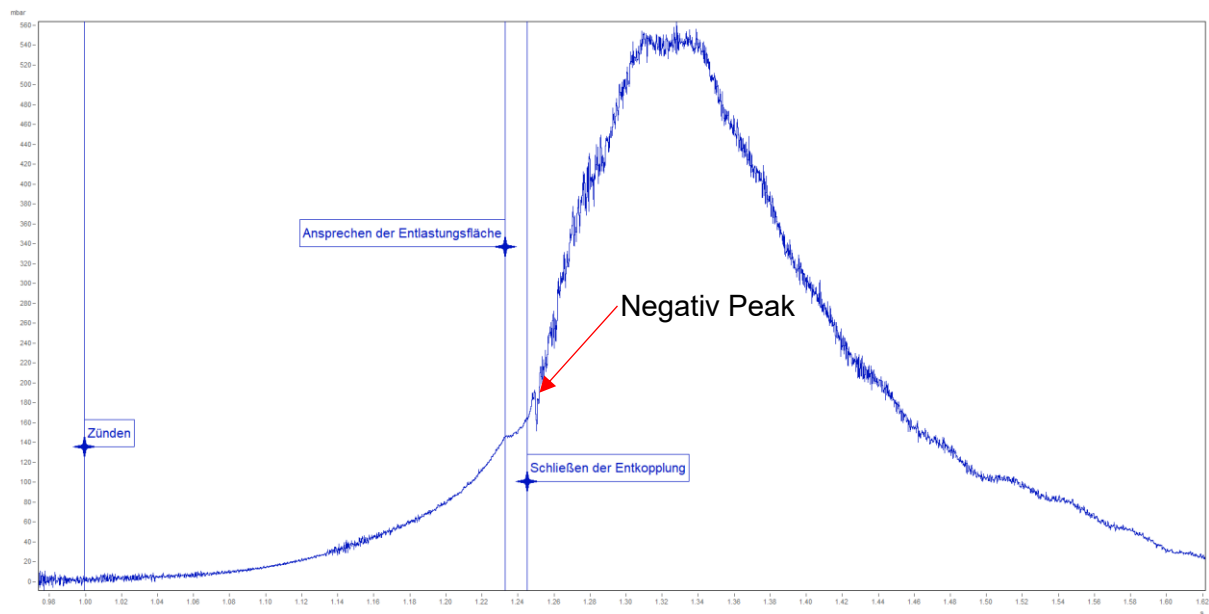


Abbildung 18: Druck/Zeitverlauf im 5 m³-Explosionsbehälter bei einem Versuch mit Weizenmehl und EE1 bei 4,5 m. Markiert sind der Zündzeitpunkt, das Ansprechen der Entlastungsfläche sowie das Schließen der Entkopplung. Etwa 4 ms nach dem Schließen der Entkopplung beginnen die hochfrequenten Schwingungen.

Die eingehendere Betrachtung der transienten Vorgänge während eines Entkopplungsvorgangs führt zu weiteren Erkenntnissen:

Betrachtet wurden die zeitlichen Zuordnungen der Zündung des Staub/Luft-Gemischs (= Start der Explosion), der zeitliche Druckverlauf im druckentlasteten Behälter sowie das Ansprechen

der Entkopplungseinrichtung (= Beginn des Schließvorgangs). Aus der Auswertung der zeitlichen Differenzen zwischen Zündzeitpunkt und Schließzeitpunkt konnte keine unmittelbare Korrelation mit der Druckerhöhung im Behälter aufgrund von Rückwirkungseffekten gefunden werden. Es scheint jedoch relevant zu sein, wie weit fortgeschritten die Reaktion im Behälter zum Schließzeitpunkt ist.

Dies wird insbesondere sichtbar bei den Versuchen mit Maisstärke, bei denen das Schließen der Entkopplungseinrichtung häufig erst kurz vor dem Erreichen des $p_{\text{red, max}}$ im Behälter eintritt. In diesen Fällen ist keine oder nur eine geringe Druckerhöhung zu beobachten. Im Gegensatz dazu tritt ein Rückwirkungseffekt dann auf, wenn die Entlastungseinrichtung bereits zu Beginn des Druckanstiegs im Behälter nach dem Öffnen der Druckentlastung schließt. Die Beobachtungen deuteten darauf hin, dass die Vorgänge in der Rohrleitung nach dem Schließen der Entkopplungseinrichtung die zu diesem Zeitpunkt noch im Entstehen begriffene Explosion im Explosionsbehälter beeinflussen. Dieser Einfluss kann umso wirksamer werden, je mehr unverbranntes Material noch im Behälter vorhanden ist. Es ist also für die Höhe der Drucküberhöhung ausschlaggebend, wie weit fortgeschritten die Reaktion im Behälter zum Schließzeitpunkt ist. Da das Anlaufverhalten der Explosion sowie der Reaktionsablauf von Versuch zu Versuch variieren, lässt sich dieser Zustand nicht mit Hilfe einer festen Zeitdifferenz zum Zündzeitpunkt beschreiben. Vielmehr muss die Menge an unverbranntem Staub-Luft-Gemisch abgeschätzt werden, die im relevanten Zeitraum nach dem Öffnen der Druckentlastung bis zum Schließen der Entkopplungseinrichtung aus dem System ausgetragen wird. Auch ist von Bedeutung, wieviel Material bis zum Zeitpunkt des Schließens umgesetzt wurde und ob eine vollständige Verbrennung vorliegt oder eine unvollständige, unter Bildung brennbarer Zwischenprodukte. Je mehr brennbares Material und Sauerstoff zum Schließzeitpunkt noch im System vorhanden sind, desto wahrscheinlicher ist eine Drucküberhöhung in Folge des Schließens und desto höher kann diese ausfallen.

Unter diesem Aspekt wurde die Zeitspanne zwischen dem Öffnen der Druckentlastung und dem Schließen der Entkopplung näher betrachtet. Je länger zwei Öffnungen (geöffnete Explosionsdruckentlastung + Rohrleitung vor dem Schließen der Entkopplungseinrichtung) im System vorhanden sind, desto mehr unverbrannter Staub kann in dieser Zeit aus dem System ausgetragen werden und steht somit nach dem Schließen nicht mehr für die Reaktion zur Verfügung. Folglich müssten die Rückwirkungseffekte schwächer ausfallen. Eine eindeutige Relation zwischen dieser Zeitspanne und dem Betrag der Druckerhöhung auf Grund von Rückwirkungseffekten konnte jedoch nicht hergestellt werden. Es ist vielmehr so, dass diese Zeitspanne nicht als Ursache, sondern als Ergebnis des Einflusses vieler Faktoren betrachtet werden muss.

Diese Überlegungen wurden zu einer ersten Arbeitshypothese zusammengefasst:

Die durch das Schließen hervorgerufene Störung erfasst, wie an den Druckverläufen erkennbar, das ganze System. Infolge dieser Störung werden Schwingungen und Störungen des Strömungsfeldes induziert, die Turbulenzerhöhungen in der Rohrleitung und im Behälter her-

vorrufen und die Reaktionsrate und damit die Druckanstiegsgeschwindigkeit erhöhen. Außerdem wird durch das Schließen der Entkopplungseinrichtung und dem damit verbundenen Druckaufbau vor der Entkopplungseinrichtung eine Rückströmung durch die Rohrleitung in den Behälter initiiert, durch die auch unverbranntes Material in die anlaufende Explosion im Behälter eingetragen werden kann. Die auf der Basis einer ungestörten Strömungssituation ausgelegte Druckentlastung kann den Behälter nicht mehr adäquat entlasten, so dass der reduzierte Explosionsüberdruck höher ausfällt als erwartet. Diese Effekte hängen offensichtlich nicht nur von den geometrischen Verhältnissen ab, sondern auch in starkem Ausmaß von den Staubeigenschaften.

Um ein solches Geschehen bei der Auslegung von Systemen berücksichtigen zu können, ist es erforderlich, die beeinflussenden Parameter zu beschreiben und hinsichtlich ihrer Bedeutung zu bewerten.

3.4.2 Beeinflussende Parameter

Aus der Arbeitshypothese gehen der Einbauabstand, die Bauart des Explosionsentkopplungssystems, die Position der Rohrleitung relativ zur Lage des Zündortes und der Entlastungsfläche, der reduzierte Explosionsüberdruck $p_{red,max}$, auf den das System ausgelegt werden soll, das L/D-Verhältnis des Behälters, das Behältervolumen (in Kombination mit dem Rohrleitungsvolumen) und die Explosionseigenschaften des Staubes als Variablen hervor.

Bei Versuchen, die eine Drucküberhöhung zur Folge hatten, konnte eine auffallend zunehmende Beschleunigung des Druckanstiegs unmittelbar nach dem Schließen der Entkopplungseinrichtung beobachtet werden. Eine detailliertere Auswertung der Messwerte ergab eine eindeutige Korrelation von Drucküberhöhung und maximaler Druckanstiegsgeschwindigkeit als Maß für die Reaktionsgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang wurde genutzt, um den Einfluss einzelner Parameter zu identifizieren und grafisch darzustellen. In Diagrammen, in denen PPF über der normierten Druckanstiegsgeschwindigkeit

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_N$$

aufgetragen wurde, wurden die zu betrachtenden Parameter in Form von Kurvenscharen dargestellt. Die normierte Druckanstiegsgeschwindigkeit wurde analog zur Drucküberhöhung PPF definiert als

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_N = \frac{\left(\frac{dp}{dt}\right)_{i,max}}{\left(\frac{dp}{dt}\right)_0}$$

3.4.2.1 Einbauabstand und Bauart der Entkopplungseinrichtung

Am 9,6 m³-Behälter mit der im unteren Behälterdrittel montierten Rohrleitung scheint mit Ausnahme von einer Versuchsreihe ein Einfluss der Rohrlänge erkennbar zu sein. Mit länger werdendem Einbauabstand steigen auch die Drucküberhöhungen. Jedoch wird diese Tendenz durch die Versuche mit der im oberen Behälterdrittel montierten Rohrleitung und den Versuchen am 5 m³-Behälter nicht bestätigt.

Sowohl der Einbauabstand als auch die verwendete Entkopplungseinrichtung verändern das Schwingungsbild in der Rohrleitung deutlich. Während EE2 ein relativ harmonisches Schwingungsbild bewirkt, entsteht durch das Schließen von EE1 zunächst eine eher chaotische, hochfrequente Schwingung mit großen Druckschwankungen. Im weiteren Verlauf der Reaktion bildet sich aber auch hier eine einer harmonischen Schwingung ähnliche Grundschiwingung aus. Trotz der durch den Schließvorgang von EE1 (Klappenprinzip) ausgelösten stärkeren Turbulenz, die die Entstehung größerer Drucküberhöhungen erwarten ließ, konnten bei der grafischen Auftragung der Ergebnisse weder für die eine noch die andere Explosionsschutzeinrichtung reproduzierbare signifikante Korrelationen zur Drucküberhöhung festgestellt werden.

Ein Einfluss beider Parameter auf das Reaktionsgeschehen kann jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden, die relativ große Streuung der Versuchsergebnisse verschleiert allerdings eventuell vorhandene Abhängigkeiten.

3.4.2.2 Einfluss der Rohrleitungsposition und des Behälter-L/D

Die geometrische Anordnung von Zündort, Rohrleitungsposition und Druckentlastungsfläche zueinander hat einen erkennbaren Einfluss auf die Drucküberhöhung, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Für den Fall, dass der Zündort zwischen Rohrleitungseintritt und Druckentlastungsfläche (9,6 m³-Behälter, Rohrleitungsposition unten, Zündort Mitte) positioniert ist, konnten deutliche Drucküberhöhungen sowohl für Maisstärke (Faktor 1,9) als auch für Weizenmehl (Faktor 2,3) verzeichnet werden. Entsprechend lagen auch die Druckanstiegsgeschwindigkeiten um bis zu einem Faktor von 4,4 für die Versuche mit Maisstärke bzw. 5 für die Versuche mit Weizenmehl über den jeweiligen mittleren Druckanstiegsgeschwindigkeiten der Vorversuche.

Im Gegensatz dazu fällt der Drucküberhöhungsfaktor PPF deutlich niedriger aus, wenn sich Rohrleitungseintritt und Druckentlastungsfläche auf der gleichen Seite relativ zum Zündort befinden (9,6 m³-Behälter, Rohrleitungsposition oben, Zündort Mitte). Nur zwei der Versuche mit

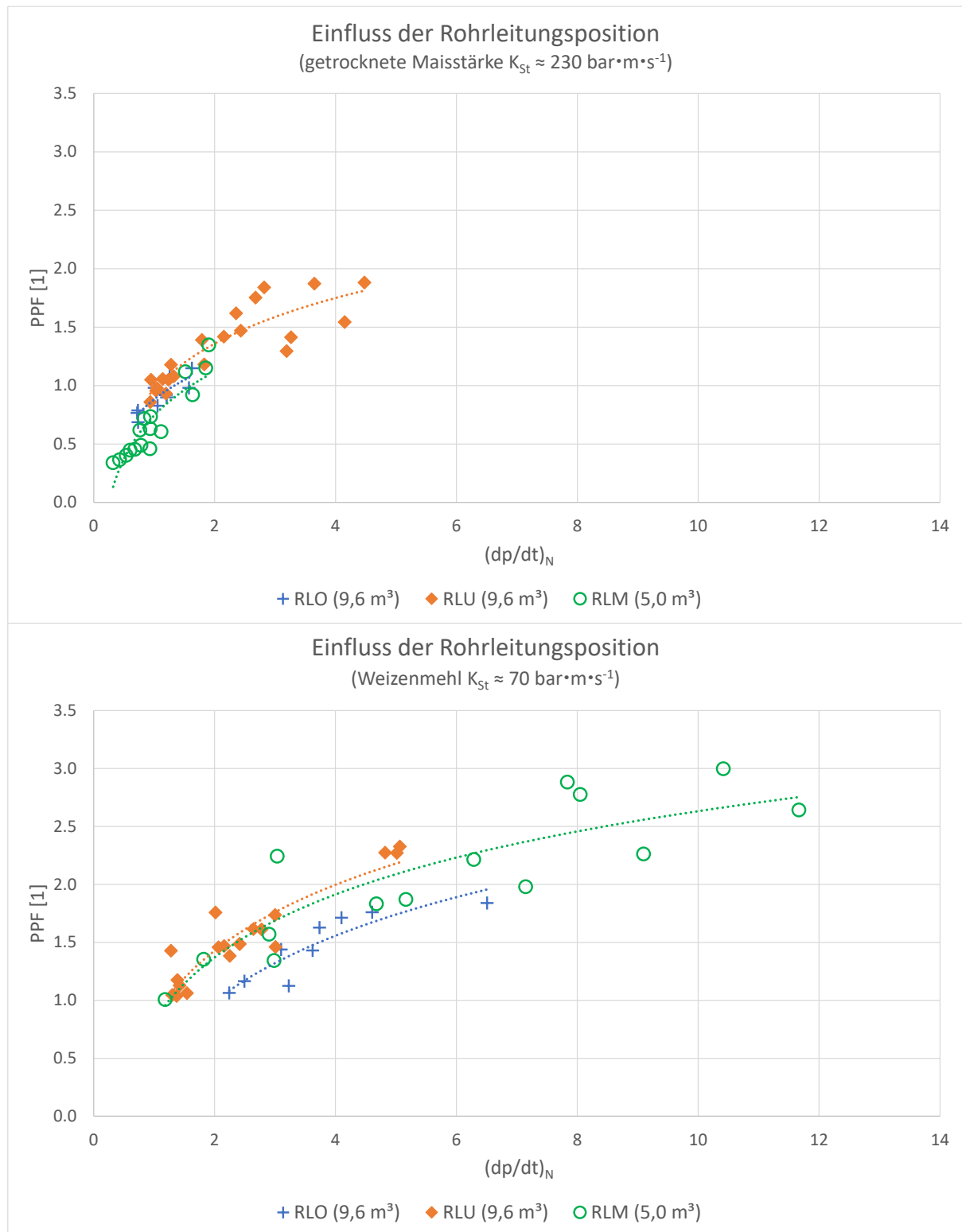


Abbildung 19: Vergleich der Drucküberhöhungen als Funktion der normierten Druckanstiegsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Rohrleitungspositionen für getrocknete Maisstärke (oben) und Weizenmehl (unten).

RLO – Rohrleitung im oberen Behälterdrittel montiert (9,6 m³-Behälter)

RLU – Rohrleitung im unteren Behälterdrittel montiert (9,6 m³-Behälter)

RLM – Rohrleitung in Behältermitte montiert (5,0 m³-Behälter)

Maisstärke wiesen eine erhöhte Druckanstiegsgeschwindigkeit auf (Faktor 1,6). Diese Versuche zeigten – ebenso wie alle weiteren Versuche mit Maisstärke – keine signifikante Drucküberhöhung. Von den 10 Versuchen mit Weizenmehl hatten sieben eine Drucküberhöhung zur Folge. Das Maximum lag mit $PPF = 1,8$ bei einer Druckanstiegsgeschwindigkeit, die das 6,4 fache des Referenzwerts erreichte. Die ebenfalls aufgetragenen Ergebnisse der Versuche mit dem kleineren 5 m³-Explosionsbehälter, bei dem die Rohrleitung in Behältermitte angeflanscht war, ergaben für die reaktive Maisstärke ein ähnliches Bild.

Diese Beobachtungen lassen sich folgendermaßen interpretieren:

- i) Zündort Mitte zwischen Rohrleitungseintritt und Druckentlastungsfläche, $L/D = 1,7$ (9,6 m³, RLU)

Aufgrund des weiteren Weges vom Zündort zur Druckentlastungsöffnung kann bei derartigen Konfigurationen auch bei schnell reagierenden Stäuben mit niedriger MZE beim Eintreffen der Rückströmung im Behälter noch genügend brennbares Material im System Behälter - Rohrleitung zur Verfügung stehen, so dass die durch den Schließvorgang der Entkopplungseinrichtung verursachte Störung eine Druckerhöhung zur Folge hat.

- ii) Rohrleitungseintritt nahe der Druckentlastungsöffnung, beide auf der gleichen Seite relativ zum Zündort (Mitte), $L/D = 1,7$ (9,6 m³, RLO)

Bei dieser Konstellation entweicht quasi zeitgleich relativ viel brennbarer Staub durch die Druckentlastungsöffnung, wenn die Explosion die Rohrleitung erreicht. Dies macht sich insbesondere bei schnell reagierenden Stäuben bemerkbar; beim Eintreffen der Rückströmung im Behälter befindet sich nicht mehr genügend brennbares Material im System, so dass die Auswirkung der durch das Schließen verursachten Turbulenzanregung auf den Explosionsdruck nur gering ist und der maximale reduzierte Explosionsüberdruck den Wert aus den Referenzversuchen kaum übersteigt.

Bei langsam ablaufenden Reaktionen von Stäuben mit hoher MZE/niedrigem K_{St} -Wert tritt auch bei dieser Konstellation eine – wenn auch schwächere – Druckerhöhung auf ($PPF_{max} = 1,8$). Das könnte sich dadurch erklären lassen, dass die Rückströmung durch die Rohrleitung bei ihrem Eintritt in den Behälter das Abströmen durch die Druckentlastungsöffnung behindert und durch Turbulenzanregung und Einblasen unverbrannten Materials eine Drucküberhöhung erzeugt.

- iii) Zündort Mitte auf Höhe des Rohrleitungseintritts, Druckentlastungsfläche Behälterkopf, $L/D = 1$ (5 m³, RLM)

Für diese Situation gilt sinngemäß das Gleiche wie für den Fall ii), mit dem Unterschied, dass die Rückströmung nunmehr direkt in das Zentrum der Explosion hineinläuft und dort wirksam wird. Auch hier gilt, dass für sehr reaktive Stäube praktisch keine Druckerhöhung zu erkennen ist aus den vorgenannten Gründen. Die Versuche mit dem reaktionsträgeren Weizenmehl führten jedoch zu signifikant höheren Werten sowohl für die Drucküberhöhung ($PPF_{max} = 3,0$) als auch für die normierte Druckanstiegsgeschwindigkeit ($((dp/dt)_{N,max} = 11,7)$).

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ist zu entnehmen, dass in den Versuchen mit dem 9,6 m³-Explosionsbehälter und getrockneter Maisstärke sowohl die Druckanstiegsgeschwindigkeiten als auch die Drucküberhöhungen deutlich höher ausfallen, wenn die Rohrleitung im unteren Behälterdrittel angeflanscht war. Für den Fall der oben am Behälter nahe der Explosionsdruckentlastung befindlichen Rohrleitung überschritten die beobachteten Druckanstiegsgeschwindigkeiten und Druckerhöhungen die Referenzwerte allenfalls vereinzelt und geringfügig. Dies gilt auch für ebenfalls aufgetragenen Ergebnisse der Versuche mit dem 5,0 m³-Explosionsbehälter und mittig angeflanschter Rohrleitung.

3.4.2.3 Einfluss des Druckniveaus

In der Versuchsserie mit dem 5 m³-Explosionsbehälter wurde auch die Größe der Explosionsdruckentlastungsfläche variiert. Diese Versuche dienten dazu zu untersuchen, inwieweit das Niveau des maximalen reduzierten Explosionsüberdrucks einen Einfluss auf die beobachteten Effekte hat. Sie wurden mit Weizenmehl durchgeführt. Durch Reduzierung der Druckentlastungsfläche wurde der maximale reduzierte Explosionsüberdruck in den Referenzversuchen von $p_{\text{red}, 0} \approx 190$ mbar bei der Standardkonfiguration auf $p_{\text{red}, 0} \approx 710$ mbar angehoben und damit in etwa auf das Druckniveau der Versuche mit Maisstärke.

Aufgetragen über der normierten Druckanstiegsgeschwindigkeit lässt sich beim Vergleich der beiden Versuchsreihen mit Weizenmehl auf unterschiedlichem Druckniveau kein signifikanter Unterschied in der Drucküberhöhung feststellen, Abbildung 20. Sie fiel bei den Versuchen auf höherem Druckniveau mit einem PPF_{max} von 2,5 geringfügig schwächer aus als bei den Versuchen auf dem niedrigeren p_{red} -Niveau ($\text{PPF}_{\text{max}} = 3$), lag aber immer noch erheblich höher als bei den Versuchen mit Maisstärke auf vergleichbarem Druckniveau ($\text{PPF}_{\text{max}} = 1,4$). Dieses Ergebnis lässt allenfalls eine Tendenz vermuten, dass mit dem gleichen Staub mit zunehmendem maximalen reduzierten Explosionsüberdruck die Drucküberhöhungen geringer ausfallen könnten. Im interessierenden Explosionsdruckbereich scheint das Druckniveau jedoch kein dominierender Parameter zu sein.

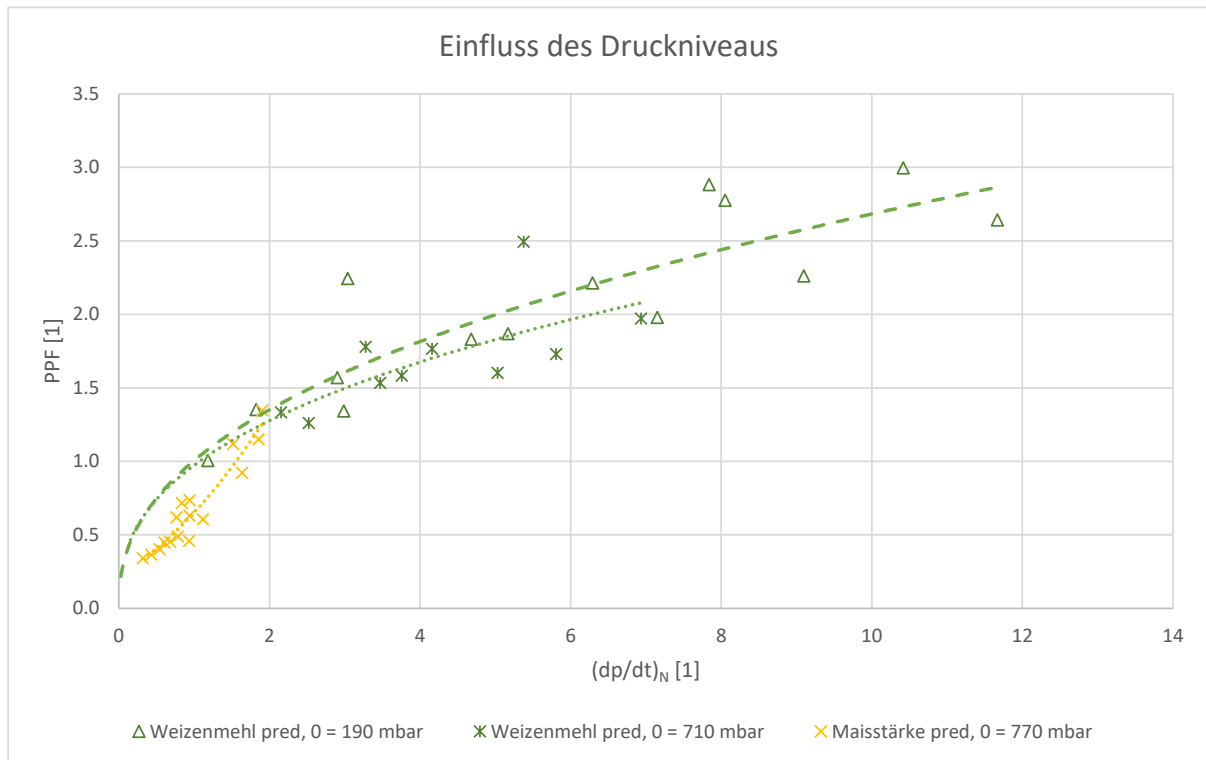


Abbildung 20: Auftragung der Ergebnisse der Versuche mit Weizenmehl auf hohem Druckniveau und niedrigem Druckniveau im Vergleich zu den Versuchen mit Maisstärke. Alle Versuche wurden am 5 m³-Behälter durchgeführt.

3.4.2.4 Einfluss des Verhältnisses von Rohrleitungsvolumen zu Behältervolumen

Der Durchmesser A_R der Rohrleitung wurde bei allen Versuchen konstant gehalten, der Einbauabstand allerdings wurde variiert. Somit variierte auch das Rohrleitungsvolumen zwischen 0,34 m³ und 0,76 m³. Der Anteil des Rohrleitungsvolumens am Volumen des betrachteten Gesamtsystems änderte sich jedoch auch insbesondere mit der Variation des Behältervolumens: Je größer das gekoppelte Volumen, desto kleiner der Anteil des Rohrleitungsvolumens. In den beschriebenen Versuchen mit zwei unterschiedlichen Behältervolumina (9,6 m³ und 5 m³) zeichnete sich ab, dass das Verhältnis Behältervolumen V_B zu Rohrleitungsvolumen V_R einen starken Einfluss auf die Drucküberhöhung aufgrund von Rückwirkungseffekten der Entkopplungseinrichtung hat. Es stand zu vermuten, dass bei kleiner werdendem Verhältnis V_B/V_R die Drucküberhöhung stärker ausfällt, war aber aufgrund der unterschiedlichen Rohrleitungspositionen nach Abschluss der ersten drei Projektstufen nicht eindeutig belegt und musste in weiteren Versuchsreihen überprüft werden.

3.4.2.5 Einfluss der Verbrennungsgeschwindigkeit / des K_{St} -Werts

Aufgrund ihrer Explosionseigenschaften reagieren unterschiedliche Stäube auch unterschiedlich auf die Störungen durch den Entlastungs- und den Entkopplungsvorgang.

Ein Staub mit einem hohen K_{St} -Wert und einer niedrigen Mindestzündenergie reagiert schneller und unter Freisetzung größerer Energiemengen als ein Staub mit niedrigem K_{St} -Wert und hoher Mindestzündenergie MZE im gleichen Behälter in der gleichen Zeitspanne. Das bedeutet, dass in kürzerer Zeit ein größerer Anteil des Staub/Luft-Gemischs reagiert und in Folge der starken Druckerhöhung mit höherer Druckanstiegsgeschwindigkeit zum einen eine größere Menge unverbrannter Staub in kürzerer Zeit ausgetragen wird, zum anderen aber auch eine größere Menge brennbares Material in kürzerer Zeit umgesetzt wird. Das passive Entkopplungssystem reagiert bezogen auf den Zündzeitpunkt folglich zwar "schneller" als bei einer schwächer anlaufenden Reaktion, bezogen auf die Entwicklung der Explosion im Behälter schließt es jedoch zu einem späteren Zeitpunkt, nämlich wenn die Explosion schon weiter fortgeschritten ist. Somit befindet sich zum Schließzeitpunkt erheblich weniger brennbares Material im System. Damit ist auch der Energieinhalt des Systems zum Schließzeitpunkt geringer.

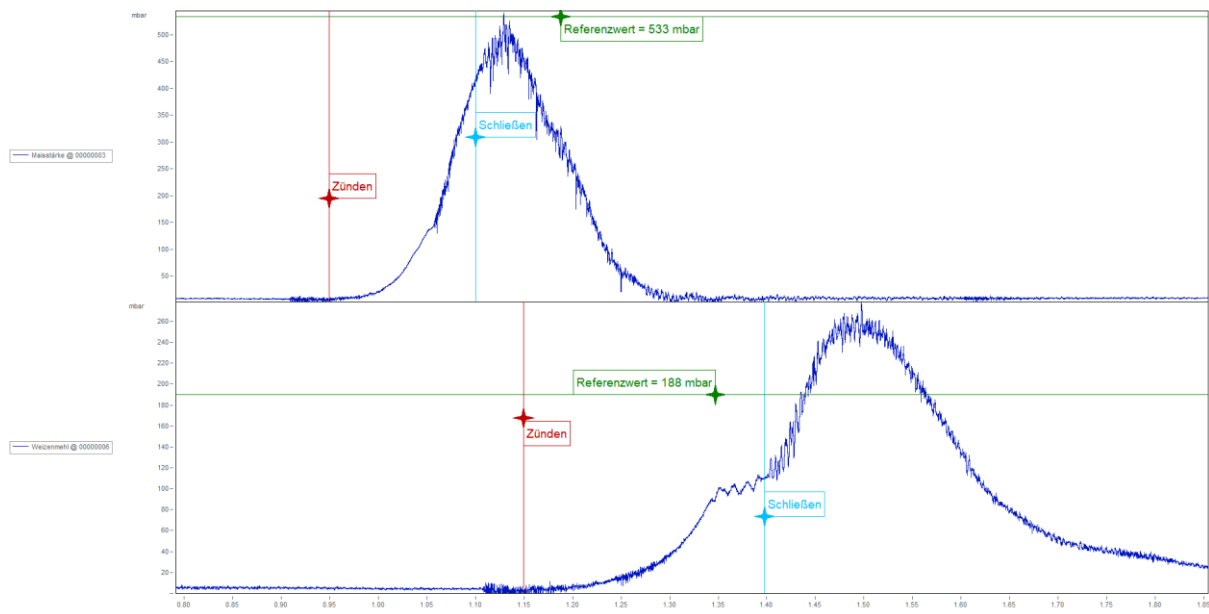


Abbildung 21: Vergleich eines Versuchs mit Maisstärke (PPF = 0,92) mit einem Versuch mit Weizenmehl (PPF = 1,36). Beide Versuche erfolgten am 9,6 m³-Behälter mit Einbauabstand 6 m mit EE1

Die Detailauswertung zweier Versuche aus Projektstufe 1 stützt die Modellvorstellung zum Einfluss der Verbrennungsgeschwindigkeit auf die Rückwirkungseffekte. In Abbildung 21 sind beispielhaft die Druckverläufe im druckentlasteten Explosionsbehälter bei identischem Versuchsaufbau, aber Durchführung des Versuchs mit Stäuben unterschiedlicher K_{St} -Werte gegenübergestellt. Während der ausgewählte Versuch mit dem reaktionsträgeren Weizenmehl eine ausgeprägte Überhöhung des reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter zur Folge hatte (unteres Diagramm), blieb der reduzierte Explosionsüberdruck im Versuch mit getrock-

netter Maisstärke sogar leicht unterhalb des Referenzdrucks. In beiden Kurven sind das Zünden und der Zeitpunkt des Schließens markiert. Das Ansprechen der Entlastungsfläche wird durch einen Knick im Druckverlauf deutlich.

Die in der Arbeitshypothese vermutete Reflexion der Expansionsströmung an der geschlossenen EE und die daraus resultierende Umkehrströmung in der Rohrleitung wird umso stärkere Auswirkungen haben, je mehr Brennstoff dafür zur Verfügung steht. Dies gilt zum einen für die Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit in der Rohrleitung z. B. auf Grund der Scherströmung an der Grenzschicht der gegenläufigen Strömungen, der Temperatur- und Dichteunterschiede, von Flammenfaltung auf Grund der Turbulenz oder von Flammeninstabilitäten, verursacht durch die Interaktion der Explosionsdruckwelle mit der Flamme (Raleigh-Taylor-Instabilität: Wenn die Druckwelle die Flamme in Richtung des noch unverbrannten Staub/Luft-Gemischs mit höherer Dichte beschleunigt, wird die Flamme instabil mit der Folge einer vergrößerten Flammenoberfläche). Aber auch das Ausmaß und die Auswirkung zusätzlicher Turbulenz, die beim Eintreffen der Rückströmung im Behälter induziert wird, sind größer bei Vorhandensein größerer Mengen brennbaren Staubs im Behälter.

Ein Anhaltspunkt dafür ist der Stoffumsatz, für den die Fläche unter der Druck-Zeit-Kurve ein Maß ist. Er beschreibt wie viel Druck innerhalb des betrachteten Zeitraumes durch den reagierenden Staub aufgebaut wurde. Der durch die anfangs offene Rohrleitung und nach Ansprechen der Entlastung durch diesen entweichende Anteil des Staubes trägt nicht zum Druckaufbau bei und wird bei dieser Art der Betrachtung auch nicht berücksichtigt. Zur Ermittlung des Stoffumsatzes wurde die Fläche unter der Druck-Zeit-Kurve im relevanten Zeitintervall betrachtet. Beginnend mit dem Zündzeitpunkt reicht das Intervall bis zu dem Zeitpunkt, an dem der maximale reduzierte Explosionsüberdruck erreicht wurde. Die Druckkurve wurde in diesem Zusammenhang mit einem Tiefpassfilter geglättet und das Integral der geglätteten Kurve gebildet. Durch die Anwendung des Filters entstanden auf Grund der Schwankungen in der Druckkurve teilweise negative Werte zum Zündzeitpunkt. Diese wurden durch Verschieben des Beginns des Intervalls zur Berechnung der Fläche eliminiert, sodass das Integral die Fläche richtig abbildet. Der dadurch erzeugte, rechnerische Fehler lag unter 1 %.

Anschließend wurde das gleiche Prozedere durchgeführt im Intervall vom Zündzeitpunkt bis zum Schließzeitpunkt der Entkopplung. Der prozentuale Anteil der Fläche zwischen „Zünden“ und „Schließen“ an der Fläche zwischen „Zünden“ und Erreichen des maximalen reduzierten Explosionsüberdruckes gibt Aufschluss darüber, wie weit die Reaktion unter den gegebenen Bedingungen bei Schließen der Entkopplung bereits fortgeschritten war.

In 14 von 16 Versuchen mit dem 5 m³-Behälter und getrockneter Maisstärke war der Anteil des Stoffumsatzes bis zum Schließen der Entkopplungseinrichtung am Stoffumsatz bis zum Erreichen von $p_{red,max}$ signifikant höher als bei den entsprechenden Versuchen mit Weizenmehl. Der Mittelwert des anteiligen Stoffumsatzes über alle betrachteten Versuche lag für Weizenmehl bei etwa 28 %, für die Versuche mit Maisstärke betrug er 43 %, Abbildung 22.

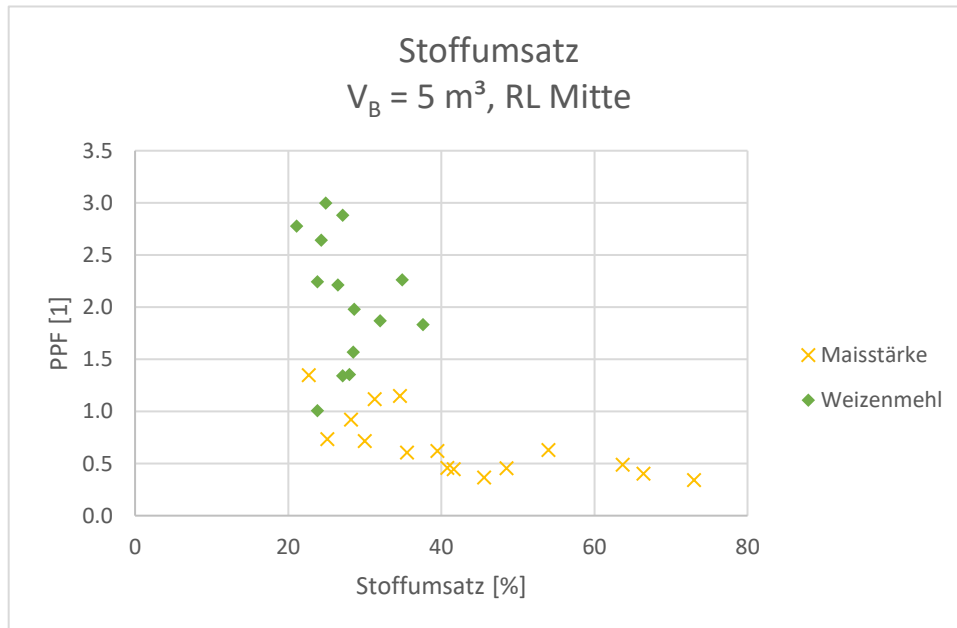


Abbildung 22: Anteil des Stoffumsatzes im Zeitraum bis zum vollständigen Schließen der Entkopplungseinrichtung am Stoffumsatz im Zeitraum bis zu Erreichen von $p_{red, max}$,
 $V_B = 5 \text{ m}^3$, Rohrleitungsposition: Behältermitte

Auch bei den Versuchen mit dem $9,6 \text{ m}^3$ -Behälter mit der Rohrleitungsposition "unten" überstieg der anteilige Stoffumsatz der Maisstärke (Mittelwert 38 %) den Mittelwert des Stoffumsatzes des Weizenmehls (25 %), Abbildung 23.

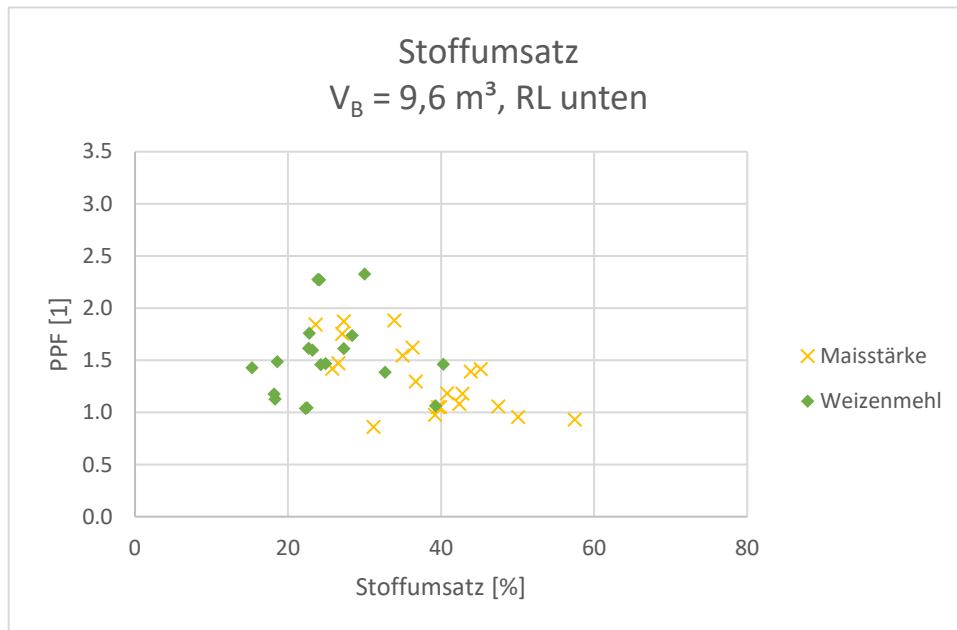


Abbildung 23: Anteil des Stoffumsatzes im Zeitraum bis zum vollständigen Schließen der Entkopplungseinrichtung am Stoffumsatz im Zeitraum bis zu Erreichen $V_{ON \text{ pred, max,}}$
 $V_B = 9,6 \text{ m}^3$, Rohrleitungsposition "unten"

Dies gilt auch für die Versuche mit dem $9,6 \text{ m}^3$ -Behälter und oben angeflanschter Rohrleitung: Der Mittelwert des anteiligen Stoffumsatzes von Weizenmehl betrug 33 % des Stoffumsatzes bis zum Erreichen des maximalen reduzierten Explosionsüberdrucks, bei den Versuchen mit Maisstärke waren zum Schließzeitpunkt im Mittel bereits 55 % des Stoffes umgesetzt, Abbildung 24.

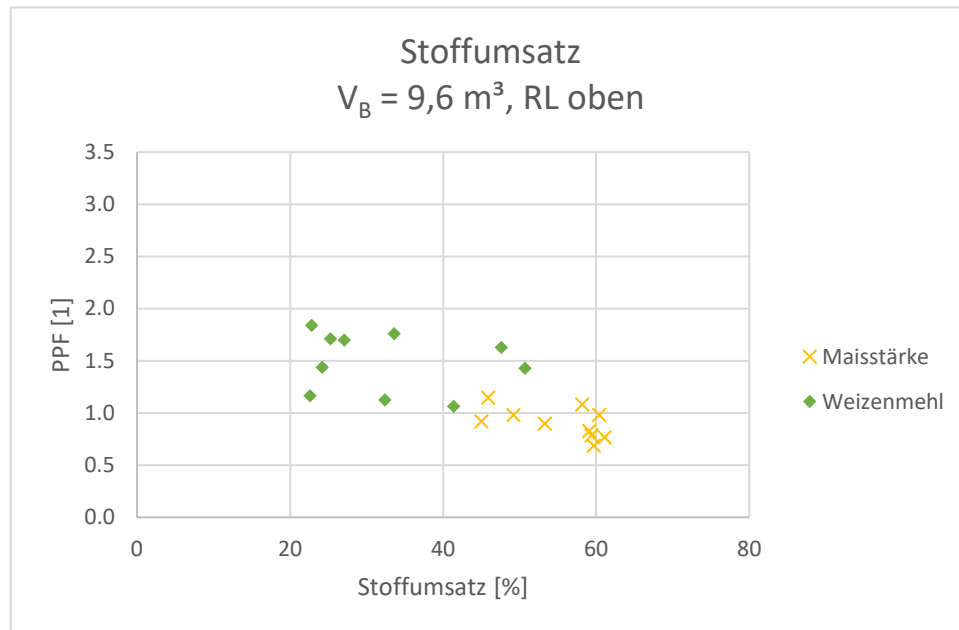


Abbildung 24: Anteil des Stoffumsatzes im Zeitraum bis zum vollständigen Schließen der Entkopplungseinrichtung am Stoffumsatz im Zeitraum bis zu Erreichen $V_{ON \text{ pred, max}}$, $V_B = 9,6 \text{ m}^3$, Rohrleitungsposition "oben"

Eine Ursache für das unterschiedliche Verhalten der Stäube ist möglicherweise, dass der Reaktion eines Stoffes durch die Physik Grenzen gesetzt sind. Die Reaktion eines Stoffes ist auf molekularer Ebene durch einen geschwindigkeitsbestimmenden Schritt wie zum Beispiel die Stoßanzahl begrenzt. Für eine Reaktion sind Stöße der Teilchen der reagierenden Stoffe notwendig, die durch die Erhöhung der Turbulenz vermehrt auftreten und damit eine Beschleunigung des Ablaufs der Reaktion bewirken.¹ Bei reaktionsfreudigen Stäuben mit von Natur aus hoher Stoßzahl wird diese durch die Anregung der Turbulenz in Folge des Ansprechens der Entkopplungseinrichtung weit weniger stark erhöht als die eines trägeren Stoffes. Eine weitere Anregung der Turbulenz könnte den Effekt der Beschleunigung sogar ins Gegenteil umschlagen lassen und zu Flammenlöschung führen. Daher ist anzunehmen, dass für jeden Staub eine Art Obergrenze der Beschleunigung und damit auch für eine möglicherweise auftretende Drucküberhöhung existiert.

¹ Franz Joos, Technische Verbrennung, S. 126 + 128

3.5 Hypothesen nach Abschluss von 3 Projektstufen

Mit den ersten drei Projektstufen ist es gelungen, die Drucküberhöhungen in verschiedenen Behältern mehrfach zu reproduzieren. Mit Hilfe der Auswertung der Daten entstand ein Bild von dem Geschehen, dass den Drucküberhöhungen zu Grunde liegt. In Abbildung 25 ist es schematisch dargestellt.

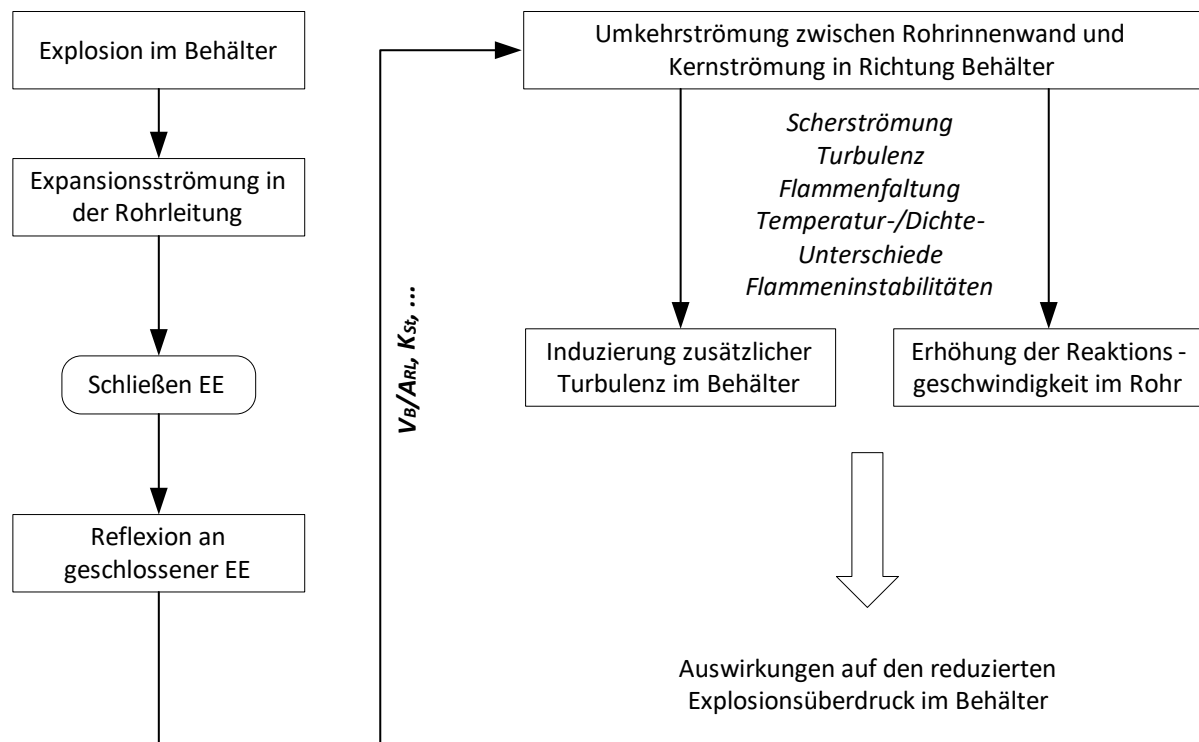


Abbildung 25: Hypothese zur Entstehung überhöhter reduzierter Explosionsüberdrücke im gekoppelten druckentlasteten Behälter durch das Schließen einer Entkopplungseinrichtung

Da das Prinzip Entkopplung in jedem Explosionsfall unverändert bleibt und in Folge dessen auch in jedem Fall eine Rückwirkung auf das Explosionsgeschehen entsteht, die aber nicht immer mit einer Drucküberhöhung einhergeht, wurden Parameter extrahiert, die einen möglichen Einfluss auf das Zustandekommen der Drucküberhöhung und ihre Höhe haben. Dazu zählen der K_{St} -Wert bzw. die Mindestzündenergie eines Staubes. Für Stäube mit niedrigen K_{St} -Werten bzw. hoher Mindestzündenergie muss eher mit einer Drucküberhöhung in Folge der Rückwirkung einer Entkopplungseinrichtung gerechnet werden, als für Stäube mit hohen K_{St} -Werten und niedriger MZE. Weiterhin ist die Position der Rohrleitung in Relation zur Lage der Druckentlastungsfläche in Kombination mit dem Längen-Durchmesser-Verhältnis des Behälters von Interesse. Ebenso relevant scheint das Verhältnis von Behältervolumen zum Rohrlängendurchmesser zu sein. Der Einbauabstand, die Art der Entkopplungseinrichtung und das Niveau des maximalen reduzierten Explosionsüberdruckes spielen für das Auftreten und die Höhe der Drucküberhöhungen auf Basis der vorliegenden Daten eine untergeordnete

Rolle. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse und Schlussfolgerungen wurde die folgende Hypothese entwickelt: Die Druckübererhöhung auf Grund von Rückwirkungseffekten von Explosionsentkopplungseinrichtungen auf den reduzierten Explosionsüberdruck in druckentlasteten Behältern beruht auf der Turbulenzerhöhung in Folge einer Rückströmung durch die Rohrleitung in den Behälter, die mit dem Schließen der Entkopplungseinrichtung und dem damit einhergehenden starken Druckaufbau vor der Entkopplungseinrichtung initiiert wird. Mit dem Druckaufbau erfolgt die Ausbildung von Schwingungen und eines hochturbulenten Strömungszustandes. Die fortwährende Reaktion des Staub-Luft-Gemisches wird dadurch angefacht und die Strömungsrichtung im Rohr wechselt, so dass das reagierende Gemisch in die bestehende Explosion im Behälter hineinströmt. Die Anfachtung der turbulenten Schwingungen im Behälter sowie die zeitliche Folge der Amplituden über die Rohrlänge in unmittelbarer Folge des Schließens sind deutliche Hinweise dafür.

Abhängig von verschiedenen Einflussgrößen fallen die Drucküberhöhungen jedoch unterschiedlich aus. Als vorherrschende Größen konnten diesbezüglich insbesondere die Explosionseigenschaften des Staubes, die Positionierung von Entlastungsfläche und Rohrleitung zueinander in Kombination mit dem L/D-Verhältnis des Behälters sowie das Verhältnis von Behältervolumen zu Rohrleitungsdurchmesser identifiziert werden. Über ihren Einfluss wurden die folgenden Hypothesen erstellt:

Die Druckübererhöhung auf Grund von Rückwirkungseffekten von Explosionsentkopplungseinrichtungen auf den reduzierten Explosionsüberdruck in druckentlasteten Behältern

i) weist eine deutliche Abhängigkeit von der Verbrennungsgeschwindigkeit bzw. dem Kst-Wert des Staubes auf. Bei Stäuben mit hoher Verbrennungsgeschwindigkeit (hohem Kst-Wert) und niedriger MZE findet ein erheblich schnellerer Umsatz des Materials statt. Damit steht zum Schließzeitpunkt der Entkopplungseinrichtung sowohl in der Rohrleitung als auch im Behälter weniger brennbares Material zur Verfügung. Die Anfachtung der Turbulenz kann sich in diesem Falle zwar verstärkend auswirken, da aber die Explosion im Behälter beim Eintreffen der Rückströmung schon relativ weit fortgeschritten ist, ist auch die Auswirkung der Turbulenzerhöhung geringer.

Bei Versuchen mit einem Staub mit Explosionseigenschaften, die zwischen jenen, die bisher verwendeten liegen, sind Drucküberhöhungen zu erwarten, die ebenfalls zwischen den bisher erfassten Drucküberhöhungen liegen.

ii) weist unter Berücksichtigung der Behältergeometrie eine deutliche Abhängigkeit von der Positionierung der Entlastungsfläche relativ zur Position der Rohrleitung mit der Entkopplungseinrichtung auf. In langgestreckten Behältern wird die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit und damit auch die Reaktionsgeschwindigkeit beschleunigt. Eine Anfachtung der Turbulenz maximal entfernt von der Druckentlastung wird damit auf Grund des weiten Weges deutlichere Auswirkungen zeigen als in kubischen Behältern oder für den Fall, dass sich die Entlastungsfläche nahe der Rohrleitung befindet.

iii) weist eine deutliche Abhängigkeit vom Verhältnis Behältervolumen zu Rohrleitungsvolumen auf. Wenn der Reaktionsraum "Rohrleitung" klein wird im Vergleich zum Behältervolumen, wird eine Rückströmung nur einen kleinen Volumenanteil des viel größeren Reaktionsraums "Behälter" beeinflussen und auch die Wiedereinmischung unverbrannten Staubes und heißer Verbrennungsgase wird sich weniger stark auswirken als bei Kombination einer vergleichsweise großvolumigen Rohrleitung mit einem kleinen Behälter.

3.6 Ergebnisse der Projektstufen 4 und 5

Um die formulierten Hypothesen zu überprüfen und weitere wichtige Daten zu sammeln, wurden zwei weitere Versuchsreihen angesetzt.

Zur Verifizierung der Hypothese i) aus Kapitel 3.5 wurden Versuche mit einem weiteren Staub durchgeführt, dessen Explosionskennzahlen zwischen denen der bislang verwendeten Produkte Weizenmehl und getrocknete Maisstärke lagen. Für die Überprüfung der Hypothese iii) aus Kapitel 3.5 wurden sowohl ein größerer als auch ein kleinerer Behälter als die bisherigen Volumina verwendet. Die experimentelle Überprüfung der Hypothese ii) aus Kapitel 3.5 musste zugunsten der Untersuchung des Einflusses von K_{st} -Wert und dem Verhältnis V_B/A_R zurückgestellt werden.

In den ersten drei Projektstufen waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den Entkopplungseinrichtungen hinsichtlich des Auftretens oder der Höhe der Drucküberhöhung beobachtet worden. Daher wurden alle weiteren Versuche ausschließlich mit der druckstoßfesteren EE2 durchgeführt.

3.6.1 Ergebnisse der Projektstufe vier

In der vierten Projektstufe kam mit dem 26,4 m³-Behälter der größte im Rahmen dieser Untersuchungen verwendete Explosionsbehälter zum Einsatz. Die Rohrleitung mit dem gleichen Nenndurchmesser (DN 400) wie in allen vorangegangenen Versuchen war in der unteren Hälfte des Behälters angeflanscht.

Die Maximalwerte der Versuchsergebnisse sind in Abbildung 26 über dem Einbauabstand aufgetragen. Im Mittel konnten in dieser Konstellation kaum Drucküberhöhungen gegenüber den Referenzversuchen verzeichnet werden. Der Maximalwert der Drucküberhöhung betrug $PPF = 1,3$ (Versuch mit Weizenmehl). Mit Maisstärke konnte keine Drucküberhöhung gegenüber den Referenzversuchen beobachtet werden. Die Werte der beiden Versuche mit 6 m Einbauabstand lagen etwa im Bereich der Referenzwerte. Bei einem Einbauabstand von 3 m lagen die Werte sogar unter $PPF = 0,8$. Da die Versuchsergebnisse eine schwache Tendenz eines Zusammenhangs zwischen Druckerhöhung und Einbauabstand erkennen ließen, wurden außerdem noch zwei Versuche mit einem deutlich längeren Einbauabstand durchgeführt ($L = 10$ m). Diese bestätigten die Tendenz nicht. Die reduzierten Explosionsüberdrücke lagen

auch für diesen Fall im Bereich der Werte der Referenzversuche. Auch zwei Versuche bei einem Einbauabstand von 6 m und einer zusätzlichen Rohrleitung der Länge $L = 3,5$ m auf der geschützten Seite der Entkopplungseinrichtung ergaben keine Druckerhöhung gegenüber den Referenzversuchen

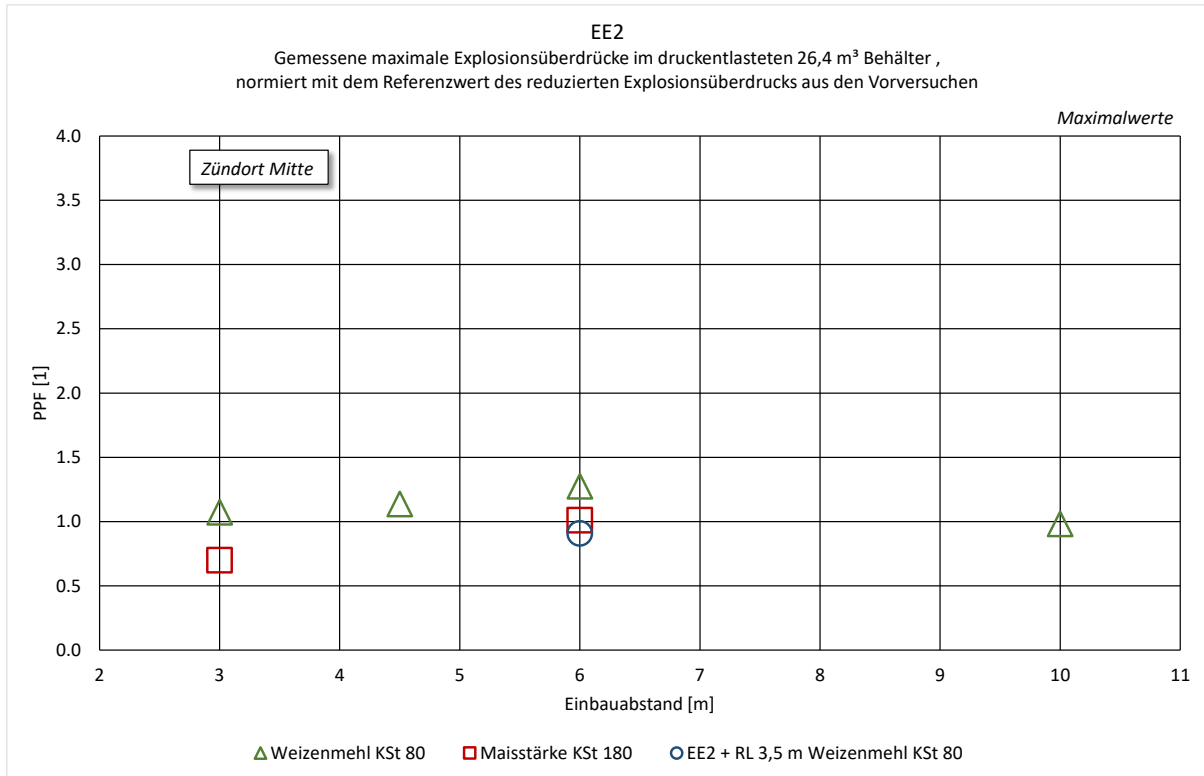


Abbildung 26: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen mit dem 26,4 m³-Explosionsbehälter, normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 26,4 m³-Explosionsbehälter ohne Rohrleitung)

3.6.2 Ergebnisse der Projektstufe 5

Für die fünfte Projektstufe wurde neben den bisher verwendeten Stäuben zusätzlich eine ungetrocknete Maisstärke verwendet. Mit ihrem Explosionskenngrößen liegt diese zwischen den bisher verwendeten Stäuben (Kennzahlen siehe Kap. 2.1).

Die Versuche erfolgten am 1 m³-Behälter. Aus zeitlichen Gründen wurde lediglich die Einbausituation bei 6 m untersucht. Für alle drei Stäube wurden sehr deutliche Drucküberhöhungen gegenüber den Referenzversuchen festgestellt. In Abbildung 27 sind die Maximalwerte aus den drei Versuchsreihen mit den unterschiedlichen Stäuben über dem Einbauabstand aufgetragen.

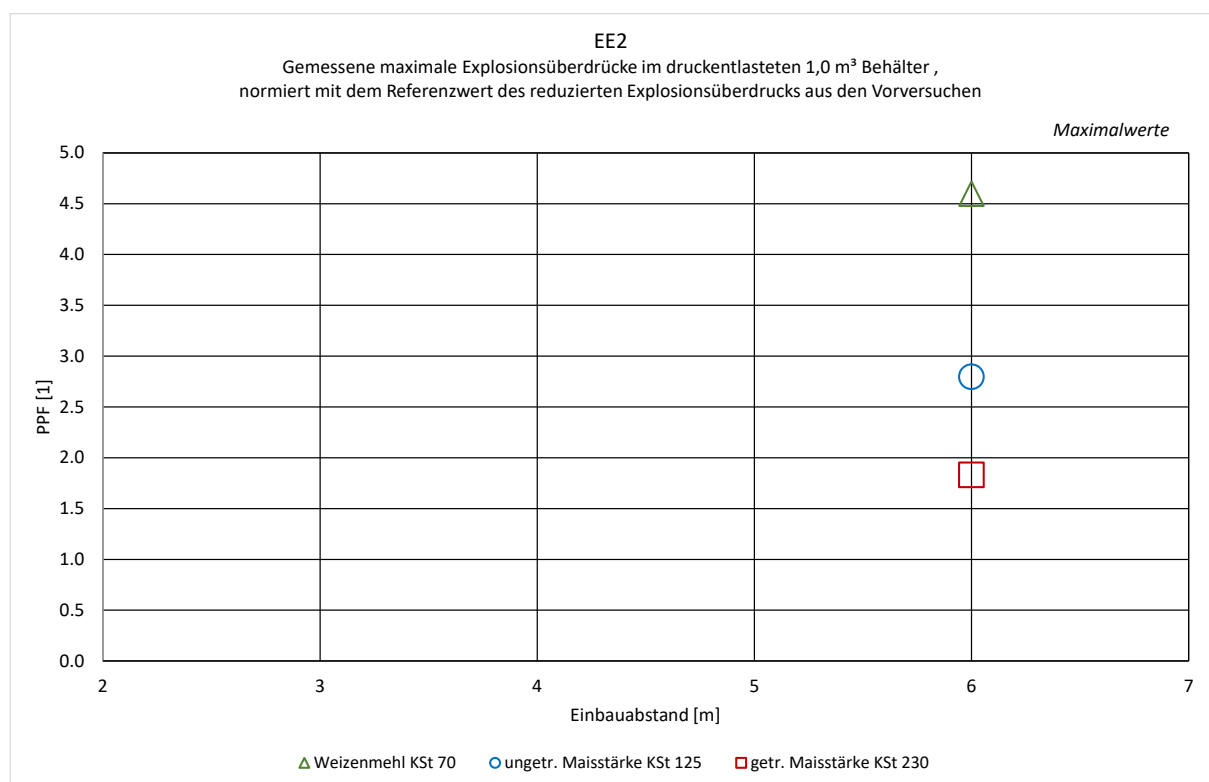


Abbildung 27: Normierte Auftragung der Versuchsergebnisse (gemessene Maximalwerte aller Versuchsreihen mit dem 1 m³-Explosionsbehälter, normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten 1 m³-Explosionsbehälter ohne Rohrleitung)

Mit einem Faktor von 4,6 bei einem Versuch mit Weizenmehl wurde in dieser Versuchsreihe der Maximalwert aller in diesem Projekt bestimmten Druckerhöhungen vorgefunden. Die Drucküberhöhungen der ungetrockneten Maisstärke lagen im Mittel bei einem Faktor 2,7 und damit deutlich über den Werten der getrockneten Maisstärke. Dennoch konnte auch für getrocknete Maisstärke bei einem Versuch mit PPF = 1,9 eine deutliche Drucküberhöhung festgestellt werden.

3.6.3 Auswertung der Projektstufen 4 und 5 und Schlussfolgerungen aus allen Projektstufen

Die Auswertung der Ergebnisse der letzten beiden Projektstufen erfolgte analog zu den vorherigen Stufen.

Bei allen Versuchen entstand das charakteristische Schwingungsbild, wie es oben bereits beschrieben wurde. Die maximale gemittelte Flammengeschwindigkeit entsprach mit maximal 100 m/s am 26 m³ und 250 m/s am 1m³-Behälter auch bei den Versuchen dieser beiden Projektstufen der von Deflagrationen.

Die maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten erreichten für Weizenmehl im Mittel mit 68 bar/s und getrocknete Maisstärke (Mittelwert: 192 bar/s) im 1 m³-Behälter, trotz der Entlastung, die Werte, die diese Stoffe bei einer Kennzahlermittlung im gleichen, allerdings geschlossenen Behälter aufweisen.

Am 26,4 m³-Behälter lagen die maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten für die Versuche mit Weizenmehl im Mittel bei 1,90 bar/s und überstiegen damit die des Vorversuches (im Schnitt 1,46 bar/s) nur leicht. Gleiches gilt für die Maisstärke, die im Mittel auf 5,06 bar/s kam. Im Vergleich lagen die Vorversuche bei 4,48 bar/s. Bei drei Vierteln dieser Versuche mit Maisstärke wurde die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit jedoch bereits beim Ansprechen der Entlastung, also noch vor dem Ansprechen der Entkopplung, verzeichnet.

Ein möglicher Einfluss des Einbauabstandes kann auch durch diese Versuche nicht geklärt werden. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, bestand die Vermutung einer leichten Tendenz, die durch zwei zusätzliche Versuche nicht bestätigt werden konnte.

Die Versuche der ersten beiden Projektstufen hatten schon gezeigt, dass bei länger gestreckten Behältern wie dem 9,6 m³-Behälter die Rohrleitungsposition relativ zu Zündort und Explosionsdruckentlastung nicht vernachlässigbar ist. Mit dem gleichen Behälter und ansonsten identischen Versuchsparametern fiel die Druckerhöhung bei unten angeflanschter Rohrleitung signifikant höher aus als bei oben nahe der Explosionsdruckentlastung montierter Rohrleitung. Dieser Einfluss lässt sich mit dem L/D des Behälters beschreiben: Befindet sich die Rohrleitung an einem länger gestreckten Behälter jenseits der Behältermitte an einem von der Explosionsdruckentlastung entfernten Ort, muss das Behälter L/D berücksichtigt werden. In dieser Betrachtung wird ein Behälter als "länger gestreckt" bezeichnet, wenn sein L/D > 1,5 beträgt.

Bestätigt hat sich der starke Einfluss des Behältervolumens bzw. richtigerweise des Quotienten aus Behältervolumen und Querschnittsfläche der Rohrleitung V_B/A_R auf die von der Explosionsentkopplung verursachte Drucküberhöhung.

In Abbildung 28 sind die Maximalwerte der Drucküberhöhungen jeder Versuchskonstellation mit dem jeweiligen Staub unabhängig von der Rohrlänge über dem genannten Verhältnis aufgetragen. Die erfassten Drucküberhöhungen steigen exponentiell mit dem kleiner werdenden Verhältnis V_B/A_R .

Auffällig ist der mit 1,9 sehr hohe Maximalwert bei $V_B/A_R = 76$ "m" für die Versuchen mit getrockneter Maisstärke am 9,6 m³-Behälter in der Konfiguration „Rohrleitung unten“. In dieser Versuchsreihe wiesen zwei weitere Versuche mit getrockneter Maisstärke ähnlich hohe Drucküberhöhungen auf. Diese Ergebnisse widersprechen der Hypothese zum Einfluss des Verhältnisses von Behältervolumen zu Rohrlungsdurchmesser allerdings nur scheinbar. Hier wird vielmehr der oben beschriebene Einfluss von Behälter-L/D und Rohrleitungsposition sichtbar.

Für die Versuche mit Weizenmehl (PPF = 2,33) fiel die Abweichung von der Trendlinie nicht so drastisch aus. Die Ursache hierfür ist in erster Linie in den unterschiedlichen Explosionscharakteristika der Stäube und dem daraus resultierenden zeitlichen Zusammenwirken der unterschiedlichen, den Explosionsablauf beeinflussenden Auswirkungen des Schließvorgangs zu suchen. Selbstverständlich darf auch die relativ große Schwankungsbreite der Versuchsergebnisse bei der Bewertung nicht vernachlässigt werden.

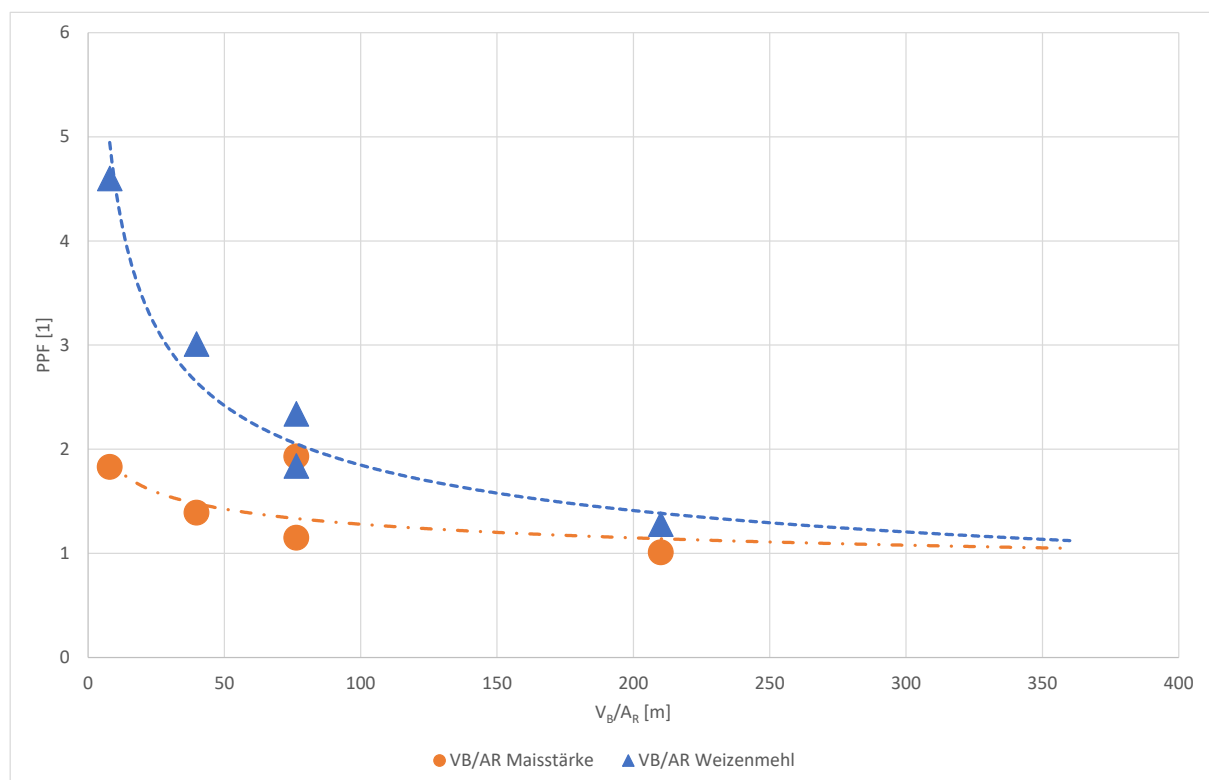


Abbildung 28: Trend des Einflusses des Verhältnisses von Behältervolumen V_B zu Rohrlungsdurchmesser A_R .

Basierend auf diesen Ergebnissen kann folgende Annahme abgeleitet werden:

Für alle organischen Stäube, deren Explosionskenngrößen zwischen denen vom hier verwendeten Weizenmehl und der Maisstärke liegen, ist davon auszugehen, dass unter optimalen

Bedingungen, das heißt bei der Staubkonzentration, bei der K_{St} ermittelt wurde, ab einem Verhältnis von $V_B/A_R \geq 350$ „m“ nicht mehr mit einer Drucküberhöhung zu rechnen ist, die über das Normalmaß der Schwankungen im Ablauf einer Explosion hinausgehen. "Normalmaß" bezeichnet in diesem Zusammenhang den aus der Praxis des Prüfgeschehens für Systeme und Geräte, die für den Explosionsschutz entwickelt wurden sind, hervorgehenden Erfahrungswert der Schwankungsbreite der Reproduzierbarkeit des reduzierten Explosionsüberdruckes von ± 20 %.

Auch die Hypothese über den Einfluss des K_{St} -Wertes wurde bestätigt. Wie schon zuvor die Druckanstiegsgeschwindigkeiten untermauern auch die Werte des Stoffumsatzes die getroffenen Überlegungen. Im 1 m³-Behälter war der Anteil des Stoffumsatzes zum Schließzeitpunkt am Umsatz vom Zündzeitpunkt bis zum Erreichen des maximalen reduzierten Explosionsüberdruckes bei Maisstärke im Mittel erwartungsgemäß mit 51,3 % deutlich höher als bei Weizenmehl, dass einen Mittelwert von 18,8 % aufwies. Die ungetrocknete Maisstärke lag mit einem Mittelwert von 22,4 %, in Übereinstimmung mit den ermittelten maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten, sehr nahe bei den Werten des Weizenmehls. Ein hoher Stoffumsatz bis zum Schließzeitpunkt hat zur Folge, dass weniger reaktiver Staub für die beschriebenen Mechanismen der Rückwirkung des Schließvorgangs zur Verfügung steht und die resultierende Drucküberhöhung somit niedriger ausfallen wird. In Prozessen mit Stäuben, die einen hohen K_{St} -Wert aufweisen, besteht demnach ein geringeres Risiko für das Auftreten einer vom Schließen der Entkopplungseinrichtung verursachten gefährlichen Drucküberhöhung, wobei der Einfluss des Behälter-L/D nicht vernachlässigt werden darf.

Am 26,4 m³-Behälter betrug der Anteil des Stoffumsatzes am Umsatz vom Zündzeitpunkt bis zum Erreichen des maximalen reduzierten Explosionsüberdruckes zum Schließzeitpunkt für Maisstärke im Mittel 24,7 % und lag damit auch hier höher als der Mittelwert des Weizenmehls (15,2 %). Jedoch war die Differenz nicht so deutlich wie bei den Versuchen, die mit den kleineren Behältervolumina (aber dem gleichen Durchmesser der Rohrleitung!) durchgeführt worden waren. An diesem Behälter war die Reaktion zum Schließzeitpunkt und damit auch zum Eintreffen der Störung im Behälter noch nicht so weit fortgeschritten, dem entsprechend müsste der Theorie nach eine Drucküberhöhung zu verzeichnen sein. Dies war jedoch nicht der Fall. Das Volumen des Behälters und vor allem auch das Verhältnis von Behältervolumen V_B zu Rohrleitungsvolumen A_R spielt hierbei eine entscheidende Rolle. In Folge des im Verhältnis zum Behälterdurchmesser kleinen Rohrlungsdurchmessers eine eintreffende Störung in Form einer durch das Schließen hervorgerufenen Rückströmung einen sehr viel kleineren Anteil des Reaktionsraumes „Behälter“ ergreift. Damit wird die Reaktion im Behälter erheblich weniger angefacht und die Druckentlastung kann ihre Aufgabe voll erfüllen. Folglich ist auch keine Drucküberhöhung zu verzeichnen.

Somit konnten die aufgestellten Hypothesen mit den Ergebnissen der Projektstufen 4 und 5 bestätigt und untermauert werden.

4 Kriterien und Werkzeuge zur Worst-Case-Abschätzung

Mit den beschriebenen Untersuchungen konnten wesentliche Einflussparameter für die beobachteten Effekte identifiziert werden. Auch wenn bis zum jetzigen Zeitpunkt eine analytische physikalische Beschreibung nicht gelungen ist, so liefern die Untersuchungen doch eine wertvolle Datenbasis für die weitere theoretische Bearbeitung, insbesondere auch unter Einsatz numerischer Simulation. Aber auch zum jetzigen Zeitpunkt lassen sich bereits wichtige Erkenntnisse extrahieren, die eine Worst-Case-Abschätzung ermöglichen. Worst-Case-Abschätzung deshalb, weil die Untersuchungen im Bereich der für Staubexplosionen optimalen Konzentrationen und bei näherungsweise homogener Staubverteilung im Volumen durchgeführt wurden, einem Zustand, der in praktischen Anwendungen nicht unbedingt immer, ja eher selten oder sogar gar nicht auftreten wird. Dies ist vermutlich auch der Grund, warum das Phänomen der Rückwirkung bisher nicht in den Fokus gerückt ist und schafft ein gewisses Maß an Sicherheit.

Auch bei geringen Staubkonzentrationen können die beschriebenen Mechanismen der Beschleunigung der Reaktion durch das Schließen der Entkopplung auftreten, allerdings sind auch die Geräte und Anlagen auf die Maximalwerte bei optimalen Bedingungen ausgelegt, da im konstruktiven Explosionsschutz grundsätzlich das Prinzip der Worst-Case-Betrachtung angewendet wird.

Vor diesem Hintergrund wurden die nachfolgend beschriebenen Kriterien und Werkzeuge entwickelt, die nach bisherigem Kenntnisstand sicherstellen sollten, dass bei ihrer Einhaltung die sicherheitskritischen Festigkeiten der Geräte und Anlagenteile nicht überschritten werden. Sie können auf alle den verwendeten Entkopplungseinrichtungen konstruktiv vergleichbaren Produkte übertragen werden. Inwieweit sie auch auf Löschmittelsperren oder Quenchventile und ähnliche Konstruktionen anwendbar sind, wurde bislang nicht untersucht.

4.1 Zahlenwertgleichung zur Abschätzung der Drucküberhöhung durch die Rückwirkungseffekte einer Explosions-Entkopplungseinrichtung

Zur konservativen Abschätzung der maximal auftretenden Drucküberhöhung aufgrund der Rückwirkung eines Explosions-Entkopplungssystems auf den reduzierten Explosionsüberdruck im verbundenen druckentlasteten Behälter wurden zwei Zahlenwertgleichungen entwickelt mit den Einflussgrößen K_{St} , V_B/A_R und L/D als Parameter. Die von diesen Gleichungen beschriebenen Kurven bilden Einhüllende um die in diesem Forschungsprojekt gemessenen maximalen Drucküberhöhungen PPF. Den Gleichungen liegen die beschriebenen Versuchsbedingungen zugrunde.

Für Behälter mit $L/D \leq 1,5$ muss keine Abhängigkeit von der Rohrleitungsposition betrachtet werden. Es gilt:

$$PPF = -65,531 \times K_{St}^{-1} \times \ln(V_B/A_R) + 252,58 \times K_{St}^{-0,85} \quad [1]$$

Für länger gestreckte Behälter mit $L/D > 1,5$ muss dieses berücksichtigt werden, wenn sich die Rohrleitung an einer von der Explosionsdruckentlastung entfernten Position befindet. Dann gilt:

$$PPF = [-65,531 \times K_{St}^{-1} \times \ln(V_B/A_R) + 252,58 \times K_{St}^{-0,85} \times 0,9259 \times (L/D)^{(K_{St}/460)}] \quad [2]$$

Die Gleichungen gelten nur für organische Stäube, deren K_{St} -Wert im untersuchten Bereich liegt:

$$70 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K_{St} \leq 230 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Einzusetzen ist derjenige K_{St} -Wert, der auch für die Auslegung der Explosionsdruckentlastung des verbundenen Behälters verwendet wurde.

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen die gute Übereinstimmung der mit den Zahlenwertgleichungen berechneten Kurven mit den Messwerten.

Die Gültigkeit der Kurven wurde zusätzlich anhand von Versuchsdaten, die außerhalb dieses Projektes entstanden sind, validiert.

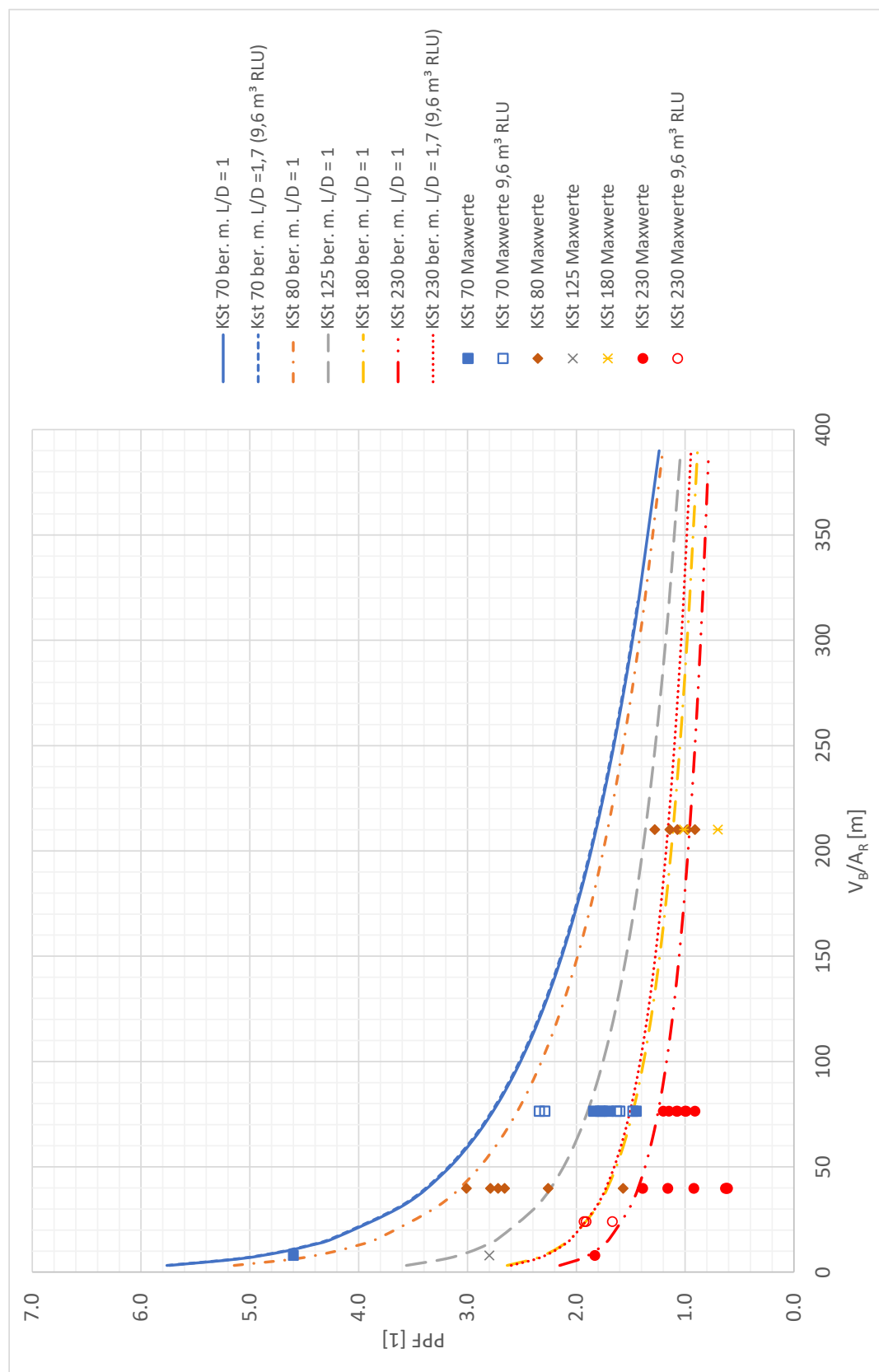


Abbildung 29: Abschätzung der Drucküberhöhung aufgrund der Rückwirkung eines Explosions-Entkopplungssystems auf den reduzierten Explosionsdruck im verbundenen druckentlasteten Behälter
 Kurven: berechnet aus Zahlenwertgleichungen
 Symbole: gemessene maximale Drucküberhöhungen aus allen Versuchsreihen

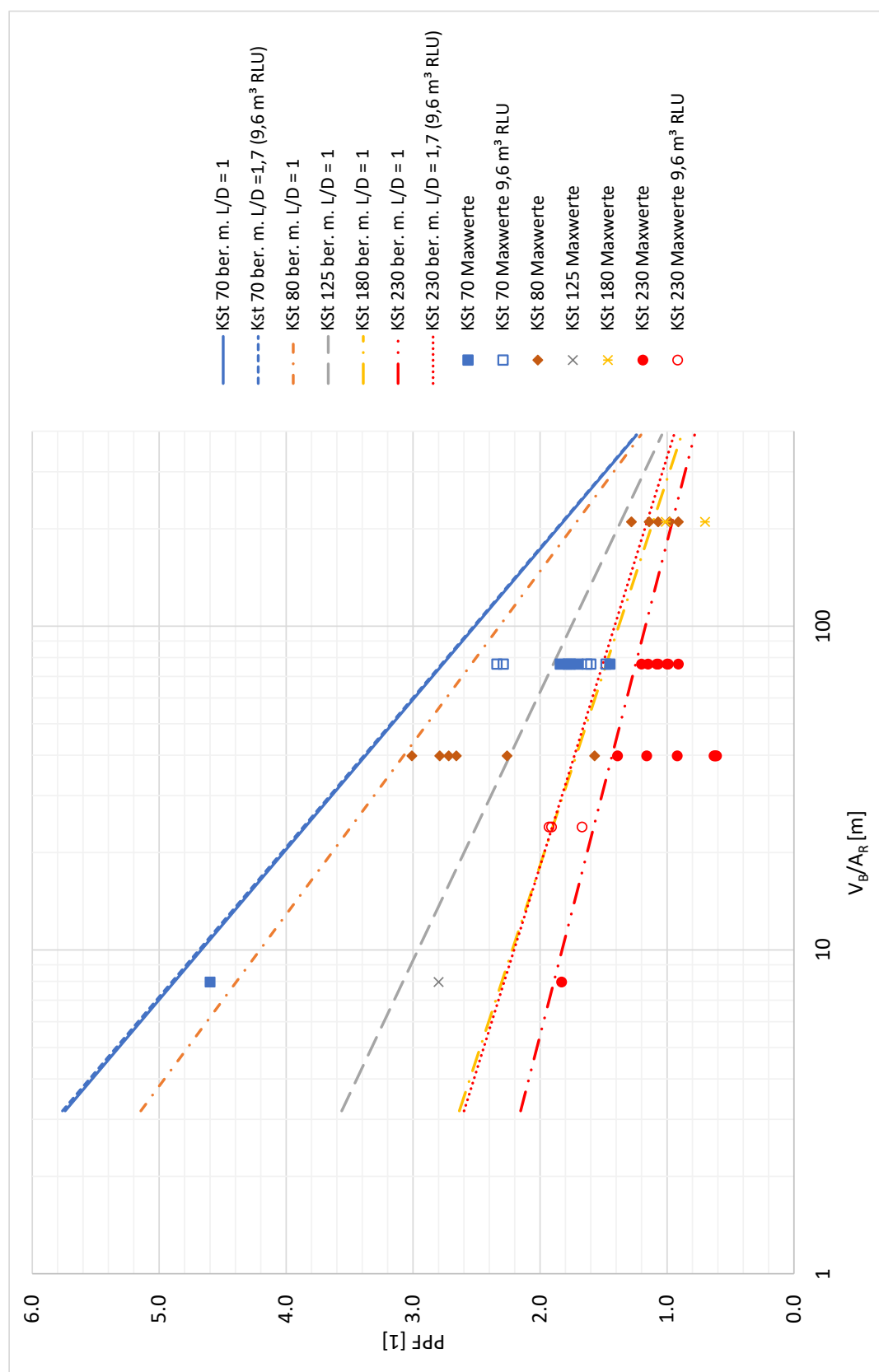


Abbildung 30: Wie Abbildung 30, jedoch in logarithmischer Auftragung

4.2 Abschätzung des kleinsten unkritischen Behältervolumens

Sowohl die Explosionscharakteristika als auch das Verhältnis V_B/A_R sind relevant für das Auftreten und die Höhe der Drucküberhöhungen. Ausgehend von den mit Weizenmehl ($K_{St} = 70 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) maximal ermittelten Drucküberhöhungen sind Werte über dem 1,2-fachen des Referenzwertes ab einem $V_B/A_R \geq 400 \text{ „m“}$ unwahrscheinlich. Mit dieser Voraussetzung lässt sich ein "kleinstes unkritisches Behältervolumen" $V_{B,unkrit}$ definieren als dasjenige kleinste Volumen, für das in Kombination mit einem gegebenen Rohrleitungsdurchmesser keine kritische Drucküberhöhung durch die Rückwirkung einer Entkopplungseinrichtung zu erwarten ist. Für Kombinationen von Rohrleitungsdurchmessern und Behältervolumina, für die gilt

$$V_B \geq V_{B,unkrit}$$

muss somit keine Drucküberhöhung aufgrund der Rückwirkung eines passiven Explosions-Entkopplungssystems der untersuchten Bauart bei der Auslegung berücksichtigt werden.

Eine Abschätzung von $V_{B,unkrit}$ gelingt nach Umformung der Zahlenwertgleichung [1] und Auflösung nach V_B . Mit den Bedingungen

$$PPF = 1,2$$

und

$$L/D \leq 1,5$$

kann $V_{B,unkrit}$ als "Funktion" des K_{St} -Werts des Staubes und mit dem Durchmesser der Rohrleitung D_R als Scharparameter dargestellt werden. Es ergibt sich

$$V_{B,unkrit} = e^B \times \frac{\pi}{4} \times D_R^2 \quad [3]$$

mit

$$B = \frac{1,2 - 252,58 \times K_{St}^{-0,85}}{-65,531 \times K_{St}^{-1}}$$

Abbildung 31 visualisiert das Ergebnis einer solchen Abschätzung am Beispiel gängiger Rohrleitungsdurchmesser.

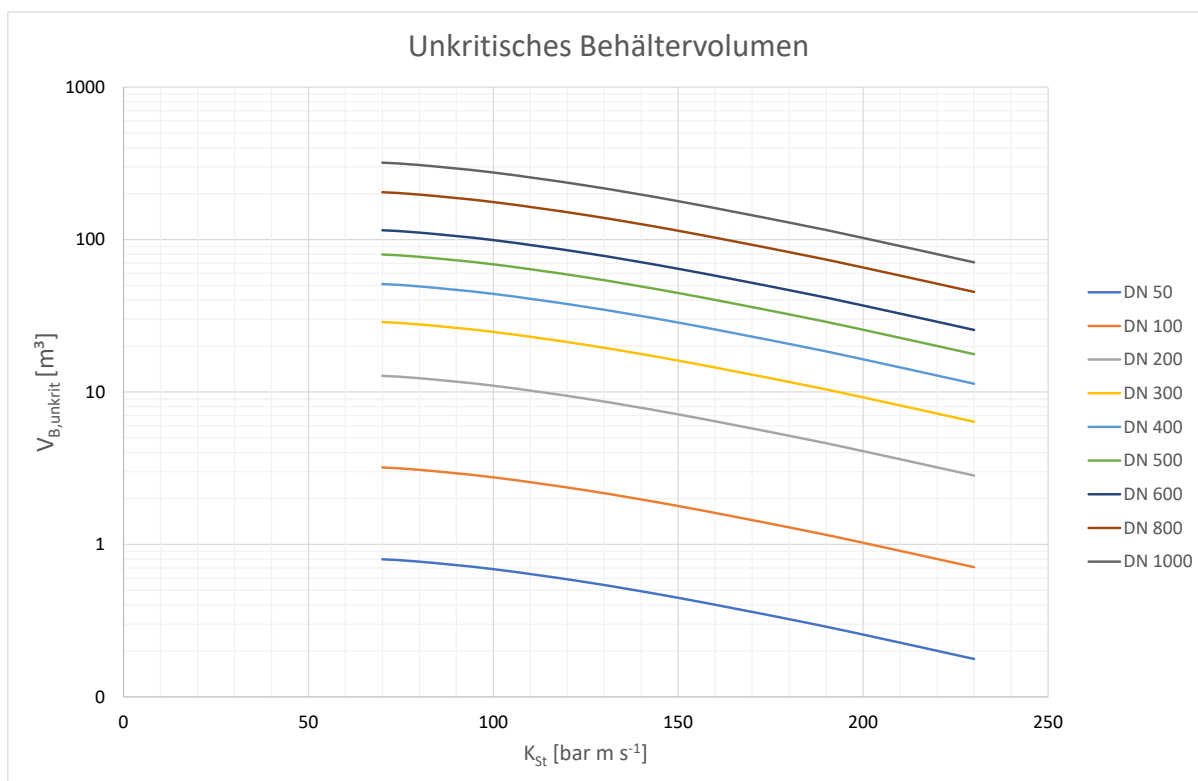


Abbildung 31: Abschätzung des "unkritischen Behältervolumens" einer Installation bestehend aus explosionsdruckentlastetem Behälter, Rohrleitung und Explosions-Entkopplungseinrichtung

5 Zusammenfassung

Die Verwendung von Explosions-Entkopplungssystemen in Verbindung mit durch Explosionsdruckentlastung geschützten Behältern ist eine weitverbreitete Kombination. Bei einer solchen Anlagenkonfiguration kann jedoch ein bislang nicht beachtetes Phänomen auftreten: Der Schließvorgang einer Entkopplungseinrichtung kann Rückwirkungen bis in den druckentlasteten Behälter, in dem die Explosion entstanden ist, zur Folge haben. Diese Rückwirkungen können dazu führen, dass der reduzierte Explosionsüberdruck im Behälter Werte annimmt, die erheblich über denjenigen liegen können, die nach der Auslegung der Explosionsdruckentlastung gemäß EN 14491 zu erwarten gewesen wären.

In diesem Forschungsprojekt sollten die Ursachen dieses Phänomens ergründet werden. Zum besseren Verständnis und idealerweise zur Berücksichtigung derartiger Drucküberhöhungen bereits bei der Auslegung von Anlagen und Anlagenteilen sollten die Einflussparameter identifiziert und im Experiment auf ihre Wirkung untersucht werden. Mit Hilfe einer großen Zahl von explosionstechnischen Untersuchungen im Großmaßstab wurden geometrische Parameter, Produkt- und Prozessparameter sowie gerätspezifische Parameter auf ihre Relevanz für die beobachteten Effekte untersucht. Als Leitgröße für den Vergleich der Versuchsergebnisse wurde der **Pressure Piling Factor** PPF eingeführt:

$$PPF = \frac{p_{i,max}}{p_{red,0}}$$

Er beschreibt die Erhöhung des reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter aufgrund der Rückwirkungseffekte eines Explosionsentkopplungs-Systems als Vielfaches in Vorversuchen bestimmter Referenzwerte.

Die Rückwirkung des Schließens einer Entkopplungseinrichtung auf den reduzierten Explosionsdruck im verbundenen explosionsdruckentlasteten Behälter stellt ein komplexes Geschehen dar, dessen beeinflussende Parameter nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Wenn auch eine analytische Beschreibung der physikalischen Vorgänge noch aussteht, so ist doch gelungen, wesentliche Einflussgrößen zu identifizieren. Diese sind im Wesentlichen:

- Das Verhältnis von Behältervolumen zur Querschnittsfläche der entkoppelten Rohrleitung V_B/A_R .
- Die Position der verbundenen entkoppelten Rohrleitung am Behälter relativ zur Position der Explosionsdruckentlastung bei länger gestreckten Behältern mit $L/D \geq 1,5$.
- Die Explosionscharakteristika des Staubes, hier insbesondere die Verbrennungsgeschwindigkeit/ der K_{St} -Wert.

In den Versuchen war der Rohrleitungsquerschnitt konstant gehalten worden, das Behältervolumen hingegen wurde variiert. Damit ergab sich eine Variation des Quotienten aus Behältervolumen und Rohrleitungsquerschnittsfläche von $V_B/A_R = 8$ [m] bis $V_B/A_R = 210$ [m]. Es

wurde ein exponentieller Anstieg der Drucküberhöhung PPF mit abnehmendem Verhältnis V_B/A_R beobachtet. Bei kleinen Gehäusen wie beispielsweise Filteranlagen mit angeschlossenen Rohrleitungen vergleichsweise großer Durchmesser muss deshalb mit dem Auftreten von Drucküberhöhungen gerechnet werden.

Bis zu einem L/D des Behälters, in dem die Explosion auftritt, von $L/D = 1,5$ scheinen die beobachteten Effekte relativ unabhängig von der Rohrleitungsposition relativ zur Position der Explosionsdruckentlastung zu sein. Bei länger gestreckten Behältern jedoch treten signifikant größere Drucküberhöhungen auf, wenn der Abstand zwischen Rohrleitungsposition (= Ort, an dem die Störung durch den Schließvorgang in den Behälter eintritt) und Explosionsdruckentlastungsöffnung groß wird.

Die dominierende Einflussgröße scheint jedoch die Reaktionsgeschwindigkeit sein. Diese wird bestimmt durch die Verbrennungsgeschwindigkeit des Staubes, charakterisiert durch den K_{St} -Wert. Auf den ersten Blick überraschend erscheint die Tatsache, dass sich größere Drucküberhöhungen einstellen für Stäube mit niedrigen K_{St} -Werten. Dies lässt sich jedoch plausibel mit dem zeitlichen Zusammenspiel der sich überlagernden Vorgänge erklären.

Die Untersuchungen wurden unter Worst-Case-Bedingungen durchgeführt, d.h. mit der für Staubexplosionen optimalen Konzentrationen des brennbaren Staubes in Luft und bei näherungsweise homogener Staubverteilung im Volumen - einem Zustand, der in praktischen Anwendungen nicht unbedingt immer, ja eher selten oder sogar gar nicht auftreten wird. Dies ist vermutlich auch der Grund, warum das Phänomen der Rückwirkung bisher nicht in den Fokus gerückt ist und schafft ein gewisses Maß an Sicherheit. Diese Vorgehensweise entspricht dem grundsätzlichen Ansatz im konstruktiven Explosionsschutz, immer die maximal mögliche Gefährdungssituation bei der Auslegung zugrunde zu legen. Mit dieser Voraussetzung wurden auf der Basis der Untersuchungsergebnisse Kriterien und Werkzeuge entwickelt, die nach bisherigem Kenntnisstand sicherstellen sollten, dass bei ihrer Einhaltung die sicherheitskritischen Festigkeiten der Geräte und Anlagenteile nicht überschritten werden. Sie können auf alle den verwendeten Entkopplungseinrichtungen konstruktiv vergleichbaren Explosions-Entkopplungssysteme übertragen werden. Es wurde eine Zahlenwertgleichung entwickelt, mit deren Hilfe die maximale Drucküberhöhung PPF als Funktion des Geometrieverhältnisses V_B/A_R , des K_{St} -Werts und des Behälter-L/D konservativ abgeschätzt werden kann. Nach geeigneter Umformung ermöglicht diese auch die Auswahl unkritischer Kombinationen von Rohrleitungsdurchmessern und Behältervolumina bei gegebenem K_{St} -Wert.

Bislang ist zwar nur eine rein phänomenologische Beschreibung der Rückwirkungseffekte von Explosions-Entkopplungssystemen auf den reduzierten Explosionsüberdruck in druckentlasteten Behältern gelungen, es konnten aber bereits nützliche praxisrelevante Werkzeuge daraus entwickelt werden. Fernziel sollte es jedoch in jedem Fall sein, unter Verwendung der gesammelten Versuchsdaten mit Hilfe numerischer Simulation und bei Bedarf weiterer Versuche, die Vorgänge mehr "physikalisch" beschreiben zu können. Die Abbildung der Vielzahl von einflussnehmenden Mechanismen in numerischen Modellen ist jedoch sehr aufwendig und wird sicherlich noch einige Zeit in Anspruch nehmen.