

# Forschungsbericht

Projekt Nr. 617.0 - FP290

*Staubexplosionsrisiko an Mischern mit bewegten Werkzeugen  
zur Erstellung und Abgrenzung möglicher  
Explosionsschutzkonzepte*

DEKRA EXAM GmbH  
Dinnendahlstraße 9  
44809 Bochum

Bearbeiter: Dr. Ute Hesener  
Matthias Reinecke M.Sc.  
Zeichen: 09EXAM 10597 BVS-Hes/Rei  
Laufzeit: 01.07.2009 bis 31.12.2011

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Teilnehmer des Forschungsbeirates</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Veranlassung und Grundlagen für das Forschungsvorhaben</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Projektphase 1 – Explosionsschutzkonzepte</b>	<b>10</b>
3.1	Beschreibung der üblichen Mischpraxis	10
3.2	Branchenbezogene Explosionsschutzmaßnahmen	14
3.3	Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung	16
3.3.1	Explosionstechnische Bewertung von typischen Mischgütern	16
3.3.2	Häufigkeit und Dauer des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre	16
3.3.3	Zündquellenbetrachtung	18
3.3.4	Angewandte Explosionsschutzkonzepte	20
<b>4</b>	<b>Projektphase 2 - Versuche</b>	<b>22</b>
4.1	Festlegung der Versuchsstäube	22
4.2	Messeinrichtung und Messaufbau	24
4.3	Konzentrationsmessungen am Horizontalmischer	25
4.4	Konzentrationsmessungen am Vertikalmischer	30
4.5	Schlussfolgerung aus den Ergebnissen der Konzentrationsmessungen	33
4.6	Simulation und Modellierung des Mischprozesses	34
<b>5</b>	<b>Projektphase 3 – Mustergefährdungsbeurteilungen</b>	<b>45</b>
5.1	Regeln für die Praxis	45
5.2	Erstellung von Mustergefährdungsbeurteilungen	45
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung</b>	<b>46</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>49</b>
A.1	Literaturverzeichnis	49
A.2	Versuchsmatrix	50
A.3	Anpassungsempfehlung der EX-RL Beispielsammlung (BGR 104)	53
A.4	Leitfaden zur Bewertung von Explosionsrisiken	55
A.5	Mustergefährdungsbeurteilungen	58
A.5.1	Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen horizontalen Zwangsmischer mit normal zündempfindlichen Stäuben in der Nahrungsmittelindustrie	59

---

A.5.2	Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen vertikalen Zwangsmischer mit normal zündempfindlichen Stäuben in der Nahrungsmittelindustrie.....	71
A.5.3	Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen horizontalen Zwangsmischer mit extrem zündempfindlichen Stäuben in der Pharmaindustrie.....	83
A.5.4	Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen horizontalen Zwangsmischer mit explosionsfähigen Stäuben in der Baustoffindustrie .....	96
A.5.5	Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen horizontalen Zwangsmischer mit extrem zündempfindlichen Stäuben in der chemischen Industrie .....	109
A.6	Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern".....	121
A.7	Darstellung der geplanten und tatsächlichen Arbeits- und Zeitabläufe .....	125

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug aus der BGR 104 (EX-RL) Beispielsammlung [BGR 104, 2011] .....	8
Tabelle 2: Klassifizierung der üblichen Mischpraxis .....	10
Tabelle 3: Erhebung von branchenspezifischen Explosionsschutzmaßnahmen.....	15
Tabelle 4: Klassifizierung festgestellter Mängel.....	21
Tabelle 5: Zuordnung der Staubungszahl zur Staubungsgruppe.....	22
Tabelle 6: Eigenschaften und sicherheitstechnische Kennzahlen der Versuchstäube .....	23
Tabelle 7: Ergebnisse mittlere Konzentration Horizontalmischer [Lorenz, 2011] .....	28
Tabelle 8: Ergebnisse mittlere (maximale) Konzentration Vertikalmischer [Maas, 2011] .....	31
Tabelle 9: Versuchsmatrix Kleinmaßstabsversuche.....	36
Tabelle 10: Modellrandbedingung Partikeleigenschaften [Maas, 2011].....	37
Tabelle 11: Versuchsmatrix Konzentrationsmessungen am Horizontalmischer.....	50
Tabelle 12: Versuchsmatrix Konzentrationsmessungen am Vertikalmischer.....	51

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gliederung mechanisch betriebene Mischer.....	12
Abbildung 2: Partikelbewegung in Abhängigkeit zur Froude-Zahl [Pahl, 2006].....	13
Abbildung 3: Korngrößenverteilung der Versuchsstäube .....	24
Abbildung 4: Funktionsprinzip der Messeinheit vom Typ 15 [Lorenz, 2011] .....	25
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Messaufbaus .....	25
Abbildung 6: Anordnung der Messpunkte im Horizontalmischer [Lorenz, 2011].....	26
Abbildung 7: CAD-Modell Messeinheit Typ 15 [Lorenz, 2011].....	27
Abbildung 8: Staubkonzentration (MP 1; 25 % FG; 2,3 m·s <sup>-1</sup> ) [Lorenz, 2011].....	29
Abbildung 9: Anordnung der Messpunkte im Vertikalmischer.....	30
Abbildung 10: Staubkonzentration (MP 3; 10 % FG; 2,5 m·s <sup>-1</sup> ) .....	32
Abbildung 11: Versuchsaufbau Kleinmaßstabsversuche.....	35
Abbildung 12: Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen für Weizenmehl.....	37
Abbildung 13: Konturdarstellung von Weizenmehlstaubkonzentrationen 1 - 350 g·m <sup>-3</sup> .....	38
Abbildung 14: Mikroskopaufnahme Weizenmehl.....	38
Abbildung 15: Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen für Maisstärke .....	39
Abbildung 16: Mikroskopaufnahme Maisstärke .....	40
Abbildung 17: Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen für Braunkohle .....	41
Abbildung 18: Volumenanteile der 3 Korngrößen sowie Staubkonzentration .....	43
Abbildung 19: Verlauf der berechneten Staubkonzentration am Monitorpunkt [Maas, 2011]	43
Abbildung 20: Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern" Seite 1.....	121
Abbildung 21: Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern" Seite 2.....	122
Abbildung 22: Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern" Seite 3.....	123
Abbildung 23: Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern" Seite 4.....	124
Abbildung 24: geplante Arbeits- und Zeitabläufe des Forschungsvorhabens .....	125
Abbildung 25: tatsächliche Arbeits- und Zeitabläufe des Forschungsvorhabens .....	126

## 1 Teilnehmer des Forschungsbeirates

Herr Dr. Berthold Dyrba	BG Rohstoffe und chemische Industrie
Herr Björn Poga	BG Rohstoffe und chemische Industrie
Herr Stefan Grund	BG Nahrungsmittel und Gaststätten
Herr Dirk Lorenz	BG Nahrungsmittel und Gaststätten
Herr Dr. Albrecht Vogl	BG Nahrungsmittel und Gaststätten
Herr Dr. Klaus-Werner Stahmer	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
Herr Gerhard Nied	AZO GmbH + Co. KG
Herr Ludger Hilleke	amixon GmbH
Herr Richard Siwek	FireEx Consultant GmbH
Herr Uwe Heitland	Gebr. Lödige GmbH
Herr Reiner Lemperle	Gebr. Lödige GmbH
Herr Burkhard Wulf	MTI-Mischtechnik International GmbH
Herr Kai Uwe Schröder	UNIFERM GmbH & Co. KG
Herr Norbert Jaeger	Syngenta AG
Frau Dr. Ute Hesener	DEKRA EXAM GmbH
Herr Matthias Reinecke	DEKRA EXAM GmbH

Dieses Forschungsvorhaben wurde finanziell gefördert von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung und der BG RCI. Die Staubkonzentrationsmessungen fanden unter fachlicher Begleitung der BGN statt und wurden teilweise auch von der BGN durchgeführt. Die Mitglieder des Forschungsbeirates unterstützten das Vorhaben durch die aktive fachliche Mitarbeit sowie auf der Herstellerseite durch finanzielle oder materielle Unterstützung. An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Beteiligten herzlich für die tatkräftige Mithilfe bedanken.

## 2 Veranlassung und Grundlagen für das Forschungsvorhaben

In der industriellen Produktion werden Mischer überall dort eingesetzt, wo mehrere Komponenten homogenisiert werden müssen. Da sich die Eigenschaften von verschiedenen Ausgangsstoffen durch den Prozess des Mischens in einem Endprodukt kombinieren lassen, ist im Zuge der technischen Entwicklung in den meisten Betrieben der chemischen und pharmazeutischen Industrie, der Nahrungsmittel-Produktion sowie im Baugewerbe und Kraftwerksbereich die Verwendung von Mixchern zweckdienlich und notwendig. Viele der dabei zu mischenden Ausgangsstoffe sind staubexplosionsfähig, so dass für den Prozess des Mischens das Staubexplosionsrisiko einzuschätzen ist und ggf. die Notwendigkeit der Anwendung von entsprechenden Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen daraus resultiert.

Die während des Betriebes von Mixchern in der Vergangenheit gesammelten Erkenntnisse und Erfahrungen über mögliche Explosionsgefahren und die entsprechend bisher anzuwendenden Schutzmaßnahmen lassen sich grundsätzlich durch die nachfolgend in Tabelle 1 zusammengefasste Auflistung entsprechend [BGR 104, 2011] wiedergeben. Der in Abhängigkeit zu den verschiedenen Betriebsweisen von Mixchern notwendige Explosionsschutz gliedert sich in vorbeugende und konstruktive Maßnahmen, die sich durch die Vermeidung des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre und/oder wirksamer Zündquellen sowie die Begrenzung der Auswirkungen eines Explosionsereignisses auf ein unbedenkliches Maß beschreiben lassen.

Da mit der technischen Entwicklung auch ständig der Bedarf besteht, mögliche Gefährdungen und Risiken zu erkennen und zu quantifizieren, wurde eine Validierung der einzuhaltenden Parameter für den Schutz von Mixchern durch Konzentrationsbegrenzung in den vergangenen Jahren angestrebt. Als Ergebnis des dazu durchgeführten Forschungsvorhabens [Hesener, 2007] zeigte sich, dass das Auftreten explosionsfähiger Gemische im Bereich von möglichen wirksamen Zündquellen bei einem hohen Befüllgrad von mindestens 70 % nicht mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

Im Rahmen des erwähnten Forschungsvorhabens wurde entgegen den in der BGR104 [BGR 104, 2011] beschriebenen Schutzkonzepten belegt, dass ein häufiges Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische auch bei hohem Füllgrad möglich ist. Darauf bezogen besteht nach gegebenem Wissensstand der Bedarf nach einer strukturierten und umfassenden Untersuchung der Explosionsrisiken an Mixchern und der Überarbeitung der in [BGR 104, 2011] dargestellten Schutzkonzepte.

Tabelle 1: Auszug aus der BGR 104 (EX-RL) Beispielsammlung [BGR 104, 2011]

Beschreibung der Merkmale / Voraussetzungen des Mischers	Festlegung der Zone	Schutzmaßnahme
Ein Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre ist ständig, langfristig oder häufig gegeben. Die Konzentration des Staub/Luft-Gemisches liegt betriebsmäßig zwischen der UEG und der OEG. Die Vermeidung von Zündquellen ist bauartbedingt durch bspw. keine beweglichen Einbauten gegeben.	Zone 20	keine
Ein Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre ist ständig, langfristig oder häufig gegeben. Die Konzentration des Staub/Luft-Gemisches liegt betriebsmäßig zwischen der UEG und der OEG. Es ist davon auszugehen, dass in Folge von Störungen wirksame Zündquellen auftreten können (bspw. durch bewegliche Einbauten).	Zone 20	Konstruktive Explosionschutzmaßnahmen, wie Explosionsfeste Bauweise, Explosionsdruckentlastung, Explosionsunterdrückung und Explosionstechnische Entkopplung
Ein Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre wird durch Inertisierungsmaßnahmen unter Beachtung von dennoch möglichen Glimmbränden sicher verhindert.	keine	Inertisierung des Mischers
Aufgrund eines hohen Befüllgrades von mehr als 70 % wird ein Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre im Bereich von möglichen wirksamen Zündquellen normalerweise verhindert. Während des Entleerens und Befüllens des Mischers ist sichergestellt, dass verfahrensbedingte Zündquellen nicht auftreten können (bspw. durch Relativgeschwindigkeiten der beweglichen Einbauten von $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). <b>Vorsicht! Dieses Schutzkonzept ist nach dem heutigen Stand der Technik mit Bezug auf den hohen Befüllgrad nicht mehr allgemein gültig!</b>	Zone 21	Konzentrationsbegrenzung

Im Hinblick auf die vom Gesetzgeber im Rahmen der BetrSichV an den Betreiber übertragene Pflicht, Gefährdungsbeurteilungen hinsichtlich der notwendigen Maßnahmen zur sicheren Benutzung von Arbeitsmitteln durchzuführen, wird deutlich, dass angesichts des Umfangs und der teilweise vorliegenden Komplexität der Thematik anleitende und orientierende Regelwerke für die Praxis unabdingbar sind.

Ziel des Forschungsvorhabens „Staubexplosionsrisiko an Mischern mit bewegten Werkzeugen zur Erstellung und Abgrenzung möglicher Explosionsschutzkonzepte“ war es daher, die übliche Mischpraxis branchenübergreifend aufzunehmen und zu klassifizieren, um die häufigsten Bauformen und Verfahren einer Gefährdungsbeurteilung unterziehen zu können. Anhand der spezifischen Gefährdungsbeurteilungen galt es, die auftretenden Konzentrationsverhältnisse, die möglichen Zündgefahren und die daraus resultierenden notwendigen



Schutzmaßnahmen mit dem Ziel der Erstellung von Mustergefährdungsbeurteilungen herauszustellen.

Die Forschungsarbeiten wurden hierzu wie folgt in drei Projektphasen gegliedert. Eine schematische Darstellung der ursprünglich geplanten und tatsächlichen Arbeits- und Zeitabläufe ist der Abbildung 24 und der Abbildung 25 im Anhang A.7 zu entnehmen.

#### Projektphase 1: Explosionsschutzkonzepte

Bestandteil der ersten Projektphase war die Ermittlung und Systematisierung der in der Praxis angewandten Mischverfahren und branchenbezogenen Explosionsschutzkonzepte. Ziel war es, darauf aufbauende, repräsentative Praxisbeispiele für die am häufigsten eingesetzten Verfahren und Bauformen abzuleiten.

#### Projektphase 2: Versuche

In der zweiten Projektphase wurden Messungen der Staubkonzentrationsverteilung in einem horizontalen sowie einem vertikalen Zwangsmischer durchgeführt. Fortführend wurde über die Messergebnisse geprüft, ob sich durch numerische Simulationen geeignete Modelle zur Abbildung des Schüttgutverhaltens und insbesondere der explosionsfähigen Staub/Luft-Gemische im Mischerinneren finden lassen. Ziel sollte es sein, die Staubkonzentrationen an den Stellen im Mischer, wo bedingt durch das Messprinzip und die Bauart eine Konzentrationsmessung unmöglich ist, rechnerisch zu ermitteln sowie eine Extrapolation auf größere Mischervolumina und andere Bauformen vornehmen zu können.

#### Projektphase 3: Musterbeispiele

Basierend auf den Erhebungen zur gängigen Mischpraxis sowie auf den Mess- und Simulationsergebnissen wurden in der dritten Projektphase Handlungsempfehlungen zur Bewertung der Explosionsrisiken sowie zur Ableitung von geeigneten Schutzkonzepten für die Praxis formuliert.

### 3 Projektphase 1 – Explosionsschutzkonzepte

#### 3.1 Beschreibung der üblichen Mischpraxis

Unter dem Begriff Mischen versteht man im Allgemeinen die absichtliche Vereinigung von mindestens zwei verschiedenen Ausgangsstoffen zu einem Gemisch unter Energieeintrag mit dem Ziel, eine definierte Homogenität zu erlangen. In der Regel hängt die erreichte Mischgüte neben den Eigenschaften der Ausgangsstoffe von einer Vielzahl differenter Geräte- und Verfahrensparameter, wie beispielsweise die Mischzeit und die Relativgeschwindigkeit der beweglichen Einbauten, ab.

Die Klassifizierung der Mischer lässt sich nach unterschiedlichen Kriterien vornehmen. Eine beispielhafte Auflistung solcher Kriterien ist der nachstehenden Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Klassifizierung der üblichen Mischpraxis

Kriterium	Typ	Charakteristik
Verfahren	Chargenmischer	gekennzeichnet durch einen diskontinuierlichen Betrieb
	Durchlaufmischer	gekennzeichnet durch einen kontinuierlichen Betrieb
Mischgutbeschleunigung	Überkritisch	gekennzeichnet durch eine im Vergleich zur Erdbeschleunigung höheren Mischgutbeschleunigung
	Unterkritisch	gekennzeichnet durch eine im Vergleich zur Erdbeschleunigung niedrigeren Mischgutbeschleunigung
Energieeintrag	Dynamisch	gekennzeichnet durch einen vom Mischer initiierten Energieeintrag
	Statisch	Gekennzeichnet durch einen vom Mischgut initiierten Energieeintrag
Ausrichtung der beweglichen Einbauten	Horizontal	Gekennzeichnet durch horizontal gelagerte Mischerwelle/n
	Vertikal	Gekennzeichnet durch vertikal gelagerte Mischerwelle/n
Anzahl der Mischerwellen	Einwellenmischer	Gekennzeichnet durch Vorhandensein einer Mischerwelle
	Doppelwellenmischer	Gekennzeichnet durch Vorhandensein zweier Mischerwellen
	Mehrwellenmischer	Gekennzeichnet durch Vorhandensein von mehr als zwei Mischerwellen
Form und Beschaffenheit des Mischraumes	Trommelmischer	Gekennzeichnet durch drehbar gelagerte Trommel mit in der Regel schwenkbarem Auslass
	Ringtrommelmischer	Gekennzeichnet durch feststehenden Mischbehälter mit beweglichen Einbauten, die sich auf ringförmigen Kreisbahnen drehen

Kriterium	Typ	Charakteristik
	Tellermischer	Gekennzeichnet durch einen in der Regel zylindrischen Mischbehälter, der sich zur Homogenisierung um die eigene vertikale Achse dreht
	Rohrmischer	Gekennzeichnet durch einen langgestreckten zylindrischen Mischbehälter, der statisch betrieben wird und feststehende Mischelemente besitzt, die dem Mischgut eine erzwungene Strömungsrichtung vorgeben
	Trogmischer	Gekennzeichnet durch einen feststehenden ggf. schwenkbaren Mischtrog, der mit beweglichen Einbauten ausgestattet ist
	Vakuummischer	Gekennzeichnet durch einen unterdruckfesten Mischbehälter in dem parallel zum Mischprozess auch weitere Verfahrensschritte wie Entgasen/Entlüften durchgeführt werden können
	Gasstrahlmischer	Gekennzeichnet durch eine Fluidisierungseinrichtung, die das Mischgut über eingedüstes Gas homogenisiert

Bestandteil des vorliegenden Forschungsvorhabens sollte ausschließlich die Betrachtung von mechanisch betriebenen Mischern sein. Dabei sollte das Spektrum an mechanisch betriebenen Mischern auf das Gebiet der Zwangsmischer beschränkt werden. Zur Übersicht über die Gliederung mechanisch betriebener Mischer und die verschiedenen Bauformen von Zwangsmischern dient die nachstehende Abbildung 1.

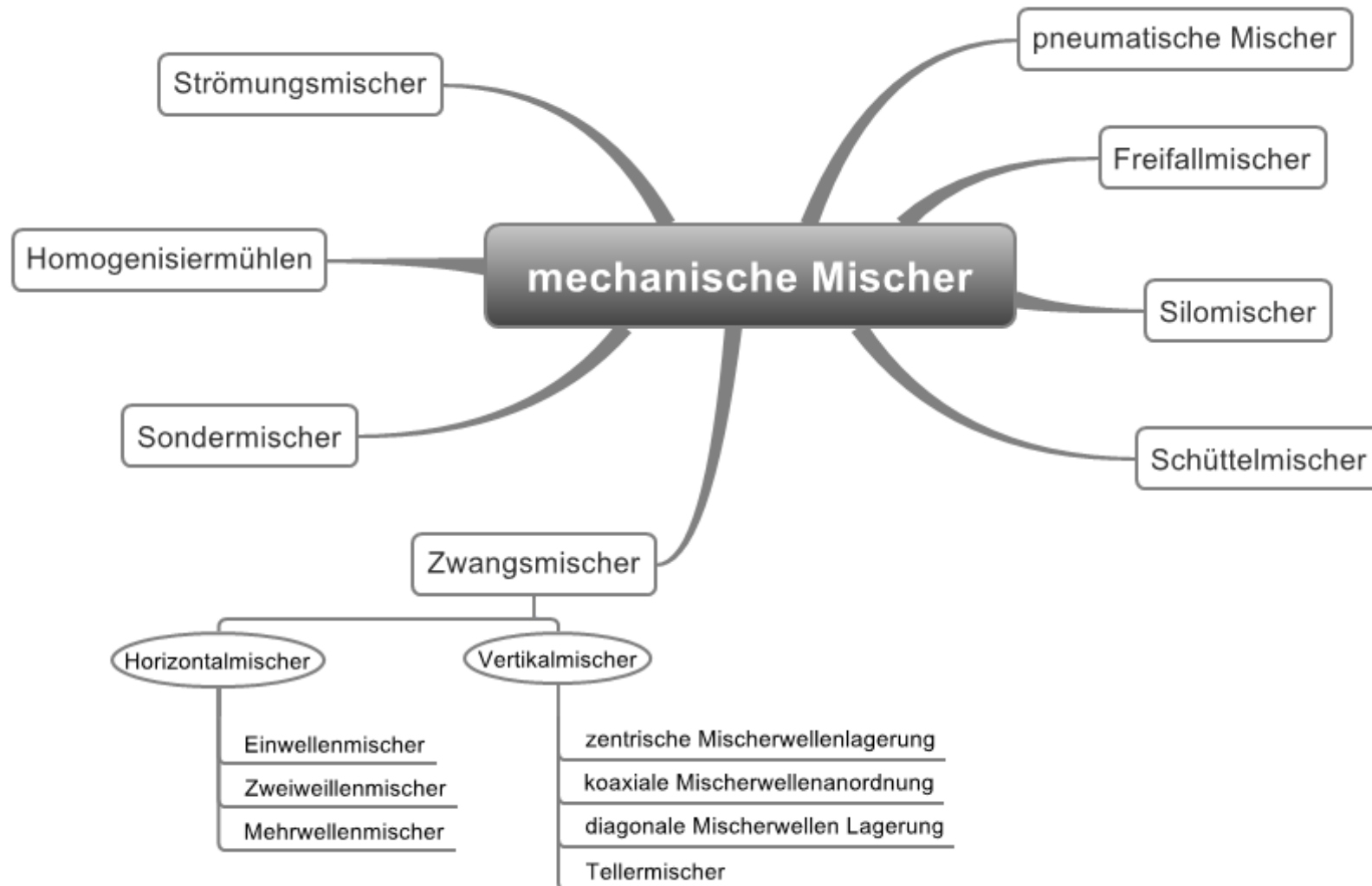


Abbildung 1: Gliederung mechanisch betriebene Mischer

Neben den Konstruktionsmerkmalen eines Mischers hat auch dessen Fahrweise einen Einfluss auf die Partikelbewegungen und somit auf die Staubkonzentrationen im Inneren. Unterscheiden lässt sich beispielsweise nach dem Einfluss der Relativbewegung der beweglichen Mischwerkzeuge. Die Art der Partikelbewegungen kann bei Horizontalmischern demnach grundsätzlich in die drei Bereiche Schubmischen, Schleudermischen und Zentrifugieren gegliedert werden. Zur Beschreibung und Klassifizierung der Zustände bedient man sich der dimensionslosen Kennzahl nach William Froude, die ein Maß des Verhältnisses zwischen Trägheit und Schwerkraft angibt. Die Froude-Zahl ist durch folgenden mathematischen Zusammenhang bestimmt:

$$Fr = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}$$

mit

$$\omega \text{ Winkelgeschwindigkeit in } \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$r$  Radius in m

$$g \text{ Schwerebeschleunigung in } \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Der Zusammenhang zwischen den beschriebenen Mischbereichen und der Froude-Zahl kann der nachstehenden Abbildung 2 entnommen werden.

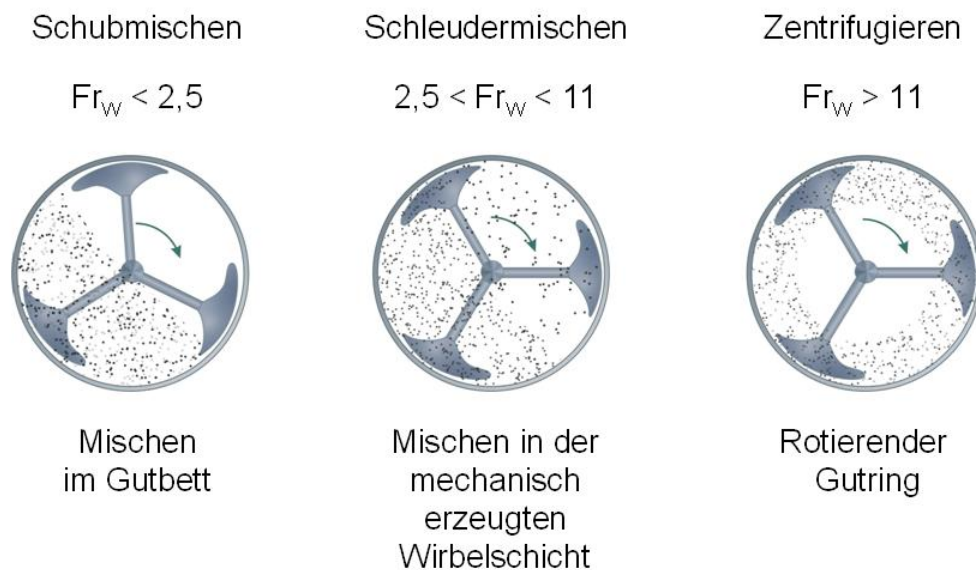


Abbildung 2: Partikelbewegung in Abhängigkeit zur Froude-Zahl [Pahl, 2006]

Bei einer Froude-Zahl kleiner 2,5 werden die Partikel des Mischgutes zwar angehoben, bleiben aber grundsätzlich unterhalb des Mischerzenites. Für diesen Zustand ist der Einfluss der Schwerkraft größer als die auftretenden Zentrifugalkräfte.

Für Froude-Zahlen zwischen 2,5 und 11 wird das Mischgut teilweise über den Mischerzenit hinaus bewegt. Die Partikelbewegung lässt sich für diesen Bereich durch Wurfbahnen beschreiben.

Liegt die Froude-Zahl oberhalb von 11, stellt sich aufgrund der hohen Zentrifugalkräfte eine mechanisch erzeugte Ringschicht im Bereich der Mischerwand ein.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Angaben und Berechnungen der Froude-Zahl i.d.R. auf den Mischerradius beziehen. Bei Betrachtung der einzelnen Partikel sind auch kleinere Radien möglich, die die Froude-Zahl entsprechend beeinflussen.

Aufgrund des divergierenden Kräfteverhältnisses von Schwer- und Zentrifugalkraft auf das Schüttgut unterscheidet sich die Partikelbewegung zwischen Horizontal- und Vertikalmischern. In Vertikalmischern steht diese vor allem in Abhängigkeit zur Form und Anordnung des Mischwerkzeuges sowie zu dessen Relativgeschwindigkeit. In der Regel ergeben sich trombenartige Partikelbewegungen mit einem ansteigenden Schüttgut an der Mischerwand und einem Abfallen des Schüttgutes in der Behältermitte. Durch den Einsatz von schraubenförmigen Bandwendeln wird zusätzlich die Aufwärts- sowie Tangentialbewegung des Mischgutes verstärkt, so dass sich eine dreidimensionale Mischgutbewegung mit nach oben abnehmender Konzentration einstellt.

### **3.2 Branchenbezogene Explosionsschutzmaßnahmen**

Die bereits einleitend erwähnten Branchen, die Mischer im Einsatz haben und sich hinsichtlich der Eigenschaften verwendeter Mischgüter, der Verfahrensweisen sowie angewandten Schutzkonzepten typisieren lassen, können wie folgt gegliedert werden:

- Baustoffindustrie
- Chemische Industrie
- Kraftwerke, insbesondere Kohlekraftwerke
- Nahrungsmittelindustrie
- Pharmazeutische Industrie

Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass sich die branchenspezifisch anzutreffenden Edukte und Produkte hinsichtlich der explosionstechnischen Kennzahlen gravierend unterscheiden können und somit auch die umgesetzten Schutzkonzepte branchenspezifisch sind.

Zur systematischen Erhebung der branchenspezifischen Mischverfahren und deren Eigenheiten wurde der in Anhang A.6 veranschaulichte Erhebungsbogen „Explosionsschutzkonzepte an Mischern“ entwickelt und angewandt. Zur Übersicht der im Rahmen dieser Anwendung erhobenen Perspektive über die branchenbezogenen Explosionsschutzmaßnahmen dient Tabelle 3.

Tabelle 3: Erhebung von branchenspezifischen Explosionsschutzmaßnahmen

Industrie	chemische Industrie	Kraftwerk	Nahrungsmittel-industrie	Pharma-industrie	Baustoff-industrie
Horizontalmischer	7	2	3	-	4
Vertikalmischer	2	-	1	2	-
max. Volumen (l)	10700	8000	3000	600	6000
min. Volumen (l)	600	2000	130	250	600
max. Abstand Behälterwand bewegl. Einbauten	15	25	6	10	15
min. Abstand Behälterwand bewegl. Einbauten	3	15	2	6	8
max. MZE (mJ)	1000	1000	360	3	30
min. MZE (mJ)	0,02	100	0,28	1	10
max. Zündtemperatur (°C)	600	580	420	400	475
min. Zündtemperatur (°C)	203	560	300	400	250
$p_{\max}$ (bar)	10,5	9	9	-	8,7
max. Füllgrad (%)	70	80	50	80	80
min. Füllgrad (%)	20	50	30	10	30
Siebabscheider	2	-	2	-	-
Magnetabscheider	2	-	-	-	-
Drehzahlreduzierung ( $<1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	7	1	3	-	1
Temperaturüberwachung	5	2	4	2	-
Lagerspülung	3	1	4	-	-
Inertisierung	2	-	2	2	-
Konz.-Begrenzung (80/20)	-	1	-	-	4
Druckentlastung	1	-	-	-	-
Explosionsfeste Bauweise	2	-	-	-	-
Entkopplung	-	-	-	-	-
Unterdrückung	-	-	-	-	-

### **3.3 Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung**

Entgegen der ursprünglich angenommenen Differenzierbarkeit hinsichtlich der in den verschiedenen Branchen anzutreffenden sicherheitstechnischen Kennzahlen verwendeter Rohstoffe, angewendeten Mischverfahren sowie umgesetzten Schutzkonzepte resultierte aus den durchgeführten Gefährdungsbeurteilungen ein branchenübergreifendes Spektrum an Bauformen und Betriebsweisen. Zusätzlich können branchenabhängige Voraussetzungen angenommen werden, die sich nicht primär auf den Explosionsschutz beziehen, jedoch einen Einfluss auf diesen haben können. Zu nennen sind dabei beispielsweise die Vermeidung eines Fremdkörpereintrages in der Nahrungsmittel- und Pharmaindustrie aus Qualitäts- und Hygienegründen oder der Anteil nennenswerter Mengen an inerten Rohstoffen im Mischgefüge von typischen Baustoffmischungen. Daraus ableiten lassen sich jedoch auch Schutzkonzepte, die in anders gearteten Branchen Verwendung finden können. Andererseits können aber branchenbezogen inhärente Prozesseigenschaften nicht grundsätzlich vorausgesetzt werden, sondern die Gefährdungsbeurteilung muss einzelfallbezogen erfolgen. Des Weiteren haben die Erhebungen in der Praxis gezeigt, dass für den Betrieb mechanischer Zwangsmischer Schutzkonzepte, die auf konstruktiven Maßnahmen basieren, weniger häufig umgesetzt werden. Sie stellen Sonderlösungen dar, bei denen die Spezifika des Mischprozesses, wie beispielsweise Auftreten von Turbulenzen oder inhomogener Stoffverteilung im Behälter, berücksichtigt werden müssen.

#### **3.3.1 Explosionstechnische Bewertung von typischen Mischgütern**

Das Spektrum der beim Mischen gehandhabten Rohstoffe umfasst die gesamte Bandbreite industriell eingesetzter Produkte. Je nach Anwendung kann hinsichtlich des Risikos, welches sich anhand der sicherheitstechnischen Kennzahlen der Stoffe abschätzen lässt, unterschieden werden. Die Vielfalt reicht hierbei von der Handhabung normal zündempfindlicher Schüttgüter, über extrem zündempfindliche Stäube sowie die Benetzung inerte Feststoffe mit entzündlichen Flüssigkeiten bis hin zum Auftreten von hybriden Gemischen, so dass Explosionsgefahren nicht nur durch Staub/Luft-Gemische, sondern auch durch Gase oder Dämpfe in der Mischpraxis auftreten können.

#### **3.3.2 Häufigkeit und Dauer des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre**

Die Beurteilung der explosionsgefährdeten Bereiche erfolgt gemäß § 5 BetrSichV durch deren Einteilung in Zonen abhängig von Häufigkeit und Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre. Für die hiervon betroffenen Mischer und deren unmittelbare Umgebung wird folgende Zoneneinteilung zugrunde gelegt:



- Zone 0 ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.
- Zone 1 ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln bilden kann.
- Zone 2 ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährlich explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.
- Zone 20 ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.
- Zone 21 ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub bilden kann.
- Zone 22 ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

Dabei gelten folgende Anmerkungen nach Anhang 3 der BetrSichV:

1. Schichten, Ablagerungen und Aufhäufungen von brennbarem Staub sind wie jede andere Ursache, die zur Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre führen kann, zu berücksichtigen.
2. Als Normalbetrieb gilt der Zustand, in dem Anlagen innerhalb ihrer Auslegungsparameter benutzt werden.

Im Rahmen der durchgeführten Anlagenbegehungen wurden verschiedenste Zoneneinteilungen festgestellt. Im Inneren von Mischern variiert die Einteilung je nach Einsatz von festen und flüssigen Rohstoffen zwischen der Zonenfreiheit, den Zonen 20 und 21 für explosionsfähige Staub/Luft-Gemische sowie den Zonen 1 und 2 für explosionsfähige Gas/Dampf/Luft-Gemische. Eine Zonenfreiheit trat entweder bei der ausschließlichen Verwendung inerter Rohstoffe oder dem Einsatz entsprechend funktionssicherer Inertisierungsmaßnahmen auf. Eine Zoneneinteilung in eine Zone 0 aufgrund eines ständig oder langfristig vorhandenen Gas/Dampf/Luft- oder hybriden Gemischs war in keiner der begangenen

Anlagen präsent, da bei derartigen Anlagen die Auftretenswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Atmosphäre durch Inertisierung reduziert wird bzw. das Auftreten explosionsfähiger Gas/Dampf/Luft-Gemische vollständig vermieden wird.

Im Aufstellungsbereich von Mischern ist bei der Handhabung von staubexplosionsfähigen Schüttgütern ohne die Umsetzung weiterer Maßnahmen in der Regel von Staubablagerungen auszugehen. Da Mischer zu Reinigungs- und Wartungszwecken meist über eine oder mehrere Revisionsöffnungen verfügen, kann eine technische Dichtheit über den gesamten Prozess i. d. R. nicht unterstellt werden. Maßgeblich für die Zoneneinteilung im Aufstellungsbereich sind daher die Zone 22 oder die Zonenfreiheit in Verbindung mit organisatorisch geregelten Reinigungsmaßnahmen.

### **3.3.3 Zündquellenbetrachtung**

Im Bereich der Mischer und deren Umgebung treten explosionsgefährdete Bereiche mit den Zonen 1, 2, 20, 21 und 22 auf. Daher ist zu bewerten, ob und inwieweit in den jeweiligen Anlagenteilen bei Vorliegen von:

- Zone 2 und 22 nur im Normalbetrieb
- Zone 1 und 21 im Normalbetrieb und bei üblicherweise zu erwartenden Betriebsstörungen sowie von
- Zone 20 im Normalbetrieb, bei üblicherweise zu erwartenden Betriebsstörungen und zusätzlich auch bei selten auftretenden Betriebsstörungen,

wirksame Zündquellen auftreten können.

Unter Berücksichtigung der in der DIN EN 1127-1 bzw. der TRBS 2152 Teil 3 genannten 13 Zündquellenarten sind für die übliche Mischpraxis insbesondere folgende Zündquellen in den Arbeitsbereichen in Betracht zu ziehen:

- heiße Oberflächen
- mechanisch erzeugte Funken
- elektrische Anlagen
- statische Elektrizität
- Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben

### 3.3.3.1 Heiße Oberflächen

Heiße Oberflächen können grundsätzlich bei Trocknungsvorgängen, durch elektrische Betriebsmittel oder Reibungswärme entstehen. Kommt es zu Lagerschäden (z. B. infolge von Lagerversagen, mangelnder Schmierung, Staubeintritt), werden Dichtungen falsch montiert oder Fremdkörper eingetragen und vom Werkzeug mitgeschliffen, sind Reibungsvorgänge, die zündwirksame Oberflächentemperaturen initiieren können, nicht auszuschließen. Ist das Anlaufen von Mischwerkzeugen an der Behälterwand nicht auszuschließen, können je nach Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit hohe Oberflächentemperaturen auftreten.

### 3.3.3.2 Mechanisch erzeugte Funken

Mechanisch erzeugte Funken können durch Schleif- und Reibprozesse hervorgerufen werden. Für den Betrieb eines Mixers sind diese Prozesse z. B. denkbar, wenn Fremdkörper, wie beispielsweise Schrauben oder Muttern, zwischen Mischwerkzeug und Mischbehälterwand eingeklemmt werden können oder das Mischwerkzeug bei einer Lagersetzung oder eines Lagerschadens an die Behälterwand anschlägt. Auch ein Lösen verschraubter Mischwerkzeuge kann zum Auftreten zündwirksamer Funken führen. Ist das Anlaufen von Mischwerkzeugen an der Behälterwand nicht auszuschließen, können je nach Relativgeschwindigkeit und Werkstoffkombination mechanische Funken auftreten.

### 3.3.3.3 Elektrische Anlagen

Elektrische Funken können beispielsweise bei Überlastung von Einrichtungen der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik hervorgerufen werden. Ursache dafür kann beispielsweise der Einsatz von nicht für den Betrieb in explosionsfähigen Atmosphären geeigneten Betriebsmitteln oder eine falsche Installation, Wartung und Instandhaltung der Betriebsmittel sein.

### 3.3.3.4 Statische Elektrizität

Elektrostatische Aufladungen können durch isolierend montierte leitfähige Anlagenbestandteile, den Einsatz von isolierenden Beschichtungen oder die Mischgutaufladung in vorgeschalteten Prozessen bzw. während des Mischens hervorgerufen werden. Sind die Mischgüter selbst elektrostatisch aufladbar, können Büschelentladungen auftreten, die für brennbare Gase und Dämpfe zündwirksam sein können.

### 3.3.3.5 Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben

Exotherme Reaktionen und die Selbstentzündung von Stäuben können durch das Auftreten heißer Oberflächen bzw. chemischer Reaktionen oder einer allgemeinen Temperaturerhöhung während des Mischprozesses initiiert werden. Glimmnester sowie Selbstentzündungsprozesse können u. U. auch aus vorgeschalteten Apparaten mit mechanischer oder thermischer Belastung, wie beispielsweise Trockner, Mühlen oder schnelllaufende Siebe, herrühren.

### 3.3.4 Angewandte Explosionsschutzkonzepte

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden 21 Gefährdungsbeurteilungen an bestehenden Anlagen unterschiedlicher Branchen durchgeführt. Die vorhandenen Explosionsschutzkonzepte basierten auf Maßnahmen zur Vermeidung von explosionsfähiger Atmosphäre in Verbindung mit Maßnahmen zur Vermeidung von Zündquellen sowie in seltenen Fällen zusätzlich auf Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes. Die Maßnahmen unterteilen sich dabei in technische und organisatorische Maßnahmen. Werden konstruktive Maßnahmen berücksichtigt, sind neben dem Schutz des eigentlichen Mischers zusätzlich auch explosionsschutztechnische Entkopplungsmaßnahmen zu den vor- und nachgeschalteten Anlagenteilen zu berücksichtigen.

Die in der Praxis vorgefundenen Explosionsschutzkonzepte und deren Umsetzung in Form von technischen und organisatorischen Explosionsschutzmaßnahmen waren in vielen Fällen unvollständig oder fehlerhaft. Die Gefährdungsbeurteilungen ergaben neben organisatorischen Mängeln zum Teil auch erhebliche und gefährliche technische Mängel. Eine Darlegung und Klassifizierung der festgestellten Mängel ist nachstehender Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Klassifizierung festgestellter Mängel

Mangel	geringfügig		erheblich		gefährlich	
	organisatorisch	technisch	organisatorisch	technisch	organisatorisch	technisch
Keine oder unvollständige sicherheitstechnische Kennzahlen der gehandhabten Stoffe vorhanden bzw. dokumentiert	x	x	x	x		
Keine oder fehlerhafte Gefährdungsbeurteilungen vorhanden	x		x			
Kein oder mangelhaftes Explosionsschutzdokument vorhanden	x		x			
Unstimmigkeiten zwischen Gefährdungsbeurteilung und Explosionsschutzdokument	x		x			
Keine oder unzureichende Arbeitsanweisungen vorhanden	x		x			
Keine oder unzureichende Wartungs- und Reinigungspläne vorhanden	x		x			
Unstimmigkeiten zwischen Dokumentation, organisatorischer Regelung und technischer Umsetzung	x	x	x	x	x	x
Keine Prüfindervalle festgelegt	x					
Keine oder unzureichende Prüfdokumentation vorhanden (§§ 10, 14, 15, Anhang 4 A Nr. 3.8 BetrSichV)			x			
Keine Nachweise für die Unterweisung und Schulung von Mitarbeitern hinsichtlich der Brand- und Explosionsgefahren vorhanden			x			
Keine, falsche oder unzureichende Kennzeichnungen explosionsgefährdeter Bereiche, Verbots-, Gebots- und Warnzeichen		x		x		
Einsatz von nicht für den Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen geeigneten Betriebsmitteln						x
Einsatz von für den Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen geeigneten Betriebsmitteln, die nicht entsprechend der bestimmungsgemäßen Verwendung installiert, gewartet oder betrieben werden				x		x
Keine oder unzureichende Erdungs- und Potenzialausgleichsmaßnahmen				x		x
Bewertung und Auslegung von Schutzmaßnahmen (Inertisierung, konstruktiver Explosionsschutz) erfolgte nicht unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Kennzahlen und/oder Prozesseinflussgrößen				x		x
Keine explosionstechnische Entkopplung an und zwischen konstruktiv geschützten Anlagenteilen						x
Keine, unzureichende oder mit falschen Grenzwerten betriebene Verriegelungsmaßnahmen an Überwachungseinrichtungen, wie bspw. Temperaturüberwachung oder Verriegelungen an Revisionsöffnungen				x		x

## 4 Projektphase 2 - Versuche

Im Rahmen der zweiten Projektphase wurden Versuche durchgeführt, die der Ermittlung von Basiswissen zur Staubkonzentrationsverteilung innerhalb von horizontalen und vertikalen Zwangsmischern dienen. Dazu war die in der Praxis vorkommende Bandbreite an Stäuben, welche sich hinsichtlich der Staubungsneigung wesentlich unterscheiden, zu ermitteln. Basierend auf dieser Erhebung wurden Versuchsstäube festgelegt und beschafft, die charakteristisch für die Praxisanwendungen sind.

Die Messung der Staubkonzentrationen erfolgte fotometrisch unter Anwendung des Lambert-Beer'schen-Gesetzes. Aufbauend auf den im Rahmen des DESC-Projektes durch die Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) gesammelten Erfahrungen, galt es, eine vorhandene Messeinrichtung so weiter zu entwickeln, dass diese den spezifischen Anforderungen an die Messung von Staubkonzentrationen innerhalb von Zwangsmischern genügt. Die Entwicklung des Messsystems erfolgte durch die BGN.

Weiterhin mussten geeignete Versuchsmischer gefunden und ein Versuchsplan konzipiert werden.

### 4.1 Festlegung der Versuchsstäube

Ziel war es, die Staubkonzentrationsmessungen unter praxisnahen Randbedingungen durchzuführen. Eine der dabei zu betrachtenden Größen sind die Mischguteigenschaften, die einen Einfluss auf die Staubentwicklung und Staubverteilung innerhalb des Mixers haben. Augenscheinlich entscheidende Eigenschaften sind beispielsweise die Korngrößenverteilung, der Medianwert, die Schüttdichte sowie die Feuchtigkeit eines Mischgutes. Weiterhin lässt sich die Staubungsneigung eines Schüttgutes durch die Staubungszahl, bestimmt nach der VDI Richtlinie 2263 Blatt 9 [VDI 2263, 2008], ausdrücken. Anhand der Staubungszahl sind Schüttgüter in Staubungsgruppen einzuteilen. Die Einteilung erfolgt entsprechend der nachstehenden Tabelle 5 gemäß [VDI 2263, 2008].

Tabelle 5: Zuordnung der Staubungszahl zur Staubungsgruppe

Staubungsgruppe	1	2	3	4	5	6
Staubungszahl S	$0 \leq S \leq 1$	$1 < S \leq 5$	$5 < S \leq 10$	$10 < S \leq 20$	$20 < S \leq 50$	$50 < S$

Mit dem Ziel Versuchsstäube zu verwenden, die das Spektrum der Staubungsneigung eines Stoffes gemäß [VDI 2263, 2008] abdecken, wurden Stäube der Staubungsgruppen 1, 4 und 6 ausgewählt. In diesem Zusammenhang galt es zu klären, welche Stoffe verfügbar sind, die dieses Kriterium erfüllen, möglichst häufig in der Praxis Verwendung finden sowie unter wirtschaftlichen Aspekten mit vertretbaren Aufwendungen zu beschaffen sind. Entsprechend der Anforderungen an die Auswahl und Verfügbarkeit der Mischgüter wurden Weizenmehl, getrocknete Maisstärke und Braunkohlenstaub mit den in Tabelle 6 gelisteten Stoffeigenschaften und sicherheitstechnischen Kennzahlen für die Durchführung der Staubkonzentrationsmessungen zugrunde gelegt.

Tabelle 6: Eigenschaften und sicherheitstechnische Kennzahlen der Versuchsstäube

<b>Eigenschaft / Kennzahl</b>	<b>Weizenmehl</b>	<b>Maisstärke</b>	<b>Braunkohlenstaub</b>
Dichte (kg·m <sup>-3</sup> )	1152	1299	1120
Schüttdichte (kg·m <sup>-3</sup> )	576	650	560
rel. Feuchte (%)	14,05	2,32	12,63
Medianwert (µm)	66	< 20	56
untere Explosionsgrenze (g·m <sup>-3</sup> )	60	30	60
Staubungszahl (-)	0,6	10,2	123,6
Staubungsgruppe (-)	1	4	6

Anhand der tabellarischen Auflistung der Mischguteigenschaften und der in Abbildung 3 dargestellten Korngrößenverteilung wird deutlich, dass die augenscheinlich für das Staubungsverhalten essentiellen Stoffeigenschaften, wie Medianwert, rel. Feuchte und Dichte, nicht sicher auf ein vergleichbares Staubungsverhalten schließen lassen. Vergleicht man insbesondere das Weizenmehl mit dem Braunkohlenstaub wird erkennbar, dass die in der Tabelle 6 gelisteten Stoffeigenschaften annähernd identisch sind, sich jedoch die Neigung zur Bildung einer Staubwolke, ausgedrückt durch die Staubungszahl, vollständig divergent dazu verhält. Auch die Vermutung, dass Schüttgüter mit vergleichsweise kleinen Medianwerten eine größere Affinität zur Staubwolkenbildung aufweisen, ist in Anbetracht der Medianwerte sowie Staubungszahlen der Maisstärke und des Braunkohlenstaubes nicht zu pauschalisieren.

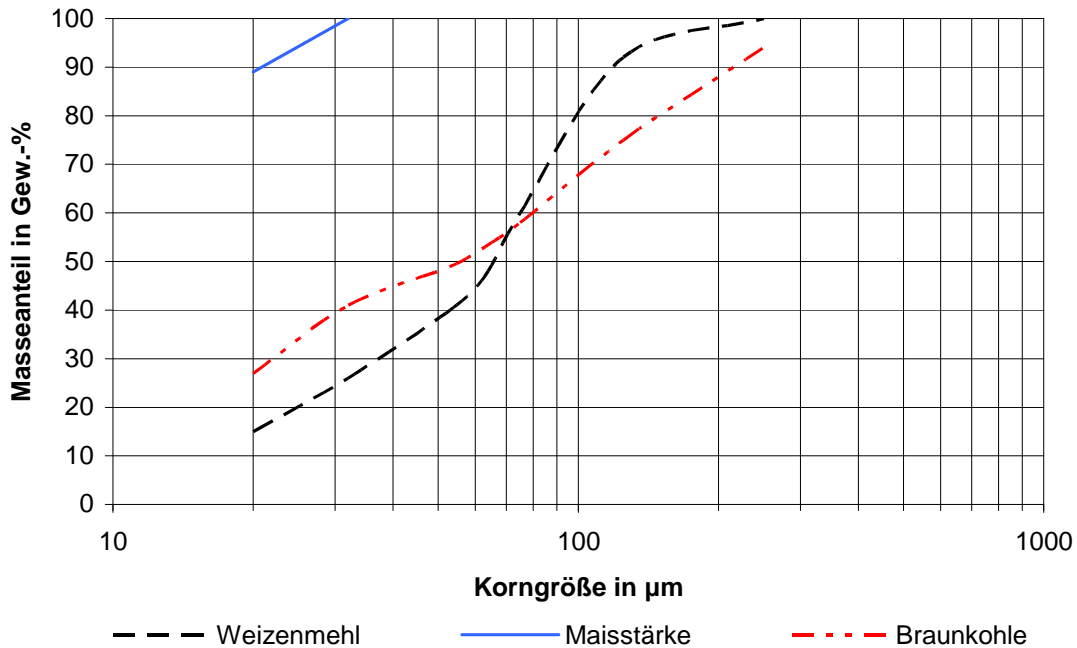


Abbildung 3: Korngrößenverteilung der Versuchsstäube

## 4.2 Messeinrichtung und Messaufbau

Die Messeinrichtung SGK 5 setzt sich im Wesentlichen aus einer Einheit zur Erfassung der Messdaten (im Folgenden Messeinheit genannt) und einer Einheit zur Anzeige, Steuerung und Verarbeitung der erfassten Daten (folgend Steuereinheit genannt) zusammen. Bei dem zur Anwendung kommenden Messprinzip wird die Lichtschwächung eines konstanten Lichtsignals durch Signaltrübung infolge von den Strahl durchquerenden Partikeln ermittelt. Die bei den Staubkonzentrationsmessungen erhaltenen Spannungswerte des SKG5 müssen zur Auswertung über eine zuvor für jedes Schüttgut erstellte Kalibrierkurve in einen Staubkonzentrationswert umgerechnet werden [Lorenz, 2011].

Zur Durchführung der Konzentrationsmessungen unter den im Inneren von Mischern zu erwartenden Randbedingungen, wie beispielsweise hohe Konzentrationen und begrenzte Platzverhältnisse zur Positionierung der Messeinheit, wurde die vorhandene Messeinheit vom Typ 7 durch die BGN angepasst. Ziel der Anpassung ist, die sich über die Messzeit einstellende Verschmutzung der Linsen zu vermeiden und die Baugröße des Typs 7 wesentlich zu verkleinern.

Nach [Dyrba, 2009] wurde die Baugröße der Messeinheit über eine Optimierung des Gehäuses, die Verwendung verkleinerter Bauteile sowie den Einsatz eines Reflexionsprismas wesentlich verringert. Zur Minimierung der Verschmutzung der Linsen ist die Messeinheit mit Messblenden bestückt worden, die unterschiedliche Abstände zueinander sowie variierende



Blendenöffnungen aufweisen [Dyrba, 2009]. Zudem kann die Blendenanordnung mit einem definierten Luftstrom durchspült werden, um das Eindringen von Staub in die Messeinheit möglichst zu vermeiden.

Eine schematische Darstellung der Messeinheit ist nachfolgender Abbildung 4 zu entnehmen.

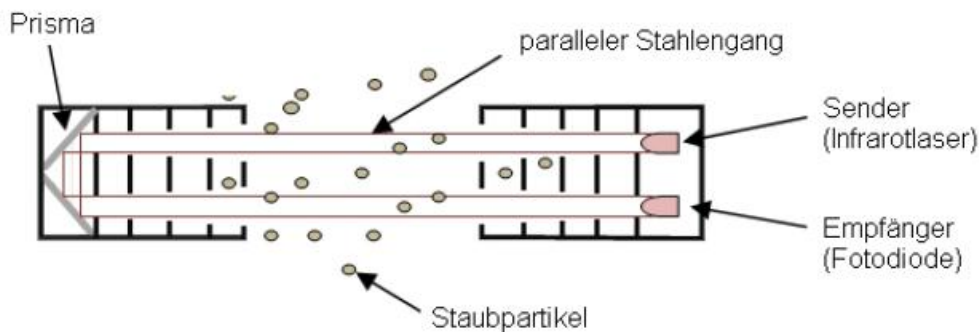


Abbildung 4: Funktionsprinzip der Messeinheit vom Typ 15 [Lorenz, 2011]

Der für sämtliche Konzentrationsmessungen prinzipiell zugrunde gelegte Messaufbau ist der Abbildung 5 zu entnehmen.

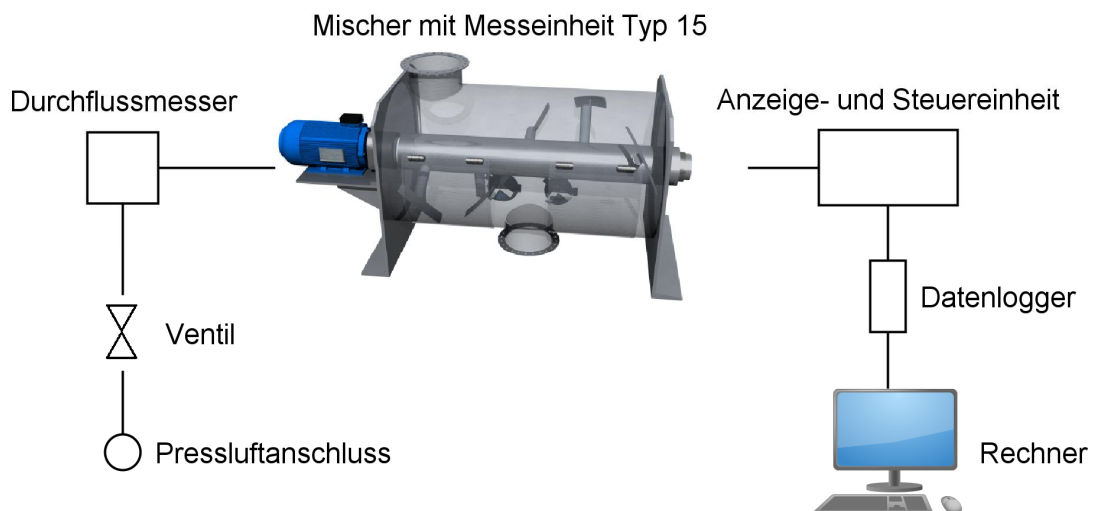


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Messaufbaus

### 4.3 Konzentrationsmessungen am Horizontalmischer

Für die Durchführung der Konzentrationsmessungen an einem Horizontalmischer konnte auf den für das vorangegangenen Forschungsprojekt [Hesener, 2007] durch die Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH, Paderborn, bereitgestellten Pflugschar-Chargenmischer vom Typ FKM 300 D mit 300 l Trommelvolumen zurückgegriffen werden. Aus den Erfahrungen

der Explosionsversuche mit diesem 300 l Horizontalmischer [Hesener, 2007] heraus, sollten die Konzentrationen an insgesamt 3 zugänglichen Messpunkten (siehe Abbildung 6) im Versuchsmischer quantifiziert werden.

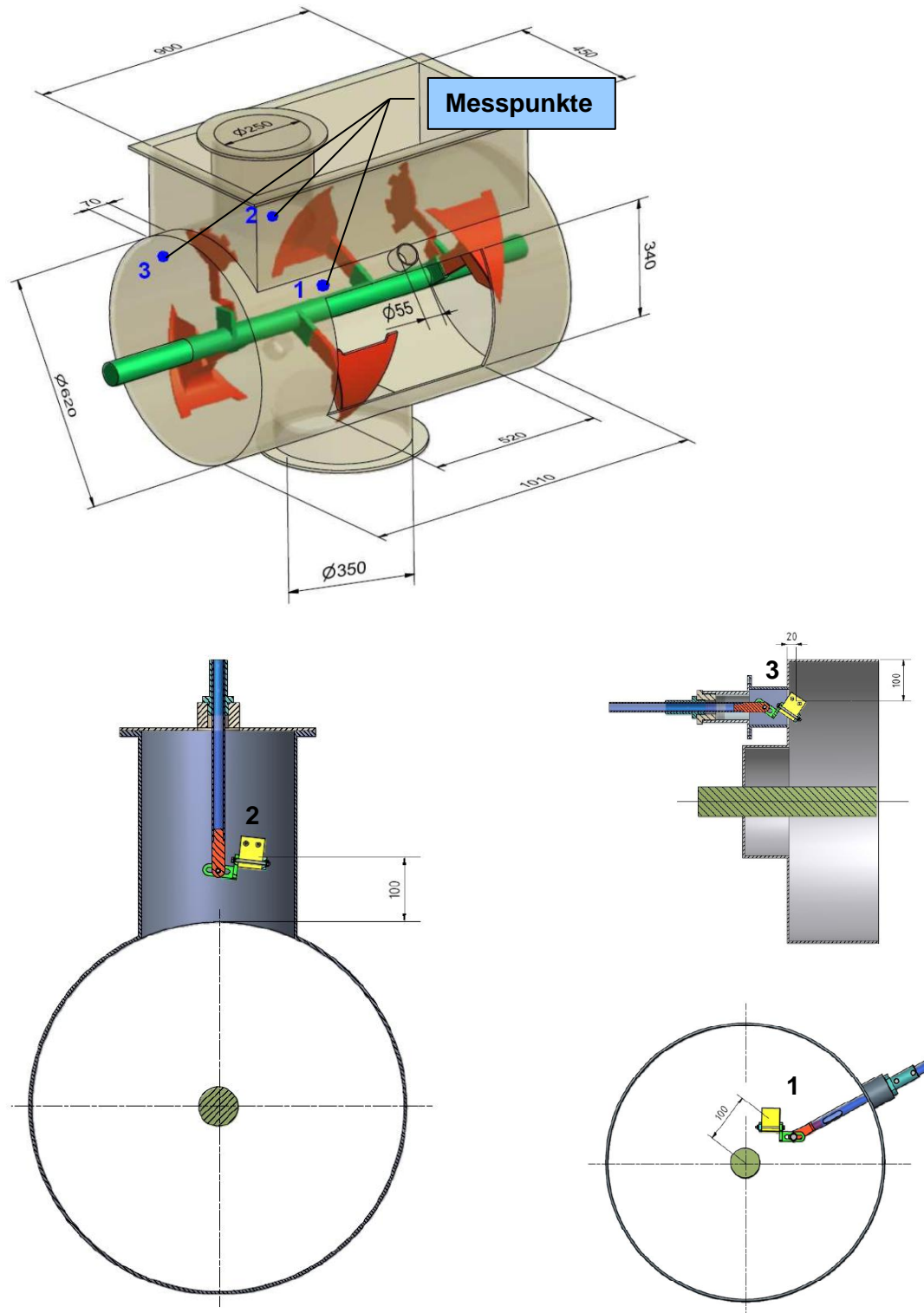


Abbildung 6: Anordnung der Messpunkte im Horizontalmischer [Lorenz, 2011]

Die Messpunkte mussten so gewählt werden, dass die Messeinheit nicht durch die rotierenden Mischwerkzeuge während der Versuche abgeschert wurde und die zu erwartenden Konzentrationen innerhalb des Messbereiches lagen.

Um die Messeinheit an den Messpunkten fixieren zu können, wurde von der BGN eine Halterung entwickelt, die zusätzlich zur Fixierung eine ausreichende Stabilität zur Gewährleistung eines parallelen Strahlenganges sowie eine Führungsmöglichkeit für die benötigten Verbindungsleitungen zur Steuereinheit bietet. Die Konzentrationsmessungen wurden durch die BGN bei den Umfangsgeschwindigkeiten von  $2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und  $4,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und den Füllgraden von 25 Vol.-%, 50 Vol.-% und 70 Vol.-% durchgeführt.

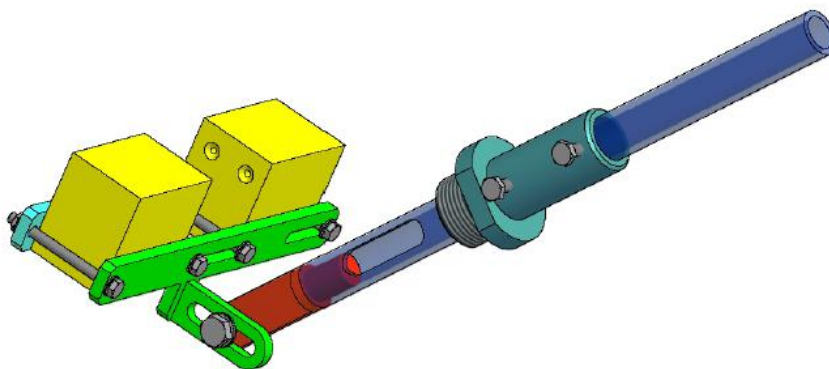


Abbildung 7: CAD-Modell Messeinheit Typ 15 [Lorenz, 2011]

Anhand der für die Konzentrationsmessungen geplanten Umfangsgeschwindigkeiten, Füllgrade sowie Mischgüter konnte die in Tabelle 11 dargestellte Versuchsmatrix aufgestellt werden.

Die Ergebnisse zu den durchgeführten Messungen sind nachstehend in Tabelle 7 gelistet.

Bei den Messungen mit einer Umfangsgeschwindigkeit von  $4,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wurde aufgrund der hohen Staubentwicklung im Mischerinneren die Grenze des Messbereiches der Messeinrichtung erreicht, so dass eine Messwerterfassung ausschließlich bei Verwendung der Luftspülung im Bereich der Blendenanordnung möglich war. Die in Tabelle 7 für die Umfangsgeschwindigkeit von  $4,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  angegebenen Messergebnisse geben daher die messbaren Mindestkonzentrationen an, nach [Lorenz, 2011] liegen die tatsächlich vorliegenden Staubkonzentrationen darüber jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit im explosionsfähigen Bereich.

Tabelle 7: Ergebnisse mittlere Konzentration Horizontalmischer [Lorenz, 2011]

Umfangsgeschwindigkeit in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Füllgrad in Vol.-%	Messpunkt	Staubkonzentration in $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		
			Weizenmehl	Maisstärke	Braunkohlenstaub
2,3	25	1	37,9	62,9	177,8
		2	6,5	39,1	119,6
		3	14,3	110,4	159,2
	50	1	375,0	390,3	252,8
		2	10,7	53,1	164,5
		3	16,7	207,7	241,7
	70	2	22,9	114,6	232,2
		3	22,1	235,8	346,2
	4,6	25	1	> 3.250	> 1.100
2			2.230	> 600	> 400
3			> 3.000	> 900	> 700
50		1	> 3.000	> 900	> 400
		2	> 3.000	> 900	> 700
		3	> 2.900	> 1.000	> 700
70		2	> 1.500	> 1.000	> 1.000
		3	> 3.000	> 900	> 500

Der Abbildung 8 ist ein typischer Verlauf von gemessenen Staubkonzentrationen eines Messdurchganges für die unterschiedlichen Versuchsstäube zu entnehmen. Prägnant zu erkennen ist die unterschiedliche Staubungsneigung der Versuchsstäube. Weiterhin ist dem Kurvenverlauf eine relativ starke Messwertschwankung über die Messzeit hinweg zu entnehmen, was auf eine starke örtliche und zeitliche Varianz der Staubkonzentration im Mischerinneren schließen lässt. Diese Varianz tritt unabhängig von der Staubungsneigung der Stoffe auf und ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die durch die Mischwerkzeuge initiierte Mischgutbewegung zurück zu führen.

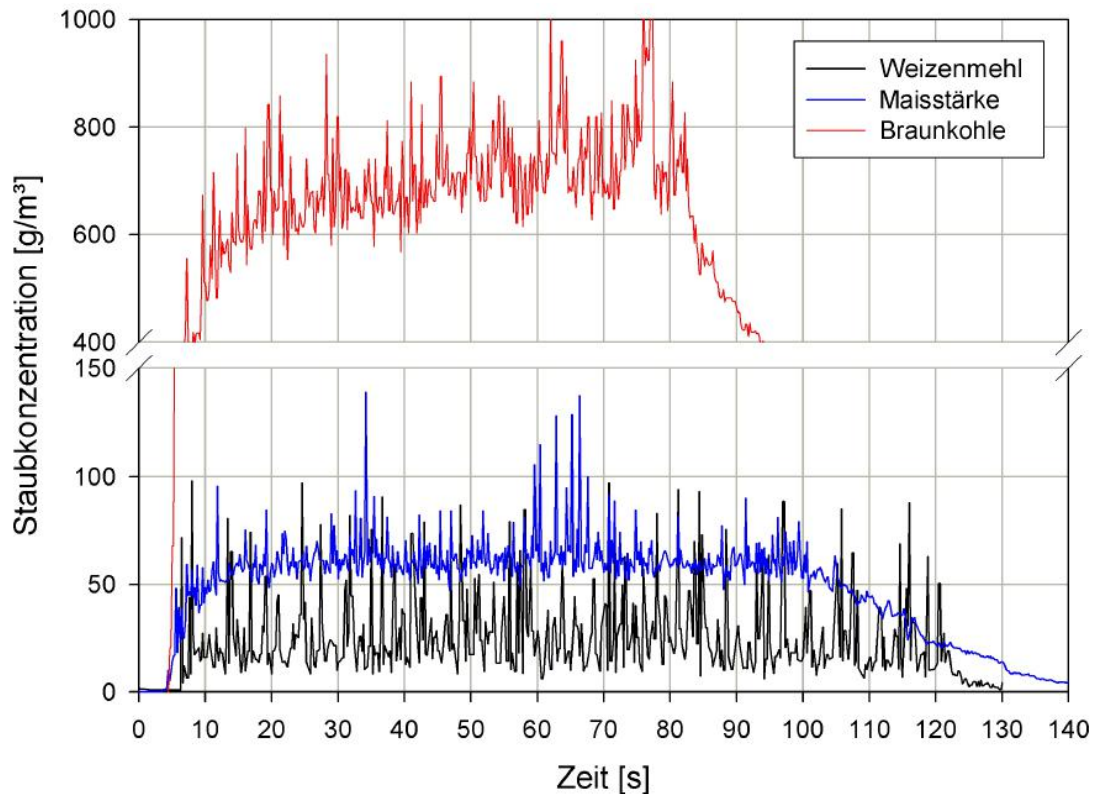


Abbildung 8: Staubkonzentration (MP 1; 25 % FG;  $2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) [Lorenz, 2011]

Zusammenfassend kann für sämtliche Messungen am Horizontalmischer festgehalten werden, dass explosionsfähige Staub/Luft-Gemische im Inneren messtechnisch nachgewiesen werden konnten. Weiterhin ist festzuhalten, dass der Füllgrad nicht als geeignetes Kriterium für das Auftreten von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen innerhalb des Mischers heranzuziehen ist. Vielmehr haben die Staubungsneigung des Mischgutes und die Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge einen Einfluss auf die Staubkonzentrationen im Horizontalmischer. Anhand der zeitlich stark variierenden Messwerte (siehe Abbildung 8) ist ersichtlich, dass sich die Staubkonzentrationen im Mischer in Abhängigkeit zur Relativgeschwindigkeit, Mischwerkzeugausführung, Staubungsneigung der Mischgüter, etc. örtlich und zeitlich über den Mischprozess ständig ändern. Dabei ist zu erwarten, dass bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten schwerkraftbedingt im unteren Teil des Mischers sehr hohe Konzentrationen vorliegen. Eine Pauschalisierung für eine sichere Auslegung der genannten Faktoren, die einen Einfluss auf die Staubkonzentrationen im Mischer haben, bei der es nicht betriebsmäßig zum Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische im Mischer kommt, ist anhand der gesammelten Erkenntnisse nicht möglich.

#### 4.4 Konzentrationsmessungen am Vertikalmischer

Für die Durchführung der Konzentrationsmessungen an einem Vertikalmischer wurde von der amixon GmbH, Paderborn, ein Vertikal-Einwellenmischer vom Typ VM2000 mit 2600 l Brutto-Trommelvolumen gestellt. Anhand der geometrischen Gegebenheiten, sollten die Konzentrationen an insgesamt 4 zugänglichen Messpunkten (siehe Abbildung 9) im Versuchsmischer quantifiziert werden.

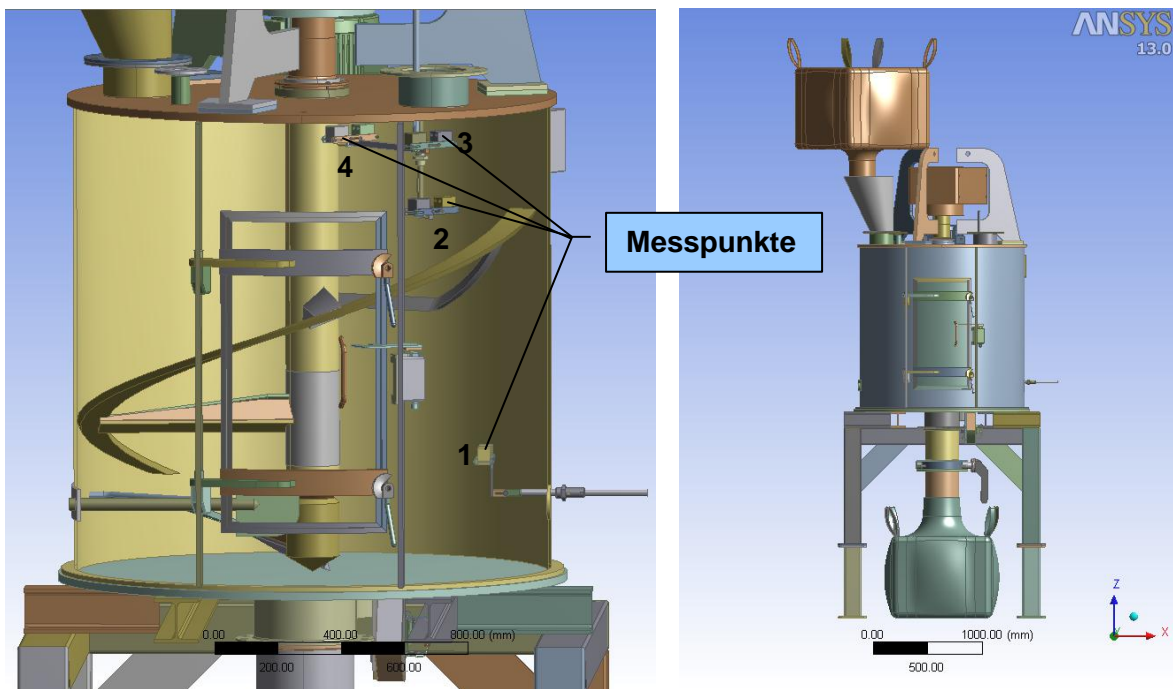


Abbildung 9: Anordnung der Messpunkte im Vertikalmischer

Die Konzentrationsmessungen wurden durch die DEKRA EXAM GmbH in Zusammenarbeit mit der amixon GmbH im Technikum der amixon GmbH in Paderborn durchgeführt.

Die Umfangsgeschwindigkeiten konnten bauartbedingt zwischen den Werten  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  variiert werden. Abweichend von den Messungen am Horizontalmischer wurden Füllgrade mit 10 Vol.-%, 56 Vol.-% und 70 Vol.-% für die Messungen am Vertikalmischer realisiert. Die gewählten Füllgrade begründen sich in den Positionierungsmöglichkeiten für die Messeinrichtung und auf dem Verhältnis zwischen Brutto- und Netto-Volumen des Vertikalmischers. Ausgehend vom Bruttovolumen entsprechen 56 Vol.-% Füllgrad ca. 70 Vol.-% Füllgrad des Nettovolumens. Da aus der Beschreibung der infrage zu stellenden Schutzmaßnahme zur Konzentrationsbegrenzung durch einen Mindestfüllgrad von 70 % entsprechend der Beispielsammlung [BGR 104, 2011] nicht uneindeutig hervorgeht, ob dieser Füllgrad sich auf das Brutto- oder Nettovolumen eines Mischerzylinders bezieht und zudem anhand der durchgeführten Gefährdungsbeurteilungen gemäß Kapitel 3.3 differierende Ansätze in

der Praxis festgestellt werden konnten, galt es zu untersuchen, ob grundsätzlich ein Unterschied zwischen diesen Betrachtungen existiert und somit ggf. ein Handlungsbedarf hinsichtlich der Konkretisierung der Beispielsammlung [BGR 104, 2011] besteht.

Anhand der für die Konzentrationsmessungen geplanten Umfangsgeschwindigkeiten, Füllgrade sowie Mischgüter wurde die in Tabelle 12 dargestellte Versuchsmatrix aufgestellt. Jede Messung wurde dreimal unter identischen Bedingungen durchgeführt, um qualitativ auf die Messunsicherheit eingehen zu können.

Die Ergebnisse zu den durchgeführten Messungen sind nachstehend in Tabelle 8 gelistet.

Tabelle 8: Ergebnisse mittlere (maximale) Konzentration Vertikalmischer [Maas, 2011]

Umfangsgeschwindigkeit in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Füllgrad in Vol.-%	Messpunkt	Staubkonzentration in $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		
			Weizenmehl	Maisstärke	Braunkohlenstaub
1,0	10	1	5 (8)	4 (5)	23 (27)
		2	7 (11)	1 (2)	27 (29)
		3	4 (5)	2 (3)	18 (20)
	56	2	7 (13)	2 (3)	19 (22)
		3	3 (5)	2 (3)	23 (25)
		4	8 (14)	1 (2)	9 (10)
	70	2	10 (17)	4 (5)	50 (54)
		3	8 (9)	2 (3)	46 (53)
		4	8 (9)	2 (3)	24 (27)
2,5	10	1	16 (25)	37 (51)	168 (170)
		2	10 (14)	14 (15)	162 (164)
		3	8 (11)	11 (13)	175 (177)
	56	2	11 (18)	21 (24)	346 (353)
		3	5 (11)	16 (19)	338 (351)
		4	10 (14)	5 (8)	192 (197)
	70	2	20 (27)	18 (23)	299 (305)
		3	11 (16)	9 (11)	268 (277)
		4	7 (8)	3 (4)	88 (98)

Der Abbildung 9 ist ein typischer Verlauf von gemessenen Staubkonzentrationen am Vertikalmischer für je einen Messdurchgang bei unterschiedlichen Versuchsstäuben zu entnehmen. Auch bei den Messungen am Vertikalmischer ist prägnant zu erkennen, dass die unterschiedliche Staubungsneigung der Versuchsstoffe einen gravierenden Einfluss auf die Staubkonzentration hat. Weiterhin ist im Vergleich zu den Messungen am Horizontalmischer

ersichtlich, dass der Kurvenverlauf einer geringeren Messwertschwankung unterliegt. Daher kann angenommen werden, dass die örtliche und zeitliche Varianz der Staubkonzentration im Vertikalmischerinneren geringer ausfällt als im untersuchten Horizontalmischer. Begründen lässt sich die Annahme durch die geringere maximale Relativgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge und der damit einhergehenden Mischgutbewegung. Anhand der Messwertkurve für Braunkohle wird deutlich, dass der Zeitraum für die Sedimentation der in Schwebelage befindlichen Staubpartikel vergleichsweise lang ist. Nach Stopp des Mischwerkzeugantriebes sank die Staubkonzentration erst nach ca. 60 Sekunden unter die UEG.

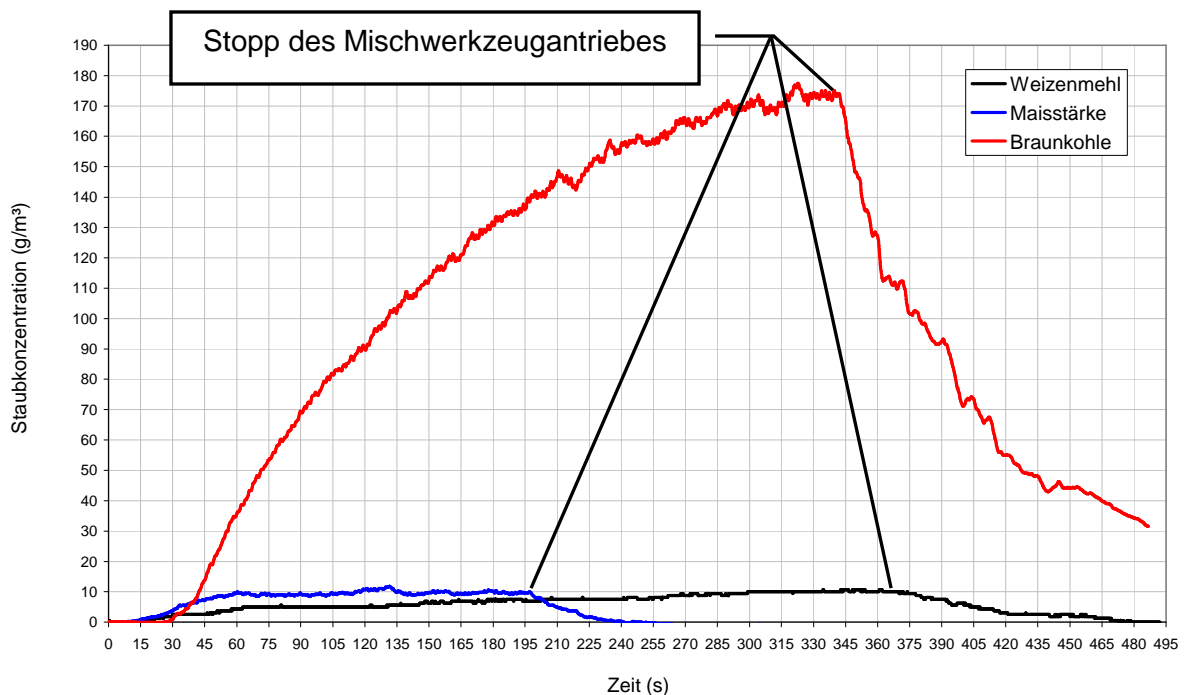


Abbildung 10: Staubkonzentration (MP 3; 10 % FG;  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Die maximalen Staubkonzentrationen, welche bei den Messungen am Vertikalmischer ermittelt wurden, lagen deutlich unter den Messergebnissen der Versuche am Horizontalmischer. Dieses lässt sich wesentlich durch die geringere maximale Umfangsgeschwindigkeit und die Ausführung des Mischwerkzeuges beim Vertikalmischer begründen. Aufgrund der geringeren Staubentwicklung im Vertikalmischerinneren wurde die Grenze des Messbereiches der Messeinrichtung nicht erreicht, so dass die Luftspülung im Bereich der Blendenanordnung zur Messwerterfassung bei keiner Messung erforderlich war.

Zusammenfassend kann für die Messungen am Vertikalmischer festgehalten werden, dass explosionsfähige Staub/Luft-Gemische im Inneren messtechnisch nachgewiesen werden konnten. Analog zu den Messungen am Horizontalmischer ist ersichtlich, dass der Füllgrad nicht als geeignetes Kriterium für das Auftreten von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen innerhalb des Mixers heranzuziehen ist. Vielmehr haben auch im Vertikalmischer die



Staubungsneigung des Mischgutes und die Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge einen Einfluss auf die Staubkonzentrationen.

#### 4.5 Schlussfolgerung aus den Ergebnissen der Konzentrationsmessungen

Zusammenfassend können anhand der durchgeführten Staubkonzentrationsmessungen folgende Schlüsse gezogen werden. Die vorgeschlagene Einteilung in explosionsgefährdete Bereiche dient als Basis für die weitere Gefährdungsbeurteilung nach TRBS 2152 Teil 3.

1. Das häufige und oder langzeitige Auftreten von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen innerhalb mechanisch betriebener Zwangsmischer kann nicht ausschließlich über einen hohen Füllgrad vermieden werden, so dass die Beispielsammlung der EX-RL [BGR 104, 2011] im Punkt 3.3.5 d) zu überarbeiten ist.
2. Die Messungen haben gezeigt, dass bei geringer Staubungsneigung der Mischgüter ein hoher Füllgrad entgegen der bisherigen Annahmen gemäß [BGR 104, 2011] sogar zu kritischeren Staubkonzentrationen im oberen Mischerbereich führen kann.
3. Die Bildung explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische innerhalb von mechanisch betriebenen Zwangsmischern hängt wesentlich von der Staubungsneigung der Mischgüter und den Umfangsgeschwindigkeiten der Mischwerkzeuge ab.
4. Eine Ringschicht (Bereich sehr hoher Staubkonzentration im Bereich der Wandung) bildet sich erst bei sehr hohen Relativgeschwindigkeiten (hohe Froude-Zahl).
5. Der Einfluss auf die Staubkonzentrationen durch die Staubungsneigung eines Mischgutes nimmt zu höheren Umfangsgeschwindigkeiten hin ab.
6. Bei sehr geringer Staubungsneigung (Staubungsgruppe 1 nach [VDI 2263, 2008]) der Mischgüter und Relativgeschwindigkeiten der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  kann ein häufiges oder langzeitiges Auftreten von explosionsfähigen Staub/Luftgemischen in Vertikalmischern während des Mischens ausgeschlossen werden. Da während des Befüllens und Entleerens sowie gelegentlich während des Mischvorganges explosionsfähige Staub/Luft-Gemische auftreten können, sind solche Vertikalmischer im Inneren in die Zone 21 einzuteilen.
7. Basierend auf den Ergebnissen der Konzentrationsmessungen kann nicht länger daran festgehalten werden, dass allein ein hoher Befüllgrad zu sehr hohen Konzentrationen im gesamten Mischerinneren führt. Je nach Relativgeschwindigkeit, Mischwerkzeugausführung, Staubungsneigung, etc. treten örtlich und zeitlich variierend

Bereiche kritischer Staubkonzentrationen auf. Ohne weitere Detailkenntnisse zur Konzentrationsverteilung bei bekannten Stoffdaten muss daher unterstellt werden, dass im Inneren von mechanisch betriebenen Zwangsmischern ohne zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre, wie bspw. Inertisierung, häufig mit explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen zu rechnen ist, so dass diese grundsätzlich in Zone 20 einzuteilen sind.

8. Aufgrund der Gestaltung von Mischwerkzeugen ist es denkbar, dass auch bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten von  $\geq 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  nur gelegentlich explosionsfähige Atmosphäre im Inneren von Vertikalmischern auftritt. Als Beleg für eine damit ggf. einhergehende Einteilung in die Zone 21 ist hersteller-/betreiberseitig ein messtechnischer Nachweis mit den vom Staubungsverhalten her kritischsten Mischgütern, die bestimmungsgemäß homogenisiert werden sollen, zu erbringen.

#### **4.6 Simulation und Modellierung des Mischprozesses**

Der grundsätzliche Vorteil der Simulationen gegenüber der praktischen Messung von Staubkonzentrationen innerhalb von Mischern liegt darin, dass es möglich ist, Erkenntnisse zur Verteilung des Staubes im gesamten Inneren und nicht ausschließlich an einzelnen Messpunkten über die Berechnungsergebnisse zu erlangen.

Über die Kenntnisse der Staubverteilung im gesamten Mischer kann aufbauend zielgerichtet bewertet werden, wo die kritischsten Bereiche hinsichtlich des Auftretens von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen und von wirksamen Zündquellen im Mischer zu erwarten sind. Bspw. kann dieses die Bereiche unmittelbar hinter den Mischwerkzeugen betreffen. An diesen Stellen ist die praktische Messung derzeit nicht möglich, jedoch ist hier die Wahrscheinlichkeit des Auftretens wirksamer Zündquellen, wie bspw. mechanisch erzeugte Funken oder heiße Oberflächen hervorgerufen durch Schleif- oder Reibprozesse, vergleichsweise hoch.

Um zu klären, ob aufbauend auf den durchgeführten Konzentrationsmessungen eine Extrapolation der Ergebnisse auf andere Mischergeometrien und Baugrößen über das Verfahren der numerischen Simulation möglich ist, galt es zunächst herauszufinden welche mathematischen Modelle die höchste Genauigkeit zur Beschreibung der Vorgänge, wie Partikelbewegung und -interaktion, liefern.

Um den Aufwand der Berechnung zur Validierung geeigneter mathematischer Modelle zunächst überschaubar zu halten, galt es zunächst, Referenzversuche im Kleinmaßstab zu

fahren. Hierfür wurde ein geeigneter Versuchsstand entwickelt und gebaut, der grundsätzlich den Aufbau eines Mixers widerspiegelt.

Durch die Verwendung eines einfachen Glaszylinders mit einem Innendurchmesser von 236 mm und einer Höhe von 328 mm konnten die Transportvorgänge der Staubpartikel im Inneren optisch gut beobachtet werden. Ein Mischflügel aus Holz in der Dimension 220 x 30 x 5 mm, welcher über eine Aluminiumwelle mit 10 mm Durchmesser mit einem Elektroantrieb verbunden wurde, stellte für die Versuche im Kleinmaßstab das Mischwerkzeug dar. Als Antrieb diente ein RW 20 DZM Laborrührer mit stufenloser Drehzahleinstellung. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 11 dargestellt.

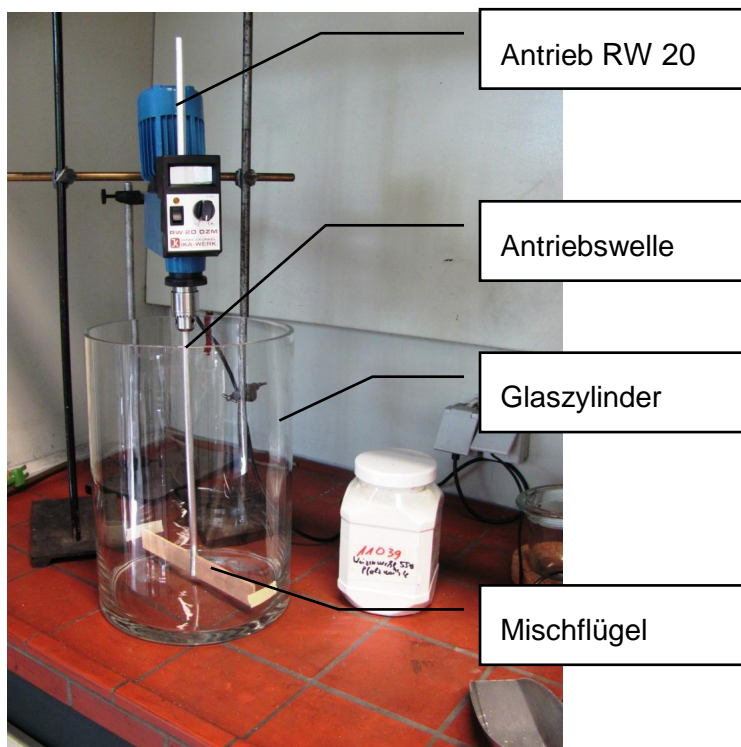


Abbildung 11: Versuchsaufbau Kleinmaßstabsversuche

Zur Versuchsdokumentation wurden eine digitale Spiegelreflexkamera, eine Digitalkamera sowie eine Videokamera verwendet, wodurch qualitative Vergleiche zwischen Simulation und Versuch auf Basis der rein optischen Beobachtungen der Kleinmaßstabsversuche möglich wurden. Quantitative Aussagen zur Genauigkeit des Modells konnten hierüber nicht getroffen werden.

Die verwendeten Versuchsstäube sind identisch zu den Stäuben der Großversuche. Eine Übersicht zu den gewählten Versuchsrandbedingungen ist der nachstehenden Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Versuchsmatrix Kleinmaßstabsversuche

Versuchs-Nr.	Staub	Füllhöhe (mm)	Umfangsgeschwindigkeit ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	Weizenmehl	23	0,70
2			1,00
3			1,40
4			2,80
5	Maisstärke		0,70
6			1,00
7			1,40
8			2,80
9	Braunkohle		0,70
10			1,00
11			1,40
12			2,80

Wie erläutert, wurden die Kleinmaßstabsversuche dazu verwendet, ein Rechenmodell für die Abbildung der Staubwolkenentstehung in Mischern zu validieren. In der Fachliteratur zum Thema finden sich einige Ansätze nach dem Euler/Euler Modell, jedoch gibt es keine Modelle, in denen die Staubeinstehung primär analysiert wird [Maas, 2011].

Physikalisch betrachtet kann eine Staubwolke als geringe Produktmenge, welche sich in einem zeitweiligen Schwebezustand in der Luft befindet, angesehen werden. Der Prozess der Staubwolkenentstehung wird dabei durch die Krafteinwirkung auf die Partikel einer Produktmenge bestimmt. Die resultierende Krafteinwirkung auf einzelne Partikel muss hierbei dazu führen, dass die Partikel in den Schwebezustand übergehen. Da der Prozess einer Staubwolkenentstehung generell gesehen nur von allgemeinen physikalischen Gesetzen bestimmt wird, wird dieser bei einem realitätsnahen Mischmodell grundsätzlich auch berechnet. Demnach ist die Grundvoraussetzung für die Auswahl des Rechenmodells eine hinreichend genaue Abbildung und Berücksichtigung der Kräfteverteilung an einzelnen Partikeln.

Für eine möglichst realitätsnahe Simulation des Partikelverhaltens sind die Eigenschaften, welche sich auf die Staubungsneigung der Stoffe auswirken, als Randbedingung für das Modell zwingend erforderlich. Über die Annahme, dass im Wesentlichen die zuvor ermittelte Schüttdichte und Korngrößenverteilung als Stoffeigenschaften zur Abbildung des Staubungsverhaltens ausreichend sind, wurden folgenden Randbedingungen festgelegt. Um den Berechnungsaufwand auf ein vertretbares Maß zu begrenzen, musste die Korngrößenverteilung der Versuchsstoffe in 3 Phasen unterschiedlicher Partikelgröße gegliedert werden.

Tabelle 10: Modellrandbedingung Partikeleigenschaften [Maas, 2011]

Eigenschaft	Partikel		
	Weizenmehl	Maisstärke	Braunkohle
Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	1152	1299	1120
Innerer Reibungswinkel (°)	35	35	25
Partikelgröße Phase 1 (µm)	20	5	10
Volumenanteil Phase 1 (-)	0,1	0,125	0,075
Partikelgröße Phase 2 (µm)	50	15	35
Volumenanteil Phase 2 (-)	0,2	0,25	0,19
Partikelgröße Phase 3 (µm)	100	25	125
Volumenanteil Phase 3 (-)	0,2	0,125	0,235

In der folgenden Abbildung 12 sind die Ergebnisse aus den Kleinmaßstabsversuchen mit den Simulationsergebnissen für Weizenmehl gegenübergestellt.

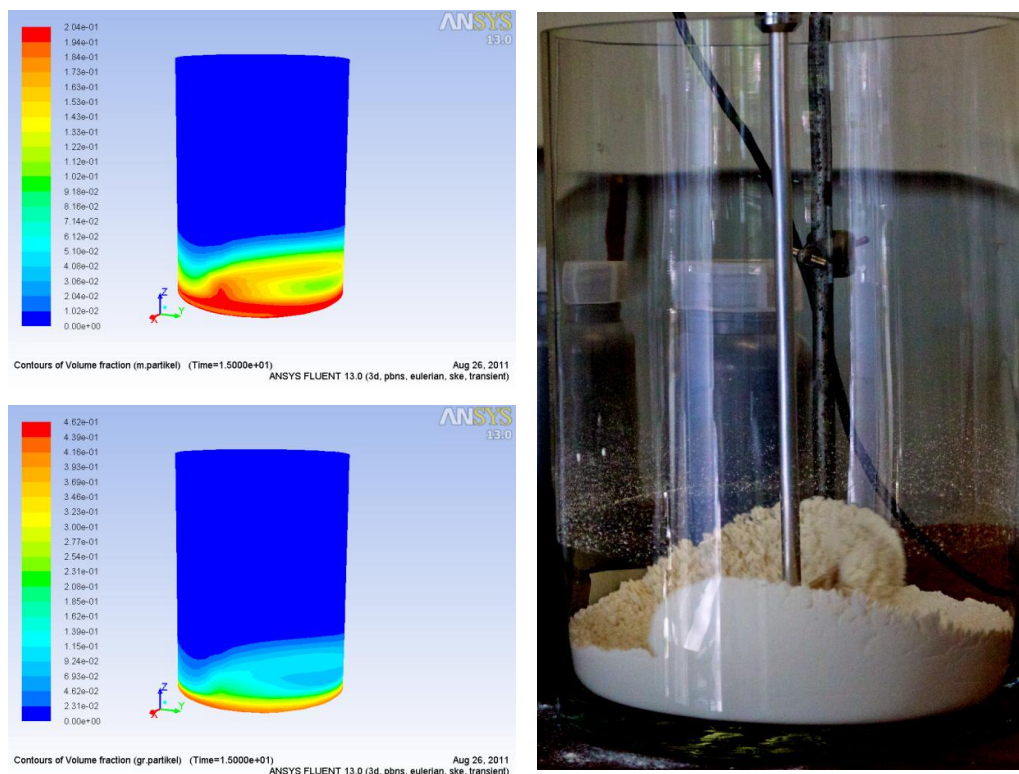


Abbildung 12: Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen für Weizenmehl

Entgegen den Simulationsergebnissen ist in der Versuchsaufnahme eine deutliche Abgrenzung zwischen dem Weizenmehl und der Umgebungsluft zu erkennen. Zudem weist die durch den Mischflügel hervorgerufene Produktbewegung in der Simulation eine gestrecktere Kontur auf als in den realen Versuchen beobachtet werden konnte.

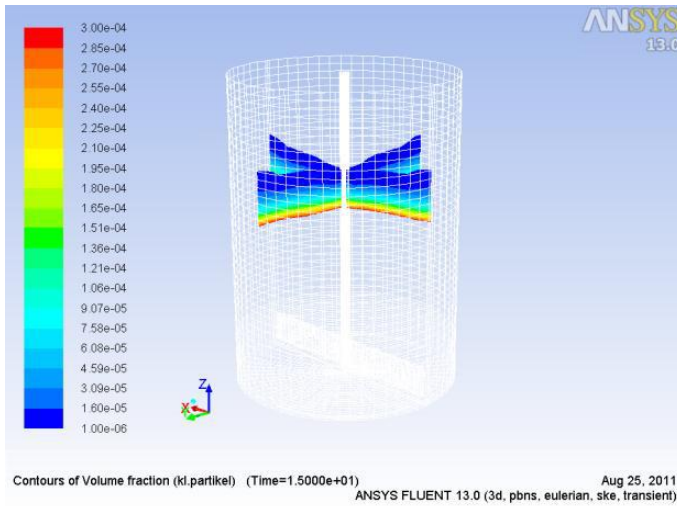


Abbildung 13: Konturdarstellung von Weizenmehlstaubkonzentrationen  $1 - 350 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$

Anhand der Abbildung 13 ist weiterhin ersichtlich, dass die Staubkonzentration über dem Schüttgut in der Simulation vergleichsweise hohe Werte annimmt. Der in Abbildung 13 farblich dargestellte Bereich entspricht einer Konzentration zwischen  $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  und  $350 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Daher ist davon auszugehen, dass die Simulationsergebnisse keine hinreichend genaue Abbildung des Staubverhaltens liefern. Zurückzuführen sind diese Unstimmigkeiten auf Partikelwechselwirkungen, die vom Modell nicht berücksichtigt werden. Erklärt werden können diese Wechselwirkungen anhand der in Abbildung 14 dargestellten Mikroskopaufnahme der Weizenmehlpartikel und dem darauf zurückzuführenden typischen Verhalten von Weizenmehl, welches während der Versuchsreihen beobachtet wurde.

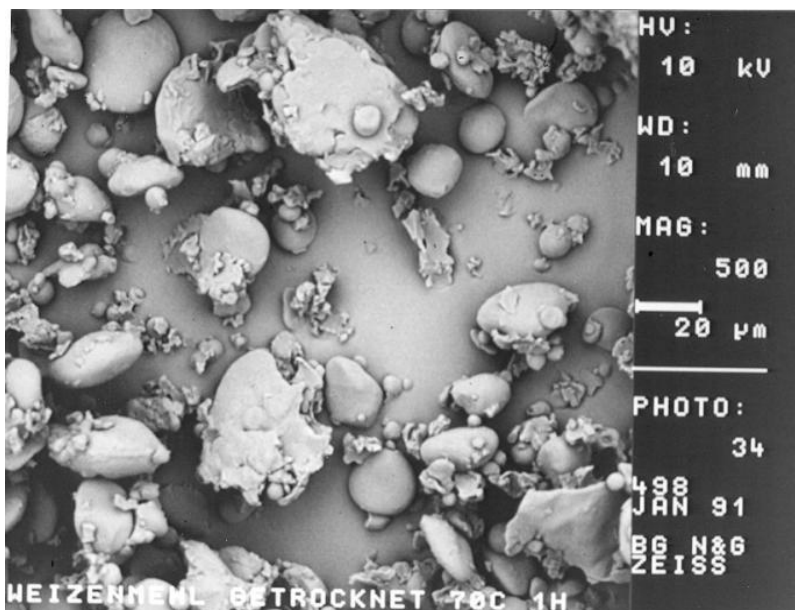


Abbildung 14: Mikroskopaufnahme Weizenmehl

Die Mikroskopaufnahme lässt erkennen, dass die Weizenmehlpartikel in Größe und Form stark variieren. Zudem kann anhand der Partikelform die Annahme abgeleitet werden, dass die auch im Versuch beobachtete „Verklumpung“ des Mehls auf eine hohe Partikelrauigkeit zurück zu führen ist. Diese Partikelrauigkeit führt demnach höchst wahrscheinlich dazu, dass Partikel mit geringem Korndurchmesser nicht aufgewirbelt werden, sondern sich eher an den größeren und schweren Partikeln anhaften, was sich auch in der geringen Staubungsneigung des Weizenmehls ausdrückt.

In der folgenden Abbildung 15 sind die Ergebnisse aus den Kleinmaßstabsversuchen mit den Simulationsergebnissen für die Maisstärke gegenübergestellt.

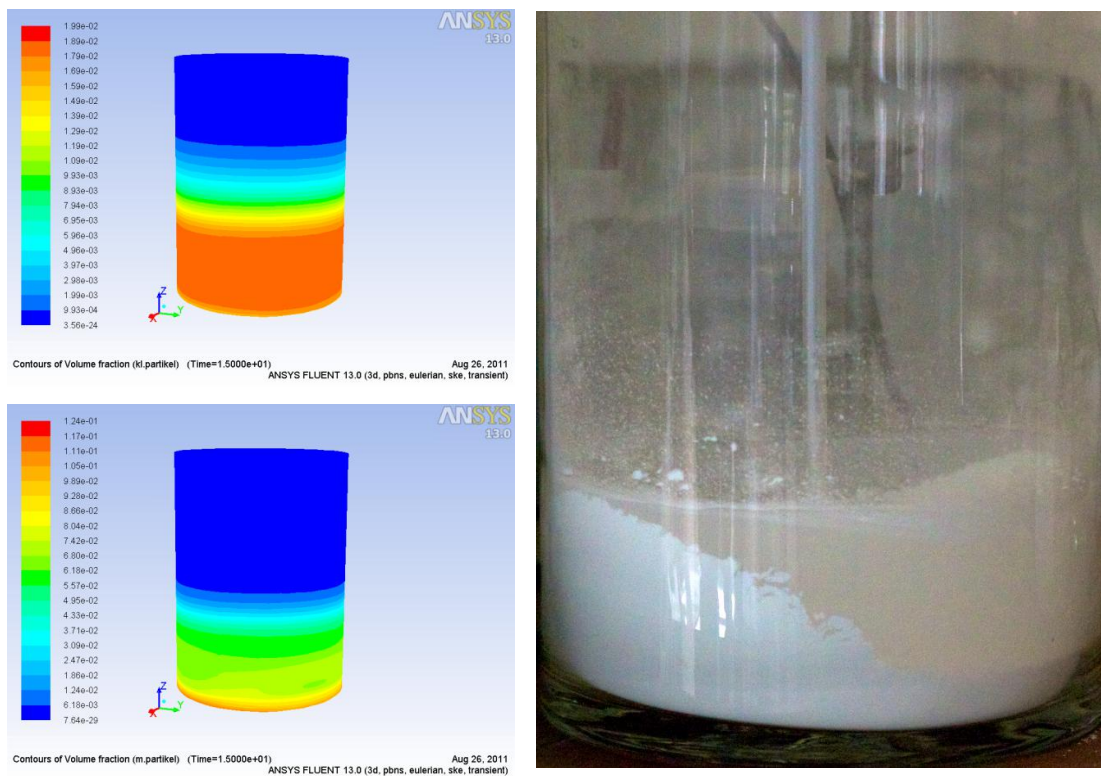


Abbildung 15: Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen für Maisstärke

Während beim Weizenmehl die Simulationsergebnisse hinsichtlich der grundsätzlichen Schüttgutbewegung noch relativ gut mit denen der Versuche übereinstimmen, ist dies bei der Maisstärke nicht mehr zu erkennen. Die Staubwolkenentwicklung fällt bei der Maisstärke, wie anhand der Staubungszahl zu erwarten war, deutlich stärker aus als beim Weizenmehl. Jedoch stehen die Simulationsergebnisse hinsichtlich der Größenordnung in keinem Bezug zu beobachteten Staubentwicklung im Kleinmaßstab.

Die Begründung für die Divergenz zwischen den Berechnungs- und Versuchsergebnissen ist auch hier in den Partikeleigenschaften zu finden. Anhand der Mikroskopaufnahme, darge-

stellt in Abbildung 16, ist zu erkennen, dass die Partikel der Maisstärke wesentlich kleinere Korngrößen und eine geringere Rauigkeit im Vergleich zum Weizenmehl aufweisen.

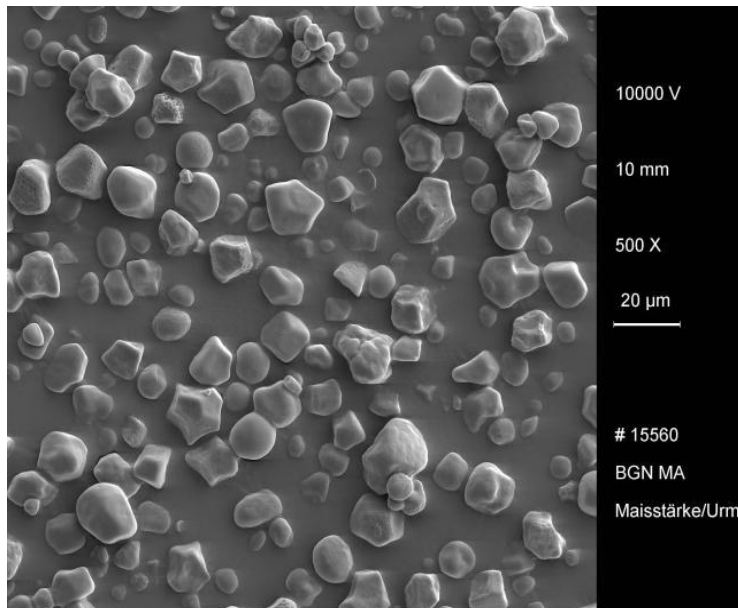


Abbildung 16: Mikroskopaufnahme Maisstärke

Es ist zu unterstellen, dass die Anziehungskräfte zwischen den Partikeln zu einer geringeren Staubungsneigung im Realversuch führen als im Modell abgebildet wird. Im Rechenmodell sind im Wesentlichen nur die Korngrößenverteilung und der Parameter für die Reibung zwischen den Partikeln Einfluss gebend auf die Staubungsneigung. Da die Maisstärke Partikel mit vergleichsweise geringer Korngröße aufweist, wird im Modell die Staubungsneigung überproportioniert. In dem Realversuch hingegen zeigen sich die Hafteigenschaften der Partikel unter anderem durch den Beschlag des Glaszylinders, was ggf. auf elektrostatische Aufladungen der Partikel hinweist.

Die Ergebnisse aus den Kleinmaßstabsversuchen sind in Abbildung 17 mit den Simulationsergebnissen für Braunkohlenstaub gegenübergestellt.



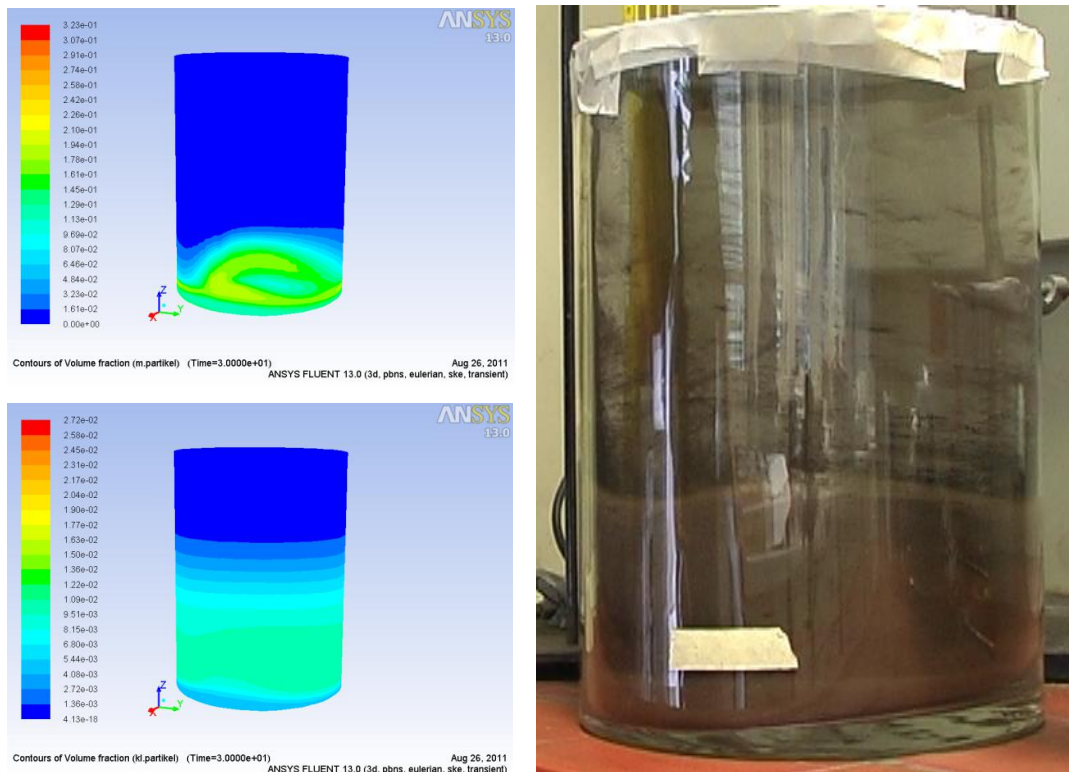


Abbildung 17: Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen für Braunkohle

Wie anhand der Staubungszahl und den im Vertikal- sowie Horizontalmischer durchgeführten Versuchen zu erwarten war, war im Kleinmaßstabsversuch bei Verwendung der Braunkohle die größte Staubwolkenentwicklung zu beobachten.

Entgegen den Simulationsergebnissen der Berechnungen mit Maisstärke und Weizenmehl, zeigte sich bei der Braunkohle eine qualitativ gute Übereinstimmung zwischen Kleinmaßstabsversuch und Simulation. Tendenziell wird auch bei der Braunkohle in der Simulation die Staubkonzentration etwas zu hoch berechnet, jedoch nicht in dem Maße, wie es bei den anderen Versuchsstäuben aufgetreten ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die grundsätzliche Schüttgutbewegung beim Weizenmehl und der Braunkohle ausreichend genau im Modell abgebildet werden kann. Bei der Maisstärke stimmen weder die berechnete Schüttgutbewegung noch die Staubkonzentrationen qualitativ mit den praktischen Versuchen überein. Die Staubkonzentrationen werden durch das Modell beim Weizenmehl stark überproportional und bei der Braunkohle überproportional berechnet.

Anhand der Beobachtungen und den Ergebnissen des Vergleichs lässt sich feststellen, dass für eine realitätsnahe Simulation der Staubentstehung in Mischern bei den Schüttgütern Weizenmehl und Maisstärke weitere Erkenntnisse der Partikeleigenschaften und darauf begründete -interaktionen notwendig sind, um eine Anpassung des Rechenmodells vorneh-

men zu können. Daran anknüpfend kann festgehalten werden, dass für die modellhafte Beschreibung des Verhaltens sehr kleiner Partikel weitere Modellverbesserungen notwendig sind. So wird insbesondere bei der Maisstärke deutlich, wie stark das Verhalten der Partikel von der Realität abweicht und interpartikuläre Kräfte im Modell nicht vernachlässigt werden können.

Basierend auf den in den Kleinmaßstabsversuchen gesammelten Erkenntnissen wurde für die Simulationsrechnungen zum Vertikalmischer im Realmaßstab nur Braunkohle als Mischgut berücksichtigt. Das erstellte Modell des Vertikalmischers entspricht in der Dimensionierung dem Versuchsmischer der amixon GmbH. Aufgrund des gewählten Füllgrades von 10 % waren das statische Werkzeug und der obere Teil des Mischwerkzeuges irrelevant für die Berechnung und wurden daher in der Modellierung nicht berücksichtigt.

Begründet auf dem hohen zeitlichen Rechenaufwand und die zur Berechnung notwendige geringe Zeitschrittweite von 0,005 s wurden insgesamt 25 s Mischzeit simuliert. Das Mischgut wurde wie zuvor beschrieben auch in der Simulation des realen Maßstabes durch die in Tabelle 10 aufgeführten Eigenschaften im Modell abgebildet.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen der Konzentrationsmessungen und den Simulationen zu gewährleisten, wurde ein Monitorpunkt im Modell an der gleichen Stelle des Messpunktes 1 im Vertikalmischer platziert.

In Abbildung 18 sind die Volumenanteile der kleinen, mittleren und großen Partikel am Ende der Berechnungszeit dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die verschiedenen Partikel innerhalb des Mischers im gleichen Bereich befinden, die maximalen Volumenanteile der einzelnen Phasen weit unterhalb des zulässigen Maximalwertes liegen und somit keine starke Entmischung vorhanden ist.

Das berechnete Verhalten des Schüttgutes stimmt grundsätzlich mit den während der Messungen gemachten Beobachtungen überein. Das Material häuft sich bedingt durch die wirkenden Radialkräfte nach außen hin auf und schiebt sich über den unteren Räumarm des Mischwerkzeuges hinweg. Hinter dem Räumarm und dem unteren Teil der Bandwendel ist zudem ein Bereich mit geringeren Konzentrationen zu erkennen. In Abbildung 18 (unten rechts) ist zu erkennen, dass sich der Bereich mit Konzentrationen zwischen  $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  und  $350 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  weit oberhalb des Schüttgutes befindet und zudem nach oben hin stark abnimmt.

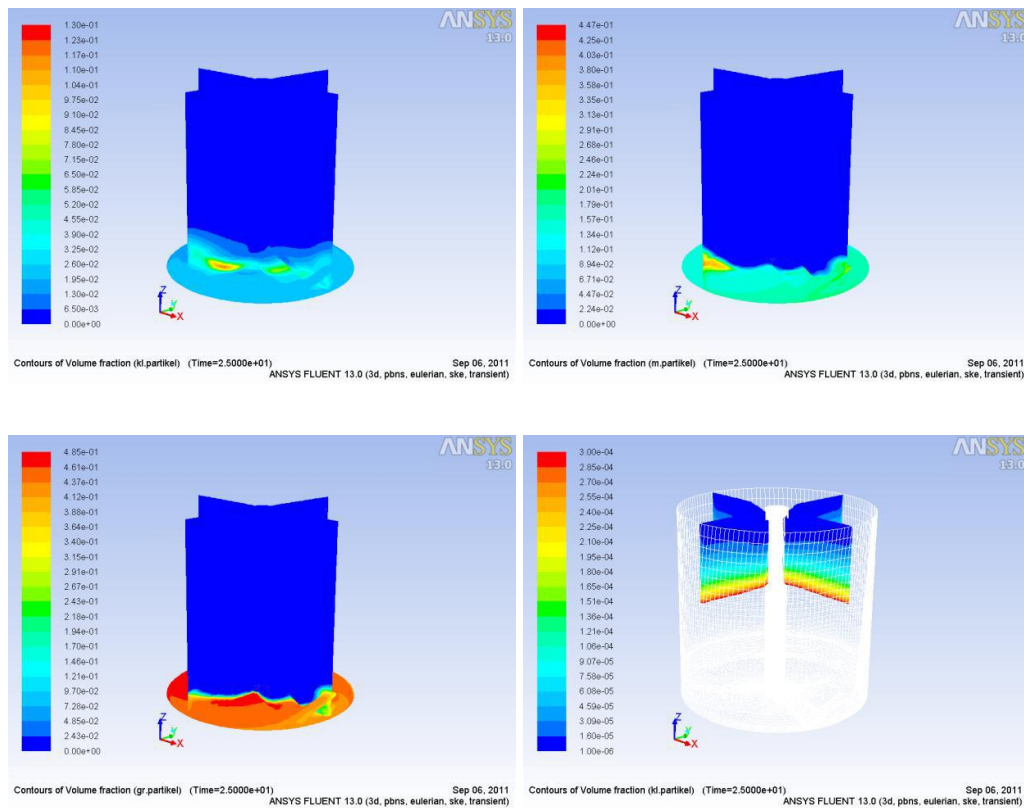


Abbildung 18: Volumenanteile der 3 Korngrößen sowie Staubkonzentration

In Abbildung 19 ist der zeitliche Verlauf der berechneten Staubkonzentration am Monitorpunkt (entsprechend Messpunkt 1) dargestellt. Die berechnete Staubkonzentration liegt ca. um das 100-fache über den gemessenen Werten.

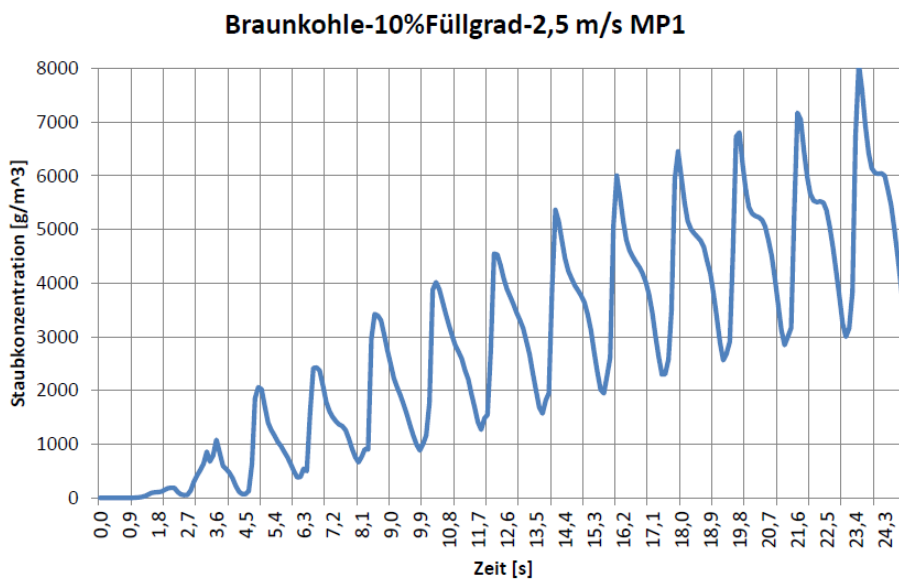


Abbildung 19: Verlauf der berechneten Staubkonzentration am Monitorpunkt [Maas, 2011]

Im abgebildeten Kurvenverlauf ist die Periodendauer für eine Umdrehung von 1,87 s anhand der konstanten Abstände zwischen lokalem Minima und Maxima zu erkennen. Weiterhin steigt die Konzentration mit fortschreitender simulierter Zeit, was sich vermutlich für größere Simulationszeiträume weiter fortsetzen würde. In diesem Aspekt ist ein ähnliches Verhalten zu den Messungen am Vertikalmischer vorhanden.

Wie bereits schon bei den Simulationen der Kleinmaßstabsversuche deutlich wurde, kann die Schüttgutbewegung hinreichend gut durch das Modell abgebildet werden. Hingegen ist eine Berechnung des Verhaltens und der Interaktion von Partikeln mit kleiner Korngröße, welche wesentlich zur Ausbildung von Staubwolken beitragen, nur unzureichend genau.

Zusammenfassend ist anhand der Berechnungsergebnisse ersichtlich, dass die Erkenntnisse über das Verhalten der verschiedenen Versuchsstäube nicht ausreichend sind, um ein zufriedenstellendes Simulationsmodell aufstellen zu können. Insbesondere sind die Interaktionen zwischen einzelnen Partikeln und die Wirkung von Anziehungs- und Abstoßungskräften auf Partikel kleiner Korngröße nicht ausreichend genau über vorhandene Modellansätze abzubilden. Da die Partikel kleiner Korngröße jedoch maßgeblich zum Staubungsverhalten eines Schüttgutes beitragen, ist eine Einschätzung des Auftretens von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen auf Grundlage der Simulationsergebnisse derzeit nicht möglich.

Für die Verbesserung des Modells müssen weitere Erkenntnisse über das Partikelverhalten, insbesondere im Bereich der Kräfte zwischen kleinen Partikeln, gewonnen sowie Modellansätze zur Charakterisierung der Stäube entwickelt werden. Für die Einteilung der Schüttgüter hinsichtlich des Staubungsverhaltens steht derzeit ausschließlich die Staubungszahl ermittelt nach [VDI 2263, 2008] zur Verfügung. Diese liefert zwar Aussagen zur grundsätzlichen Staubungsneigung eines Schüttgutes, beinhaltet jedoch keinen Bezug zu abbildbaren Materialeigenschaften, die Eingangparameter für ein Rechenmodell sein könnten. Für weiterführende Betrachtungen wäre neben der Verbesserung des verwendeten Euler/Euler-Modells durch Anpassung der geschilderten Eingangparameter auch die Verwendung der Diskreten Elemente Methode (DEM) denkbar, da in dieser numerischen Berechnungsmethode die Bewegung jedes einzelnen Partikels berücksichtigt wird und somit genauere Ergebnisse als mit dem Euler/Euler Ansatz erzielt werden können. Die Verwendung einer DEM lässt sich jedoch im Hinblick auf die zu berücksichtigende Partikelanzahl und die damit einhergehenden Anforderungen an Rechenkapazitäten in absehbarer Zeit unter wirtschaftlichen Aspekten nicht realisieren.

## 5 Projektphase 3 – Mustergefährdungsbeurteilungen

### 5.1 Regeln für die Praxis

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Anlagenbegehungen und Gefährdungsbeurteilungen sowie den gesammelten Erkenntnissen der Konzentrationsmessungen werden im Folgenden zur Orientierung bei der Bewertung von Explosionsrisiken und als Basis zur Aufstellung von Explosionsschutzkonzepten allgemein gültige Regeln für die Praxis aufgeführt.

Zur systematischen Bewertung von betrieblich vorliegenden Brand- und Explosionsrisiken wurde der im Anhang A.4 aufgeführte Leitfaden entwickelt.

Des Weiteren wird basierend auf den Forschungsergebnissen die in Anhang A.3 gelistete Überarbeitung der EX-RL Beispielsammlung (BGR 104) vorgeschlagen.

### 5.2 Erstellung von Mustergefährdungsbeurteilungen

Um die im Rahmen des vorliegenden und der zu diesem Thema vorangegangenen Forschungsvorhaben gesammelten Erkenntnisse möglichst eingängig einem größeren Kreis von Interessierten, wie Mischerherstellern und -betreibern, zugänglich zu machen, wurden die Forschungsergebnisse in Form von Musterexplosionsschutzkonzepten zusammengefasst. Hierfür galt es folgende Konzepte entsprechend den typischen Betriebsweisen, die am häufigsten in der Praxis Anwendung finden, aufzustellen:

1. Konzept auf Basis der Vermeidung von Zündquellen für Horizontalmischer
2. Konzept auf Basis der Vermeidung von Zündquellen für Vertikalmischer
3. Konzept auf Basis der Vermeidung bzw. Verringerung des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre durch Inertisierung mit Inertgas
4. Konzept auf Basis der Vermeidung bzw. Verringerung des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre durch Inertisierung mit inerten Schüttgut
5. Konzept auf Basis des konstruktiven Explosionsschutzes

Die entsprechend der vorangegangenen Aufzählung aufgestellten Explosionsschutzkonzepte sind in Form von Mustergefährdungsbeurteilungen dem Anhang A.5 zu entnehmen.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Der Nutzen der durchgeführten Forschungen zum Staubexplosionsrisiko an Mischern mit bewegten Werkzeugen liegt wesentlich in der Bereitstellung von technischen Regeln bzw. der Überarbeitung des berufsgenossenschaftlichen Regelwerkes, welches die Basis für die betriebliche Sicherheit im überwiegenden Teil der kleinen und mittleren Unternehmen ist.

Hierfür wurde im Rahmen der ersten Projektphase eine Bestandsanalyse hinsichtlich der branchenüblichen Mischverfahren unter Berücksichtigung der Eigenschaften verwendeter Mischgüter, der Verfahrenstechnik sowie der angewandten Schutzkonzepte durchgeführt. Im Rahmen der Bestandsanalyse wurden Anlagen der Baustoffindustrie, der chemischen Industrie, der Nahrungsmittel- und pharmazeutischen Industrie sowie im Kraftwerksbereich systematisch begangen und unter zu Hilfenahme des entwickelten Erhebungsbogens (siehe Anhang A.6) klassifiziert. Aufbauend auf dieser Erhebung konnten die für die Praxis typischen Mischverfahren und Schutzkonzepte ausgewertet werden. Die Auswertung zeigte, dass eine zuvor angestrebte branchenspezifische Klassifizierung hinsichtlich der sicherheitstechnischen Kennzahlen verwendeter Rohstoffe, der angewendeten Mischverfahren sowie der umgesetzten Schutzkonzepte nicht zielführend ist, da ein branchenübergreifendes Spektrum an Bauformen und Betriebsweisen für mechanische Zwangsmischer in der Praxis präsent ist. Branchenabhängig können jedoch Voraussetzungen angenommen werden, die sich nicht primär auf den Explosionsschutz beziehen, jedoch einen Einfluss auf diesen haben können. Zu nennen sind dabei beispielsweise die zwingende Vermeidung eines Fremdkörpereintrages in der Nahrungsmittel- und Pharmaindustrie aus Qualitäts- und Hygienegründen oder der Anteil nennenswerter Mengen an inerten Rohstoffen im Mischgefüge von typischen Baustoffmischungen. Daraus ableiten lassen sich jedoch auch Schutzkonzepte, die in anders gearteten Branchen Anwendung finden können aber nicht zwingend durch inhärente Prozesseigenschaften vorauszusetzen sind.

Des Weiteren haben die Erhebungen in der Praxis gezeigt, dass für den Betrieb mechanischer Zwangsmischer Schutzkonzepte, die auf konstruktiven Maßnahmen basieren, nur in Ausnahmefällen umgesetzt werden.

In der zweiten Projektphase galt es den Einfluss eines hohen Befüllgrades auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische in horizontalen sowie vertikalen Zwangsmischern durch Staubkonzentrationsmessungen zu untersuchen sowie eine Übertragbarkeit der Messergebnisse auf andere Bauformen und Baugrößen durch das Verfahren der numerischen Simulation zu erforschen.

Als Ergebnis der Konzentrationsmessungen kann festgehalten werden, dass der Füllgrad eines Zwangsmischers kein verlässliches Kriterium zur Beurteilung der Auftretenswahrscheinlichkeit von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen ist. In Abhängigkeit der Staubungsneigung der gewählten Versuchsstoffe wurden sowohl bei hohen Füllgraden von 70 % und bei niedrigen Füllgraden von 10 % respektive 25 % kritische und weniger kritische Staubkonzentrationen in den Versuchsmischern messtechnisch nachgewiesen. Zudem hat sich über die Messungen gezeigt, dass mit zunehmender Relativgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge der Einfluss der Staubungsneigung eines Schüttgutes auf die Staubkonzentrationen innerhalb von Zwangsmischern abnimmt. Darauf fußend ist festzuhalten, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen innerhalb von Zwangsmischern von stofflichen, verfahrenstechnischen sowie baulichen Randbedingungen abhängig ist. Die untere Explosionsgrenze wurde ausschließlich bei den durchgeführten Messungen am Vertikalmischer bei Umfangsgeschwindigkeiten  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und Weizenmehl als Versuchstaub mit einer sehr geringen Staubungsneigung (entsprechend Staubungsgruppe 1 nach [VDI 2263, 2008]) sicher unterschritten. Sämtliche davon abweichende Versuchskonfigurationen am Vertikal- sowie Horizontalmischer resultierten in Staubkonzentrationen, die häufig oder langfristig oberhalb der unteren Explosionsgrenze der Versuchsstäube lagen. Demnach ist in der Regel davon auszugehen, dass Mischer im Inneren ohne zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre, wie bspw. Inertisierungsmaßnahmen, in eine Zone 20 einzuteilen sind. Ausgenommen werden können hierbei ausschließlich vertikale Zwangsmischer mit Umfangsgeschwindigkeiten  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , die zur Homogenisierung von Schüttgütern der Staubungsgruppe 1 nach [VDI 2263, 2008] verwendet werden. Für diese Konfigurationen ist nur während des Befüllens und Entleerens von einem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische auszugehen, so dass eine Einteilung im Inneren in die Zone 21 erfolgen kann.

Die Forschungen zur Abbildung des Mischprozesses über das Verfahren der numerischen Simulationen haben zum Ergebnis, dass die Staubungsneigung eines Schüttgutes von einer Vielzahl von stofflichen Eigenschaften abhängt, die sich schwerlich durch ein mathematisches Modell beschreiben lassen. Allein die Eigenschaften der Korngrößenverteilung und des Schüttgewichtes eines Mischgutes sind unzureichend zur Beschreibung der Staubungsneigung. Die durchgeführten Berechnungen nach dem Euler/Euler-Ansatz lieferten im Wesentlichen unbefriedigende Ergebnisse, die sich qualitativ nur teilweise und quantitativ nicht mit den Messergebnissen deckten. Für eine Abbildung des Mischprozesses unter Berücksichtigung der Vielzahl an Partikeln mit der exakteren Diskreten Elemente Methode sind nach heutigen Standards unzureichende Hardwareressourcen vorhanden, so dass eine Simulation der Staubkonzentrationen in Mischern unter wirtschaftlichen Aspekten derzeit noch nicht praktikabel umgesetzt werden kann.

---

Im Rahmen der dritten Projektphase wurden die Forschungsergebnisse in einem Leitfaden zur Bewertung des betrieblichen Brand- und Explosionsrisikos sowie in Mustergefährdungsbeurteilungen für typische Explosionsschutzkonzepte zusammengefasst. Anhand dieser Zusammenfassung wird es insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen leichter systematisch betrieblich vorliegende Gefahren zu erkennen und dem Stand der Technik entsprechende Schutzmaßnahmen abzuleiten und umzusetzen.



## A Anhang

### A.1 Literaturverzeichnis

- [BGR 104, 2011] BGR 104, 2011, Explosionsschutz-Regeln „Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung“, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften Fachausschuss „Chemie“, Deutschland
- [Dyrba, 2009] Dyrba, 2009, Diplomarbeit, Verkleinerung des Staubkonzentrationsmessgerätes SGK 5, Fachhochschule Heidelberg, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, Mannheim, Deutschland
- [Hesener, 2007] Kleßen, Hesener, 2007, Forschungsbericht zum Projekt „Explosionsdrucktechnische Untersuchungen in Mischern mit unterschiedlichen explosionsfähigen Stäuben und einem Befüllgrad von 70 Vol.-%“, DEKRA EXAM GmbH, Bochum, Deutschland
- [Lorenz, 2011] Seithel, Chupin, Lorenz, 2011, Staubkonzentrationsmessungen in einem Horizontal-Mischer mit dem SKG5 Typ 15, Projekt Nr. G-05-0501, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Bereich Prävention, Zentrallabor, Mannheim, Deutschland
- [Maas, 2011] Maas, 2011, Diplomarbeit, Untersuchung der Staubverteilung in vertikalen Zwangsmischern, Ruhr Universität Bochum, Dekra Exam GmbH, Bochum, Deutschland
- [Pahl, 2006] Pahl, 2006, Vorlesungsskript „Mischer und deren Mischungsprinzipien“, Institut für Energie- und Verfahrenstechnik, Universität Paderborn, Deutschland
- [VDI 2263, 2008] VDI 2263 Blatt 9, 2008, Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren – Beurteilungen – Schutzmaßnahmen, Bestimmung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Deutschland

## A.2 Versuchsmatrix

Tabelle 11: Versuchsmatrix Konzentrationsmessungen am Horizontalmischer

Versuchs-Nr.	Staub	Füllgrad (%)	Umfangsgeschwindigkeit ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Messpunkt
1	Weizenmehl	25	2,3	1
2				2
3				3
4		50		1
5				2
6				3
7		70	2	
8			3	
9		25	4,6	1
10				2
11				3
12				1
13				2
14				3
15			70	2
16				3
17	Maisstärke	25	2,3	1
18				2
19				3
20		50		1
21				2
22				3
23		70	2	
24			3	
25		25	4,6	1
26				2
27				3
28				1
29				2
30				3
31			70	2
32				3
33	Braunkohle	25	2,3	1
34				2
35				3
36		50		1
37				2
38				3
39		70	2	
40			3	

Versuchs-Nr.	Staub	Füllgrad (%)	Umfangsgeschwindigkeit ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Messpunkt
41		25	4,6	1
42				2
43				3
44		50		1
45				2
46				3
47		70		2
48				3

Tabelle 12: Versuchsmatrix Konzentrationsmessungen am Vertikalmischer

Versuchs-Nr.	Staub	Füllgrad (%)	Umfangsgeschwindigkeit ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Messpunkt		
1	Weizenmehl	10	1,0	1		
2				2		
3				3		
4		56		2		
5				3		
6				4		
7		70		2		
8				3		
9				4		
10				10	2,5	1
11						2
12						3
13				56		2
14						3
15						4
16				70		2
17						3
18						4
19	Maisstärke	10	1,0	1		
20				2		
21				3		
22		56		2		
23				3		
24				4		
25		70		2		
26				3		
27				4		
28				10	2,5	1
29						2
30						3
31	56		2			

Versuchs-Nr.	Staub	Füllgrad (%)	Umfangsgeschwindigkeit ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Messpunkt		
32		70		3		
33				4		
34				2		
35				3		
36				4		
37				Braunkohle	10	1,0
38	2					
39	3					
40	56	2				
41		3				
42		4				
43	70	2				
44		3				
45		4				
46	10	2,5	1			
47			2			
48			3			
49			56		2	
50					3	
51					4	
52			70		2	
53					3	
54	4					

### A.3 Anpassungsempfehlung der EX-RL Beispielsammlung (BGR 104)

Nr.	Beispiel	Merkmale/Bemerkungen/ Voraussetzungen/Hinweise	Schutzmaßnahmen Nach TRBS 2152 Teil 2	Festlegung der Zonen zur Zündquellenvermeidung nach TRBS 2152 Teil 3	Schutzmaßnahmen nach TRBS 2152 Teil 4
3.3.5	Mischer, Trockner (z. B. mechanische Mischer bzw. Trockner, pneumatische Mischer bzw. Trockner, mit oder ohne bewegliche Einbauten)	a) Vertikalmischer: G.e.A. ist aufgrund einer geringen Staubungsneigung der Mischgüter entsprechend der Staubungsgruppe 1 und maximalen Umfangsgeschwindigkeit der beweglichen Einbauten von $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nur während des Befüllens und Entleerens vorhanden.	2.3.2	Zone 21	keine
		b) Vertikal- oder Horizontalmischer: G.e.A. tritt ständig, langfristig oder häufig auf. Das Staub/Luft-Gemisch liegt betriebsmäßig im Explosionsbereich. Vermeiden von Zündquellen ist aufgrund der Bauart z. B. keine beweglichen Einbauten gegeben.	keine	Zone 20	keine
		c) wie b) aber: Die beweglichen Einbauten können selbst bei seltenen Störungen nicht zur wirksamen Zündquelle werden. Bspw. aufgrund der Konstruktion und Bauweise, durch Verzicht von lösba- ren Schraubverbindungen im Inneren, Überwacher Spülung der Wellen- durchführungen, ggf. Temperatur- überwachung sowie regelmäßiger Wartung und Instandhaltung; der Eintrag von Zündquellen (z.B. Glimm- nester) ist sicher ausgeschlossen.	keine	Zone 20	nicht erforderlich, da Zündquellen sicher vermieden werden können

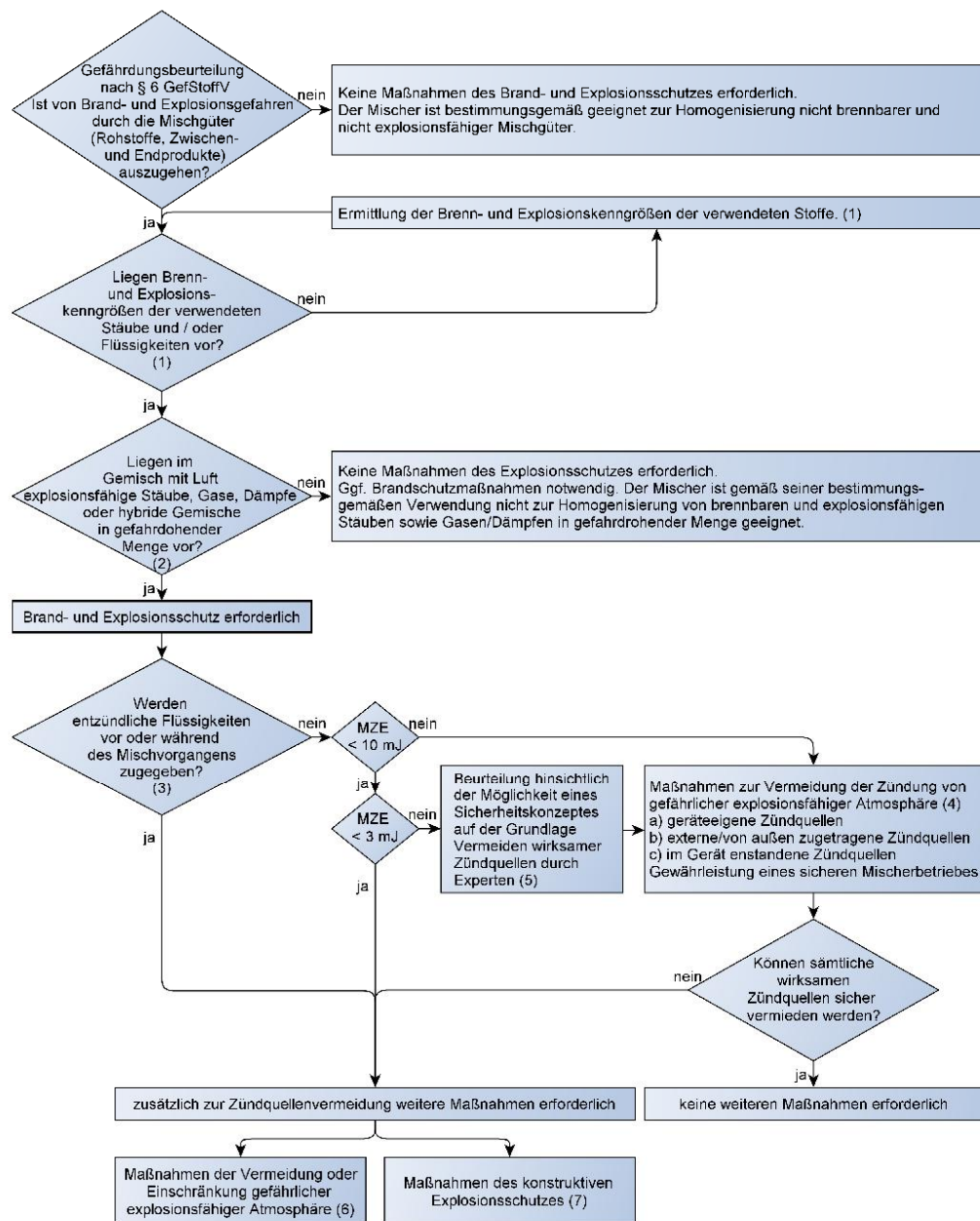
Nr.	Beispiel	Merkmale/Bemerkungen/ Voraussetzungen/Hinweise	Schutzmaßnahmen Nach TRBS 2152 Teil 2	Festlegung der Zonen zur Zündquellenvermeidung nach TRBS 2152 Teil 3	Schutzmaßnahmen nach TRBS 2152 Teil 4
		d) wie b) aber: Es sind bewegliche Einbauten vorhanden, die in Folge von Störungen zur wirksamen Zündquelle werden können oder der Eintrag von Zündquellen (z.B. Glimmnester) kann nicht sicher ausgeschlossen werden.	keine	Zone 20	erforderlich, da wirksame Zündquellen nicht sicher vermieden werden können
		e) wie d) aber: G.e.A. ist durch Inertisierung für die Prozessschritte soweit verhindert, dass keine wirksamen Zündquellen mehr vorhanden sind; es ist zu beachten, dass auch bei ausreichender Inertisierung zum Vermeiden von Staubexplosionen ein Entzünden (Glimmbrand) von abgelagertem Staub möglich sein kann.	2.3.3.3	Je nach Güte der Inertisierungs- und Überwachungsmaßnahmen sowie Maß an Zündquellenvermeidung Zone 21, Zone 22 oder keine Zone.	keine

## A.4 Leitfaden zur Bewertung von Explosionsrisiken

### Explosionsrisiken an mechanischen Zwangsmischern mit bewegten Einbauten

#### Leitfaden

Dieser Leitfaden dient zur Unterstützung von Herstellern und Betreibern bei der Durchführung von geräte- sowie betriebsspezifischen Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen mit dem Ziel, die Festlegung von notwendigen Schutzmaßnahmen zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes von mechanischen Zwangsmischern zu ermöglichen.



**(1) Ermittlung der Brenn- und Explosionskenngrößen**

Anhaltswerte zur Beurteilung des Brand- und Explosionsrisikos können orientierend aus der Stoffdatenbank GESTIS-STAUB-EX unter [www.dguv.de/ifa/de/gestis/expl](http://www.dguv.de/ifa/de/gestis/expl) herangezogen werden.

Zur Bewertung und Auslegung notwendiger Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen sind die Brenn- und Explosionskenngrößen im Versuch mittels Prüfverfahren, bspw. gemäß VDI 2263 Blatt 1, DIN EN 13821, DIN EN 14034, DIN EN 50281-2-1, DIN EN 15188, zu bestimmen.

Zur Beurteilung des Brand- und Explosionsrisikos sind folgende Stoffkenngrößen von Bedeutung:

- Staubexplosionsfähigkeit
- Mindestzündenergie (MZE)
- Mindestzündtemperatur einer Staubschicht
- Mindestzündtemperatur einer Staubwolke
- Selbstentzündungstemperatur
- Maximaler Explosionsüberdruck ( $p_{max}$ )
- Maximaler zeitlicher Druckanstieg ( $K_{St}$ -Wert)

*Die Brenn- und Explosionskenngrößen werden unter genormten Prüfbedingungen ermittelt. Der Anlagenbetreiber muss die betriebspezifischen Prozessparameter bei der Bewertung der Brenn- und Explosionskenngrößen berücksichtigen sowie mit der bestimmungsgemäßen Verwendung des Mischers abgleichen.*

**(2) Bewertung gefährdender Mengen**

Zur Beurteilung des Brand- und Explosionsrisikos sind neben den stofflichen Eigenschaften die zu erwartenden Mengen an explosionsfähiger Atmosphäre entsprechend TRBS 2152 Teil 1 zu berücksichtigen.

**(3) Zugabe brennbarer Flüssigkeiten**

Werden brennbare Flüssigkeiten mit insgesamt mehr als 0,5 Gew.-% der gesamten Rohstoffmasse im Mischer zugegeben, gewährleistet der vorbeugende Explosionsschutz als alleinige Schutzmaßnahme keinen hinreichend sicheren Anlagenbetrieb; es muss mit dem Auftreten hybrider Gemische gerechnet werden (Gemisch aus brennbarem Staub und brennbarem Gas und/oder Dampf in Luft, wobei die Konzentration einer oder mehrerer Brennstoffkomponenten unter der jeweiligen unteren Explosionsgrenze liegen kann, das Gesamtgemisch aber dennoch explosionsfähig ist).

Liegt der Gewichtsanteil brennbarer Flüssigkeiten unter 0,5 Gew.-% der gesamten Rohstoffmasse, kann das Gemisch mittels der Brenn- und Explosionskenngrößen des reinen Staub/Luft-Gemisches bewertet werden

**(4) Maßnahmen zur Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre**

Zur Umsetzung des vorbeugenden Explosionsschutzes sind grundsätzlich die in der TRBS 2152 Teil 3 oder DIN EN 1127-1 beschriebenen 13 Zündquellenarten zu beachten. Für die spezielle Anwendung von mechanischen Zwangsmischern mit bewegten Werkzeugen ist besonders auf mechanisch erzeugte Funken, heiße Oberflächen, elektrische Betriebsmittel, statische Elektrizität, exotherme Reaktionen einschließlich die Selbstentzündung von Stäuben im Rahmen der geräte- und prozessspezifischen Gefährdungsbeurteilung einzugehen.

Hierbei gilt es u.A. folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Vermeidung von mechanisch erzeugten Funken durch den Ausschluss eines Fremdkörpereintrages, bspw. über den Einsatz vorgeschalteter Siebabscheider mit einer Maschenweite kleiner als der Mindestabstand zwischen Mischerwand und bewegtem Werkzeug und den ausschließlichen Einsatz von nicht löslichen Schraub- bzw. Schweißverbindungen innerhalb des Mischers sowie durch die Verwendung geeigneter Materialpaarungen
- Vermeidung von heißen Oberflächen durch geeignete Lagerausführung, Temperaturüberwachung an Lagern und Wellendurchführungen, Einsatz von für den Betrieb in explosionsfähiger Atmosphäre geeigneten Bauteilen
- Einbindung sämtlicher leit- und ableitfähigen Bauteile in den betrieblichen Potenzialausgleich (elektrischer Widerstand gegen Erdpotenzial von  $< 10^6 \Omega$ )
- Vermeidung des Einsatzes nichtleitfähiger Beschichtungen auf leitfähigem Trägermaterial oder Durchschlagsspannung der Beschichtung  $< 4 \text{ kV}$
- Betrieb des Mischers nur im Rahmen der bestimmungsgemäßen Verwendung gemäß Herstellerdokumentation
- keine vorgeschalteten Anlagenteile, die eine Entstehung von Glimmnestern bedingen können (bspw. Trockner oder Mühlen)
- Festlegung von Reinigungsintervallen und Verantwortlichkeiten im Rahmen von Arbeitsanweisungen
- Vermeidung von Staubablagerungen in gefährdender Menge ( $< 1 \text{ mm}$  Schichtdicke) in der unmittelbaren Anlagenumgebung durch geeignete Maßnahmen, wie bspw. den regelmäßigen Einsatz von explosionsgeschützten Staubsaugern, oder die Verwendung von für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen geeigneten Geräten in der Anlagenumgebung
- Durchführung von regelmäßigen Wartungs- sowie Instandhaltungsarbeiten an den Lagern und Wellendurchführungen sowie Kontrolle der Bauteilverbindungen (Schraub- und Schweißverbindungen)
- Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten erfolgen nur bei abgeschalteter sowie entleerter Anlage nach Freigabe
- Unterweisung der Beschäftigten hinsichtlich des Verhaltens zur Gewährleistung eines sicheren Anlagenbetriebes (Entstehung und Auswirkung von Bränden und Explosionen)
- Durchführung wiederkehrender Prüfungen des ordnungsgemäßen Zustand hinsichtlich des Betriebs durch eine zugelassene Überwachungsstelle oder befähigte Person in Intervallen von höchstens 3 Jahren (gemäß § 15 BetrSichV)

**(5) Experten**

z.B. befähigte Person mit besonderer Kenntnis auf dem Gebiet des Explosionsschutzes nach TRBS 1203



**(6) Maßnahmen der Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre**  
(TRBS 2152 Teil 2)

- Vermeidung oder Mengenbegrenzung der Stoffe, die explosionsfähige Atmosphäre bilden können
- Inertisierung des Mischers
- Regelmäßige Beseitigung von Staubablagerungen im Aufstellungsbereich

*Die Maßnahmen zur Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre müssen anhand der Brenn- und Explosionskenngrößen aller verwendeten Ausgangs-, Zwischen- und Endprodukte für die vorliegenden Prozessbedingungen geplant und umgesetzt werden. Die Maßnahmen sind hinsichtlich der Wirksamkeit durch geeignete und funktionssichere Einrichtungen zu überwachen.*

**(7) Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes**

(TRBS 2152 Teil 4, DIN EN 14460, DIN EN 14491, DIN EN 14797, DIN EN 14994, DIN EN 15089)

- explosionsfeste Bauweise des Mischers für den maximalen Explosionsdruck oder den reduzierten Explosionsdruck ggf. in Kombination mit Explosionsdruckentlastung ins Freie oder Explosionsunterdrückung, und explosionstechnische Entkopplung gegenüber vor und nachgeschalteten Anlagenteilen

*Die Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes müssen anhand der Brenn- und Explosionskenngrößen aller verwendeten Ausgangs-, Zwischen- und Endprodukte für die vorliegenden Prozessbedingungen geplant und umgesetzt werden.*

## **A.5 Mustergefährdungsbeurteilungen**

A.5.1 Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen horizontalen Zwangsmischer mit normal zündempfindlichen Stäuben in der Nahrungsmittelindustrie

Mustermann AG  
Musterstraße 9  
01234 Musterhausen

**Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe  
für einen horizontalen Zwangsmischer mit normal zündempfindlichen Stäuben  
in der Nahrungsmittelindustrie**

-----

Bearbeiter:

Datum:

\_\_\_\_\_  
geprüft und freigegeben

\_\_\_\_\_  
erstellt

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 2 von 12  
Revision 0  
..2011

**Inhalt**

1 Veranlassung .....3

2 Grundlagen .....3

3 Kurzbeschreibung der Anlage .....3

4 Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe .....4

5 Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung .....5

6 Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung und Festlegung von Schutzmaßnahmen.....6

7 Zusammenfassung.....8

Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des  
Wirksamwerdens von Zündquellen.....10

## **1 Veranlassung**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Staubexplosionsrisiko an Mixern mit bewegten Werkzeugen zur Erstellung und Abgrenzung möglicher Explosionsschutzkonzepte“ gilt es, die Staubexplosionsrisiken in Mixern systematisch zu untersuchen. Ziel ist es dabei, Muster-Gefährdungsbeurteilungen für verschiedene Mischer in unterschiedlichen Branchen mit divergierenden Betriebsparametern zu erarbeiten, um Herstellern sowie Betreibern von Mixern die Erstellung von geräte- sowie betriebsspezifischen Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen zu erleichtern.

In der vorliegenden Muster-Gefährdungsbeurteilung wird beispielhaft das Staubexplosionsrisiko beim Betrieb eines horizontalen Zwangsmischers mit organischen Schüttgütern in der Nahrungsmittelindustrie betrachtet. Über die dargelegte Gefährdungsbeurteilung werden Maßnahmen aufgezeigt, die einen sicheren Betrieb mit normal zündempfindlichen Stäuben gewährleisten.

## **2 Grundlagen**

Grundlage für diese Muster-Gefährdungsbeurteilung bilden die nachfolgend aufgeführten Unterlagen und Informationen:

- Sicherheitsdatenblatt für Zucker
- Sicherheitsdatenblatt für Dextrose
- Betriebsanleitung Mischer Typ NahInd

## **3 Kurzbeschreibung der Anlage**

Bei der zu betrachtenden Anlage handelt es sich um einen horizontalen Zwangsmischer mit 3 m<sup>3</sup> Volumen, der zur Homogenisierung staubexplosionsfähiger Nahrungsmittel in Schüttgutförmigkeit dient. Die Homogenisierung der Mischgüter erfolgt innerhalb des Mischbehälters durch rotierende, auf einer Welle versetzt angeordnete Mischwerkzeuge, die in Größe, Anzahl, Anordnung, geometrischer Form und Umfangsgeschwindigkeit derart auf die Geometrie des Mischbehälters abgestimmt sind, dass sie das Mischgut in eine dreidimensionale Bewegung zwingen. Der Antrieb der Welle erfolgt über einen außen aufgesetzten Getriebemotor. Zur Vermeidung einer Agglomeration sowie zur Steigerung der Homogenisierungswirkung des Mischprozesses ist der Mischer mit 6 Messerköpfen ausgestattet, die unterhalb der Mischerwelle angeordnet sind.

Das Schüttgut wird in einem vorgeschalteten Behälter vorgelegt und verwogen. Anschließend gelangt die Schüttgutvorlage schwerkraftgestützt über ein kurzes Fallrohr und zwei auf der Oberseite angeordnete Befüllöffnungen in den Mischer. Das Befüllen erfolgt bei einer maximalen Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und abgeschalteten Messerköpfen. Der Füllgrad steht hierbei in Abhängigkeit zur Rezeptur und wird über die zentrale Rezeptursteuerung zwischen 30 % und 80 % geregelt. Ist der Befüllvorgang abgeschlossen, werden die Befüllöffnungen durch eine geeignete Absperrarmatur verriegelt, der Antrieb wird auf Nenndrehzahl entsprechend einer Relativgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  geregelt und die Messerköpfe werden zugeschaltet. Nach Ablauf der Mischzeit von maximal 5 Minuten werden die Antriebe der Messerköpfe ausgeschaltet und die Drehzahl des Mixers abgesenkt, so dass sich eine maximale Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  einstellt. Anschließend erfolgt das Entleeren über eine Entleeröffnung an der Unterseite des Mixers. Für eine bessere Zugänglichkeit zu Reinigungs- und Wartungsarbeiten besitzt der Mischer zwei Revisionsklappen, deren Verschluss über Endlagenschalter mit den Antrieben der Mischwerkswelle und der Messerköpfe verriegelt ist.

**4 Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe**

In der nachstehenden Tabelle 1 sind die sicherheitstechnischen Kennzahlen der verwendeten Schüttgüter aufgeführt.

Tabelle 1: sicherheitstechnische Kennzahlen der verwendeten Rohstoffe

brennbare Stoffe	Explosionsfähigkeit	UEG ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	MZE (mJ)	Zündtemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Glimmtemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Brennzahl
Dextrose	staubexplosionsfähig	30	360	380	450	2
Zucker	staubexplosionsfähig	60	10 ( $< 63 \mu\text{m}$ )  > 100 (Median $350 \mu\text{m}$ )	360	420	2

Anhand der beim Prozess verwendeten Rohstoffe wird deutlich, dass diese explosionsfähige Staub/Luft-Gemische bilden können. Es ist ersichtlich, dass die verwendeten Produkte auf-

grund der zur Zündung ihrer explosionsfähigen Staub/Luft-Gemische notwendigen Energien als normal zündempfindlich einzustufen sind ( $MZE \geq 10 \text{ mJ}$ ). Entzündliche, leicht- oder hochentzündliche Flüssigkeiten werden nicht verwendet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Brenn- und Explosionskenngrößen der hier gehandhabten Schüttgüter keine signifikanten Hinweise auf eine überdurchschnittliche Reaktivität und erhöhte Zündempfindlichkeit geben.

## **5 Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung**

Explosionsgefährdete Bereiche sind gemäß § 5 BetrSichV abhängig von Häufigkeit und Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen einzuteilen. Bei den eingesetzten Stoffen können explosionsfähige Staub/Luft-Gemische auftreten, für die folgende Zoneneinteilung gilt:

- **Zone 20** ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.
- **Zone 21** ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben bilden kann.
- **Zone 22** ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

Dementsprechend lassen sich die explosionsgefährdeten Bereiche der Anlage in folgende Zonen einteilen:

### Mischerinneres

Durch die betrieblich bedingte Aufwirbelung von Schüttgütern und die sich beim Mischprozess einstellende inhomogene Staubverteilung ist trotz der gemittelt betrachteten hohen Staubkonzentration im gesamten Mischervolumen partiell von einem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische auszugehen. Diese können dabei örtlich und zeitlich variierend über die gesamte Dauer des Mischvorganges vorliegen. Somit wird das Innere des Mixers in die Zone 20 eingeteilt.

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 6 von 12  
Revision 0  
..2011

#### Aufstellungsraum

Aufgrund der während Reinigungs- und Wartungsarbeiten nicht auszuschließenden Staubaustritte über die vorhandenen Revisionsöffnungen kann es zu Staubablagerungen im Aufstellungsbereich des Mixers kommen. Da diese jedoch grundsätzlich gering sind, und unmittelbar nach ihrer Entstehung durch geeignete und im Rahmen von Betriebsanweisungen festgelegte Maßnahmen entfernt werden, entfällt eine Zoneneinteilung in die Zone 22 für den Aufstellungsraum.

Da der Aufstellungsraum einen geschlossenen Boden besitzt, sind Staubverschleppungen in darunter liegende Geschosse ausgeschlossen.

### **6 Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung und Festlegung von Schutzmaßnahmen**

Gemäß Kapitel 5 ist für die Betrachtung möglicher Zündquellen im Inneren des Mixers die Zone 20 zu berücksichtigen. Daher ist für das Innere zu bewerten, ob und inwieweit im Normalbetrieb, bei üblicherweise zu erwartenden Betriebsstörungen und zusätzlich auch bei seltenen Betriebsstörungen wirksame Zündquellen auftreten können und durch welche Schutzmaßnahmen deren Wirksamkeit auf ein tolerierbares Maß reduziert werden kann.

Unter Berücksichtigung der in der DIN EN 1127-1 bzw. in der TRBS 2152 Teil 3 genannten Zündquellenarten, kommen demnach folgende wirksame Zündquellen in den Arbeitsbereichen in Betracht:

- heiße Oberflächen
- mechanisch erzeugte Funken
- elektrische Anlagen
- statische Elektrizität
- Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben

Das hierfür zugrunde liegende Explosionsschutzkonzept basiert auf Maßnahmen zur Vermeidung von explosionsfähiger Atmosphäre in Verbindung mit Maßnahmen zur Vermeidung von wirksamen Zündquellen. Die getroffenen Schutzmaßnahmen unterteilen sich dabei in technische und organisatorische Maßnahmen, die im Folgenden näher beschrieben werden.



**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 7 von 12  
Revision 0  
..2011

Zur Vermeidung des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre im Bereich des Mischeraufstellungsraumes werden mögliche Staubablagerungen umgehend durch Absaugen über einen für den Betrieb in staubexplosionsgefährdeten Bereichen geeigneten mobilen Staubsauger (Kennzeichnung II 3D) beseitigt. Die Einhaltung der Reinigungsmaßnahmen wird im Rahmen eines organisatorisch festgeschriebenen Reinigungsplanes geregelt und protokolliert.

Da die dem Mischer vorgeschalteten Apparate bestimmungsgemäß zur Handhabung der vorliegenden Stäube geeignet sind und keine Verfahrensschritte, die zu gefährlichen Temperaturerhöhungen innerhalb des Schüttgutes führen könnten, vor dem Mischprozess stattfinden, kann ein Eintrag von Glimmnestern in den Mischer ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Inbetriebnahme hat sich zudem gezeigt, dass keine nennenswerte Erwärmung des Mischgutes innerhalb der Mischzeit stattfindet.

Die Rohstoffe werden grundsätzlich nach den Qualitätsanforderungen vorgeseibt. Hierfür ist dem Mischer eine Siebanlage vorgeschaltet. Die Maschenweite des Schwingsiebes beträgt 6 mm. Aufgrund der Rohstoffvorsiebung und des Minimalabstandes von 8 mm zwischen bewegten Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter, ist ein Eintrag von Fremdkörpern, die zur Zündquelle werden könnten, auszuschließen. Im Inneren des Mixers befinden sich keine Schraubverbindungen, so dass das Lösen und Anschlagen von Schrauben und Muttern ausgeschlossen werden kann.

Das Auftreten zündwirksamer mechanisch erzeugter Funken infolge des Anlaufens oder Anschlagens der Mischwerkzeuge wird durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung vermieden. Des Weiteren kommen geeignete Materialpaarungen, wie bspw. Edelstahl-Edelstahl, zum Einsatz, die bei Eintritt von einzelnen Schlägen nicht zur Funkenbildung neigen.

Reibungsbedingte heiße Oberflächen an den Lagern und Wellendurchführungen des Mischwerkzeuges und der Messerköpfe werden durch Temperaturüberwachung vermieden. Zur Vermeidung eines Staubeintrittes sind die Dichtungen luftgespült. Die Luftspülung ist durchflussüberwacht. Die Temperatur- und Durchflussüberwachung sind hartverdrahtet und schalten sämtliche Antriebe bei Überschreitung einer Temperatur von 240 °C respektive bei Unterschreitung des Mindestvolumenstromes von  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  spannungsfrei.

Die im Mischer eingesetzten elektrischen Betriebsmittel weisen eine maximale Oberflächentemperatur von 240 °C auf und sind für den Betrieb in Zone 20 geeignet. Bezüglich der Aus-

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 8 von 12  
Revision 0  
..2011

wahl und Errichtung der elektrischen Betriebsmittel wurden die Vorgaben der DIN EN 60079-14 beachtet.

Zur Vermeidung von gefährlichen Aufladungen sind sämtliche leit- und ableitfähigen Anlagenteile in den betrieblichen Potenzialausgleich eingebunden und weisen einen Ableitwiderstand von  $< 10^6 \Omega$  auf. Isolierende Beschichtungen mit einer Durchschlagsspannung  $> 4 \text{ kV}$  werden nicht verwendet. Die infolge des Mischguthandlings zu erwartenden Büschelentladungen sind für Stäube nicht zündwirksam.

Zur Vermeidung eines Lager- oder Dichtungsschadens erfolgen eine Verschleißprüfung sowie die Wartung des Mixers entsprechend den Herstellervorgaben in Intervallen von höchstens 8 Wochen je nach Anlagenauslastung. Hierbei werden die Lagerschmierung sowie der Mindestabstand zwischen dem Mischbehälter und den einzelnen Mischwerkzeugen kontrolliert.

Halbjährlich werden die Funktionsfähigkeit und das Ansprechverhalten der MSR-Einrichtungen mit Sicherheitsfunktion, wie die Temperaturüberwachung, die Verriegelung der Revisionsklappe sowie die Spülluftüberwachung, geprüft. Festgeschrieben und protokolliert werden die Wartungen im Rahmen des betriebseigenen Wartungsplans.

Nach dem Austausch einer Dichtung wird der Mischer grundsätzlich zunächst ohne Mischgut betrieben und die Temperaturentwicklung im Bereich der neuen Dichtung sowie die technische Dichtheit des Mixers hinsichtlich der normalen Betriebsparameter überprüft.

Zur Verhinderung von wirksamen Zündquellen ist für die Durchführung von Heißenarbeiten, wie bspw. der Einsatz von Winkelschleifern oder Schweißgeräten, eine schriftliche Arbeitsfreigabe erforderlich. Heißenarbeiten werden im Bereich des Mixers grundsätzlich erst nach Beseitigung sämtlicher Staubablagerungen und nur mit einer Brandsicherheitswache durchgeführt. Die organisatorische Regelung zur Durchführung von Heißenarbeiten ist in einer Betriebsanweisung dargelegt.

Eine tabellarische Zusammenfassung der Gefährdungsanalyse und der entsprechend angewandten technischen sowie organisatorischen Schutzmaßnahmen ist im Anhang 1 in Tabelle 2 aufgeführt.

## **7 Zusammenfassung**

Das auf Basis der vorliegenden Gefährdungsbeurteilung umgesetzte Explosionsschutzkonzept ist im betrieblichen Explosionsschutzdokument nach § 6 BetrSichV beschrieben.

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 9 von 12  
Revision 0  
..2011

Die Prüfung vor Inbetriebnahme nach § 14 (1) sowie Anhang 4 A Nr. 3.8 BetrSichV wurde durch eine befähigte Person mit besonderer Kenntnis auf dem Gebiet des Explosionsschutzes gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS 1201 mit dem Teil 1 durchgeführt.

Die Wirksamkeit der Explosionsschutzmaßnahmen wird im Rahmen der ermittelten Prüfrist von 3 Jahren durch eine befähigte Person gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS 1201 mit dem Teil 1 überprüft. Die Prüfergebnisse werden in Form von Prüfaufzeichnungen dokumentiert.

Musterhausen, den ....

Bearbeiter

**Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen**

Tabelle 2: Zündgefahren und Schutzmaßnahmen

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen						
	Potentielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Eingeleitete Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen	Notwendige Einschränkungen
1.	Heiße Oberfläche	Lagerschaden			x		Infolge von seltenen Störungen, wie vorzeitiger Verschluss oder Materialfehlern, kann ein Lagerschaden auftreten. Daraus können unzulässig hohe Temperaturen am Lager resultieren, was infolge von Wärmeleitung auch im Mischentmieren zu gefährlichen Zuständen führen kann.	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen				x		T≤240 °C
2.	Heiße Oberflächen, mechanisch erzeugte Funken	Erwärmung oder Funkengarben durch Reibung zwischen den Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter		x			Unzulässige Erwärmung oder Funkengarben durch Reibung zwischen den Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter	Regelmäßige Wartung und Verschleißprüfung sowie Kontrolle des Mindestabstandes zwischen Mischwerk und Mischbehälter sowie Vermeidung des Fremdkörpereintrages durch Rohstoffisobung. Keine Schraubverbindungen im Innern.			x			T≤240 °C

Seite 11 von 12  
Revision 0  
..2011

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen				
	Potenzielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen	Notwendige Einschränkungen
3.	Heiße Oberflächen	Erwärmung an den Wellenabdichtungen		x			Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen				x	T≤240 °C
4.	Heiße Oberfläche	Überlastung von Betriebsmitteln mit Kontakt zu Zone 20				x	Gründe für die Bewertung	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.			x	T≤240 °C
5.	Heißarbeiten, Instandsetzung	Durchführung von Heißarbeiten oder Instandsetzungen				x	Unzulässige Erwärmung hervorgerufen durch Staubemittler oder schadhaft oder falsch montierte Dichtungen.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.			x	-
6.	Elektrostatische Entladungen	Isolierte elektrisch leitende Anlagenteile	x				Isoliert gelagerte leitfähige Anlagenteile können gefährlich hoch aufgeladen werden. Funkenentladungen sind nicht auszuschließen.	Einrichtung von Potenzialausgleichs- und Erdungsmaßnahmen sowie Einbindung aller leitfähigen Anlagenteile.			x	-

Seite 12 von 12  
Revision 0  
..2011

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen					
	Potenzielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen
7.	Elektrostatische Entladungen	Nicht leitfähige Anlagenteile, isolierende Beschichtungen				x	Nicht leitfähige oder mit isolierenden Beschichtungen versehene leitfähige Anlagenteile werden nicht verwendet. Zündwirksame Gleitstößelschalenentladungen können daher nicht auftreten.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.				x	-
8.	Exotherme Reaktionen, Selbstzündung	Unzulässig hohe Erwärmung des Schüttgutes			x		Keine vorgeschalteten Prozesse, die zu gefährlichen Temperaturerhöhungen des Schüttgutes führen könnten.	Maßnahmen zur Vermeidung unzulässiger Erwärmungen gemäß Punkt 1., 2., 3. und 4.				x	T≤240 °C

A.5.2 Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen vertikalen Zwangsmischer mit normal zündempfindlichen Stäuben in der Nahrungsmittelindustrie

Mustermann AG  
Musterstraße 9  
01234 Musterhausen

**Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe  
für einen vertikalen Zwangsmischer mit normal zündempfindlichen Stäuben  
in der Nahrungsmittelindustrie**

-----

Bearbeiter:

Datum:

\_\_\_\_\_  
geprüft und freigegeben

\_\_\_\_\_  
erstellt

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Vertikaler Zwangsmischer**

Seite 2 von 12  
Revision 0  
..2011

### **Inhalt**

1	Veranlassung .....	3
2	Grundlagen .....	3
3	Kurzbeschreibung der Anlage .....	3
4	Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe .....	4
5	Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung .....	5
6	Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung und Festlegung von Schutzmaßnahmen.....	6
7	Zusammenfassung.....	8
Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen.....		10



## **1 Veranlassung**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Staubexplosionsrisiko an Mixchern mit bewegten Werkzeugen zur Erstellung und Abgrenzung möglicher Explosionsschutzkonzepte“ gilt es, die Staubexplosionsrisiken in Mixchern systematisch zu untersuchen. Ziel ist es dabei, Muster-Gefährdungsbeurteilungen für verschiedene Mischer in unterschiedlichen Branchen mit divergierenden Betriebsparametern zu erarbeiten, um Herstellern sowie Betreibern von Mixchern die Erstellung von geräte- sowie betriebsspezifischen Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen zu erleichtern.

In der vorliegenden Muster-Gefährdungsbeurteilung wird beispielhaft das Staubexplosionsrisiko beim Betrieb eines vertikalen Zwangsmischers mit organischen Schüttgütern in der Nahrungsmittelindustrie betrachtet. Über die dargelegte Gefährdungsbeurteilung werden Maßnahmen aufgezeigt, die einen sicheren Betrieb mit normal zündempfindlichen Stäuben gewährleisten.

## **2 Grundlagen**

Grundlage für diese Muster-Gefährdungsbeurteilung bilden die nachfolgend aufgeführten Unterlagen und Informationen:

- Sicherheitsdatenblatt für Weizenmehl Typ A
- Sicherheitsdatenblatt für Reismehl Typ AA
- Betriebsanleitung Mischer Typ VertNahInd

## **3 Kurzbeschreibung der Anlage**

Bei der zu betrachtenden Anlage handelt es sich um einen vertikalen Zwangsmischer mit 3 m<sup>3</sup> Volumen, der zur Homogenisierung staubexplosionsfähiger Nahrungsmittel in Schüttgutforn dient. Die Homogenisierung der Mischgüter erfolgt innerhalb des Mischbehälters durch ein rotierendes Bandwendelmischwerkzeug, welches in Größe, Anordnung, geometrischer Form und Umfangsgeschwindigkeit derart auf die Geometrie des Mischbehälters abgestimmt ist, dass es das Mischgut in eine dreidimensionale Bewegung zwingt. Der Antrieb der Welle erfolgt über einen außen aufgesetzten Motor. Die Lagerung der Welle erfolgt über das Getriebelager oberhalb der Kopfplatte des Mischers. Die Wellenabdichtung erfolgt über eine luftgespülte Lippendichtung.

Das Schüttgut wird in einem vorgeschalteten Behälter vorgelegt und verwogen. Anschließend gelangt die Schüttgutvorlage schwerkraftgestützt über ein kurzes Fallrohr und zwei auf der Oberseite angeordnete Befüllöffnungen in den Mischer. Das Befüllen erfolgt bei einer maximalen Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Der Füllgrad steht hierbei in Abhängigkeit zur Rezeptur und wird über die zentrale Rezeptursteuerung zwischen 20 % und 80 % geregelt. Ist der Befüllvorgang abgeschlossen, werden die Befüllöffnungen durch eine geeignete Absperrarmatur verriegelt. Die maximale Umfangsgeschwindigkeit des Bandwendelmischwerkzeuges beträgt  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nach Ablauf der Mischzeit von maximal 5 Minuten erfolgt das Entleeren über eine Entleeröffnung in der Bodenplatte des Mixers. Für eine bessere Zugänglichkeit zu Reinigungs- und Wartungsarbeiten besitzt der Mischer eine Revisionsklappe, deren Verschluss über Endlagenschalter mit dem Antrieb der Mischwerkswelle verriegelt ist.

#### 4 Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe

In der nachstehenden Tabelle 1 sind die sicherheitstechnischen Kennzahlen der verwendeten Schüttgüter aufgeführt.

Tabelle 1: sicherheitstechnische Kennzahlen der verwendeten Rohstoffe

brennbare Stoffe	Explosionsfähigkeit	Staubungszahl	UEG	MZE	Zündtemperatur	Glimmtemperatur	Brennzahl
			( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	(mJ)	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $^{\circ}\text{C}$ )	
Weizenmehl A	staubexplosionfähig	0,6	30	360	460	450	2
Reismehl AA	staubexplosionfähig	0,3	60	25	380	480	2

Anhand der beim Prozess verwendeten Rohstoffe wird deutlich, dass diese explosionsfähige Staub/Luft-Gemische bilden können. Aufgrund der geringen Staubungszahlen der gehandhabten Stäube (VDI 2263 Blatt 9) kann davon ausgegangen werden, dass deren Neigung zur Staubwolkenbildung gering ist. Es ist weiterhin ersichtlich, dass die verwendeten Produkte aufgrund der zur Zündung ihrer explosionsfähigen Staub/Luft-Gemische notwendigen Energien als normal zündempfindlich einzustufen sind ( $\text{MZE} \geq 10 \text{ mJ}$ ). Entzündliche, leicht- oder hochentzündliche Flüssigkeiten werden nicht verwendet.

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Vertikaler Zwangsmischer**

Seite 5 von 12  
Revision 0  
..2011

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Brenn- und Explosionskenngrößen der hier gehandhabten Schüttgüter keine signifikanten Hinweise auf eine überdurchschnittliche Reaktivität und erhöhte Zündempfindlichkeit geben.

## 5 Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung

Explosionsgefährdete Bereiche sind gemäß § 5 BetrSichV abhängig von Häufigkeit und Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen einzuteilen. Bei den eingesetzten Stoffen können explosionsfähige Staub/Luft-Gemische auftreten, für die folgende Zoneneinteilung gilt:

- **Zone 20** ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.
- **Zone 21** ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben bilden kann.
- **Zone 22** ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

Dementsprechend lassen sich die explosionsgefährdeten Bereiche der Anlage in folgende Zonen einteilen:

### Mischerinneres

Durch die betrieblich bedingte Aufwirbelung von Schüttgütern ist im gesamten Mischervolumen partiell von einem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische auszugehen. Diese können dabei örtlich und zeitlich variierend auftreten. Da die Stäube eine geringe Staubungsneigung (Staubungsgruppe 1 nach VDI 2263 Blatt 9) aufweisen und der Mischer mit maximalen Relativgeschwindigkeiten von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  betrieben wird, ist gelegentlich mit dem Auftreten von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen während des Befüll- und Mischvorganges zu rechnen. Somit wird das Innere des Mixers in die Zone 21 eingeteilt.

### Aufstellungsraum

Aufgrund der während Reinigungs- und Wartungsarbeiten nicht auszuschließenden Staubaustritte über die vorhandenen Revisionsöffnungen kann es zu Staablagerungen im

Aufstellungsbereich des Mixers kommen. Da diese jedoch grundsätzlich gering sind, und unmittelbar nach ihrer Entstehung durch geeignete und im Rahmen von Betriebsanweisungen festgelegte Maßnahmen entfernt werden, entfällt eine Zoneneinteilung in die Zone 22 für den Aufstellungsraum.

Da der Aufstellungsraum einen geschlossenen Boden besitzt, sind Staubverschleppungen in darunter liegende Geschosse ausgeschlossen.

## **6 Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung und Festlegung von Schutzmaßnahmen**

Gemäß Kapitel 5 ist für die Betrachtung möglicher Zündquellen im Inneren des Mixers die Zone 21 zu berücksichtigen. Daher ist für das Innere zu bewerten, ob und inwieweit im Normalbetrieb und bei üblicherweise zu erwartenden Betriebsstörungen wirksame Zündquellen auftreten können und durch welche Schutzmaßnahmen deren Wirksamkeit auf ein tolerierbares Maß reduziert werden kann.

Unter Berücksichtigung der in der DIN EN 1127-1 bzw. in der TRBS 2152 Teil 3 genannten Zündquellenarten, kommen demnach folgende wirksame Zündquellen in den Arbeitsbereichen in Betracht:

- heiße Oberflächen
- mechanisch erzeugte Funken
- elektrische Anlagen
- statische Elektrizität
- Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben

Das hierfür zugrunde liegende Explosionsschutzkonzept basiert auf Maßnahmen zur Vermeidung von explosionsfähiger Atmosphäre in Verbindung mit Maßnahmen zur Vermeidung von wirksamen Zündquellen. Die getroffenen Schutzmaßnahmen unterteilen sich dabei in technische und organisatorische Maßnahmen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Zur Vermeidung des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre im Bereich des Mischeraufstellungsraumes werden mögliche Staubablagerungen umgehend durch Absaugen über einen für den Betrieb in staubexplosionsgefährdeten Bereichen geeigneten mobilen Staubsauger (Kennzeichnung II 3D) beseitigt. Die Einhaltung der Reinigungsmaßnahmen

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Vertikaler Zwangsmischer**

Seite 7 von 12  
Revision 0  
..2011

wird im Rahmen eines organisatorisch festgeschriebenen Reinigungsplanes geregelt und protokolliert.

Da die dem Mischer vorgeschalteten Apparate bestimmungsgemäß zur Handhabung der vorliegenden Stäube geeignet sind und keine Verfahrensschritte, die zu gefährlichen Temperaturerhöhungen innerhalb des Schüttgutes führen könnten, vor dem Mischprozess stattfinden, kann ein Eintrag von Glimmnestern in den Mischer ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Inbetriebnahme hat sich zudem gezeigt, dass keine nennenswerte Erwärmung des Mischgutes innerhalb der Mischzeit stattfindet.

Die Rohstoffe werden grundsätzlich nach den Qualitätsanforderungen vorgeseibt. Hierfür ist dem Mischer eine Siebanlage vorgeschaltet. Die Maschenweite des Schwingsiebes beträgt 6 mm. Aufgrund der Rohstoffvorsiebung und des Minimalabstandes von 8 mm zwischen bewegten Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter, ist ein Eintrag von Fremdkörpern, die zur Zündquelle werden könnten, auszuschließen.

Die Schraubverbindungen im Inneren des Mixers sind gegen unbeabsichtigtes Lösen gesichert, so dass das Lösen und Anschlagen von Schrauben und Muttern für zu erwartende Fehlerzustände ausgeschlossen werden kann.

Das Auftreten zündwirksamer mechanisch erzeugter Funken infolge des Anlaufens oder Anschlagens des Mischwerkzeuges wird durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung vermieden. Des Weiteren kommen geeignete Materialpaarungen, wie bspw. Edelstahl-Edelstahl, zum Einsatz, die bei Eintritt von einzelnen Schlägen nicht zur Funkenbildung neigen.

Reibungsbedingte heiße Oberflächen am Lager und der Wellendurchführung werden durch regelmäßige Wartung entsprechend den Herstellervorgaben und durch die Luftspülung der Lippendichtung mit Überwachung des Volumenstromes vermieden. Die Durchflussüberwachung ist hartverdrahtet und schaltet den Antrieb bei Unterschreitung des Mindestvolumenstromes von  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  spannungsfrei.

Die im Mischer eingesetzten elektrischen Betriebsmittel weisen eine maximale Oberflächentemperatur von  $240 \text{ }^\circ\text{C}$  auf und sind für den Betrieb in Zone 21 geeignet. Bezüglich der Auswahl und Errichtung der elektrischen Betriebsmittel wurden die Vorgaben der DIN EN 60079-14 beachtet.

Zur Vermeidung von gefährlichen Aufladungen sind sämtliche leit- und ableitfähigen Anlagenteile in den betrieblichen Potenzialausgleich eingebunden und weisen einen Ableitwiderstand von  $< 10^6 \text{ } \Omega$  auf. Isolierende Beschichtungen mit einer Durchschlagsspannung  $> 4 \text{ kV}$

werden nicht verwendet. Die infolge des Mischguthandlings zu erwartenden Büschelentladungen sind für Stäube nicht zündwirksam.

Zur Vermeidung eines Lager- oder Dichtungsschadens erfolgen eine Verschleißprüfung sowie die Wartung des Mixers entsprechend den Herstellervorgaben in Intervallen von höchstens 8 Wochen je nach Anlagenauslastung. Hierbei werden die Lagerschmierung sowie der Mindestabstand zwischen dem Mischbehälter und dem Mischwerkzeug kontrolliert.

Halbjährlich werden die Funktionsfähigkeit und das Ansprechverhalten der MSR-Einrichtungen mit Sicherheitsfunktion, wie die Verriegelung der Revisionsklappe sowie die Spülluftüberwachung, geprüft. Festgeschrieben und protokolliert werden die Wartungen im Rahmen des betriebseigenen Wartungsplans.

Nach dem Austausch einer Dichtung wird der Mischer grundsätzlich zunächst ohne Mischgut betrieben und die Temperaturentwicklung im Bereich der neuen Dichtung sowie die technische Dichtheit des Mixers hinsichtlich der normalen Betriebsparameter überprüft.

Zur Verhinderung von wirksamen Zündquellen ist für die Durchführung von Heißenarbeiten, wie bspw. der Einsatz von Winkelschleifern oder Schweißgeräten, eine schriftliche Arbeitsfreigabe erforderlich. Heißenarbeiten werden im Bereich des Mixers grundsätzlich erst nach Beseitigung sämtlicher Staubablagerungen und nur mit einer Brandsicherheitswache durchgeführt. Die organisatorische Regelung zur Durchführung von Heißenarbeiten ist in einer Betriebsanweisung dargelegt.

Eine tabellarische Zusammenfassung der Gefährdungsanalyse und der entsprechend angewandten technischen sowie organisatorischen Schutzmaßnahmen ist im Anhang 1 in Tabelle 2 aufgeführt.

## **7 Zusammenfassung**

Das auf Basis der vorliegenden Gefährdungsbeurteilung umgesetzte Explosionsschutzkonzept ist im betrieblichen Explosionsschutzdokument nach § 6 BetrSichV beschrieben.

Die Prüfung vor Inbetriebnahme nach § 14 (1) sowie Anhang 4 A Nr. 3.8 BetrSichV wurde durch eine befähigte Person mit besonderer Kenntnis auf dem Gebiet des Explosionsschutzes gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS 1201 mit dem Teil 1 durchgeführt.

Die Wirksamkeit der Explosionsschutzmaßnahmen wird im Rahmen der ermittelten Prüffrist von 3 Jahren durch eine befähigte Person gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Vertikaler Zwangsmischer**

Seite 9 von 12  
Revision 0  
..2011

1201 mit dem Teil 1 überprüft. Die Prüfergebnisse werden in Form von Prüfaufzeichnungen dokumentiert.

Musterhausen, den ....

Bearbeiter

Seite 10 von 12  
Revision 0  
..2011

Mustermann AG  
Muster-Gefährdungsbeurteilung  
Vertikaler Zwangsmischer

**Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen**

Tabelle 2: Zündgefahren und Schutzmaßnahmen

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen						
	Potentielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen	Notwendige Einschränkungen
1.	Heiße Oberfläche	Lagerschaden			x		Gründe für die Bewertung Infolge von selteneren Störungen, wie vorzeitiger Verschleiß oder Materialfehlern, kann ein Lagerschaden auftreten. Daraus können unzulässig hohe Temperaturen am Lager resultieren, was infolge von Wärmeleitung auch im Mischentmischung zu gefährlichen Zuständen führen kann.	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen Regelmäßige Wartung und Verschleißprüfung entsprechend den Herstellerangaben.			x			T≤240 °C
2.	Heiße Oberflächen, mechanisch erzeugte Funken	Erwärmung oder Funkengarben durch Reibung zwischen den Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter			x		Aufgrund der Relativgeschwindigkeiten der Mischwerkzeuge < 1 m·s <sup>-1</sup> ist die Entstehung von zündwirksamen Schweißfunken nicht zu unterstellen. Zündwirksame Schweißfunken können beim Anschlagen des Mischwerkzeuges oder beim Eintrag großer Fremdkörper im seltenen Fehlerfall auftreten.	Regelmäßige Wartung und Verschleißprüfung sowie Kontrolle des Mindestabstandes zwischen Mischwerk und Mischbehälter sowie aller Schraubverbindungen im Inneren. Vermeidung des Fremdkörpereintrages durch Rohstoffsiebung.			x			-



**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Vertikaler Zwangsmischer**

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen				
	Potenzielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen	Notwendige Einschränkungen
3.	Heiße Oberfläche	Erwärmung durch Reibung an der Wellenabstützung		x			Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen		x			T≤240 °C
4.	Heiße Oberfläche	Überlastung von Betriebsmitteln mit Kontakt zu Zone 21			x		Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.		x			T≤240 °C
5.	Heißarbeiten, Instandsetzung	Durchführung von Heißarbeiten oder Instandsetzungen				x	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.				x	-
6.	Elektrostatische Entladungen	Isolierte elektrisch leitende Anlagenteile	x				Einrichtung von Potenzialausgleichs- und Erdungsmaßnahmen sowie Einbindung aller leitfähigen Anlagenteile.				x	-

Seite 12 von 12  
Revision 0  
..2011

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Vertikaler Zwangsmischer**

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen					
	Potenzielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen
7.	Elektrostatische Entladungen	Nicht leitfähige Anlagenteile, isolierende Beschichtungen				x	Nicht leitfähige oder mit isolierenden Beschichtungen versehene leitfähige Anlagenteile werden nicht verwendet. Zündwirksame Gleitstößelscheitelladungen können daher nicht auftreten.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.				x	-
8.	Exotherme Reaktionen, Selbstzündung	Unzulässig hohe Erwärmung des Schüttgutes			x		Keine vorgeschalteten Prozesse, die zu gefährlichen Temperaturerhöhen des Schüttgutes führen könnten.	Maßnahmen zur Vermeidung unzulässiger Erwärmungen gemäß Punkt 1., 2., 3. und 4.				x	T≤240 °C

A.5.3 Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen horizontalen Zwangsmischer mit extrem zündempfindlichen Stäuben in der Pharmaindustrie

Mustermann AG  
Musterstraße 9  
01234 Musterhausen

**Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe  
für einen horizontalen Zwangsmischer mit extrem zündempfindlichen Stäuben  
in der Pharmaindustrie**

-----

Bearbeiter:

Datum:

\_\_\_\_\_  
geprüft und freigegeben

\_\_\_\_\_  
erstellt

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 2 von 13  
Revision 0  
..2011

**Inhalt**

1	Veranlassung .....	3
2	Grundlagen .....	3
3	Kurzbeschreibung der Anlage .....	3
4	Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe .....	4
5	Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung .....	5
6	Zündgefahrenanalyse und Schutzmaßnahmen .....	6
7	Zusammenfassung.....	9
Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen.....		11

## **1 Veranlassung**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Staubexplosionsrisiko an Mixchern mit bewegten Werkzeugen zur Erstellung und Abgrenzung möglicher Explosionsschutzkonzepte“ gilt es die Staubexplosionsrisiken in Mixchern systematisch zu untersuchen. Ziel ist es dabei, Muster-Gefährdungsbeurteilungen für verschiedene Mischer in unterschiedlichen Branchen mit divergierenden Betriebsparametern zu erarbeiten, um Herstellern sowie Betreibern von Mixchern die Erstellung von geräte- sowie betriebsspezifischen Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen zu erleichtern.

In der vorliegenden Muster-Gefährdungsbeurteilung wird beispielhaft das Staubexplosionsrisiko beim Betrieb eines horizontalen Zwangsmischers mit pharmazeutischen Wirkstoffen in der Pharmaindustrie betrachtet. Über die dargelegte Gefährdungsbeurteilung werden Maßnahmen aufgezeigt, die einen sicheren Betrieb mit extrem zündempfindlichen Stäuben gewährleisten.

## **2 Grundlagen**

Grundlage für diese Muster-Gefährdungsbeurteilung bilden die nachfolgend aufgeführten Unterlagen und Informationen:

- Sicherheitsdatenblatt für Phytopharmakum A
- Sicherheitsdatenblatt für Synthetikum B
- Sicherheitsdatenblatt Trägermaterial C
- Betriebsanleitung Mischer Typ Pharma

## **3 Kurzbeschreibung der Anlage**

Bei der zu betrachtenden Anlage handelt es sich um einen horizontalen Zwangsmischer mit 0,5 m<sup>3</sup> Volumen, der zur Homogenisierung staubexplosionsfähiger Pharmawirkstoffe in Schüttgutform dient. Die Homogenisierung der Mischgüter erfolgt innerhalb des Mischbehälters durch rotierende, auf einer Welle versetzt angeordnete Mischwerkzeuge, die in Größe, Anzahl, Anordnung, geometrischer Form und Umfangsgeschwindigkeit derart auf die Geometrie des Mischbehälters abgestimmt sind, dass sie das Mischgut in eine dreidimensionale Bewegung zwingen. Der Antrieb der Welle erfolgt über einen außen aufgesetzten Getriebemotor.

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 4 von 13  
 Revision 0  
 ..2011

Das aus Qualitätsgründen gesiebte Schüttgut wird in einen mit Stickstoff durchspülten Behälter vorgelegt und verwogen. Anschließend gelangt die Schüttgutvorlage schwerkraftgestützt über ein kurzes Fallrohr und eine auf der Oberseite angeordnete Befüllöffnung in den Mischer. Das Befüllen erfolgt bei einer maximalen Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Der Füllgrad steht hierbei in Abhängigkeit zur Rezeptur und wird über die zentrale Rezeptursteuerung zwischen 10 % und 80 % geregelt. Ist der Befüllvorgang abgeschlossen, wird die Befüllöffnung durch eine pneumatisch betriebene Absperrklappe verschlossen und das Innere des Mischbehälters durch Spülen mit Stickstoff inertisiert. Die notwendige Spülzeit und der Stickstoffvolumenstrom werden überwacht. Nach erfolgter Spülung wird die Antriebsdrehzahl auf den Nennwert entsprechend einer Relativgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  geregelt.

Nach Ablauf der Mischzeit wird die Drehzahl des Mixers abgesenkt, so dass sich eine maximale Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  einstellt. Anschließend erfolgt das Entleeren über eine Entleeröffnung an der Unterseite des Mixers. Für eine bessere Zugänglichkeit zu Reinigungs- und Wartungsarbeiten besitzt der Mischer eine Revisionsklappe, deren Verschluss über Endlagenschalter mit dem Antrieb der Mischwerkswelle und im inerten Zustand verriegelt ist.

**4 Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe**

In der nachstehenden Tabelle 1 sind die sicherheitstechnischen Kennzahlen der verwendeten Schüttgüter aufgeführt.

Tabelle 1: sicherheitstechnische Kennzahlen der verwendeten Rohstoffe

Brennbarer Stoffe	Explosionsfähigkeit	UEG	MZE	Zündtemperatur	Glimmtemperatur	Sauerstoffgrenzkonzentration	Brennzahl
		( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	( $\text{mJ}$ )	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $\text{Vol.}\%$ )	
Phytopharmakum A	staubexplosionsfähig	60	3	420	300	10	3
Synthetikum B	staubexplosionsfähig	30	1	360	280	8,5	4
Trägematerial C	staubexplosionsfähig	60	3	420	310	9	3

Anhand der beim Prozess verwendeten Rohstoffe wird deutlich, dass ohne weitere Schutzmaßnahmen von einem Auftreten extrem zündempfindlicher Staub/Luft-Gemische ausgegangen werden muss. Entzündliche, leicht- oder hochentzündliche Flüssigkeiten werden nicht verwendet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Brenn- und Explosionskenngößen der hier gehandhabten Schüttgüter auf eine hohe Zündempfindlichkeit hinweisen, so dass unterstellt werden muss, dass selbst Zündquellen von geringer Energie in der Lage sind, die auftretenden Staub/Luft-Gemische zu zünden.

## **5 Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung**

Explosionsgefährdete Bereiche sind gemäß § 5 BetrSichV abhängig von Häufigkeit und Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen einzuteilen. Bei den eingesetzten Stoffen können explosionsfähige Staub/Luft-Gemische auftreten, für die folgende Zoneneinteilung gilt:

- **Zone 20** ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.
- **Zone 21** ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben bilden kann.
- **Zone 22** ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

Dementsprechend lassen sich die explosionsgefährdeten Bereiche der Anlage in folgende Zonen einteilen:

### Mischerinneres

Durch die betrieblich bedingte Aufwirbelung von Schüttgütern und die sich beim Mischprozess einstellende inhomogene Staubverteilung wäre ohne Berücksichtigung der Inertisierung partiell von einem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische im Mischer auszugehen. Diese können dabei örtlich und zeitlich variierend über die gesamte Dauer des Mischvorganges vorliegen. Da die Mischgüter extrem zündempfindlich sind, werden Schutzmaßnahmen zur Vermeidung des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre betrieben. Aufgrund dessen,

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 6 von 13  
Revision 0  
..2011

dass der Mischprozess unter inerten Bedingungen durchgeführt wird (genaue Ausführung siehe Kapitel 6), ist während des Mischens nicht mit dem Auftreten explosionsfähiger Gemische zu rechnen. Begründet darauf, dass die Entleerung unter atmosphärischen Bedingungen erfolgt, wird das Innere des Mixers in die Zone 21 eingeteilt.

#### Aufstellungsraum

Aufgrund der während Reinigungs- und Wartungsarbeiten nicht auszuschließenden Staubaustritte über die vorhandenen Revisionsöffnungen kann es zu Staubablagerungen im Aufstellungsbereich des Mixers kommen. Da diese jedoch grundsätzlich gering sind, und unmittelbar nach ihrer Entstehung durch geeignete und im Rahmen von Betriebsanweisungen festgelegte Maßnahmen entfernt werden, entfällt eine Zoneneinteilung in die Zone 22 für den Aufstellungsraum.

Da der Aufstellungsraum einen geschlossenen Boden besitzt, sind Staubverschleppungen in darunter liegende Geschosse ausgeschlossen.

### **6 Zündgefahrenanalyse und Schutzmaßnahmen**

Gemäß Kapitel 5 ist für die Betrachtung möglicher Zündquellen im Inneren des Mixers die Zone 21 zu berücksichtigen. Daher ist für das Innere zu bewerten, ob und inwieweit im Normalbetrieb und bei üblicherweise zu erwartenden Betriebsstörungen wirksame Zündquellen auftreten können und durch welche Schutzmaßnahmen deren Wirksamkeit auf ein tolerierbares Maß reduziert werden kann.

Unter Berücksichtigung der in der DIN EN 1127-1 bzw. in der TRBS 2152 Teil 3 genannten Zündquellenarten, kommen demnach folgende wirksame Zündquellen in den Arbeitsbereichen in Betracht:

- heiße Oberflächen
- mechanisch erzeugte Funken
- elektrische Anlagen
- statische Elektrizität
- Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben

Da die verwendeten Schüttgüter extrem zündempfindlich sind, basiert das zugrunde liegende Explosionsschutzkonzept auf Maßnahmen zur Vermeidung von explosionsfähiger Atmosphä-



**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 7 von 13  
Revision 0  
..2011

re (Inertisierung) in Verbindung mit Maßnahmen zur Vermeidung von wirksamen Zündquellen. Die getroffenen Schutzmaßnahmen unterteilen sich dabei in technische und organisatorische Maßnahmen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Zur Vermeidung des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre wird das Mischerinnere vor Beginn des eigentlichen Mischprozesses mit Stickstoff inertisiert. Zur Auslegung der Inertisierungsmaßnahme wurden zunächst die Sauerstoffgrenzkonzentrationen (SGK) der Rohstoffe experimentell bestimmt. Die dabei ermittelte geringste SGK liegt bei 8,5 Vol.-%.

Der Produkteintrag erfolgt unter Stickstoff. Die Inertisierung des Mixers erfolgt mittels Spülmethode entsprechend TRBS 2152 Teil 2. Der Sollwert der Sauerstoffkonzentration nach durchgeführter Inertisierung wurde auf 4,5 Vol.-% Restsauerstoffgehalt definiert. Die Spülzeit von 4 Minuten und der Stickstoffvolumenstrom von mindestens  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  werden überwacht. Eine direkte Messung und Überwachung der Sauerstoffkonzentration ist nicht erforderlich. Die Revisionsklappe ist während dieses Vorgangs verschlossen und wird überwacht.

Die nach Durchführung der Stickstoffspülung tatsächlich vorliegende Sauerstoffkonzentration wurde im Rahmen der Inbetriebnahme messtechnisch zu 4,2 Vol.-% ermittelt, so dass nachweislich davon auszugehen ist, dass die Randbedingungen der Inertisierungsmaßnahme unter den betrieblichen Gegebenheiten zur Erreichung des Sollwertes führen. Die messtechnische Überprüfung der Wirksamkeit erfolgt halbjährlich. Die technische Dichtheit des Mixers wird während der Inertisierung über die vorhandene Druckmessung überprüft. Hierzu muss ein Stickstoffüberdruck von 30 mbar über die Spülzeit gehalten werden. Anderenfalls wird über die Rezeptursteuerung eine Fehlermeldung ausgegeben und der Mischer durch das Personal auf Undichtigkeiten geprüft.

Der Betrieb des Mischwerkzeuges mit Relativgeschwindigkeiten oberhalb von  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ist nur nach erfolgter Inertisierung möglich. Die Revisionsklappe ist so über die Rezeptursteuerung verriegelt, dass ein Öffnen erst nach erfolgter Lüftung mit einem 5-fachen Raumlufwechsel des Mixers möglich ist. Dieses wird über die in der Steuerung definierte Spülzeit von 15 Minuten bei einem Luftvolumenstrom von  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  gewährleistet. Diese Luftspülung vor Entriegelung der Revisionsklappe ist aus Personenschutzgründen erforderlich.

Zur Vermeidung des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre im Bereich des Mischeraufstellungsraumes werden mögliche Staubablagerungen umgehend durch Absaugen über einen für den Betrieb in staubexplosionsgefährdeten Bereichen geeigneten mobilen Staubsauger (Kennzeichnung II 3D) beseitigt. Die Einhaltung der Reinigungsmaßnahmen

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 8 von 13  
Revision 0  
..2011

wird im Rahmen eines organisatorisch festgeschriebenen Reinigungsplanes geregelt und protokolliert.

Trotz der Inertisierung wurden aufgrund der vorliegenden Brennzahlen und der Entleerung unter atmosphärischen Bedingungen zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung von Zündquellen getroffen.

Da die dem Mischer vorgeschalteten Apparate bestimmungsgemäß zur Handhabung der vorliegenden Stäube geeignet sind und keine Verfahrensschritte, die zu gefährlichen Temperaturerhöhungen innerhalb des Schüttgutes führen könnten, vor dem Mischprozess stattfinden, kann ein Eintrag von Glimmnestern in den Mischer ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Inbetriebnahme hat sich zudem gezeigt, dass keine nennenswerte Erwärmung des Mischgutes innerhalb der Mischzeit stattfindet.

Da die Rohstoffe grundsätzlich nach den Qualitätsanforderungen vorgeseibt werden, ist ein Eintrag von größeren Fremdkörpern, die zur Zündquelle werden könnten, auszuschließen.

Das Auftreten zündwirksamer mechanisch erzeugter Funken infolge des Anlaufens oder Anschlagens der Mischwerkzeuge wird durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung vermieden. Des Weiteren kommen geeignete Materialpaarungen, wie bspw. Edelstahl-Edelstahl, zum Einsatz, die bei Eintritt von einzelnen Schlägen nicht zur Funkenbildung neigen.

Reibungsbedingte heiße Oberflächen an den Lagern und Wellendurchführungen werden durch Temperaturüberwachung vermieden. Zur Vermeidung eines Staubeintrittes sind die Dichtungen stickstoffgespült. Die Temperaturüberwachungen sind hartverdrahtet und schalten den Antrieb bei Überschreitung einer Temperatur von 80 °C spannungsfrei.

Die im Mischer eingesetzten elektrischen Betriebsmittel weisen eine maximale Oberflächentemperatur von 205 °C auf und sind für den Betrieb in Zone 21 geeignet. Bezüglich der Auswahl und Errichtung der elektrischen Betriebsmittel wurden die Vorgaben der DIN EN 60079-14 beachtet.

Zur Vermeidung von gefährlichen Aufladungen sind sämtliche leit- und ableitfähigen Anlagenteile in den betrieblichen Potenzialausgleich eingebunden und weisen einen Ableitwiderstand von  $< 10^6 \Omega$  auf. Isolierende Beschichtungen mit einer Durchschlagsspannung  $> 4 \text{ kV}$  werden nicht verwendet. Die infolge des Mischguthandlings zu erwartenden Büschelentladungen sind für Stäube nicht zündwirksam.

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 9 von 13  
Revision 0  
..2011

Zur Vermeidung eines Lager- oder Dichtungsschadens erfolgen eine Verschleißprüfung sowie die Wartung des Mixers entsprechend den Herstellervorgaben in Intervallen von höchstens 8 Wochen je nach Anlagenauslastung. Hierbei werden die Lagerschmierung, der Mindestabstand zwischen dem Mischbehälter und den einzelnen Mischwerkzeugen sowie der feste Sitz aller Schraubverbindungen im Inneren kontrolliert.

Halbjährlich werden die Funktionsfähigkeit und das Ansprechverhalten der MSR-Einrichtungen mit Sicherheitsfunktion, wie die Temperaturüberwachung, die Drucküberwachung zur Dichtheitsprüfung, die Verriegelung der Revisionsklappe sowie die Spülzeit- und Volumenstromüberwachung, geprüft. Zusätzlich wird halbjährlich messtechnisch überprüft, ob der Sollwert der Sauerstoffkonzentration über die Inertisierungsmaßnahme erreicht wird. Festgeschrieben und protokolliert werden die Wartungen im Rahmen des betriebseigenen Wartungsplans.

Nach dem Austausch einer Dichtung wird der Mischer grundsätzlich zunächst ohne Mischgut betrieben und die Temperaturentwicklung im Bereich der neuen Dichtung sowie die technische Dichtheit des Mixers hinsichtlich der normalen Betriebsparameter überprüft.

Zur Verhinderung von wirksamen Zündquellen ist für die Durchführung von Heißenarbeiten, wie bspw. der Einsatz von Winkelschleifern oder Schweißgeräten, eine schriftliche Arbeitsfreigabe erforderlich. Heißenarbeiten werden im Bereich des Mixers grundsätzlich erst nach Beseitigung sämtlicher Staubablagerungen und nur mit einer Brandsicherheitswache durchgeführt. Die organisatorische Regelung zur Durchführung von Heißenarbeiten ist in einer Betriebsanweisung dargelegt.

Eine tabellarische Zusammenfassung der Zündgefahrenanalyse und der entsprechend angewandten technischen sowie organisatorischen Schutzmaßnahmen ist im Anhang 1 in Tabelle 2 aufgeführt.

## **7 Zusammenfassung**

Das auf Basis der vorliegenden Gefährdungsbeurteilung umgesetzte Explosionsschutzkonzept ist im betrieblichen Explosionsschutzdokument nach § 6 BetrSichV beschrieben.

Die Prüfung vor Inbetriebnahme nach § 14 (1) sowie Anhang 4 A Nr. 3.8 BetrSichV wurde durch eine befähigte Person mit besonderer Kenntnis auf dem Gebiet des Explosionsschutzes gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS 1201 mit dem Teil 1 durchgeführt.

Die Wirksamkeit der Explosionsschutzmaßnahmen wird im Rahmen der ermittelten Prüfrist von 3 Jahren durch eine befähigte Person gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 10 von 13  
Revision 0  
..2011

1201 mit dem Teil 1 überprüft. Die Prüfergebnisse werden in Form von Prüfaufzeichnungen dokumentiert.

Musterhausen, den ....

Bearbeiter

**Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen**

Tabelle 2: Zündgefahren und Schutzmaßnahmen

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen					
	Potentielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen
1.	Heiße Oberflächen	Lagerschaden			x		Infolge von selteneren Störungen, wie vorzeitiger Verschleiß oder Materialfehlern, kann ein Lagerschaden auftreten. Daraus können unzulässig hohe Temperaturen am Lager resultieren, was infolge von Wärmeleitung auch im Mischeninneren zu gefährlichen Zuständen führen kann.	Unzulässige Lagererwärmungen werden über je eine Temperaturüberwachung an den Wellendurchführungen der Mischwelle erfasst und direkt durch Hartverdrahtung zur Abschaltung des Mischerantriebes geführt. Regelmäßige Wartung und Verschleißfortführung entsprechend den Herstellerangaben.				x	T≤205 °C
2.	Heiße Oberflächen, mechanisch erzeugte Funken	Erwärmung oder Funkengarben durch Reibung zwischen den Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter		x			Unzulässige Erwärmung oder Funkengarben hervorgerufen durch schlechte Mischwerkzeuge infolge von Lagerschäden oder gelbsten Schraubverbindungen.	Inertisierung des Mischers bei Prozessen mit Relativgeschwindigkeit > 1 m·s <sup>-1</sup> . Begrenzung der Relativgeschwindigkeit < 1 m·s <sup>-1</sup> , während der Entleerung über die Phasensteuerung. Regelmäßige Wartung und Verschleißfortführung sowie Kontrolle des Mindestabstandes zwischen Mischwerk und Mischbehälter sowie aller Schraubverbindungen im Inneren.			x		T≤205 °C

Seite 12 von 13  
Revision 0  
..2011

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlicher eingeleiteter Maßnahmen					
	Potentielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen
3.	Heiße Oberflächen	Erwärmung an den Wellenabdichtungen	x				Unzulässige Erwärmung hervorgerufen durch Staubeintritt oder schadhaftes bzw. falsch montierte Dichtungen.	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen		x			T≤205 °C
4.	Heiße Oberflächen	Überlastung von Betriebsmitteln mit Kontakt zu Zone 21		x			Auswahl und Errichtung ausschließlich für den Betrieb in Zone 21 geeigneter Betriebsmittel. Installation von elektrischen Betriebsmittel nach DIN EN 60079-14.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.		x			T≤205 °C
5.	Heißarbeiten, Instandsetzung	Durchführung von Heißarbeiten oder Instandsetzungen			x		Die Durchführung von Heißarbeiten bedarf der schriftlichen Arbeitsfreigabe sowie der Stellung einer Brandstreckenschutzweiche. Abgelagerte Stäube werden vor Beginn der Heißarbeiten saugend entfernt.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.			x		-
6.	Elektrische Entladungen	Isolierte elektrische Anlagenteile	x				Isoliert gelagerte leitfähige Anlagenteile können gefährlich hoch aufgeladen werden. Funkenentladungen sind nicht auszuschließen.	Einrichtung von Potenzialausgleichs- und Erdungsmaßnahmen sowie Einbindung aller leitfähigen Anlagenteile.				x	-

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen					
	Potenzielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen
7.	Elektrostatische Entladungen	Nicht leitfähige Anlagenteile, isolierende Beschichtungen				x	Nicht leitfähige oder mit isolierenden Beschichtungen versehene leitfähige Anlagenteile werden nicht verwendet. Zündwirksame Gleitstößelscheitelladungen können daher nicht auftreten.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.				x	-
8.	Exotherme Reaktionen, Selbstzündung	Unzulässig hohe Erwärmung des Schüttgutes			x		Keine vorgeschalteten Prozesse, die zu gefährlichen Temperaturerhöhungen des Schüttgutes führen könnten.	Maßnahmen zur Vermeidung unzulässiger Erwärmungen gemäß Punkt 1., 2., 3. und 4.				x	T≤205°C

A.5.4 Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen horizontalen Zwangsmischer mit explosionsfähigen Stäuben in der Baustoffindustrie

Mustermann AG  
Musterstraße 9  
01234 Musterhausen

**Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe  
für einen horizontalen Zwangsmischer mit explosionsfähigen Stäuben  
in der Baustoffindustrie**

-----

Bearbeiter:

Datum:

\_\_\_\_\_  
geprüft und freigegeben

\_\_\_\_\_  
erstellt



**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 2 von 13  
Revision 0  
..2011

#### **Inhalt**

1	Veranlassung .....	3
2	Grundlagen .....	3
3	Kurzbeschreibung der Anlage .....	3
4	Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe .....	4
5	Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung .....	5
6	Zündgefahrenanalyse und Schutzmaßnahmen .....	7
7	Zusammenfassung.....	9
Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen.....		11

## 1 Veranlassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Staubexplosionsrisiko an Mixchern mit bewegten Werkzeugen zur Erstellung und Abgrenzung möglicher Explosionsschutzkonzepte“ gilt es, die Staubexplosionsrisiken in Mixchern systematisch zu untersuchen. Ziel ist es dabei, Muster-Gefährdungsbeurteilungen für verschiedene Mischer in unterschiedlichen Branchen mit divergierenden Betriebsparametern zu erarbeiten, um Herstellern sowie Betreibern von Mixchern die Erstellung von geräte- sowie betriebsspezifischen Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen zu erleichtern.

In der vorliegenden Muster-Gefährdungsbeurteilung wird beispielhaft das Staubexplosionsrisiko beim Betrieb eines horizontalen Zwangsmischers mit inerten Baustoffen und explosionsfähigen Additiven in der Baustoffindustrie betrachtet. Über die dargelegte Gefährdungsbeurteilung werden Maßnahmen aufgezeigt, die einen sicheren Betrieb mit den vorliegenden Stäuben gewährleisten.

## 2 Grundlagen

Grundlage für diese Muster-Gefährdungsbeurteilung bilden die nachfolgend aufgeführten Unterlagen und Informationen:

- Sicherheitsdatenblatt für Additiv A
- Sicherheitsdatenblatt für Bindemittel B
- Sicherheitsdatenblatt für Gesteinskörnung C
- Bericht „Bestimmung der Brenn- und Explosionskenngrößen von Baustoffmischung ABC“
- Betriebsanleitung Mischer Typ BauInd

## 3 Kurzbeschreibung der Anlage

Bei der zu betrachtenden Anlage handelt es sich um einen horizontalen Zwangsmischer mit 4 m<sup>3</sup> Volumen, welcher zur Homogenisierung von Baustoffen und Additiven in Schüttgutform dient. Die Homogenisierung der Mischgüter erfolgt innerhalb des Mischbehälters durch rotierende, auf einer Welle versetzt angeordnete Mischwerkzeuge, die in Größe, Anzahl, Anordnung, geometrischer Form und Umfangsgeschwindigkeit derart auf die Geometrie des Mischbehälters abgestimmt sind, dass sie das Mischgut in eine dreidimensionale Bewegung zwingen. Der Antrieb der Welle erfolgt über einen außen aufgesetzten Getriebemotor.

Die inerten Rohstoffe werden in einem dem Mischer vorgeschalteten Behälter vorgelegt und verwogen. Anschließend gelangt die Schüttgutvorlage schwerkraftgestützt über ein kurzes Fallrohr und eine auf der Oberseite angeordnete Befüllöffnung in den Mischer. Das Befüllen erfolgt bei einer maximalen Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Der Füllgrad steht hierbei in Abhängigkeit zur Rezeptur und wird über die zentrale Rezeptursteuerung zwischen 10 % und 80 % geregelt. Grundsätzlich werden die inerten Baustoffe zuerst in den Mischer gegeben. Die Additive werden anschließend über die Aufgabe an einer Sackschütte nachgelegt. Die Menge der aufzugebenden Additive wird dem Mitarbeiter über die Rezeptursteuerung angezeigt. Der maximale Anteil an explosionsfähigen Additiven für die unterschiedlichen Mischungen beträgt 18 Gew.-%. Ist der Befüllvorgang abgeschlossen, werden die Befüllöffnungen durch pneumatisch betriebene Absperrklappen verschlossen und der Antrieb auf Nenndrehzahl entsprechend einer maximalen Umfangsgeschwindigkeit von  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  geregelt.

Nach Ablauf der Mischzeit wird die Drehzahl des Mixers abgesenkt, so dass sich eine maximale Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  einstellt. Anschließend erfolgt das Entleeren über zwei Entleeröffnungen an der Unterseite des Mixers. Für eine bessere Zugänglichkeit zu Reinigungs- und Wartungsarbeiten besitzt der Mischer zwei Revisionsklappen, deren Verschluss über Endlagenschalter mit dem Antrieb der Mischwerkswelle verriegelt ist.

**4 Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe**

In der nachstehenden Tabelle 1 sind die sicherheitstechnischen Kennzahlen der verwendeten Schüttgüter aufgeführt.

Tabelle 1: sicherheitstechnische Kennzahlen der verwendeten Rohstoffe

Brennbarer Stoffe	Explosionsfähigkeit	UEG ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	MZE ( $\text{mJ}$ )	Zündtemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Glimmtemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Brennzahl
Additiv A	staubexplosionsfähig	60	25	300	275	4
Bindemittel B	nicht explosionsfähig	-	-	-	-	-
Gesteinskörnung C	nicht explosionsfähig	-	-	-	-	-

Die beim Prozess verwendeten Rohstoffe sind zum Teil staubexplosionsfähig. Da in Abhängigkeit der Rezepturen verschiedenen Anteile an inerten und explosionsfähigen Rohstoffen in den Mischungen vorkommen, wurde die Mischung mit dem größten Anteil von 18 Gew.-% an explosionsfähigen Additiven hinsichtlich der Explosionsfähigkeit labortechnisch untersucht. Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass die kritischste Mischung als nicht-explosionsfähig zu werten ist. Die Bestimmung des Brennverhaltens der kritischsten Mischung ergab eine Brennzahl 3, so dass ein örtlich begrenztes Glimmen bzw. Brennen bei Zündung der Mischung zu berücksichtigen ist.

Für die Rezepturen mit geringeren Anteilen an explosionsfähigem Additiv kann demnach konservativ von einem identischen Reaktionsverhalten ausgegangen werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Brenn- und Explosionskenngößen der hier gehandhabten Schüttgüter für das Additiv auf eine normale Zündempfindlichkeit hinweisen. Die homogenisierten Mischungen sind aufgrund des hohen Inertstoffanteils nicht explosionsfähig.

## 5 Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung

Explosionsgefährdete Bereiche sind gemäß § 5 BetrSichV abhängig von Häufigkeit und Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen einzuteilen. Bei den eingesetzten Stoffen können explosionsfähige Staub/Luft-Gemische auftreten, für die folgende Zoneneinteilung gilt:

- **Zone 20** ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.
- **Zone 21** ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben bilden kann.
- **Zone 22** ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 6 von 13  
Revision 0  
..2011

Dementsprechend lassen sich die explosionsgefährdeten Bereiche der Anlage in folgende Zonen einteilen:

#### Mischerinneres

Da nach erfolgter Homogenisierung keine Explosionsgefahr aus den unterschiedlichen Mischungen resultiert, ist ausschließlich während des Befüll- und Mischvorgangs mit Additivzugabe von einem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische auszugehen. Da die inerten Bestandteile vorgelegt werden und den wesentlichen Masseanteil stellen, kann nach der Aufgabe und Untermischen der Additive davon ausgegangen werden, dass das Gemisch keine Explosionsgefahr mehr aufweist. Demnach ist in den Zeiträumen der Additivaufgabe gelegentlich von einer explosionsfähigen Atmosphäre im Inneren des Mixers auszugehen. Somit wird das Innere des Mixers in die Zone 21 eingeteilt.

#### Aufstellungsraum und Sackaufgabe

Aufgrund der während Reinigungs- und Wartungsarbeiten nicht auszuschließenden Staubaustritte über die vorhandenen Revisionsöffnungen ist um den Mischer mit Staubablagerungen zu rechnen. Diese werden regelmäßig durch geeignete und im Rahmen von Betriebsanweisungen festgelegte Maßnahmen entfernt. Da aus betrieblichen Gründen nicht sichergestellt werden kann, dass die Staubablagerungen stets vor Erreichen von Ablagerungen mit gefährdender Schichtdicke (< 1 mm) beseitigt werden können, ist zumindest kurzzeitig infolge von aufgewirbelten Stäuben auch in der Umgebung des Mixers und der Sackaufgabe mit explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen zu rechnen.

Da die Additive ohne Anteil an inerten Rohstoffen im Bereich der Sackaufgabe gehandhabt werden, ist hier mit Explosionsgefahren zu rechnen. Trotz der dort betriebenen Absaugung über die zentrale Entstaubungsanlage, ist im unmittelbaren Aufgabebereich gelegentlich von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen auszugehen. Folglich wird die Sackaufgabe in die Zone 21 eingeteilt. Für den Aufstellungsraum des Mixers und den Bereich um die Sackaufgabe ergibt sich ein explosionsgefährdeter Bereich der Zone 22 mit einem Radius von 5 m. Um im Falle einer Aufwirbelung der abgelagerten brennbaren Stäube zu Verhindern, dass sich im gesamten Raum ein explosionsfähiges Staub/Luft-Gemisch bildet, ist über den betrieblichen Reinigungsplan geregelt, dass die Ablagerungen vor Erreichen einer Schichtdicke von 2 mm saugend entfernt werden. Hierzu befindet sich im Bereich des Mixers und der Sackaufgabe je ein Anschluss an die zentrale Entstaubungsanlage, über die mit einem flexiblen Schlauch die abgelagerten Stäube beseitigt werden können.

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 7 von 13  
Revision 0  
..2011

Da der Aufstellungsraum einen geschlossenen Boden besitzt, sind Staubverschleppungen in darunter liegende Geschosse ausgeschlossen.

## **6 Zündgefahrenanalyse und Schutzmaßnahmen**

Gemäß Kapitel 5 ist für die Betrachtung möglicher Zündquellen im Inneren des Mixers und der Sackaufgabe die Zone 21 sowie für den Aufstellungsbereich sowie um die Sackaufgabe die Zone 22 zu berücksichtigen. Daher ist für das Innere zu bewerten, ob und inwieweit im Normalbetrieb und bei üblicherweise zu erwartenden Betriebsstörungen wirksame Zündquellen auftreten können. Für die Zone 22 ist zu prüfen, ob wirksame Zündquellen im Normalbetrieb auftreten können. Anschließend sind für die explosionsgefährdeten Bereiche Schutzmaßnahmen festzulegen und umzusetzen, über die die Wirksamkeit der Zündquellen auf ein tolerierbares Maß reduziert wird.

Unter Berücksichtigung der in der DIN EN 1127-1 bzw. in der TRBS 2152 Teil 3 genannten Zündquellenarten, kommen demnach folgende wirksame Zündquellen in den Arbeitsbereichen in Betracht:

- heiße Oberflächen
- mechanisch erzeugte Funken
- elektrische Anlagen
- statische Elektrizität
- Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben

Das hierfür zugrunde liegende Explosionsschutzkonzept basiert auf Maßnahmen zur Vermeidung von explosionsfähiger Atmosphäre in Verbindung mit Maßnahmen zur Vermeidung von wirksamen Zündquellen. Die getroffenen Schutzmaßnahmen unterteilen sich dabei in technische und organisatorische Maßnahmen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Zur Vermeidung des häufigen oder langzeitigen Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre im Inneren des Mixers werden grundsätzlich die inertesten Rohstoffe vor den explosionsfähigen Additiven aufgegeben.

Zur Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre im Bereich des Mischeraufstellungsraumes und um die Sackaufgabe werden Staubablagerungen regelmäßig durch Absaugen über die zentrale Entstaubungsanlage beseitigt.

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 8 von 13  
Revision 0  
..2011

Die Einhaltung der Reinigungsmaßnahmen wird im Rahmen eines organisatorisch festgeschriebenen Reinigungsplanes geregelt und protokolliert. Des Weiteren ist organisatorisch in einer Betriebsanweisung geregelt, dass die Additive ausschließlich bei aktivierter Absaugung an der Sackaufgabe aufgegeben werden.

Da die dem Mischer vorgeschalteten Apparate bestimmungsgemäß zur Handhabung der vorliegenden Stäube geeignet sind und keine Verfahrensschritte, die zu gefährlichen Temperaturerhöhungen innerhalb des Schüttgutes führen könnten, vor dem Mischprozess stattfinden, kann ein Eintrag von Glimmnestern in den Mischer ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Inbetriebnahme hat sich zudem gezeigt, dass keine nennenswerte Erwärmung des Mischgutes innerhalb der Mischzeit stattfindet.

Zur Vermeidung reibungsbedingter heißer Oberflächen infolge eines Fremdkörpereintrages ist dem Mischer eine Siebanlage vorgeschaltet. Die Maschenweite des Schwingsiebes beträgt 8 mm. Aufgrund der Rohstoffvorsiebung und des Minimalabstandes von 10 mm zwischen bewegten Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter, ist ein Verklemmen und Mitschleifen von nicht abgeschiedenen Fremdkörpern auszuschließen. Zudem befindet sich an der Sackaufgabe ein Gitterrost mit einer Maschenweite von 10 mm. Das Hilfsmittel zum Öffnen der Sackware ist über eine flexible Verbindung mit der Sackaufgabe verbunden, so dass dieses nicht in das Innere des Mixers gelangen kann.

Die Schraubverbindungen im Inneren des Mixers sind gegen unbeabsichtigtes Lösen gesichert, so dass das Lösen und Anschlagen von Schrauben und Muttern für zu erwartende Fehlerzustände ausgeschlossen werden kann.

Das Auftreten zündwirksamer mechanisch erzeugter Funken infolge des Anlaufens oder Anschlagens der Mischwerkzeuge wird durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung vermieden. Des Weiteren kommen geeignete Materialpaarungen, wie bspw. Edelstahl-Edelstahl, zum Einsatz, die bei Eintritt von einzelnen Schlägen nicht zur Funkenbildung neigen.

Reibungsbedingte heiße Oberflächen an den Lagern und Wellendurchführungen werden durch regelmäßige Wartung entsprechend den Herstellervorgaben und durch luftgespülte Wellenabdichtung mit Überwachung des Luftvolumenstromes vermieden.

Die im Mischer und an der Sackschütte eingesetzten elektrischen Betriebsmittel weisen eine maximale Oberflächentemperatur von 200 °C auf und sind für den Betrieb in Zone 21 geeignet. Betriebsmittel die im Aufstellungsbereich des Mixers eingesetzt werden, sind für den Betrieb in Zone 22 geeignet und weisen ebenfalls eine maximale Oberflächentemperatur von

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 9 von 13  
Revision 0  
..2011

200 °C auf. Bezüglich der Auswahl und Errichtung der elektrischen Betriebsmittel wurden die Vorgaben der DIN EN 60079-14 beachtet.

Zur Vermeidung von gefährlichen Aufladungen sind sämtliche leit- und ableitfähigen Anlagenteile in den betrieblichen Potenzialausgleich eingebunden und weisen einen Ableitwiderstand von  $< 10^6 \Omega$  auf. Isolierende Beschichtungen mit einer Durchschlagsspannung  $> 4 \text{ kV}$  werden nicht verwendet. Die infolge des Mischguthandlings zu erwartenden Büschelentladungen sind für Stäube nicht zündwirksam.

Zur Vermeidung eines Lager- oder Dichtungsschadens erfolgen eine Verschleißprüfung sowie die Wartung des Mixers entsprechend den Herstellervorgaben in Intervallen von höchstens 8 Wochen je nach Anlagenauslastung. Hierbei werden die Lagerschmierung, der Mindestabstand zwischen dem Mischbehälter und den einzelnen Mischwerkzeugen sowie der feste Sitz aller Schraubverbindungen im Inneren kontrolliert.

Halbjährlich werden die Funktionsfähigkeit und das Ansprechverhalten der MSR-Einrichtungen mit Sicherheitsfunktion, wie die Spülluftüberwachung und die Verriegelung der Revisionsklappen, geprüft. Festgeschrieben und protokolliert werden die Wartungen im Rahmen des betriebseigenen Wartungsplans.

Nach dem Austausch einer Dichtung wird der Mischer grundsätzlich zunächst ohne Mischgut betrieben und die Temperaturentwicklung im Bereich der neuen Dichtung hinsichtlich der normalen Betriebsparameter überprüft.

Zur Verhinderung von wirksamen Zündquellen ist für die Durchführung von Heißenarbeiten, wie bspw. der Einsatz von Winkelschleifern oder Schweißgeräten, eine schriftliche Arbeitsfreigabe erforderlich. Heißenarbeiten werden im Bereich des Mixers grundsätzlich erst nach Beseitigung sämtlicher Staubablagerungen und nur mit einer Brandsicherheitswache durchgeführt. Die organisatorische Regelung zur Durchführung von Heißenarbeiten ist in einer Betriebsanweisung dargelegt.

Eine tabellarische Zusammenfassung der Gefährdungsanalyse und der entsprechend angewandten technischen sowie organisatorischen Schutzmaßnahmen ist im Anhang 1 in Tabelle 2 aufgeführt.

## **7 Zusammenfassung**

Das auf Basis der vorliegenden Gefährdungsbeurteilung umgesetzte Explosionsschutzkonzept ist im betrieblichen Explosionsschutzdokument nach § 6 BetrSichV beschrieben.



**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 10 von 13  
Revision 0  
..2011

Die Prüfung vor Inbetriebnahme nach § 14 (1) sowie Anhang 4 A Nr. 3.8 BetrSichV wurde durch eine befähigte Person mit besonderer Kenntnis auf dem Gebiet des Explosionsschutzes gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS 1201 mit dem Teil 1 durchgeführt.

Die Wirksamkeit der Explosionsschutzmaßnahmen wird im Rahmen der ermittelten Prüffrist von 3 Jahren durch eine befähigte Person gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS 1201 mit dem Teil 1 überprüft. Die Prüfergebnisse werden in Form von Prüfaufzeichnungen dokumentiert.

Musterhausen, den ....

Bearbeiter

**Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen**

Tabelle 2: Zündgefahren und Schutzmaßnahmen

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen					
	Potentielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen
1.	Heiße Oberfläche	Lagerschaden			x		Infolge von selteneren Störungen, wie vorzeitiger Verschleiß oder Materialfehlern, kann ein Lagerschaden auftreten. Daraus können unzulässig hohe Temperaturen am Lager resultieren, was infolge von Wärmeleitung auch im Mischentmehrer zu gefährlichen Zuständen führen kann.	Regelmäßige Wartung und Verschleißprüfung entsprechend den Herstellerangaben.			x		T≤200 °C
2.	Heiße Oberflächen, mechanisch erzeugte Funken	Erwärmung oder Funkengeigen durch Reibung zwischen den Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter		x			Unzulässige Erwärmung oder Funkengeigen hervorgerufen durch schleifende Fremdkörper oder Mischwerkzeuge infolge von Fremdkörpertrag, Lagerbeschäden oder gelösten Schraubverbindungen.	Regelmäßige Wartung und Verschleißprüfung sowie Kontrolle des Mindestabstandes zwischen Mischwerk und Mischbehälter sowie aller Schraubverbindungen im Inneren. Vermeidung des Fremdkörperintrages durch Rohstoffstreuung.			x		T≤200 °C

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen					
	Potenzielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen
3.	Heiße Oberfläche	Erwärmung durch Reibung an den Wellenabdichtungen	Im Normalbetrieb	x			Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen		x			T≤200°C
4.	Heiße Oberfläche	Überlastung von Betriebsmitteln mit Kontakt zu Zone 21			x		Unzulässige Erwärmung hervorgerufen durch Staubeintritt oder schadhaftes bzw. falsch montierte Dichtungen. Auswahl und Errichtung ausschließlich für den Betrieb in Zone 21 geeigneter Betriebsmittel, Installation von elektrischen Betriebsmitteln nach DIN EN 60079-14.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.		x			T≤200°C
5.	Heiße Oberfläche	Überlastung von Betriebsmitteln mit Kontakt zu Zone 22		x			Auswahl und Errichtung ausschließlich für den Betrieb in Zone 22 geeigneter Betriebsmittel, Installation von elektrischen Betriebsmitteln nach DIN EN 60079-14.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.		x			T≤200°C
6.	Heißarbeiten, Instandsetzung	Durchführung von Heißarbeiten oder Instandsetzungen				x	Die Durchführung von Heißarbeiten bedarf der schriftlichen Arbeitsfreigabe sowie der Stellung einer Brandstrecke. Abgelagerte Stäube werden von Beginn der Heißarbeiten saugend entfernt.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.				x	-

Seite 13 von 13  
Revision 0  
..2011

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen					
	Potenzielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen
7.	Elektrostatische Entladungen	Isolierte elektrische leitende Anlagenteile	x				Isoliert gelagerte leitfähige Anlagenteile können gefährlich hoch aufgeladen werden. Funkenentladungen sind nicht auszuschließen.	Einrichtung von Potenzialausgleichs- und Erdungsmaßnahmen sowie Einbindung aller leitfähigen Anlagenteile.				x	-
8.	Elektrostatische Entladungen	Nicht leitfähige Anlagenteile, isolierende Beschichtungen				x	Nicht leitfähige oder mit isolierenden Beschichtungen versehene leitfähige Anlagenteile werden nicht verwendet. Zündwirksame Gleitstatischesentladungen können daher nicht auftreten.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.				x	-
9.	Exotherme Reaktionen, Selbstzündung	Unzulässig hohe Erwärmung des Schüttgutes			x		Keine vorgeschalteten Prozesse, die zu gefährlichen Temperaturenhöhungen des Schüttgutes führen könnten.	Maßnahmen zur Vermeidung unzulässiger Erwärmungen gemäß Punkt 1., 2., 3., 4. und 5.				x	T≤200°C

A.5.5 Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe für einen horizontalen Zwangsmischer mit extrem zündempfindlichen Stäuben in der chemischen Industrie

Mustermann AG  
Musterstraße 9  
01234 Musterhausen

**Muster-Gefährdungsbeurteilung für Explosionsgefahren durch brennbare Stoffe  
für einen horizontalen Zwangsmischer mit extrem zündempfindlichen Stäuben  
in der chemischen Industrie**

-----

Bearbeiter:

Datum:

\_\_\_\_\_  
geprüft und freigegeben

\_\_\_\_\_  
erstellt

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 2 von 12  
Revision 0  
..2011

### **Inhalt**

1	Veranlassung .....	3
2	Grundlagen .....	3
3	Kurzbeschreibung der Anlage .....	3
4	Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe .....	4
5	Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung .....	5
6	Zündgefahrenanalyse und Schutzmaßnahmen .....	6
7	Zusammenfassung.....	9
Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen.....		10

## 1 Veranlassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Staubexplosionsrisiko an Mixchern mit bewegten Werkzeugen zur Erstellung und Abgrenzung möglicher Explosionsschutzkonzepte“ gilt es die Staubexplosionsrisiken in Mixchern systematisch zu untersuchen. Ziel ist es dabei, Muster-Gefährdungsbeurteilungen für verschiedene Mischer in unterschiedlichen Branchen mit divergierenden Betriebsparametern zu erarbeiten, um Herstellern sowie Betreibern von Mixchern die Erstellung von geräte- sowie betriebsspezifischen Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen zu erleichtern.

In der vorliegenden Muster-Gefährdungsbeurteilung wird beispielhaft das Staubexplosionsrisiko beim Betrieb eines horizontalen Zwangsmischers zur Herstellung von pulverförmigen Kunststoffadditiven in der chemischen Industrie betrachtet. Über die dargelegte Gefährdungsbeurteilung werden Maßnahmen aufgezeigt, die einen sicheren Betrieb mit extrem zündempfindlichen Stäuben gewährleisten.

## 2 Grundlagen

Grundlage für diese Muster-Gefährdungsbeurteilung bilden die nachfolgend aufgeführten Unterlagen und Informationen:

- Sicherheitsdatenblatt für Additive A
- Sicherheitsdatenblatt für Additive B
- Betriebsanleitung Mischer Typ ChemInd

## 3 Kurzbeschreibung der Anlage

Bei der zu betrachtenden Anlage handelt es sich um einen horizontalen Zwangsmischer mit 2 m<sup>3</sup> Volumen, welcher zur Homogenisierung staubexplosionsfähiger Additive in Schüttgutform dient. Die Homogenisierung der Mischgüter erfolgt innerhalb des Mischbehälters durch rotierende, auf einer Welle versetzt angeordnete Mischwerkzeuge, die in Größe, Anzahl, Anordnung, geometrischer Form und Umfangsgeschwindigkeit derart auf die Geometrie des Mischbehälters abgestimmt sind, dass sie das Mischgut in eine dreidimensionale Bewegung zwingen. Der Antrieb der Welle erfolgt über einen außen aufgesetzten Getriebemotor.

Das Schüttgut wird in einem vorgeschalteten Behälter vorgelegt und verwogen. Anschließend gelangt die Schüttgutvorlage schwerkraftgestützt über ein kurzes Fallrohr und zwei auf

der Oberseite angeordnete Befüllöffnungen in den Mischer. Das Befüllen erfolgt bei einer maximalen Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Der Füllgrad steht hierbei in Abhängigkeit zur Rezeptur und wird über die zentrale Rezeptursteuerung zwischen 10 % und 60 % geregelt. Ist der Befüllvorgang abgeschlossen, werden die Befüllöffnungen durch eine geeignete Absperrarmatur verriegelt, der Antrieb wird auf Nenndrehzahl entsprechend einer Relativgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  geregelt und die schnelllaufenden Messerköpfe werden zugeschaltet. Nach Ablauf der Mischzeit von 15 Minuten wird die Drehzahl des Mixers abgesenkt, so dass sich eine maximale Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge von  $< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  einstellt. Anschließend erfolgt das Entleeren über eine Entleeröffnung an der Unterseite des Mixers. Für eine bessere Zugänglichkeit zu Reinigungs- und Wartungsarbeiten besitzt der Mischer zwei Revisionsklappen, deren Verschluss über Endlagenschalter mit dem Antrieb der Mischwerkswelle verriegelt ist.

**4 Explosionstechnische Beurteilung der vorhandenen Stoffe**

In der nachstehenden Tabelle 1 sind die sicherheitstechnischen Kennzahlen der verwendeten Schüttgüter aufgeführt.

Tabelle 1: sicherheitstechnische Kennzahlen der verwendeten Rohstoffe

brennbare Stoffe	Explosionsfähigkeit	$K_{ST}$ ( $\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$P_{max}$ (bar)	UEG ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	MZE (mJ)	Zündtemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Glimmtemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Brennzahl
Additiv A	staub-explosionsfähig	156	8,7	30	< 3	480	schmilzt ab 135 $^{\circ}\text{C}$	3
Additiv B	staub-explosionsfähig	178	9,2	30	< 3	375	schmilzt ab 120 $^{\circ}\text{C}$	3

Anhand der beim Prozess verwendeten Rohstoffe wird deutlich, dass diese explosionsfähige Staub/Luft-Gemische bilden können. Es ist ersichtlich, dass die verwendeten Produkte aufgrund der zur Zündung ihrer explosionsfähigen Staub/Luft-Gemische notwendigen Energien als extrem zündempfindlich einzustufen sind (MZE < 3 mJ). Entzündliche, leicht- oder hochentzündliche Flüssigkeiten werden nicht verwendet.



**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 5 von 12  
Revision 0  
..2011

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Brenn- und Explosionskenngrößen der hier gehandhabten Schüttgüter Hinweise auf eine überdurchschnittliche Reaktivität und erhöhte Zündempfindlichkeit geben, so dass unterstellt werden muss, dass selbst Zündquellen von geringer Energie in der Lage sind, die auftretenden Staub/Luft-Gemische zu zünden.

## 5 Explosionsgefährdete Bereiche und Zoneneinteilung

Explosionsgefährdete Bereiche sind gemäß § 5 BetrSichV abhängig von Häufigkeit und Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen einzuteilen. Bei den eingesetzten Stoffen können explosionsfähige Staub/Luft-Gemische auftreten, für die folgende Zoneneinteilung gilt:

- **Zone 20** ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.
- **Zone 21** ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben bilden kann.
- **Zone 22** ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Stäuben normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

Dementsprechend lassen sich die explosionsgefährdeten Bereiche der Anlage in folgende Zonen einteilen:

### Mischerinneres

Durch die betrieblich bedingte Aufwirbelung von Schüttgütern und die sich beim Mischprozess einstellende inhomogene Staubverteilung ist trotz der gemittelt betrachteten hohen Staubkonzentration im gesamten Mischervolumen partiell von einem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische auszugehen. Diese können dabei örtlich und zeitlich variierend über die gesamte Dauer des Mischvorganges vorliegen. Somit wird das Innere des Mixers in die Zone 20 eingeteilt.

### Aufstellungsraum

Aufgrund der während Reinigungs- und Wartungsarbeiten nicht auszuschließenden Staubaustritte über die vorhandenen Revisionsöffnungen kann es zu Staubablagerungen im

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 6 von 12  
Revision 0  
..2011

Aufstellungsbereich des Mixers kommen. Da diese jedoch unmittelbar nach ihrer Entstehung und zwingend vor Erreichen gefährdender Schichtdicken ( $< 1$  mm) durch geeignete und im Rahmen von Betriebsanweisungen festgelegte Maßnahmen entfernt werden, entfällt eine Zoneneinteilung in die Zone 22 für den Aufstellungsraum.

Da der Aufstellungsraum einen geschlossenen Boden besitzt, sind Staubverschleppungen in darunter liegende Geschosse nicht möglich.

## **6 Zündgefahrenanalyse und Schutzmaßnahmen**

Gemäß Kapitel 5 ist für die Betrachtung möglicher Zündquellen im Inneren des Mixers die Zone 20 zu berücksichtigen. Daher ist für das Innere zu bewerten, ob und inwieweit im Normalbetrieb, bei üblicherweise zu erwartenden Betriebsstörungen und zusätzlich auch bei seltenen Betriebsstörungen wirksame Zündquellen auftreten können und durch welche Schutzmaßnahmen deren Wirksamkeit auf ein tolerierbares Maß reduziert werden kann.

Unter Berücksichtigung der in der DIN EN 1127-1 bzw. in der TRBS 2152 Teil 3 genannten Zündquellenarten, kommen demnach folgende wirksame Zündquellen in den Arbeitsbereichen in Betracht:

- heiße Oberflächen
- mechanisch erzeugte Funken
- elektrische Anlagen
- statische Elektrizität
- Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben

Das hierfür zugrunde liegende Explosionsschutzkonzept basiert auf Maßnahmen zur Vermeidung von explosionsfähiger Atmosphäre in Verbindung mit Maßnahmen zur Vermeidung von wirksamen Zündquellen sowie Maßnahmen, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken. Die getroffenen Schutzmaßnahmen unterteilen sich dabei in technische und organisatorische Maßnahmen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Zur Vermeidung des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre im Bereich des Mischeraufstellungsraumes werden mögliche Staubablagerungen umgehend durch Absaugen über einen für den Betrieb in staubexplosionsgefährdeten Bereichen geeigneten mobilen

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 7 von 12  
Revision 0  
..2011

Staubsauger (Kennzeichnung II 3D) beseitigt. Die Einhaltung der Reinigungsmaßnahmen wird im Rahmen eines organisatorisch festgeschriebenen Reinigungsplanes geregelt und protokolliert.

Da die potenziellen Zündquellen nicht konsequent für sämtliche zu betrachtende Fehlerzustände sicher ausgeschlossen werden können, wurde der Mischer konstruktiv geschützt. Hierzu ist das Gerät für den maximalen Explosionsdruck ausgelegt und weist eine Explosionsdruckstoßfestigkeit von 10 bar nach DIN EN 14460 auf. Während des Mischbetriebs sind die Befüll- und Entleerklappe geschlossen und der geschlossene Zustand wird überwacht. Die Klappen sind im geschlossenen Zustand explosionsdruckstoßfest für 10 bar und zünddurchschlagsicher für die verwendeten Stäube (durch Explosionsversuche geprüft nach DIN EN 15089). Da die Maßnahme des konstruktiven Explosionsschutzes nur bei Auftreten des seltenen Fehlerfalls als Schutzmaßnahme wirksam werden soll, sind zudem Maßnahmen zur Vermeidung wirksamer Zündquellen im Inneren des Mixers umgesetzt und im Folgenden beschrieben.

Da die dem Mischer vorgeschalteten Apparate bestimmungsgemäß zur Handhabung der vorliegenden Stäube geeignet sind und keine Verfahrensschritte, die zu gefährlichen Temperaturerhöhungen innerhalb des Schüttgutes führen könnten, vor dem Mischprozess stattfinden, kann ein Eintrag von Glimmnestern in den Mischer ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Inbetriebnahme hat sich zudem gezeigt, dass keine nennenswerte Erwärmung des Mischgutes innerhalb der Mischzeit stattfindet.

Zur Vermeidung reibungsbedingter heißer Oberflächen infolge eines Fremdkörpereintrages ist dem Mischer eine Siebanlage vorgeschaltet. Die Maschenweite des Schwingsiebes beträgt 8 mm. Aufgrund der Rohstoffvorsiebung und des Minimalabstandes von 10 mm zwischen bewegten Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter, ist ein Verklemmen und Mitschleifen von nicht abgeschiedenen Fremdkörpern auszuschließen.

Die Schraubverbindungen im Inneren des Mixers sind gegen unbeabsichtigtes Lösen gesichert, so dass das Lösen und Anschlagen von Schrauben und Muttern für zu erwartende Fehlerzustände ausgeschlossen werden kann.

Das Auftreten zündwirksamer mechanisch erzeugter Funken infolge des Anlaufens oder Anschlagens der Mischwerkzeuge wird durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung vermieden. Des Weiteren kommen geeignete Materialpaarungen, wie bspw. Edelstahl-

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 8 von 12  
Revision 0  
..2011

Edelstahl, zum Einsatz, die bei Eintritt von einzelnen Schlägen nicht zur Funkenbildung neigen.

Reibungsbedingte heiße Oberflächen an den Lagern und Wellendurchführungen werden durch Temperaturüberwachung vermieden. Zur Vermeidung eines Staubeintrittes sind die Dichtungen luftgespült. Die Temperaturüberwachungen sind hartverdrahtet und schalten den Antrieb bei Überschreitung einer Temperatur von 80 °C spannungsfrei. Wodurch auch Anbackungen von schmelzendem Produkt weitestgehend vermieden werden.

Die im Mischer eingesetzten elektrischen Betriebsmittel weisen eine maximale Oberflächentemperatur von 120 °C auf und sind für den Betrieb in Zone 20 geeignet. Bezüglich der Auswahl und Errichtung der elektrischen Betriebsmittel wurden die Vorgaben der DIN EN 60079-14 beachtet.

Zur Vermeidung von gefährlichen Aufladungen sind sämtliche leit- und ableitfähigen Anlagenteile in den betrieblichen Potenzialausgleich eingebunden und weisen einen Ableitwiderstand von  $< 10^6 \Omega$  auf. Isolierende Beschichtungen mit einer Durchschlagsspannung  $> 4 \text{ kV}$  werden nicht verwendet. Die infolge des Mischguthandlings zu erwartenden Büschelentladungen sind für Stäube nicht zündwirksam.

Zur Vermeidung eines Lager- oder Dichtungsschadens erfolgen eine Verschleißprüfung sowie die Wartung des Mixers entsprechend den Herstellervorgaben in Intervallen von höchstens 8 Wochen je nach Anlagenauslastung. Hierbei werden die Lagerschmierung, der Mindestabstand zwischen dem Mischbehälter und den einzelnen Mischwerkzeugen sowie der feste Sitz aller Schraubverbindungen im Inneren kontrolliert.

Halbjährlich werden die Funktionsfähigkeit und das Ansprechverhalten der MSR-Einrichtungen mit Sicherheitsfunktion, wie die Temperaturüberwachung, Stellungsanzeiger der Befüll- und Entleerklappen sowie die Verriegelung der Revisionsklappen, geprüft. Festgeschrieben und protokolliert werden die Wartungen im Rahmen des betriebseigenen Wartungsplans.

Nach dem Austausch einer Dichtung wird der Mischer grundsätzlich zunächst ohne Mischgut betrieben und die Temperaturentwicklung im Bereich der neuen Dichtung hinsichtlich der normalen Betriebsparameter überprüft.

Zur Verhinderung von wirksamen Zündquellen ist für die Durchführung von Heißenarbeiten, wie bspw. der Einsatz von Winkelschleifern oder Schweißgeräten, eine schriftliche Arbeitsfreigabe erforderlich. Heißenarbeiten werden im Bereich des Mixers grundsätzlich erst nach Beseitigung sämtlicher Staubablagerungen und nur mit einer Brandsicherheitswache durchgeführt.

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Seite 9 von 12  
Revision 0  
..2011

Die organisatorische Regelung zur Durchführung von Heißarbeiten ist in einer Betriebsanweisung dargelegt.

Eine tabellarische Zusammenfassung der Zündgefahrenanalyse und der entsprechend angewandten technischen sowie organisatorischen Schutzmaßnahmen ist im **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** in Tabelle 2 aufgeführt.

### **7 Zusammenfassung**

Das auf Basis der vorliegenden Gefährdungsbeurteilung umgesetzte Explosionsschutzkonzept ist im betrieblichen Explosionsschutzdokument nach § 6 BetrSichV beschrieben.

Die Prüfung vor Inbetriebnahme nach § 14 (1) sowie Anhang 4 A Nr. 3.8 BetrSichV wurde durch eine befähigte Person mit besonderer Kenntnis auf dem Gebiet des Explosionsschutzes gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS 1201 mit dem Teil 1 durchgeführt.

Die Wirksamkeit der Explosionsschutzmaßnahmen wird im Rahmen der ermittelten Prüffrist von 3 Jahren durch eine befähigte Person gemäß TRBS 1203 nach den Vorgaben der TRBS 1201 mit dem Teil 1 überprüft. Die Prüfergebnisse werden in Form von Prüfaufzeichnungen dokumentiert.

Musterhausen, den

Bearbeiter

Seite 10 von 12  
Revision 0  
..2011

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

**Anhang 1 Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen**

Tabelle 2: Zündgefahren und Schutzmaßnahmen

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme					Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen				
	Potentielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen	Gründe für die Bewertung		Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen	Notwendige Einschränkungen
1.	Heiße Oberfläche	Lagerschaden			x		Infolge von seltenen Störungen, wie vorzeitiger Verschluss oder Materialfehlern, kann ein Lagerschaden auftreten. Daraus können unzulässig hohe Temperaturen am Lager resultieren, was infolge von Wärmeleitung auch im Mischentmerrn zu gefährlichen Zuständen führen kann.	Unzulässige Lagererwärmungen werden über je eine Temperaturüberwachung an den Wellendurchführungen der Mischertwellen erfasst und direkt durch Hartverdrahtung zur Abschaltung des Mischerrantriebes geführt. Regelmäßige Wartung und Verschleißfortführung entsprechend den Herstellervorgaben.				x	T ≤ 120 °C

Seite 11 von 12  
Revision 0  
..2011

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**


Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen					
	Potenzielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen	Notwendige Einschränkungen	
2.	Heiße Oberflächen, mechanisch erzeugte Funken	Erwärmung oder Funkengarben durch Reibung zwischen den Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter		x			Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen  Regelmäßige Wartung und Verschleißprüfung sowie Kontrolle des Mindestabstandes zwischen Mischwerk und Mischbehälter sowie aller Schraubverbindungen im Inneren. Vermeidung des Fremdkörpereintrages durch Roboterföpfung. Explosionsdruckstoffsichere Bauweise des Mixers bis 10 bar. Begrenzung der Relativgeschwindigkeit < 1 m/s während der Befüllung und Entleerung mit offenen Absperriklappen über die Phasensteuerung.  Erfassung von unzulässiger Erwärmung an Dichtungen durch Temperaturüberwachung an den Wellendurchführungen. Lüftung an den Dichtungen zur Vermeidung eines Stauberntites. Kontrolle der Temperaturentwicklung an der Dichtung nach Austausch oder Wartung.		x			Ts120°C	
3.	Heiße Oberfläche	Erwärmung durch Reibung an den Wellenabdichtungen		x			Unzulässige Erwärmung hervorgerufen durch Staubeintritt oder schadhaftes bzw. falsch montierte Dichtungen.				x		Ts120°C
4.	Heiße Oberfläche	Überlastung von Betriebsmitteln mit Kontakt zu Zone 20				x	Auswahl und Errichtung ausschließlich für den Betrieb in Zone 20 geeigneter Betriebsmittel. Installation von elektrischen Betriebsmitteln nach DIN EN 60079-14.					x	T120°C

**Mustermann AG**  
**Muster-Gefährdungsbeurteilung**  
**Horizontaler Zwangsmischer**

Nr.	Zündgefahr		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen Maßnahme				Eingeleitete Maßnahmen zur Verhinderung des Wirksamwerdens der Zündquelle	Häufigkeit des Auftretens einschließlich der eingeleiteten Maßnahmen					
	Potentielle Zündquelle	Primäre Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen		Gründe für die Bewertung	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartender Störung	Bei seltener Störung	Nicht zu berücksichtigen
5.	Heißarbeiten, Instandsetzung	Durchführung von Heißarbeiten oder Instandsetzungen				x	Die Durchführung von Heißarbeiten bedarf der schriftlichen Arbeitsfreigabe sowie der Stellung einer Brandsicherheitswache. Abgelagerte Stäube werden vor Beginn der Heißarbeiten saugend entfernt.	Beschreibung der eingeleiteten Maßnahmen				x	-
6.	Elektrostatische Entladungen	Isolierte elektrische leitende Anlagenteile	x				Isoliert gelagerte leitfähige Anlagenteile können gefährlich hoch aufgeladen werden. Funkenentladungen sind nicht auszuschließen.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.				x	-
7.	Elektrostatische Entladungen	Nicht leitfähige Anlagenteile, isolierende Beschichtungen				x	Nicht leitfähige oder mit isolierenden Beschichtungen versehene leitfähige Anlagenteile werden nicht verwendet. Zündwirksame Gleitbleischiebentladungen können daher nicht auftreten.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.				x	-
8.	Exotherme Reaktionen, Selbstzündung	Unzulässig hohe Erwärmung des Schüttgutes			x		Keine vorgeschalteten Prozesse, die zu gefährlichen Temperaturerhöhungen des Schüttgutes führen könnten.	Maßnahmen zur Vermeidung unzulässiger Erwärmungen gemäß Punkt 1., 2., 3. und 4.				x	T≤120°C



## A.6 Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern"



### ERHEBUNGSBOGEN - EXPLOSIONSSCHUTZKONZEPTE AN MISCHERN -

<b>Firmenname</b> .....	<b>Mischer</b>	
<b>Anschrift</b> .....	<b>Hersteller</b> .....	
.....	<b>Typ</b> .....	
	(horizontal / vertikal)	
<b>Ansprechpartner</b> .....	<b>Baujahr</b> .....	
<b>Telefon</b> .....	<b>Volumen</b> .....	
<b>Mobil</b> .....	<b>Max. Drehzahl</b> .....	
<b>E-Mail</b> .....	<b>Antriebsleistung</b> .....	
<b>Industriezweig</b> .....	<b>Trommeldurchmesser</b> .....	
<b>Mischvorgang</b>	<b>Umfangsgeschwindigkeit</b> .....	
<b>Mischbetrieb</b> (konti-/ diskontinuierlich) .....	<b>Art und Anzahl der bewegten Teile</b> .....	
<b>Mischdauer</b> .....	<b>Abstand zw. Mischerwand und bewegten Teilen</b> .....	
<b>Drehzahl</b> .....	<b>Betriebsstunden</b> .....	
<b>Betriebsüberdruck</b> .....	<b>Kennzeichnung (RL 94/9/EG)</b> .....	
<b>Betriebstemperatur</b> .....	<b>Max. Betriebsüberdruck</b> .....	
<b>Mischprinzip</b> (siehe Anhang) .....	<b>Max. Betriebstemperatur</b> .....	


  

**Angabe der kritischsten Kennzahlen aller eingesetzten Stoffe**

	Stäube	Hybride Gemische	Lösemittel
Ausgangsstoffe			
Korngrößenverteilung			
Medianwert			
Flammpunkt			
Brennzahl			
Untere			
Explosionsgrenze			
Zündtemperatur bzw.			
Zündpunkt			
Glimmtemperatur			
Brennzahl			
Selbstentzündungs- temperatur			
Mindestzündenergie mit Induktivität <input type="checkbox"/>			
K <sub>St</sub> -Wert			
Maximaler Explosionsüberdruck			
Spezifischer Widerstand			

DEKRA EXAM GmbH, Dinnendahlstraße 9, 44809 Bochum, Telefon +49 234 3696 113, Telefax +49 234 3696 150, matthias.reinecke@dekra.com

Abbildung 20: Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern" Seite 1



## ERHEBUNGSBOGEN

### - EXPLOSIONSSCHUTZKONZEPTE AN MISCHERN -

**Bisher angewandtes Explosionsschutzkonzept inklusive Einschätzung der Wirksamkeit bzw. Mängel sowie Vorschläge zur Ertüchtigung**

	Innen	
<i>Zoneneinteilung</i>	Außen	
<i>Vermeiden Explosionsfähiger Atomsphäre durch</i>	einen Mindestfüllgrad von    %	<input type="checkbox"/>
	Inertisierung mit	<input type="checkbox"/>
Bemerkungen / Erläuterungen		
<i>Vermeiden wirksamer Zündquellen durch</i>	Überwachung von Glimmnesteintragung durch:	<input type="checkbox"/>
	Temperaturüberwachung an	<input type="checkbox"/>
	Verriegelung von	
	ab    °C	
	Verriegelung über (SPS, SSPS, Hartverdrahtung)	
	Den Einsatz von Metallabscheidern vor:	<input type="checkbox"/>
	Den Einsatz von Siebabscheidern mit einer Maschenweite von maximal    mm vor:	<input type="checkbox"/>
	Vermeidung von Elektrostatik durch:	<input type="checkbox"/>
Wartung und Instandsetzung (Bauteil / Intervall)		
Bemerkungen / Erläuterungen		
<i>Konstruktiver Explosionsschutz durch</i>	Explosionssichere Bauweise (druckfest / druckstoßfest)	<input type="checkbox"/>
	Explosionssichere Bauweise bis    bar	
Bemerkungen / Erläuterungen		
	Druckentlastung	<input type="checkbox"/>
	Ansprechdruck der Entlastungseinrichtung	bar
Bemerkungen / Erläuterungen		
	Unterdrückung	<input type="checkbox"/>
Bemerkungen / Erläuterungen		
	Explosionstechnische Entkopplung	<input type="checkbox"/>
Bemerkungen / Erläuterungen		

DEKRA EXAM GmbH, Dinnendahlstraße 9, 44809 Bochum, Telefon +49 234 3696 113, Telefax +49 234 3696 150, matthias.reinecke@dekra.com

Abbildung 21: Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern" Seite 2



**ERHEBUNGSBOGEN**  
**- EXPLOSIONSSCHUTZKONZEPTE AN MISCHERN -**

Beschreibung bisher stattgefundener Ereignisse  
(Arbeitsunfälle, Brände, Explosionen)

Sonstige Bemerkungen / Erläuterungen

DEKRA EXAM GmbH, Dinnendahlstraße 9, 44809 Bochum, Telefon +49 234 3696 113, Telefax +49 234 3696 150, matthias.reinecke@dekra.com

Abbildung 22: Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern" Seite 3



## ERHEBUNGSBOGEN - EXPLOSIONSSCHUTZKONZEPTE AN MISCHERN -

Anhang: Übersicht über die Mischprinzipien (nur Horizontalmischer)

Tabelle 1: Übersicht der Froude-Zahlen (Fr) in Abhängigkeit zum Mischerradius und zur Umfangsgeschwindigkeit

v in m/s	R in m								
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
0.5	0.13	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01
1	0.51	0.25	0.17	0.13	0.10	0.08	0.07	0.06	0.06
1.5	1.15	0.57	0.38	0.29	0.23	0.19	0.16	0.14	0.13
2	2.04	1.02	0.68	0.51	0.41	0.34	0.29	0.25	0.23
2.5	3.19	1.59	1.06	0.80	0.64	0.53	0.46	0.40	0.35
3	4.59	2.29	1.53	1.15	0.92	0.76	0.66	0.57	0.51
3.5	6.24	3.12	2.08	1.56	1.25	1.04	0.89	0.78	0.69
4	8.15	4.08	2.72	2.04	1.63	1.36	1.16	1.02	0.91
4.5	10.32	5.16	3.44	2.58	2.06	1.72	1.47	1.29	1.15
5	12.74	6.37	4.25	3.19	2.55	2.12	1.82	1.59	1.42
5.5	15.42	7.71	5.14	3.85	3.08	2.57	2.20	1.93	1.71
6	18.35	9.17	6.12	4.59	3.67	3.06	2.62	2.29	2.04
6.5	21.53	10.77	7.18	5.38	4.31	3.59	3.08	2.69	2.39
7	24.97	12.49	8.32	6.24	4.99	4.16	3.57	3.12	2.77
7.5	28.67	14.33	9.56	7.17	5.73	4.78	4.10	3.58	3.19
8	32.62	16.31	10.87	8.15	6.52	5.44	4.66	4.08	3.62
8.5	36.82	18.41	12.27	9.21	7.36	6.14	5.26	4.60	4.09
9	41.28	20.64	13.76	10.32	8.26	6.88	5.90	5.16	4.59
9.5	46.00	23.00	15.33	11.50	9.20	7.67	6.57	5.75	5.11
10	50.97	25.48	16.99	12.74	10.19	8.49	7.20	6.37	5.66

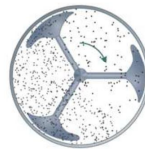
Tabelle 2: Übersicht der Drehzahl (U/s) in Abhängigkeit zum Mischerradius und zur Umfangsgeschwindigkeit

v in m/s	R in m								
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
0.5	0.40	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04
1	0.80	0.40	0.27	0.20	0.16	0.13	0.11	0.10	0.09
1.5	1.19	0.60	0.40	0.30	0.24	0.20	0.17	0.15	0.13
2	1.59	0.80	0.53	0.40	0.32	0.27	0.23	0.20	0.18
2.5	1.99	0.99	0.66	0.50	0.40	0.33	0.28	0.25	0.22
3	2.39	1.19	0.80	0.60	0.48	0.40	0.34	0.30	0.27
3.5	2.79	1.39	0.93	0.70	0.56	0.46	0.40	0.35	0.31
4	3.18	1.59	1.06	0.80	0.64	0.53	0.45	0.40	0.35
4.5	3.58	1.79	1.19	0.90	0.72	0.60	0.51	0.45	0.40
5	3.98	1.99	1.33	0.99	0.80	0.66	0.57	0.50	0.44
5.5	4.38	2.19	1.46	1.09	0.88	0.73	0.63	0.55	0.49
6	4.77	2.39	1.59	1.19	0.95	0.80	0.68	0.60	0.53
6.5	5.17	2.59	1.72	1.29	1.03	0.86	0.74	0.65	0.57
7	5.57	2.79	1.86	1.39	1.11	0.93	0.80	0.70	0.62
7.5	5.97	2.98	1.99	1.49	1.19	0.99	0.85	0.75	0.66
8	6.37	3.18	2.12	1.59	1.27	1.06	0.91	0.80	0.71
8.5	6.76	3.38	2.25	1.69	1.35	1.13	0.97	0.85	0.75
9	7.16	3.58	2.39	1.79	1.43	1.19	1.02	0.90	0.80
9.5	7.56	3.78	2.52	1.89	1.51	1.26	1.08	0.94	0.84
10	7.96	3.98	2.65	1.99	1.59	1.33	1.14	0.99	0.88

**Schubmischen**  
Fr < 2,5



**Schleudermischen**  
2,5 < Fr < 11



**Zentrifugieren**  
Fr > 11

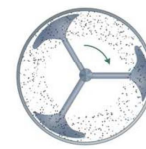


Abbildung 23: Erhebungsbogen "Explosionsschutzkonzepte an Mischern" Seite 4

## A.7 Darstellung der geplanten und tatsächlichen Arbeits- und Zeitabläufe

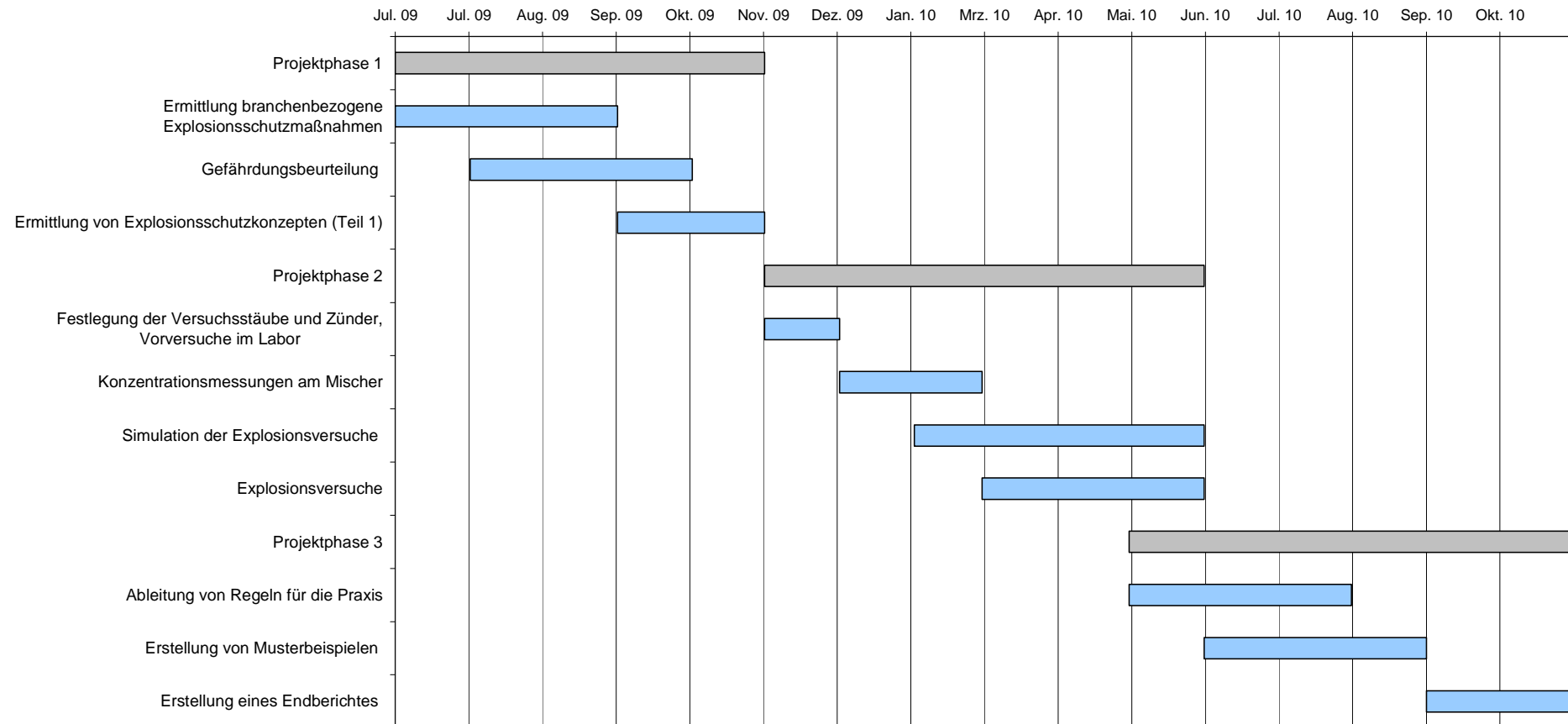


Abbildung 24: geplante Arbeits- und Zeitabläufe des Forschungsvorhabens

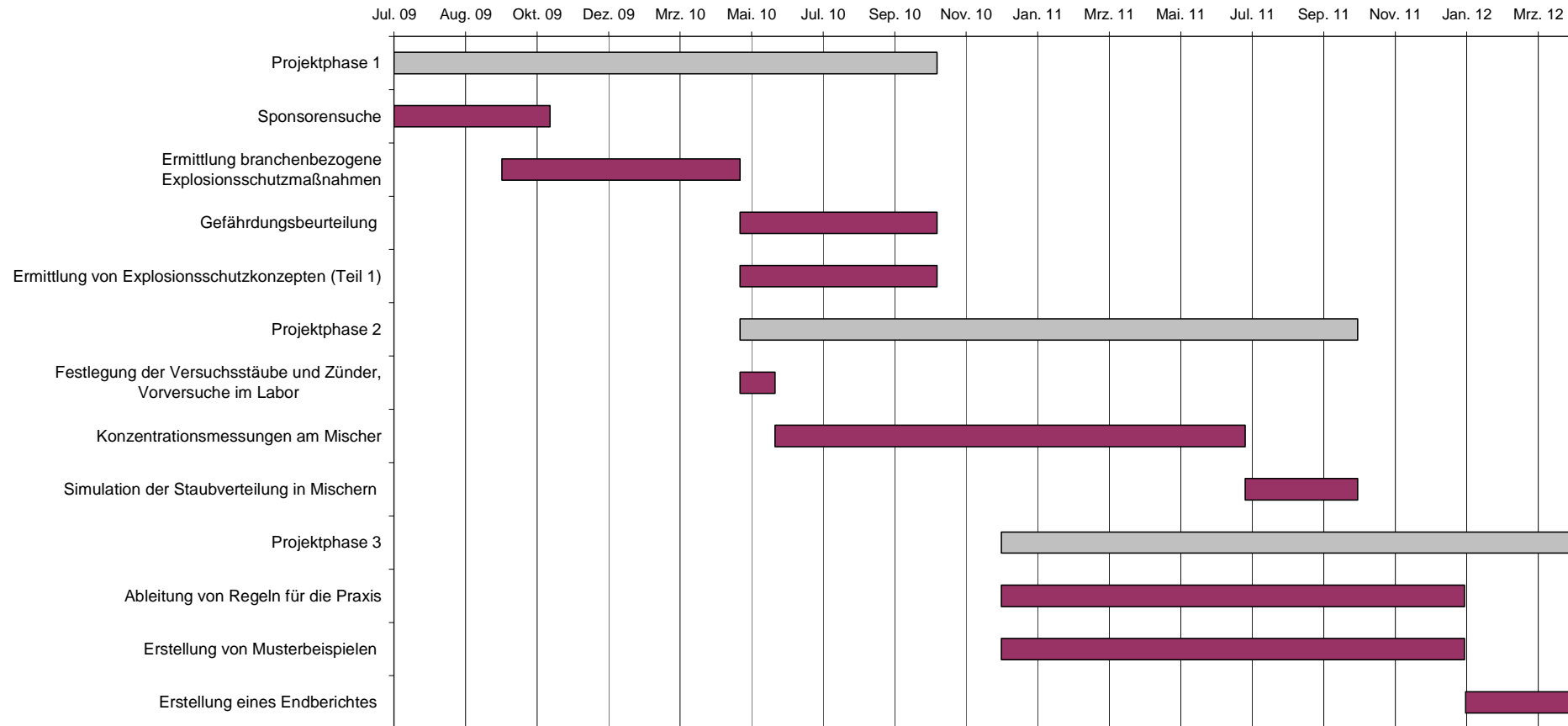


Abbildung 25: tatsächliche Arbeits- und Zeitabläufe des Forschungsvorhabens