



**Observable Größen zur Kritikalitätsbewertung  
explosionsgefährlicher Apparaturen  
im Kontext der Betriebssicherheit**

**Dissertation  
zur Erlangung eines Doktorgrades**

in der  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik  
der  
**Bergischen Universität Wuppertal**

vorgelegt von  
Katharina Maiwald  
aus Bautzen

**Wuppertal 2023**

**Prüfungskommission:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Janoske (Vorsitz)  
Bergische Universität Wuppertal  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik  
Lehrstuhl Strömungsmechanik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth (Gutachter)  
Bergische Universität Wuppertal  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik  
Lehrstuhl für Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Kockmann (Gutachter)  
Technische Universität Dortmund  
Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Ulrich Klenk (Mitglied)  
Bergische Universität Wuppertal  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Juli 2023

Wuppertal

# Danksagung

„Keine Schuld ist dringender als die, Dank zu sagen“

(Marcus Tullius Cicero)

Nach jahrelanger Schaffenszeit mit dem Ziel der Erreichung des Doktorgrades möchte ich die Gelegenheit nutzen und ebendiese Schuld mit einem herzlichen Dankeschön begleichen.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth. Während meiner Zeit am Lehrstuhl Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung an der Bergischen Universität Wuppertal weckte er nicht nur meine Motivation und Begeisterung für die Disziplin des Explosionsschutzes, sondern unterstützte als Doktorvater mein Promotionsvorhaben und tauschte sich mit mir über so manche Passagen aus, bis sie R-U-N-D waren. Die Barth'sche Schule prägt seither meine Arbeit.

Auch den weiteren Mitwirkenden der Prüfungskommission Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Janoske, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Kockmann und Dr.-Ing. habil. Ulrich Klenk gilt mein aufrichtiger Dank.

Natürlich möchte ich meinen Dank auch den Mentoren, Projektpartnern und Kollegen aussprechen, insbesondere von der Nestec Ltd., Nestlé Research Konolfingen, welche meine Forschungszeit an der Bergischen Universität Wuppertal durch ein spannendes betriebspraktisches Forschungsprojekt überhaupt erst ermöglichten. Herr Dr. Pablo Lerena war mir in dieser Zeit stets Inspiration für wissenschaftliches Arbeiten und Denken. Auch bei der Speira GmbH konnte ich anschließend meine Datenerhebung fortsetzen und interessante Diskussionen mit den Kollegen im Rheinwerk führen. Besten Dank an Marco Zenke und Dr. Thomas Schmitz.

Freunden, Familie und Lieblingsemenschen, die mich durch ein offenes Ohr, Mitlesen oder Antreiben unterstützten, sollen an dieser Stelle natürlich nicht unbenannt bleiben - herzlichen Dank. Und allen voran danke ich meinem Sohn Mats, der es mir mit seiner genügsamen Art erlaubt hat, meine Arbeit in seinem ersten Lebensjahr nahezu abschließen zu können. Dir möchte ich diese Dissertation widmen.

# Kurzfassung

Die gängigste Vorstellung eines explosionsfähigen Stoff-Luft-Gemisches ist die einer homogenen Verteilung innerhalb von Apparaturen. Diese gleichmäßige Verteilung wird zudem als konstant über die Zeit angesehen. Dieser angenommene Gemischzustand bildet die Grundlage für die weitere Sicherheitsbetrachtung explosionsgefährlicher Apparaturen im Kontext der Betriebssicherheit. Die Realität stimmt mit dieser Annahme häufig nicht überein. Es ist zwischenzeitlich bekannt, dass sich zwei unterschiedliche Arten von Zuständen innerhalb von Apparatvolumen einstellen können: homogene und inhomogene Gemische, die in ihrer Summe einen instantanen Zustand ergeben. Um diese Eingangsgröße zur Sicherheitsbetrachtung beschreibbar zu machen, wurde unter dem Einsatz von Prozessanalysetechniken eine Merkmalsbeschreibung für staub- und gasführende Anlagen generiert.

Mit Hilfe einer mikroskopischen Beschreibung der instantanen Koinzidenzbedingungen von explosionsfähigen Stoff-Luft-Gemisch im Spiegelbild wirksamer Zündquellen in direkter zeitlicher und örtlicher Abhängigkeit ist in dessen Folge eine Akzeptanz von Maßnahmen außerhalb geltender Konventionen zu erwarten und dem Schaffen von intrinsischen Sicherheitsreserven mit gleichbleibend hohem Sicherheitsniveau entgegenzuwirken.

Hierfür wurde ein Kritikalitätsmodell basierend auf einer erweiterten Risikoformel entwickelt und auf beide mittels observabler Größen exemplarisch charakterisierten Gemischzustände angewendet. Dieses Kritikalitätsmodell findet im Ergebnis dieser Dissertation Einzug in das über Jahrzehnte bewährte Vorgehen der Explosionsgefährdungsbeurteilung und erweitert dieses als „*Duktus*“ bekannte Abfrageschema um einen parallelen Verlauf mit Clusterung von Teilvolumen gefährlicher explosionsfähiger und nicht-gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre mit dem Ziel, die Wahrscheinlichkeit über die Aktivierung eines Ereignisses genauer zu charakterisieren, den Output für die Auslegung von Sicherheitsmaßnahmen zu schärfen und somit deren Verlässlichkeit zu erhöhen. Eine optimierte systematische (in ihrem Vorgehen auch systemische) Sicherheitsbetrachtung ist die Folge. Die Verlässlichkeit - in der vorliegenden Arbeit charakterisiert durch die Aspekte der Zuverlässigkeit, Ökonomie und Sicherheit - des generierten Outputs wird bei Anwendung für zu treffende Maßnahmen vorausgesetzt.

Die Beschreibungen zur Gewinnung und Bewertung observabler Größen vor der Sicherheitsbetrachtung, die exemplarische Anwendung des Modells und erweiterten Vorgehens und dessen Dokumentation sowie die Zuhilfenahme anerkannter Methoden, wie der normativen Zündquellenbewertung oder der HAZOP-Analyse zur Identifikation betriebsüblicher Störungen, liefern im Gesamtbild zudem einen kompetenzbildenden Beitrag für Beurteiler vergleichbarer Herausforderungen.

# Abstract

## **“Observable quantities for criticality assessment of explosive-hazarded apparatus in the context of operational safety”**

The most common conception of an explosive substance-air-mixture is that of a homogeneous distribution within an apparatus. This uniform distribution is also considered to be constant over time. This assumption about the hazardous explosive mixture provides the basis for safety assessment of an apparatus in the context of operational safety. Reality often does not agree with this assumption. It is known in the meantime that two different types of conditions can occur within the volume of an apparatus: homogeneous and inhomogeneous mixtures, which in sum results in an instantaneous condition. In order to make this input-variable of the safety assessment describable, process analytic techniques were used to characterise the conditions within a dust-loaded as well as a gas-loaded system.

With the help of a microscopic description of the instantaneous coincidence conditions of explosive substance-air-mixtures and effective ignition sources in direct temporal and local dependence, an acceptance of measures outside of valid conventions can be expected as a result and the creation of intrinsic safety reserves with a consistently high safety level can be counteracted.

For this purpose, a model of criticality based on an extended risk formula was developed and applied to both exemplary characterized systems and their mixtures by means of observable quantities. As a result of this dissertation, this model of criticality finds its way into the procedure of explosion hazard assessment, which has been tried and tested over decades, and expands the questionnaire known as "*Duktus*" by including a parallel procedure with clustering of partial volumes of hazardous explosive and non-hazardous explosive atmosphere with the aim of characterizing the dependability of activation of an event more precisely, refine the output for the design of safety measures and thus increasing their reliability. An optimized systematic (in its procedure also systemic) safety assessment is the result. The dependability - characterized in the present work by the aspects of reliability, efficiency and safety - of the generated output is assumed for applying measures.

The descriptions of how to obtain and evaluate observable quantities prior to the safety assessment, the exemplary application of the model and extended procedure and its documentation, as well as the use of approved methods, such as the normative ignition source assessment or the HAZOP-analysis for the identification of operational faults, also provide a competence-forming contribution for assessors of comparable challenges.

# Inhaltsübersicht

Danksagung.....	I
Kurzfassung .....	III
Abstract .....	V
Inhaltsübersicht.....	VII
Inhaltsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Ingenieurwissenschaftliches Verorten des Untersuchungsgegenstandes.....	12
3 Charakterisieren apparativ-technischer und prozessual-betrieblicher Bedingungen der untersuchten Realanlagen .....	27
4 Erheben und Auswerten observabler Größen staubführender Anlagen.....	47
5 Erheben und Auswerten observabler Größen gasführender Anlagen.....	75
6 Modellieren der Kritikalität.....	102
7 Optimieren der systematischen Sicherheitsbetrachtung.....	134
8 Fazit und Ausblick .....	150
Bilderverzeichnis .....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XIV
Literaturverzeichnis.....	XV
Lebenslauf.....	XXX

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsübersicht</b> .....	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	3
1.2 Zielstellung .....	7
1.3 Aufbau und Herangehensweise .....	10
<b>2 Ingenieurwissenschaftliches Verorten des Untersuchungsgegenstandes</b> .....	<b>12</b>
2.1 Rechtliche Einordnung und Grundlagen .....	13
2.2 Bestimmung und Unsicherheiten sicherheitstechnischer Kenngrößen .....	16
2.3 Vorgehen und Grenzen im Beurteilungsprozess der Explosionsgefahr .....	20
2.4 Der „neue“ Duktus und seine „alten“ Konventionen .....	22
<b>3 Charakterisieren apparativ-technischer und prozessual-betrieblicher Bedingungen der untersuchten Realanlagen</b> .....	<b>27</b>
3.1 Explosionsfähiges Staub-Luft-Gemisch im Inneren von Apparaturen .....	28
3.1.1 Anlagencharakteristik der exemplarischen Realanlage.....	29
3.1.2 Ermitteln von Störungsszenarien mittels HAZOP-Analyse.....	32
3.1.3 Stand der Sicherheitstechnik .....	33
3.2 Explosionsfähiges Gas-Luft-Gemisch im Inneren von Apparaturen .....	34
3.2.1 Anlagencharakteristik der exemplarischen Realanlage.....	35
3.2.2 Ermittlung von Störungsszenarien mittels HAZOP-Analyse.....	38
3.2.3 Stand der Sicherheitstechnik .....	41
3.3 Prozessanalytische Technologien.....	42
3.4 Vergleich der charakteristischen Bedingungen und Validierbarkeit.....	45

<b>4 Erheben und Auswerten observabler Größen staubführender Anlagen.....</b>	<b>47</b>
4.1 Erfassung der Bewertungsparameter.....	50
4.2 Messung der Staubkonzentration und Partikelgeschwindigkeit.....	54
4.2.1 Machbarkeitsstudie.....	54
4.2.2 Analysetechniken und Messprinzipien.....	56
4.2.3 Versuchsaufbau und Durchführung Realanlage.....	58
4.2.4 Datenerfassung und Auswertung zur Staubkonzentration .....	59
4.2.5 Datenerfassung und Auswertung zur Partikelgeschwindigkeit.....	63
4.3 Bewertung der Zündquellen .....	66
4.4 Zwischenfazit .....	72
<b>5 Erheben und Auswerten observabler Größen gasführender Anlagen.....</b>	<b>75</b>
5.1 Erfassung der Bewertungsparameter.....	77
5.2 Messung der Gaszusammensetzung und Mengen.....	82
5.2.1 Machbarkeitsstudie.....	82
5.2.2 Analysetechniken und Messprinzipien.....	85
5.2.3 Versuchsaufbau und Durchführung Realanlage.....	87
5.2.4 Datenerfassung und Auswertung .....	89
5.3 Bewertung der Zündquellen .....	96
5.4 Zwischenfazit .....	97
<b>6 Modellieren der Kritikalität.....</b>	<b>102</b>
6.1 Sicherheitlicher Zusammenhang örtlicher und zeitlicher Varianzen .....	103
6.1.1 Varianz im Teilsystem bei Normalbetrieb (Stäube).....	105
6.1.2 Varianz im Teilsystem bei anzunehmenden Störungen (Gase) .....	109
6.1.3 Superposition.....	111
6.2 Kausal-orientierte Bedeutung.....	114
6.2.1 Experimentelle Bewertung korrelierender Bedingungen.....	114
6.2.2 Experimentelle Bewertung der Glimmnestzündwirksamkeit .....	118
6.3 Final-orientierte Bedeutung.....	120
6.3.1 Rechnerische Bewertung.....	120
6.3.2 Experimentelle Bewertung.....	127
6.3.2.1 Auswirkungen nicht explosionstechn.-entkoppelter Anlagenteile.....	127
6.3.2.2 Auswirkungen partiell explosionsfähiger Atmosphären .....	130

6.4 Zwischenfazit .....	132
<b>7 Optimieren der systematischen Sicherheitsbetrachtung.....</b>	<b>134</b>
7.1 Anforderungen an die Kritikalitätsbewertung .....	134
7.2 Zugewinn für die Zuverlässigkeit.....	135
7.3 Zugewinn für die Ökonomie .....	137
7.4 Zugewinn für die Sicherheit .....	140
7.5 Abgeleitete Vorgehensweise .....	142
<b>8 Fazit und Ausblick .....</b>	<b>150</b>
8.1 Ergebnis.....	150
8.2 Diskussion und Ausblick.....	152
8.2.1 Ergänzung zum Stand der Technik Sprühtrocknung.....	155
8.2.2 Ergänzung zum Stand der Technik Brennofen .....	157
<b>Bilderverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>XV</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>XXX</b>

# 1 Einleitung

## Inhalt

---

1.1 Motivation .....	3
1.2 Zielstellung .....	7
1.3 Aufbau und Herangehensweise .....	10

---

Der Explosionsschutz bildet eine besondere Disziplin der Betriebssicherheit und gilt somit als Teil der Arbeitssicherheit. Expertenschätzungen zufolge zeichnet sich die überwiegende Zahl der betrieblichen Explosionsgeschehnisse dadurch aus, dass deren Auswirkungen auf das Gelände des betroffenen Unternehmens begrenzt blieben und nur sehr wenige Personen betroffen waren, vgl. (Barth 2019). Die Öffentlichkeit nimmt eher die seltenen störfallartigen und medial aufgegriffenen Großexplosionsereignisse wahr. Die Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge dieser betriebstypischen Ereignisse sind eng an die detaillierten Bedingungen der Stoffe, Apparate und Prozesse geknüpft. Aufgrund fortschreitender Entwicklungen hin zu kompliziert ausgelegten Apparaten und Prozessen erklärt sich auch der stetig anhaltende Forschungsbedarf zum sicheren Betrieb dieser Systeme. Moderne Anlagen vereinen zunehmend mehrere verfahrenstechnische Einheitsoperationen, während diese früher auf separate Apparate verteilt waren. Beispielsweise findet in einem Fließbett heute nicht mehr nur die Produktförderung statt, sondern auch die Nachtrocknung und die Konditionierung mit Zusatzstoffen. Bei manchen modernen Applikationen verändert sich demzufolge nicht nur die Kompliziertheit der verfahrenstechnischen Systeme, sondern es entsteht bisweilen sogar Komplexität. Beides ruft neue Herausforderungen für die Sicherheitsbetrachtung und auch für die sicherheitsgerichtete Forschung hervor.

Doch auch für Bestandsanlagen gelten nicht alle Anlagenbedingungen und resultierenden potentiellen Explosionsgefahren als identifiziert und ganzheitlich bewertet. Heute geltende Anforderungen finden für Altanlagen, wie Anlagen im Bestand im betriebsüblichen Umfeld

synonymhaft bezeichnet werden, noch immer nicht in Gänze Anwendung. Dieser Gegebenheit steht jedoch der Wille des Gesetzgebers gegenüber, die Anlagen stets unter dem geltenden Stand der Technik sicher zu betreiben. Ein Bestandsschutz existiert nicht. (Barth et al. 2020) bezeichnet dieses Postulat als dynamische Kopplung.

Die beiden Apparaturen Sprühturm und Brennofen weisen den Forschungsbedarf für eine systematische Evaluierung der Explosionssicherheit und die Gewinnung relevanter, bislang unbekannter Parameter insbesondere hinsichtlich der Wechselwirkung stofflicher Merkmale und geltender Apparate- und Prozessbedingungen auf. Die vergleichbaren ingenieurwissenschaftlichen Defizite und die Zugänglichkeit beider Anlagen für den Verfasser sorgen dafür, dass mit dieser Abhandlung sowohl staub- als auch gasführende Anlagen gleichermaßen exemplarisch für die wissenschaftliche Herangehensweise und Bearbeitung der Problemstellung Berücksichtigung finden, ohne eine betriebspraktische Lösung in den Fokus zu stellen.

Die gängigste Vorstellung eines explosionsfähigen Stoff-Luft-Gemisches ist die einer homogenen Verteilung innerhalb von Apparaturen. Diese gleichmäßige Verteilung wird zudem als konstant über die Zeit angesehen. Dieser angenommene Gemischzustand bildet die Grundlage für die weitere Sicherheitsbetrachtung. Die Realität stimmt mit dieser Annahme jedoch häufig nicht überein. Industriemaßstäbliche Messungen und Simulationsmöglichkeiten zur Charakterisierung explosionsfähiger Gemische liegen nur selten vor. Numerische Simulationen hochdynamischer Staub-Luft-Gemische sind bis heute nicht gesichert möglich, wenngleich versucht wird, Algorithmen bisheriger Modelle für erfolgreich durchgeführte Simulationen von Gas-Luft-Gemischen ersatzweise zu übertragen. Industriemaßstäbliche Messungen dynamischer Konzentrationsverteilungen wurden in der Vergangenheit zwar durchgeführt, vgl. z. B. (Siwek 2000; Siwek et al. 2004), beschränken sich jedoch auf wenige Apparatetypen und sind nicht umfangreich zugänglich.

Die Erfassung notwendiger Parameter als Beurteilungsgrundlage in Form quantitativer Bemessungswerte und die anschließende Auswertung im sicherheitlichen Kontext soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit für sowohl staub- als auch gasführende Anlagen und Anlagenteile erfolgen. Vor diesem Hintergrund ist eine Kritikalitätsbewertung explosionsgefährlicher Apparaturen im Kontext der Betriebssicherheit modellhaft abzuleiten. „Explosionsgefährlich“ geht dabei aus dem Wortstamm der ursächlichen Gefahr einer potentiellen Explosion hervor und nicht aus den nach Gefahrstoffverordnung einzustufenden Gefährlichkeitsmerkmalen.

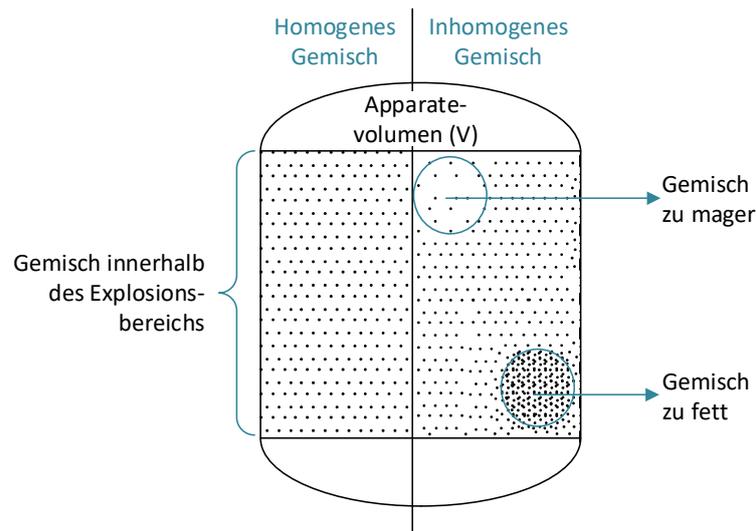
### 1.1 Motivation

Die Explosionsfähigkeit eines Stoff-Luft-Gemisches lässt sich durch bewährte und standardisierte labormaßstäbliche Prüfverfahren in Form sogenannter sicherheitstechnischer Kenngrößen bewerten, vgl. (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 1). Allerdings lässt sich nicht bei allen betrieblichen Konstellationen die erforderliche Probenentnahme in einer Weise vornehmen, dass die Produktzusammensetzung und -beschaffenheit im sicherheitlichem Kontext als repräsentativ gilt. Dies ist z. B. der Fall, wenn die zu beurteilenden stofflichen Verteilungen und Zusammensetzungen ausschließlich störungsbedingt auftreten und ggf. zudem über den Zeitverlauf der anhaltenden Störung variieren.

Ein Beispiel sicherheitstechnischer Kenngrößen ist die untere Explosionsgrenze. Ihr gegenüber steht die reale Verteilung eines brennbaren Stoffes im zu bewertenden Volumen. Um die notwendige Vergleichbarkeit von Kenngrößen und Verteilung ziehen zu können, gilt es, den Prozess hinreichend zu verstehen. Die Wichtigkeit des Prozessverständnisses vor der eigentlichen Sicherheitsbetrachtung stellte auch (Radandt 2019) noch einmal deutlich heraus. Schließlich kann nur mit einem ausreichenden Prozessverständnis die Bewegung der in der Luft dispergierten Teilchen unter Einfluss der Turbulenz der Luftströmung in den Kontext von sicherheitstechnischen Kenngrößen gestellt werden und in die Sicherheitsbetrachtung einfließen. Doch ebendiese Verteilung in Apparaturen ist nicht immer hinlänglich bekannt.

Daher wird für die Beurteilung oftmals die (rechnerische) Annahme einer homogenen Verteilung getroffen. Durch frühere Studien der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) durch (Hauert et al. 1996b) bei der axialen und tangentialen Silobefüllung ist jedoch bekannt, dass sich zwei unterschiedliche Arten von Zuständen einstellen können.

Für den Beleg der Forschungshypothese, dass sich innerhalb geschlossener Apparaturen inhomogene Verteilungen einstellen, benötigt es weitere Größen zur Charakterisierung der Merkmale eines Gemisches (z. B. Turbulenz, Partikelgeschwindigkeit, Konzentration). Diese Inhomogenitäten lassen vermuten, dass sich neben Teilvolumen explosionsfähiger Gemische auch Teilvolumen nicht-explosionsfähiger Gemische in selbigem Apparatevolumen einstellen (siehe Bild 1), die über die Zeit zusätzlich veränderlich sein können. Die Forschungshypothese ist dahingehend zu erweitern, dass dadurch auch ein Einfluss auf den Beginn und Verlauf einer Explosion gegeben ist.



**Bild 1: Forschungshypothese inhomogener Gemische**

Um diese Hypothesen in den Kontext realer Bedingungen zu stellen, werden zwei Beispielanlagen herangezogen. Dass für beide Apparaturen eine ähnliche Fragestellung in der betrieblichen Praxis aufkam, unterstützt die Motivation und den Bedarf dieser thematischen Bearbeitung mit dem Effekt, dass sowohl staub- als auch gasführende Anlagen für das angestrebte Vorgehen zur Kritikalitätsbewertung exemplarisch Anwendung finden sollen. Die ingenieurwissenschaftliche Motivation der für die Beispielanlagen geltenden Wissensdefizite sollen im Folgenden erläutert und veranschaulicht werden.

**Sprühtrocknungsanlagen** wurden ursprünglich für das Haltbarmachen des Überschusses der natürlichen Milchproduktion entwickelt. Das dabei entstehende pulverförmige Produkt stellte jedoch eine Explosionsgefahr für den Trocknungsprozess mit Auswirkungen auf die gesamte Anlagenperipherie dar. Dies gilt demnach für die Anlagenteile Trockenturm, Fließbett, Zyklon, Filter und pneumatische Leitungen sowie ggf. für das umgebende Gebäude. Die Weiterentwicklung klassischen Milchpulvers (z. B. Magermilchpulver) hin zu milchpulverbasierten Produkten mit diversen Produktbeimischungen aus Ölen, Vitaminen, Zuckern etc. sowie die qualitativen Veränderungen der Instanzeigenschaften sind bislang nicht hinreichend im bilateralen Kontext von variierenden Produkteigenschaften innerhalb eines geschlossenen Prozessschrittes und deren Explosionsfähigkeit untersucht worden. Dies gilt auch für den flexiblen Einsatz von Sprühtrocknungsanlagen, insbesondere von Bestandsanlagen und ihrer bis heute gleichbleibenden Maßnahmenarchitektur. Doch nicht nur die Produkte weisen eine stetige Weiterentwicklung auf. Auch die Anlagen- und Verfahrenstechnik unterliegt einer steigenden Komplexität, was nicht zuletzt auch die Ausmaße zum Zwecke der Wirtschaftlichkeit einschließt. Dies führt schlussendlich zu neuartigen Bautypen, die bislang in ihrer Ausführung noch nicht in

Regularien den Stand der Sicherheitstechnik beschreibend integriert worden sind. Die möglichen Einflüsse hinsichtlich variierender Explosionsgefahren bis hin zu den potentiellen Auswirkungen von Ereignissen sind daher zu hinterfragen. (Grund et al. 2010) hat diese wechselnden Bedingungen mit einer Erhöhung des Explosionsrisikos und dem Bedarf individueller Explosionsschutzkonzepte gleichgesetzt. Ausgehend von betrieblichen Erfahrungswerten lässt sich für die in dieser Studie betrachteten Anlagentypen jedoch eine Differenzierung geltender Gefahren hin zu einem wiederum reduzierten Explosionsrisiko erkennen, die bislang nicht fundiert untersucht wurden und daher nicht valide begründet werden können. Daher sind auch für abweichende Bautypen gleiche Kriterien zum Explosionsschutz und der resultierenden Maßnahmenarchitektur anzunehmen, weshalb das derzeit geltende Schutzkonzept einer Trocknungskammer auf dem Prinzip des konstruktiven Explosionsschutzes basiert. Auch über die experimentellen Möglichkeiten der Charakterisierung notwendiger Bemessungswerte innerhalb einer geschlossenen Trocknungskammer ist bislang wenig bekannt.

Das final-orientierte, in der heutigen Praxis der Sprühtrocknung maßgeblich angewendeten Schutzkonzept, basiert auf Versuchen aus den Jahren 1997 bis 2001 und dazugehörigen Veröffentlichungen von (Siwek 2000; Siwek et al. 2004). Als Resultat dieser Studien konnte ein Standard für die sogenannte konventionelle Sprühtrocknung mit rotierender Luftbewegung abgeleitet und von Experten des Vereins Deutscher Ingenieure im Rahmen der Richtlinien (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7) sowie der dazugehörigen Beispielsammlung (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7.1) festgelegt werden. Für Verfahren und Bautypen unkonventionellen Designs, die auch als moderne mehrstufige Sprühtrocknungsanlagen mit vertikaler Luftbewegung bezeichnet werden können, sind dem gegenüber ein flächendeckender konstruktiver Explosionsschutz in Form einer Explosionsunterdrückung umzusetzen, wenngleich insbesondere bei der Sprühtrocknung von Milchpulvern mit geringeren Explosionsauswirkungen zu rechnen ist als bei vergleichweisen Anlagen und Prozessen mit chemischen Stäuben, die beispielsweise in der Pharmazie ebenfalls mittels konvektiver Trocknung verarbeitet werden. Auch diese Bautypen fanden zum Teil in den eingangs benannten Studien Berücksichtigung, wurden jedoch nicht im Detail publiziert, da aufgrund der Varianzen kein geltender Standard für die unkonventionelle Trocknung abgeleitet werden konnte. Eine mikroskopische Betrachtung im risikologischen Kontext kann Aufschluss über die Bedingungen innerhalb der Trocknungskammern inkl. der Wechselwirkung mit benachbarten Anlagenteilen und deren Auswirkungsbetrachtungen liefern.

**Brennöfen**, als zweites Anlagenbeispiel, liegen bislang wenig wissenschaftliche Erkenntnisse zu Grunde, die dem Betreiber Auskunft über die Explosionsgefahren aus der Charakterisierung vom Vorhandensein brennbarer Stoffe und deren Dispersion liefern. Der geschlossene Brennofenprozess zur Anodenproduktion bildet eine Teilmenge der Gesamtwertschöpfungskette zur Flüssigaluminium-Produktion. Der Brennofenprozess gilt dabei als ein eigener, baulich getrennter Prozess - mit diversen Teilprozessen in direkter Wechselwirkung - zum Brennen sogenannter Grüner Anoden, die im Weiteren als elektrischer Leiter in der Schmelzflusselektrolyse fungieren. Auch hierbei liefern betriebspraktische Beobachtungen die Grundlage des Forschungsbedarfs. Aus ihnen ist bekannt, dass bei der Aufhebung der Unterdruckfahrweise Gase freigesetzt werden, die zu einer Energiefreisetzung in Form einer unkontrollierten Verbrennung mit Druckanstieg führen können. Über die spezifische Zusammensetzung der freigesetzten Gase in Abhängigkeit des jeweiligen Prozessschrittes liegen nur wenige Erkenntnisse vor, die bislang nicht fundiert untersucht wurden und noch nicht in den sicherheitlichen Kontext von bestehenden Explosionsgefahren gesetzt wurden. Das Potential der freigesetzten Stoffe, welches sich insbesondere störungsbedingt auch in der Anlagenumgebung sowie innerhalb benachbarter Anlagenteile ausbreitet, ist in seinen Quellen und Mengen zum einem vom zeitlichen Verlauf nicht auszuschließender technischer Störungsszenarien und zum anderen von Bedieneinflüssen aufgrund manuell auszuführender (Notfall-)Prozeduren abhängig. Ab welchem Zeitpunkt anhaltender Störungen ein kritischer Zustand gefährlicher explosionsfähiger Gemische eintritt, kann nicht nachweislich beziffert werden. Anforderungen an den Stand der Sicherheitstechnik für Trockner und Öfen in denen brennbare Stoffe freigesetzt werden, sind der DIN EN 1539, vgl. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2016b), zu entnehmen. Auch werden in jener Norm Maßnahmen des Explosionsschutzes bis hin zum konstruktiven Explosionsschutz, sowie Anforderungen an deren Zuverlässigkeit in Abhängigkeit von Trocknungstemperatur und Konzentration benannt. Nichtsdestotrotz bildet auch dabei die Annahme über die freigesetzten Stoffe und deren Verteilung die Beurteilungsgrundlage. Der untersuchte Brennofen zum Brennen Grüner Anoden sieht eine explosionsgeschützte Ausführung der Anlage bislang nicht vor, wengleich aufgrund von Erfahrungen entstandener Anlagenschäden Notfallprozeduren diesbezüglich entwickelt wurden. Entgegen der Sprühtrocknung liegt die ingenieurwissenschaftliche Motivation hierbei folglich nicht in der Weiterentwicklung der Verfahrenstechnik begründet, sondern vielmehr in der Charakterisierung von Explosionsgefahren einer über Dekaden unveränderten Bestandsanlage. Doch auch für dieses Anlagenbeispiel gilt, dass die experimentellen Möglichkeiten zur Gewinnung von Daten als Bewertungsgrundlage weitestgehend unbekannt sind, bzw. mögliche bewährte Verfahren ungenutzt blieben.

### 1.2 Zielstellung

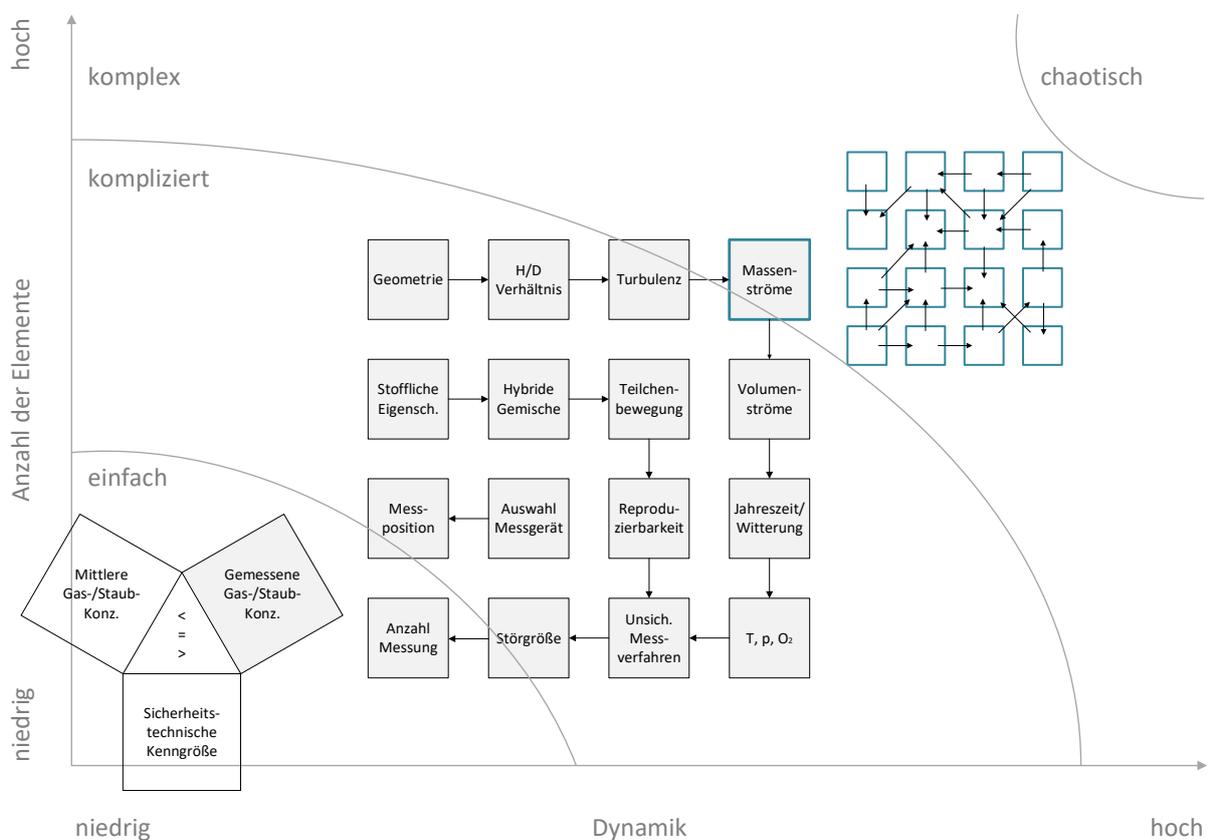
Der „*Duktus*“ als bewährtes Abfrageschema zur Beurteilung der Explosionsgefahren gemäß (TRGS 720) basiert auf den Prinzipien des vorbeugenden (inhärent bzw. kausal-orientierten) sowie konstruktiven (final-orientierten) Explosionsschutzes und unterliegt gewissen Konventionen. Ziel des Promotionsvorhabens ist es, den Input für die Charakterisierung eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches durch eine Verbesserung des Prozessverständnisses zu erhöhen und unter Anwendung prozessanalytischer Methoden aufzuzeigen, wie eine Merkmalsbeschreibung für staub- und gasführende Anlagen erreicht werden kann. Mit Hilfe einer mikroskopischen Beschreibung der instantanen Koinzidenzbedingungen von explosionsfähigen Stoff-Luft-Gemisch im Spiegelbild wirksamer Zündquellen innerhalb einer Apparatur gelingt es nach Abschluss der Methodenentwicklung, die Wahrscheinlichkeit über die Aktivierung eines Ereignisses genauer zu charakterisieren, den Output für die Auslegung von Sicherheitsmaßnahmen zu schärfen und somit deren Verlässlichkeit zu erhöhen. Der *Duktus* sieht eine solche mikroskopische Betrachtung nicht vor und bildet einen „zum-Teil-wirkenden“ Schutzbeitrag einer Maßnahme bislang nicht ab. Wirkt eine vorbeugende Maßnahme nicht gesichert, ist das Schutzkonzept durch eine konstruktive Maßnahme zu erweitern. Darauf basiert auch die Erreichung von Reduzierungsstufen gemäß (TRGS 725).

Hier setzt die Kritikalitätsbewertung wie vorgangs beschrieben an und erzielt durch Erhöhung der Kenntnisse über stoffliche, apparative sowie prozessuale Bedingungen eine genauer abgestimmte Sicherheitstechnik und erhöht deren Verlässlichkeit.

Das Vorgehen zur Kritikalitätsbewertung bietet folglich einen neuen Ansatz, der bereits vor dem bekannten Vorgehen nach *Duktus* greift, die übergeordnete ganzheitliche Sicherheitsbetrachtung optimiert und somit eine Methodenverbesserung bewirkt.

Wie aus der Zielstellung abgeleitet werden kann, ist für die Generierung des gewinnbringenden Inputs zur Charakterisierung eines explosionsfähigen Gemisches die Gas-/ Staubkonzentration als messbare Größe denen der sicherheitstechnischen Kenngrößen gegenüberzustellen und mit der Abschätzung über Quellen und Mengen durch die mittlere Konzentration vergleichend abzurunden. Sind diese drei Vergleichsgrößen scheinbar durch einen direkten „einfachen“ Zusammenhang erklärbar, so unterliegt doch jede dieser Größen einer Anzahl an veränderlichen Einflüssen (Elementen), die diese nicht nur beschreibbar machen, sondern zudem in Wechselwirkung zueinander stehen. Beinahe jedes dieser Elemente kann selbiges Verhalten wiederum für sich in Anspruch nehmen und das Verhältnis der Elemente erfährt final gegebenenfalls den Übergang in eine Komplexität, was darin resultiert, dass auch der Prozess oder die Anlage selbst in ihrer Dynamik zunehmen, bzw. vielmehr andersherum überhaupt erst verursachen und

diverse ungerichtete Wechselwirkungen entstehen. Bild 2 gibt diese Zusammenhänge für die Problemstellung grafisch wieder. Unabhängig davon, in welchem der abgebildeten Systemzustände ein System mit dem Ziel des Personen- oder Sachwertschutzes sich eingliedert, ist ein gleich hohes Sicherheitsniveau stets anzustreben sowie chaotische (nicht nachvollziehbare oder unverständliche) Zustände zu vermeiden. Dass in der Realität die Erreichung einer gleich hohen Sicherheit mit erheblich unterschiedlichem Aufwand verbunden ist, kann damit verglichen werden, dass einfache Systeme in der Anlagentechnik der Nutzung einer Drehmaschine entsprechen, während z. B. mehrstufige Recyclinganlagen bisweilen komplexe Strukturen annehmen können.



**Bild 2: Elementevielzahl der Zielgrößen und deren Wechselwirkung, in Anlehnung an die Darstellung nach (Peterjohann 2020)**

Nicht alle Einzelelemente können in den folgenden Ausführungen im Detail beschrieben werden, sind jedoch in die jeweiligen Bewertungsschritte zwingend einzubeziehen. Ein kursorisches Aufzeigen soll auf diese Elemente und deren Berücksichtigung hinweisen.

Mit dem Ziel der exemplarischen Validierung, werden die beiden Beispielanlagen Sprühtrockner und Brennofen in den Fokus gestellt. Durch Anwendung zweier grundlegend verschiedenartiger Anlagentypen - sowohl aus dem Bereich der Staub-Luft-Gemische als auch der Gas-

Luft-Gemische - soll ein möglichst breites Spektrum zur Verifizierung der Arbeitshypothesen abgedeckt werden. Das entwickelte Vorgehen zur Kritikalitätsbewertung gibt durch theoretische Demonstration Aufschluss darüber, welcher Einfluss auf die Schutzmaßnahmen besteht und ob der Einfluss intrinsischer Sicherheitsreserven bisweilen zum Teil zu konservativ bewertet wurde. Während eine Kritikalitätsbewertung für Neuanlagen zur Bemessung der Schutzmaßnahmen bereits vor Inbetriebnahme oder zur Optimierung bestehender Schutzkonzepte herangezogen wird, so steht bei Bestandsanlagen die strategische Auslegung zur Ertüchtigung im Vordergrund. Für Betreiber diverser Bestandsanlagen liefert eine Bewertung herrschender Explosionsgefahren zur zeitlichen Herangehensweise der Ertüchtigung aufgrund klassierter Kritikalität einen wirtschaftlichen Modifizierungsplan. Für die jeweiligen Anlagentypen besteht nach Abschluss der Dissertation ein Wissenszugewinn bezüglich des geltenden Stands der Sicherheitstechnik.

Somit wirkt der wissenschaftliche Beitrag der Methodenverbesserung im Rahmen dieses Vorhabens neben der Zuverlässigkeit auch auf die Ökonomie.

Der Anlagenbetreiber steht durch den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt stets vor der Herausforderung, Anpassungen an den Stand der Technik im Blick zu behalten und die Anlagensicherheit zu optimieren. Diese Optimierung kann er eigenständig vornehmen und sie unterliegt somit seinem Verantwortungsbereich. Die vorliegende Arbeit bietet hierzu einen kompetenzbildenden Beitrag. Damit ist in erster Linie die Fach- und Methodenkompetenz (neben der Sozial und Selbstkompetenz) nach (Lehmann und Nieke 2000) zur Handlungsfähigkeit gemeint, die ein Beurteiler mitbringen sollte. Explosionen aufgrund fehlerhafter Einschätzungen, können das Resultat mangelnder Kenntnisse (begründet durch zahlreiche Ursachen) sein. Das wiederholte Aufkommen der eingehenden Fragestellung über die tatsächliche Verteilung von Staub-/Gas-Luft-Gemischen im Inneren von Apparaturen und die daraus resultierende reale Gefahr für ein Unternehmen bestätigt den Bedarf, dem Beurteiler, der mithilfe dieses Vorgehens unter Umständen unternehmensintern bestellt werden kann, Möglichkeiten zur Erhebung observabler Größen sowie Modelle zu dessen Bewertung und Tools zur Dokumentation an die Hand zu geben, damit eine Sicherheitsbetrachtung auch mit diesem Vorgehen abschließend als RUND - nach (Barth 2018), R\_ichtig, U\_mfassend (i.S. von vollständig), N\_achvollziehbar (i. S. von transparent, überprüfbar) und D\_okumentiert (i.S. von belegbar) - bezeichnet werden kann.

### 1.3 Aufbau und Herangehensweise

Im Anschluss an ein einführendes **Kapitel 1** werden zur ingenieurwissenschaftlichen Verortung in **Kapitel 2** die geltenden Prinzipien des Explosionsschutzes aufgegriffen. Der Fokus liegt hierbei auf den für das weitere Verständnis relevanten sicherheitstechnischen Kenngrößen sowie den Beurteilungsverfahren und dabei insbesondere deren Grenzen bzw. Ungenauigkeiten. Dem Leser wird dahingehend ein Grundverständnis vorausgesetzt, da mit dieser Arbeit insbesondere die Herausforderungen bisherigen Vorgehens der Bestimmung und Interpretation von Kenngrößen aufgegriffen werden.

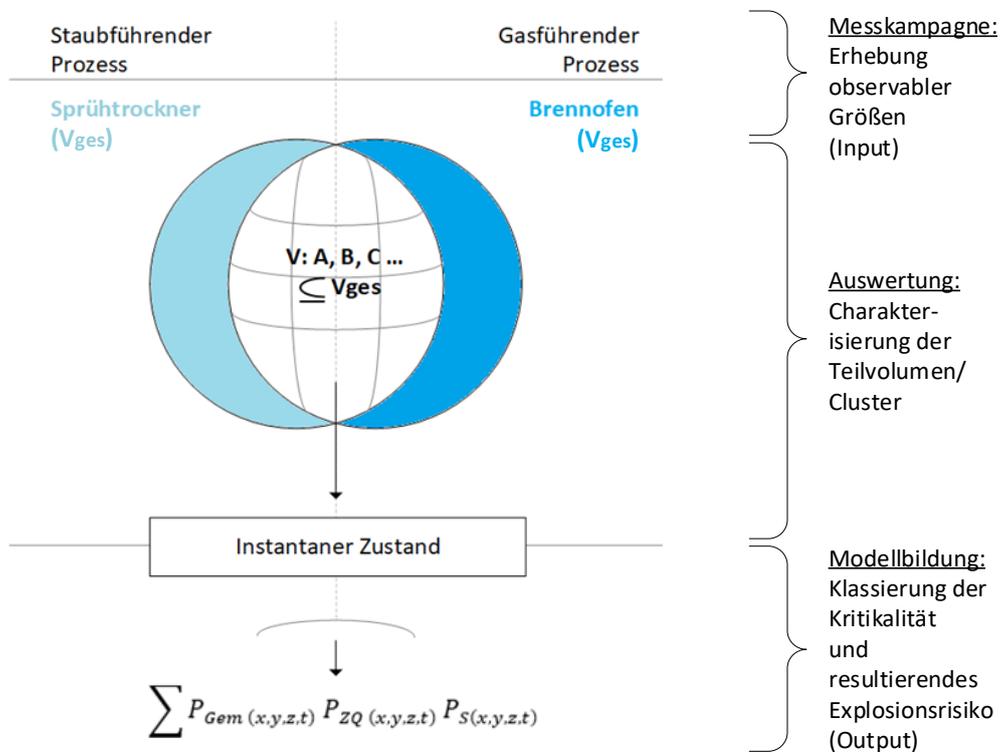
Die Kenntnis über die stofflichen sowie apparativ-technischen und prozessual-betrieblichen Parameter der untersuchten Realanlagen werden als notwendige Beurteilungsgrundlage in **Kapitel 3** geschaffen, damit eine anlagenbezogene, reale und integrierte Evaluierung von Explosionsgefahren überhaupt möglich ist.

Nach dem Identifizieren und Selektieren der zur weiteren Anwendung erforderlichen ingenieurwissenschaftlichen Prinzipien, findet in **Kapitel 4** (staubführende Anlage) und **Kapitel 5** (gasführende Anlage) die experimentelle, respektive messtechnische Erhebung notwendiger Daten zur weiteren Beurteilung der explosionsfähigen Gemische statt. Hierzu werden vorab die Erkenntnisse aus den durchgeführten Machbarkeitsstudien zur Auswahl geeigneter Prozessanalysetechniken abstrahiert, die nach erfolgreichem Test für den jeweiligen Anwendungsbereich herangezogen wurden. Sowohl für den Sprühtrocknungsprozess (Sprühturm) als auch für den Brennofenprozess (Brennkammer) erfolgt die Quantifizierung des Dispersionsgrades und, insofern vorab notwendig, die Bewertung der stofflichen Zusammensetzung in Abhängigkeit der in einer Risikobeurteilung identifizierten relevanten Störungsszenarien. Ein Abstrakt der Zündquellenbewertung schließt sowohl Kapitel 4 als auch Kapitel 5 ab und verdeutlichen in einer jeweiligen Zusammenfassung die Möglichkeit einer systematischen Dokumentation.

Kapitel 4 und 5 erfahren einen analogen Aufbau und gleichen sich z. T. in allgemeingültigen Hinweisen. Dies hat den Hintergrund, dass der Leser den für sich relevanten Anwendungsbereich, d. h. staub- oder gasführende Anlage separat lesen kann, ohne zwischen den Kapiteln springen zu müssen und für beide gleichbedeutende Hinweise filtern muss.

Die ermittelten örtlichen und zeitlichen Varianzen bezüglich des Vorkommens gefährlicher explosionsfähiger Gemische innerhalb geschlossener Apparaturen werden als Grundlage der Modellierung der Kritikalität in **Kapitel 6** in den risikologischen Zusammenhang gestellt und methodisch ausgewertet. Bild 3 veranschaulicht diesen Zusammenhang der Forschungshypothese und zeigt auf, dass sich innerhalb der betrachteten Apparatvolumen heterogene, instantane Zustände über Ort und Zeit und somit variierende Teilmengen des Gesamtvolumens ( $V_{A, B, C, \dots}$ )

$\subseteq V_{ges}$ ) sowohl gefährlicher explosionsfähiger Gemische als auch nicht-gefährlicher explosionsfähiger Gemische einstellen können. Die Wahrscheinlichkeit über das Vorhandensein eines explosionsfähigen Gemisches ( $P_{Gem}$ ) in Koinkidenz einer wirksamen Zündquelle ( $P_{ZQ}$ ) bilden maßgebliche Parameter des Explosionsrisikos als Ableitung der vorliegenden Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses, vgl. z. B. (Steen 2009). Die anhand der erhobenen Daten aus Messkampagnen für die exemplarischen staub- und gasführenden Anlagen geschaffenen mikroskopischen Beurteilungsgrundlagen ( $P_{Gem}(x(t), y(t), z(t)); P_{ZQ}(x(t), z(t), y(t))$ ) zeigen unter Anwendung von Ansätzen rechnerischer und experimenteller Verfahren auf, ob dahingehend ein Einfluss auf Zündmechanismen und Schadensschwere ( $S$ ), als weiteren Parameter des Explosionsrisikos, zu erwarten sind.



**Bild 3: Methodische Herangehensweise**

Die Ergebnisse hinsichtlich einer Optimierung der systematischen Sicherheitsbetrachtung mit dem Zugewinn für die Zuverlässigkeit von Maßnahmen und der ökonomischen Bilanzierung der sicherheitstechnischen Auslegung münden in **Kapitel 7**. Die Ansätze zum erweiterten Vorgehen mittels klassierter Kritikalität werden einem Anforderungsprofil entgegengestellt, um eine Akzeptanz der Anwendbarkeit zu erfahren.

Die zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse, die Diskussion von Erkenntnissen und Grenzen sowie das Aufzeigen weiteren Forschungsbedarfs im finalen **Kapitel 8** bilden den Abschluss der Dissertation.

## 2 Ingenieurwissenschaftliches Verorten des Untersuchungsgegenstandes

### Inhalt

---

2.1	Rechtliche Einordnung und Grundlagen .....	13
2.2	Bestimmung und Unsicherheiten sicherheitstechnischer Kenngrößen .....	16
2.3	Vorgehen und Grenzen im Beurteilungsprozess der Explosionsgefahr .....	20
2.4	Der „neue“ Duktus und seine „alten“ Konventionen .....	22

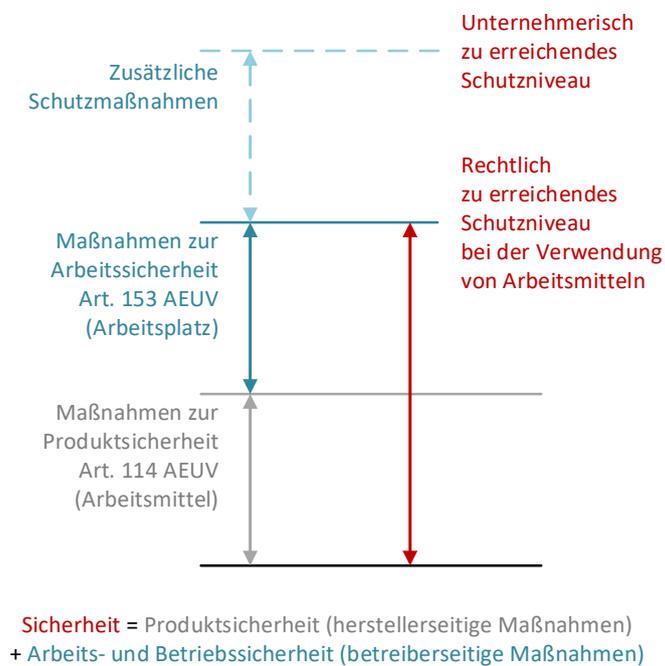
---

Die in diesem Kapitel beschriebenen Prinzipien und Methoden dienen der Einordnung des Untersuchungsgegenstandes gegenüber dem gegenwärtigen Stand der Wissenschaft und Technik. Sie bilden somit die für diese Arbeit relevante Teilmenge des ganzheitlichen Explosionsschutzes ab. Gleichzeitig werden Untersuchungen grundlegenden Charakters und deren Lösungsansätze aufgezeigt. Dies betrifft insbesondere die Ermittlung sicherheitstechnischer Kenngrößen, da Ungenauigkeiten in der Bestimmung und Interpretation einen relevanten Anteil bei der Charakterisierung der Gemischzustände einnehmen. Eine umfassende Wiedergabe des allgemein geltenden Stands der Technik erfolgt nicht, sondern kann in den anerkannten Standardwerken von (Bartknecht 1993), bzw. (Bartknecht und Pellmont 2018, Band 1-6), (Steen 2009), (Eckhoff 2003) und (Freitag 1965) nachgelesen werden. Während grundlegende Literatur die Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen und deren Ableitung zur Festlegung präventiver und konstruktiver Maßnahmen behandelt, so untersucht die Forschung die Charakterisierung von Staubwolkenentstehung, Zündmechanismen und Flammenausbreitung und -fortpflanzung, vgl. (Eckhoff 1993). Dass diese Forschungsfragen auch heute noch bestehen, zeigen die dieser Arbeit zugrundeliegenden

Forschungsprojekte und -objekte, welche sich ebenfalls mit diesen Leitworten auseinandersetzen, und das knapp 30 Jahre nach Veröffentlichung des zusammenfassenden Fachartikels.

## 2.1 Rechtliche Einordnung und Grundlagen

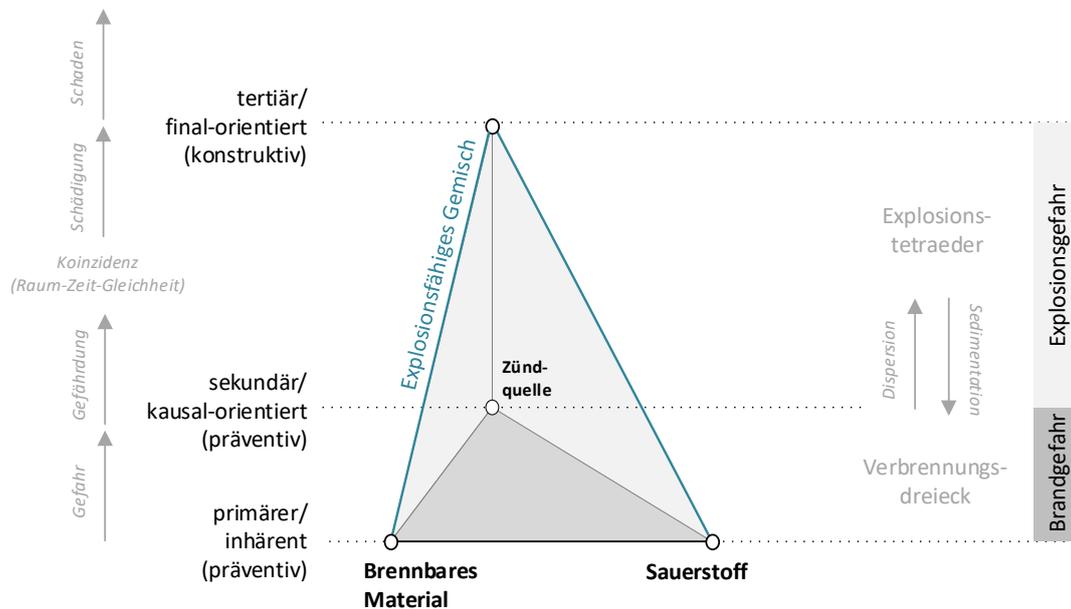
Mit den Gründungsverträgen der europäischen Union wurden auch die Verträge über die Arbeitsweise der Europäischen Union abgeschlossen, die mit ihren Artikeln 114 und 153 Mindestanforderungen zur Produkt- und Arbeitssicherheit bzw. Betriebssicherheit regeln. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen an hersteller- und betreiberseitige Maßnahmen wird schließlich das rechtliche Ziel zur Erreichung des erforderlichen Schutzniveaus zur sicheren Verwendung von Arbeitsmitteln und damit auch von Anlagen verfolgt. Dieses Schutzniveau kann wie in Bild 4 dargestellt in Abhängigkeit von unternehmerisch zu erreichenden Sicherheitsstandards, z. B. zur Vermeidung von Betriebsunterbrechungen und Imageverlusten, durch zusätzliche Schutzmaßnahmen heraufgehoben werden.



**Bild 4: Schutzniveaus zur sicheren Verwendung von Arbeitsmitteln**

Der Regelungsgegenstand des Arbeitsschutzes für die Betreiberpflichten im Gefahrenfeld Explosion wird durch die europäischen Regelungen zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre, der ATEX-Richtlinie 1999/92/EG, vgl. (EU-Kommission 16.12.1999), abgebildet. Die Umsetzung in nationales Recht erfolgt über die novellierte Betriebssicherheits- (BetrSichV) und die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), wobei letztere die Beurteilung möglicher Explosionsgefahren mit dem Ziel eines in sich schlüssigen Explosionsschutzkonzeptes beinhaltet. Die Betriebssicherheitsverordnung regelt demgegenüber die Prüfanforderungen überwachungsbedürftiger Anlagen (u. a. Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen). Die Technischen Regeln und Normen wiederum konkretisieren die in den

Vorordnungen benannten Anforderungen entsprechend der sogenannten Vermutungswirkung, d. h. bei Erfüllung dieser Vorgaben kann davon ausgegangen werden, dass die rechtlichen Anforderungen gemäß dem Stand der Technik eingehalten wurden, was unter Nutzung abweichender Methoden und Vorgehen erst nachgewiesen werden muss.



**Bild 5: Branddreieck und Explosionstetraeder im Kontext der Maßnahmenrangfolge des Explosionsschutzes**

Das Vorliegen einer Explosionsgefahr ergibt sich aus der Erweiterung des Vorhandenseins einer Brandgefahr, darstellbar als Verbrennungsdreieck, hin zu der Erfüllung des sogenannten Explosionstetraeders gem. Bild 5, (Barth 2023). Findet eine Aufwirbelung (oder bildlich gesprochen ein „Heraufheben“ vom Dreieck zum dreidimensionalen Tetraeder) eines Brennstoffes in Verbindung mit einem Oxidationsmittel statt, so bildet sich ein explosionsfähiges Gemisch aus. Zu dessen Vermeidung findet der primäre/inhärente Explosionsschutz Anwendung. Insofern keine örtliche und zeitliche Koinzidenz mit einer wirksamen Zündquelle vorliegt (z. B. durch erfolgreiche Vermeidung von Zündquellen durch sekundäre/kausal-orientierte Explosionsschutzmaßnahmen), können die Partikeln wieder zu Boden sedimentieren. Aus der Explosionsgefahr findet erneut eine Begrenzung, ein „Herabsetzen“, auf eine Brandgefahr statt. Mit der Eliminierung eines dieser Faktoren innerhalb des illustrierten Branddreiecks und somit der ursächlichen Gefahr einer Explosion kann der präventive Explosionsschutz abgebildet werden. Das Vorhandensein einer wirksamen Zündquelle und die Unabhängigkeit dieser vom Gemisch lässt sich anhand des Tetraeders zudem visuell hervorheben.

Die Erfüllung der beschriebenen Koinzidenz und dem daraus resultierenden Vorliegen einer konkreten Gefahr für den Beschäftigten in der Arbeitsumgebung durch die Möglichkeit einer

Explosion führt zu einer Gefährdung mit einer schädigenden Wirkung auf Beschäftigte und Sachgüter. Dieser wird durch tertiäre/final-orientierte Maßnahmen entgegengewirkt, welche die schädigenden Auswirkungen auf ein unbedenkliches Maß reduzieren. In dem Fall ist vom konstruktiven Explosionsschutz die Rede.

Der zugrundeliegende Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang wurde bereits in den Anfängen der Sicherheitstechnik durch (Compes 1982) beschrieben und stellt bis heute die Basis einer Gefährdungsbeurteilung dar.

Zur Charakterisierung von Brenn- und Explosionsverhalten eines Stoffes werden sicherheitstechnische Kenngrößen ermittelt. Dabei wird nicht nur zwischen abgelagerten und aufgewirbelten Stäuben unterschieden, sondern zusätzlich zwischen Kenngrößen für Stoffe gasförmigen Aggregatzustandes. Stäube und Gase verhalten sich grundsätzlich verschieden. Liegen bei Gasen Moleküle gleicher Phase nebeneinander, so erschwert bei Staub-Luft-Gemischen ein Nebeneinander von Gasmolekülen und Staubteilchen (verschiedener Korngrößen) die Handhabbarkeit zusätzlich, z. B. betreffend eine Interpretation physikalischer Eigenschaften oder einer Durchmischung zur Bestimmung von Kenngrößen. Untersuchungen von (Bartknecht 1987) und ein Abstrakt von (Heinrich 1988) weisen weitere Unterscheidungsmerkmale für sicherheitstechnische Kenngrößen beider Zustände aus. Die Mindestzündenergie beispielsweise unterscheidet sich im Bereich der Zehnerpotenz, weshalb z. B. hochmobile zündwirksame Partikeln (kurz: HZP) als Zündquelle für Gase eine größere Gefahr darstellen als für viele Staub-Luft-Gemische. Stäube können hingegen einen größeren maximalen Druckanstieg erreichen, die Verläufe selbst sind jedoch grundsätzlich gleichartig, vgl. (Jung 2018). Obwohl die umfangreichen Untersuchungen von sicherheitstechnischen Kenngrößen bereits fünf Dekaden zurückliegen und seither weiterführenden regelmäßigen Forschungen unterlagen, gilt bis heute, dass Kenngrößen für Stäube eine gewissen Ungenauigkeit und Vorsicht bei der Anwendbarkeit zugrunde gelegt werden muss.

Die unter Labormaßstäben und -bedingungen experimentell ermittelten Kenngrößen sind aufgrund dessen grundsätzlich nicht ohne Weiteres auf den zu beurteilenden Anwendungsfall übertragbar. Je nach geltenden Bedingungen bezüglich Turbulenz, Druck, Temperatur und Feuchtigkeit sind die Ergebnisse zudem zu interpretieren.

Da für die Versuche zur Bestimmung von Kenngrößen die Proben durch Siebung (und Trocknung) aufbereitet werden, ist z. B. zudem der tatsächlich vorliegende Medianwert der Korngrößen zu berücksichtigen. Bei Stäuben sind die ermittelten sicherheitstechnischen Kenngrößen als Vergleichsbasis für den betrieblichen Anwendungsfall achtsam zu übertragen, da aufgrund

der schwerlich zu erzielenden Reproduzierbarkeit der Verteilung innerhalb der Prüfapparatur Abweichungen entstehen können. Zur Abschätzung dieser Unsicherheiten, wurden für den im weiteren Verlauf relevanten Bewertungsparameter der unteren Explosionsgrenze (UEG) Untersuchungen durch (Kues 2016) angestellt, die im Folgenden vorgestellt und erweitert werden. Zusätzlich wurde dabei in Zusammenarbeit mit (Pellmont 2016b) der Einfluss der Zündenergie auf die Varianz der UEG untersucht.

## **2.2 Bestimmung und Unsicherheiten sicherheitstechnischer Kenngrößen**

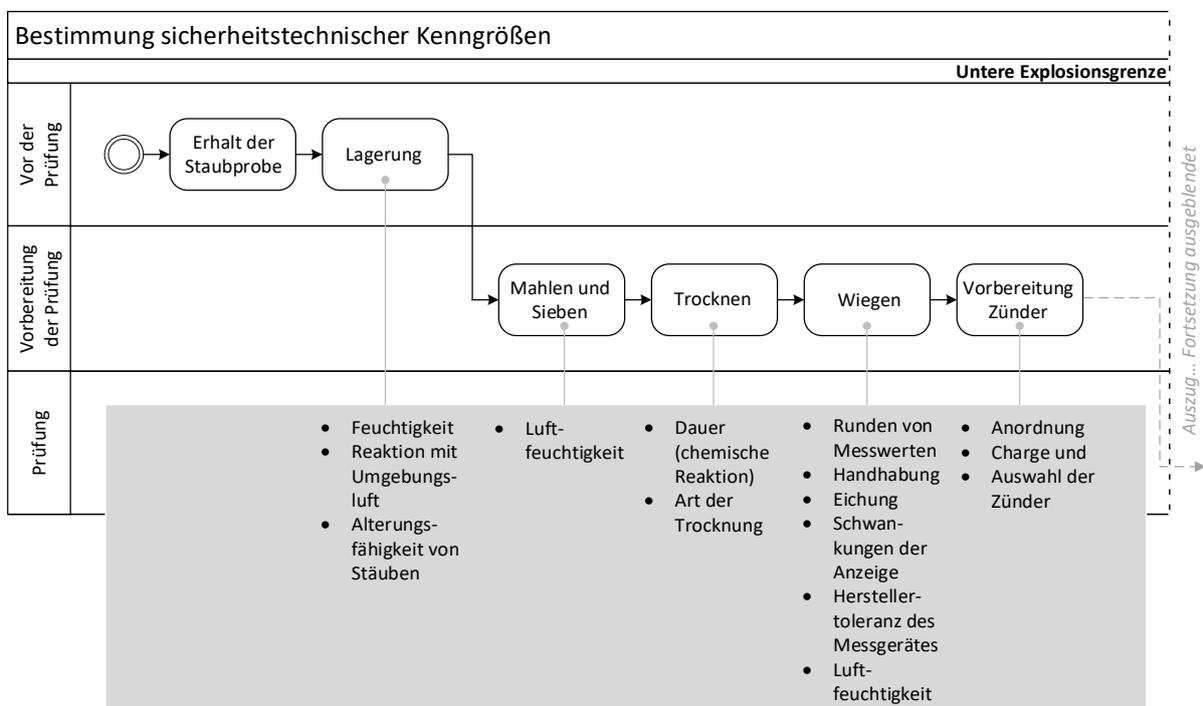
Dass der Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen insbesondere für den Anwendungsfall von Stäuben gewisse Grenzen gesetzt sind, ist zum einen auf die bereits erwähnte Schwierigkeit der Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen zurückzuführen, zum anderen bestehen jedoch weitere Unsicherheiten dahingehend, dass die bisherigen Studien insbesondere im Rahmen atmosphärischer Bedingungen durchgeführt wurden. Eine ausführliche Vergleichsstudie des Einflusses nicht-atmosphärischer Bedingungen auf sicherheitstechnische Kenngrößen von Gasen und Dämpfen lieferte die Physikalisch-Technischen Bundesanstalt durch (Hirsch und Brandes 2014) und bestätigte diese Relevanz. Auch Untersuchungen von (Hesener und Beck 2015) validierten für Stäube zuletzt, dass Kenngrößen selbst im definierten Geltungsbereich nicht als konstant angesehen werden können und fortwährendem Forschungsbedarf unterliegen. Dass diese Untersuchungen den Umstand eines nicht unerheblichen Einflusses von atmosphärischen und nicht-atmosphärischen Bedingungen hervorheben, unterstreicht auch die Notwendigkeit mit den novellierten technischen Regelungen eine klare Linie zwischen beiden Anwendungsbereichen zu ziehen, vgl. z. B. (TRGS 720).

Im Rahmen der nachfolgend vorgestellten Studien wurden auf Grundlage der erkannten Unsicherheiten bei der Bestimmung der unteren Explosionsgrenze (UEG) Untersuchungen angestellt, die sowohl qualitative als auch in Ansätzen quantifizierbare Ursachen identifizieren. Ziel war es, sich dem bei Übertragung der UEG auf industrielle Anlagen einzuräumenden Unsicherheitsfaktor von 50 % anzunähern, was z. B. bei einer ermittelten UEG von  $120 \text{ g/m}^3$  und einem eingeräumten Unsicherheitsfaktor von 50 % einer festgelegten UEG von  $60 \text{ g/m}^3$  entspricht. Diese 50 % basieren auf dem Ablauf der labortechnischen Untersuchung, bei dem die Menge des in die Prüfapparatur eingebrachten Staubes jeweils halbiert wird. Dies geschieht dabei so lange, bis keine Explosion - erkennbar an einem Druckanstieg von 0,5 bar Überdruck unter Berücksichtigung der eingesetzten chemischen Zünder von insgesamt 2 kJ - mehr stattfindet.

Die Herangehensweise durch (Kues 2016) folgte einer Prozessdarstellung des gesamten UEG-Bestimmungsverfahrens für 20-l-Kugel und 1 m<sup>3</sup>-Behälter mittels Swimlanes. Derartige Darstellungen lassen Aufgaben und Anwender direkt erkennen und schaffen so eine Transparenz zur Ableitung von Schnittstellen, Schwachpunkten und folglich Optimierungspotentialen. Ebenso soll somit eine systematische Identifikation von Ursachen für Abweichungen erfolgen. Der Gesamtprozess wurde in fünf Prüfphasen unterteilt. Die einzelnen Bearbeitungsschritte wurden zugeordnet.

- Vor der Prüfung
- Vorbereitung der Prüfung
- Durchführung der Prüfung
- Nachbereitung der Prüfung
- Umrechnung der Prüfergebnisse

Innerhalb dieser Phasen spielen die Anwender Probenentnehmer und -Sender, Lieferant, Prüfer (ggf. mehrere Beteiligte) und Beurteiler zur Interpretation hinsichtlich der industriellen Anwendung eine tragende Rolle. Exemplarisch sei hierzu mit Bild 6 ein Auszug, inkl. qualitativer Einflüsse aufgezeigt.



**Bild 6: Qualitative Abweichungsmöglichkeiten in den Prozessphasen der UEG-Bestimmung im 1 m<sup>3</sup>-Behälter (nach (Kues 2016))**

Bei der Probenentnahme bspw. ist Zeitpunkt und Position der Entnahme zum Vorliegen einer repräsentativen Stoffzusammensetzung relevant, z. B. aufgrund von z. T. stark variierenden

Chargenqualitäten eingesetzter Stoffe oder der örtlichen Lage im Gesamtprozess, welcher möglicherweise nicht den Stoffmerkmalen in allen kritischen Bereichen der Anlage entspricht. Bei der Prüfung selbst sind insbesondere Erfahrung und Witterungsbedingungen von Bedeutung, aber auch Einflüsse wie Charge und Zustand der chemischen Zünder sowie deren Anordnung. Welcher Einfluss von der gewählten Zündquelle ausgeht, zeigen auch Untersuchungen durch (Scheid et al. 2013), der aufgrund von Nachteilen der chemischen Zünder einen Vergleich mit alternativen Zündquellen anstellte. Schlussendlich ist die Verwendung der Ergebnisse vom Beurteiler dahingehend abhängig, welche Berechnungsformel zur Übertragung auf z. B. herrschende Temperaturen zum Einsatz kommt und welcher Stoff untersucht wurde.

Werden in einer Gegenüberstellung nicht nur experimentell ermittelte Werte, sondern auch beide Berechnungsverfahren nach Wiemann

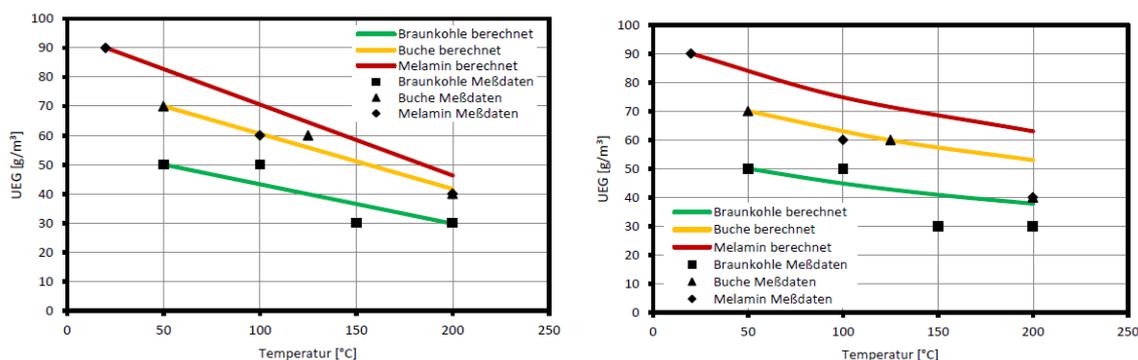
$$UEG(T) = UEG(T_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad [1]$$

mit  $\alpha = -0,0027 \frac{g}{m^3 \cdot K}$

und Burghes-Wheeler

$$UEG(T) = UEG(T_0) \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right) \times [1 - 0,000721 \cdot (T - T_0)] \quad [2]$$

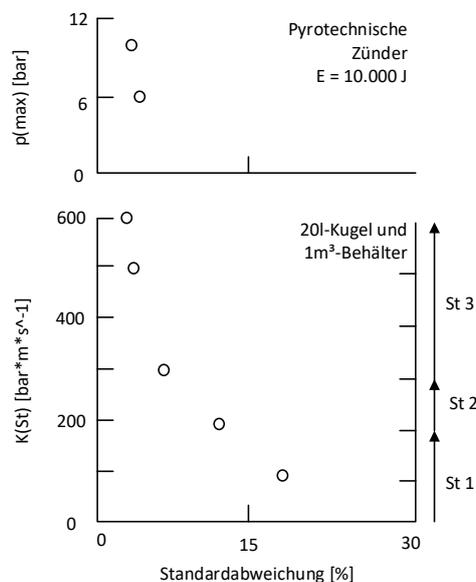
grafisch abgebildet, so wird schnell ersichtlich, dass nicht nur zwischen Experiment und Berechnung eine Differenz besteht, sondern zudem zwischen beiden Rechenmodellen, siehe Bild 7, vgl. (Hesener et al. 2015). Die Differenz nimmt dabei mit steigenden Temperaturkorrekturen zu.



**Bild 7:** Vergleich experimentell und rechnerisch ermittelter UEGs (vgl. (Hesener et al. 2015)); links Berechnungsverfahren nach Wiemann [1], rechts Berechnungsverfahren nach Burghes-Wheeler [2]

Dieser Vergleich zeigt auf, dass die Wahl des Rechenmodells das Gesamtergebnis der unteren Explosionsgrenze um weitere Prozentsätze verfälscht. Die Untersuchungen zeigten zudem, dass die Differenz zwischen Experiment und Berechnung für einen unbekanntem Anteil flüchtiger Bestandteile zusätzlich variiert und keine belastbaren Aussagen zu treffen sind.

Um die Belastbarkeit der „bestimmten“ UEG - als Pendant zur „umgerechneten“ und „festgelegten“ UEG - weiterhin zu quantifizieren, wurden Wiederholungsversuche im Labor des Lehrstuhls Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung in der sogenannten 20-l-Kugel angestellt. Diesen Gedanken zur Festlegung der Standardabweichung verfolgte bereits (Bartknecht 1993) z. B. mit der Bestimmung und dem Vergleich von  $p_{\max}$  und  $K_{St}$ -Werten. Bild 8 zeigt, dass mit kleiner werdenden  $K_{St}$ -Wert die Standardabweichung zunimmt. Da die Ermittlung dieser Explosionsgrößen auf ebendiesem Verfahren in der 20-l-Kugel basiert, ist eine Übertragbarkeit der Tendenz nicht auszuschließen.



**Bild 8: Standardabweichung für die Explosionskenngrößen brennbarer Stäube, vgl. (Bartknecht 1993)**

Zur weiteren Annäherung an einen Unsicherheitsfaktor von 50 % erfolgte die Reduzierung der Stoffmengen nicht um 50 %, sondern in Schritten von  $10 \text{ g/m}^3$ , um im weiteren Vorgehen mit Reduzierungen von bis zu  $1 \text{ g/m}^3$  einen exakten Wert der UEG zu erhalten. In der ersten Versuchsreihe lag die UEG bei  $57 \text{ g/m}^3$ , und das auch bei einem wiederholten Durchgang gleicher Probe. Bei der zweiten Versuchsreihe gleichen Vorgehens betrug die UEG =  $58 \text{ g/m}^3$ , was dem ersten Ergebnis erstaunlich nahekommt. Beim normativen Vorgehen wäre die UEG demnach auf  $30 \text{ g/m}^3$  festgelegt worden, was auch in diesem Fall noch eine Differenz von 47,4 % ausmacht.

Die Ergebnisse dieser Studien zeigen die grundlegenden Probleme beim Umgang mit sicherheitstechnischen Kenngrößen am Beispiel der UEG. Da durch die geringe Anzahl an Wiederholungsversuchen zwar gezeigt wurde, dass eine exakte Bestimmung scheinbar möglich ist, gleichzeitig aber nicht validiert oder als Standardabweichung ausgedrückt werden konnte, wird auch im Verlauf weiterhin ein Unsicherheitsfaktor von 50 % angenommen.

### 2.3 Vorgehen und Grenzen im Beurteilungsprozess der Explosionsgefahr

Die nachfolgenden Beschreibungen gehen in den Grundzügen zur Vorgehensweise aus der (TRGS 720) sowie (Lottermann 2012) und in weiteren Ausführungen aus (Maiwald et al. 2017b) sowie der (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7) hervor.

Der Arbeitgeber hat gemäß § 5 Arbeitsschutzgesetz Gefahren zu analysieren, die auf den Beschäftigten einwirken können und so eine Gefährdung darstellen. Diese Sicherheits-betrachtung in Form einer betreiberseitigen Gefährdungsbeurteilung (GBU) stellt neben der herstellerseitigen Risikobeurteilung oder internen sowie versicherungstechnischer Audits nur einen Anlass zur Beurteilung dar, soll aber im Folgenden im Fokus stehen. Insofern im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung zur Bereitstellung und Verwendung von Arbeitsmitteln nach (TRBS 1111) eine Explosions- und Brandgefahr nicht ausgeschlossen werden kann, ist eine weiterführende GBU gemäß (TRGS 720) durchzuführen. Diese Technische Regel verdeutlicht die Vorgehensweise zur Beurteilung von Explosionsgefahren (Ex-GBU) durch ein Abfrageschema (im Folgenden kurz: *Duktus*) zum Erkennen und Vermeiden von ebendieser Gefährdungsart. Das benannte Abfrageschema greift die Maßnahmenrangfolge nach ATEX-Richtlinie 1999/92/EG ((EU-Kommission 16.12.1999) auf, die gleichzeitig die bekannte Maßnahmenhierarchie nach (Compes 1982) wiedergibt, wonach Sicherheitsmaßnahmen vorrangig vor Schutzmaßnahmen anzuwenden sind. M. a. W. Maßnahmen vor jener Gefahr, die auf die umgebende Person einwirken kann.

Mit der Beurteilung über das Vorhandensein von brennbaren Stoffen sowie der Möglichkeit, dass diese Stoffe in der Lage sind explosionsfähige Gemische zu bilden, die nach Abschätzung von Quellen und Mengen eine Gefahr für den Beschäftigten darstellen können und somit in gefahrdrohender Menge als gefährliches explosionsfähiges Gemisch oder gefährliche explosionsfähige Atmosphäre vorliegen, werden Maßnahmen des primären Explosionsschutzes (im Folgenden: inhärenter Explosionsschutz) festgelegt. Unter der Prämisse atmosphärischer Bedingungen können für diese gefährliche explosionsfähige Atmosphäre explosionsgefährdeter Bereich eingeteilt und in Zonen ausgedrückt werden. Nach dem Treffen inhärenter Maßnahmen kann eine Zonenfreiheit erreicht werden, insofern die Wahrscheinlichkeit und Dauer des Auftretens einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre sicher ausgeschlossen werden kann. Kann dies jedoch nicht bestätigt werden, ist durch die Beurteilung von möglichen Zündquellen und deren Wirksamkeit das präventive Schutzkonzept durch Maßnahmen der Zündquellenvermeidung zu erweitern. Nach Beurteilung aller 13 möglichen Zündquellen sind kausal-orientierte Maßnahmen festzulegen. Die Festlegung von Zonen unterstützt dabei die anforderungsgerechte Auswahl von Geräten. Ohne diese Einteilung sind Geräte mit dem Schutzzumfang

„höchstes Maß an Sicherheit“ auszuwählen, vgl. (VDI Verein Deutscher Ingenieure 2023). Kann die Vermeidung wirksamer Zündquellen unter Anwendung des probabilistischen 2-Fehler-Toleranz Prinzips in Verbindung mit der (TRGS 725) nicht mit ausreichender Sicherheit erzielt werden, ist das präventive Schutzkonzept mit final-orientierten Maßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen einer Explosion abzuschließen.

Die Festlegung der Maßnahmenrangfolge unter Verwendung des *Duktus* wird mehr durch ein beschreibendes schrittweises Vorgehen denn durch eine systematische Methode im Sinne eines anwenderfreundlichen Werkzeugs zur Beantwortung der Fragestellungen abgebildet, wengleich die Reihe der Technischen Regeln für Gefahrstoffe mit der fortlaufenden TRGS 720 *ff* umfassende Hinweise liefert. Auch wird z. B. durch (Lottermann 2012) ein Ansatz zur Systematik einer integrierten Brand- und Explosionssicherheit - als erweitertes Abfrageschema - oder durch (Miranda et al. 2015) eine vereinfachte Beurteilungs-Methodik basierend auf der sogenannten Pittsburgh Coal Method aufgezeigt.

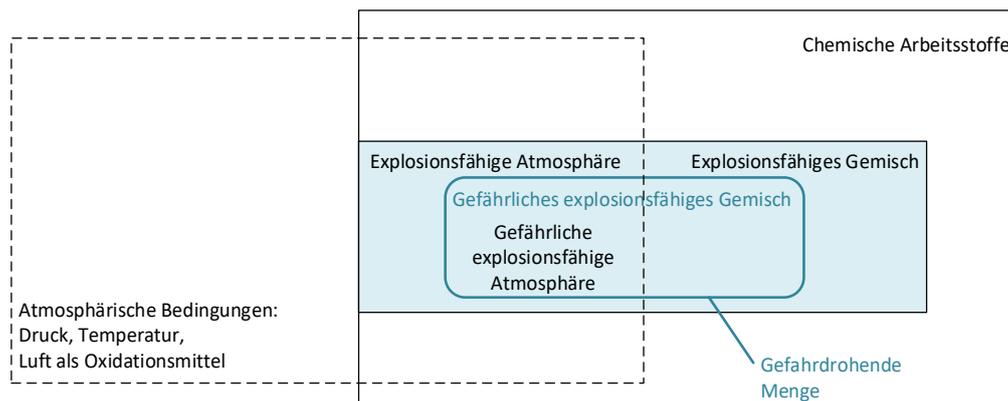
Eine erfolgreiche Beurteilung von Anlagen oder Produkten kann ohne weitere Nutzung hilfestellender Methoden nicht garantiert werden. Herausforderungen in der Anwendung des *Duktus* ergeben sich durch die Vielzahl an Möglichkeiten der durch Flüssigkeiten, Stäube oder hybriden Gemischen gebildeten Zustände sowie in der weiteren Folge aus der großen Anzahl an potentiellen Zündquellen und insbesondere der Kenntnis über deren Wirksamkeit und Vermeidung (z. B. im Sinne der Funktionalen Sicherheit) sowie schließlich der Identifikation beider - explosionsfähige Gemische und Zündquelle - im bilateralen Kontext, vgl. (Maiwald et al. 2017b). Eine interdisziplinäre Qualifikation der Methodenkompetenz und Fachkompetenz, z. B. von der elektrischen Sicherheit bis hin zur Berechnung von Auswirkungen von Explosionen, ist nahezu vorauszusetzen, um ein ganzheitliches Explosionsschutzkonzept als Resultat zu erhalten. (Barth et al. 2020) erweitert die notwendige Kompetenz noch um den Wesenszug der Verantwortung.

Neben dem Vorgehen nach *Duktus* benötigt es daher auch Methoden, die dem Anwender, respektive Beurteiler ein Werkzeug zur Seite stellen, mit Hilfe dessen alle Gefahren systematisch zu Erkennen und mit Maßnahmen zu belegen sind. Ein direkter normativer Verweis in der Technischen Regel ist nicht gegeben, doch sind diese Methoden in zahlreichen Richtlinien exemplarisch abgebildet, z. B. in der (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7.1). In diesem Zusammenhang kann z. B. die Methode der Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) sowie die Zürich Hazard Analysis (ZHA) benannt werden. Doch auch die nicht zuletzt aus der Störfallverordnung bekannte und anerkannte Methode der Hazard and Operability Studies (HAZOP-Analyse)

findet im Zusammenhang mit der Identifikation von Störungen sicherheitsrelevanter Anlagen regelmäßig Anwendung bei Sicherheitsbetrachtungen. Die dabei erkannten Störungen werden hinsichtlich ihrer potentiellen Wirkungen hin beurteilt und weisen die Anwender somit neben z. B. ungewollten Reaktionen und Druckanstiegen auch auf mögliche Bildungen explosionsfähiger Gemische hin (siehe Kapitel 3.2.2). Doch liefert auch dieses Werkzeug keine Auskunft über die Charakterisierung dieser Gemischzustände. Folglich bildet die HAZOP-Analyse lediglich eine Teilmenge der Gesamtbeurteilung ab und ist integraler Bestandteil der Gesamtbeurteilung von Explosionsgefahren. Zudem berücksichtigt diese Form der Analyse auch und insbesondere Störungen außerhalb der Bewertungsgrenzen der Gefährdungsbeurteilung von Explosionsgefahren und der Betriebszustände im Normalbetrieb. Zur Bewertung von Zündquellen wiederum stehen die Normen DIN 1129 in Verbindung mit DIN 13237 und DIN 15198, bzw. DIN EN ISO 80079-36 zur Verfügung, die tabellarisch durch die Bewertung führt. Doch auch für diese Referenz bemerkte (Beyer 2004), dass keine Hilfestellung für die Bewertung selbst aufgezeigt wird, sondern vielmehr eine Dokumentation der Ergebnisse vorgegeben wird. Mit Hilfe eines erweiterten Berichtsschemas zeigte (Himstedt und Beyer 2004) exemplarisch die Systematik eines möglichen Werkzeuges auf, welches zudem Hilfen für die Festlegung von Maßnahmen bietet und die Feststellung einer Zündquelle und die Bewertung über die Häufigkeit des Auftretens trennt. Es ist zu beachten, dass dieses Vorgehen in erster Linie für Hersteller konzipiert wurde (siehe Kapitel 4.3).

### **2.4 Der „neue“ Duktus und seine „alten“ Konventionen**

Mit der aktuellen Fassung von 2020 erfuhr die Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 720 eine erneute Novellierung und trägt damit den Anforderungen der BetrSichV und GefStoffV (von 2015) Rechnung. Die Fortschreibung und Änderungen innerhalb der TRGS 720 sind in (Losert 2018) und (Barth et al. 2020) abstrahiert. Sie verweisen dabei auch auf die Relevanz der verwendeten Nomenklatur und seiner Bedeutung im Beurteilungsprozess der Explosionsgefahr.



**Bild 9: Beziehung „gefährliches explosionsfähiges Gemisch“ und „gefährliche explosionsfähige Atmosphäre“, nach (Losert 2018)**

Als vorrangige Änderung kann die Differenzierung zwischen dem gefährlichen explosionsfähigen Gemisch<sup>1</sup> und der gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre<sup>2</sup> benannt werden; letztere mit dem Ziel der Definition explosionsgefährdeter Bereiche<sup>3</sup>. Aus der Visualisierung (Bild 9) durch (Losert 2018) geht die Beziehung dieser Gemischzustände von chemischen Arbeitsstoffen, zu denen explosionsfähige Stoffe aufgrund ihrer physikalischen Einwirkungen gemäß GefStoffV gehören, zu ihrer Umgebung hervor.

In dieser Arbeit wird dieses Begriffsverständnis gemäß dieser Definition verwendet. D. h. die allgemeingültigen Aussagen werden unter dem Wortlaut der explosionsfähigen Gemische beschrieben, gelten jedoch - insofern nicht ausdrücklich auf atmosphärische Bedingungen bezogen - für explosionsfähige Atmosphäre ebenso. Dies wird angewendet, da die beiden Beispielanlagen außerhalb der atmosphärischen Bedingungen betrieben werden. Ein explosionsgefährdeter Bereich in der Anlagenumgebung wiederum unterliegt in der Regel den Bedingungen einer explosionsfähigen Atmosphäre.

Aus dem bekannten *Duktus* der Vorgängerregularien wurden aufgrund der benannten Unterscheidung zwei Abfrageschemas. Im Wesentlichen liegt hierbei das Unterscheidungsmerkmal in der Freiwilligkeit der Zoneneinteilung für gefährliche explosionsfähige Atmosphären. Eine

<sup>1</sup> Gefährliches explosionsfähiges Gemisch ist ein explosionsfähiges Gemisch, das in solcher Menge auftritt, dass besondere Schutzmaßnahmen für die Aufrechterhaltung der Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten oder anderer Personen erforderlich werden, vgl. (TRGS 720)

<sup>2</sup> Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre ist ein gefährliches explosionsfähiges Gemisch mit Luft als Oxidationsmittel unter atmosphärischen Bedingungen (Umgebungstemperatur von -20 °C bis +60 °C und Druck von 0,8 bar bis 1,1 bar), vgl. (TRGS 720)

<sup>3</sup> Explosionsgefährdeter Bereich ist der Gefahrenbereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann, bzw. Zone: Explosionsgefährdete Bereiche, in denen Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung oder zur Auswirkungsbegrenzung erforderlich sind, können nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen unterteilt werden. Zur Definition der Zonen siehe Anhang 1 Nummer 1.7 GefStoffV, vgl. (TRGS 720)

Zoneneinteilung für gefährliche explosionsfähige Gemische ist gemäß geltenden Regularien nicht vorgesehen, wenngleich eine dennoch „sachlich gedachte“ Zone auch dabei die anforderungsgerechte Geräteauswahl unterstützt.

Die Kopplung von definierten Wahrscheinlichkeiten auftretender explosionsfähiger Atmosphäre (ständig, gelegentlich, selten) mit der Vermeidung von Zündquellen mündet in einem gleich geringen Restrisiko, welches nach (Barth et al. 2020) implizit dem gesellschaftlich-tolerierbaren Maß entspricht. Es gilt somit das probabilistische Prinzip, das ausgehend von der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von explosionsfähiger Atmosphäre in gefahrdrohender Menge die erforderlichen Maßnahmen abgeleitet werden. Der Leitfaden zur Durchführung der ATEX-Richtlinie 1999/92/EG, veröffentlicht durch (BGN 2003), betont unter dem Absatz der Beurteilungsmaßstäbe explizit, dass die Beurteilung der potentiellen Explosionsgefahr unabhängig davon zu bewerten ist, ob Zündquellen vorhanden sind oder auftreten können. Auch die TRGS 720 beschreibt diese Bedingung damit, dass für die Festlegung von Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung vorausgesetzt wird, dass das Auftreten eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches und das Wirksamwerden der Zündquelle unabhängig sind. Andernfalls greift der final-orientierte Explosionsschutz. Zudem ist für die Zündquellenbewertung zwar das Maß der eingebrachten Energie als Vergleichsgröße der Äquivalenzenergie relevant, jedoch finden Ort und Zeitpunkt der auftretenden Zündquelle in Kombination mit dem Gemisch keine hinreichende Berücksichtigung. Für die Festlegung von konstruktiven Maßnahmen hingegen ist es gängiges Mittel, den Ort einer Zündung, der den Verlauf einer Explosion beeinflusst, einzubeziehen. Dieses Mittel wird bei der Auslegung von Maßnahmen (i. d. R. durch den Hersteller konstruktiver Explosionsschutzeinrichtungen) angewendet. Im Rahmen des *Duktus* unterscheidet das final-orientierte Schutzkonzept keine differenzierten Maße auftretender Explosionen, sondern basiert im Rahmen dessen auf der weiterhin vorliegenden Explosionsgefahr. Es wird von Auswirkungen üblichen Ausmaßes gesprochen, was im Falle einer Explosion bis zu tödlichen Verletzungen der in der Anlagenumgebung befindlichen Person sowie der Anlagenzerstörung führen kann.

Alle Bewertungsmaßstäbe finden im Rahmen des Normalbetriebes Anwendung. Demnach sind - neben Inspektion und Wartung - Freisetzungen aufgrund von betriebsüblichen Störungen zwar inbegriffen, nicht jedoch darüberhinausgehende Störungen. Diese Konvention nimmt einen erheblichen Einfluss auf das Gesamtergebnis der Bewertung nach *Duktus*, schließt sie doch die Anwendung dieses Vorgehens für erkannte Szenarien z. B. als Ergebnis einer HAZOP-Analyse teilweise aus.

Das Prinzip des schrittweisen Vorgehens nach *Duktus* resultiert in der postulierten Einhaltung der Rangfolge von Maßnahmen zur Erreichung des rechtlich erforderlichen Schutzniveaus (siehe Bild 4). Es wird vorgegeben, dass ein erfolgreicher Abschluss der Beurteilung, ob inhärent oder kausal-orientiert, nur dann möglich ist, wenn die Gefahr (sicher) verhindert gilt. Bildlich gesprochen ist dies erst dann der Fall, wenn ein Dominostein als Glied der Kette fallender Steine sicher entfernt wird. Dies ist z. B. unter Anwendung der Maßnahmen nach TRGS aufgrund der sogenannten Vermutungswirkung der Fall. Ein deterministisches Vorgehen bietet dabei die TRGS 725, welche die Zuverlässigkeit für technische Maßnahmen der MSR-Einrichtungen beziffert und ebenso auf den bekannten 2-Fehler-Prinzip beruht. Die notwendige Anzahl an Reduzierungsstufen<sup>4</sup> oder zulässigen Fehlertoleranzen ist von der festgelegten Zone abhängig, welche vor Maßnahmen festzulegen ist und daher bereits für den inhärenten Explosionsschutz gilt. Ausschließlich für betriebsbewährte Praxis kann auch eine Fehlertoleranz von null zulässig sein. Organisatorische Maßnahmen werden weiterhin nicht mittels Zuverlässigkeit quantitativ beschrieben, denn eine akzeptable Beschreibung von Zuverlässigkeit außerhalb definierbarer Performance Level (PL) oder Safety Integrated Level (SIL) von Einrichtungen ist schwerlich zu argumentieren.

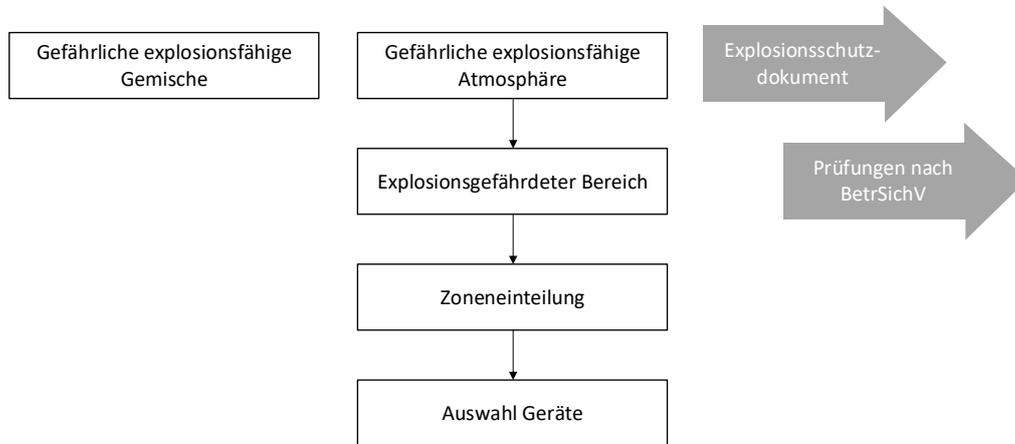
Durch diese Konventionen kann dem *Duktus* folglich ein intrinsischer Sicherheitsfaktor zugesprochen werden, da „zum-Teil-wirkende“ Schutzmaßnahmen nicht durch Zuverlässigkeit beschreibbar sind und somit keinen nachweislich sicheren Anlagenbetrieb (im Sinne der Vermutungswirkung) darstellt. Dies kann sogar in einer Aufkaskadierung von Sicherheitsreserven münden; auch durch getroffene (konservative) Annahmen, die nicht verifiziert sind. Das trifft für Stäube mehr zu denn für Gase. Beispielsweise scheint die Anwendbarkeit eines inhärenten Maßnahmenkonzeptes vergleichsweise unsicher, wie auch die Schwierigkeiten mit sicherheitstechnischen Kenngrößen und der Notwendigkeit eines 50 %igen Unsicherheitsfaktors zeigen. Für Gas-Luft-Gemische hingegen sind die Gegebenheiten der Gemisch- und Umgebungszustände messbarer und die Konzentrationsüberwachung ein probates Mittel in der Praxis.

Wenngleich bereits für gefährliche explosionsfähige Atmosphäre eine Freiwilligkeit für die Festlegung ausgebildeter explosionsgefährdeter Bereiche und deren Definition in Form von Zonen eingeräumt wird (die bei nicht-Anwendung bei der Auswahl von Geräten der Zone 20/0 zu entsprechen hat), so gelten für die gefährlichen explosionsfähigen Gemische außerhalb atmosphärischer Bedingungen weitere ermäßigte Verpflichtungen ausgehend von geltenden

---

<sup>4</sup> Das erforderliche Maß an Sicherheit der Maßnahmen zur Vermeidung oder Einschränkung von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre und der Zündquellenvermeidung wird in dieser TRGS durch Reduzierungsstufen ausgedrückt. (TRGS 725, 2018)

Regularien und ihren Anwendungsgrenzen. Dies gilt nicht zuletzt bis hin zu den Prüfpflichten nach BetrSichV. Das folgende Bild 10 veranschaulicht diese Gegenüberstellung und Herangehensweisen:



**Bild 10: Prüfung nach BetrSichV für überwachungsbedürftige Anlagen, nach (Hesener 2022)**

# 3 Charakterisieren apparativ-technischer und prozessual-betrieblicher Bedingungen der untersuchten Realanlagen

## Inhalt

---

3.1 Explosionsfähiges Staub-Luft-Gemisch im Inneren von Apparaturen .....	28
3.1.1 Anlagencharakteristik der exemplarischen Realanlage.....	29
3.1.2 Ermitteln von Störungsszenarien mittels HAZOP-Analyse.....	32
3.1.3 Stand der Sicherheitstechnik .....	33
3.2 Explosionsfähiges Gas-Luft-Gemisch im Inneren von Apparaturen .....	34
3.2.1 Anlagencharakteristik der exemplarischen Realanlage.....	35
3.2.2 Ermittlung von Störungsszenarien mittels HAZOP-Analyse.....	38
3.2.3 Stand der Sicherheitstechnik .....	41
3.3 Prozessanalytische Technologien.....	42

---

Erfahrene Experten des Explosionsschutzes betonen immer wieder die Signifikanz des Prozessverständnisses vor der eigentlichen Sicherheitsbetrachtung. Dies schließt innerhalb definierter Systemgrenzen die Erhebung folgender Parameter ein und bildet somit den unerlässlichen ersten Schritt in der Vorgehensweise zur Gefährdungsbeurteilung.

- Stoffliche Parameter
- Apparativ-technische Parameter
- Prozessual-betriebliche Parameter

Die mit der Novellierung und Fortschreibung des *Duktus* geforderte „Gewissheit“ darüber, ob eine Bildung gefährlicher explosionsfähiger Gemische inhärent „sicher“ verhindert ist, betont diese Notwendigkeit, da Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge betrieblicher Explosions-

ereignisse jeglichen Ausmaßes an das Wissen und die Wechselwirkung dieser Parameter geknüpft sind.

Mit Hilfe von prozessanalytischen Technologien wird eine physikalische Größe erzeugt und die Möglichkeit der Bildung von gefährlichen explosionsfähigen Gemischen beschreibbar gemacht. Unter Einsatz von Online-Messungen können die stofflichen, apparativen und prozessualen Bedingungen in jeder Prozessphase definiert werden. Während die Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen eine feste Größe in der Gefährdungsbeurteilung von Explosionsgefahren ist, stellt die Erfassung weiterer Parameter den Anwender zum Teil vor Herausforderungen. Die gegenwärtigen technischen Möglichkeiten erlauben es jedoch, auch diese Parameter frühzeitig zu ermitteln und in der Vorgehensweise für die Beurteilung und Vermeidung von Explosionsgefährdungen (kurz: *Duktus*) früher anzusetzen.

Die Verifizierung von Forschungshypothesen und resultierende Vorgehen sind anhand eines Beispiels nur selten gegeben bzw. nur an diesem Beispiel belegt. Daher sollen im Folgenden das Werkzeug der Kritikalitätsbewertung, die zu generierenden Größen sowie deren Wechselwirkung anhand zweier grundlegend verschiedener staub- und gasführender Anlagen aufgezeigt werden, um ein möglichst breites Anwendungsspektrum des Modells und der notwendigen Generierung des Dateninputs abzudecken.

Die Systemabgrenzung und die Zerlegung der Teilsysteme in die einzelnen Prozessphasen helfen dem Beurteiler bei einer systematischen Herangehensweise. Mit der vermeintlichen Absicht der Erstellung einer umfassenden Explosionsgefährdungsbeurteilung unter Nutzung der HAZOP-Analyse, wie laut (Barth 2020) betriebspraktisch vorzufinden, werden jedoch nur Abweichungen vom Normalprozess abgebildet und die typischen und in der Anzahl überwiegender Phasen des Normalbetriebes z. T. außer Acht lassen. Ggf. ist eine Anlage auch nur unter seltenen Störungsszenarien als Anlage in explosionsgefährdeten Bereichen einzuordnen und ohne HAZOP-Analyse als solche gar nicht ersichtlich. Sind die identifizierten Szenarien demnach ausschließlich außerhalb betriebsüblicher Störungen zu verorten, findet die Anlage keine Berücksichtigung im Rahmen der Explosionsgefährdungsbeurteilung und Maßnahmen entsprechend den Maßstäben der ATEX-Regularien werden nicht getroffen.

### **3.1 Explosionsfähiges Staub-Luft-Gemisch im Inneren von Apparaturen**

Da in Kapitel 4 die prozessanalytischen Methoden für die Charakterisierung staubführender Anlagen hinsichtlich des potenziellen Vorhandenseins gefährlicher explosionsfähiger

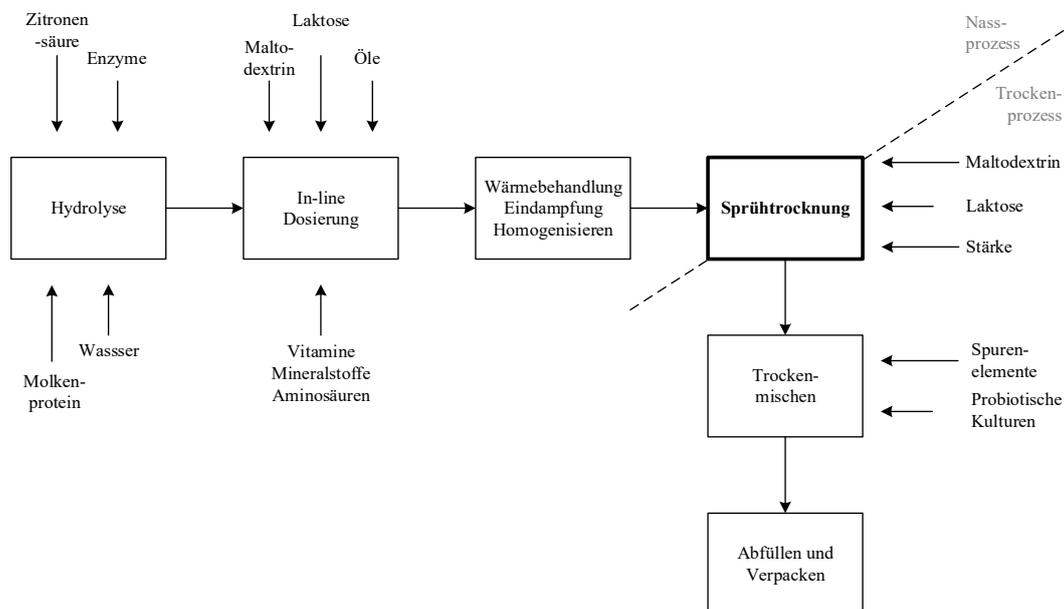
Gemische zum Einsatz kommen, wird im Folgenden die hierfür exemplarische Anlage - der Sprühtrockner zur Milchpulverproduktion - beschrieben. Auch wird dahingehend das Schutzkonzept gemäß gegenwärtigem Stand der Sicherheitstechnik aufgegriffen, um im späteren Verlauf aufzuzeigen, ob ein Einfluss auf modifizierte Ansätze der Maßnahmenarchitektur durch die angestellten Untersuchungen im Zusammenhang eines risikologischen Kontexts besteht.

In der Sprühtrocknung wird zwischen diversen Bautypen unterschiedlicher Komplexität differenziert. Die Komplexität der Sprühtrocknung zeichnet sich durch eine multifunktionale Vernetzung (Vielzahl und Vielfalt von Elementen, vgl. Schlüter 2017) und die daraus resultierenden Abhängigkeit vielfältiger Zusammenhänge und Wechselwirkungen aus. Die Komplexität schließt die Kompliziertheit von Systemen ein. Die (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7), die den derzeit geltenden Stand der Sicherheitstechnik für Sprühtrocknungsanlagen widerspiegelt, beschreibt - neben bekannten Brand- und Explosionsgefahren und abgeleiteten anerkannten Schutzmaßnahmen - schematisch die Bauformen und Einzelaggregate. Ein Stand der Sicherheitstechnik, welcher sich vom allgemein gültigen Mindestschutzkonzept unterscheidet, findet für sogenannte konventionelle Sprühtrockner Anwendung und ist in (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7.1) ebenfalls standardisiert aufgezeigt. Dieser Bautyp zeichnet sich durch seine herkömmlich typische Trocknungsart mit rotierender Luftbewegung und Trocknungskammer mit Konus aus. In den Folgekapiteln wird demgegenüber jedoch auf die moderne mehrstufige Sprühtrocknung, vgl. (Dammann 2015), für die eine senkrechte Luftbewegung und dadurch verursachte Kreislaufführung mit Abluftaustritt in der Trocknungskammerdecke charakteristisch ist, eingegangen. Aufgrund bestehender Publikationen zur „konventionellen“ Trocknung durch z. B. (Siwek 2012) wird der hier im Fokus stehende Bautyp im weiteren Verlauf als „unkonventioneller“ Sprühtrockner bezeichnet, um eine Abgrenzung und zeitgleich Vergleichbarkeit zu erzielen, vgl. (Maiwald 2016).

### **3.1.1 Anlagencharakteristik der exemplarischen Realanlage**

Die Sprühtrocknung zur konvektiven Trocknung von Molkereiprodukten innerhalb eines heißen Luftstroms, findet seit ca. 1900 Anwendung. Neben dem ursprünglichen Anwendungsbereich zum Trocknen und Haltbarmachen von natürlicher Milchproduktion im Überschuss, können Suspensionen oder Lösungen jedoch auch in weiteren Feldern der Lebensmittelindustrie sowie in der pharmazeutischen und chemischen Industrie zur Herstellung diverser Produkte in Pulver-, Granulat- oder Agglomeratform sprühgetrocknet werden. Grundlagen dieser Technologie sind in den einschlägigen Werken von (Masters 1991; Miranda et al. 2015) und (GEA Niro A/S 2015) nachzulesen.

Seit den Ursprüngen der Sprühtrocknung fanden jedoch nicht nur die Produkte zur Weiterentwicklung, sondern auch und insbesondere im letzten Jahrzehnt die Verfahrenstechnik und Bauform von den bereits benannten konventionellen Trocknern hin zur unkonventionellen Trocknung, was sich nach (Grund et al. 2010) aus der Erfordernis zur Verringerung des Staubgehaltes pulverförmiger Nahrungsmittel zur Verbesserung von Instant-Qualitäten ergibt. Allen Bautypen gleich sind Einzelaggregate - wie Speise- und Heißluftsystem, Trockenturm, inkl. Zeräubungsvorrichtung sowie Abscheidesysteme, bei denen einem Filter in der Regel ein Zyklon vorgeschaltet ist - und die Zerlegung des Gesamtprozesses in den Nass- und Trockenprozess. Letzterer soll im Folgenden im Zusammenhang mit dem Trocknungssystem Typ G in Kombination mit der Trocknungskammer Typ C der (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7) in den wesentlichen (auf das Verständnis der weiteren Ausführungen dieser Dissertation zielenden) Zügen beschrieben werden, während der Nassprozess zur Konzentratgewinnung in Abhängigkeit der Rezeptur vernachlässigt wird; ebenso die der Sprühtrocknung nachgeschaltete Behandlung der Produkte zur Trockenmischung und Abfüllung. Eine Übersicht aller Prozessschritte und Produktströme ist in Bild 11 abgebildet.

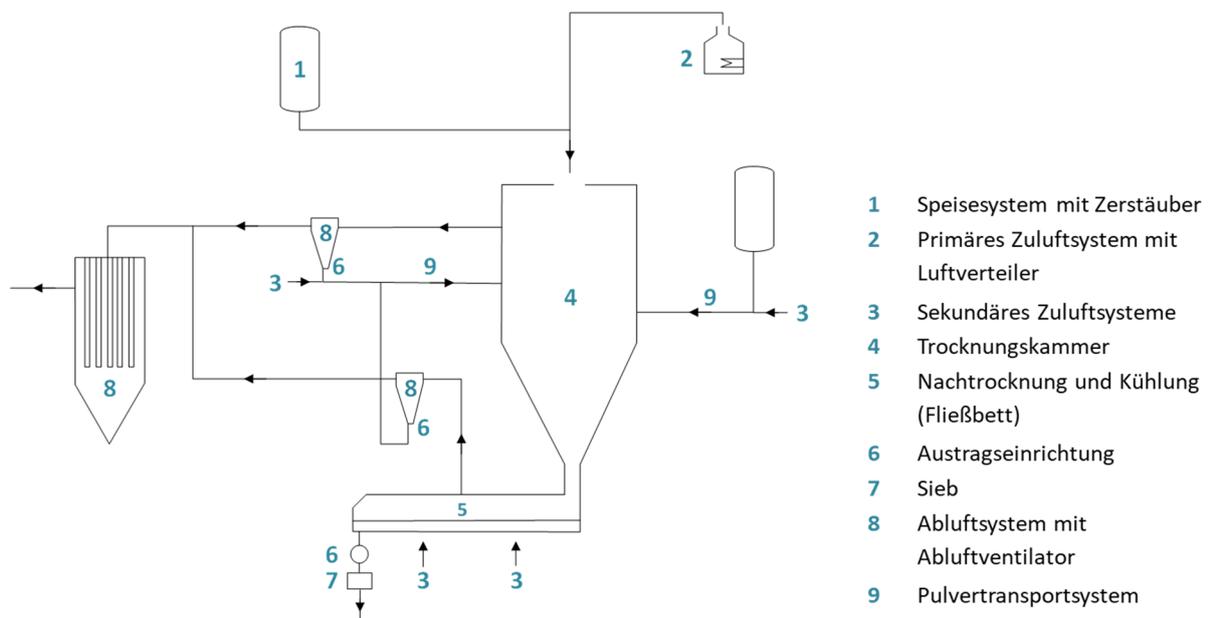


**Bild 11: Prozessschritte und Produktströme des Nass- und Trockenprozesses der Sprühtrocknung**

Die zur thermischen Trocknung benötigte Heißluft wird über Radialventilatoren erzeugt und mittels erdgasbetriebener Brenner erwärmt. Die dabei entstehende auf ca. 380 °C temperierte Luft wird über ein Rohrleitungssystem zur verjüngten Heißluftdüse geführt, wo sie eine Geschwindigkeitszunahme erfährt und mit über 200 m/s in die Trocknungskammer geführt wird. Neben der Heißluftdüse der Primärluft befinden sich auch die Hochdruckdüsen zur Konzentrateindüsung im Bereich der Trocknungskammerdecke. Die Anordnung jener ist in ihren

Winkeln so ausgelegt, dass eine Überlagerung des Sprühbildes vermieden wird. Das Konzentrat nimmt sich der umgebenden Geschwindigkeit der Primärluft an und wird folglich zur Trocknung in die Trocknungskammer getragen. Dabei findet der erste Schritt der Trocknung statt, bei der die Flüssigkeit der Teilchenoberfläche rasch und gleichmäßig verdampft, vgl. (ESCIS 2001; Gehrman et al. 2009). Die im Inneren befindliche Feuchtigkeit kann jedoch nicht derart rasch getrocknet werden. Es entsteht ein Flüssigkeitsgefälle.

Die Verweilzeit der einzelnen Partikeln in der Trocknungskammer ist dabei nicht nur von dieser Trocknung abhängig, sondern auch von der erzielten Agglomeration. Erst nach Erreichung einer gewissen Partikelgröße kann das Produkt mittels Schwerkraft aus dem konischen Bereich der Trocknungskammer getragen werden. Kleinere Partikeln werden aufgrund der senkrechten Luftführung in Kombination mit der an der nahe der Trocknungskammerdecke befindlichen Abluft verursachten Kreislaufführung umgelenkt und zum weiteren Agglomerieren mit den eingetragenen Tröpfchen und Stäuben zurück nach oben transportiert. Zu dieser Agglomeration dient nicht nur die Konzentrateindüsung, sondern auch Zumischungen innerhalb der zylindrischen Trocknungskammer. Diese Zumischungen, z. B. Maltodextrin, wie Bild 12 visualisiert, werden über einen Vorlagebehälter pneumatisch in den Sprühturm gefördert. Eine weitere Zumischung ist durch die Feinpulverrückführung aus den mit dem Abluftstrom der Trocknungskammer und Fließbetten getragenen Staub gegeben.



**Bild 12:** Fließschema Sprühtrocknungsprozess (Kombination Typ G, Typ C gem. (VDI Verein Deutscher Ingenieure 2010)

Der über die Zyklone abgeschiedene Staub wird über darunter befindliche Vorratsbehälter gesammelt und mittels Zellenradschleuse über eine Förderleitung ebenfalls in den zylindrischen

Trocknungskammerbereich zurückgeführt. Die gereinigte Luft gelangt über einen nachgeschalteten Rundfilter zur weiteren Abscheidung und Einhaltung der Emissionsgrenzwerte ins Freie. Die aus dem konischen Bereich mittels Schwerkraft getragenen Partikeln gelangen in das nachgeschaltete Fließbett. Dieses ist in zwei Teilsysteme zu zerlegen: Nachtrocknung und Pulverkühlung. Beides erfolgt innerhalb des Fließbetts mit verschiedenen temperierten Luftströmungen - die über einen Wärmetauscher über ein Siebblech zum Produkt geführt werden - und verschiedene Schichthöhen. Das Produkt wird dabei in einen sogenannten quasistationären Zustand versetzt. In der Nachtrocknung soll mit abnehmender Trocknungsgeschwindigkeit der zweite Trocknungsschritt erzielt werden. Die im Inneren der Teilchen befindliche Flüssigkeit muss nach außen diffundieren und der dabei zu überwindende Widerstand, insbesondere bei agglomerierten Teilchen aufgrund des zunehmenden Teilchendurchmessers und Schichthöhe in der Fließbetttrocknung, wird nach (ESCIS 2001) größer, was eine Trocknung auf nahezu 0 % Restfeuchtigkeit deutlich erschwert, jedoch auch nicht zwingend erforderlich ist. Über eine Siebmaschine zur Separierung von Fremdpartikeln gelangt das nunmehr fertige Endprodukt über einen Vorlagebehälter zur weiteren Trockenmischung, von z. B. Spurenelementen.

### **3.1.2 Ermitteln von Störungsszenarien mittels HAZOP-Analyse**

Für die Sprühtrocknungsanlage steht das grundsätzliche Vorhandensein eines potentiell explosionsfähigen Gemisches innerhalb der geschlossenen nicht einsehbaren Trocknungskammer außer Frage. Die Notwendigkeit einer HAZOP-Analyse zur Identifikation von Szenarien, die zur Bildung eines explosionsfähigen Staub-Luft-Gemisches führen können, ergab sich somit eingangs nicht. Die Staubverteilung innerhalb der Trocknungskammer ist apparate- und prozessbedingt dauerhaft vorhanden.

Nichtsdestotrotz kann das Hinzuziehen dieses Vorgehens die Veränderung des Sprühbildes, z. B. durch Ausfall von Rückführung oder Reduzierung/Erhöhung des Drucks von Produkt- und Lufteindüsung, beschreiben und einem mikroskopischen Blickwinkel förderlich sein. Ebenso für die Ableitung betriebsüblicher Störungen mit sicherheitsrelevanten Folgen und dessen Vermeidung. Mit dem Ziel die Trocknungskammer unter idealisierten Bedingungen zu charakterisieren, wurde auf eine exemplarische Anwendung verzichtet.

Auch kann die HAZOP-Analyse eine Unterstützung bei der Identifizierung von Störungsszenarien sein, die die Begünstigung von Selbstentzündungsvorgängen bewirken, und ist somit für die Sprühtrocknung auch bei der Zündquellenbewertung von Vorteil.

Die exemplarische Anwendung der HAZOP-Analyse als Teil der Gefährdungsbeurteilung findet für die gasführende Beispielanlage in Kapitel 3.2.2 Anwendung. Grund hierfür sind die größeren Unsicherheiten des Gemischzustandes und der Identifikation dazugehöriger Szenarien einer Bestandsanlage. Das Vorgehen selbst gleicht sich für sowohl staub- als auch gasführende Anlagen.

### **3.1.3 Stand der Sicherheitstechnik**

Da der Stand der Sicherheitstechnik, national abgebildet in der (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7) sowie in Publikationen wie (Recommendations For Fire Prevention In Spray Drying Of Milk Powder 1986; ATEX Explosionsschutz GmbH 2010; Occupational Safety and Health Service 1993; ESCIS 2001) diverse allgemein anerkannte Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen zulässt und erst im Rahmen der jeweiligen Einzelbetrachtung konkretisiert werden kann, wird im Folgenden nur der vorgegebene Rahmen der geltenden Schutzkonzepte - insbesondere für die Trocknungskammer - wiedergegeben. Die Bezeichnung Schutzkonzept verweist hierbei bereits auf den geltenden Ansatz der konstruktiven Maßnahmenarchitektur, wengleich auch die differenzierte Betrachtung für konventionelle Sprühtrockner dargelegt werden soll, da diese einen seinerzeit und bis heute geltenden maßgebenden Fortschritt zum Stand der Sicherheitstechnik liefert.

Die zu beurteilenden Gefahren im Sinne eines präventiven Explosionsschutzkonzepts sind zum einen die Staubverteilung in der Trocknungskammer und resultierendes Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Gemische und zum anderen das Vorhandensein wirksamer Zündquellen und dabei als charakteristisches Merkmal der Sprühtrocknung die Glimmnestbildung.

Im Falle der konventionellen (herkömmlichen) Trocknung ist davon auszugehen, dass durch den Bautyp mit rotierender Luftbewegung ohne Feinpulverrückführung und ohne innenliegendem Fließbett sowie bei einer gemittelten Staubkonzentration unterhalb der unteren Explosionsgrenze eine Aufsummierung der Konzentration lediglich im konischen Anlagenbereich stattfindet. Resultierend ist mit dem Vorhandensein eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches auch nur im Konus bzw. im unteren Drittel der Trocknungskammer zu rechnen. Da trotz Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung keine ausreichende Zonenreduzierung erreicht werden kann, ist die Auslegung final-orientierter Maßnahmen erforderlich, wengleich sich diese konstruktiven Maßnahmen der Explosionsunterdrückung nur auf den benannten unteren Trocknungskammerbereich beziehen, vgl. (Siwek 2000).

Dem gegenüber stehen jedoch die unkonventionellen (modernen, mehrstufigen) Sprühtrockner, die aufgrund ihrer qualitativen Vorteile heuer überwiegend Anwendung finden. Aufgrund der folgenden wesentlichen Merkmale ist ein selbiges Schutzkonzept jedoch nicht anwendbar:

- Internes oder nicht-entkoppeltes Fließbett
- Abluftkanäle in der Trocknungskammerdecke und dadurch resultierende Strömungsumkehr
- Feinpulverrückführung
- Zumischung

Durch diese beschriebenen apparativ-technischen und prozessual-betrieblichen Einflüsse ist nach (Grund et al. 2010) von einer Aufsummierung um das 2-3 fache der gemittelten Staubkonzentration auszugehen und durch die Strömungsumkehr des Feianteils ist zudem mit einer Aufsummierung dessen im oberen Trocknungskammerbereich zu rechnen. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Gemische in der gesamten Trocknungskammer nimmt somit erheblich zu.

Nach geltendem Stand der Sicherheitstechnik kann auch für unkonventionelle Sprühtrockner das Auftreten wirksamer Zündquellen nicht sicher vermieden werden.

Seit 2015 findet im Kontext von Zündquellen und Zündquellenvermeidung auch die (TRGS 725) Anwendung, die in den wesentlichen Zügen auch den bisherigen probabilistischen Ansatz aufgreift und die Anforderungen an die funktionale Sicherheit der Sicherheits- und Schutz Einrichtungen spezifiziert. Dieses Konzept mit ausreichender Zuverlässigkeit muss dabei auch für alle potentiellen Zündquellen Anwendung finden und folglich auch für die exothermem Prozesse der Selbstentzündung. Die begünstigenden Effekte der Bildung von Glimmnestern in der Sprühtrocknung liegen in der Dauer der Wärmeeinwirkung, der Temperatur sowie dem Volumen der Produktablagerung begründet. Es sind Maßnahmen zu ergreifen, die eine solche Ablagerung direkt vermeiden. Zudem sind technische Lösungen zur Brandfrüherkennung mittels CO-Detektion verfügbar. Die Erreichung einer ausreichend zuverlässigen Zonenreduzierung ist dabei jedoch wiederum abhängig von den Anforderungen der TRGS 725.

### **3.2 Explosionsfähiges Gas-Luft-Gemisch im Inneren von Apparaturen**

Da in Kapitel 5 die prozessanalytischen Methoden für die Charakterisierung gasführender Anlagen hinsichtlich des potenziellen Vorhandenseins gefährlicher explosionsfähiger Gemische zum Einsatz kommen, wird im Folgenden die hierfür exemplarische Anlage - der Brennofen zur Anodenproduktion - beschrieben. Auch wird dahingehend das Sicherheitskonzept gemäß

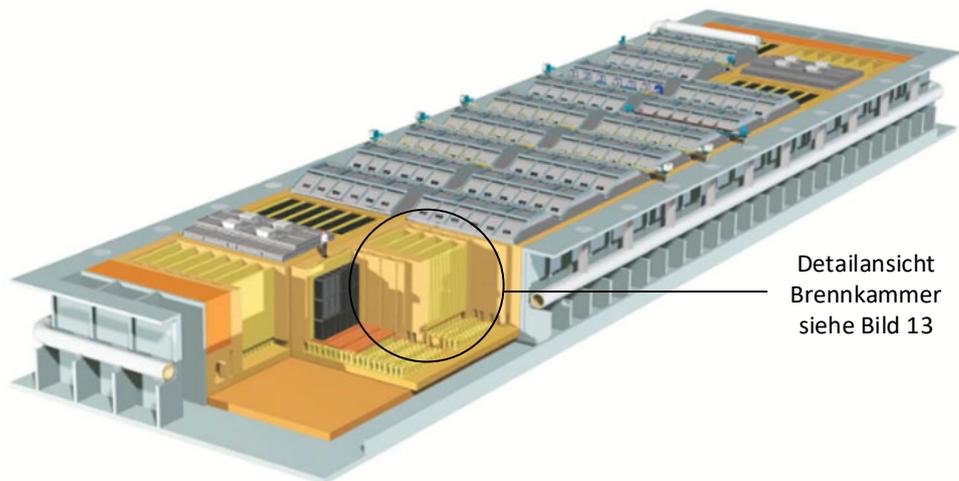
derzeit geltendem Stand der Sicherheitstechnik aufgegriffen, um im späteren Verlauf aufzuzeigen, ob ein Einfluss auf modifizierte Ansätze der Maßnahmenarchitektur durch die angestellten Untersuchungen im Zusammenhang eines risikologischen Kontexts besteht.

Anoden sind ein wesentlicher Bestandteil der Wertschöpfungskette zur Fertigung von Primäraluminium. In der Schmelzelektrolyse werden diese als elektrischer Leiter eingesetzt und bilden folglich den Gegenpol der Kathode. Es werden sogenannte Grüne Anoden in den Brennofen eingesetzt und als gebrannte Anoden der Elektrolyse zugeführt. Die Bestandteile Grüner Anoden sind im Wesentlichen Koks und Steinkohlenteerpech, welche nach dem Vermengen und Verkneten mittels Rüttelmaschine in die gewünschte Form gebracht werden. Für das Brennen dieser Anoden gibt es zwei Verfahren, wobei für die weitere Bewertung das Verfahren mit „geschlossenem Deckel“ Anwendung finden soll und die ökonomisch (effiziente) sinnvolle Erüchtigung im Bedarfsfall. Während Brennkammern mit „offenem Deckel“ präferiert bei Neuanlagen zum Einsatz kommen, so ist eine komplette Umrüstung von Bestandsanlagen vergleichsweise sehr kostenintensiv und notwendige Modernisierungen und Steuerungen werden einem solchen Tausch vorgezogen. Daher wird die hier berücksichtigte funktionelle Technologie auch in den kommenden Jahren nicht wesentlich an Relevanz verlieren.

Auch für Bestandsanlagen gilt, dass der Betreiber über den geltenden Stand der Sicherheitstechnik informiert sein muss und seine Anlagen stets in einem dem entsprechenden sicheren Zustand betreiben muss. D. h. dem Betreiber wird dahingehend kein Bestandsschutz eingeräumt und notwendige Optimierungen und eine angepasste Dynamik der Sicherheitsarchitektur sind gesetzlich und nachweislich gefordert, vgl. (Barth et al. 2020).

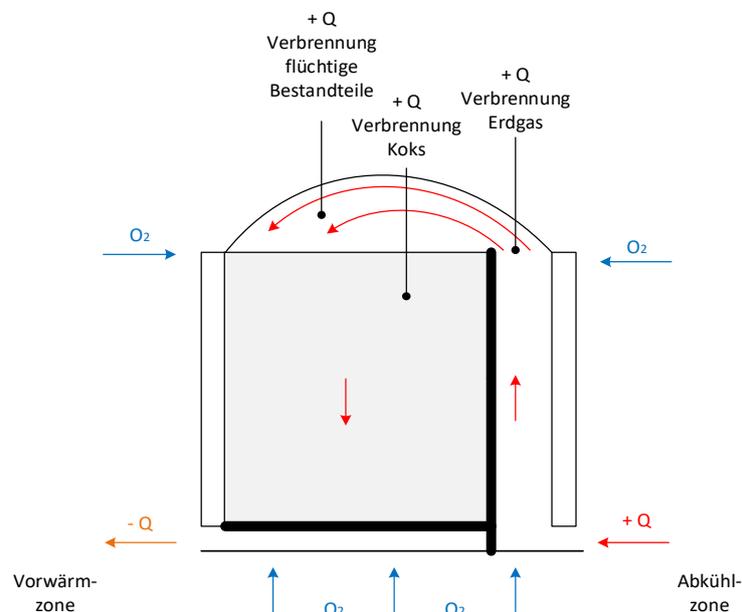
### **3.2.1 Anlagencharakteristik der exemplarischen Realanlage**

Grüne Anoden, bestehend aus Petrolkoks, Steinkohlenteerpech und Restmaterial gebrannter Anoden, werden im sogenannten Grünen Betrieb geformt und zur weiteren Bearbeitung dem Brennofen (Bild 13) zugeführt. Der Brennofen besteht aus 28 Brennkammern zu je fünf Kassetten, in welchen die Grünen Anoden (jeweils 18 pro Kasette, bzw. 90 pro Brennkammer) eingesetzt werden. Zum Schutz vor Luftabbrand werden die Anoden anschließend mit metallurgischen Koks (Zechenkoks als Füllmasse) abgedeckt und umschlossen. Nach Setzen des „Stiefels“ ist die Brennkammer an die Ringleitung und an eine der beiden parallel unabhängigen Feuerzüge eingebunden; d. h. der Stiefel ist ein manuell verfahrbares Rohrstück und Bestandteil der Abluftleitung. Der notwendige Unterdruck kann durch den Ventilator der Gasreinigungsanlage, respektive die Stiefelklappenstellung erzeugt werden.



**Bild 13: Aufbau Brennofen, (Keller und Sulger 2007)**

Der Brennofen kann anhand seiner charakteristischen Temperaturverläufe in drei Zonen unterteilt werden: Vorwärm-, Heiz- (auch Feuer-) und Abkühlzone. Für die Vorwärmzone werden zunächst die heißen Prozessgase aus den nachgeschalteten Brennkammern zur kontinuierlichen Vorheizung der vorliegenden Brennkammern genutzt, d. h. der Zug erfolgt in Richtung der Vorwärmzone sowie vertikal entlang der Kassettenwände (siehe Bild 14). Hierbei erfolgt auch der Wärmeaustausch durch die Kassettenwände über die Füllmasse in die Anoden.



**Bild 14: Aufbau Brennkammer, inkl. Wärmeströmung (Vorderansicht)**

Nach erfolgreicher Vorwärmung der Anoden in den ersten drei Brennkammern bis zur Erreichung der Selbstentzündungstemperatur von Erdgas, wird dieses in der Feuerzone zur Verbrennung zugegeben und eine Beheizung auf eine Temperatur bis zu 1300 °C erfolgt, die auf bis zu

100 h gehalten wird. Nur so kann über die Höhe der Brennkammer eine gleichmäßige Verteilung der Temperatur und somit ein optimales „Brennen“ der Anoden erfolgen.

In Abhängigkeit der in den Brennkammern herrschenden Temperaturen werden bereits ab der Vorwärmzone flüchtige Bestandteile der Anoden, im Wesentlichen Kohlenstoffverbindungen des Steinkohlenteerpechs der Grünen Anoden, freigesetzt und im weiteren Verlauf weitestgehend pyrolysiert. Die austretenden Pyrolysegease steigen durch die Füllmasse nach oben und werden mit den Prozessgasen durch die Kassettenwände mit nach unten gezogen. In der vorgewärmten Brennkammer fangen bei entsprechender Temperatur und Anwesenheit von Sauerstoff diese Pyrolysegease an zu brennen. Die übrigen Bestandteile werden mit dem Abgasstrom über die Ringleitung durch Ventilatoren der Gasreinigungsanlage zugeführt und abgeschieden. Die relevanten Prozessschritte und seine Nebenanlagen sowie Produktströme sind in Bild 15 dargestellt. Dabei wird für die weitere Beurteilung erkenntlich, welcher stoffliche In- und Output in den jeweiligen Prozessschritten entsteht.

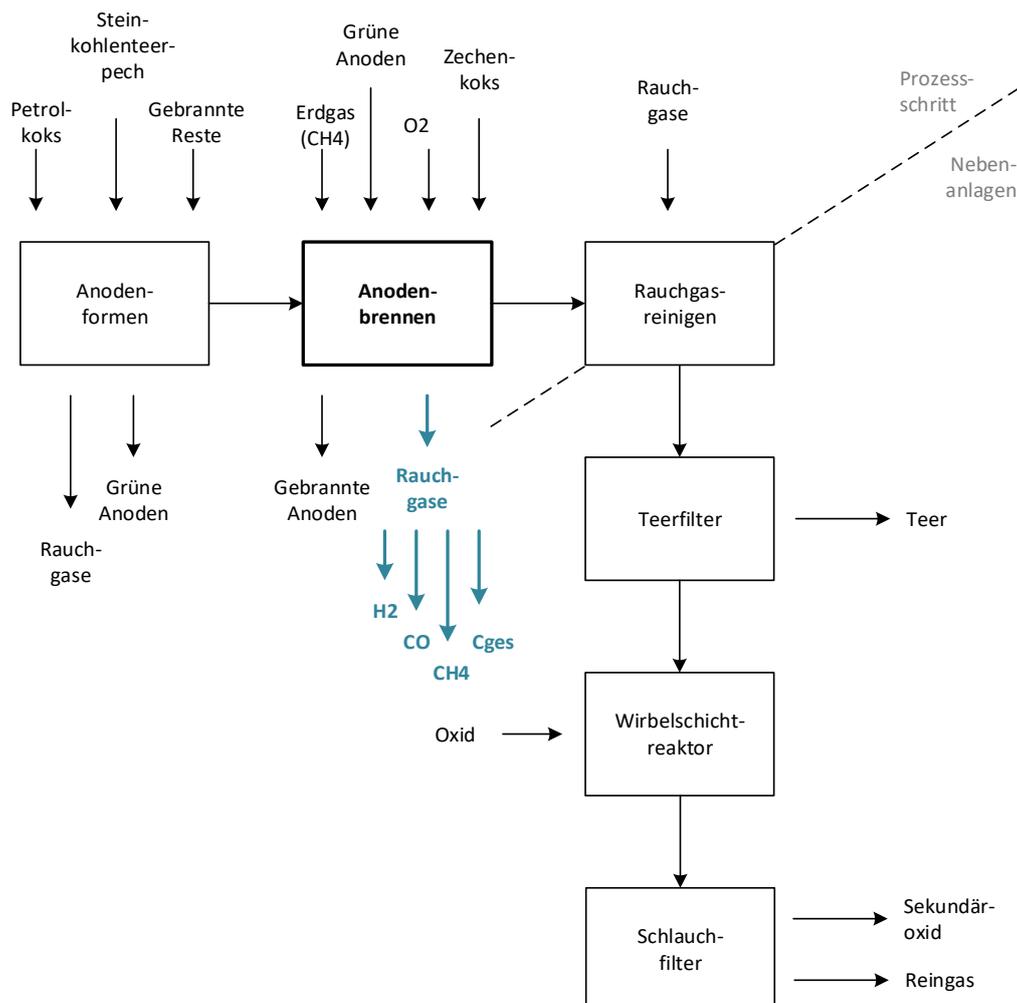


Bild 15: Prozessschritte und Produktströme des Anoden-Brennens

### 3.2.2 Ermittlung von Störungsszenarien mittels HAZOP-Analyse

Selbst wenn die Bewertung der explosionsfähigen Gemische unter Berücksichtigung aller Quellen und Mengen im Normalbetrieb ergeben hat, dass keine Explosionsgefahr besteht, so sind auch die Störungen innerhalb dieser Konvention, inklusive der durch menschlichen Fehlverhaltens verursachten, in die Gefährdungsbeurteilung zu inkludieren. Mit der Novellierung der TRGS 720 spricht der Gesetzgeber nicht mehr nur von der Möglichkeit der Bildung eines explosionsfähigen Gemisches, sondern setzt voraus, dass diese sicher verhindert wird. Vom Wortlaut her erhöht dies die Anforderungen an die Identifizierung der potentiell explosionsfähigen Gemische hin zur Bewertung des Vorhandenseins gefahrdrohender Mengen und seiner Gegenmaßnahmen. Wenngleich die Einteilung von Zonen in explosionsgefährdete Bereiche sich wiederum auf den Normalbetrieb bezieht, so setzt die „sichere Verhinderung“ doch auch die Bewertung störungsbedingter Szenarien voraus und zeigt anhand des vorliegenden Beispiels auch die Relevanz für über die Konvention des Normalbetriebes hinausgehenden Störungen auf. Zu unterscheiden sind dann lediglich die Anforderungen an die abzuleitenden Maßnahmen.

Dieser Anspruch, ausgehend vom hohen Gefährdungspotential einer Explosion, setzt ein systematisches Vorgehen zur Beurteilung voraus. Die Methoden der qualitativen Risikobeurteilung sind vielfältig, können Standardwerken wie (Preiss 2009; Rausand 2011) entnommen werden und werden im Folgenden nicht näher betrachtet oder verglichen. Vielmehr sollen die Szenarien und Ergebnisse der empirisch bewährten Methode einer HAZOP-Analyse einfließen.

Die HAZOP-Analyse findet ihren Ursprung Mitte der 1970er Jahre im britischen Manchester bei den Imperial Chemical Industries (ICI) und wurde gegen 1980 durch die BG Chemie nach Deutschland überführt. Hierzulande ist die Methode als PAAG-Verfahren übersetzt und eingeführt. Dieses Akronym steht für die Vermeidung von Störungen durch Prognose von Abweichungen, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen und Gegenmaßnahmen. Rund 20 Jahre später erhielt das etablierte systematische Werkzeug Einzug in die Normung, vgl. (BG RCI 2020). Aufgrund der zwischenzeitlich geläufigen Benennung als HAZOP-Analyse findet dieses Akronym im Weiteren Verwendung.

Unter Hinzuziehen der für eine HAZOP-Analyse bekannten Leitworte (siehe Bild 16), wurde für den Anwendungsfall des Subsystems Brennofen identifiziert, dass die Bildung eines explosionsfähigen Gemisches lokal die folgenden Ausprägungen annehmen kann:

- in der Umgebung

## Charakterisieren apparativ-technischer und prozessual-betrieblicher Bedingungen der untersuchten Realanlagen

---

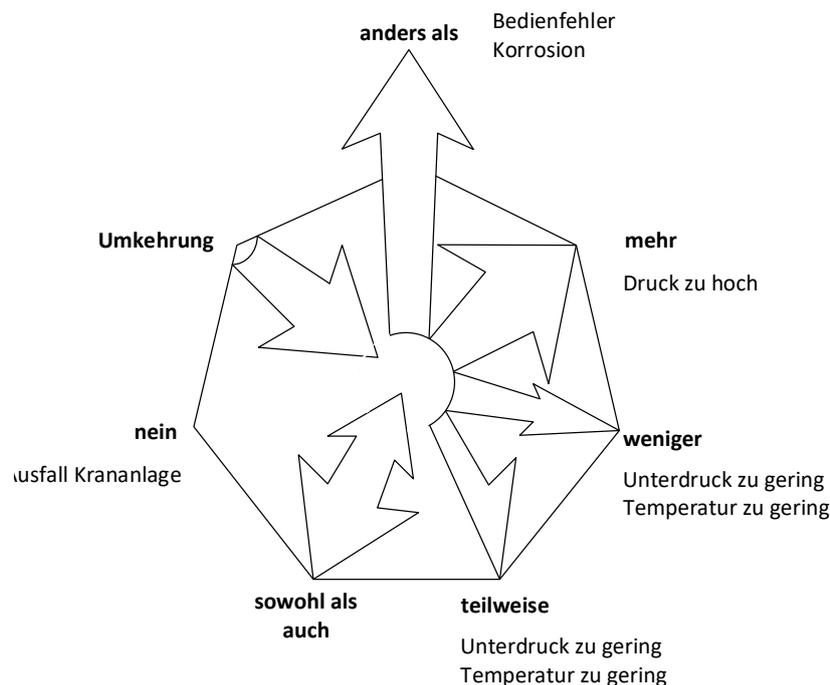
- in der Brennkammer
- in der Gasreinigungsanlage
- in der Ringleitung und im Teerfilter

Die darin auftretenden potentiell gefahrdrohenden Gemischzustände ergeben sich dabei aus

- explosionsfähigen Pyrolysegas und
- explosionsfähigem Erdgas

in Verbindung mit

- erhöhtem Sauerstoff.



**Bild 16: Angewandte Leitworte am Beispiel des Brennofens, nach (IVSS Sektion Chemie 2020)**

In Summe ergaben sich somit aus den in Bild 16 identifizierten relevanten Leitworten allein bei der Berücksichtigung des Subsystems Brennofen mit Brennkammern 16 in Betracht zu ziehende Störungsszenarien, die die Bildung gefährlichen explosionsfähigen Gemisches verursachen können und die Ableitung von Maßnahmen erfordern. Exemplarisch herausgegriffen seien hierbei mit Tabelle 1 drei der Szenarien mit den erfahrungsgemäß höchsten Eintrittswahrscheinlichkeiten basierend auf einem möglichen „zu geringem Unterdruck“:

## Charakterisieren apparativ-technischer und prozessual-betrieblicher Bedingungen der untersuchten Realanlagen

Tabelle 1: Auszug HAZOP-Analyse, „zu geringer Unterdruck“

Leitwort	Ursache	Auswirkung
Unterdruck zu gering	Stiefelklappe ist zu weit geschlossen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zu geringe O<sub>2</sub>-Zufuhr in die Feuerzone und fallende Temperatur</li> <li>- Brennerbrücken öffnen die Durchflussventile für Erdgas</li> <li>- Rasches Abfallen der Temperatur bei Kammerbrand               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Bildung g. e. G. in der Brennkammer</li> <li>○ Bildung g. e. G. in der Gasreinigungsanlage</li> </ul> </li> </ul>
	Ein Ventilator ist ausgefallen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sichtbare Rauchentwicklung</li> <li>- Zu geringe O<sub>2</sub>-Zufuhr in die Feuerzone</li> <li>- Unterdruckverlust im gesamten Ofen               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Bildung g. e. G. in der Brennkammer</li> <li>○ Bildung g. e. G. in der Umgebung</li> </ul> </li> </ul>
	Deckelbruch in der Vorwärmzone nach Herabfallen einer Anode	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sichtbare Rauchentwicklung</li> <li>- Weiteres Strömen von Erdgas in die Brennkammern der Feuerzone und</li> <li>- Erhöhung des Druckes in selbigen</li> <li>- Erhöhung des Unterdruckes in den Brennkammern davor               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Bildung g. e. G. in der Umgebung</li> </ul> </li> </ul>

Bild 17 zeigt eine der in der Studie beschriebene sichtbare Rauchgasentwicklung in der Umgebung des Brennofens mit Verteilung in der gesamten Halle im Falle eines Stromausfalles. Die Rauchgasentwicklung und die von ihr ausgehenden Gefahren können bislang nicht genauer charakterisiert werden.



Bild 17: Rauchgasentwicklung in der Anlagenumgebung nach Stromausfall, (Hydro Aluminium Rolled Products GmbH 2018a)

### 3.2.3 Stand der Sicherheitstechnik

Die für den Brennofen geltenden Sicherheitsanforderungen sind in der (DIN EN 1539) für „Trockner und Öfen, in denen brennbare Stoffe freigesetzt werden“ zusammengetragen. Es wird auf Gefährdungsfaktoren gemäß Gefährdungsbeurteilung verwiesen, wobei der Fokus im Folgenden auf den Explosions- und Brandgefahren liegt, denn die Möglichkeit der Bildung eines explosionsfähigen Gemisches und eine mögliche Zündung sind ebenfalls aufgeführt. Da aus der Vergangenheit bereits Ereignisse eines Abbrandes (Holden und Bergli 2003) sowie einer unkontrollierten Druckfreisetzung (Zenke 2018) bekannt sind, ist nicht nur von der Möglichkeit derartiger Ereignisse die Rede, sondern vielmehr von Wahrscheinlichkeiten. Die Höhe des notwendigen Sicherheits- oder Schutzniveaus ist gemäß geltender Normung anhängig von der Konzentration an brennbaren Stoffen in Relation zur unteren Explosionsgrenze, die freigesetzt werden. Es wird dabei zwischen drei Betriebsbereichen unterschieden, vgl. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2016b).

Das anzuwendende Explosionsschutzkonzept für Trockner und Öfen reicht je nach eingestuftem Betriebsbereich grundsätzlich vom inhärenten Explosionsschutz und der Überwachung der Konzentration und des Eintrages brennbarer Stoffe bis hin zur Zündquellenvermeidung des kausal-orientierten Explosionsschutzes und der Explosionsdruckentlastung der final-orientierten Maßnahmenarchitektur. Auf die Anforderungen hinsichtlich der technischen Zuverlässigkeit für sicherheitsbezogene Steuerungen wird verwiesen.

Das derzeit geltende Sicherheitskonzept des exemplarischen Brennofen basiert auf einer Stellungnahme zum Explosionsschutz durch (EXAM BBG Prüf- und Zertifizierer GmbH 2004). Neben empirischen Übermittlungen ist auch von (Keller und Sulger 2007) die Gefahr einer Explosion durch Unterdruckverlust gelistet. Mit Hilfe der vorgangs beschriebenen HAZOP-Analyse wurden die Ursachen dessen identifiziert und durch weitere mögliche Szenarien erweitert. Dennoch ist aufgrund einer angenommenen höchsten Wahrscheinlichkeit aufgrund des Unterdruckverlustes in erster Linie die Lüftung elektrisch (Ventilatoren) als auch mechanisch (Klappen) zum zuverlässigen Erhalt des Mindestvolumenstroms und dessen Kontrolle zu sichern. Während nach diesem Konzept der (EXAM BBG Prüf- und Zertifizierer GmbH 2004) der Nennvolumenstrom inhärent sicherzustellen ist, so wird in (Inburex Consulting GmbH 2006) zudem die Notwendigkeit einer organisatorischen Notfallprozedur benannt. Dies gilt für den Ausfall der Lüftung sowie für das Versetzen des Stiefels im Normalbetrieb. Für den Brennofen wird dies durch eine Standard Operational Procedure - vergleichbar mit einer Betriebs-

anweisung - vgl. (Hydro Aluminium Rolled Products GmbH 2018b), umgesetzt und sieht insbesondere die folgenden Handlungen vor:

- Haupthahn an allen Gasstationen schließen (manuell)
- Notkamin öffnen und Notventilator über den Notstromdiesel zur Entlüftung der Rauchgaskanäle hochfahren
- Gasdüsen an den Brennkammern entfernen.
- Schaulochdeckel an den Brennkammern entfernen. Dies sorgt für einen kontrollierten Abbrand der entstehenden Rauchgase begünstigt durch die Sauerstoffzufuhr

Kausal-orientierte Maßnahmen finden nicht Anwendung, da der lose aufliegende Deckel der Brennkammern als frühzeitige Druckentlastung angenommen wird.

Ob die Anforderungen dem heutigen Stand der Technik entsprechen und die notwendige Zuverlässigkeit gewährleisten ist, gilt es im Weiteren durch Bewertung der Atmosphäre zu beurteilen und das Schutzkonzept entsprechend zu optimieren. Bereits in (Inburex Consulting GmbH 2006) ist die fehlende Verifizierung der angenommenen Gemischzustände beschrieben und auf die prozessbedingt fehlende kontinuierliche Konzentrationsmessung zur Prozessüberwachung verwiesen.

Durch (Keller und Sulger 2007) wird ferner die Rolle des Managements in Entscheidungsprozessen der Maßnahmenfindung hervorgehoben. Dieser Aspekt soll durch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Berücksichtigung finden.

### **3.3 Prozessanalytische Technologien**

Die beschriebenen Anlagencharakteristiken lassen voraussetzen, dass die Produktionsprozesse - nicht zuletzt aufgrund ihrer bisherigen Historie - auf die gegenseitigen Wechselwirkungen zu regelnder Einzelgrößen abgestimmt sind. Sie durchliefen folglich einem Optimierungsprozess unter Zuhilfenahme prozessanalytischer Technologien (PAT). Die klassische PAT-Anwendung verfolgt damit das Ziel, physikalische und chemische Parameter, Prozesse und dessen Wechselwirkungen aufeinander abzustimmen, um einen energieeffizienten Prozess mit bester Produktqualität und -kontrolle zu erhalten. Die Schritte zur Erreichung bzw. Nutzung der PAT-Werkzeuge können nach (Hartung 2011) in die folgenden Vorgänge untergliedert werden:

- Identifizierung und Erfassung kritischer Material- und Prozessparameter
- Erstellung eines Systems zur Erfassung der kritischen Parameter
- Entwicklung mathematischer Beziehungen zwischen Parametern und Messwerten

Trotzdem diese Vorgehensweise ihren Ursprung in der Qualitätsoptimierung der chemischen Industrie hat und auch in der Pharmazie strengen Regularien unterliegt, vgl. (Food and Drug Administration (FDA) 2004), kann das Ziel und folglich auch der Weg in seinen Grundzügen auf weitere Fragestellungen im Rahmen des Produktionsprozesse Übertragung finden. Die finalen Erkenntnisse münden in der Prozessautomatisierung und der Auswahl einzusetzender Sensorik. Nach (Pabst 2010) ist dabei jedoch deutlich erkennbar, dass im Wesentlichen stoffunspezifische Größen, wie Druck, Temperatur oder Durchflussmenge, im Regelkreis erfasst und ausgewertet werden, während die eigentliche Produktqualität aus stofflichen Merkmalen beschrieben wird. Diese Charakterisierung zur Bestimmung von Feuchtigkeitsanteil, Reinheit etc. erfolgt jedoch überwiegend im Labor.

Obwohl die PAT-Werkzeuge i. d. R. im Prozesszusammenhang genutzt werden, kann die hier zusammenfassend abgebildete Vorgehensweise auch Sektoren außerhalb industrieller Herstellungsanwendungen übertragen werden, wie umwelt- und überwachungsrelevante Faktoren, vgl. (Bakeev 2010). Dass auch die Sicherheit von Anlagen in den Kontext eingesetzter Sensorik gestellt wird, zeigen diverse Einsatzmöglichkeiten in der betrieblichen Praxis und deren Verknüpfung mit sicherheitsgerichteten Steuerungen sowie hinterlegten Konsequenzen (z. B. Notaus, Inertisierung). Dies ist atmosphärisch insbesondere für Gase gängige Praxis eines inhärenten Schutzkonzeptes. Auch Anforderungen der TRGS 725 zeigen auf, dass Sensorik als Teil der MSR-Technik sowie damit in Verbindung stehende Vorgaben bezüglich deren Zuverlässigkeit in den Zusammenhang sicherheitsgerichteter Steuerungen von Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen Einzug gehalten haben. Doch auch hierbei stellt sich die vorgangsbenannte Tatsache ein, dass insbesondere bei staubführenden Anlagen stoffunspezifische Größen erfasst werden, wie etwa die Temperaturmessung als Maßnahme des kausal-orientierten Explosionsschutzes.

Beispiele und allgemeingültige Ansätze für Möglichkeiten der potentiell zu erfassenden Größen für sowohl staub- als auch gasführende Anlagen werden in den Studien der Folgekapiteln 4 und 5 angestrebt. Auch zeigt sich, dass die o. g. ersten PAT-Schritte auf die Methoden sicherheitsanalytischer Techniken (SAT) - als abgeleiteter Wortlaut - in ihren Grundzügen sinnvoll übertragbar sind.

Insofern die kritischen Parameter, die eine Explosionsgefahr darstellen bzw. zu dieser führen können, nicht bekannt sind, liefert eine Risikoanalyse weiterführende Informationen zum Erkennen relevanter Bewertungsparameter. Es wird folglich eine apparativ-prozessual-stoffliche Wechselwirkung abgebildet. Anschließend erfolgt unter Einsatz von Analysetechniken die

Erfassung observabler Größen, die zur Kritikalitätsbewertung beitragen. Diese lassen sich nach (Bakeev 2010) wie folgt unterscheiden und definieren:

**Tabelle 2: Analysetechniken zur Bestimmung observabler Größen, nach (Bakeev 2010)**

<b>Art der Messung</b>	<b>Definition</b>
At-line	Bei einer at-line Messung wird die zu prüfende Materialprobe vom Prozess isoliert und in Prozessumgebung analysiert. Die geprüfte Materialprobe wird nicht in den Prozess zurückgeführt.
On-line	Bei einer on-line Messung wird die zu prüfende Materialprobe vom Prozess isoliert, in der Prozessumgebung analysiert und später wieder in den Prozess zurückgeführt. Diese Definition beinhaltet auch Prüfungen, die per Bypass erfolgen.
In-line	Bei einer in-line Messung wird die zu prüfende Materialprobe direkt im laufenden Prozess analysiert. Bei einer in-line Messung erfolgt kein Eingriff in den Prozess.
Off-line	Das Merkmal einer off-line Messung ist, dass die zu prüfende Materialprobe vom Prozess isoliert und zeitnah in einem separierten Prüflabor analysiert wird. Bei einer off-line Messung wird die geprüfte Materialprobe ebenfalls nicht wieder dem Prozess zugeführt.

Im Hinblick auf den im Fokus stehenden sicherheitlichen Kontext, kann z. B. die Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen den Offline-Messungen zugewiesen werden. Weitere Quantifizierungen als relevant identifizierter observabler Größen können jedoch auch durch Online- oder Inline-Messungen realisierbar sein, z. B. Partikeltemperatur und -Feuchte. Doch auch bei diesem Beispiel stellen Offline- oder zumindest Atline-Messungen keine Seltenheit dar und werden vorrangig zum Zwecke der Qualitätsbewertung ermittelt.

Ob eine (kontinuierliche) Datenerfassung relevante Hinweise liefert und unter Entwicklung algorithmischer Beziehungen eine sinnvolle Implementierung auf die sicherheitsgerichtete Steuerung findet, zur erweiterten Standardisierung ausgewählter Prozesse heranzuziehen sind oder lediglich über die jeweils betrachtete Einzelanwendung Aufschluss liefert, ist für die Nutzung der vorgestellten Schritte und methodischen Werkzeuge (insbesondere Risiko- und Analysetechniken) vorerst wenig relevant, da temporär projektbezogen oder dauerhaft kontinuierlich durch die beschriebene SAT-Vorgehensweise eine systematische Parametererfassung erzielt werden kann.

### **3.4 Vergleich der charakteristischen Bedingungen und Validierbarkeit**

Da die beschriebenen Anlagenbeispiele und ihr Forschungsgegenstand nicht nur zur Verifizierung der jeweiligen Schutzkonzepte und dessen Basis (der Beschreibung des Gemischzustandes) herangezogen werden sollen, sondern zeitgleich durch ihre Unterschiedlichkeit eine promotionstypische Validierung des abgeleiteten Ansatzes zulassen, findet mit Tabelle 3 eine Zusammenfassung der relevanten stofflichen sowie prozessualen und apparativen Bedingungen statt. Bereits die Gegenüberstellung zeigt, dass für beide Anlagentypen die gleiche Relevanz hinsichtlich der herausgegriffenen Vergleichswerte besteht. Es werden daneben auch Unbekanntes und Fragestellungen aufgeführt, die sich aus der Motivation der Anlagenbeispiele heraus ergeben und sich ebenfalls gleichen. Diese sollen im weiteren Verlauf der Arbeit mit Hilfe prozessanalytischer Techniken und methodisch modellhaften Vorgehens beschreibbar gemacht werden. Beides - technische und methodische Werkzeuge - bündeln sich in einer optimierten betreiberseitigen Sicherheitsbetrachtung. Mit Anwendung auf staub- und gasführende Anlagen und ihrer exemplarischen Varianz wird unterstellt, dass final der Nachweis erbracht werden kann, dass das Vorgehen auch für andersgeartete Anlagen unter Einhaltung aller für eine Sicherheitsbetrachtung geltenden Qualitätsmerkmale gleichermaßen Anwendung findet.

Charakterisieren apparativ-technischer und prozessual-betrieblicher Bedingungen der untersuchten Realanlagen

Tabelle 3: Vergleich relevanter stofflich, prozessual, apparativer Bedingungen

	Trocknungskammer des Sprühtrockners		Brennkammer des Brennofens	
<b>Allgemein</b>	Bestandsanlage	10 J	Bestandsanlage	60 J
	g. e. G. im Normalbetrieb		g. e. G. im Normalbetrieb (nach HAZOP-Analyse)	
	Konstruktives Explosionsschutzkonzept <i>*konservativ</i>		Präventives (organisatorisches) Explosionsschutzkonzept <i>*verlässlich</i>	
<b>apparativ</b>	Geschlossene Apparatur <i>* Möglichkeiten der Gemisch- zustandsbeschreibung</i>	V	Geschlossene Apparatur <i>*Möglichkeiten der Gemischzu- standsbeschreibung</i>	V
	Bauform: Zylinder, Konus <i>*Einfluss auf die Ausbildung von Teilvolumen g. e. G.</i>		Bauform: Quader (z. T. befüllt) <i>*Einfluss auf die Ausbildung von Teilvolumen g. e. G.</i>	
	Offene Verbindung zu benachbarten Anlagenteilen: zu benachbarten Subsysteme - Fließbett, Umgebung  <i>*Einfluss Auswirkungsbetrachtung</i>	s. Bild 12	Offene Verbindung zu benachbarten Anlagenteilen: zu nächstgelegenen Brennkammern innerhalb des gleichen Subsystems sowie zu benachbarten Subsystemen - Ringleitung, Umgebung  <i>*Einfluss auf die Bildung von g. e. G.</i>	s. Bild 13
<b>Prozessual (Medien)</b>	staubführend	Milchpulver	Gasführend	Verbr.-prod.
	Prozessluft Temperatur Kammer Unterdruck u. v. m.	z. T. au- ßerh. atm. Bed.	Prozessluft Temperatur Kammer Unterdruck Sauerstoffgehalt u. v. m.	z. T. au- ßerh. atm. Bed.
<b>Stofflich</b>	Sicherheitstechnische Kenngrößen; Offline-Bestimmung (standardisiert); Grundlage Probeentnahme und Bestimmung SiKe des Endprod.	s. Kap. 4.1	Sicherheitstechnische Kenngrößen; Zugriff Stoffdatenbank; Grundlage Annahme über Verbrennungsprodukte; keine Probenentnahme	s. Kap. 5.1; T. 8
	Zwischenprodukt Zumischung z. B. Maltodextrin <i>*Einfluss auf g. e. G.</i>		Verbrennungsgase Zumischung Erdgas <i>*Einfluss auf g. e. G.</i>	
	Mittlere Staubkonzentration <i>* Erhebung observabler Größen als erweiterten Input</i>	$C_{Ber}$ > UEG	Mittlere Staubkonzentration <i>* Erhebung observabler Größen als erweiterten Input</i>	$C_{Ber}$ < UEG

# 4 Erheben und Auswerten observabler Größen staubführender Anlagen

## Inhalt

---

4.1 Erfassung der Bewertungsparameter.....	50
4.2 Messung der Staubkonzentration und Partikelgeschwindigkeit.....	54
4.2.1 Machbarkeitsstudie.....	54
4.2.2 Analysetechniken und Messprinzipien.....	56
4.2.3 Versuchsaufbau und Durchführung Realanlage.....	58
4.2.4 Datenerfassung und Auswertung zur Staubkonzentration .....	59
4.2.5 Datenerfassung und Auswertung zur Partikelgeschwindigkeit.....	63
4.3 Bewertung der Zündquellen .....	66
4.4 Zwischenfazit .....	72

---

Die Verwendung der Bezeichnung „observable Größe“ entstammt dem Fachgebiet der Physik und findet dabei für eine beobachtbare Messgröße - entgegen einer mathematischen Größe - und dem ihr zugeordneten Operator Anwendung, vgl. (Physik IV). Entgegen seiner Verwendung in der Quantenmechanik, wo die Observablen einen eher makroskopischen Zustand beschreiben, erfahren diese in der Übertragung auf die Explosionssicherheit einen für diese Disziplin mikroskopischen Blickwinkel und sollen hierbei der quantitativen Charakterisierung kritischer Zustände definierter Volumina dienen. Den Anwendungsfeldern gleich ist demnach das angestrebte Ziel, getroffene Annahmen durch reelle Werte, d. h. physikalisch messbare Größen beschreibbar zu machen.

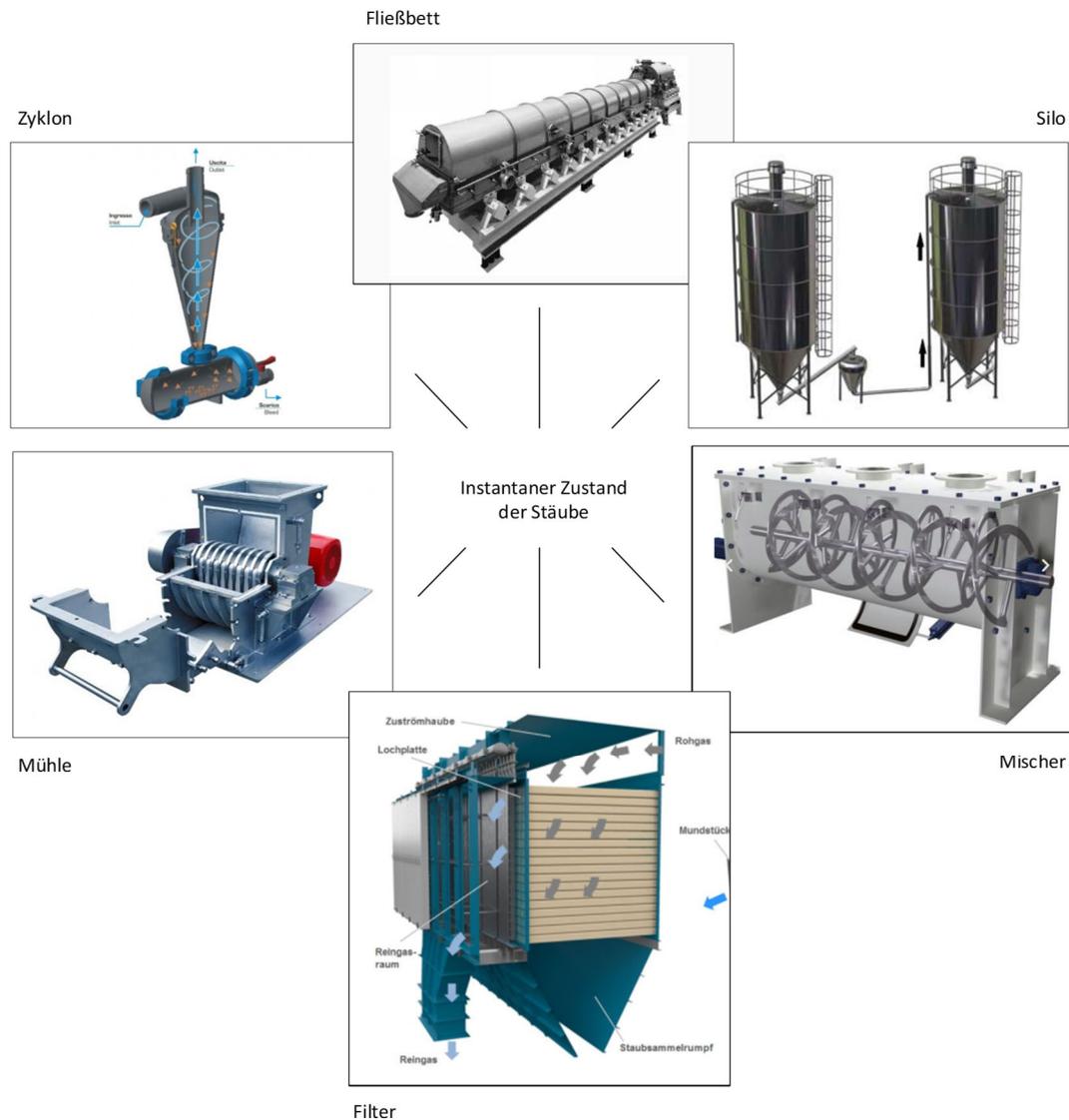
Der Zustand von Stäuben innerhalb geschlossener Apparaturen und dessen Dispersion entspricht augenscheinlich einer idealisierten Verteilung, d. h. im Sinne einer Explosionsgefahr *einem* explosionsfähigen Bereich. Real ist diese jedoch aufgrund von z. B. Sedimentations- und

Staubungsverhalten nur schwerlich abzuschätzen. Bereits bei der gezwungenen vermeintlich gleichmäßigen Verteilung bei der Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen in einem definierten Volumen - wie etwa Hartmann-Rohr, 20-l-Kugel oder 1 m<sup>3</sup>-Behälter - stellt sich dieser Effekt ein und erschwert das Schaffen standardisierte Bedingungen, die im Rahmen dieser Untersuchungen notwendig sind (siehe Kapitel 2.2). Hinzu kommen z. B. prozessual-betriebliche Einwirkungen, wie Luftströmungen, die die Teilchendispersion stark beeinflussen und somit den Sedimentationskräften gezielt entgegenwirken. Auf der apparativ-technischen Seite können zudem Barrieren (z. B. Filterschläuche) oder das Anlagendesign (z. B. Durchmesserjüngungen) für eine Differenzierung der Verteilung innerhalb einer Apparatur verantwortlich sein. Weitere für eine Gemisch-Charakterisierung unbekannte Größen stellen sich ein, wenn die Partikeln innerhalb von Apparaturen einem Veränderungsprozess unterliegen. Diese können Partikeleigenschaften, wie Größe, Feuchteanteil oder Zusammensetzung sein. Eine Konsequenz ist, dass in solchen Fällen eine Ermittlung der sicherheitstechnischen Kenngrößen des Endprodukts nicht ausreichend repräsentativ ist.

Dass dieser beschriebene Zustand keine Seltenheit darstellt, zeigen die in Bild 18 gesammelten Beispielanlagen. Allen gleich ist, dass sich ein Verständnis der Phänomenologie des Gemischzustandes aus der Erfahrung heraus entwickelte und erst im Folgenden ein Vorstellungsmodell ergab. Diese Erfahrungen gingen folglich in einen theoretischen Ansatz (z. B. festgelegt als mathematische Formel) über und wurden erst im weiteren Verlauf durch z. B. Messungen oder Simulationen greifbar, was das zu Grunde legende Verständnis praktisch verifiziert. Diese Historie kann je nach Kompliziertheit oder gar Komplexität eines Systems Jahre bis Jahrzehnte in Anspruch nehmen und liefert erst final eine handfeste Grundlage für die Sicherheitsbetrachtung.

Die von (Hesener und Reinecke 2012) angestellten Untersuchungen an Mischern zeigen auf, dass ein weitverbreitetes und lange Zeit geltendes Schutzkonzept auf Grundlage von Erfahrungen nicht immer einen sicheren Betriebszustand darstellt. So wurde im Rahmen eines umfangreichen Forschungsvorhabens ein ausführlicher Vergleich branchenspezifischer Explosionsschutzkonzepte angestellt, welchem messtechnische Untersuchungen über die Staubkonzentration in Verbindung mit resultierenden Rechenmodellen zum Zwecke der Simulation über die Verteilung der Partikeln folgten. Erst mit diesen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass das für Mischer bislang geltende „Mindestfüllstandkriterium“ von 70 % für die Anwendungsgrenze eines präventiven Explosionsschutzkonzeptes kein verlässliches Kriterium darstellt, vgl. (Reinecke und Hesener 2012). Dieses Beispiel zeigt die Notwendigkeit fundierter

Belege über die Wirksamkeit von Maßnahmen oder mit anderen Worten, die Erfordernis einer eingangs benannten „handfesten Grundlage“ für eine ganzheitliche Sicherheitsbetrachtung, die Erfahrungen zwar zwingend einbezieht, jedoch weit über diese hinausgeht.



**Bild 18:** Beispiele für Anlagen instantaner Zustände der Staubkonzentrationsverteilung, vgl.

(Fließbett: Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH 1999;

Zyklon: Manotura GmbH & Co. KG 2022;

Silo: Polimak A.S.;

Mischer: TOT Manejo De Sólidos;

Filter: Lühr Filter GmbH,

Mühle: fmlld-Förder-Misch-Mess-Lager und Dosiertechnik-Vertriebsges. m.b.H. 2023)

Da auch die geschlossene Trocknungskammer einer Sprühtrocknungsanlage diese Herausforderungen instantaner Zustände von Stäuben aufweist, soll dieses Teilsystem zu Auswahl (Machbarkeit) und Einsatz geeigneter Messeinrichtungen im notwendigen Detaillierungsgrad herangezogen werden. Durch die Erfassung der Bewertungsparameter aus stofflicher, apparativer und betrieblicher Sicht wird erkennbar, welche observablen Größen zusätzlich zu erfassen

sind und zur Sicherheitsbetrachtung der Explosionsfähigkeit staubführender Anlagen durch die Lieferung weiterführende Hinweise beitragen.

Alle benannten Parameter und vorgestellten Untersuchungen zielen auf den in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Anlagentyp der unkonventionellen Trocknung.

Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen basieren auf dem Forschungsprojekt „Explosion Protection of Spray Dryers“, vgl. (Maiwald 2018b), sowie den daraus resultierenden Publikationen von (Maiwald et al. 2017a) und (Maiwald 2017a) und wurden überarbeitet sowie ergänzt.

### **4.1 Erfassung der Bewertungsparameter**

Die Schaffung der Transparenz von Anlagendesign und Prozessbedingungen stellt einen notwendigen Schritt in der Sicherheitsbetrachtung dar, da andernfalls eine realitätsnahe und integrierte Analyse unmöglich ist. Es handelt sich hierbei demnach um eine Frühphase im Verfahren der Bewertung, die ihren fließenden Übergang zum *Duktus* und somit zur Bewertung herrschender Explosions- und Brandgefahren findet und zur Beurteilung des Vorhandenseins gefährlicher explosionsfähiger Gemische beiträgt.

Aufgrund der Komplexität moderner Anlagen ist für eine strukturierte Analyse aller Einzelaggregate und deren Schnittstellen und Wechselwirkungen vorab eine Systemabgrenzung vorzunehmen. Im Folgenden liegt das Hauptaugenmerk demnach im Wesentlichen auf dem Teilsystem der Trocknungskammer und deren Wechselwirkung zu benachbarten Anlagenteilen und Rohrleitungsverbindungen. Diese grundsätzlichen Wechselwirkungen z. B. insbesondere zu Fließbett und Zyklon, sowie die Reduzierung des Gesamtprozesses auf den aktiven Trockenprozess wurde in Kapitel 3.1.1 abstrahiert, wenngleich deren Bedeutung für das vorliegende Gemisch sowie die Zündquellen erst mit diesem Kapitel verdeutlicht werden. Als Wechselwirkung sind jedoch nicht nur die technischen Komponenten untereinander zu nennen, sondern auch jene zwischen Technik, Organisation und Mensch. Die Person wird dabei neben dem Anlagenbediener auch durch das Wartungs- und Instandhaltungspersonal abgebildet. Sie bilden die gefährdete Gruppe, auf welche die Gefahr schädigend einwirken kann, vgl. (Compes 1982). Die Tätigkeiten und Aufenthaltszeiten sind daher in die Bewertung grundsätzlich zu integrieren, reduzieren sich jedoch bei der Sprühtrocknung durch die Gegebenheit nicht-dauerhaft besetzter Arbeitsplätze, aufgrund zeitlich reduzierter Kontrollgänge und Instandsetzungsarbeiten.

Aus stofflicher Perspektive steht ein exemplarisch gewähltes Milchpulver und deren Merkmale im Vordergrund. Stofflich ist zwischen der Charakterisierung von Produkteigenschaften bis hin zum einzelnen Partikel und der Erfassung sicherheitstechnischer Kenngrößen, die als relevante Größe für die anlagentechnischen Auslegungs- und Vergleichsparameter heranzuziehen sind, zu unterscheiden.

Die Partikelgrößenverteilung, i. d. R. angegeben als Medianwert, hat Untersuchungen nach (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7) zur Folge einen erheblichen Einfluss auf das Explosionsverhalten. Zum einen sind Stäube ab einer Größe von 500  $\mu\text{m}$  als explosionsfähig einzustufen und zum anderen nehmen Explosionskenngrößen, wie  $p_{\text{max}}$  und  $K_{\text{St}}$  mit zunehmender Feinheit des Staubes zu. Während Staub per Definition eine Partikelgröße bis 500  $\mu\text{m}$  aufweist, sind Feinstaub auf 100 - 300  $\mu\text{m}$  und Feinstaub auf 30 - 100  $\mu\text{m}$  definiert, vgl. (Bartknecht 1993). (Stahmer und Gerhold 2014) konnte in ihren Untersuchungen weiterhin quantifizieren, dass bereits ein explosionsfähiger Staubanteil (< 500  $\mu\text{m}$ ) von > 5 Gew% ausreicht, um eine Probe zu zünden.

Nicht außer Acht zu lassen sind in diesem Kontext die Umgebungsbedingungen. Die Luftführung und das dadurch verursachte Strömungsbild in der Trocknungskammer bewirkt, dass nicht ausreichend agglomerierte Partikeln mit dem Luftstrom eine Strömungsumkehr erfahren und zurück zur Trocknungskammerdecke getragen werden. Dies führt nach (Grund et al. 2010) dazu, dass die Feinstaubkonzentration nach oben hin zunimmt. Der ermittelte Median gibt folglich lediglich die Partikelgrößenverteilung des Endproduktes an, liefert jedoch keinen Hinweis auf die jeweilige Partikelgröße und deren prozentuale Verteilung über den Querschnitt der Trocknungskammer.

Ein weiterer für die Bewertung einer Staubprobe wichtiger Faktor stellt der Feuchteanteil dar. Die Feuchte innerhalb einer Staubprobe wirkt sich in zwei Richtungen aus: zum einen reduziert sie die Explosionsheftigkeit bzw. den maximalen Explosionsdruck und zum anderen reduziert sie die Zündfähigkeit des Staubes, d. h. sie erhöht die Mindestzündenergie. Die Auswirkungen beruhen vor allem auf den chemisch/physikalischen Eigenschaften von Wasser. Der Wasseranteil verdampft bei der Zündung der Staubprobe und wirkt dadurch zum einen abkühlend und zum anderen verdünnt er die sich ausbreitenden Verbrennungs- und Pyrolysegase, was zu einer Hemmung der Verbrennungsreaktion führt. Weiterhin ist bekannt, dass Feuchte schon in sehr geringen Anteilen innerhalb einer Staubprobe, die zwischen den Partikeln wirkenden Kräfteverhältnisse (van-der-Waals-Kräfte und elektrostatische Kräfte) verstärkt. Schon geringe Anteile führen zur Ausbildung eines dünnen Wasserfilms auf der Partikeloberfläche und verändern

den Abstand zwischen den Partikeln. Steigt der Feuchteanteil weiter, bilden sich mit steigenden Partikelabstand Wasserbrücken zwischen den Partikeln aus. Damit einhergehend sinkt die Entzündungsfähigkeit der Partikeln ab, vgl. (Eckhoff 2003)

Natürlich sind auf der stofflichen Seite auch die Ergebnisse der sicherheitstechnischen Kenngrößen selbst zu nennen. Dabei ist die zu Rate zu ziehende Kenngröße abhängig von dem jeweiligen Bewertungsschritt. Zur Beurteilung über das Vorhandensein eines explosionsfähigen Gemisches zur Identifikation inhärenter Maßnahmen ist die Brennzahl, Explosionsfähigkeit sowie die untere Explosionsgrenze und die Sauerstoffgrenzkonzentration entscheidend. Mit Hilfe der Mindestzündenergie und -temperatur kann anschließend die Wirksamkeit vorhandener Zündquellen beurteilt werden. Auswirkungsbetrachtungen bzw. die Festlegung final-orientierter Maßnahmen können mit den Explosionskenngrößen des maximalen Explosionsdrucks sowie des maximalen zeitlichen Druckanstiegs beschrieben werden. Demnach können für die Anwendung des *Duktus* je nach Bewertungsschritt alle Kenngrößen von Relevanz sein. Für den Fokus dieses Kapitels und der dabei im Vergleich stehenden messtechnisch zu erfassenden Vergleichsparameter, ist die untere Explosionsgrenze heranzuziehen. Da es sich bei Milchpulver um ein organisches Material handelt, ist die Brennbarkeit und Explosionsfähigkeit gegeben. Untersuchungen bestätigten dies. Allen Kenngrößen gleich ist, wie auch bei den Partikeleigenschaften, die Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen. Exemplarisch seien hierzu die Einflüsse auf die untere Explosionsgrenze herausgegriffen:

Tabelle 4: Einflussparameter und resultierende Trends auf die Untere Explosionsgrenze

Sicherheitstechnische Kenngröße (s.K.)	Einflussparameter	Trend s.K.	
Untere Explosionsgrenze (UEG)	$T_{\text{Umgebung}}$ steigt	↓	
	$P_i$ {	> 1 bar	↑
		< 1 bar	↓
	$O_2$ Konzentration sinkt	↑	
	$O_2$ Konzentration steigt	→	
	Zündenergie steigt	→	
Zündenergie steigt (bei Stäuben mit hoher UEG)	↓		

Die Einflussgrößen auf sicherheitstechnische Kenngrößen können auf fünf wesentliche festgelegt werden: Druck, Sauerstoff, Temperatur, Korngrößenverteilung, Feuchtigkeit.

Für das Milchpulver wurde durch (Pellmont 2016a) mit Hilfe der 20l-Apparatur eine untere Explosionsgrenze (UEG) von 125 g/m<sup>3</sup> („tel quel“, d. h. unverändert, unbehandelt, i. d. S ungesiebt und ungetrocknet) ermittelt.

Eine Umrechnung der ermittelten UEG auf die nicht-atmosphärischen Bedingungen der Sprühtrocknung gemäß Gleichung [1] bei einer Durchschnittstemperatur von 80 ° C ergibt eine korrigierte UEG von ca. 105 g/m<sup>3</sup>.

$$UEG(T) = UEG(T_0) \times [1 + \alpha \times (T - T_0)] \quad [1]$$

$$UEG(353,15 \text{ K}) = 0,125 \times [1 - 0,0027 \times (353,15 - 293,15)] \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (1 - (K - K)) \right]$$

$$UEG(353,15 \text{ K}) = 0,105 \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Eine grobe Abschätzung der mittleren Staubkonzentration im Turm kann „theoretisch“ mittels folgender Gleichung [2] abgebildet werden (Pulvertransport durch Rückführung und/oder Zuzusammischungen nicht inbegriffen):

$$\bar{c} = \frac{\dot{m}_{dust}}{\dot{m}_{air} \cdot \frac{1}{\rho_{air}(f(T))}} \quad [2]$$

$$\bar{c} = \frac{175}{5834 \cdot \frac{1}{0,969}} \left[ \frac{\left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \cdot \frac{1}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \right]$$

$$\bar{c} = 0,02923 \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Diese Parameter spiegeln zeitgleich die Bedingungen während der Messkampagne (siehe Kapitel 4.2.3) wider. Wie in (Lottermann 2012) oder (Maiwald et al. 2017a) beschrieben, ergibt der Quotient aus Massenstrom des Staubes und Massenstrom der Luft im Verhältnis zur temperaturbedingten Dichte im vorliegenden Anwendungsfall eine gemittelte Staubkonzentration von ca. 30 g/m<sup>3</sup>, was für viele Produkte nahe, bzw. sogar unterhalb der unteren Explosionsgrenze liegt. Diese gemittelte Konzentration bildet zwar typische Produktionsparameter ab, liegt jedoch aufgrund der möglichen Ausschöpfung im wirtschaftlichen Sinne deutlich unter dem Durchschnitt und entspricht eher der unteren Leistungsgrenze des für die Versuche verwendeten Turmvolumens. Für den vorliegenden Trocknungsprozess scheint somit ein sicherer Anlagenbetrieb vorzuliegen. Selbst nach einer theoretischen Anpassung der gemittelten Staubkonzentration nach (Grund et al. 2010) aufgrund inhomogener Staubverteilung, Ablagerungen

und Rückführungen um den Faktor drei und einer resultierenden Summe von  $\bar{c} = 90 \text{ g/m}^3$  gilt die temperaturkorrigierte UEG weiterhin als unterschritten. Dies trifft jedoch lediglich für die Betrachtungen von Monoanlagen nach Definition (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7.1) zu, da andernfalls auch geringere Explosionsgrenzen nicht auszuschließen sind, bzw. für jeden Einzelfall zu bestimmen sind.

### 4.2 Messung der Staubkonzentration und Partikelgeschwindigkeit

Nachdem die Bewertungsparameter erfasst wurden, gilt es folglich im zweiten Schritt des *Duktus* die Explosions- und Brandgefährdungen zu ermitteln. Auf der stofflichen Seite stehen dahingehend die in Kapitel 4.1 aufgelisteten Bewertungsparameter vergleichend gegenüber. Die bisherige Vergleichsgröße zur Anlagenauslegung anhand der mittleren Staubkonzentration gibt hierzu jedoch keinen Hinweis auf die tatsächliche Verteilung im Gesamtvolumen der Trocknungskammer, sondern geht von einer idealisierten Verteilung aus. Dass die Dispersion und damit einhergehende Partikeleigenschaften jedoch auch entscheidend für einen potentiellen Explosionsbeginn und -verlauf sind, wurde ebenfalls aufgezeigt. Selbst für den Normalbetrieb kann bei unkonventionellen Trocknern keine allgemeingültige Aussage getroffen werden, die sich auf den Stand der Sicherheitstechnik auswirkt. Es sind weitere Einzelbetrachtungen notwendig. Daher soll für die Trocknungskammer des unter Kapitel 3.1.1 beschriebenen Prozesses eine messtechnische Bewertungsgrundlage geschaffen werden.

#### 4.2.1 Machbarkeitsstudie

Ziel der Machbarkeitsstudie ist die Auswahl geeigneter prozessanalytischer Werkzeuge auf Grundlage des Studiums in Frage kommender Messprinzipien. Als Resultat werden Testmessungen an einer Pilotanlage durchgeführt, um die Messkampagne für die Realanlage zu definieren. Auch die in der Recherche aufgezeigten Erfahrungsberichte fließen in die Auswahl ein, ohne hierzu vorab wiederholende Testmessungen zu fahren.

Wie bereits beschrieben, dient die angestrebte Messung von Staubkonzentration, Geschwindigkeit, respektive Turbulenz und Temperatur im sicherheitlichen Kontext der Beurteilung des potentiell explosionsfähigen Gemisches. Klassische forschungsbasierte Anwendungen von prozessanalytischer Technologie verfolgen demgegenüber auch die Prozessoptimierung durch Steuerungserweiterungen oder eine Qualitätskontrolle. Während die Prozessoptimierung nach (Frauendorfer und Hergeth 2016) eine gleichbleibende Effizienz hinsichtlich energieminimaler und mengenmaximaler Fahrweise unter Wahrung der Anlagensicherheit verfolgt, spielen für

die Qualitätskontrollen Angaben wie Restfeuchte, Korngrößenverteilung, Spezifikation, Anteil brauner Partikeln (im Falle milchpulverbasierter Produkte) eine Rolle. Auch die Validierung von computergestützten Modellierungen zum selbigen Zweck sollte unter Einsatz von Messgeräten erfolgen. Auf diese Notwendigkeit verweisen z. B. auch Studien von (Nicolai und Reh 1995) und (Shi, J., Xinguang, L., Ping, Z. u. Radandt, S. 2009). Aufgrund des Fortschritts von Simulationsprogrammen sind dessen Anwendung keine Seltenheit mehr, stellen den Anwender im Falle staubführender Anlagen jedoch weiterhin aufgrund der in Kapitel 4.1 beschriebenen Eigenschaften vor Herausforderungen. Es ist nach (Frauendorfer und Hergeth 2016) unter Zuhilfenahme von Simulationen möglich, Messkampagnen in ihren Ausmaßen zu reduzieren und lediglich punktuelle und zeitlich begrenzte Messungen zur Verifizierung durchzuführen. Sie bilden somit dennoch weiterhin eine wichtige Grundlage. Die Kombination und den Wissenszugewinn für die Nutzbarmachung für Simulationsmodelle unterstreichen auch letzte Publikationen der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. (Tödt 2020) am Beispiel der Turbulenz während der Silobefüllung.

Die Auswahl von Messgeräten zum Einsatz in Trocknungskammern von Sprühtrocknungsanlagen wird durch die Umgebungsbedingungen erschwert. So ist die Messeinrichtung und deren Sensorik den hohen Trocknungstemperaturen von ca. 80°C ausgesetzt und muss zeitgleich den anhaftenden Partikeln aufgrund von Feuchtigkeit und resultierender Verschmutzung standhalten. Dieser Verschmutzungsgrad variiert dabei zusätzlich im vertikalen Turmquerschnitt. Des Weiteren sind Sprühtrockner als überwachungsbedürftige Anlage in explosionsgefährdeten Bereichen gem. BetrSichV ausgelegt, was Anforderungen an das eingesetzte Equipment hinsichtlich Eignung und Kennzeichnung stellt. Von dem verwendeten Messgerät darf folglich keine Zündquelle ausgehen und die Sensorik muss (temperatur-)robust und Verschmutzungsresistent ausgeführt sein, bzw. über eine Selbstreinigungsfunktion (z. B. mittels Druckluft) verfügen. Je nach zu untersuchendem Produkt und zeitlichen Umfang kann sich auch eine Abrasion der Sensorik einstellen.

Weiterhin ist im Rahmen der Machbarkeitsstudie und insbesondere bei der Planung des Versuchsaufbaus, inkl. der Planung notwendiger Peripherie, zu berücksichtigen, dass potentielle Messpositionen i. d. R. auf die bereits vorhandenen Stützen und Öffnungen (z. B. Mannlöcher) begrenzt sind, da aus statischen sowie hygienischen Gründen eine Erweiterung von Stützen nur selten umsetzbar ist. Ebenso können diese Eingriffe auf die Beschaffenheit der Wandung Ablagerungen begünstigen. Dies erschwert die Flexibilität bei der gewünschten Abtaste diverser Teilvolumina innerhalb eines Gesamtbehälters. Auch die Größe der Messapparatur ist auf diese

Öffnungen begrenzt. Das Messgerät sollte derart ausgeführt sein, dass eine möglichst weite horizontale Tiefe erreicht werden kann. Dies ist z. B. unter Einsatz von Lanzen möglich, die wiederum einen Platzbedarf in der Anlagenumgebung fordern.

Die zum Anlagenbetrieb kontinuierlichen Messungen der Prozesssteuerung spielen bei der im Rahmen der Machbarkeitsstudie angestrebten Auswahl keine Rolle, sind jedoch als relevante Parameter aufgrund von stofflichen und betrieblichen Wechselwirkungen in die Gesamtbewertung zu integrieren.

Diese Erkenntnisse gingen aus orientierenden Messungen an einer Pilotanlage hervor. Zu diesem Zwecke wurde das Sauerstoffkonzentrationsmessgerät SKG 5 der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA) e.V. eingesetzt und auf Nutzbarkeit im Rahmen des Anwendungsfalles der Trocknungskammer getestet. Die Beschreibungen weisen jedoch zeitgleich darauf hin, warum schlussendlich ein alternatives Messgerät Anwendung fand. Weitere Machbarkeitsstudien mittels Testmessungen fanden dabei jedoch nicht statt, da sich nach Einsichtnahme unveröffentlichter Dokumentationen (vgl. (Suter et al. 2000-2002; Meili 2000)) vergangener Projekte auf Erfahrungen berufen werden konnte.

Im Folgekapitel sollen dennoch beide Messgeräte und ihre Prinzipien aufgeführt werden, da das SKG 5 eine Weiterentwicklung erfuhr und für weitere Anwendungsgebiete staubführender Anlagen (z. B. Silos, vgl. (Schmidt 2017)) erfolgreich eingesetzt wird.

### 4.2.2 Analysetechniken und Messprinzipien

Für die simultanen Messungen von Temperatur und Konzentration sowie Geschwindigkeit wurde als Messgerät das sogenannte Labasys 100® der MSE Meili AG verwendet, siehe Bild 19. Das Messprinzip basiert auf der Rückstreuung des von Laserdioden mittels Glasfaser geführten Lichts, vgl. (MSE Meili AG 2011). Das resultierende Spannungssignal wird mittels Lambert-Beers'schen Gesetz in die Feststoffvolumenkonzentration umgerechnet. Das Messgerät eignet sich für diverse prozessuale Anwendungsbereiche hoher Drücke und Temperaturen und ebenso zum kontinuierlichen Monitoring von Prozessen.

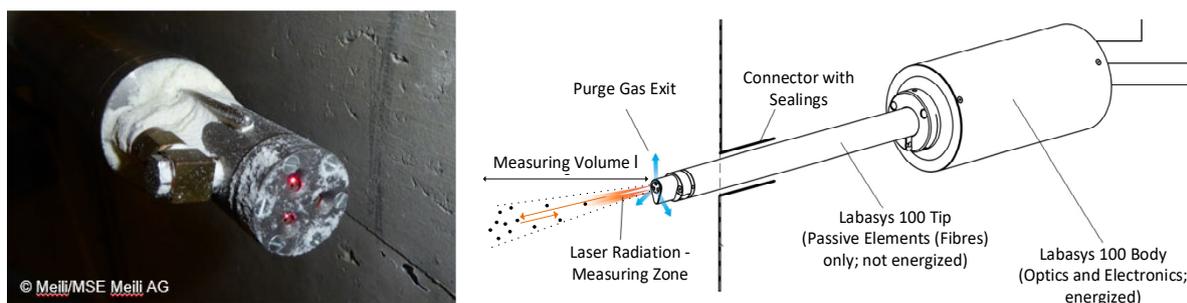


Bild 19: Messgerät Labasys 100, rechts vgl. (MSE Meili AG 2011)

Um mit selbigem Messgerät die Geschwindigkeiten zu untersuchen, war die 3-Channel Konfiguration erforderlich. Die Strömungssignale müssen nach (MSE Meili AG 2016) in Wechselwirkung zueinander stehen, um den Geschwindigkeitsvektor in der Ebene senkrecht zu den Achsen der Sonde angeben zu können. Bei der 2-dimensionalen Geschwindigkeitsanalyse werden zunächst die Rohgeschwindigkeiten von jeweils zwei der drei Sensoren bestimmt ( $v_{21}$ ,  $v_{23}$ ,  $v_{31}$ ).

Diese Geschwindigkeiten werden mithilfe des Abstandes von zwei Sensoren ermittelt und mithilfe folgender Formel [3] berechnet:

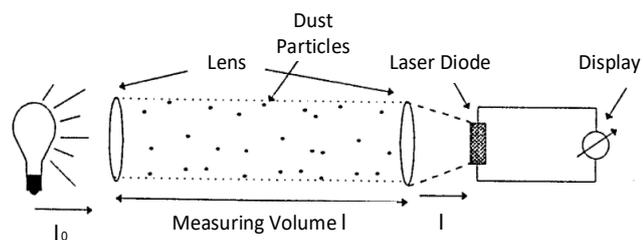
$$c = \frac{\Delta d_{opt}}{\tau^*} \quad [3]$$

Wobei  $\Delta d_{opt}$  den Abstand zwischen zwei Sensoren und  $\tau^*$  die Flugzeit der Partikeln darstellt. Für die Bestimmung sind nur zwei von den drei Rohgeschwindigkeiten zur Ermittlung des Geschwindigkeitsvektors erforderlich. Dieser Geschwindigkeitsvektor  $v$  startet im gemeinsamen Sensor der beiden Rohgeschwindigkeitsvektoren  $v_a$  und  $v_b$  und verläuft senkrecht zu dem verbindenden Vektor  $v_c$ . Mathematisch kann anschließend durch die Subtraktion der beiden Rohgeschwindigkeitsvektoren der Vektor  $c$  berechnet werden, vgl. (MSE Meili AG 2016).

Dem gegenüber steht die ebenfalls bewährte Messmethode des Staubkonzentrationsmessgeräts SKG 5 der FSA e.V., siehe Bild 20. Das Messprinzip beruht auf der Lichtabschwächung durch die in der Luft des Messvolumens dispergierten Staubpartikeln, vgl. (FSA e.V.).



Bild 20: Messgerät SKG 5, rechts vgl. (FSA e.V.)



Die Messeinheit besteht folglich aus einer Sender-Diode (Infrarotlicht) und einer dem gegenüberpositionierten Empfänger-Foto-Diode. Die durch die Partikeln abgeschwächte Intensität wird als Transmissionsgrad bezeichnet. Somit leitet sich auch bei dieser Methode in Verbindung mit der Kalibrierung zur Erfassung des relevanten Kalibrierungskoeffizienten die

Extinktion aus dem Labert-Beers'schen Gesetz ab und ergibt schließlich die Konzentration über die folgende Gleichung, vgl. (Dyrba 2009).

$$c = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{k \cdot l} \quad [4]$$

$\frac{I}{I_0}$  – Transmissionsgrad;

$l$  – Abstand Sender/ Empfänger Diode;

$k$  – Kalibrierungskoeffizient

#### 4.2.3 Versuchsaufbau und Durchführung Realanlage

Für die Messreihen wurden die am Sprühtrocknungsturm zur Verfügung stehenden Stützen ausgewählt, um statische Beanspruchungen durch den Umbau zu vermeiden. Dennoch konnten somit über den vertikalen Turmquerschnitt Positionen im Deckenbereich sowie im zylindrischen und konischen Turmbereich bemessen werden. Die Messpunkte sowie der Gesamtaufbau sind der schematischen Skizze in Bild 21 zu entnehmen. Der Messerfolg im horizontalen Querschnitt ist durch die Länge der Lanze auf 2,2 m Eindringtiefe begrenzt, was im Konus jedoch ein vollständiges Abtasten in 0,2 m Schritten erlaubte.

Da die Messungen nur einen Anteil des Gesamt-Apparatevolumens erfassen können, wird im Folgenden von Bemessungsvolumen gesprochen.

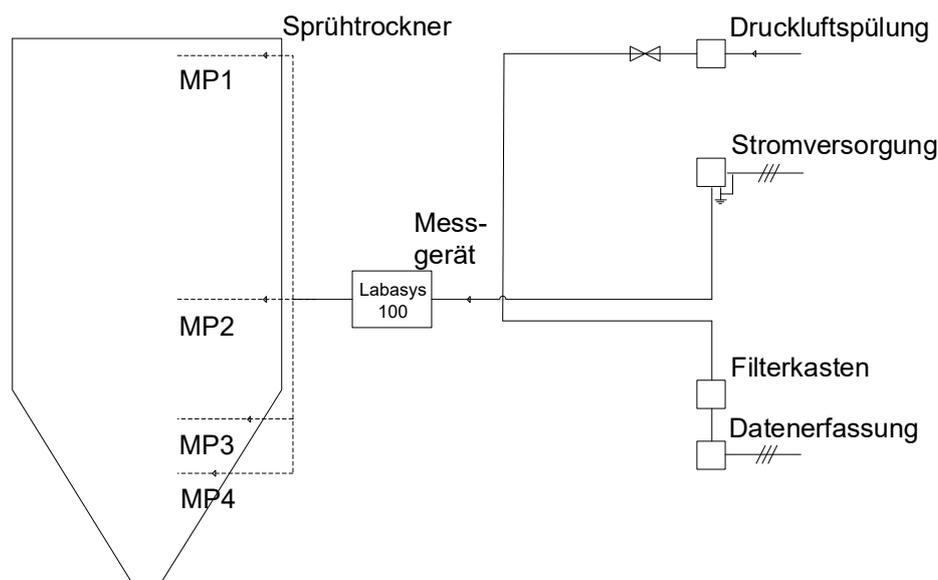
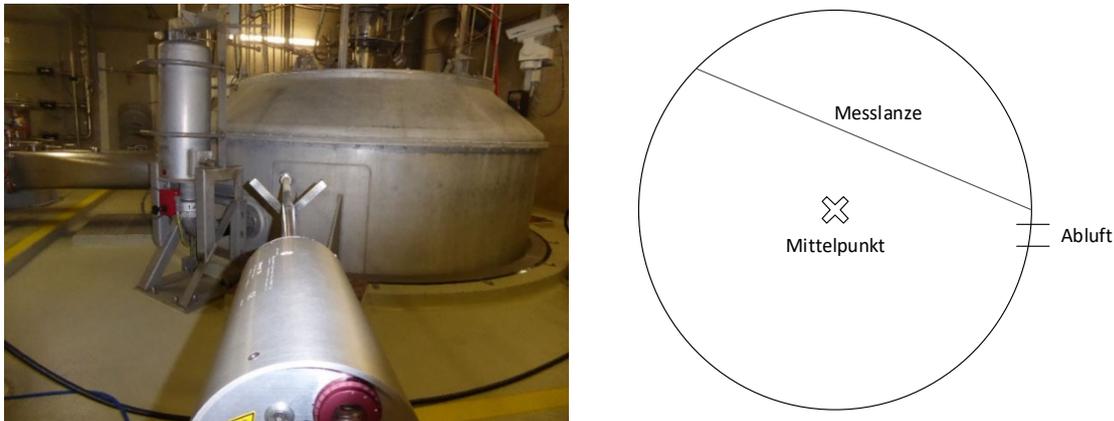


Bild 21: Schematische Darstellungen des Versuchsaufbau, vgl. (Maiwald et al. 2017a)

Entgegen den übrigen Positionen ist bei der Position 1 (MP 1) zu beachten, dass die Lanze und somit die Messsonde nicht in Richtung Zentrum, respektive der Eindüsung geführt wurde,

sondern seitlich versetzt in Richtung der Abluft. Bild 22 gibt diese Ausrichtung sowohl fotografisch (Seitenansicht) als auch in schematischer Draufsicht wieder. Die Datenerfassung in Position 2 (MP 2) spiegelt die Umstände der Zumischung wider. Hierbei wurde für Messsonde und Zumischung der selbige Flansch genutzt, wobei die Messsonde in einem Winkel von  $10^\circ$  angebracht wurde, um in Richtung Turmzentrum zu vermessen.



**Bild 22: Ausrichtung Messapparatur an MP 1 [links: Seitenansicht; rechts: Draufsicht]**

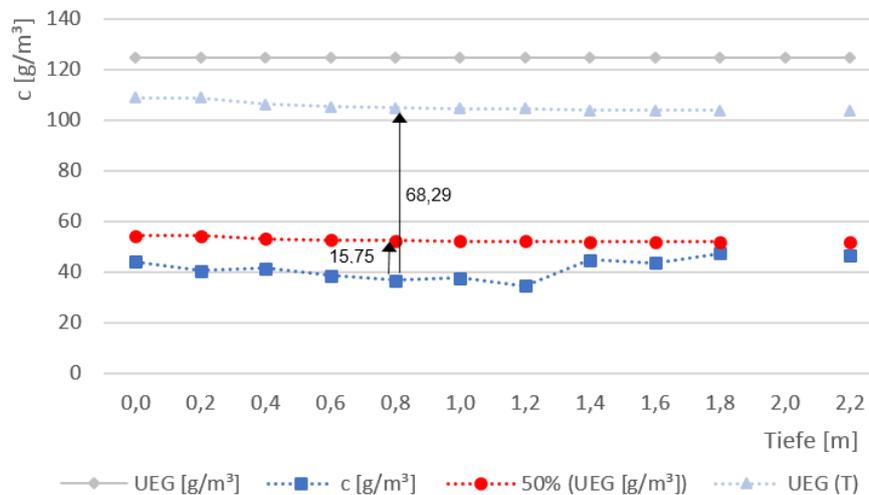
Die räumliche Datenerfassung erfolgte an jeder Messstelle über ein Zeitfenster von 30 bis 50 Sekunden mit einer Abtastrate von 20 kHz. Durch die Wahrscheinlichkeit auftretender Produktanhaftungen am Sensor aufgrund von Partikelfeuchtigkeit, ist eine Reinigungsfunktion mittels Druckluft im Messsystem integriert.

#### 4.2.4 Datenerfassung und Auswertung zur Staubkonzentration

Die Grafiken (Bild 23 und Bild 24) sind von links nach rechts zu lesen, wobei links der Wandungsbereich und rechts der maximale Einschub der Lanze wiedergegeben wird. Diese ist wie angegeben auf 2,0 m begrenzt und ermöglicht inkl. Messsonde Messungen bis 2,2 m Tiefe. Dies entspricht einer Messtiefe über die Turmmitte (1,75 m bei  $d = 3,5$  m) hinaus.

Die Vergleiche von mittlerer Staubkonzentration, unterer Explosionsgrenze und Staubkonzentrationsmessungen werden nach (Maiwald et al. 2017a) in allen Messpunkten angestellt und hinsichtlich der Existenz eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches geprüft. Bei dem angestellten Vergleich wurde die untere Explosionsgrenze (UEG) nicht lediglich auf die nicht-atmosphärischen Bedingungen korrigiert, sondern zusätzlich um einen Unsicherheitsfaktor von 0,5 reduziert. Dieser Punkt stellt somit die „festgelegte“ UEG dar und erscheint recht hoch, doch Unsicherheiten im Bestimmungsverfahren durch Übertragung von z. B. Turbulenz, Geometrie und Zündenergie auf die realen Prozessbedingungen rechtfertigen diese Annahme

vorerst. Für Stäube ist dies bisher nur eine Annahme, wobei für Gase eine Unterschreitung der UEG von 20 % empfohlen wird, vgl. (Bartknecht 1993).



**Bild 23: Vergleich UEG - c, Turmdecke, vgl. (Maiwald et al. 2017a)**

Bild 23 zeigt die Resultate der Konzentrationsmessungen (c) im Deckenbereich mit einer ausreichenden Unterschreitung der UEG. Alle Messwerte unterschreiten die rechnerisch ermittelte mittlere und korrigierte Staubkonzentration von  $\bar{c} = 90 \text{ g/m}^3$  um durchschnittlich ca.  $50 \text{ g/m}^3$ . Zudem ist anhand dieses Beispielprodukts die deutliche Unterschreitung der temperaturkorrigierten UEG hervorzuheben. Auch der eingeräumte Unsicherheitsabstand (50 %/UEG) ist in allen Punkten unterschritten.

Der konische Teil der Trocknungskammer zeigte im Vergleich einen ähnlichen Trend in Richtung eines sicheren Anlagenzustandes hinsichtlich der Bildung explosionsfähiger Gemische. Hierbei lagen die Werte der Konzentrationsmessungen durchschnittlich sogar bei lediglich  $10 \text{ g/m}^3$ .

Demgegenüber sind in Bild 24 die Messergebnisse im mittleren Turmzylinder dargestellt. Hier zeigt die grafische Gegenüberstellung markante Abweichungen im Verhältnis der Vergleichsparameter. Während bis zu einer Einschubtiefe von 1 m die UEG und sogar der 50 %ige Unsicherheitsabstand noch deutlich unterschritten sind, weisen die Folgewerte einen extremen Anstieg auf bis zu  $1400 \text{ g/m}^3$  auf. Die Staubverteilung im Bemessungsvolumen befindet sich demnach für dieses Teilvolumen innerhalb des Explosionsbereichs und ideale stöchiometrische Verhältnisse wurden bereits überschritten. Herstellerangaben des Messsystems zur Folge (Meili 2017) ist in diesem Bereich hoher Konzentrationen und insbesondere Verschmutzungen der Sensoren dennoch mit einer maximalen Ungenauigkeit von 30 % auszugehen, was bei Maximalwerten um  $1400 \text{ g/m}^3$  noch immer einer lokale Aufkonzentrierung auf  $1000 \text{ g/m}^3$  bedeutet.

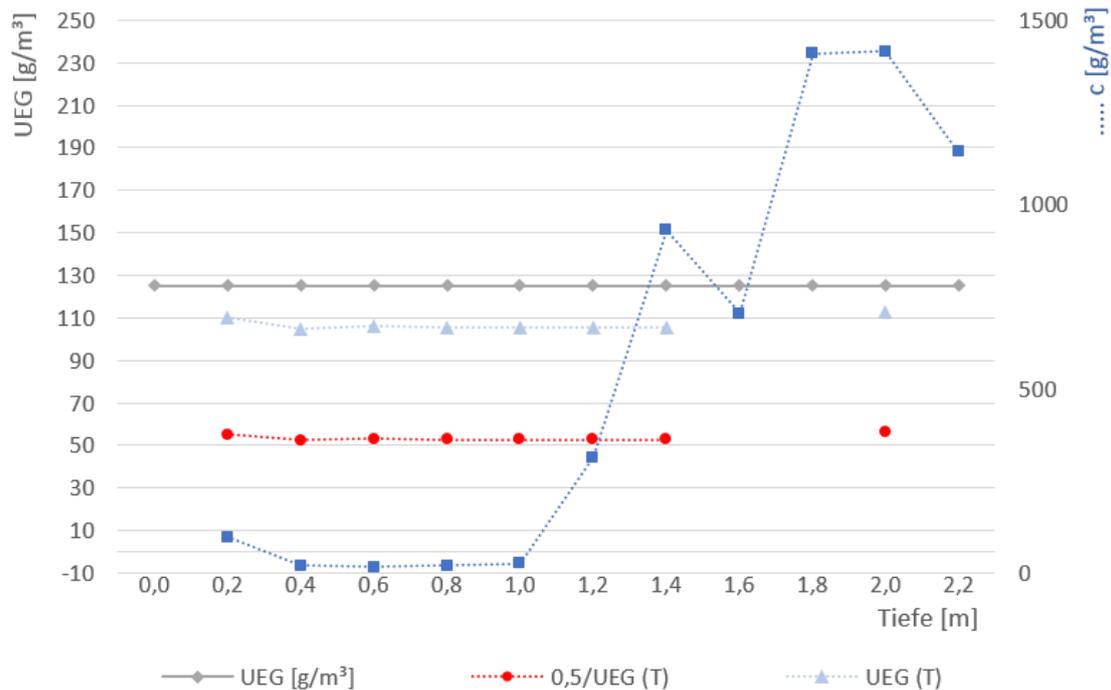


Bild 24: Vergleich UEG - c, Zylindermitte, vgl. (Maiwald et al. 2017a)

Es ist in dieser Ergebnisauswertung darauf zu verweisen, dass die vorgestellten Diagramme lediglich die gemittelten Werte anzeigen. Real entsprechen die Konzentrationswerte über die Aufnahmezeit von 50 Sekunden dem Konzentrations-Zeit-Diagramm in Bild 25. Der im Diagramm abgebildete Messbereich entspricht Messposition 3 (Konus) in einem Abstand von 0,2 m zur Wandung und d. h. selbst bei einer gemittelten vermeintlichen Konzentration unterhalb der UEG, ist lokal und temporär mit Aufkonzentrierungen auf über 1000 g/m<sup>3</sup> zu rechnen. Der Graph zeigt auch, dass eines der drei Signale Abweichungen im Vergleich aufweist.

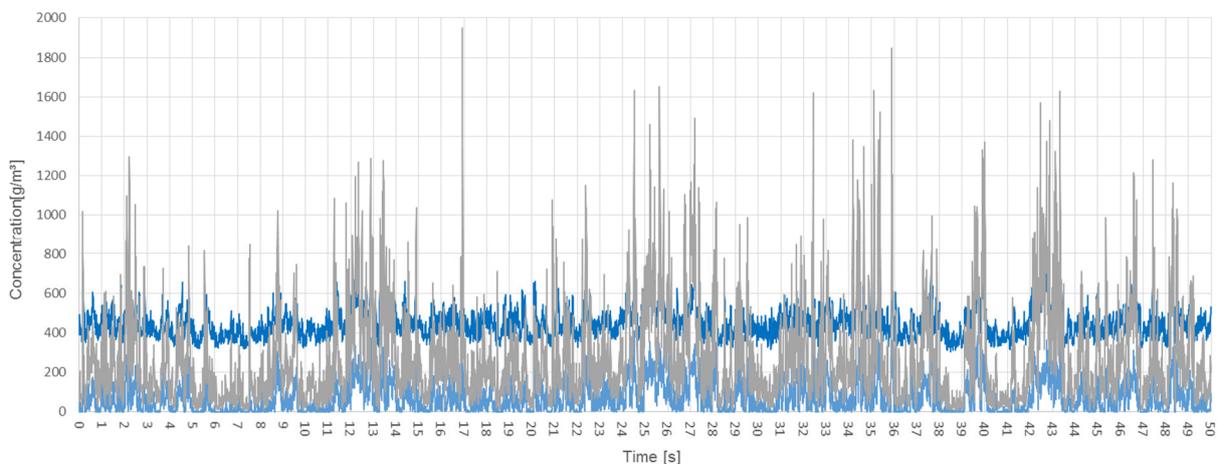


Bild 25: Konzentrations-Zeit-Diagramm, Konus (MP 3), 50 sec

Wie Bild 24 zeigt, ist davon auszugehen, dass sich die hohen Staubkonzentrationen der Messungen auf der Strömungsumkehr begründen lassen, nicht jedoch auf die Zumischung selbst.

Dieser Einfluss führte im Umfeld sowie bei 680 mm Tiefe, wo Messsonde und Zumischung zusammentreffen, zu keiner signifikanten Erhöhung.

Bis auf die lokale Aufkonzentrierung im mittleren zylindrischen Turmbereich weisen die Resultate der Messungen eine durchschnittlich geringe Staubkonzentration auf. Dies gilt sogar für Bereiche, in denen erfahrungsgemäß mit höheren Werten zu rechnen ist, wie z. B. Konus und Wandungsnähe aufgrund des rezirkulierenden Staubes. Hierzu sei auf den während der Versuche geltenden Massenstrom verwiesen, der vergleichsweise gering ausfällt und eher der unteren Leistungsgrenze einer Trocknungskammer dieser Dimensionierung entspricht.

Wie die Ergebnisse aufzeigen, herrschen bereits im Normalbetrieb Gemisch-beeinflussende Bedingungen. Gleiches gilt auch und insbesondere für Störungen. Diese Beeinflussung kann zur Aufkonzentrierung, respektive Reduzierung der Konzentration führen oder zur Abweichung der idealisierten Verteilung im Bemessungsvolumen. Im Normalbetrieb spielt neben den Prozessbedingungen (Temperatur, Druck etc.) auch das Anlagendesign eine entscheidende Rolle. Zu den bereits erwähnten Faktoren von Abluft und Rückführung sind auch deren Positionierung sowie die Positionen und Produkteigenschaften von Zumischungen in Form von Rückführungen und Zudosierungen entscheidend für die Staubverteilung und deren Charakterisierung. Dies erhöht gleichzeitig die Gesamtmassenbilanz. Durch die Zudosierung von z. B. Maltodextrin ist in diesem Zusammenhang zusätzlich dessen Einfluss auf die sicherheitstechnischen Kenngrößen zu untersuchen, da davon auszugehen ist, dass Maltodextrin in einem Teilvolumen des Turms die Hauptkomponente des Staubgemisches einnimmt. Hinzu kommt der Einsatz von Einrichtungen zur Abreinigung der Wandungen von Ablagerungen im laufenden Normalbetrieb, z. B. mittels mechanisch gesteuerter Klopfer. Klimatische Umgebungsbedingungen beeinflussen die Auslegung des zu trocknenden Massenstroms zusätzlich, insofern kein Lufttrockner zum Einsatz kommt. Untersuchungen dieser Umstände werden mit dem Kapitel der Modellierung der Kritikalität angestellt (siehe Kapitel 6).

Im Falle einer Störung sorgt ein herbeigeführter Notaus der Anlage binnen Sekunden für eine Unterbrechung aller Zu- und Abluftströme. Der dispergierte Staub kommt zum Erliegen. Demgegenüber sorgen Druckveränderungen im Turm, ob durch Aufhebung des Unterdrucks oder aufgrund von Ereignissen in benachbarten Anlagenteilen, für eine Abweichung des idealisierten Strömungsbildes. Zur Sprühtrocknung wird der Turm bei leichtem Unterdruck gefahren. Eine Störung des Unterdrucks im Turm kann dafür sorgen, dass der Staub über den offenen Deckenbereich der Trocknungskammer Typ C gem. (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7) nach außen tritt. Die Verteilung im Turm entspricht dann nicht mehr dem angestrebten Strömungsbild im

laufenden Trocknungsprozess. Zudem ist aufgrund des potentiell austretenden Staubes mit einem in der Umgebung befindlichen explosionsgefährdeten Bereich zu rechnen.

#### 4.2.5 Datenerfassung und Auswertung zur Partikelgeschwindigkeit

Für die Auswertung der Partikelgeschwindigkeiten können sowohl die simultanen Messungen der Staubkonzentration als auch die aus den Rohdaten ersichtlichen Datenmengen herangezogen werden. Sie geben schließlich Auskunft über die Beschaffenheit und Charakteristik der Partikeln und ihrer Bewegung.

Die Luftzirkulation in der Trocknungskammer einer Sprühtrocknungsanlage wird durch einen Radialventilator erzeugt und mittels Lufterhitzer auf eine Temperatur von ca. 390 °C erwärmt. Da die Primärluft eine Querschnittsverengung durchquert, nimmt ihre Geschwindigkeit zu und wird so in die Trocknungskammer mit einer Geschwindigkeit von etwa 250 m/s eingebracht. Das Konzentrat wird in den axial verlaufenden Luftstrom gesprüht. Zusätzlich wird durch die Abluftpositionierung in der Trocknungskammerdecke eine Strömungsumkehr hervorgerufen, die in einer Rezirkulierung des Produktes resultiert. Die Partikelgeschwindigkeiten sind demnach in verschiedene Richtungen zu erfassen.

Nach dem Verlassen der Düse wird die Luftgeschwindigkeit in zwei Regionen unterteilt. In Initial- und Hauptregion (siehe Bild 26). Die Initialregion beschreibt den Bereich, in der die Luftgeschwindigkeit gleich der Geschwindigkeit des Konzentrats beim Verlassen der Düse ist, vgl. auch (Backsmann 2017).

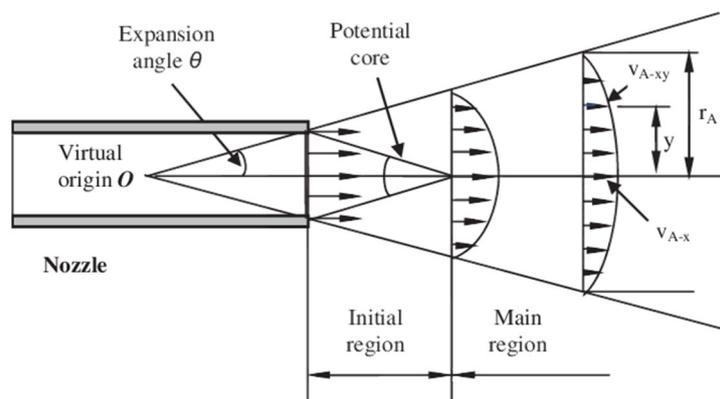
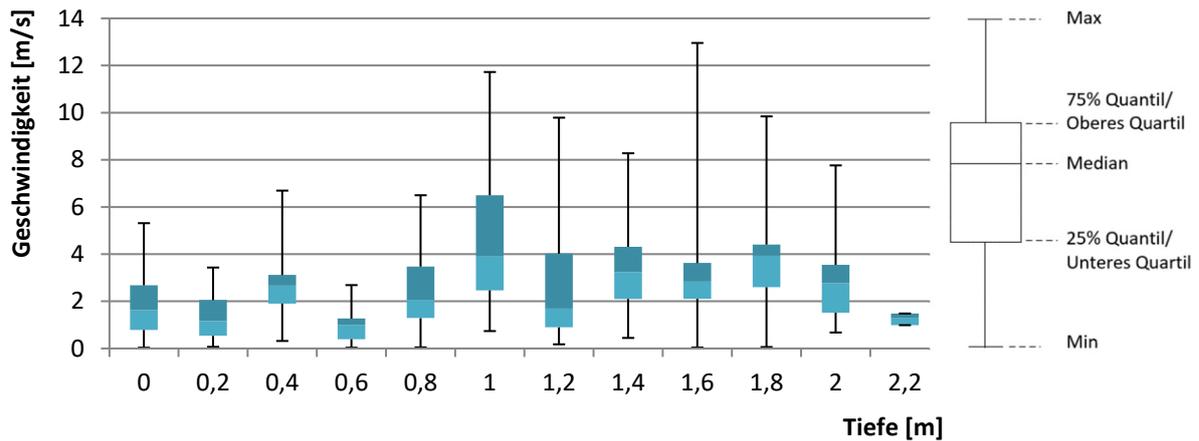


Bild 26: Struktur der Regionen eines Luftstrahls (H.Z. Li, J. Wang, J.M. Fan 2009)

Durch den 6,2 - fachen Wert des Durchmessers der Düse kann die Länge der Initialregion berechnet werden.

$$\text{Länge Initialregion} = 6,2 \times d_{\text{Nozzle}} \quad [5]$$

Bei einem Düsendurchmesser von z. B. 104 mm ergibt sich unter Anwendung der Gleichung [5] eine Initialregionlänge von  $\sim 645$  mm. Die Geschwindigkeit der Eindüsung beträgt zwischen 200 und 250 m/s. Um die Geschwindigkeit des Fluids bzw. der Luft zu reduzieren wird der Luftdruck verringert. Damit wird gleichzeitig eine Verringerung der Wärmeübertragung hervorgerufen. Eine Reduzierung der Primärluft hat eine frühere Strömungsumkehr zur Folge, vgl. (Backsmann 2017).



**Bild 27: Gemessenes Partikelgeschwindigkeitsprofil MP 4, Konus**

Durchschnittlich bewegen sich die Partikeln im Turmzylinder sowie im Konus mit einer Geschwindigkeit von ca. 0-15 m/s fort. Exemplarisch sei hierzu mit dem Diagramm in Bild 27 die vertikale Partikelgeschwindigkeit im unteren Konusbereich (MP 4) aufgeführt. Die Darstellung in Form eines Box-Plot gibt für die jeweiligen Einschubtiefen der Lanze neben dem Median auch das untere und obere Quartil sowie die minimalen und maximalen Werte an. Für den MP 4 wird dabei ersichtlich, dass der Median sowie die jeweiligen Extrema unwesentlich voneinander abweichen. Das Messgerät konnte für diesen Bereich folglich eine gute Datenbasis vorweisen.

In allen vier Messpositionen ist mit steigender Einschubtiefe der Messsensorik eine Reduzierung der Datenmengen charakteristisch, was auf die hohe Partikelanzahl, respektive die Staubkonzentration zurückzuführen ist. Dies führt sogar dazu, dass im Bereich des Konzentrationsmaximums im mittleren Zylinder keine auswertbaren Daten mehr erfasst werden konnten. Jedoch konnte in ebendiesem Bereich in einer Tiefe von 1,20 m ( $c \sim 50 \text{ g/m}^3$ ) noch ein steigender Geschwindigkeitstrend auf 50 - 90 m/s erkannt werden. Eine Auswertung ergibt in diesen vereinzelt Messpunkten eine erhebliche Abweichung der Maximalwerte zum grundsätzlich gleichbleibenden Medianwert. Es ist davon auszugehen, dass dieser Peak auf den im Winkel breiter werdenden Einfluss der Eindüsung der Primärluft sowie die in diesem Bereich

strömungsbedingte Rezirkulierung hervorgerufen wird. Auch im oberen Bereich der konisch verlaufenden Trocknungskammer ist noch ein Geschwindigkeitspeak der Partikeln von 80 m/s zu verzeichnen. Auch hierbei ist nicht auszuschließen, dass sich die gewünschte Strömungsumkehr bis in diesen Bereich erstreckt, da die Tiefe dieser mit der Höhe der Primärluft sowie dem Massenstrom einhergeht. Ebenso kann jedoch auch die Sedimentation ausreichend agglomerierter Partikeln in Richtung des Ausgangs der Trocknungskammer zu einer Erhöhung der gemessenen Geschwindigkeiten führen.

Die erfassten Maximalwerte im Deckenbereich von 47 m/s sind mit der Lanzenführung in Richtung Abluftleitung zu begründen. Der Einfluss der Initialregion konnte aus selbigem Grund nicht erfasst werden.

Entgegen der Beurteilung und Charakterisierung der Staubkonzentration im Bemessungsvolumen, stehen für die Bewertung der Geschwindigkeit, respektive der Turbulenzen keine sicherheitstechnischen Kenngrößen als Vergleichswert zur Verfügung. Es sind jedoch Trends bezüglich des Einflusses von Turbulenzen auf die sicherheitstechnische Kenngröße Mindestzündenergie (MZE) bekannt, die in die Ergebnisbetrachtungen einfließen sollen. Trotzdem der Fokus dieser Arbeit nicht auf der MZE liegt, seien mit Blick auf die Zündquellenbewertung auch die weiteren relevanten Umgebungsbedingungen benannt. (Thiele 2014) unterscheidet hierbei zwischen standardisierbaren und nicht-standardisierbaren Einflussgrößen, wobei letztgenannte staubspezifisch sind und keine Grenzwerte oder Bereiche zulassen, innerhalb derer Minimalwerte der MZE erreicht werden. Die erfassten Werte zu Temperatur, Staubkonzentration und Turbulenz sind demnach separat auszuwerten. Der Einfluss der gemessenen Temperatur innerhalb der Trocknungskammer lässt sich ähnlich der UEG rechnerisch korrigieren.

Die Turbulenz stellt keine physikalisch messbare Größe dar. Wird sie in experimentellen Versuchen z. B. bezüglich ihres Einflusses auf die MZE in der Vergangenheit stets durch die Zündverzögerungszeit (Bartknecht 1993) angegeben, so stellt dies nach (Thiele 2014) jedoch vielmehr den Zustand der Verwirbelung dar.

Das Vorliegen einer turbulenten Strömung ausgehend von der Strömungsgeschwindigkeit wird durch die Berechnung der Reynolds-Zahl bestimmt. Für eine Trocknungskammer ist diese Umrechnung nicht zulässig. Allerdings weisen bereits die Partikelgeschwindigkeiten darauf hin, dass überwiegend von einer turbulenten Strömung und somit von einer Verschiebung der Mindestzündenergie auszugehen ist. Bild 28 veranschaulicht diesen Einfluss auf die sicherheitstechnische Kenngröße der Mindestzündenergie und zeigt den starken Abfall der MZE mit verminderter Verwirbelung bzw. mit reduzierter Turbulenzintensität innerhalb der

Versuchskammer. Steigende Turbulenzen wirken sich folglich verengend auf die Entflammbarkeitsgrenzen aus und es schließt sich ein Anstieg der MZE an, vgl. (Amyotte et al. 1988). Diese Umstände in Kombination mit den durchgeführten Messungen liefern Hinweise auf die in der Trocknungskammer örtlich und zeitlich herrschenden Zündwirksamkeiten und liefern für eine Zündquellenbewertung einen hohen Input.

Für Turbulenzen gilt zudem, dass sie neben den Einfluss auf die Zündung eines Staub-Luft-Gemisches auch Einfluss auf den Verlauf einer Explosion nehmen. Es wird somit zwischen Anfangs- und Explosionsturbulenzen unterschieden, vgl. (Scheid 2005). Da bei letztgenannten auch die Druckentlastungsturbulenz einhergeht ist die Konstruktion der Anlage (z. B. Öffnungen, Schwachstellen etc.) von Bedeutung für die Berücksichtigung dieser Auswirkungen, soll jedoch in diesem Schritt der Beurteilung vernachlässigt werden.

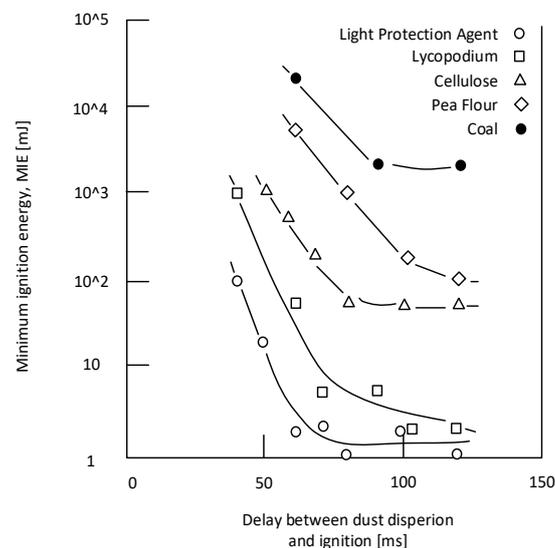


Bild 28: Zusammenhang zw. minim. MZE und Zündverzögerungszeit (Turbulenz), vgl. (Bartknecht 1987)

### 4.3 Bewertung der Zündquellen

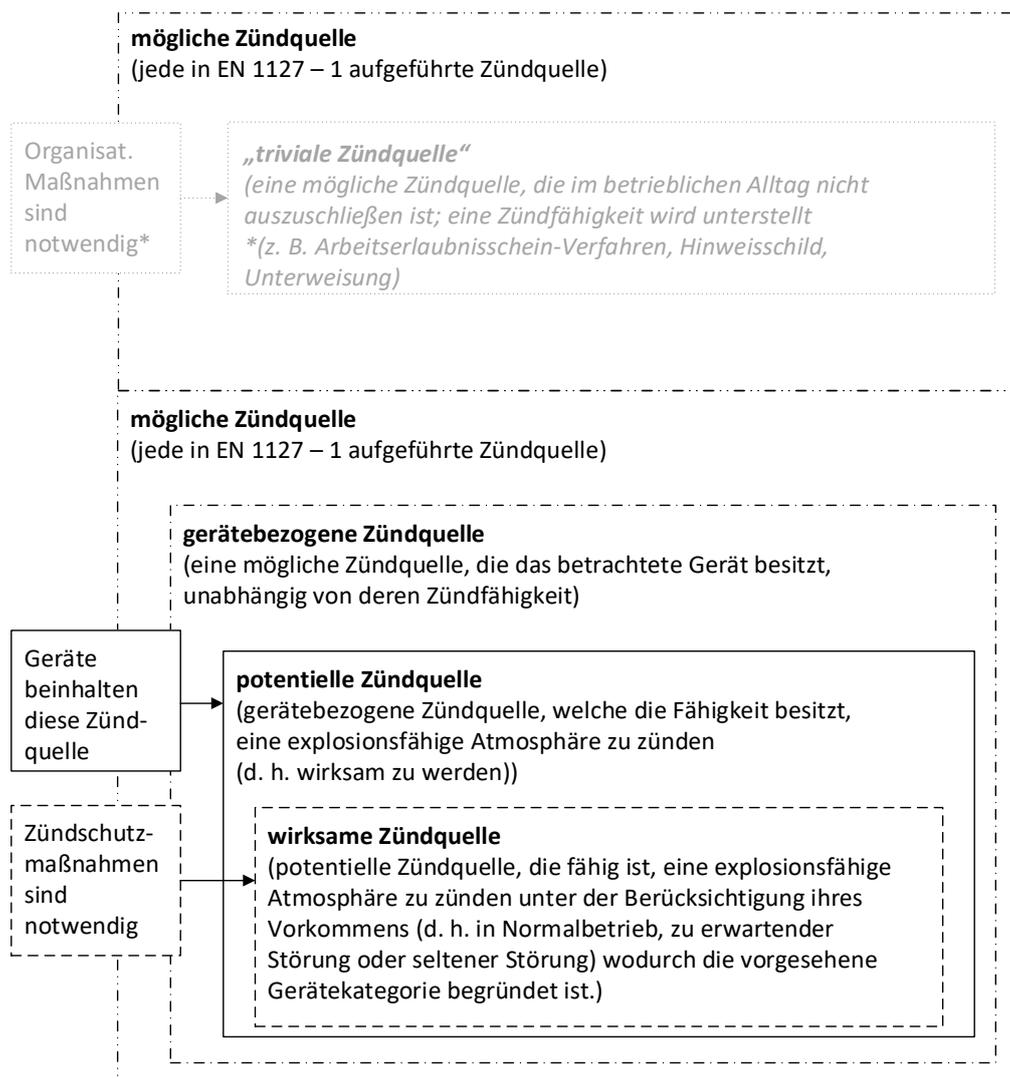
Mit dem übergeordneten Ziel einer ganzheitlichen Sicherheitsbetrachtung sowie dem späteren Aufzeigen der Relevanz im Kontext der atmosphärischen Studien für die Ableitung eines Kritikalitätsmodells soll in diesem Kapitel die Zündquellenbewertung einer Trocknungskammer abstrahiert werden. Da der Anwendungsfall der Sprühtrocknung für staubführende Anlagen lediglich eine Beispielanlage vorstellt, soll auch im Weiteren nur exemplarisch ein Auszug der Zündquellenbewertung für Trocknungskammern dieser Art herausgegriffen werden, da eine Allgemeingültigkeit für andere Anlagentypen trotz vollumfänglicher Bewertung nicht bestehen würde. Dennoch wird auch mit diesem Kapitel dem Anwender, der seitens Unternehmer mit der Gefährdungsbeurteilung der Explosionsgefahren beauftragt wird, aufgezeigt, mit welchem

Vorgehen, Denkweisen und Ansätzen den Anforderungen einer Zündquellenbewertung nach ATEX-Richtlinie 1999/92/EG bzw. GefStoffV genüge getan werden kann.

Kann im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung das Vorhandensein eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches nicht sicher verhindert werden, sind Maßnahmen zur Vermeidung von Zündquellen bzw. Maßnahmen gegen dessen Wirksamwerden zu treffen. Die TRGS 720 betont hierbei in Kapitel 4, Absatz 9 ausdrücklich, dass die Festlegung von Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung eine Unabhängigkeit zwischen dem Auftreten von gefährlichen explosionsfähigen Gemischen und dem Wirksamwerden von Zündquellen voraussetzt. Eine Bewertung der Zündquellen findet demnach losgelöst von den umgebenden Einflüssen statt. Die TRGS 723 legt weiterhin die eingehende Bedingung fest, dass bei der Festlegung von Maßnahmen von einem ständig vorhandenen explosionsfähigen Gemisch auszugehen ist. Die genaue Anforderung an die Maßnahme richtet sich anschließend jedoch an die Wahrscheinlichkeit des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Gemische, d. h. an die festgelegte bzw. „sachlich gedachte“ (siehe Kapitel 2.4) Zone. Die Zündquellenbewertung erfolgt entgegen der Definition des bisher verwendeten Wortlautes der betriebsüblichen Störungen auch für die vorhersehbare oder seltene Fehlerfälle bzw. gelegentliche und seltene Betriebszustände, siehe auch (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7, unveröffentlichter Entwurf). Zudem werden die Zündquellen lediglich für das jeweils betrachtete Teilsystem identifiziert, was die lokale Zuordnung eher unter einen makroskopischen Blickwinkel stellt. Weitere Zuordnungen lokaler Vorkommnisse von Zündinitialen oder die Kombination aus Ort, Zeit und Maß der Energie sind bei der unabhängigen Bewertung möglicher Zündquellen nicht vorgesehen.

Zu unterscheiden ist die Zündquellenbewertung durch den Hersteller für das Inverkehrbringen von Geräten und Komponenten zum Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen und die Zündquellenbewertung durch den Betreiber und seinen konkreten Apparaten, Prozessen und Stoffen. Während bei der Bewertung durch den Hersteller gemäß DIN 1129 in Verbindung mit DIN 13237 und DIN 15198 (als Konkretisierungen der ATEX-Richtlinie 2014/34/EU) das Ziel der Festlegung einer gültigen Gerätekategorie verfolgt wird, gilt für den Betreiber gem. GefStoffV und TRGS 723 (als Konkretisierungen der ATEX-Richtlinie 1999/92/EG) das Ziel eines sicheren Anlagenbetriebes und im Vergleich die Auswahl einer geeigneten Gerätekategorie für den betrieblichen Anwendungsfall. Lediglich für nicht-elektrische Geräte und Komponenten, die nicht nach der 94/9/EG in Verkehr gebracht wurden ist eine nachträgliche Zündquellenbewertung im Sinne der herstellerseitigen Eignung durch den Betreiber gefragt, vgl. (Meinert 2013).

Für Geräte und Komponenten, die nach 2003 in Verkehr gebracht wurden, liefert der Hersteller in der Betriebsanleitung notwendige Hinweise für den sicheren Betrieb, vgl. (BG RCI 2023b).



**Bild 29: Zusammenhang der Zündquellendefinitionen nach (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2016a), ergänzt um (Barth 2023)**

Im Rahmen der Zündquellenbewertung sind alle 13 Zündquellen der in der DIN 1129-1 aufgeführten möglichen Zündquellen auf ihre Relevanz hin zu beurteilen. Der Hersteller unterscheidet anschließend weiter nach gerätebezogenen und potentiellen Zündquellen (siehe Bild 29) und prüft zuletzt die Wirksamkeit. Die Grenzen der Wirksamkeit bzw. des Anwendungsbereiches werden durch die resultierende Gerätekategorie definiert. Der Betreiber hat ebenso alle möglichen Zündquellen zu beurteilen, um die Wirksamkeit schlussendlich anhand seiner eingesetzten Stoffe und deren bestimmten sicherheitstechnischen Kenngrößen vergleichend zu bewerten. Die möglichen Zündquellen sind sowohl einzeln als auch in Kombination zu berücksichtigen. Die Bedeutung dieser benannten Kombinationen wird in der folgenden exemplarischen Zündquellenbewertung auszugsweise anhand exothermer Reaktionen in der

Trocknungskammer aufgezeigt und in der Tabelle 5 durch primäre und sekundäre Zündquellen ausgedrückt. Die Wahl der exemplarischen Zündquelle Glimmnest fiel aufgrund ihrer besonderen Relevanz für Sprühtrocknungsprozesse und den fortwährenden Forschungsbedarf insbesondere auch hinsichtlich ihrer Bildung, Zündwirksamkeit und Detektierbarkeit. Die in Tabelle 5 gelisteten Zündgefahren unterlagen Untersuchungen durch (Liske 2016) und wurden im Rahmen des zugrundeliegenden Projektes in (Liske 2018) dokumentiert, werden aber nicht im Detail wiedergegeben. Es werden jedoch auch Bewertungen von Zündquellen zweier aufeinanderfolgender Ereignisse kursorisch aufgezeigt, was einer Sonderform benannter Kombinationen darstellt.

Als Grundlage für die tabellarische Bewertung gilt neben den Mindestanforderungen des Technischen Regelwerks auch die systematische Erfassung nach DIN EN 13463-1 bzw. der heutigen DIN EN ISO 80079, wurde jedoch für das Anliegen der Betreiber erweitert und ergänzt.

Auf der Liste möglicher Zündquellen nimmt die Zündquellen der exothermen Reaktionen die Nr. 13 ein. Die Selbstentzündung stellt für den Sprühtrockner eine typische Zündquelle dar und kann insbesondere an der Zerstäuberdüse bzw. an der Decke bei fehlerhaften Sprühbild jener Düse auftreten, aber ebenso aufgrund von Ablagerungen im zylindrischen und vor allem konischen Wandungsbereich. Ebenso kann die Zündquelle der Exothermie in direkt benachbarten Anlagenteilen auftreten, die wiederum Einfluss auf die Trocknungskammer nehmen kann, z. B. bei Blockierung des Zyklons der Rückführung sowie im zur Trocknungskammer hin offenen Fließbett.

Auch als Kombination aus einer vorangegangenen (unwirksamen) Zündquelle ist die Selbstentzündung möglich. Als primäre Zündquelle kann der Eintrag eines Fremdkörpers in Form einer heißen Oberfläche fungieren. Liegt die Temperatur dieses Fremdkörpers  $\frac{2}{3}$  unterhalb der Mindestzündtemperatur (MZT) des zu verarbeitenden Stoffes, ist nicht von einer wirksamen Zündquelle auszugehen. Besagter heißer Fremdkörper kann sich jedoch z. B. im Fließbett ablagern und zu Produktanhaftungen führen, die final in einer Glimmnestbildung resultieren können.

Weiterhin kann die Zündquelle Nr. 6 Elektrostatik aufgeführt werden. Diese tritt bspw. bei nicht geerdeten Anlagenteilen auf (z. B. Schleuse Fließbett) oder aber in flexiblen Leitungen (z. B. Rückführung) als Gleitstielbüschelentladung. Die Zündwirksamkeit letztgenannten ist von der Mindestzündenergie der in der Trocknungskammer befindlichen Stoffe abhängig. Bei der hier exemplarischen Benennung der Exothermie sei die Zündquelle Elektrostatik jedoch erwähnt, da sie als Zündinitial eines kombinatorischen Ereignisses wirksam werden kann. Jüngste

Erfahrungen und Untersuchungen zeigten, dass Glimmnester brennbare Gase bilden, die eine Zündfähigkeit für die primäre Zündquelle der Elektrostatik nicht auszuschließen lässt.

Mit der Kombination zweier seltener Ereignisse von möglichen Zündquellen würden nach heutigen Maßstäben die aufgezeigte Verkettung Berücksichtigung unter den Grenzen des Normalbetriebes finden. Die Beispiele zeigen jedoch nicht nur die Relevanz für diese möglichen Kombinationen auf, sondern zudem das lokal unterschiedlich zu bewertende Auftreten, was wiederum Einfluss auf die Zündwirksamkeit hat. Die tabellarische Vorgehensweise stellt demnach bereits eine Erweiterung der Mindestanforderungen dar. Wie bei der Bewertung des Gemisches ist auch für die Zündquellenbewertung ein mikroskopischer Blickwinkel entscheidend und liefert weiterführende Informationen hinsichtlich des Einflusses auf resultierende Wahrscheinlichkeiten einer Koinzidenz von Zündquelle und explosionsfähigen Gemisch.

Die sogenannten „trivialen Zündquellen“ nach (Barth 2023), welche betriebsüblich z. B. im Rahmen von Instandhaltungsarbeiten oder durch das Bedienpersonal mit Aufenthalt innerhalb der explosionsgefährdeten Bereiche vorkommen, sind mittels organisatorischer Maßnahmen (siehe Bild 29) ebenso zu berücksichtigen und auszuschließen.

Eine weiterführende Auflistung der für den Sprühtrockner relevanten Zündquellen sind der (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7.1) zu entnehmen.

Tabelle 5: Exemplarische Zündquellenbewertung (Auszug Exotherme Reaktion)

ZQ-Nr.	1.						Wirksamkeit	ZQ-Nr.	2.						Wirksamkeit					
	primäre Zündgefahren		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer zusätzlichen						sekundäre Zündgefahren (od. Kombination von ZQ)		Bewertung der Häufigkeit des Auftretens ohne Einleitung einer									
	mögliche Zündquelle	Beschreibung/ Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartenden Störungen	Bei seltenen Störungen	Nicht zu berücksichtigen			Begründung der Bewertung	Ereignisintensität	mögliche Zündquelle	Beschreibung/ Ursache	Im Normalbetrieb	Bei zu erwartenden Störungen		Bei seltenen Störungen	Nicht zu berücksichtigen	Begründung der Bewertung	Ereignisintensität	
1.	Heiße Oberfläche	Fremdkörper-eintrag			X		Ereigniserfahrung	Brand/ Explosion	<u>unwirksam:</u> 2/3 < MZW - keine Flamme, <u>wirksam:</u> primäre ZQ bei 2/3 > MZE	13.	Exotherme Reaktion	primäre ZQ Fremdkörper-eintrag - sekundäre sekundäre ZQ Glimmnest im Fließbett aufgrund Fremdkörper/ Ablagerungen				X		Brand mit anschließender Explosion	<u>wirksam:</u> Bildung von Glimmnestern als Kombination der beiden ZQ überwiegend im Fließbett möglich	
6.	Elektrostatik	Schleuse Fließbett nicht geerdet			X		Ereigniserfahrung	Brand im Fließbett (Primärereignis)	<u>unwirksam:</u> für Staubgemisch im Fließbett, <u>wirksam:</u> Kombination mit Ereignis (3.)	13.	Exotherme Reaktion	primäre ZQ: Elektrostatik - sekundäre ZQ Glimmnest im Fließbett aufgrund Fremdkörper/ Ablagerungen				X		Wahrscheinlichkeit des Auftretens als Funktion aus zwei seltener Störung	Brand (Primärereignis) mit anschließender Explosion (Sekundärereignis)	<u>wirksam:</u> primäre ZQ Elektrostatik für gebildete brennbaren Gase eines Glimmnestes wirksam
13.	Exotherme Reaktion	Glimmnest aufgrund Ablagerung Konus	X				Die Ablagerung ist Design- und Verfahrenstechnik-bedingt im Normalbetrieb möglich, abhängig von Betriebslaufzeit und Temp.	Explosion	<u>unwirksam:</u> Staubkonzentration < UEG											

Flammen bei integriertem Fließbett wirksame ZQ für Staubkonzentration/ explosionsfähiges Gemisch innerhalb der Trocknungskammer

#### 4.4 Zwischenfazit

Die mit den Kapiteln 4.1 und 4.2 gewonnenen Erkenntnisse sind Bestandteil der Bewertung des inhärenten Explosionsschutzes im Rahmen der Explosionsgefährdungsbeurteilung und somit gemäß GefStoffV dokumentationspflichtig. Die folgende Zusammenfassung als Zwischenfazit bildet nicht nur die Schlussfolgerungen ab, sondern zeigen dem Beurteiler zeitgleich eine Möglichkeit der Dokumentation auf. Die Anwendung der durch (Maiwald et al. 2017b) publizierten „Toolbox“ liefert dabei ein Werkzeug zur transparenten Darlegung des systematischen Herangehens. Das tabellarische Vorgehen der benannten „Toolbox“ wird mit den Darstellungen nach Bild 30 und Bild 31 aufgegriffen und auf den Anwendungsfall, bzw. auf die Ergebnisse aus der Messkampagne der Trocknungskammer, übertragen und erweitert.

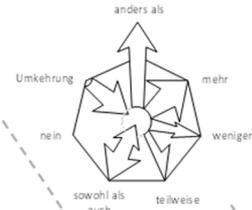
Zur Beantwortung der Frage, ob die Bildung eines explosionsfähigen Gemisches möglich ist, wird das Gesamtsystem (Sprühtrocknungsprozess) in Subsysteme (Speisesystem, Trocknungskammer etc.) unterteilt, siehe Matrix 1, Bild 30. Anschließend werden alle Prozessphasen des Normalbetriebs einem jeden Subsystem gegenübergestellt, siehe ebenfalls Matrix 1, Bild 30. Zur erfolgreichen Beurteilung des Vorhandenseins eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches innerhalb der Subsysteme gilt es somit zu beantworten, ob brennbare Stoffe überhaupt vorhanden sind und in gefahrdrohender Menge vorliegen. Hierfür wird ein jedes Subsystem separat herausgegriffen, um mit Matrix 2 die einzelnen Prozessphasen hinsichtlich ihrer Quellen und Mengen explosionsfähiger Gemische zu bewerten, siehe Bild 30. Neben dem Vorhandensein eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches und dem visuellen Hervorheben der Bewertung durch ein „grünes - nein“ oder ein „rotes - ja“ kann final eine Zone 20, 21 oder 22 festgelegt werden. Die Ergebnisse für jede Prozessphase sind anschließend wieder in die Matrix 1, Bild 31 zu übertragen.

Matrix 2, Bild 30 zeigt, dass die durchgeführte Messkampagne zur Erfassung der Staubkonzentration (Kapitel 4.2.4) detaillierte Erkenntnisse für die Prozessphasen

- Zerstäubung Speiseprodukt
- Trocknung in der Trocknungskammer
- Austrag in Richtung Fließbett

liefert.

Anwendung der HAZOP Analyse zur Bewertung technischer Störungen und Bedienerfehler innerhalb des Normalbetriebes



**Matrix 1: Festlegung Subsysteme und Prozessphasen – vor Bewertung**

Nr.	Subsystem	Ist die Bildung eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches möglich?									
		Prozessphasen im Normalbetrieb									
		Anfahren	Zufuhr Speise- produkt	Zufuhr Trocknungs- luft	Zerstäubung Speise- produkt	Trocknung in der Trocknungs- kammer	Austrag Fließbett	Abfahren	Wartung/ Inspek- tion	Technische Störung	Bediener- fehler
1.	Speisesystem										
2.	Trocknungs- kammer										
3.	Fließbett										
4.	Zyklone										
5.	Schlauchfilter										

Herausgreifen eines Subsystems zur Bewertung mittels Matrix 2

**Matrix 2: Bewertung eines Subsystems innerhalb seiner Prozessphasen auf das Vorhandensein eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches (für das Subsystems Trocknungskammer)**

Subsystem: Nr. 2 / Trocknungskammer								
Prozess- phase	Brennbarer Stoff		Explosionsf. Atmosphäre		Mengen und Quellen	Gefährliche ex. Atmosphäre		Zone nach Maßn. Betriebs- konzept
	ja	nein	ja	nein		ja	nein	
Anfahren	in den weiteren Prozessphasen berücksichtigt							
Zufuhr Speise- produkt		nein		nein	nicht relev.		nein	keine
Zufuhr Trocknungsluft		nein		nein	nicht relev.		nein	keine
Zerstäubung Speise- produkt	ja			nein	Berechnung c (mittl. Staub- konzentration); Staubkonzentra- tionsmessungen (durchgef. Mrz 2016)		nein	Zone 22
Trocknung in der Trocknungs- kam- mer	ja		ja			ja		Zone 20
Austrag Fließbett	ja		ja				nein	Zone 22
Abfahren	in den weiteren Prozessphasen berücksichtigt							
Wartung/ Inspek- tion	ja			nein			nein	keine
Technische Störung	ja		ja		abhängig vom lokalen	ja		Zone 22
Bedienerfehler	ja		ja		Vorkommen und Szenario	ja		Zone 22

Übertragung der Festlegungen für jede Prozessphase eines jeden Subsystems in Matrix 1

**Bild 30: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 4.1 - 4.2 (Teil 1)**

Übertragung der Festlegungen für  
jede Prozessphase eines jeden  
Subsystems in Matrix 1

**Matrix 1: Festlegung Subsysteme und Prozessphasen  
– nach Bewertung (des Subsystems Trocknungskammer)**

Nr.	Subsystem	Ist die Bildung eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches möglich?											
		Prozessphasen im Normalbetrieb								Technische Störung	Bedienerfehler		
		Anfahren	Zufuhr Speise- produkt	Zufuhr Trocknungs- luft	Zerstäu- bung Speise- produkt	Trocknung in der Trocknungs- kammer	Austrag Fließbett	Abfahren	Wartung/ Inspektion				
1.	Speisesystem												
2.	Trocknungs- kammer	-			Zone 22	Zone 20	Zone 22	-		Zone 22	Zone 22		
3.	Fließbett												
4.	Zyklone												
5.	Schlauchfilter												

**Bild 31: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 4.1 - 4.2 (Teil 2)**

Da im Bereich der Turmdecke der Trocknungskammer und somit im Bereich der Zerstäubung des Speiseproduktes (zuzuordnen der gleichnamigen Prozessphase) die Staubkonzentration unterhalb der temperaturkorrigierten unteren Explosionsgrenze und dem eingeräumten Sicherheitsabstand lag (siehe Bild 23) und innerhalb der Initialregion zudem hohe Partikelgeschwindigkeiten und insbesondere Feuchtigkeit herrschen, kann die Bildung eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches ausgeschlossen werden. Eine Zone 22 wird dennoch festgelegt, nicht zuletzt aufgrund der angrenzenden Zone 20 in selbiger Trocknungskammer oder aufgrund von Bedienerfehlern. Gleiches gilt für den unteren konischen Trocknungsbereich und den gleichbedeutenden Austrag des Produktes in Richtung des nachgeschalteten Fließbetts. Anders verhielt es sich im zylindrischen Bereich der Trocknungskammer, zuzuordnen der Trocknung in der Trocknungskammer. Auch hier sind die Ergebnisse innerhalb der (oberen) konischen Trocknungskammer zu berücksichtigen. Es wurden im Zylinder Staubkonzentrationen innerhalb der Explosionsgrenzen gemessen, was für diese Prozessphase (mit Verzicht auf die Bildung weiterer Teilvolumen innerhalb der festgelegten Prozessphasen) zum Vorliegen eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches und bei Anwendung der Zoneneinteilung zur Definition einer Zone 20 führt. Die Ergebnisse der Zoneneinteilung finden ihren Übertrag in Matrix 1, Bild 31.

Die Darstellungen am Beispiel der Trocknungskammer als Zwischenfazit der Erhebung und Auswertung observabler Größen staubführender Anlagen setzen die Annahme voraus, dass die durchgeführten Messungen im Sinne einer Einzelfallbetrachtung für diese Explosionsgefährdungsbeurteilung als valide Grundlage angesehen werden. Auf eine Maßnahmenableitung und die weitere Anwendung der „Toolbox“ nach (Maiwald et al. 2017b) wird verzichtet, da mit Kapitel 4 die Charakterisierung des Gemischzustandes im Vordergrund steht.

# 5 Erheben und Auswerten observabler Größen gasführender Anlagen

## Inhalt

---

5.1 Erfassung der Bewertungsparameter .....	77
5.2 Messung der Gaszusammensetzung und Mengen .....	82
5.2.1 Machbarkeitsstudie.....	82
5.2.2 Analysetechniken und Messprinzipien.....	85
5.2.3 Versuchsaufbau und Durchführung Realanlage.....	87
5.2.4 Datenerfassung und Auswertung .....	89
5.3 Bewertung der Zündquellen .....	96
5.4 Zwischenfazit .....	97

---

Die Verwendung der Bezeichnung „observable Größe“ entstammt dem Fachgebiet der Physik und findet dabei für eine beobachtbare Messgröße - entgegen einer mathematischen Größe - und dem ihr zugeordneten Operator Anwendung. Entgegen seiner Verwendung in der Quantenmechanik, wo die Observablen einen eher makroskopischen Zustand beschreiben, erfahren diese in der Übertragung auf die Explosionssicherheit einen für diese Disziplin mikroskopischen Blickwinkel und sollen hierbei der quantitativen Charakterisierung kritischer Zustände definierter Volumina dienen. Den Anwendungsfeldern gleich ist demnach das angestrebte Ziel, getroffene Annahmen durch reelle Werte, d. h. physikalisch messbare Größen beschreibbar zu machen, vgl. (Physik IV).

Der Zustand von Gasen innerhalb geschlossener Apparate und deren Verteilung lässt sich im Vergleich zu Stäuben als beschreibbarer bezeichnen. Aufgrund seiner Dichte in Relation zur umgebenden Luft ist eine Ansammlung von Gasen bis hin zur gleichmäßigen Verteilung innerhalb des Bemessungsvolumens lokal definierbar. Für Testbedingungen, z. B. zur Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen, lässt sich eine Gasprobe innerhalb der

Testapparate nahezu ideal verteilen und liefert dahingehend vergleichsweise geringere Standardabweichungen der Ergebnisse. Auch die Bestimmung der oberen Explosionsgrenze ist für Gase möglich.

Prozessual-betrieblich kommen jedoch auch bei Gasen Einflussfaktoren die Umgebungsbedingungen betreffend hinzu, die es erfordern, die sicherheitstechnischen Kenngrößen für die Anwendung im Betrieb richtig zu interpretieren und ggf. zu korrigieren. Weitere für eine Gemisch-Charakterisierung relevante und zum Teil unbekannt stoffliche Bedingungen stellen sich ein, wenn die Quellen und Mengen sowie die Zusammensetzung über einen möglichen Störungsverlauf oder aufgrund manueller Bedienungsunterschiede variieren. Hinweise über relevante Szenarien liefert eine systematische Risikobeurteilung, wie z. B. die HAZOP-Analyse (siehe Kapitel 3.2.2).

Im Vergleich zu Stäuben spielt hierbei demnach nicht die mikroskopische Betrachtung und bislang anwendungspraktisch selten genutzte observable Größe hin zum einzelnen Partikel, bzw. der Gasmoleküle und dessen Einfluss auf sicherheitstechnische Kenngrößen eine Rolle, sondern die Zusammensetzung und Anreicherung von potentiell explosionsfähigen Gas-Luft-Gemischen unter gewissen prozessual-betrieblichen Bedingungen; ggf. auch den Normalbetrieb überschreitend. Die Konsequenz ist, dass die Ermittlung sicherheitstechnischer Kenngrößen nicht durch eine Probeentnahme im Normalbetrieb erfolgen kann, sondern „künstlich“ geschaffen werden muss. Umfangreiche Versuche hierzu wurden z. B. durch (Schröder 2002) durchgeführt. Auch hierbei ist die benannte Relevanz der Anlagen- und Stoffkenntnis und insbesondere dessen Wechselwirkung hervorzuheben.

Besonders charakteristisch für Anlagenbeispiele dieser Art ist der Part der Volumenbegrenzung innerhalb des Explosionstetraeders, d. h. die Zerlegung in Teilsysteme und die Möglichkeit der Stofffreisetzung und ggf. Stoffübertragung innerhalb und außerhalb der Subsysteme. Allen gleich ist auch bei gasführenden Anlagen, dass sich ein Verständnis der Phänomenologie des Gemischzustandes aus der Erfahrung heraus entwickelte und erst im Folgenden ein Vorstellungsmodell ergab. Diese Erfahrungen gingen folglich in einen theoretischen Ansatz (z. B. festgelegt als mathematische Formel) über und wurde erst im weiteren Verlauf durch z. B. Messungen oder Simulationen greifbar, was das zu Grunde legende Verständnis praktisch verifiziert. Aufgrund der benannten vergleichweisen greifbareren Charakteristik sind diese Berechnungsmodelle in Form von Simulationen für Gase weit fortgeschrittener. Dennoch kann dies ebenfalls je nach Kompliziertheit oder gar Komplexität eines Systems Jahre bis Jahrzehnte in

Anspruch nehmen, wie das folgende Beispiel zeigt, und liefert erst final eine handfeste Grundlage für die ganzheitliche Sicherheitsbetrachtung.

Da die Brennkammer zum Brennen Grüner Anoden exemplarisch diese Herausforderungen instantaner Zustände von Gasen aufweist, soll dieses Teilsystem (im Folgenden auch: Subsystem) zur Auswahl (Machbarkeit) und Einsatz geeigneter Messeinrichtungen herangezogen werden. Durch die Erfassung der Bewertungsparameter aus stofflicher, apparativer und betrieblicher Sicht, wird erkennbar, welche observablen Größen zu erfassen sind und zur Kritikalitätsbewertung der Explosionsfähigkeit gasführender Anlagen durch Lieferung weiterführender Hinweise beitragen. Alle benannten Parameter und vorgestellten Untersuchungen zielen auf den in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Anlagentyp ab.

### 5.1 Erfassung der Bewertungsparameter

Die Schaffung der Transparenz von Anlagendesign und Prozessbedingungen stellt einen notwendigen Schritt in der Sicherheitsbetrachtung dar, da andernfalls eine realitätsnahe und integrierte Analyse unmöglich ist. Es handelt sich hierbei demnach um eine Frühphase in der Kritikalitätsbewertung, die ihren fließenden Übergang zum *Duktus* und somit zur Bewertung herrschender Explosions- und Brandgefahren findet und zur Beurteilung des Vorhandenseins gefährlicher explosionsfähiger Gemische beiträgt.

Wie die Anlagenbeschreibung in Kapitel 3.2.1 zeigt, besteht der Brennofen in Summe aus einer Reihe von technischen Elementen und Nebenanlagen, die die sogenannten Subsysteme bilden. Im Folgenden wird das Subsystem der Brennkammern eines Feuerzuges und seine Wechselwirkung zu benachbarten Anlagenteilen zur Beurteilung herangezogen. Das System befindet sich in einer Systemumgebung und wird von dieser abgegrenzt. Systemgrenzen entstehen oftmals konstruktions- oder baubedingt, d. h. sie ergeben sich aus der Einhausung der Anlage oder des Gebäudes, vgl. (VDI Verein Deutscher Ingenieure 2023). Welchen Anteil diese Brennkammern im Gesamtsystem einnehmen, wird aus der zusammenfassenden Darstellung und Dokumentation in Kapitel 3.2.1 erkennbar.

Auch bei der stofflichen Betrachtung der gasführenden Anlage sind neben den vorliegenden Produkteigenschaften - und hier insbesondere den in die Gasphase übergehenden Komponenten - die als Vergleichsgröße fungierenden sicherheitstechnischen Kenngrößen zu untersuchen.

Aus stofflicher Perspektive spielen die beim Brennen der Grünen Anoden entstehenden Pyrolysegase eine Rolle bei der Betrachtung eines potentiell explosionsfähigen Gemisches. Es ist hierbei zu unterscheiden zwischen den prozessbedingten Pyrolyseprodukten innerhalb der

geschlossenen Brennkammer sowie den störungsbedingt austretenden Pyrolysegasen innerhalb der Brennkammer sowie in der Umgebung. Als Systemgrenze wird demnach das Gebäude verstanden. Weiterhin wird Erdgas als Brennstoff für die Verbrennung in drei der Brennkammern genutzt, was die explosionsfähigen Gemische um den Brennstoff Methan ( $\text{CH}_4$ ) erweitert. Aus den in Kapitel 3.2.2 beschriebenen (Störungs-)szenarien geht hervor, dass sich stofflich drei kritische Zustände ergeben: ein zu hoher Anteil an Pyrolysegas, Erdgas und/oder Sauerstoff. Letztgenanntes hat durch einen reduzierten Sauerstoffanteil einen Einfluss auf die sicherheitstechnischen Kenngrößen (z. B. Erhöhung der unteren Explosionsgrenze).

Die flüchtigen Bestandteile, die die Pyrolysegase bilden, ergeben sich aus der Verbrennung von Steinkohlenteerpech und Koks, welche die Hauptbestandteile der Grünen Anoden bilden. Das entstehende Gemisch setzt sich nach (Holden und Bergli 2003) zusammen aus den Stoffgruppen der

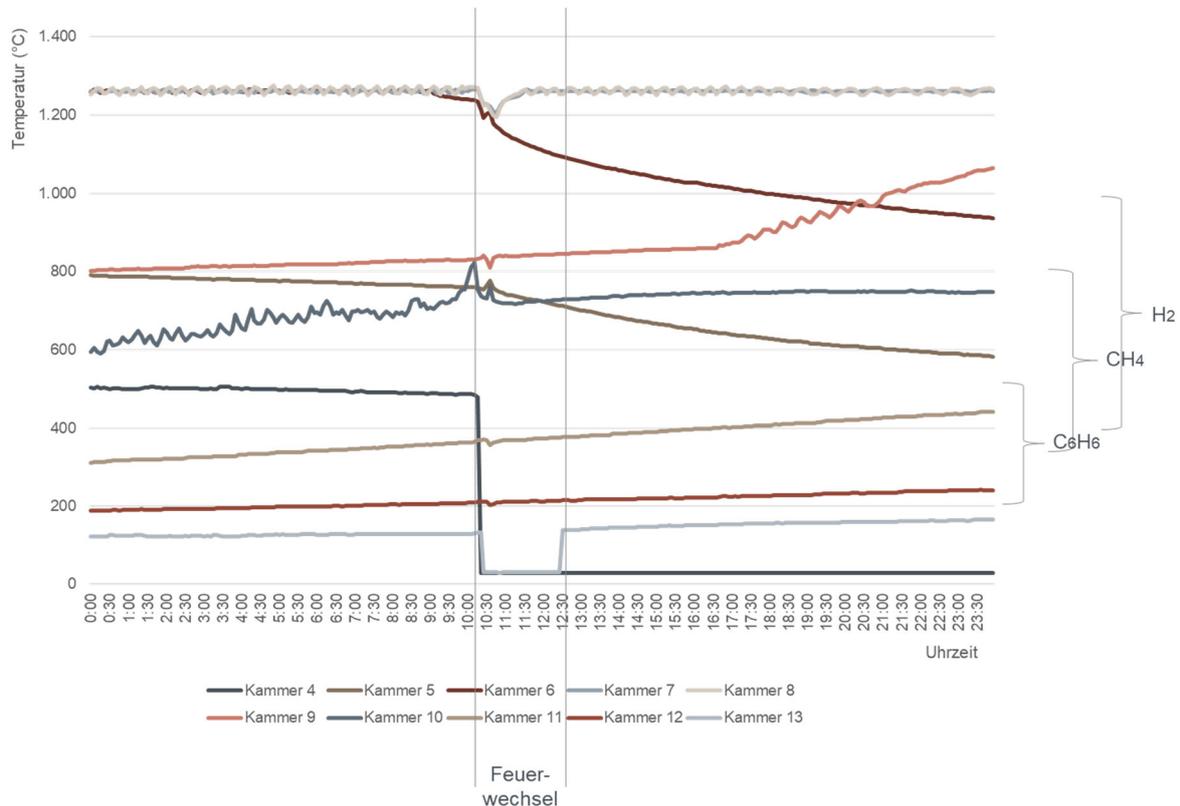
- kondensierbaren Kohlenwasserstoffe, z. B. Benzol ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), erfasst im Rahmen von Gesamt-C ( $\text{C}_{\text{ges}}$ ), und der
- nicht-kondensierbaren Kohlenwasserstoffe, im Wesentlichen Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ).

Diese treten jeweils in unterschiedlichen Temperaturbereichen, d. h. Stadien der Verbrennung auf.

- Benzol wird zwischen 200 - 500 °C freigegeben
- Methan wird zwischen 350 - 800 °C freigegeben
- Wasserstoff wird zwischen 400 - 1000 °C freigegeben

In jeder Brennkammer des Brennofens sind unterschiedliche Temperaturbereiche je nach Feuerfortschritt zu erwarten, was dazu führt, dass die benannten Kohlenwasserstoffe nicht in allen Brennkammern gleichermaßen auftreten. Bild 32 gibt die relevanten Freisetzungen wieder und stellt einen direkten Bezug zu Temperatur und Brennkammer her.

Mit den Temperaturverläufen sind zeitgleich die Schwankungen während eines Feuerwechsels erkennbar. In der Vorwärmzone herrschen bereits Temperaturen von 200 bis 350 °C (Kammer 11 - Kammer 13 (bzw. Deckel 1 - Deckel 3), Bild 32). Eine Selbstentzündung freigesetzter Gase findet grade noch nicht statt, bzw. eine beginnende Flammenerscheinung ist in Deckel 3 (D3) erkennbar.



**Bild 32: Temperaturverläufe aller Brennkammern, inkl. Feuerwechsel**

Ausgehend von den benannten Temperaturabhängigkeiten der freigesetzten Gase ist in Deckel 2 und Deckel 3 im Wesentlichen mit den Wasserstoffen  $C_{ges}$  und ggf. bereits mit einem Anteil an  $CH_4$  sowie  $CO$  zu rechnen. Nichtsdestotrotz soll auch  $H_2$  in den Messungen erfasst werden. Nach (Tremblay und Charette 1988) ist im Gesamtprozess des Anodenbrennens von folgenden prozentualen Anteilen flüchtiger Bestandteile anhand des Gewichtsverlustes auszugehen:

**Tabelle 6: Anteile flüchtiger Bestandteile beim Anodenbrennen**

	TAR*	$H_2$	$CH_4$	Summe
Flüchtige Bestandteile in % des Anfangsgewichts	4,95	0,35	0,12	5,42
% Gewichtsverlust	91,3	6,5	2,2	100

\* kondensierbare Kohlenwasserstoffe

Für die sicherheitstechnischen Kenngrößen der unteren und oberen Explosionsgrenzwerte der Einzelkomponenten werden die Werte der GESTIS-Stoffdatenbank der (Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e.V.) herangezogen.

Tabelle 7: Sicherheitstechnische Kenngrößen relevanter flüchtiger Bestandteile

Sicherheitstechnische Kenngröße	Einheit	CO	C <sub>gesamt</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Untere Explosionsgrenze	Vol%	10,9	1,2	4,0	4,4
	g/m <sup>3</sup>	91		3,4	29
Obere Explosionsgrenze	Vol%	76	8,6	77	17
	g/m <sup>3</sup>	632		65	113
Sauerstoffgrenz-Temperatur (SGK/CO <sub>2</sub> )	Vol%	5,5	14	5,2	
Sauerstoffgrenz-Temperatur (SGK/N <sub>2</sub> )	Vol%	6,2	8,5	4,3	9,9
Zündtemperatur	°C	605	555	560	595

\* C (gesamt) - Annahme Benzol

Als umgebungsbedingter Einfluss auf die sicherheitstechnischen Kenngrößen ist insbesondere die Temperaturabhängigkeit der Brennkurve (siehe Bild 32) zu berücksichtigen. Exemplarisch und anhand großer Versuchsreihen wird durch die Bundesanstalt für Materialforschung (Schröder 2002) aufgezeigt, dass mit steigender Temperatur die untere Explosionsgrenze (UEG) sinkt und die Explosionsgrenzen geringer werden.

$$UEG(T) = UEG(T_0) \times [1 - K_0 \times (T - T_0)] \quad [1]$$

mit  $K_0 = 0,000784$

Eine Korrektur der UEG findet jedoch erst für die Betrachtung des Gasgemisches statt und kann folglich nur mit Annahmen oder nach erfolgten Messungen stattfinden. Gleiches gilt für die Bestimmung der UEG des Gemisches vorab. Für eine erste Abschätzung werden Werte aus früheren Messkampagnen von (Holden und Bergli 2003) herangezogen, siehe Anwendung Gleichung [6]. Dabei fanden Messungen im Abluftkanal statt und nicht direkt an der Quelle der Rauchgasentwicklung. Es galt eine Temperatur von 95°C.

$$UEG_{Gem} = \frac{100 \%}{\sum \frac{Vol\%}{UEG}} = \frac{100 \%}{\frac{Vol\%_{CO}}{UEG_{CO}} + \frac{Vol\%_C}{UEG_C} + \frac{Vol\%_{H_2}}{UEG_{H_2}}} \quad [6]$$

$$UEG_{Gem} = \frac{100 \%}{\sum \frac{Vol\%}{UEG}} = \frac{100}{\frac{83,24 \text{ CO}}{12,5 \text{ CO}} + \frac{10,06 \text{ C}}{1,2 \text{ C}} + \frac{6,7 \text{ H}_2}{4,0 \text{ H}_2}} \quad \left[ \% \cdot \frac{Vol\%}{\%} \right]$$

wobei  $\sum Vol\% = 100\%$

$$UEG_{Gem} = 5,98 \quad [Vol\%]$$

$$\begin{aligned}
 UEG_{Gem(573,15K)} &= 5,98 \cdot [1 - 0,0014 \times (573,15 - 298,15)] && [Vol\% \times [1 - (K - K)]] \\
 UEG_{Gem(573,15K)} &= 3,68 && [Vol\%]
 \end{aligned}$$

Die Summe brennbarer Gase im Verhältnis zur UEG ergibt sich final aus:

$$\begin{aligned}
 \frac{X_{Gem}}{UEG_{Gem}} \cdot 100\% &&& [7] \\
 \frac{1,79}{3,68} \cdot 100 = 48,65 &&& \left[ \frac{Vol\%}{Vol\%} \cdot \% \right]
 \end{aligned}$$

Darüber hinaus kann bei nicht zur Verfügung stehenden Messwerten die mittlere Konzentration im Abluftstrom berechnet werden, ohne dabei eine stoffliche Unterscheidung zu unterstellen. Dies stellt in der Praxis einen gangbaren Weg dar, wenngleich Verifizierungen fehlen. Es wird von einer konstanten Freisetzungsrate von Zersetzungsgasen über die Betriebslaufzeit ausgegangen. Die mittlere Gaskonzentration ist dabei ein Produkt aus dem Durchsatz an Anoden über die Betriebslaufzeit und dem Gewichtsverlust im Verhältnis zum Volumenstrom der Luft. Die prozessual-betrieblichen Bedingungen sind demnach entscheidend für die stoffliche Grundbewertung.

$$\begin{aligned}
 \bar{c} &= \frac{m \cdot \delta}{t \cdot V} && [8] \\
 \bar{c} &= \frac{\frac{80.000}{8.760} \cdot 0,05}{70.000} = && \left[ \frac{\frac{\frac{t}{a} \times (\%)}{\left(\frac{Nm^3}{h}\right)}}{m^3} \times 10^{-3} \right] \\
 \bar{c} &= 0,0065 \leq 0,040 && \left[ \frac{kg}{m^3} \right]
 \end{aligned}$$

Für eine Berechnung des Normalbetriebes unter folgenden Bedingungen ergibt sich eine mittlere Gaskonzentration  $\bar{c} \sim 6 \text{ g/m}^3$  mit.

- m = Durchsatz der Anode von 80 000 t/a
- t = Betriebslaufzeit von 8 760 h/a
- d = Gewichtsverlust von 5 %
- V = Frischluftmenge von 70 000 Nm<sup>3</sup>/h

Als vergleichende Größe wird eine der als Faustregel für Alkane geltende UEG von 40 g/m<sup>3</sup> angenommen. Demnach sind weniger als 25 % der UEG erreicht, was einen sicheren Anlagenzustand vermuten lässt. Aus der HAZOP-Analyse Kapitel 3.2.2 ist bekannt, dass eine Störung der Abluftleistung über die Zeit brennbare und explosionsfähige Gase freisetzt. Die Erreichung

einer angenommen UEG von 40 g/m<sup>3</sup> über die Zeit der anhaltenden Störung berechnet sich demnach wie folgt:

$$\bar{c} = \frac{\frac{\left(\frac{80.000}{8.760} \cdot 0,05\right)}{60} \cdot 22}{2} \quad \left[ \frac{\left(\frac{\frac{t}{a}}{\frac{h}{a}}\right)}{\frac{min}{2}} \cdot min \right]$$

$$\bar{c} = 0,28 > 0,040 \quad \left[ \frac{Nm^3}{m^3} \right]$$

Im Vergleich mit den Explosionsgrenzen wird nach 22 min und einer resultierenden gemittelten Konzentration von 280 g/m<sup>3</sup> der mittlere/obere Explosionsbereich erreicht. Eine UEG von 40 g/m<sup>3</sup> wird mit 36 g/m<sup>3</sup> nach etwa 3 min erreicht.

Für eine Verifizierung im Rahmen von Messungen sind diese kritischen Zustände nur schwerlich zu simulieren. Dennoch können bereits beim sogenannten Feuerwechsel und der damit verbundenen Unterbrechung des Luftzuges durch Versetzen des „Stiefels“ analog herrschende Bedingungen für einen Zeitraum von ca. 5 min abgebildet werden. Weitere Freisetzungen über die Zeit lassen sich durch Extrapolation vermuten. Der Stiefelwechsel selbst gehört zum Normalbetrieb und ist manuell auszuführen.

## 5.2 Messung der Gaszusammensetzung und Mengen

Zur Auswahl geeigneten Messequipments erfolgt vorab eine Machbarkeitsstudie. Die zum Einsatz kommenden Analysemethoden werden vorgestellt, um in der folgenden Messkampagne den Gemischzustand beschreibbar zu machen. Eine detaillierte Auswertung der erhobenen Daten zeigt den Wissenszugewinn und Mehrwert zur Kritikalitätsbewertung.

### 5.2.1 Machbarkeitsstudie

Da der Brennofen, bestehend aus diversen Subsystemen, wie Brennkammern, Ringleitung etc., verschiedenste potentielle Messstellen bietet und dabei unterschiedlichste Prozessbedingungen und Produkteigenschaften abbildet, galt es vorab zu bedenken, an welcher Stelle Messungen für die Problemstellung repräsentativ sind. Dies bedeutet zum einen, dass die Zusammensetzung der Atmosphäre denen der in der HAZOP-Analyse identifizierten kritischen Zuständen gleicht, und zum anderen, dass diese Zustände simuliert werden können, ohne einen kritischen Anlagenzustand und somit eine Gefährdung für das Betriebs- und Messpersonal hervorzurufen.

Da der Feuerwechsel einen Verlust des Unterdrucks abbildet, was eine der Hauptursachen der Gemischbildung ist (siehe Kapitel 3.2.2) und bei betriebsüblichem Ablauf keine bekannte Gefahr darstellt, wurde diese Prozedur für die Messungen gewählt. Dieses Verfahren bzw. das Versetzen des „Stiefels“ für den Anschluss der nächsten Brennkammer an die Ringleitung kann ca. fünf Minuten dauern. Erfahrungen und Konzentration des Bedienpersonals spielen dabei eine große Rolle. Denn auch diese Prozedur sollte nicht wesentlich mehr Zeit in Anspruch nehmen, da aus Erfahrungsberichten her bekannt ist, dass das sich bildende Gemisch unter Umständen einen gefährlichen Zustand erreichen kann. Eine Automatisierung ist nicht möglich. Es ist davon auszugehen, dass bei dem Feuerwechsel ein Trend über die Entwicklung der Freisetzung brennbarer Gase in den Brennkammern erkennbar ist. Da der Feuerwechsel etwa fünf Minuten in Anspruch nimmt, ist die kritische Zeit zur Erreichung der rechnerisch ermittelten unteren Explosionsgrenze nahezu erreicht und erlaubt weitere Abschätzungen.

Lokal ist eine Messung im Teilsystem der entstehenden Pyrolysegase anzustreben. Dies ist insbesondere in den Deckeln 2 und 3 der Fall, d. h. im Subsystem der Vorwärmzone, da die Temperaturen bereits hoch genug sind, um kondensierbare sowie nicht-kondensierbare Kohlenwasserstoffverbindungen der aus Steinkohlenteerpech bestehenden Anoden freizusetzen, nicht jedoch um eine Selbstentzündung hervorzurufen, wenngleich erste Flammerscheinungen bereits auftreten können. Demnach ist eine gesuchte repräsentative Gaszusammensetzung im Kontext potentieller Explosionsgefahren und zur Charakterisierung möglicher gefahrdrohender Mengen in diesem Bemessungsvolumen zu erwarten. Dies bedeutet jedoch, dass das Messequipment Temperaturen von bis zu 400 °C ausgesetzt ist. Die Temperaturen der einzelnen Brennkammern sind der Brennkurve in Bild 32 zu entnehmen. In Deckel vier findet durch die Zugabe von Erdgas als Brennstoff und dem Erreichen der Selbstentzündungstemperatur die gewollte und kontrollierte Verbrennung jener Gase statt. Auch Kondensatbildung kann Einfluss auf die Messergebnisse haben und ist als Störgröße möglichst auszuschließen.

Erfahrungen für die Auswahl geeigneter Messverfahren können aus dem Bereich der emissionschutzrechtlichen Erfassung von Grenzwerten einzuhaltender Luftschadstoffe gemäß den Anforderungen des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) gezogen werden. Vor diesem Hintergrund wurden in der Vergangenheit regelmäßig Messungen an dem zur Gesamtanlage gehörigen Kamin vorgenommen. Diese wurden im Jahr 2018 im Rahmen eines betriebsinternen Projektes zur Modernisierung der Ofensteuerung auf die Ringleitung ausgeweitet. Doch auch diese Messungen sind nicht repräsentativ, um die Berechnungen der rechnerisch ermittelten mittleren Gaskonzentration zu verifizieren.

Eine erste Messkampagne zur Bewertung der Explosionsgefahren wurden bereits im Jahr 2003 betriebsintern vorgenommen. Diese fand jedoch am Abluftkanal statt. Das genutzte Messverfahren ist nicht bekannt. Relevante Ergebnisse wurden jedoch in Kapitel 5.1 zum exemplarischen Umgang mit observablen Vergleichsgrößen herangezogen.

Unter Berücksichtigung dieser Umstände fanden erste Orientierungsmessungen basierend auf den Messverfahren nach (DIN EN 15058) und (DIN EN 12619) statt, die aufgrund bisheriger Erfahrungen direkt an der Realanlage durchgeführt werden konnten. Es wurden jeweils zwei Einzelmessungen an Deckel 2 und 3 vorgenommen. Gewonnene Hinweise für die weitere Messkampagne waren:

- Die simultane Erfassung von Sauerstoff ( $O_2$ ) und Kohlenmonoxid ( $CO$ ) verifizieren die theoretischen Trends über die prozessualen stofflichen Verhältnisse, d. h. sobald bei Unterbrechung des Unterdrucks  $O_2$  sank, stieg  $CO$  an. Auch konnte durch die Messung an beiden Brennkammern der Vorwärmzone Deckel 2 und 3 der Zug von Gasen aus der vorangehenden Brennkammer 3 und 4 abgelesen werden
- Der Messbereich bzw. das Verfahren für  $CO$  entsprach dem der Emissionsmessungen, was aufgrund des Anwendungsbereichs bzw. der Zielstellung nach BImSchG zu niedrig gewählt wurde. Die Werte mussten oberhalb des Messbereichs extrapoliert werden, was eine Unsicherheit der Ergebnisse darstellt.
- Da der Prozessschritt des Feuerwechsels stark von Bedienpersonal abhängt, bzw. eine Reihe an manuellen Prozessschritten beinhaltet, sind die Umgebungsbedingungen während der Messungen detailliert zu beschreiben. Über das Prozessleitsystem können anschließend zusätzlich Bedingungen wie Temperatur und Luftzug abgelesen werden. Dass dies bei den Orientierungsmessungen nicht ausreichend genau erfolgte, erschwerte die Auswertung im Nachgang.
- Ein Fehler im Handling des Ablaufes zum Feuerwechsel sorgte für einen von der zu erwartenden Kurve abweichenden Verlauf der Volumenströme. Diese Fehlbedienung bildet ein Störungsszenario ideal ab.

Auf eine ausführliche Auswertung der Orientierungsmessungen wird an dieser Stelle verzichtet, da dies mit den Folgekapiteln und der tatsächlichen Messkampagne erfolgt.

Die Bedenken bzgl. hoher Temperaturen und Kondensatbildung hatten keinen Einfluss auf den Messerfolg. Das Messequipment hat sich als geeignet herausgestellt. Der Messbereich zur Erfassung der  $CO$ -Werte ist anzupassen und das ausgewählte Verfahren zu prüfen.

Da im Rahmen der Machbarkeit die gemessenen Werte für H<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> derart gering ausfielen, dass sie auf die Zielstellung vernachlässigbar scheinen, sollen diese Größen in der weiteren Messkampagne entfallen. Ein Grund hierfür kann die Freisetzungsrate in Abhängigkeit des Temperaturbereichs im Bemessungsvolumen sein. Die prozentualen Anteile beider Größen werden in der Festlegung eines Sicherheitsfaktors berücksichtigt.

### 5.2.2 Analysetechniken und Messprinzipien

Für die Charakterisierung der Gaszusammensetzung im Kontext der Explosionssicherheit gilt es nach vorangestellten Überlegungen im Wesentlichen die Größen Kohlenmonoxid (CO) und organische Kohlenwasserstoffe (C<sub>ges</sub>) zu bestimmen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden zudem Methan (CH<sub>4</sub>) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) erfasst. Eine simultane Bestimmung von Benzol (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) im Gemisch war aufgrund der angewendeten Messverfahren ebenfalls möglich. Trotzdem die Messkampagne sich auf CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>ges</sub> und O<sub>2</sub> beschränkt, sind für Pyrolysegase und andersartige Anlagentypen auch die weiteren Größen relevant und seien daher an dieser Stelle mit gelistet, siehe Tabelle 8. Für den Messaufbau am Brennofen kommen ein nichtdispersiver Infrarotanalysator (NDIR) und ein Flammenionisationsdetektor (FID) zum Einsatz. Für CO und C<sub>ges</sub> kann somit eine kontinuierliche Messung über den gesamten Zeitraum des Feuerwechsels stattfinden, während bei der diskontinuierlichen Erfassung durch Probenahme nur eine Mittelwertbildung möglich ist.

Tabelle 8: Messkomponenten und zugeewesenes Messverfahren

Messkomponente	Verfahren	Referenz		Messbereich
Kohlenmonoxid CO	Nichtdispersiver Infrarotanalysator (NDIR)	DIN EN 15058	konti	0 - 5 000 ppm 0 - 10 Vol%
Organische Stoffe C <sub>gesamt</sub>	Flammenionisationsdetektor (FID)	DIN EN 12619	konti	0 - 1 000 ppm 0 - 10 000 ppm
CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>2</sub>	Nichtdispersiver Infrarotanalysator (NDIR)		konti	
Methan CH <sub>4</sub>	Probenahme mittels Gassammelballon --> Analyse mittels Gaschromatografie durch Vermessung der Wärmeleitfähigkeit (GC/WLD)		diskonti	

Wasserstoff $H_2$	Probenahme mittels Gassammelballon --> Analyse mittels Gaschromatografie durch Vermessung der Wärmeleitfähigkeit (GC/WLD)		diskonti	
Benzol $C_6H_6$	Probenahme durch Adsorption an Aktivkohle --> Analyse mittels Gaschromatografie (GC/FID) nach Lösemitteldesorption	DIN TS 13649	diskonti	

Für die kontinuierliche Erfassung von CO kommt ein NDIR zum Einsatz. Das Messprinzip basiert auf dem Lambert-Beers'schen Gesetz und somit auf der elektro-optischen Absorption und kann durch den physikalischen Aufbau in Bild 33 abstrahiert werden. Ein vorangestellter optischer Filter sorgt dafür, dass nur der relevante Wellenlängenbereich für CO in die Prüfküvette gelangt und eine Querempfindlichkeit anderer Gase ausgeschlossen wird. Gleiches gilt für Stickstoff als Referenzgas, bzw. Referenzdetektor. Die Abschwächung des die Küvette durchlaufenden Lichts in Richtung Detektor gilt dann als Maß für die CO-Konzentration, vgl. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2017b). Eine Konditionierung der Probe war trotz möglicher Störgrößen, wie Kondensat und Partikeln, nicht notwendig.

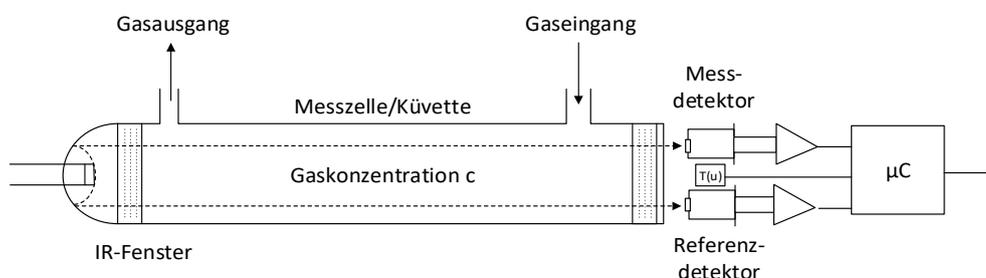


Bild 33: Messprinzip Infrarot-Gassensor (NDIR), nach (Wiegleb)

Neben CO wurden mit diesem Messverfahren auch weitere anorganische Kohlenwasserstoffverbindungen, wie  $CO_2$  und  $NO_x$  gemessen, ebenso  $O_2$ .

Für die organisch gebundenen Kohlenwasserstoffe hingegen eignet sich ein Flammenionisationsdetektor (FID), dessen Messprinzip (siehe Bild 34, vgl. (Förster et al. 2019)) auf der Ionisation der Verbindungen in einer Wasserstoffflamme basiert. Die Flamme befindet sich in einem elektrischen Gleichspannungsfeld. Der gemessene Ionisationsstrom bei der Verbrennung ist daraufhin ein Maß für die Anzahl an Kohlenstoffatomen in der Flamme. Auch die Verkettung der Teilchen sowie die Bindungspartner spielen eine Rolle, vgl. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2013)

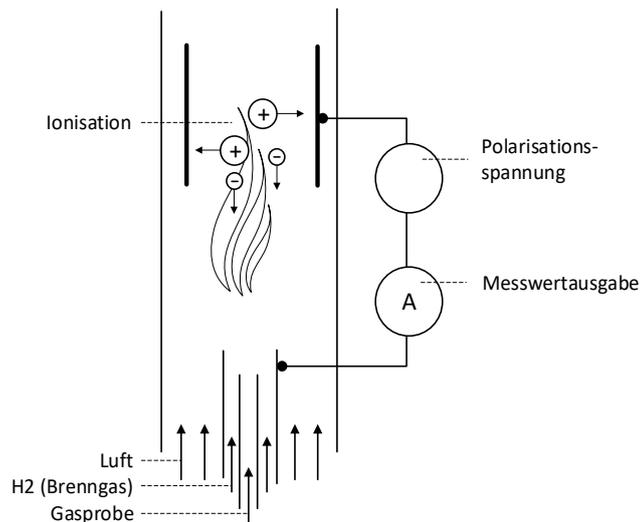
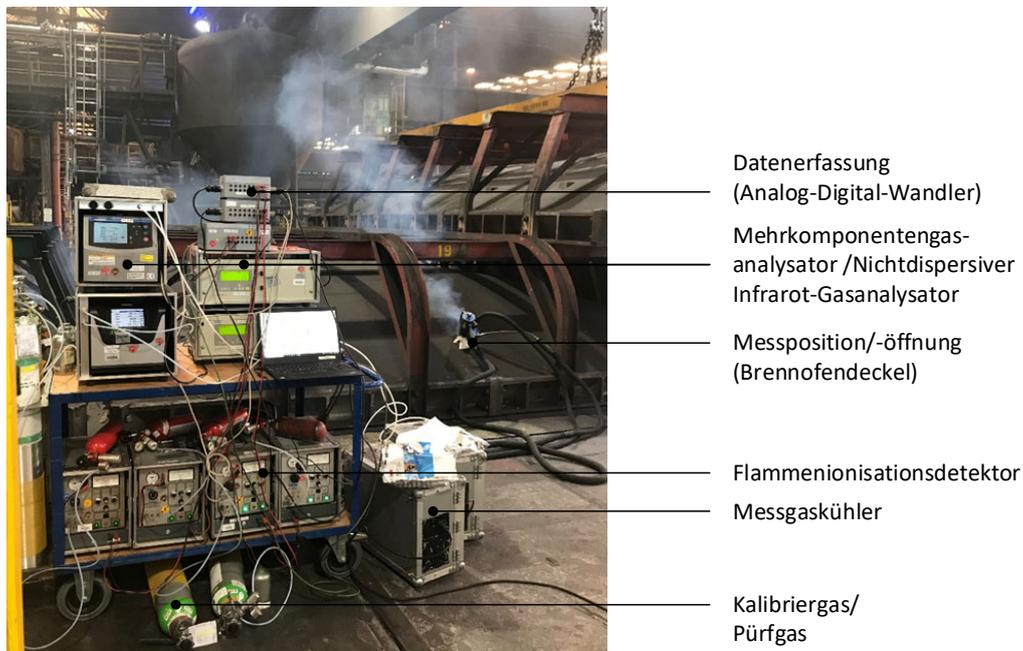


Bild 34: Messprinzip Flammenionisationsdetektor (FID), nach (Förster et al. 2019)

### 5.2.3 Versuchsaufbau und Durchführung Realanlage

Für die Messkampagne wurden ausgehend von den bisherigen Erkenntnissen zwei parallele Messaufbauten vorgenommen. Dabei wurde beim Feuerwechsel, die unter Kapitel 5.2.1 benannten Größen an Deckel 2 und Deckel 3 zeitgleich für jeweils zwei Messbereiche (CO: 0 - 5 000 ppm, 0 - 10 Vol%;  $C_{\text{ges}}$ : 0 - 1 000 ppm, 0 - 10 000 ppm) erfasst. Hierzu wurden drei Messsonden in die vorhandenen Schaulöcher auf der kurzen Ofenseite oberhalb des Abdeckmaterials geführt, siehe Bild 35.



Hersteller Gasanalysator:  
 Horiba PG-250 SRM  
 Horiba PG-350  
 Siemens / ULTRAMAT 23  
 Bernath Atomic / BA 3006

Bild 35: Messaufbau inkl. Entnahmesonde am Brennofen Deckel 3

Aufgrund der idealisierten Verteilung der ausströmenden und aufsteigenden Pyrolysegase ist auf diese Weise mit einer repräsentativen Aussage der Gemischzusammensetzung oberhalb der Anoden zu rechnen.

Somit konnten die Größen sowohl für beide Deckel vergleichend herangezogen werden als auch der prozessbedingte Einfluss, bzw. die Wechselwirkung der benachbarten Deckel zueinander erfasst werden. Die Messungen unterstützen somit nicht nur die Erfassung der erforderlichen Werte zur Berechnung der UEG, sondern liefern dem Anlagenbetreiber zeitgleich zusätzliches Detailwissen über den Prozess. Es wurden in Summe drei hintereinander stattfindende Feuerwechsel vermessen, d. h. die Messungen fanden mit einem zeitlichen Versatz von ca. 42 h statt. Dies gab nicht nur einen zeitlichen Vorteil der gesamten Messkampagne, sondern erleichtert auch wesentlich den in unmittelbarer Nähe zum jeweiligen Deckel platzierten Auf- und Umbau (siehe Bild 35) und die Messgeräte mussten nicht neu gestartet werden.

Auch die Prozessbedingungen sind somit annähernd gleich. Dies erlaubt eine optimierte Vergleichbarkeit und Messungenauigkeiten durch Rebooten der Messeinrichtungen sind vermieden. Der Messaufbau entspricht den unter Kapitel 5.2.2 beschriebenen Verfahren und ist in Bild 36 schematisch dargestellt.

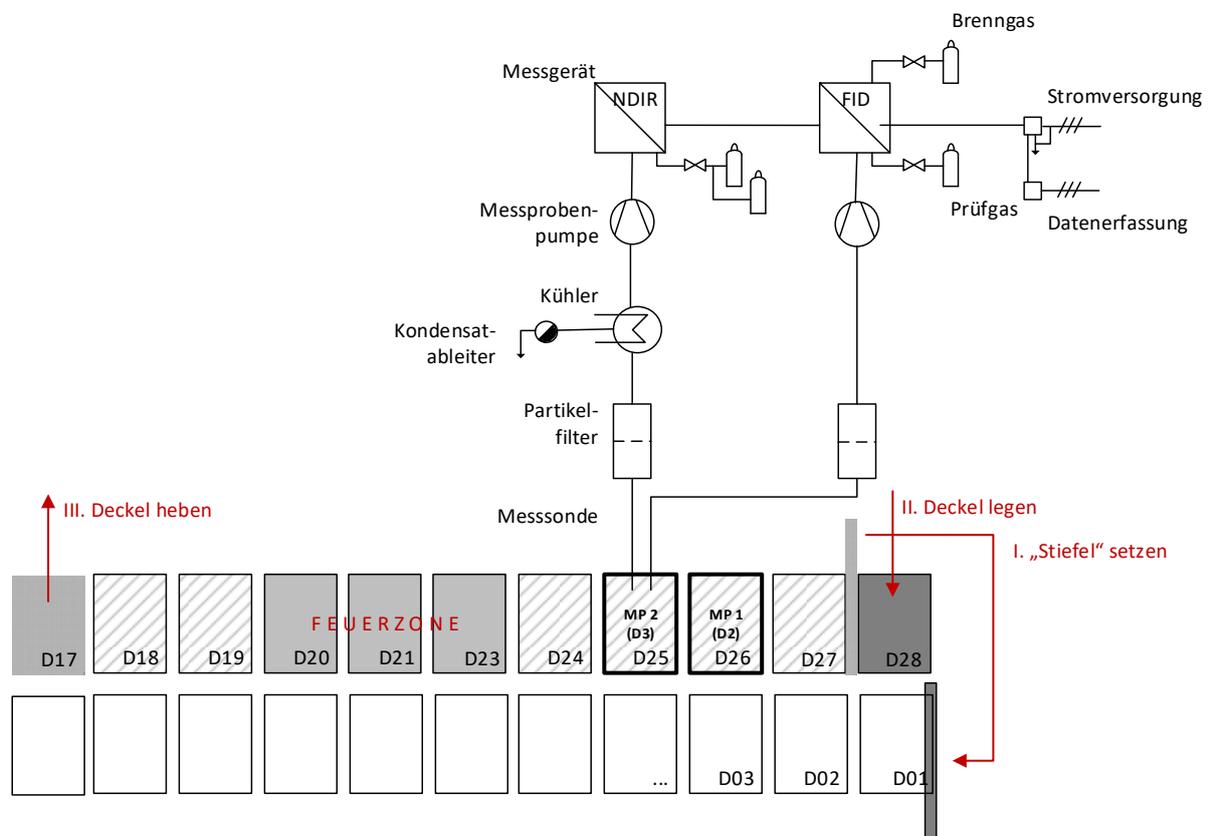


Bild 36: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Die Gasproben zur Bestimmung von  $C_{ges}$  führen jeweils über eine Messsonde durch einen Partikelfilter und eine beheizte Probenleitung zum Messgerät, dem FID. Die Gasprobe zur Bestimmung von CO wird durch eine Sonde über einen Kühler zum Messgerät, dem NDIR, des jeweiligen Messgerätes geführt. Im Messbereich von 0 - 5 000 ppm handelt es sich um ein Mehrkomponentenmessgerät, welches simultan  $CO_2$  und  $O_2$  als ebenfalls relevante Größen für die vorliegende Zielstellung der Charakterisierung der Gemischzustände und ihrer potentiellen Explosionsgefahr misst.

Nach Kalibrierung der Messgeräte mit den entsprechenden Prüfgasen wurden Daten in je 10 sec-Schritten erfasst. Die Zeiten der manuellen Prozedur des Feuerwechsels wurden mit dem Messgerät und dem IBA-System abgestimmt und genauestens notiert, um im Folgenden die Einflüsse eines jeden Arbeitsschrittes interpretieren zu können.

### 5.2.4 Datenerfassung und Auswertung

Ausgehend von der Berechnung der mittleren Gaskonzentration ( $\bar{c}$ ) im Falle eines Ausfalls der Abluftleistung und der Freisetzung von Zersetzungsgasen aufgrund hoher Temperaturen über die Zeit, ergibt sich die in Bild 37 lineare Steigung von  $\bar{c}$  über die Zeit (rote Markierung).

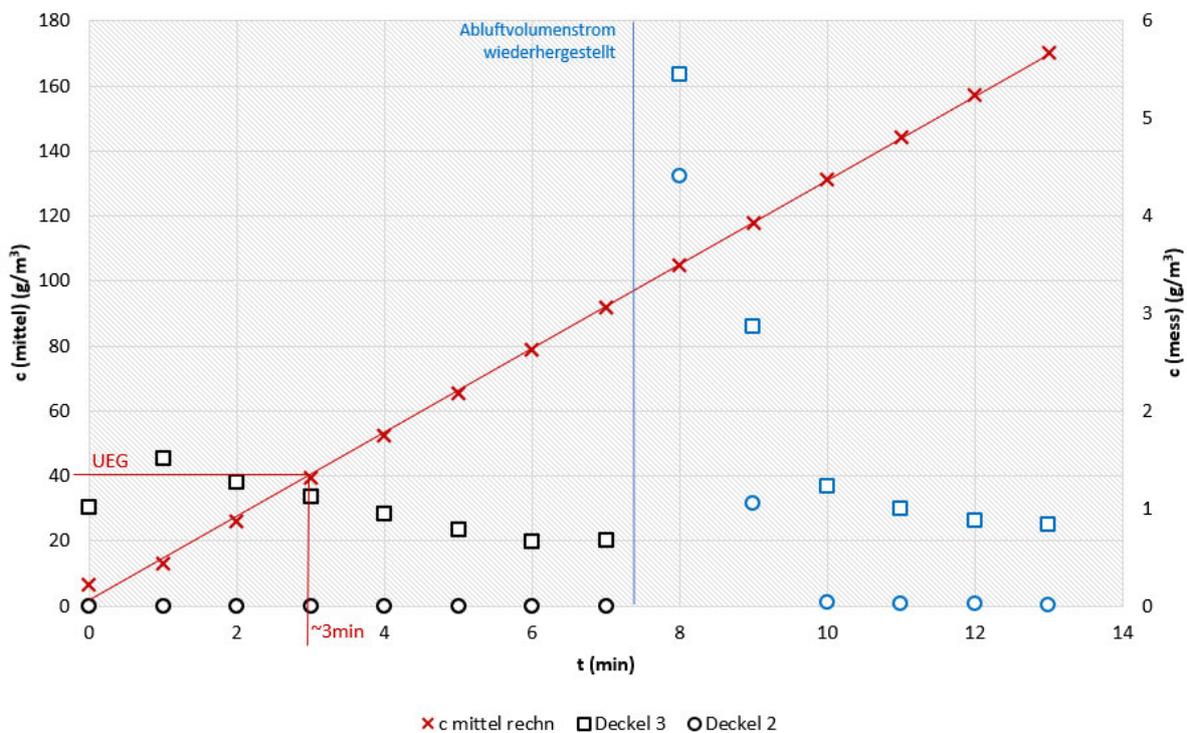
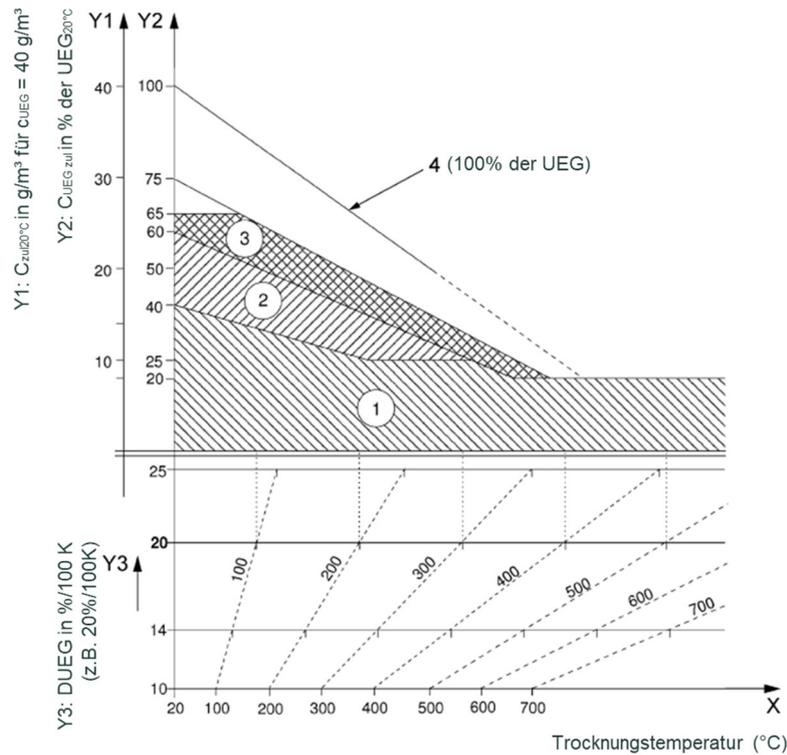


Bild 37: Vergleich der rechnerisch ermittelten Gaskonzentration zu den gemessenen flüchtigen brennbaren Bestandteilen im Gasgemisch

Diese idealisierte Berechnung ist aufgrund des fehlenden Unterdrucks einem Feuerwechsel gleichzusetzen. Für einen Vergleich zur unteren Explosionsgrenze wurde in bisherigen Untersuchungen eine Faustregel entsprechend den Explosionsgrenzen für Alkane herangezogen, vgl. (Inburex Consulting GmbH 2006). Dies entspricht auch der DIN EN 1539 und den Grenzwerten der zulässigen Betriebsbereiche in Abhängigkeit der freigesetzten Konzentration brennbarer Gase, siehe Bild 38. Eine UEG von  $40 \text{ g/m}^3$  und eine OEG von  $300 \text{ g/m}^3$  werden angenommen.



**Bild 38: Betriebsbereiche für Trockner Typ A, gem. DIN EN 1539**

Aufgrund der besseren Sichtbarkeit der Einzelwerte sind die gemessenen Konzentrationen ( $C_{\text{mess}}$ ) in Bild 37 auf der Sekundärachse im angepassten Messbereich dargestellt, auch wenn dies einer Vergleichbarkeit rein visuell nicht förderlich ist. Da die Gleichung zur Berechnung von  $\bar{c}$  auf dem Gewichtsverlust der Anoden von kondensierbaren Kohlenwasserstoffen,  $\text{H}_2$  und  $\text{CH}_4$  gemäß Tabelle 6 basiert, wird zum Vergleich in Bild 37 auch nur die gemessenen Gaskonzentrationen von  $C_{\text{ges}}$  herangezogen. Ein Sicherheitsfaktor in Anlehnung an Tabelle 6 für  $\text{H}_2$  und  $\text{CH}_4$  würde die Ergebnisse nicht nennenswert beeinflussen. Eine Summe aller freigesetzten Verbrennungsprodukte, d. h. inkl.  $\text{CO}$ , würde die abgebildete lineare Steigung ( $\bar{c}$ ) hingegen nach Wiederherstellung des Abluftvolumenstroms (vertikale Linie) wesentlich überschreiten, bliebe jedoch bei Verlust des Unterdrucks (d. h. links der vertikalen Linie) unterhalb der berechneten mittleren Gaskonzentration ( $\bar{c}$ ). Ebenfalls erkennbar ist, dass die Messwerte für  $C_{\text{ges}}$  nicht linear steigen, sondern nach einer anfänglichen Erhöhung nach zwei Minuten bereits

wieder fallen. Dies widerspricht somit auch der rechnerischen Abschätzung. Nach Gegenüberstellung der Messergebnisse mit den Temperaturen der jeweiligen Deckel ist erkennbar, dass die Temperatur in Deckel 2 nach etwa zwei Minuten (mit der kompletten Unterbrechung des Unterdrucks durch Heben des „Stiefels“) abfällt und somit auch die Freisetzung der Zersetzungsprodukte reduziert wird.

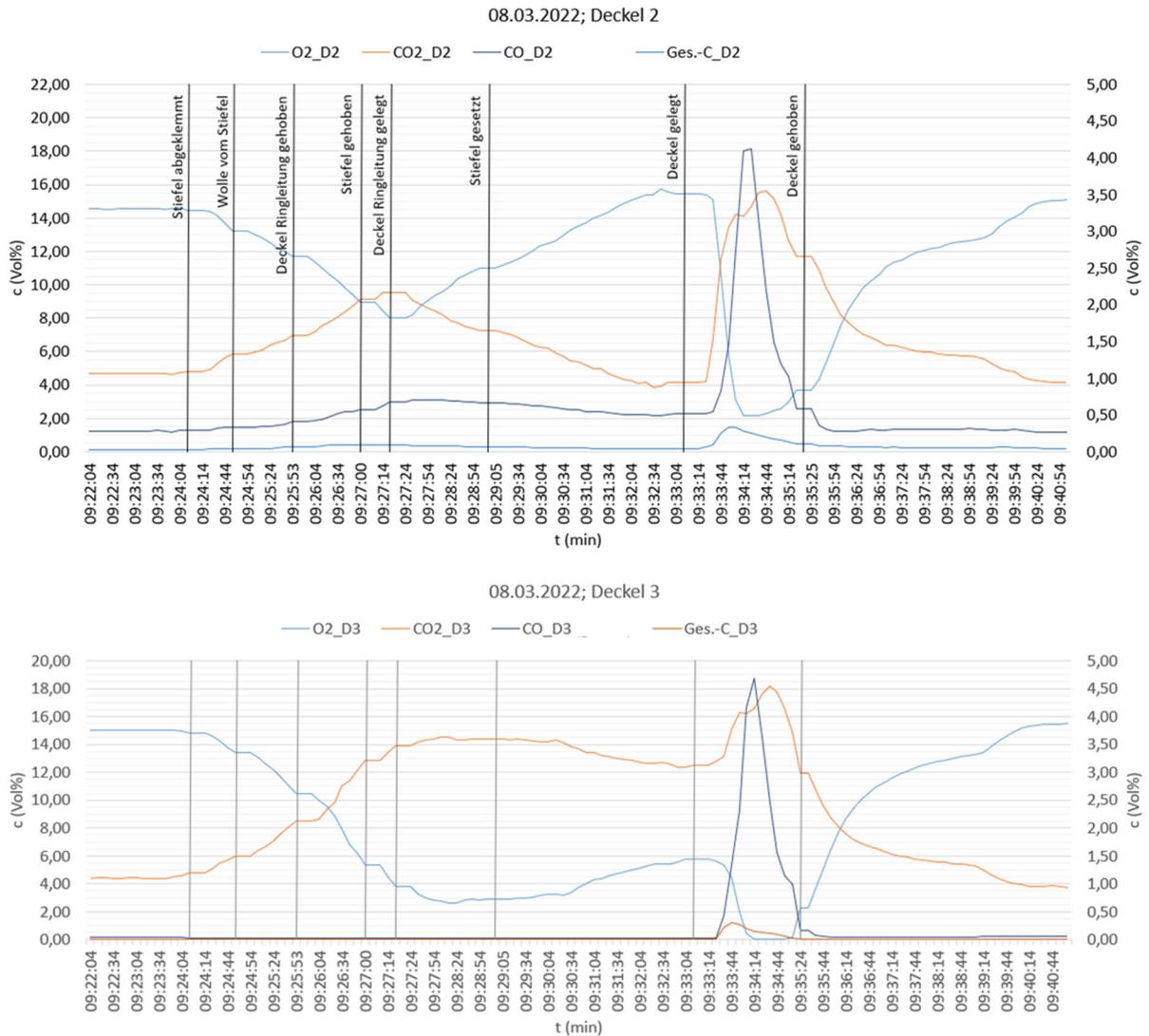
Bereits aus der Machbarkeitsstudie ist bekannt, dass neben den organischen Kohlenwasserstoffen auch mit anorganischen Verbindungen und dabei insbesondere CO (und H<sub>2</sub>) als Verbrennungsprodukt zu rechnen ist und dies in die Berechnung der UEG Einzug finden muss. Für die Berechnung der erforderlichen Vergleichswerte (der UEG nach Le Chatelier [Glg. 6] und der temperaturkorrigierten UEG [Glg. 1]) wurden die in Kapitel 5.1 vorgestellten Gleichungen verwendet, welche in selbigem Kapitel exemplarisch berechnet wurden. Die Identifizierung der für die UEG zu berücksichtigenden Maximalwerte ergibt sich aus den Graphen über die gesamte Messlaufzeit und die in Bild 39 erkennbaren Verläufe für CO und C<sub>ges</sub> (rechte Ordinate) in einem Gemisch aus O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> (linke Ordinate). Die Abhängigkeit der manuell durchgeführten Prozessschritte wird durch die vertikalen Linien wiedergegeben.

Es ist erkennbar, dass die brennbaren Bestandteile als Gemisch aus CO und C<sub>ges</sub> ihren Peak erreichen, sobald der „Deckel gelegt“ und der Abluftvolumenstrom („Zug“) und somit der Aufbau des Unterdrucks in den Brennkammern wiederhergestellt wurde. Vor dieser Zeit, nämlich in der nach HAZOP-Analyse identifizierten kritischen Zeit des Unterdruckverlustes, zwischen „Deckel Ringleitung gehoben“ und „Deckel gelegt“ ist ebenfalls ein Anstieg des Rauchgases (der brennbaren Zersetzungsprodukte) erkennbar, wenngleich nicht annähernd im selbigen Bereich, vgl. Bild 39.

Neben dem Verlauf der Rauchgase ist in den Diagrammen in Bild 39 jedoch ebenso erkennbar, dass die O<sub>2</sub>-Werte und die konkurrierenden CO<sub>2</sub>-Werte in Deckel 2 (D2) und Deckel 3 (D3) unterschiedlich verlaufen. In Deckel 3 ist eine Reduzierung des O<sub>2</sub>-Anteils im Zeitraum des Unterdruckverlustes erkennbar, während in Deckel 2 nach „Deckel Ringleitung gelegt“ ein frühzeitiger Anstieg an O<sub>2</sub> stattfindet. Diese Gegebenheiten sind bei Annäherung des Gemisches (c<sub>mess</sub>) an die untere Explosionsgrenze in die Bewertung über das gefährliche explosionsfähige Gemisch einzubeziehen und finden mit der korrelierenden Berechnung der Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) zudem Berücksichtigung.

Als Begründung dieser Verläufe ist die nicht erreichte Selbstentzündungstemperatur in D2 zu benennen. Es bilden sich Zersetzungsprodukte (gemessen in Form von C<sub>ges</sub>), die nicht verbrennen. Daraus resultiert ein im Vergleich zu den anderen Messtagen reduzierter CO-Anteil, da an

diesen die Selbstentzündungstemperatur (SET) dauerhaft oder teilweise erreicht wurde. In Deckel 3 hingegen wird mit einer Temperatur unter dem Deckel von  $> 600\text{ °C}$  die SET der Teergase von Beginn der Aufzeichnungen an erreicht.  $C_{\text{ges}}$  wird nahezu vollständig verbrannt, was sowohl bei  $C_{\text{ges}}$  als auch bei CO zu einer Näherung an 0 Vol% führt. Nach Wiederherstellung des Abluftvolumenstroms mit „Deckel gelegt“ steigen  $C_{\text{ges}}$  und CO signifikant. Es findet ein Zug der unter Deckel 4 (D4) gebildeten Gase statt. Demnach wurde mehr  $C_{\text{ges}}$  gebildet, als aufgrund des geringen Sauerstoffanteils verbrannt werden konnte und CO steigt.



**Bild 39: Messergebnisse Deckel 2 und Deckel 3, 08.03.2022 für CO und  $C_{\text{ges}}$  (rechte Ordinate) sowie  $CO_2$  und  $O_2$  (linke Ordinate) in Vol%**

Diese kursorisch beschriebenen Beobachtungen lassen die folgenden Hypothesen zu:

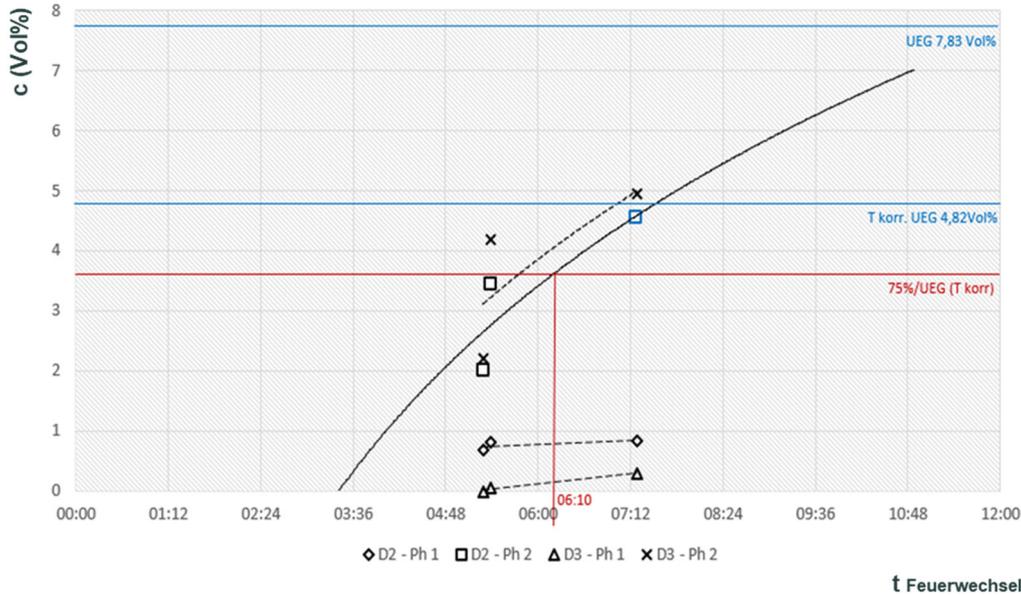
- In D2 findet ein Einzug von Sauerstoff entgegen dem Feuerfortschritt und somit entgegen dem Luftzug statt. Dass der Anstieg sich nicht aus den Deckeln der Abkühlzone und den folgenden offenen Deckeln ergibt, ist aus den Werten von D3 interpretierbar. Die in D3 abgeflachte  $O_2$ -Kurve lässt einen Übertrag aus D2 vermuten.

- Die Maximalwerte nach Wiederherstellung des Unterdrucks ergeben sich durch den Weitertransport der freigesetzten Gase aus D4 über D3 in D2. Die Auswertung der Rohdaten und ein Zeitversatz des Peaks um 10 sec, was rechnerisch die Zeit des vollständigen Austausches des mit Brenngas gefüllten Leervolumens und dem Transport in die Folgebrennkammer in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms entspricht, bestätigt diese Annahme. Zudem entsprechen die Werte in D3 denen einer vollständigen Oxidation, wie sie in D4 zu erwarten ist. Unter Zumischung der erhöhten Sauerstoffwerte aus D2 ergibt sich folglich ein annähernd gleich verlaufender Peak mit erhöhten Sauerstoffanteil aufgrund der stattfindenden Durchmischung.
- Eine zielgerichtete Vergleichbarkeit zur Berechnung der mittleren Gaskonzentration kann nur erfolgen, wenn die SET im Deckel nicht erreicht wurde und die Temperatur gleichbleibend hoch ist. Ein Abfall der Temperatur sorgt für einen damit einhergehenden Reduzierung der Freisetzung.

Aus der Gegenüberstellung der gemessenen Maximalwerte des brennbaren Gasgemisches und der geltenden Explosionsgrenzen, gemäß Gleichung [6], inklusive des eingeräumten Sicherheitsabstandes jener innerhalb eines Diagramms (Bild 40) werden die Näherungen zur UEG erkennbar. Es ist zu beachten, dass die eingetragenen punktuellen Einzelwerte und der angestrebte Vergleich den Maximalwerten für die Zeit des Unterdruckverlustes (festgelegt als Phase 1 beider Deckel, d. h. D2 Ph 1, D3 Ph 1) sowie nach wiederhergestelltem Zug (festgelegt als Phase 2 beider Deckel, d. h. D2 Ph 2, D3 Ph 2) aller drei Messtage in Abhängigkeit der benötigten Zeit (Dauer) für den Feuerwechsel entsprechen. Grund für diese Auswahl ist der Umstand, dass die Berechnung der UEG eines Gasgemisches für jede Zusammensetzung in Abhängigkeit ihrer anteiligen Verhältnisse nach Gleichung [6] einzeln erfolgt.

Auch wenn mit einer Anzahl von drei Messungen kein statistisch verwertbarer Trend abgeleitet werden kann, soll die Darstellungsform in Bild 40 einen Ansatz liefern. Die Auftragung der Explosionsgrenzen in Abhängigkeit der Zeit zwischen dem beginnenden Unterdruckverlust und dem Abschluss der gesamten Prozedur des Feuerwechsels mit „Aufdrehen des Gases“ ergab keinen stetigen Anstieg freigesetzter Zersetzungsprodukte. Dies ist bereits aus den Ergebnissen in Bild 39 abzuleiten. Vielmehr kann mit den Messungen bestätigt werden, dass eine Abhängigkeit zur Dauer der Prozedur gegeben ist. Eine Steigung von 5 min auf 7 min ist erkennbar und kann nach Setzen einer Trendkurve zu der Annahme führen, dass 75 % der

temperaturkorrigierten UEG nach knapp über 6 min erreicht werden. Die temperaturkorrigierte UEG selbst nach einer weiteren Minute.



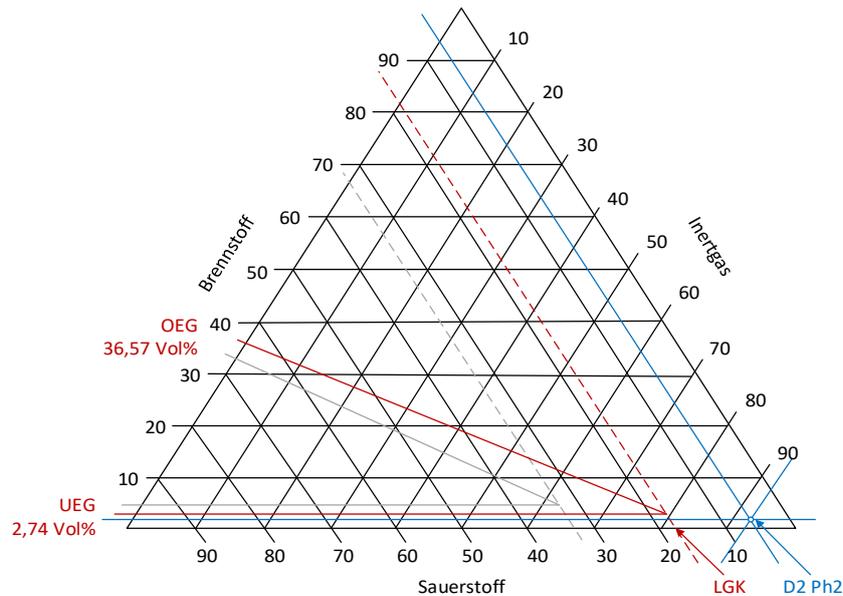
**Bild 40: Diagramm zur Trendableitung in Abhängigkeit der Zeit des Feuerwechsels**

Der Maximalwert von 4,9 Vol% (abgebildet durch ein x bei ca. 5 Vol%/7:12min) nähert sich zwar mit einem Verhältnis von 85 % der temperatur-korrigierten UEG, weist jedoch im selben Zeitpunkt keinen Sauerstoffanteil auf. Der durch ein blaues Rechteck dargestellte Maximalwert für D2 Ph 2 hingegen, nähert sich zu knapp 95 % der UEG ( $T_{\text{korr}}$ ), siehe horizontal abgebildete Vergleichswerte in Bild 40. Der Sicherheitsabstand zur temperaturkorrigierten unteren Explosionsgrenze wird folglich nicht in allen Punkten eingehalten. Auch hierbei ist ein Blick auf den dazugehörigen  $O_2$ -Anteil im Gemisch erforderlich. Für diesen Bereich galt ein erhöhter  $O_2$ -Anteil von 2,17 Vol%, Was den Vergleich und die Berechnung der (Sauerstoffgrenzkonzentration) SGK erforderlich macht.

$$SGK_{\text{Gem}} = \frac{\left( \frac{100\%}{\frac{Vol\%(CO_2)}{SGK(\frac{C}{CO_2})} + \frac{Vol\%(N_2)}{SGK(\frac{C}{N_2})}} * \%C \right) + \left( \frac{100\%}{\frac{Vol\%(CO_2)}{SGK(\frac{CO}{CO_2})} + \frac{Vol\%(N_2)}{SGK(\frac{CO}{N_2})}} * \%CO \right) + \left( \frac{100\%}{\frac{Vol\%(CO_2)}{SGK(\frac{H_2}{CO_2})} + \frac{Vol\%(N_2)}{SGK(\frac{H_2}{N_2})}} * \%H_2 \right)}{100\%} \quad [9]$$

$$SGK(T) = SGK(T_0) \times [1 - 0,000784 \times (T - T_0)] \quad [10]$$

Die temperatur-korrigierte SGK mit einem Temperaturkoeffizienten von  $k = -0,0016$  wird unterschritten. Auch eine Darstellung im ternären Dreistoffsystem kann für jeden Messpunkt Aufschluss über das Erreichen des Explosionsbereiches liefern. Die Eintragung des beschriebenen Gemischzustandes des in Bild 40 markierten blauen Quadrats im Dreistoffsystem Bild 41 bestätigt den Abstand zum Explosionsbereich.



**Bild 41: Konzentrationsverhältnisse im Dreistoffsystem**

Mit den gemessenen Werten zum Gemischzustand lässt sich zwar eine wesentlich genauere Angabe treffen als mit der Berechnung zur mittleren Gaskonzentration und der Annahme einer als Faustregel geltenden UEG, doch war auch hierbei das Treffen einiger Annahmen notwendig, die die Zuverlässigkeit der Schlussfolgerungen hinsichtlich des potentiell explosionsfähigen Gemisches beeinflussen:

- Es wurde ein anteiliger Sicherheitsfaktor für das Vorhandensein von  $H_2$  im brennbaren Gasmisch getroffen. Dieser beträgt  $2/3$  des  $C_{ges}$ -Anteils und ergibt sich aus Erfahrungswerten bisheriger Messungen.
- Für  $C_{ges}$  wurden die sicherheitstechnischen Kenngrößen von Benzol angenommen, welche zum einen charakteristisch für organische Kohlenwasserstoffe sind und zum anderen die Größe Benzol im Gemisch vergangener Messungen bestimmt wurde.
- Die sicherheitstechnischen Kenngrößen wurden auf eine Temperatur von  $300^\circ C$  korrigiert, wohlwissend dass in D2 und D3 Temperaturen von  $> 500^\circ C$  bzw.  $> 700^\circ C$  erreicht werden. Dies ist darauf zu begründen, dass gem. (Hirsch und Brandes 2014) eine Korrektur der UEG oberhalb  $300^\circ C$  nicht sinnvoll ist, bzw. keine konkrete Aussage über den darüber befindlichen Verlauf getroffen werden kann. Für die obere Explosionsgrenze (OEG) gilt dies für die Annäherung der Zündtemperatur, welche mit Deckel 3 erreicht wird. Nichtsdestotrotz wurde für die Größen UEG, OEG und SGK die gleiche Temperatur-Korrektur gewählt.
- Für die nicht mit den vier Größen  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $C_{ges}$  und  $CO$  ermittelten Stoffe im Gesamtgemisch wurde anteilig Stickstoff angenommen.

- Die Luftgrenzkonzentration und damit die Spitze des Explosionsbereiches im Dreistoffsystems (Bild 41) wurde nicht experimentell bestimmt, sondern mit der Gleichung nach (DIN EN 1839) und dem rechnerisch ermittelten Wert der SGK berechnet.
- Die Ungenauigkeit des Bestimmungsverfahrens zur UEG für Gase wird in der (DIN EN 1839) mit bis zu 10 % angegeben. Aufgrund der weiteren benannten Annahmen und der auf zwei Messgrößen brennbarer Gase begrenzten Messkampagne wird ein erweiterter Sicherheitsfaktor von 75 %/UEG eingeräumt.
- Die Temperaturkoeffizienten entsprechen dem nach (Hirsch und Brandes 2014) angegebenen stoffspezifischen Werten und weichen somit im Ergebnis der korrigierten UEG nach unten hin ab. Die Werte sind vergleichsweise wesentlich konservativer.

### 5.3 Bewertung der Zündquellen

Da sich in der Bewertung über Quellen und Mengen an explosionsfähigen Gemischen ergeben hat, dass eine gefahrdrohende Menge nicht überschritten wird und sich kein gefährliches explosionsfähiges Gemisch in Kombination mit dem erforderlichen Sauerstoffanteil ergibt, ist eine Zündquellenbewertung gemäß Abfrageschema des *Duktus* theoretisch nicht erforderlich. Auch bei der Anwendung der (DIN EN 1539) für Trockner und Öfen, in denen brennbare Stoffe freigesetzt werden, ist diese Maßnahmen aufgrund der gemessenen Werte nicht erforderlich. Das dazugehörige Diagramm (siehe Bild 38) bezieht sich auf die höchstzulässige Menge oder den höchstzulässigen Durchsatz an brennbaren Stoffen und damit auf Teergase, nicht jedoch auf die unvollständige Verbrennung und die Bildung von CO oder weiterer explosionsfähiger Reaktionsprodukte.

Unter der betreiberseitigen Festlegung, dass aufgrund der unbekanntem Messgenauigkeit, insbesondere in Anbetracht der Anzahl getroffener Annahmen, dennoch eine konservative Zoneneinteilung stattfindet, kann ein Übergang in den kausal-orientierten Explosionsschutz wiederum erforderlich werden - das Treffen inhärenter Maßnahmen zur Vermeidung des gefährlichen explosionsfähigen Gemisches ist dem vorzustellen.

In den betrachteten Subsystemen der Brennkammern ist eine Zündquellenbewertung jedoch aufgrund der prozessbedingten Temperaturen wenig sinnvoll. Eine Verbrennung ist vielmehr gewünscht. Auf eine detaillierte Anwendung der Zündquellenbewertung wird an dieser Stelle verzichtet, da eine exemplarische Anwendung mit Kapitel 4.3 stattfand und das Vorgehen jenem gleicht und nicht dem wissenschaftlichen Beitrag der weiteren Kapitel und dieser Arbeit beiträgt.

Es ist jedoch zu erwähnen, dass eine Zündquellenbewertung wiederum für die benachbarten Anlagenteile (z. B. Ringleitung, Filter) relevant sein kann. Die Notwendigkeit eines kausalorientierten Explosionsschutzkonzeptes ist folglich nicht für die Gesamtanlagenbewertung auszuschließen.

### 5.4 Zwischenfazit

Die mit den Kapiteln 5.1 und 5.2 gewonnenen Erkenntnisse sind Bestandteil der Bewertung des inhärenten Explosionsschutzes im Rahmen der Explosionsgefährdungsbeurteilung und somit gemäß GefStoffV dokumentationspflichtig. Die folgende Zusammenfassung als Zwischenfazit bildet nicht nur die Schlussfolgerungen ab, sondern zeigen dem Beurteiler zeitgleich eine Möglichkeit der Dokumentation auf. Die Anwendung der durch (Maiwald et al. 2017b) publizierten „Toolbox“ liefert dabei ein Werkzeug zur transparenten Darlegung des systematischen Herangehens. Das tabellarische Vorgehen der benannten „Toolbox“ wird mit den Darstellungen nach Bild 42 bis Bild 43 aufgegriffen und auf den Anwendungsfall, bzw. auf die Ergebnisse aus der Messkampagne der Brennkammern, übertragen und erweitert.

Zur Beantwortung der Frage, ob die Bildung eines explosionsfähigen Gemisches möglich ist, wird das Gesamtsystem (Brennofenprozess) in Subsysteme (Brennkammer, Ringleitung etc.) unterteilt, siehe Matrix 1, Bild 42. Anschließend werden alle Prozessphasen des Normalbetriebs einem jeden Subsystem gegenübergestellt, siehe ebenfalls Matrix 1, Bild 42. Zur erfolgreichen Beurteilung des Vorhandenseins eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches innerhalb der Subsysteme gilt es somit zu beantworten, ob brennbare Stoffe überhaupt vorhanden sind und in gefährdender Menge vorliegen. Hierfür wird ein jedes Subsystem separat herausgegriffen, um mit Matrix 2 die einzelnen Prozessphasen hinsichtlich ihrer Quellen und Mengen explosionsfähiger Gemische zu bewerten, siehe Matrix 2a, Bild 42 und Matrix 2b, 2c, Bild 43. Neben dem Vorhandensein eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches und dem visuellen Hervorheben der Bewertung durch ein „grünes - nein“ oder ein „rotes - ja“ kann final eine Zone 0, 1 oder 2 festgelegt werden. Dies erfolgt im inhärenten Schutzkonzept gem. (TRGS 722) unter Berücksichtigung des Betriebskonzeptes. Als Beispiel kann die Funktion eines Ventilators zur Aufrechterhaltung eines Unterdrucks benannt werden, welcher zur Erfüllung der Prozessbedingungen notwendig ist. Die Zuverlässigkeit der Lüftung bezüglich der Anforderungen an eine mögliche zonenreduzierende Maßnahme ist erst gegeben, wenn eine Aufhebung der Unterdruckfahrweise sicherheitsrelevante Folgen hat, vgl. (Grund 2022).

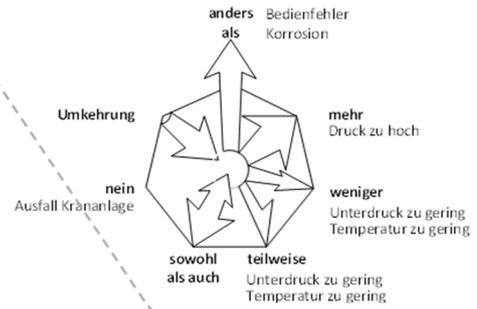
Die Ergebnisse der Messungen zur Erfassung der Gaskonzentration (Kapitel 5.2.4) liefern detaillierte Erkenntnisse für das Subsystem Vorwärmzone, wiedergegeben in Matrix 2a, Bild 42 und dabei insbesondere für die Prozessphasen

- Betrieb (42h)
- Feuerwechsel
- Anfahren nach Feuerwechsel.

Ebenso lassen sich anhand der Messungen sowie weiterer Erkenntnisse der betrieblichen Praxis zur Beurteilung der Quellen und Mengen Rückschlüsse für die Subsysteme Feuerzone (Matrix 2b, Bild 43) und Abkühlzone (Matrix 2c, Bild 43) ziehen.

Da die Messgenauigkeit sowie die Unsicherheiten aufgrund der getroffenen Annahmen gem. Kapitel 5.2.4 nicht genau quantifiziert werden können, fallen die Schlussfolgerungen konservativ aus. Aufgrund des geringen Abstandes der gemessenen Gaskonzentration innerhalb der Vorwärmzone zur unteren Explosionsgrenze oder gar der Überschreitung der temperaturkorrigierten unteren Explosionsgrenze wird das Vorhandensein eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches festgelegt. Da die Messungen jedoch die Zeitabhängigkeit der Feuerwechselprozedur zur Bildung gefährdender Mengen explosionsfähigen Gas-Luft-Gemisches bestätigen und die Wahrscheinlichkeit einer länger andauernden Feuerwechselprozedur insbesondere für ein „Stiefel setzen um die Ecke“ (d. h. von Deckel 28 auf Deckel 01, siehe Bild 36) gegeben ist, wird aufgrund der Häufigkeit dieser Prozedur eine Zone 2 definiert, siehe Matrix 2a, Bild 42. Selbiges gilt für das anschließende Wiederanfahren, siehe Matrix 2a, Bild 42. Die in der Matrix aufgezeigten Bewertungen für die technischen Störungen und Bedienerfehler sind auf ausgewählte Szenarien der HAZOP-Analyse zurückzuführen, die unter die Konvention der betriebsüblichen Störungen innerhalb des Normalbetriebes fallen. Die Festlegung jener im Vergleich zu Störungen außerhalb des Normalbetriebes (z. B. Störungen, die eine Instandsetzung erfordern) unterliegt nach (BG RCI 2023a) den Konkretisierungen des Betreibers, z. B. auch aufgrund seiner Erfahrungen.

Anwendung der HAZOP-Analyse zur Bewertung technischer Störungen und Bedienerfehler innerhalb des Normalbetriebes



Matrix 1: Festlegung Subsysteme und Prozessphasen – vor Bewertung

Nr.	Subsystem	Ist die Bildung eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches möglich?							
		Prozessphasen im Normalbetrieb						Technische Störung	Bedienerfehler
		Anfahren	Betrieb (42h)	Feuerwechsel	Anfahren nach Feuerwechsel	Abfahren	Wartung/Inspektion		
1.	Brennkammer	-	-	-	-	-	-	-	-
1.1	Vorwärmzone (D1-D4)								
1.2	Feuerzone (D5-D7)								
1.3	Abkühlzone (D8-D10)								
2.	Gasbrücken								
3.	Ringleitung								
4.	E-Filter								
5.	Schlauchfilter								

Herausgreifen des Subsystems Vorwärmzone zur Bewertung mittels Matrix 2

Matrix 2a: Bewertung eines Subsystems innerhalb seiner Prozessphasen auf das Vorhandensein eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches (für das Subsystem Brennkammer - Vorwärmzone)

Subsystem: Nr. 1 Brennkammer / Nr. 1.1 Vorwärmzone								
Prozessphase	Brennbarer Stoff		Explosionsf. Gemische		Mengen und Quellen	Gefährliche ex. Gemische		Zone nach Maßn. Betriebskonzept
	ja	nein	ja	nein		ja	nein	
Anfahren		nein		nein			nein	keine
Betrieb (42h)	ja		ja		Berechnung c (mittl. Gaskonzentration)		nein	keine
Feuerwechsel	ja		ja		Berechnung c (mittl. Gaskonzentration); Gaskonzentrationsmessungen (durchgef. Mrz 2022)	ja		Zone 2
Anfahren nach Feuerwechsel	ja		ja			ja		Zone 2
Abfahren		nein		nein			nein	keine
Wartung/Inspektion		nein		nein			nein	keine
Technische Störung	ja		ja		siehe HAZOP-Analyse	ja		Zone 2
Bedienerfehler	ja		ja			ja		Zone 2

Bild 42: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 5.1 - 5.2 (Teil 1)

# Erheben und Auswerten observabler Größen gasführender Anlagen

Herausgreifen des Subsystems  
Feuerzone zur Bewertung mittels  
Matrix 2

Matrix 2b: Bewertung eines Subsystems innerhalb seiner Prozessphasen auf das Vorhandensein eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches (für das Subsystems Brennkammer - Feuerzone)

Subsystem: Nr. 1 Brennkammer / Nr. 1.2 Feuerzone								
Prozess- phase	Brennbarer Stoff		Explosionsf. Gemische		Mengen und Quellen	Gefährliches ex. Gemische		Zone nach Maßn. Betriebs- konzept
	ja	nein	ja	nein		ja	nein	
Anfahren	ja (CH4)		ja		Zufuhr unverbranntes Erdgas	ja		Zone 2
Betrieb (42h)	ja		ja		Berechnung c (mittl. Gas- konzentration)		nein	keine
Feuerwechsel	ja		ja				nein	keine
Anfahren nach Feuerwechsel		nein		nein			nein	keine
Abfahren		nein		nein			nein	keine
Wartung/ Inspektion		nein		nein			nein	keine
Technische Störung	ja		ja		siehe HAZOP- Analyse	ja		Zone 2
Bedienerfehler	ja (CH4)		ja		Zufuhr unverbranntes	ja		Zone 2

Herausgreifen des Subsystems  
Abkühlzone zur Bewertung  
mittels Matrix 2

Matrix 2c: Bewertung eines Subsystems innerhalb seiner Prozessphasen auf das Vorhandensein eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches (für das Subsystems Brennkammer - Abkühlzone)

Subsystem: Nr. 1 Brennkammer / Nr. 1.3 Abkühlzone (Deckel 8, 9, 10 - offener Deckel 11)								
Prozess- phase	Brennbarer Stoff		Explosionsf. Gemische		Mengen und Quellen	Gefährliches ex. Gemische		Zone nach Maßn. Betriebs- konzept
	ja	nein	ja	nein		ja	nein	
Anfahren		nein		nein			nein	keine
Betrieb (42h)		nein		nein			ein	keine
Feuerwechsel		nein		nein			nein	keine
Anfahren nach Feuerwechsel		nein		nein			nein	keine
Abfahren		nein		nein			nein	keine
Wartung/ Inspektion		nein		nein			nein	keine
Technische Störung		nein		nein			nein	keine
Bediener-fehler		nein		nein			nein	keine

Bild 43: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 5.1 - 5.2 (Teil 2)

Die Freisetzung brennbarer flüchtiger Bestandteile ist aufgrund der Temperaturen innerhalb der Brennkammer 5 abgeschlossen. Die gebildete Gaskonzentration, z. B. innerhalb der Brennkammer 4, wird bei Wiederherstellung des Zuges in die Brennkammern der Vorwärmzone geführt, was wiederum anhand der Messkampagne belegbar ist. Für die Feuerzone selbst ist beim Anfahren sowie aufgrund von Bedienerfehlern zudem eine ausbleibende Verbrennung des über die Gasbrücken zugeführten Erdgases (CH<sub>4</sub>) nicht auszuschließen, was in Matrix 2b, Bild 43 zur Festlegung der Zone 2 führt. In der Abkühlzone findet keine Freisetzung brennbarer Bestandteile mehr statt. Matrix 2c, Bild 43 gibt diesen Zustand für alle Prozessphasen durch ein „grünes - nein“ als Beantwortung über die Frage des Vorliegens gefährlicher explosionsfähiger Gemische wieder. Eine Übertragung der Bewertungen aller drei Subsysteme findet schließlich in Matrix 1, Bild 44 statt.

*Übertragung der Festlegungen für jede Prozessphase eines jeden Subsystems in Matrix 1 (z.B. aus Matrix 2a)*

**Matrix 1: Festlegung Subsysteme und Prozessphasen – nach Bewertung (des Subsystems Brennkammer)**

Nr.	Subsystem	Ist die Bildung eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches möglich?							
		Prozessphasen im Normalbetrieb						Technische Störung	Bedienerfehler
		Anfahren	Betrieb (42h)	Feuerwechsel	Anfahren nach Feuerwechsel	Abfahren	Wartung/Inspektion		
1.	Brennkammer	-	-	-	-	-	-	-	-
1.1	Vorwärmzone (D1-D4)	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2
1.2	Feuerzone (D5-D7)	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2
1.3	Abkühlzone (D8-D10)	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2
2.	Gasbrücken	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2
3.	Ringleitung	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2
4.	E-Filter	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2
5.	Schlauchfilter	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2

**Bild 44: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 5.1 - 5.2 (Teil 3)**

Die Darstellungen am Beispiel der Brennkammern als Zwischenfazit der Erhebung und Auswertung observabler Größen gasführender Anlagen setzen die Annahme voraus, dass die durchgeführten Messungen im Sinne einer Einzelfallbetrachtung für diese Explosionsgefährdungsbeurteilung als valide Grundlage angesehen werden. Auf eine Maßnahmenableitung und die weitere Anwendung der „Toolbox“ nach (Maiwald et al. 2017b) wird verzichtet, da mit Kapitel 5 die Charakterisierung des Gemischzustandes im Vordergrund steht.

## 6 Modellieren der Kritikalität

### Inhalt

---

6.1	Sicherheitlicher Zusammenhang örtlicher und zeitlicher Varianzen .....	103
6.1.1	Varianz im Teilsystem bei Normalbetrieb (Stäube).....	105
6.1.2	Varianz im Teilsystem bei anzunehmenden Störungen (Gase) .....	109
6.1.3	Superposition.....	111
6.2	Kausal-orientierte Bedeutung.....	114
6.2.1	Experimentelle Bewertung korrelierender Bedingungen.....	114
6.2.2	Experimentelle Bewertung der Glimmnestzündwirksamkeit .....	118
6.3	Final-orientierte Bedeutung.....	120
6.3.1	Rechnerische Bewertung.....	120
6.3.2	Experimentelle Bewertung.....	127
6.3.2.1	Auswirkungen nicht explosionsstechn.-entkoppelter Anlagenteile.....	127
6.3.2.2	Auswirkungen partiell explosionsfähiger Atmosphären .....	130
6.4	Zwischenfazit .....	132

---

Die mittels messtechnischer Erhebung gesammelten und ausgewerteten Daten sowie die Zündquellenbewertung in Anlehnung anerkannter Verfahren nach (DIN EN 13463-1) zeigen auf, dass sowohl die explosionsfähigen Gemische örtlich und zeitlich über die jeweiligen Anlagenquerschnitte variieren können als auch die Zündquellen. Dies reduziert die Wahrscheinlichkeit einer Koinzidenz ebendieser Bedingungen. Mit diesem Kapitel soll daher der sicherheitliche Zusammenhang der erfassten Varianzen von Teilvolumen (d. h. der instantanen Zustände) innerhalb der Subsysteme als Modell und deren Einfluss auf potentielle Auswirkungen, die Ableitung von Maßnahmen sowie dessen Zuverlässigkeit beschrieben werden. Die dabei angestellte mikroskopische Betrachtung soll nicht nur einen Beitrag zur praktischen anwenderfreundlichen Erfüllung von theoretisch rechtlichen Anforderungen liefern, sondern auch durch

den Einsatz gezielter (d. h. am Wirkungsort) Maßnahmen die Zuverlässigkeit dieser erhöhen. Dadurch kann sich z. B. für Betreiber von Bestandsanlagen zudem die Option ergeben, in Rücksprache mit den zuständigen Behördenvertretern die Wirtschaftlichkeit einer zur Anpassung an den Stand der Technik notwendigen Maßnahmenarchitektur im Auge zu behalten.

### **6.1 Sicherheitlicher Zusammenhang örtlicher und zeitlicher Varianzen**

Die Ergebnisse aus Kapitel 4 und 5 liefern Erkenntnisse darüber, dass ein mikroskopischer Blickwinkel - d. h. eine detaillierte Beschreibung der Gemischzustände und resultierende instantane Koinzidenzbedingungen innerhalb von Teilvolumen eines geschlossenen Apparates - unter Anwendung von Messprinzipien einen enormen Wissenszugewinn für die Bewertung von Stoff, Anlage und Prozess liefert. Bereits in (Berufsgenossenschaftliche Regel für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit 2007) ist beschrieben, dass es in der Regel schlichtweg falsch ist, Staubkonzentrationen als gleichmäßige Verteilung im Raum idealisiert zu betrachten und beschreibt, dass eine summarische Betrachtung inhomogener Staubverteilung nicht die Konzentrationsverhältnisse für jedes Teilvolumen wiedergibt. Örtliche Staubkonzentrationen können sich dabei von der errechneten unterscheiden. Dieser Zustand wurde durch die exemplarischen Messungen am Sprühtrockner (siehe Kapitel 4) jüngst erneut belegt. Auch befassten sich in der Vergangenheit umfangreiche experimentelle Studien von (Hauert und Vogl 1995; Siwek 2012; Schmidt 2017) mit diesem Zustand und der technischen Möglichkeit zur Erfassung dieser observablen Größen. Die gewonnenen publizierten Daten weisen dies jedoch derzeit nur für eine Handvoll Anlagen nach. Dass eine ungleiche Verteilung explosionsfähiger Gemische in Abhängigkeit des Anlagentyps auch für Gase gelten kann, zeigt das Beispiel des Brennofens. Demnach ist auch bei Gasen ein mikroskopischer Blick sinnvoll, wenngleich durch die Eigenschaften über die Verteilung im Raum die Teilvolumen andersartig ausgeprägt bzw. zu interpretieren sind. Eine gewisse räumliche Trennung ist vorauszusetzen.

Es wurde erkennbar, dass die Teilvolumen nicht nur örtlich variieren, sondern zudem der Zeitfaktor zu berücksichtigen ist. Sei es aufgrund von An- und Abfahrvorgängen, Dauer von Störungen oder schlichtweg aufgrund von Schwankungen innerhalb der Partikel-/ Molekülbewegungen, z. B. aufgrund eingestellter Massenströme. Dies findet somit für den Normalbetrieb als auch für Störungsszenarien Anwendung.

Rechtliche Berücksichtigung finden diese Zustände bereits seit den 1990er Jahren für die Auslegung des final-orientierten Explosionsschutzes, vgl. z. B. (TRGS 724; VDI-Richtlinie 3673, Blatt 1; DIN EN 14491). Die Anwendung inhomogener Gemischzustände setzt dabei jedoch stets eine Einzelfallbetrachtung voraus, bzw. fundierte Veröffentlichungen. Das Hinzuziehen

dieser observablen Größen findet demnach in der Regel erst im letzten Schritt zur Bewertung und Festlegung von Schutzmaßnahmen nach TRGS 720 statt, ohne bereits im präventiven Bereich für die gezielte Maßnahmenableitung genutzt zu werden. Der intrinsische Sicherheitsfaktor, ein Merkmal des Vorgehens nach *Duktus*, bleibt somit bestehen und wird erst mit den konstruktiven Maßnahmen angetastet; m. a. W. eine „zum-Teil-wirkende“ konstruktive Schutzmaßnahme gilt hierbei als probates Mittel.

Als Besonderheit sei in diesem Kontext jedoch mit Hinblick auf den betrachteten Anwendungsfall des Brennofens die geltende DIN EN 1539 hervorzuheben. Sie schenkt der Möglichkeit von Teilvolumen insofern Bedeutung, dass von der Einteilung des Ofens in Trocknungssektionen die Rede ist, für welche die Explosionsschutzanforderungen separat gelten und in gegenseitiger Beeinflussung zu den benachbarten Sektionen zu bewerten sind.

Auch die Störfallverordnung (StörfallV) nutzt in ihrer Fassung vom 02.05.2000 den Wortlaut der „*Teilvolumen einer Anlage, die der Zone 20 [...] zuzuordnen sind*“ für die Charakterisierung der Gefahr, vgl. (Bundesanzeiger Verlag GmbH 2022). Die Summe dieser Teilvolumen resultiert in der Zuordnung der Mengenschwellen, die ein Maß für die Ausprägung der erforderlichen Maßnahmen, respektive Betreiberpflichten sind. Mit nachfolgenden Änderungen der Verordnung ist dieser Anhang und die Berücksichtigung von Teilvolumen im Rahmen der Störfallpflichten jedoch entfallen.

In der Sicherheitstechnik ist das Risiko definiert als Produkt aus Schadensschwere und Eintrittswahrscheinlichkeit.

$$\text{Risk} (R_{Ex}) = f(S, P_{Ex}) \quad [11]$$

Nach einer Übertragung dieses Ansatzes durch (Steen 2009) auf das Explosionsrisiko ergibt sich daraus:

$$\text{Risk} (R_{Ex}) = P_{mixture} \cdot \sum P_{ignition\ source} \cdot S \quad [12]$$

(Lottermann 2012) fasst zusammen, dass sich der Umfang der Explosionsmaßnahmen nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre richtet. Dieses Attribut ist demnach der erste Anlaufpunkt, ebenso im *Duktus* nach TRGS 720, und bestimmt die weitere Bewertung maßgeblich. (Lottermann 2012) stellt diese Tatsache weiterhin in den Kontext des Unwirksammachens von Zündquellen, respektive der Reduzierung der Wahrscheinlichkeit des Wirksamwerdens.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Kapitel 4 und Kapitel 5 lässt sich die Gleichung [12] um den Part der örtlichen ( $x, y, z$ ) und zeitlichen ( $t$ ) Varianzen bezogen auf Teilvolumen des im Fokus stehenden Subsystems erweitern, vgl. (Maiwald 2017b).

$$Risk (R_{Ex(t; x, y, z)}) = P_{mixture(t; x; y; z)} \cdot \sum P_{ignition\ source(t; x; y; z)} \cdot S_{(t; x; y; z)} \quad [13]$$

Demnach ist das Risiko definiert über die Faktoren der explosionsfähigen Atmosphäre/Gemische bezogen auf das lokale Vorhandensein zu einem bestimmten Zeitpunkt, der wirksamen Zündquelle zu selbigem Ort und Zeit sowie den aus dieser Koinzidenz resultierenden Schadensschwere. Letztere ist dabei abhängig von dem Ort der Zündung über den Querschnitt einer Anlage sowie den im selbigen Moment geltenden Abstand zu den Explosionsgrenzen.

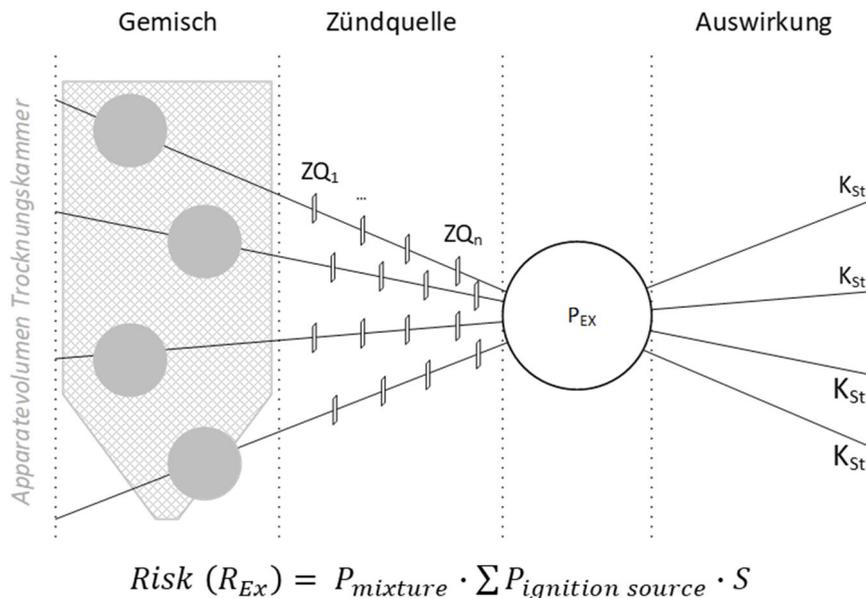
Auch bei der Definition von Zonen wird der zeitliche Faktor berücksichtigt. Hierbei finden die Schlagworte „häufig“, „gelegentlich“ und „kurzzeitig“ Anwendung. Diese sind stets in den Kontext des Normalbetriebes zu setzen, was per Definition die betriebsüblichen Störungen einschließt. Die Ergebnisse einer HAZOP-Analyse identifizieren auch die (betriebsunüblichen) Störungen, die über diesen Normalbetrieb hinaus auftreten können. Diese Szenarien fallen dann nicht unter den rechtlichen Anwendungsbereich der Zoneneinteilung und abzuleitender Maßnahmen.

Im Folgenden wird der sicherheitliche Zusammenhang auf die Beispielanlagen der Sprühtrocknung und des Brennofens übertragen. Für die staubführende Anlage basiert dieser auf den publizierten Vorarbeiten durch (Maiwald 2017b) sowie auf unveröffentlichte Darlegungen in (Maiwald 2018a). Ergänzt werden diese Beiträge zudem um die Übertragung auf die gasführende Anlage.

### 6.1.1 Varianz im Teilsystem bei Normalbetrieb (Stäube)

Der allgemeingültige Ansatz basierend auf der Berechnung der mittleren Staubkonzentration kann für die Trocknungskammer auf Basis der bewährten Risikoformel [12] gem. Bild 45 dargestellt werden. Demnach bildet eine homogen angenommenen Staubverteilung im Bemessungsvolumen - innerhalb des Apparatvolumens der Trocknungskammer dargestellt durch in Form und Größe gleichbleibende „Kreise“ für ein homogenes Gemisch ( $P_{mix}$ ) - aufgrund von Unkenntnis weiterer Angaben zur Partikelführung die Grundlage für die weitere Zündquellenbewertung. Die Bewertung über das Vorhandensein und Wirksamwerden der 13 Zündquellen erfolgt nach DIN 1127-1, bzw. TRGS 723 bezogen auf die gesamte Trocknungskammer. Es ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit für  $P_{EX}$ . Daraus abgeleitet wird die sicherheitstechnische

Kenngröße der maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeit, der  $K_{St}$ -Wert, als Auswirkung einer Explosion angesetzt und für die Auslegung des konstruktiven Explosionsschutzes angenommen. Der  $K_{St}$ -Wert wird hierbei sinnbildlich auch für die weiteren sicherheitstechnischen Kenngrößen der Druckauswirkungen herangezogen. Wohlwissend, dass bei homogener Verteilung teilweise mehr als zweifach so hohe Explosionsdrücke auftreten als im Vergleich zur inhomogenen Verteilung, vgl. (VDI-Richtlinie 3673, Blatt 1).



**Bild 45: Kritikalitätsmodell basierend auf dem Ansatz der mittleren Staubkonzentration**

Diese idealisierte Betrachtung lässt sich auf Grundlage detaillierter Anlagenkenntnis, Simulationen (soweit für Stäube realistisch abbildbar) oder durch Datenerhebung wie Messkampagnen fokussieren, was dazu führt, dass bereits die kausal-orientierte Maßnahmenfindung dort greift, wo Zündquellen eine Koinzidenz mit der explosionsfähigen Atmosphäre eingehen und somit überhaupt wirksam werden können. Es ist dabei davon auszugehen, dass die gezielten Maßnahmen zuverlässiger greifen, ohne durch eine ggf. vorkommende Reduzierung von Maßnahmen das Schutzniveau zu senken (siehe Kapitel 7.1).

Ein weiterer Einfluss ist auf die Findung von Maßnahmen gegeben, da durch die mikroskopische Betrachtung nicht für jedes Teilvolumen der maximale Druckanstieg zu erwarten ist. Durch die umfangreichen Studien über die sicherheitstechnischen Kenngrößen ist bekannt, dass der maximale Druckanstieg im mittleren Explosionsbereiche mit optimalem stöchiometrischem Verhältnis vorkommt. Bei Staubkonzentrationen nahe der unteren oder oberen Explosionsgrenze sind diese Explosionsdrücke geringer, vgl. (Bartknecht 1993). Diesen Tatsachen wird

nach (DIN EN 14491) bei der Auslegung konstruktiver Maßnahmen bei der Berechnung der Größe von Entlastungsflächen bereits z. T. Rechnung getragen.

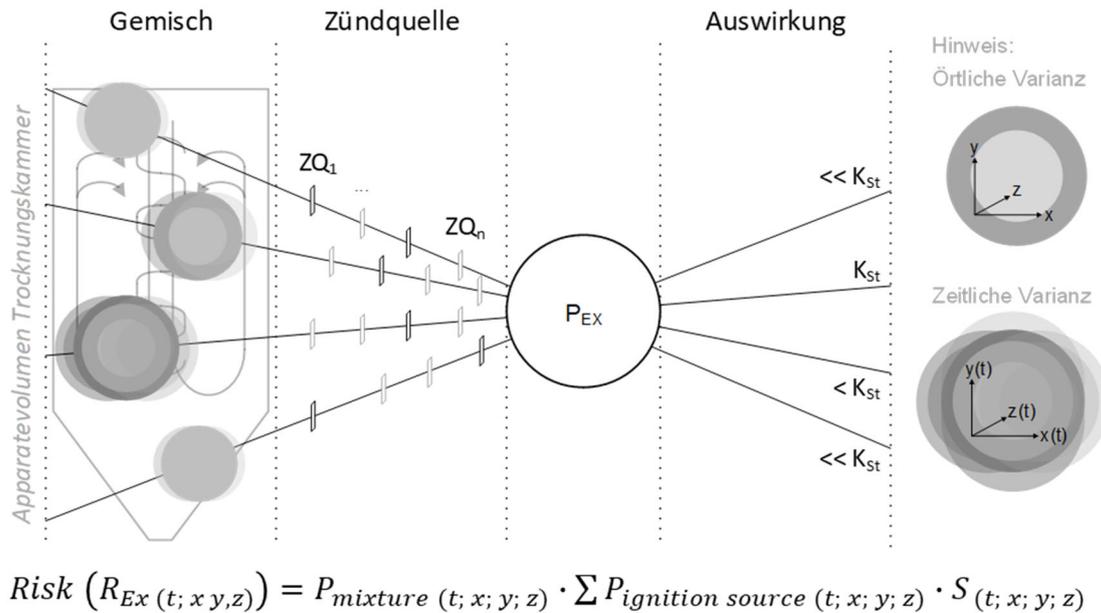
Das benannte Verhalten kann herangezogen werden, um ein Volumen (z. B. Trocknungskammer der Zone 20) im Rahmen dieser Modellvorstellung weiterhin in Kritikalitätsstufen, respektive Zonen zu unterteilen und zu beschreiben und somit eine klassierte Kritikalität über die Atmosphäre/Gemische zu definieren.

Entgegen der Bedienung von Stufen z. B. im Sinne der PSA-Kategorien I - III und ihres geltenden Schutzniveaus, erfolgt die Beschreibung der Kritikalität in Anlehnung an die bewährte Zoneneinteilung des Explosionsschutzes. Es wird jedoch weder ein Schutzniveau von Maßnahmen noch eine Wahrscheinlichkeit über das Vorhandensein einer explosionsfähigen Atmosphäre charakterisiert. Vielmehr beschreiben die folgenden Zonen im Rahmen des Kritikalitätsmodells die Näherungen zum Explosionsbereich:

Zone 200	ideales stöchiometrisches Verhältnis innerhalb des Explosionsbereichs
Zone 210	unter-/über-stöchiometrisches Verhältnis nahe der Explosionsgrenzen
Zone 220	außerhalb des Explosionsbereiches

Diese beschriebenen Zusammenhänge sowie die erweiterte Risikoformel [13] können für den Sprühtrockner bzw. das Teilsystem der Trocknungskammer mit Bild 46 abgebildet werden. Die skizzierte Zustandsabbildung zeigt alle relevanten Bereiche (Teilvolumen) - für eine Diskussion über die Koinzidenz von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre und Zündquellen - auf. Diese Darstellung unterstützt die systematische Herangehensweise zur Kritikalitätsbewertung durch visuelle Vereinfachung komplexer Zusammenhänge in Form eines Vorstellungsmodells.

Eine inhomogene Staubverteilung - innerhalb des Apparatevolumens der Trocknungskammer dargestellt durch in Größe und Form variierende „Kreise“ (siehe Hinweis Bild 46) für ein inhomogenes Gemisch ( $P_{\text{mix}}$ ) - beschreibt einen Faktor der Risikoformel zur Charakterisierung der instantanen Zustände über Ort und Zeit.



**Bild 46: Kritikalitätsmodell basierend auf den Messergebnissen zur Staubkonzentration**

Durch die simultanen Messungen von Staubkonzentration und Partikelgeschwindigkeit (siehe Kapitel 4.2.3) ist für den mittleren Turmzylinder bekannt, dass sich Konzentrationen bis zu  $1400 \text{ g/m}^3$  einstellen sowie Geschwindigkeiten bis zu  $90 \text{ m/s}$ . Es kann daher die Annahme getroffen werden, dass die Konzentration zumindest im überstöchiometrischen Verhältnis liegt. Durch die Turbulenz, die in diesem Punkt herrscht, steigt die Mindestzündenergie zudem an. Als Zündquelle in diesem Bereich ist mit herabfallenden Glimmnestern oder Fremdkörpern in Form heißer Oberflächen zu rechnen.

Die Wahrscheinlichkeit eines Explosionsrisikos ergibt sich nach diesem Modell aus den Faktoren eines zu fetten Gemisches, welches starken Turbulenzen ausgesetzt ist, und zwei der dreizehn möglichen Zündquellen. Die Wirksamkeit ist zu bewerten. Wird ausgehend von dieser reduzierten wahrscheinlichen Koinzidenz ein potentielles Schadensausmaß abgeleitet, ist eher mit einem Abbrand denn mit einer Explosion zu rechnen.

Diese exemplarische Anwendung des Modells wird in den Folgekapiteln 6.2 und 6.3 durch experimentelle Untersuchungen weitergehend untersucht. Im Detail sind in diesem Modell auch die Schwankungen der Beladungen, An- und Abfahrvorgänge oder potentielle Flammerscheinungen des Gemisches zur Zündung benachbarter idealer Gemischzusammensetzungen etc. zu berücksichtigen.

### 6.1.2 Varianz im Teilsystem bei anzunehmenden Störungen (Gase)

Eine Übertragung des klassierten Kritikalitätsmodells kann auch auf gasführende Anlagen erfolgen. Während bei staubführenden Anlagen die Akzeptanz zur Betrachtung von Teilvolumen erst nach ausgiebigen Einzelbetrachtungen besteht, so wird für Ofen und Trockner gemäß DIN EN 1539 ausdrücklich verwiesen: „Ist ein Trockner in mehrere Trocknungssektionen (Lüftungsabschnitte) unterteilt, sind die Explosionsschutzanforderungen sowohl für jede Sektion separat als auch für deren gegenseitige Beeinflussung zu erfüllen.“ Durch die mit der Norm gegebene Möglichkeit der Bewertung von Teilvolumen wird die Anwendung des klassierten Kritikalitätsmodells unterstützt. Eine zusätzliche Unterteilung innerhalb einer jeden Brennkammer erscheint im Anwendungsfall der Gase jedoch nicht zielführend.

Ausgehend von der Berechnung der mittleren Gaskonzentration ergibt sich für die Deckel des Brennofens (es wird mit Gleichung [8] keine Unterscheidung zwischen Vorwärmzone, Feuerzone und Abkühlzone gemacht) ein Verhältnis von Brenngas zu Luft, welches  $< 20\% / \text{UEG}$  liegt. Mit diesem allgemeingültigen Ansatz liegt nicht nur kein gefährliches explosionsfähiges Gemisch vor, sondern auch die Bedingungen nach DIN EN 1539 für ein vereinfachtes Maßnahmenkonzept nach Betriebsbereich 1 (siehe Bild 38) gelten als erfüllt. Dieser Ansatz kann auf das Modell gemäß Bild 47 übertragen werden.

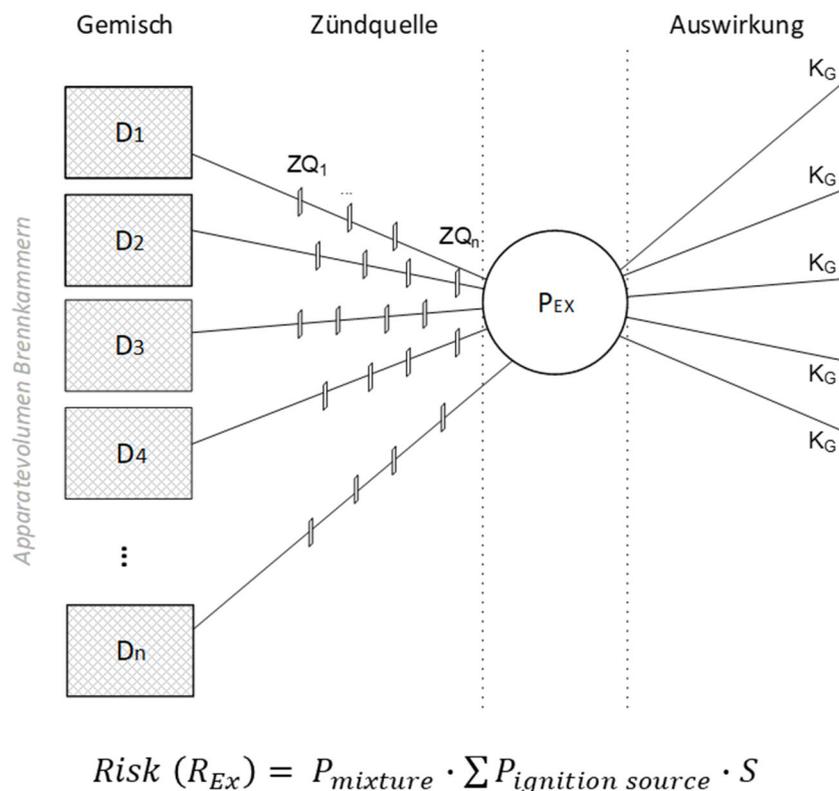


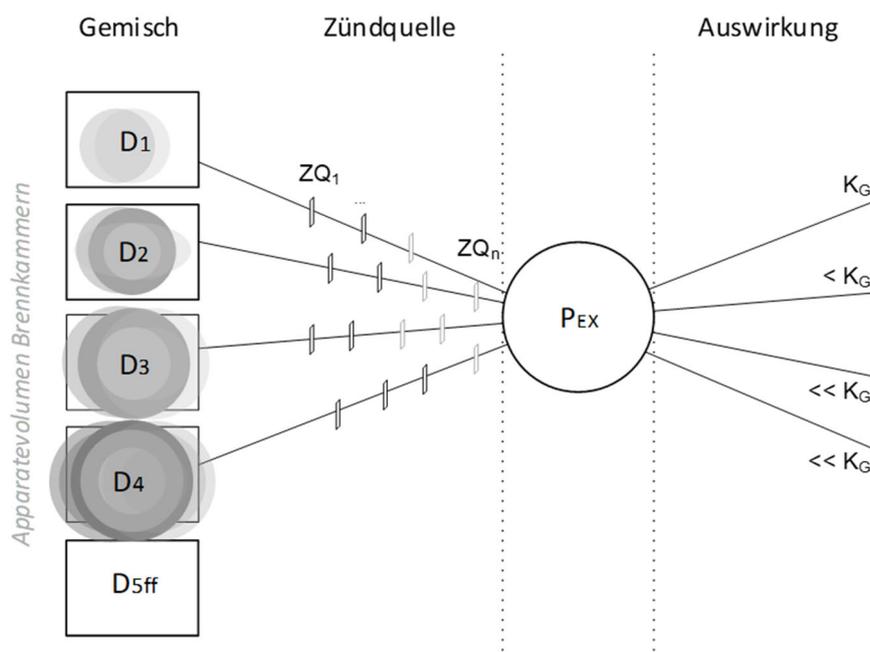
Bild 47: Kritikalitätsmodell basierend auf dem Ansatz der mittleren Gaskonzentration

Das Abfrageschema nach *Duktus* kann mit diesem Kenntnisstand mit der Dokumentation in der Gefährdungsbeurteilung ohne Zündquellenbewertung abgeschlossen werden. Die Maßnahmen der Norm sind zu berücksichtigen.

Mit dem erweiterten Input der Messkampagne in Kapitel 5.2.3 ist bekannt, dass sich ein potentiell explosionsfähiges Gemisch in Deckel 2 während der Messkampagne nicht einstellte, jedoch den eingeräumten Sicherheitsabstand überschritt, weshalb eine weiterführende Betrachtung im Rahmen der Modellvorstellung stattfindet. Im Gegensatz zur staubführenden Anlage im Anwendungsfall der Sprühtrocknung ist für den Brennofen nicht nur die lokale Verortung im Modell charakteristisch, sondern es kann zudem eine genaue temporäre Ableitung des Gemischzustandes erfolgen. Demnach kann unter Anwendung der Risikoformel die folgenden Merkmale für die Wahrscheinlichkeit des Vorliegens eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches beschrieben werden:

$$Risk (P_{mix(t,x,y,z)}) = P_{mix \left( \frac{35}{525.600} \min; \frac{40}{100} \% \right)}$$

Die Zeit des kritischen Gemischzustandes kann mit den Messungen auf 10 sec festgelegt werden. Nach 210 Feuerwechseln jährlich und einer Betriebslaufzeit von 8760 h im Jahr ergibt sich eine temporäre Wahrscheinlichkeit für  $P_{mix(t)}$ . Bei einem angenommenen Gesamtvolumen von allen 10 Deckeln (= 100 %) eines Zuges ergibt sich eine lokale Wahrscheinlichkeit von 40 % des Gesamtvolumens für Deckel 1-4 im Sinne  $P_{mix(x,y,z)}$ .



$$Risk (R_{Ex(t; x, y, z)}) = P_{mixture(t; x, y, z)} \cdot \sum P_{ignition\ source(t; x, y, z)} \cdot S(t; x, y, z)$$

Bild 48: Kritikalitätsmodell basierend auf den Messergebnissen zur Gaskonzentration

Dieser Ansatz gibt somit eine genaue Auskunft über die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches ( $P_{\text{mix}}$ ) und damit eines der Faktoren zur Kalkulierung des Risikos einer Explosion nach Gleichung [13] wieder. Nach vereinfachter visueller Übertragung der komplexen Zusammenhänge kann die Zustandsabbildung wie in Bild 48 modelliert erfolgen. Eine inhärente Maßnahmenfindung bzw. die folgende Zündquellenbewertung ist demnach nur für den Brennkammern der Vorwärmzone (Deckel 1-3) und aufgrund der Temperaturverläufe für die Brennkammer Deckel 4 des Gesamtsystems Brennofens anzuwenden.

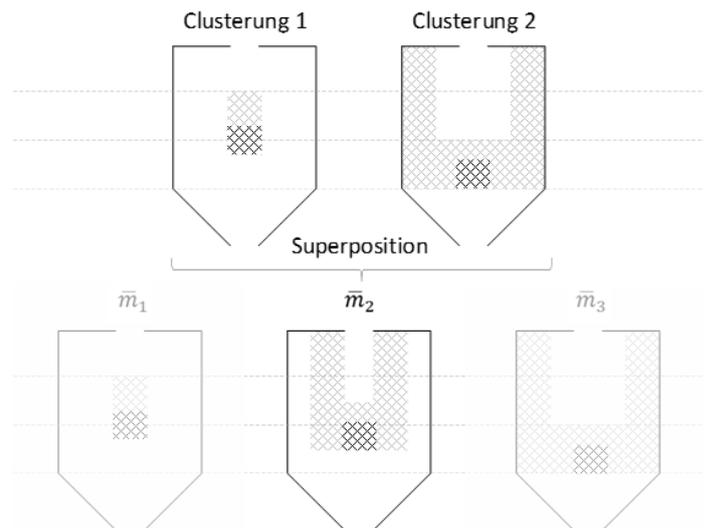
Mit 75 %/UEG und einem reduzierten Sauerstoffanteil von  $< 5\%$  ist von einem unterstöchiometrischen Verhältnis auszugehen, welches Einfluss auf die Auswirkungen einer Explosion nimmt. Der maximale Druckanstieg  $p_{\text{max}}$  und der maximale zeitliche Druckanstieg  $(dp/dt)_{\text{max}}$  stellen sich im Bereich einer stöchiometrischen Gemischzusammensetzung (Zone 200, siehe Kapitel 6.1) ein und vermindern sich zu der unteren und oberen Explosionsgrenze hin, vgl. (Bartknecht 1993).

Da im Brennofen gerade die Erreichung der UEG angenommen werden kann (Zone 210), sind die Auswirkungen entsprechend in ihrer Heftigkeit als reduziert zu bewerten. Aus Augenzeugenberichten ist bekannt, dass das Öffnen der Schaulöcher (siehe Notfallprozedur, Kapitel 3.2.3) im Falle eines Stromausfalles dazu führen kann, dass mit der Koinzidenz von Sauerstoff eine Entzündung der freigesetzten brennbaren Gase stattfinden kann. Gleichwohl ist überliefert, dass der Brennkammerdeckel sich bei einer beginnenden Explosion wie eine Druckentlastungsöffnung verhält, da jener lediglich lose aufliegt.

### 6.1.3 Superposition

Durch das Infragestellen des Vorhandenseins eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches oder eines nicht-gefährlichen explosionsfähigen Gemisches innerhalb eines geschlossenen Apparates wird ein makroskopisches Beispiel für das Superpositionsprinzip kreiert, welches durch den Zustand der einzelnen Partikeln bzw. Moleküle sogar einen mikroskopischen Übertrag (wenn auch nicht im Sinne des ursprünglichen Anwendungsfeldes der Quantenphysik) erfahren kann. Ein gefährliches explosionsfähiges Gemisch kann sich in Abhängigkeit der prozessualbetrieblichen und apparativ-technischen Bedingungen innerhalb eines Zeitfaktors in Teilvolumen der Anlage ausbilden, es ist jedoch nicht bekannt, in welchem Maß und Umfang, d. h. wie groß die Teilvolumen sind, wie sie sich verschieben und ob ein unter- oder überstöchiometrisches oder stöchiometrisches Verhältnis vorliegt. Diese Ungewissheit besteht so lange, bis diese Zustände beobachtet werden und ändert sich, sobald observable messbare Größen den

Gemischzustand charakterisieren. Die Wirklichkeit kann exakt beschreibbar gemacht werden, denn „Messgeräte verwandeln Ungewisses in Gewissheit und Verschwommenes in exakte Daten“, nach (Röthlein 2007). Gemäß dem Superpositionsprinzip stellen die Ergebnisse der Messkampagnen jeweils einen Zustand dar, der eingenommen werden kann. Je nach Voraussetzung ist dieser jedoch nicht stationär, sondern zeit- und ortsabhängig. Dieser Umstand ist mit Gleichung [13] durch die modifizierte Risikoformel  $Risk (R_{Ex}(t; x, y, z))$  definiert.



**Bild 49: Superposition, exemplarisch Trocknungskammer**

Messungen an der Trocknungskammer des Sprühtrockners zum Beispiel haben in der Vergangenheit konträre Ergebnisse geliefert, die verschiedene Clusterungen des Apparatevolumens der Trocknungskammer in Teilvolumen gefährlicher explosionsfähiger Gemische und Cluster unterstöchiometrischer Verhältnisse (Teilvolumen nicht-gefährlicher explosionsfähiger Gemische) erlauben. Demnach ist ein explosionsfähiges Gemisch in einem Mischverhältnis dieser beiden Clusterungen (Zustände der Teilvolumen), stark vereinfacht gegenübergestellt in Bild 49, ebenfalls möglich. Obwohl über frühere Messungen nicht ausreichend Informationen vorliegen und obwohl die Ergebnisse der mit dieser Arbeit beschriebenen Studie aufgrund ihrer sehr geringen Staubkonzentrationen im konischen Turmbereich zum Teil unplausibel erscheinen, so können dennoch die im Folgenden aufgeführten Hypothesen abgeleitet werden.

- Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal beider Messreihen lässt sich im Massenstrom erklären, da die resultierende mittlere Staubkonzentration von  $30 \text{ g/m}^3$  (2016), ohne Einfluss von Rückführung und Zumischung vergleichsweise sehr niedrig ausfällt. Typische gemittelte Werte befinden sich eher im Konzentrationsbereich von ca.  $80 \text{ g/m}^3$ . Die Geschwindigkeiten ( $v = 200 \text{ m/s}$ ), respektive Druck der Eindüsung beider

Messungen blieb dabei jedoch gleich. Eine Erklärung für die unterschiedlichen Kritikalitätsverteilungen wäre demnach, dass durch den geringeren Massenstrom der Punkt der Rezirkulierung höher liegt als bei vergleichweisen Messungen höherer Massenströme. Dieser sorgt für einen erheblichen Konzentrationsanstieg. Die anfängliche Vermutung, dass die Erhöhung der gemessenen Staubkonzentration auf das Zusammentreffen von Zumischung und Messsonde zurückzuführen ist, kann durch Bild 24 ausgeschlossen werden. Dass ein derartiger Anstieg in den früheren Messungen nicht verzeichnet wurde, kann darauf zurückzuführen sein, dass sich die Messpositionen über der Rezirkulierungszone befanden, da jener bei höherem Massenstrom tiefer gelegen ist.

- Gleichwohl ist in dem Zusammenhang geringerer Massenströme auch die Turbulenz im Turm insgesamt geringer, was dafür sorgt, dass die Rezirkulierung nicht zur Erhöhung der Konzentration im Wandungsbereich führt, sondern ebenfalls im zentralen Drittel verbleibt. Anders als bei der Staubkonzentrationsverteilung höherer Massenströme, wo der Effekt des rezirkulierenden Mediums, aufgrund der Positionierung der Abluft, bis zur Wandung reicht und auch im Turmdeckenbereich eine größere Turbulenz aufweist. Diese Vermutung ließ sich durch eine Sichtkontrolle während der Messungen bestätigen.

Beide Ergebnisse und die daraus resultierenden Hypothesen sind für sich schlüssig und möglich. Aufgrund fehlender Wiederholungsmessungen bleibt jedoch ein Zweifel anhaften, der nur durch die Fortsetzung von Messungen bzw. die erfolgreiche Erweiterung von numerischen Simulationen ausgeräumt werden kann.

Im Falle der Brennkammer spielt die Zeitabhängigkeit gemäß klassischen Superpositionsprinzip eine zentrale Rolle. Die Temperatur in der Brennkammer entscheidet darüber, ob freigesetzte brennbare Gase direkt verbrennen oder sich bis zum kompletten Unterdruckverlust und dem damit verbundenen Temperaturabfall anreichern. Zur selben Zeit ist der vorhandene O<sub>2</sub>-Wert für eine stöchiometrische oder unvollständige Verbrennung entscheidend. Die Größen superponieren miteinander. Sind sie zu einem Zeitpunkt messbar, beschreiben sie den tatsächlichen (den „wahren“) Gemischzustand für diesen Augenblick, welche in den angrenzenden Teilvolumen zur gleichen Zeit verschiedenartig verlaufen bzw. aufgrund ihrer Wechselwirkung miteinander zeitversetzt auftreten können.

## 6.2 Kausal-orientierte Bedeutung

Aus der Zündquellenbewertung, insbesondere in Kapitel 4.3, wurde bereits erkennbar, welche Zündquellen für das Anlagenbeispiel zu berücksichtigen sind. Sie treten in Koinkidenz mit den beschriebenen Gemischzuständen. Für das phänomenologische Verständnis und die Nutzbarmachung der Erkenntnisse für die gezielte Ableitung von Maßnahmen zur Erhöhung dessen Zuverlässigkeit, wurden im Rahmen der Promotionsprojekte im Labor des Fachgebiets Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung der Bergischen Universität Wuppertal Untersuchungen angestellt, die die beschriebenen Varianzen und die korrelierenden Bedingungen von Stoffen und Umgebungsbedingungen innerhalb der charakterisierten Teilvolumen experimentell abbilden. Sie werden in den Kontext der Zündwilligkeit gesetzt. Die Untersuchungen beschränken sich auf den Umgang mit Stäuben.

### 6.2.1 Experimentelle Bewertung korrelierender Bedingungen

Im Zuge der beschriebenen Untersuchungen in Kapitel 4 konnte die inhomogene Verteilung und Zusammensetzung des staubförmigen Produktes charakterisiert werden. Zumischung und Rückführung beeinflussen nicht nur die Konzentrationsverteilung, sondern auch die Merkmale des Staubes, z. B. bezüglich Temperatur und Partikelgröße. Im Bereich der Zumischung kann z. B. Maltodextrin oder Laktose, je nach Rezept, einen wesentlichen Produktbestandteil einnehmen, während im Bereich der Rückführung von einer feineren Partikelgrößenverteilung auszugehen ist. Eine Probenentnahme zur exakten Partikelgrößenanalyse ist aufgrund bestehender apparativer Gegebenheiten nicht uneingeschränkt möglich. Beide Merkmale beeinflussen das Explosionsrisiko. Des Weiteren ist die Produktfeuchtigkeit über den Anlagenquerschnitt stark variierend, ist die Trocknung der Partikeln hin zum Erreichen des Turmausgangs doch das Ziel der konvektiven Trocknung. Die Partikeln bewegen sich hierzu so lange in der Strömungsführung der Anlage, bis der erwünschte Trocknungsgrad erreicht ist und sie zu Boden sedimentieren und ausgetragen werden. Während standardisierte Versuche zur Ermittlung der sicherheitstechnischen Kenngröße der untere Explosionsgrenze (UEG) Zündenergien in Form von chemischen Zündern von 2 kJ heranziehen, so ist bei der Übertragung mit derart hohen Zündpotentialen in einem Sprühtrocknungsprozess selten zu rechnen. Exemplarisch sei hier die Gleitstielbüschelentladung zu nennen, die lediglich Zündenergien von bis zu 10 J aufweisen kann. Diese tritt z. B. in den flexiblen Leitungen von Rückführung und Zumischung auf. Neben den Konzentrationen, Partikelgrößen und -zusammensetzungen, variieren auch die Temperaturen der Rückführung von Fließbett ( $\sim 50^{\circ}\text{C}$ ) und Trocknungskammer ( $\sim 90^{\circ}\text{C}$ ).

Zwar ist aus Studien zur Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen der Trend auf die Zündwilligkeit von größer oder kleiner werdenden Partikelgrößen, Konzentrationen, Turbulenzen oder Feuchtigkeit bekannt, nicht jedoch, wenn es sich um ein Kollektiv mehrerer Faktoren handelt oder welchem Merkmal eine stärkere Prävalenz zuzuordnen ist. Um den Einfluss dieser korrelierenden Bedingungen und dessen Dynamik zu untersuchen und bezugnehmend auf das Modell in Kapitel 6.1 die variierenden Zündwilligkeiten der Gemischzustände zu untersuchen, wurde eine faktorielle Versuchsplanung angestellt, in der eine Anzahl möglicher Einflussparameter miteinander kombiniert wurden, siehe Auszug Tabelle 9.

Im ersten Versuchsaufbau wurden hierfür die folgenden Laborapparaturen genutzt:

- Trocknungsschrank (Fa. Heraeus)
- Thermogravimetrischer Feuchtebestimmer (Sartorius, Type MA150)
- Infrarot Thermometer (Vollcraft)
- MIKE3-Apparatur

Die verschiedenen Korngrößen  $< 125 \mu\text{m}$ ,  $< 250 \mu\text{m}$ ,  $> 250 \mu\text{m}$  und ungesiebttes Produkt wurden jeweils ungetrocknet (Raumtemperatur) oder 40 min. bei  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  getrocknet und in die MIKE3-Apparatur gegeben. Zusätzlich wurden die Konzentrationen variiert. Es wurden die Konzentrationen  $750 \text{ g/m}^3$ ,  $1000 \text{ g/m}^3$ ,  $1250 \text{ g/m}^3$  und  $1500 \text{ g/m}^3$  untersucht. Vor dem Einfüllen der Probe in die MIKE3-Apparatur wurde die Oberflächentemperatur des Pulvers mittels Infrarot-Thermometer gemessen, um den Abkühlvorgang zu dokumentieren. Es wurde ein Versuchsablauf mit  $1000 \text{ mJ}$  und Induktion und ein Versuchsdurchlauf mit  $300 \text{ mJ}$  und Induktion durchgeführt, wobei in diesem zweiten Versuchsdurchlauf nur die Proben getestet wurden, die im Vorfeld bei der größeren Energie zur Zündung kamen.

Es kann für die Versuchsreihe festgehalten werden, dass mit der MIKE3-Apparatur wenig allgemeingültige Trends erkennbar waren, was mit einer zu niedrigen Zündenergie des Versuchsaufbaus zu erklären ist. Die Mindestzündenergie (MZE) der Probe konnte bei  $1000 \text{ mJ}$  bemessen werden, was eine Variation der Zündpotentiale nach unten hin ausschloss. Eine reduzierte MZE aufgrund der korrelierenden Bedingungen konnte demnach nicht beobachtet werden. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden.

- Die häufigsten Zündungen erfolgten bei einer Partikelgröße von  $< 125 \mu\text{m}$ . Die Zündwilligkeit der Konzentration hingegen scheint vernachlässigbar, wenngleich bei höheren Konzentrationen von  $1250 \text{ g/m}^3$  bis  $1500 \text{ g/m}^3$  marginal mehr Entzündungen erfolgten. Im ungesiebtten Zustand liegt eine höhere Zündwilligkeit bei kleineren Konzentrationen unterhalb von  $1000 \text{ g/m}^3$ . Die variierende Trocknungstemperatur von  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  und

90 °C lieferte keinen erkennbaren Einfluss auf die Ergebnisse, respektive den ermittelten Feuchtegehalt. In Summe ist demnach der Partikelgröße in dieser faktoriellen Versuchsreihe die stärkste Prävalenz zuzuschreiben.

Tabelle 9: Faktorielle Versuchsplanung (Auszug für < 125 µm)

Partikelgröße [µm]	Konzentration [g/m³]	Trocknungstemperatur [°C]	Zündenergie [mJ]
< 125	750	ugT	300
			1000
		50	300
			1000
		90	300
			1000
	1000	ugT	300
			1000
		50	300
			1000
		90	300
			1000
	1250	ugT	300
			1000
		50	300
			1000
		90	300
			1000
	1500	ugT	300
			1000
		50	300
			1000
		90	300
			1000
< 250	...	...	...
> 250	...	...	...
ungesiebt	...	...	...

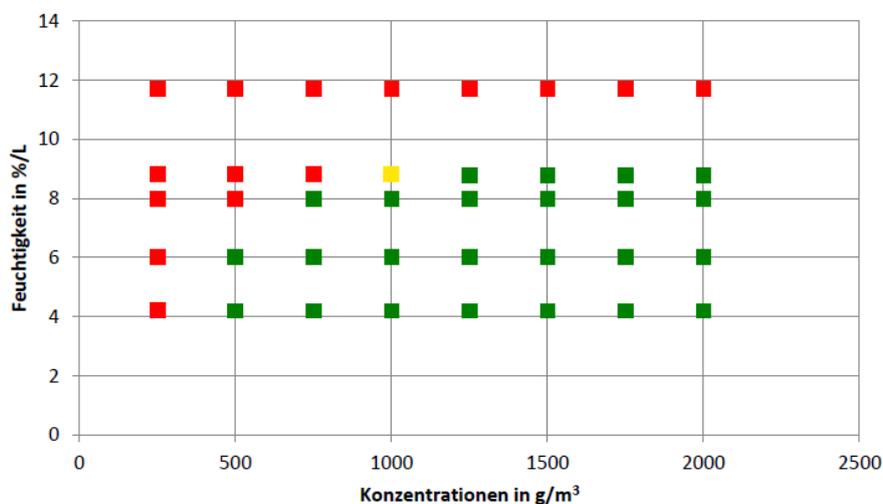
Daher wurde in einer zweiten Versuchsreihe auf die Nutzung des Hartmann-Rohrs mit einer höheren Zündenergie zurückgegriffen, um Konzentration und Partikelgröße sowie Konzentration und Feuchtigkeit als korrelierende Bedingung zu untersuchen. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden

- Konzentration - Partikelgröße

Mit der Verwendung von getrocknetem Milchpulver konnten bei nahezu allen Konstellationen Zündungen beobachtet werden. Mit größer werdender Konzentration stieg zudem die Auswirkung, messbar über die Flammenlänge.

- Konzentration - Probenfeuchtigkeit

Es war ein wesentlicher Einfluss des Feuchtigkeitsanteils erkennbar. Bei Feuchtebeladungen von 12 %/l ist unabhängig von der Konzentration keine Zündung möglich. Für die weiteren Variationen zeigt das Diagramm in Bild 50 die gegenseitige Abhängigkeit, dass mit sinkendem Feuchtegehalt und steigender Konzentration die Zündwilligkeit zunimmt.



**Bild 50: Zündversuche im Hartmannrohr von Verhältnis Konzentration und Feuchtigkeit (rot: keine Zündung; grün: Zündung)**

Nach Übertragung dieser Erkenntnisse auf den Turmquerschnitt und den Vergleich aus erfassten Größen (Konzentration, Temperatur) sowie prozessbedingten und simulativen Gegebenheiten (Feuchtigkeitsanteil) kann beschrieben werden, dass nach der Eindüsung des flüssigen Produktes bei Erreichung einer Produktfeuchte von 9 %/l Konzentrationen von 1000 g/m³ zündfähig sind. Mit geringer werdenden Feuchtegehalt (< 8 %/l) auch Konzentrationen von 500 g/m³. Weiterhin besitzen die Partikel der Feinpulverrückführung aufgrund ihrer geringen Größe eine hohe Zündwilligkeit bei bereits 1000 mJ. Die Temperatur ist dabei jedoch nicht von Relevanz, da der Unterschied der Temperatur der zugemischten Partikeln vernachlässigbar ist. Es ist zu betonen, dass mit diesen Versuchsbedingungen lediglich die Zündung nachgewiesen wurde, nicht die Explosion.

## 6.2.2 Experimentelle Bewertung der Glimmnestzündwirksamkeit

Aus Erfahrungsberichten ist bekannt, dass rot-glühende Glimmnester den Turmquerschnitt einer Trocknungskammer passieren können, z. B. durch Ablösen eines Glimmnestes von den Düsen, jedoch keine nachweisliche Zündung des Staub-Luft Gemisches im Inneren der Trocknungskammer verursachen. Dieses Phänomen konnte bislang nicht wissenschaftlich gestützt beschrieben und validiert werden. Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob dies auf ein nicht-zündwilliges Gemisch oder die Zündwirksamkeit eines Glimmnestes selbst zurückzuführen ist oder auf weitere Einflüsse, wie z. B. die herrschenden Turbulenzen im Querschnitt. Da eine Zone 20, zumindest im zylindrischen Teilvolumen der Trocknungskammer nicht ausgeschlossen werden kann (siehe Kapitel 4.2.4), sind weiterführende Untersuchungen bezüglich der Zündwirksamkeit anzustreben.

Im Rahmen einer Bachelorthesis wurde für labormaßstäbliche Untersuchungen das Hartmann-Rohr herangezogen. Dazu wurde anstatt des üblichen Zündfunkens ein Glimmnest als Zündquelle verwendet. Das Glimmnest wurde dazu auf Höhe der eigentlichen Elektroden des Zündfunkens im Hartmann-Rohr platziert und mittels Heißluftföhn angeströmt, um den Effekt des angeströmten Aufglühens künstlich hervorzurufen. In diesen Versuchen von (Berghaus 2016) wurde ein partikelbeladener Strom verwendet mit einem bekanntlich zündfähigen Gemisch. Jedoch konnte in keinem der Versuche eine Zündung des Staub-Luft-Gemisches verzeichnet werden.

Untersuchungen von künstlich hergestellten Glimmnestern im Rahmen einer weiteren Abschlussarbeit durch (Drost 2017) haben ergeben, dass Glimmnester aus Milchpulver extrem robust sind. Bei großskaligen Strömungsversuchen in einer partikel-unbeladenen Rohrleitung mit einer Luftgeschwindigkeit von 16 m/s zerfallen sie nicht und können mehrere Male durch die Rohrleitung befördert werden. Demnach kann auch ein Entflammen der Glimmnester als unwahrscheinlich angesehen werden, weshalb sie in einem Luftstrom eher als zündunwirksam angesehen werden können. Während des Transports durch die Rohrleitung kann jedoch ein rotes Glühen des Glimmnestes beobachtet werden. Den Temperatur-Zeit-Verläufen dieser Versuche kann entnommen werden, dass die Glimmnester vor der Eingabe in die Rohrleitung eine Temperatur von ca. 400 °C bis 440 °C haben und nach der Entnahme eine Temperatur von ca. 600 °C bis 750 °C. Somit weisen die Glimmnester eine weitaus höhere Temperatur auf, nachdem sie durch die Rohrleitung transportiert wurden.

Weitere umfangreiche Untersuchungen mit künstlich erzeugten Glimmnestern wurden z. B. durch (Zockoll 1988) oder (Lorenz 2005) angestellt. Trotz einer großen Anzahl an Versuchsreihen wie dieser gilt die Zündwirksamkeit von Glimmnestern nicht als ausgeschlossen oder

hinlänglich beherrschbar, weshalb eine sichere Zündquellenvermeidung heuer nur mit zuverlässigen technischen Maßnahmen erfolgen kann.

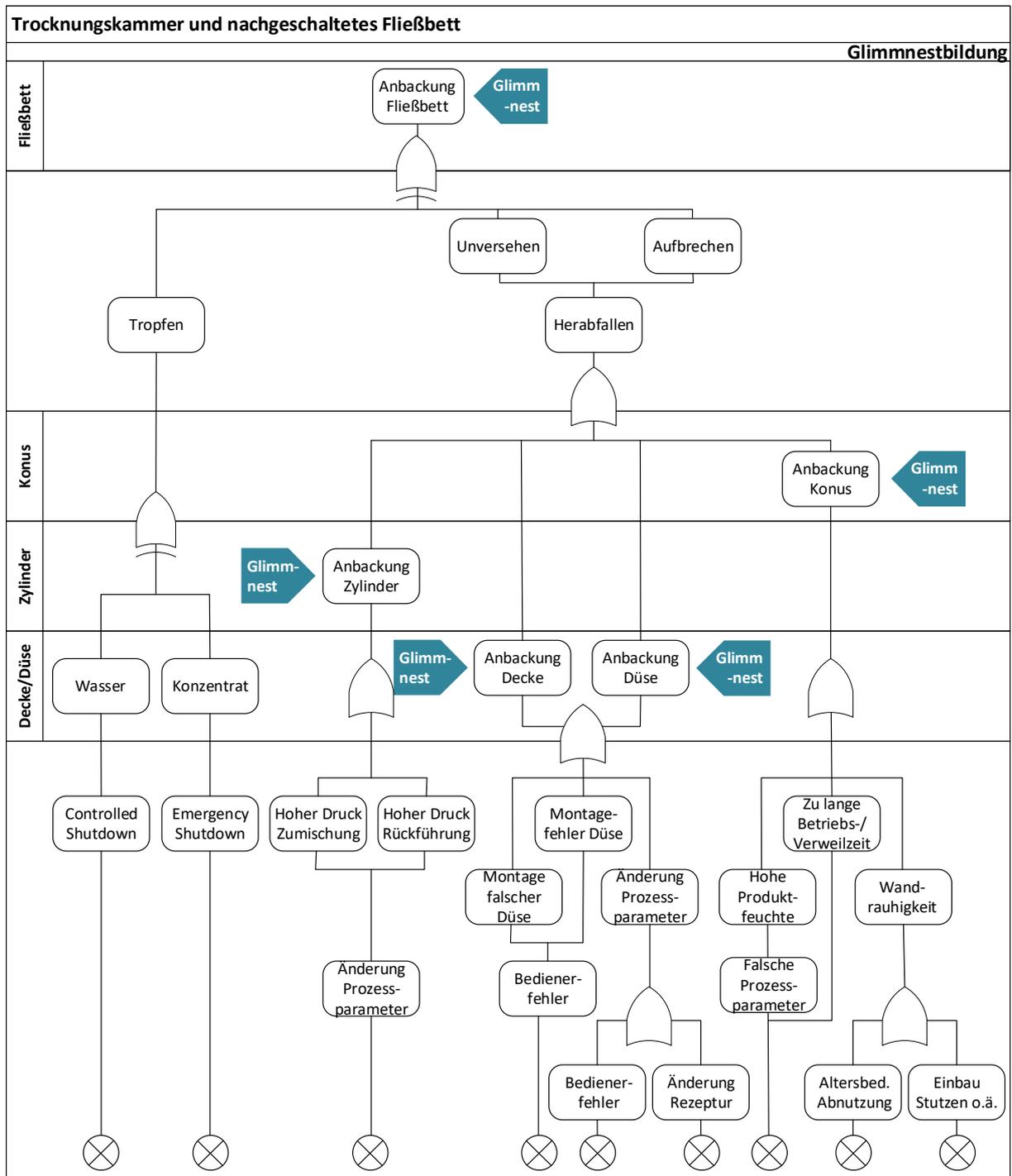


Bild 51: Lokalisierung möglicher Glimmnestbildungen über den Turmquerschnitt eines Sprühtrockners

Zur Nutzbarmachung dieser Untersuchungen in Verbindung mit dem Kritikalitätsmodells ist es erforderlich, alle möglichen Glimmnestbildungen zu lokalisieren und unter geltende Umgebungsbedingungen zu stellen und mit den Ergebnissen der untersuchten Zündwirksamkeiten abzugleichen. Zu diesem Zwecke kann eine Visualisierung mittels Fehlerbaum (Bild 51) genutzt werden und die anschließende Bewertung nicht nur über die Zündwirksamkeiten, sondern auch über die Festlegung und Erfüllung erforderlicher Reduzierungsstufen nach TRGS 725 systematisieren. Die Festlegung von Maßnahmen mit dem Vorgehen der Technischen Regel mittels des aufgezeigten mikroskopischen Ansatzes bietet eine konkretisierte Anwendungsmöglichkeit. Es ist zu erwarten, dass dieses Vorgehen einen positiven Effekt auf die Zuverlässigkeit der Maßnahme, z. B. auf die CO-Detektion zur Früherkennung von Glimmnestern, nimmt. Auf eine exemplarische Anwendung des standardisierten Vorgehens gemäß TRGS 725 wird verzichtet.

### **6.3 Final-orientierte Bedeutung**

Die Bewertung von potentiellen Auswirkungen ist ein gängiges Werkzeug für die Auslegung von konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen, findet jedoch in der Bewertung durch den Betreiber und in dem Vorgehen nach *Duktus* kaum Berücksichtigung, bzw. es wird in der Bewertung nicht in der Auswirkungsheftigkeit unterschieden. Wird durch die Zündquellenvermeidung kein sicherer Anlagenzustand erreicht, sind final-orientierte Maßnahmen zu ergreifen. Der Betreiber kann dem Hersteller derartiger Schutzeinrichtungen durch detailliertes Vorgehen bereits wichtige Hinweise und Erkenntnisse liefern, die bei der Auslegung der Maßnahmen unterstützen, um Über- oder Unterdimensionierungen zu verhindern. Tut er dies nicht, so wird seitens Hersteller der Stand der Technik angewendet.

#### **6.3.1 Rechnerische Bewertung**

Wie im Kritikalitätsmodell aufgezeigt, ist mit dem Ansatz der detaillierten Bewertung und Kenntnis der Gemischzustände eine differenzierte Betrachtung von Auswirkungen in Abhängigkeit der lokalen und temporären Zündinitiierung anzustreben. Auch für die folgenden Ausführungen zur rechnerischen Bewertung wird auf die exemplarische Anlagenbeschreibung in Kapitel 3.1.1 verwiesen. Mit der Nutzung des normativen Ansatzes zur Druckentlastungsrechnung wird auf Vorarbeiten durch (Maiwald 2018a) zurückgegriffen.

In der Auswirkungsbetrachtung spielt neben den sicherheitstechnischen Kenngrößen des exemplarischen Produktes (Milchpulvers) auch das Design der Anlage (Trocknungskammer) eine entscheidende Rolle. Dieses ist durch z. B. vorhandene Öffnung und Schwachstellen für

den Verlauf einer Explosion entscheidend und kann unter Umständen als Druckentlastungsöffnung fungieren. Entgegen dem gezielten Einsatz einer Entlastungsöffnung, ist durch die bauartbedingte Öffnung in der Decke der Trocknungskammer Typ C nach (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7) eine Druckentlastung in den Raum gegeben. Dies hat wiederum Auswirkungen auf das Gebäude und vor allem auf die im Raum befindlichen Personen.

Da die Größe der rechnerisch erforderlichen Entlastungsfläche Rückschlüsse auf den zu erwartenden Druckanstieg in einem Behälter zulässt sowie aufgrund der designbedingten Entlastungsöffnung, wird das Berechnungsverfahren nach (DIN EN 13463-1) angewendet.

Im Falle einer Entlastung sind die auftretenden Drücke grundsätzlich zu unterscheiden in  $p_{max}$ ,  $p_{es}$ ,  $p_{red}$  und  $p_{stat}$ . Diese Größen sind entscheidend für die nachfolgend betrachteten Szenarien. Die Druckverläufe über die Zeit sind dabei wie folgt zu lesen:

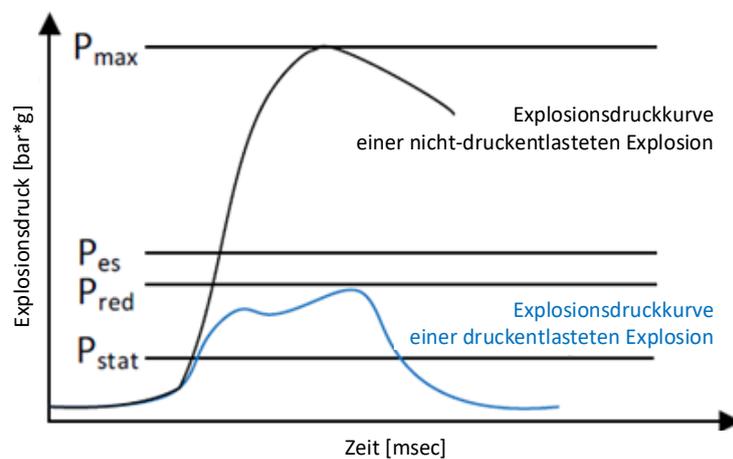


Bild 52: Charakteristische Explosionsdruckverläufe gem. DIN EN 14491

- $p_{max}$**  Der maximale Explosionsdruck, der sich bei einer Explosion innerhalb eines geschlossenen Volumens und optimalen Gemischverhältnis einstellt
- $p_{es}$**  Der Auslegungsdruck des Behälters, entsprechend  $p_{red}$
- $p_{red}$**  Der maximale Druck, der sich in einem Behälter bei explosionsdruckentlasteter Explosion einstellt.
- $p_{stat}$**  Druck, der die Öffnung der Druckentlastung verursacht

Die folgenden Gleichungen ermöglichen die Berechnung der erforderlichen Entlastungsfläche A für einen Behälter.

$$A = B \left( 1 + C \cdot \log \frac{L}{D} \right) \quad [14]$$

$$B = [3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{max} \cdot K_{St} \cdot p_{red,max}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{stat} - 0,1) \cdot p_{red,max}^{-0,5}] \cdot V^{0,753} \quad [15]$$

$$C = (-4,305 \cdot \log p_{red,max} + 0,758) \quad [16]$$

Neben der klassischen Berechnung von Entlastungsflächen, werden die Kenngrößen entsprechend dem neu erlangten Wissen über die Gemischzustände angepasst. Durch eine iterative Anpassung der Werte kann hierüber auch eine Abschätzung über weitere Szenarien heraus erfolgen.

Für die Berechnung der Entlastungsfläche ist das L/D-Verhältnis von entscheidender Bedeutung. Zur Berechnung des L/D-Wertes für eine Sprühtrocknungsanlage ist das effektive Volumen gemäß (DIN EN 14491) zu bestimmen. Dabei wird sowohl  $V_{eff}$  als auch  $H_{eff}$  mit dem Faktor 1/3 multipliziert. Dieser Faktor wurde experimentell ermittelt, da sich die Flamme im konischen Bereich nicht ideal ausbreitet. Insgesamt kann festgehalten werden, dass mit zunehmenden L/D-Verhältnis die erforderliche Entlastungsfläche zunimmt, da die Reaktion einen entsprechend längeren Weg zur Druckentlastung zurücklegen muss und folglich in ihrer Heftigkeit über diesen Weg hin zunimmt. Auch die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung nimmt zu. Mit einer Reduzierung des L/D-Verhältnisses findet folglich eine Näherung der Positionierung zur Druckentlastung hin statt.

Druck- und Explosionswirkungen außerhalb einer Entlastungsöffnung entstehen durch Drücke, die zum einen aus der druckentlasteten Explosion im Inneren des druckentlasteten Behälters und zum anderen aus der Explosion der Staubwolke im Bereich außerhalb der Entlastungsöffnung hervorgehen. Der Überdruck aufgrund der druckentlasteten Explosion hat eine starke gerichtete Wirkung. Der Überdruck aufgrund der Explosion der Staubwolke im Bereich außerhalb der Entlastungsöffnung hat keine gerichtete Wirkung, vgl. (DIN EN 14491).

Der Überdruck aufgrund der Explosion der Staubwolke im Bereich außerhalb der Entlastungsöffnung ist in Abhängigkeit von Entlastungsfläche und Behältervolumen wie folgt zu berechnen:

$$p_{ext} = 0,2 \cdot p_{red} \cdot A_V^{0,1} \cdot V_{eff}^{0,18} \quad [17]$$

Bei größeren Abständen  $r$  ( $r > R_s$ ) von der Entlastungsöffnung vermindert sich der äußere Überdruck  $p_{ext,r}$  entsprechend.

Der maximale Abstand des auftretenden berechneten Überdrucks ist dabei ebenfalls rechnerisch in Abhängigkeit des Behältervolumens zu kalkulieren.

$$L_F = 10 \cdot V^{\frac{1}{3}} \quad [18]$$

$$R_S = 0,25 \cdot L_F \quad [19]$$

Als weiterer Wert für den Überdruck im Außenbereich der Anlage, kann die ungerichtete Kraft aufgrund der druckentlasteten Explosion berechnet werden:

$$p_{ext,r} = 1,24 \cdot p_{red,max} \cdot (D/r)^{1,35} / [1 + (\alpha/56)^2] \quad [20]$$

Für die folgenden Berechnungen werden ausgehend von der zuvor beschriebenen Methodik sowie den Erkenntnissen den Stand der Forschung betreffend verschiedene Faktoren variiert. Diese betreffen zum einen die tatsächlich bestimmten Konzentrationen und die damit verbundenen labortechnisch ermittelten sicherheitstechnischen Kenngrößen  $p_{max}$  und  $K_{St}$  des exemplarischen Milchpulverproduktes (siehe Bild 53) und zum anderen die Variation des L/D-Verhältnisses, welches die Lage des Zündorts innerhalb der Trocknungskammer beschreibt, z. B. in Abhängigkeit vorkommender Glimmnester nach Bild 51.

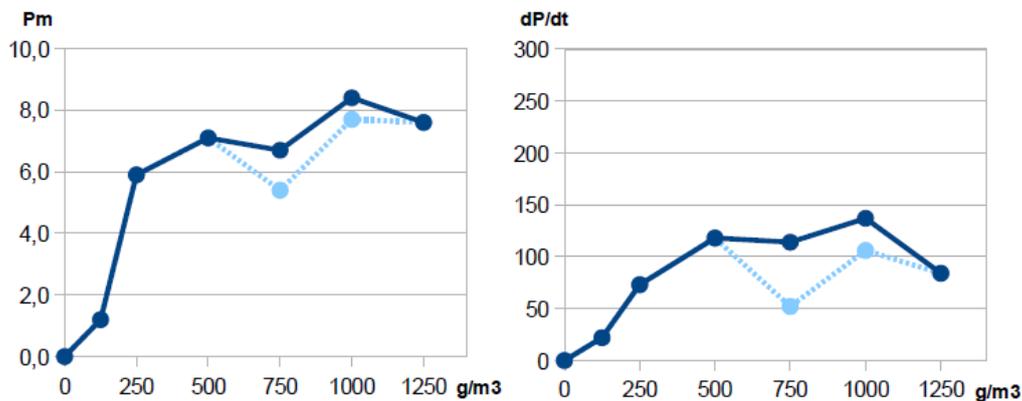


Bild 53: Sicherheitstechnische Kenngrößen  $p_{max}$  und  $(dP/dt)$  des exemplarischen Milchpulvers

Während das rechnerisch ermittelte L/D-Verhältnis von dem am weitesten zurückgelegten Weg der Reaktion ausgeht - d. h. Zündung im Auslass des Konus der Trocknungskammer - so geht ein L/D-verhältnis = 1 von einem Zündort in der Tiefe des Turmdurchmessers von der Decke aus. Dies entspricht bei einem Turmdurchmesser von 3,5 m einer Zündung in einer Tiefe von ebenfalls 3,5 m. Im Rahmen der Grenzen des Berechnungsverfahrens betrifft dies auch Zündungen oberhalb, d. h. bei  $L/D < 1$ .

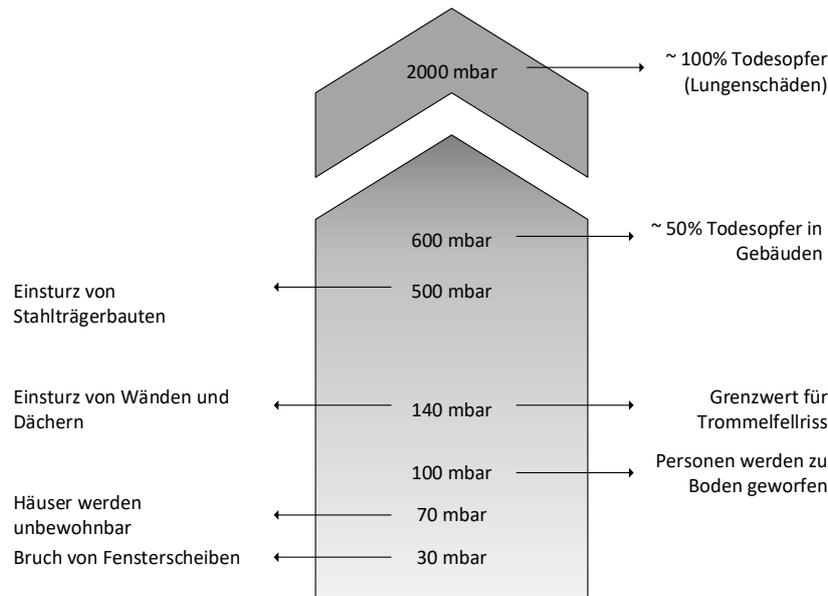
Zudem wird aufgrund der prozessanalytisch ermittelten Teilvolumen der Faktor  $V_{eff}$  um 50 % reduziert und dies sowohl für den Zylinder als auch für den Konus, was ausgehend von den vorgestellten Resultaten in Kapitel 4.2.4 eine konservative Betrachtung wiedergibt. Des Weiteren wird die Öffnung in der Decke und die Decke im Ganzen als angenommene schwächste

Stelle als Entlastungsfläche angesehen. Es wird ein  $p_{\text{stat}} = 0,2$  bar angenommen, was dem Eigengewicht der Decke geschuldet ist und kleiner als die Behälterfestigkeit von 0,3 bar und größer als  $p_{\text{stat}}$  einer klassischen Entlastungsfläche von 0,1 bar ist. Für letztgenannte Szenarien ist eine iterative Berechnung notwendig, da die Gleichungen [17] bis [20] auf Versuchen basieren und nicht zur Ermittlung von  $p_{\text{red}}$  mittels Umstellung gedacht sind.

Vor der Auswertung der berechneten Szenarien ist festzuhalten, dass die verwendete Methode nur bedingt für Auswirkungsbetrachtungen von Explosionsszenarien, insbesondere im Außenbereich der Anlage geeignet ist. Dies liegt nicht zuletzt auch daran, dass die Berechnung des Überdrucks in der Umgebung nur von der Entlastungsfläche  $A$ , dem Behältervolumen  $V$  und der Behälterfestigkeit  $p_{\text{stat}}$  abhängig ist. Die Ergebnisse liefern somit eher einen Trend über die Entwicklungen je nach eingebrachten Szenarien. Bekannt ist demgegenüber jedoch, dass die Größe der Entlastungsfläche auf den zu erwartenden Druck im Behälter schließen lässt und dass mit steigendem  $L/D$ -Verhältnis ebenfalls die Heftigkeit der Explosionsreaktion zunimmt. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die erforderliche Entlastungsfläche mit einer Verschiebung des Zündortes in Richtung Trocknungskammerdecke abnimmt. Dies trifft folglich auch für den Überdruck im Außenbereich ( $p_{\text{ext}}$ ) zu, der sich von 0,15 bar, bzw. 0,13 bar auf ca. 0,1 bar reduziert. Dies ist dem verminderten  $V_{\text{eff}}$  geschuldet. Auch bei der Reduzierung des explosionsfähigen Gemisches auf 50 % des Behältervolumens verringert sich  $p_{\text{ext}}$  auf bis zu 0,11 bar.

Für den Fall der iterativen Berechnung einer angenommen designbedingten Entlastungsflächen kann festgestellt werden, dass eine Explosionsdruckentlastung über die Decke mit einem  $p_{\text{stat}} = 0,2$  bar in einem  $p_{\text{red}} < 0,3$  bar resultiert. Unter den gegebenen Annahmen bedeutet dies, dass die Behälterfestigkeit aufgrund der vorhandenen Entlastungsfläche ausreicht, um die Trocknungskammer nicht gänzlich zu beschädigen. Dabei wird im Außenbereich ein Druck von 0,11 bar bis 0,14 bar erreicht. Anders verhält es sich bei der Öffnung innerhalb der Decke (Annahme  $A = 0,75$  m). Hierbei wird ein  $p_{\text{red}} = 2,1$  bar und ein  $p_{\text{ext}} = 0,83$  bar erzeugt. Der Behälter würde diesem Druck nicht standhalten und bersten oder die schwächste Stelle verformen, bzw. im vorliegenden Betrachtungsfall zur weiteren Entlastung und bei Erreichen des erhöhten  $p_{\text{stat}} = 0,2$  bar die Trocknungskammerdecke anheben. Aufgrund dessen ist dieses Szenario als realistischstes bezogen auf die Anwendungsgrenzen des Berechnungsverfahrens anzusehen, denn die Norm setzt hierzu voraus, dass der schwächste Bereich des Gehäuses als Explosionsfestigkeit angesetzt wird. Diese öffnen sich in einer frühen Phase der Explosion und setzen brennendes und/oder verbranntes Material frei, wodurch der Überdruck in der Anlage reduziert wird.

Mit dem berechneten Überdruck im Außenbereich lassen sich darüber hinaus auch die Druckeinwirkungen auf die im Außenbereich befindlichen Personen sowie auf die Gebäudestatik beurteilen, denn mittels [...] „*Druckentlastung wird eine Explosion weder verhindert noch gelöscht. Es muss mit Flammen- und Druckauswirkungen außerhalb des Gehäuses sowie mit weggeschleuderten Teilen gerechnet werden, und es müssen geeignete Schutzmaßnahmen getroffen werden. Es können auch Brände im Gehäuseinneren ausbrechen*“ [DIN EN 14491]. Bild 54 zeigt die in diesem Kontext geltenden schädigenden Einwirkungen auf Menschen und Gebäude.



**Bild 54: Auswirkungen einer Explosion und dessen Einwirkung auf Mensch und Umgebung, nach (Pepperl+Fuchs)**

Gemäß den aufgeführten Szenarien und Berechnungen sind Drücke von 100 mbar bis 150 mbar zu erwarten. Während eine Druckeinwirkung von 100 mbar den Sturz von Personen herbeiführen kann, so sind bei 140 mbar bereits Zerstörungen am Gebäude zu erwarten und es ist mit erheblichen Gesundheitsschäden für den Menschen zu rechnen.

Bei Drücken von 150 mbar ist demnach nicht zwingend direkt mit einer Todesfolge zu rechnen. Durch die Schäden am Gebäude besteht dennoch eine erhebliche Gefahr für die im Raum befindlichen Personen, da eine Entfluchtung nicht gewährleistet werden kann und mit Trümmerflug zu rechnen ist. Erfahrungen aus der Vergangenheit bestätigen eine größere Gefährdung für Personen durch umherfliegende Teile als durch die Druckeinwirkung selbst.

Auch für die Anwendung auf Gase lässt sich in Analogie die (DIN EN 14994) zur Berechnung der Druckentlastung und seiner Auswirkungen auf die Umgebung heranziehen. Im Gegensatz zu Stäuben wird hierbei nicht zwischen den externen Auswirkungen der druckentlasteten Explosion und der Explosion des aus dem geschlossenen Volumen tretenden Brennmaterials unterschieden.

Entscheidend für die Entlastung sind die Grundparameter der Trägheit der Abdeckung der Entlastungsöffnung und die Geometrie der Umschließung. Daneben nehmen auch die Verbrennungseigenschaften und der Gemischzustand eine zentrale Rolle ein. Die Norm unterscheidet bei der Konzentrationsverteilung und beschreibt den Einfluss der „*teilweise mit explosionsfähigen Gemischen gefüllten Volumen*“. Wurde die Größe der Entlastungsöffnung für einen Füllgrad von 100 % berechnet, kann der reduzierte Überdruck einer teilweise gefüllten Umschließung (Füllgrad < 50 %) reduziert werden. Der benannte Füllgrad ist nicht mit den Merkmalen eines zu mageren oder zu fetten Gemisches bzw. eines idealen stöchiometrischen Verhältnisses zu vergleichen. Lediglich letztgenanntes und der prozentuale Anteil innerhalb des Bemessungsvolumens findet Berücksichtigung bei der Reduzierung des zu erwartenden Explosionsüberdruckes.

Gegenüber den partiellen explosionsfähigen Gemischen bei Stäuben aufgrund der Sedimentationsvorgänge ist die Verteilung von Gasen in Abhängigkeit der Gaseigenschaften zu interpretieren. So unterscheidet auch die Beispielsammlung der DGUV Regel 113-001 bei der Festlegung von Zonen. Handelt es sich z. B. um Gase, die schwerer als Luft sind, findet eine teilweise Ansammlung in Bodennähe statt, je nach Zeit und Menge der Freisetzung. Übertragen auf die freiwerdenden Verbrennungsgase im Brennofen kann von einer Ansammlung unterhalb des Deckels ausgegangen werden. Im Falle eines bestehenden Zuges findet jedoch eine gerichtete Strömung in die benachbarten Anlagenteile statt, was wiederum eine Füllung der Brennkammerschächte mit explosionsfähigen Gemischen bedeuten kann.

Die Brennkammerdeckel des Brennofens mit einem Gewicht von 23 t liegen nur lose auf der Brennkammer mit Maßen von 6 x 6 m auf. Hieraus ergibt sich designbedingt eine „natürliche“ Entlastungsöffnung ( $p_{\text{stat}} = 0,06 \text{ bar}$ ). Eine frühzeitige Druckentlastung ist gegeben, kann jedoch zu umherfliegenden Teilen und somit zur Gefährdung von Personen führen. Erfahrungsgemäß wird der Deckel jedoch nur „angehoben“ und berstet beim Herabfallen. Ausgehend von diesen Erfahrungen ist nicht von einem idealen Gemisch im Ereignisfall auszugehen.

Unter Berücksichtigung der Messergebnisse und der Übertragung auf das Kritikalitätsmodell ist bereits diese Berechnung für die Brennkammer 2 als konservativ zu betrachten. Auf weitere exemplarische Berechnungen soll daher verzichtet werden, zumal die externen Auswirkungsbetrachtungen sich der selbigen Gleichung [20] bedient und ebenso abhängig ist von dem hier berechneten  $p_{\text{stat}}$  und den resultierenden  $p_{\text{red}}$ .

## 6.3.2 Experimentelle Bewertung

Die nachfolgend vorgestellten experimentellen Untersuchungen basieren auf Versuchen im Labormaßstab, die am Lehrstuhl Methoden der Sicherheitstechnik Unfallforschung im Rahmen von Abschlussarbeiten durchgeführt wurden. Sie stellen orientierende Versuche dar, die jedoch als Basis zur Ableitung allgemeingültiger Aussage heranzuziehen sind.

### 6.3.2.1 Auswirkungen nicht explosionsstechn.-entkoppelter Anlagenteile

Das Schutzkonzept eines unkonventionellen Sprühtrockners basiert in den seltensten Fällen auf der reinen Zündquellenvermeidung, sondern vielmehr auf dem Einsatz konstruktiven Explosionsschutzes. Die Anforderungen an ein Schutzkonzept setzen dabei die chemische Industrie und lebensmittelproduzierenden Anlagen gleich, wenngleich stofflich bedingt mit deutlich geringeren Explosionsverläufen zu rechnen ist. Die Wirksamkeit des geltenden Explosionsschutzkonzeptes wird jedoch durch die Beobachtungen deutlich, dass verheerende Ausmaße mit Kompletterstörung und dem Verlust des Lebens bei der Sprühtrocknung mit Konzeptfortentwicklung weit zurückliegen. Dem gegenüber steht jedoch auch, dass aufgrund der immer größer werdenden Volumina der explosionsfähigen Trocknungskammer im Explosionsfall mit einer größeren Energiefreisetzung zu rechnen ist. Auch der Ort der Zündung spielt bei der Bewertung des Maßes der Auswirkungen eine tragende Rolle, wie bereits die Berechnungen in Kapitel 6.3.1 zeigten. Mit der größtmöglichen Auswirkung einer Explosion ist im Sprühtrockner bei einer offenen Flamme aus dem Fließbett stammend als wirksame Zündquelle für die offene, nicht entkoppelte Verbindung zur Trocknungskammer zu rechnen.

Zur Bewertung der Auswirkungen bei erfolgreicher Zündung eines Staub-Luft-Gemisches im Fließbett einer Sprühtrocknungsanlage wurden daher durch (Kulosa 2017) Untersuchungen an einer labormaßstäblichen Versuchsanlage vorgenommen. Diese Versuchsanlage entspricht im Wesentlichen der Anlage zur Untersuchung des Abbrandverhaltens von quasistaionären Zuständen, vgl. (Leksin et al. 2014). Aufgrund der bisherigen Untersuchungen in diesem Fließbett wird die Annahme getroffen, dass eine standardisierte Abbildung des fluidisierten Zustandes für weitergehende Studien gegeben ist. Das Fließbett wurde um eine nicht-entkoppelte Trocknungskammer sowie eine Staubrückführung erweitert, siehe Bild 55.



**Bild 55:** Versuchsmodell einer nicht-entkoppelten Trocknungskammer zur Auswirkungsbetrachtung, vgl. (Kulosa 2017)

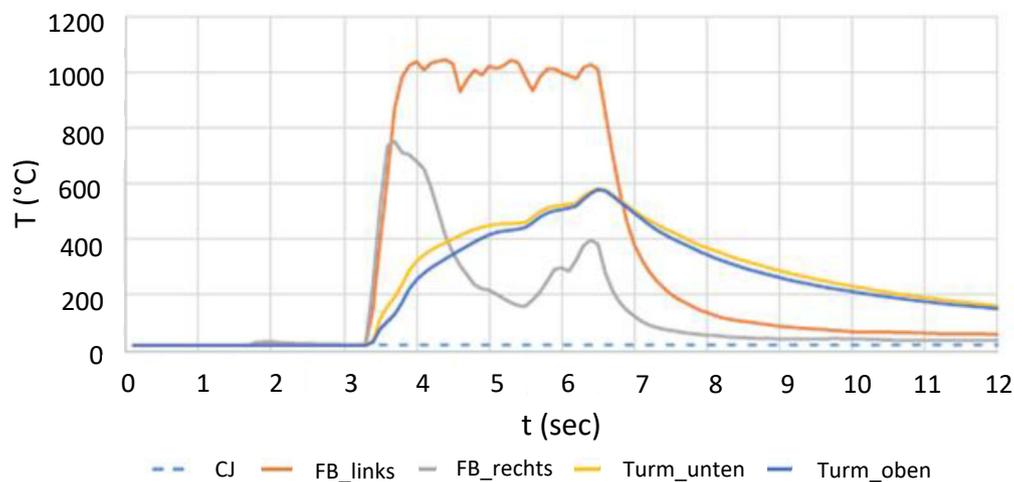
Als primäre Zündquelle kamen ein Glimmnest, die heiße Oberfläche (siehe Tabelle 10) und als Referenz für standardisierte Bedingungen der Platindraht zum Einsatz.

**Tabelle 10** Merkmale experimentell hergestellter Zündquellen

<b>Produkt:</b> Kaffeeweißer			
<b>Herstellung der Zündquellen im Muffelofen</b>			
<b>Zündquelle</b>	<b>Maße</b>	<b>Ofentemperatur</b>	<b>Probentemperatur</b>
Heiße Oberfläche (Metallkugel)	15 mm	775 - 920 °C	450 - 505 °C
Exotherme Reaktion (Glimmnest)	27 mm	575 - 625 °C	325 - 455 °C

Der Einsatz dieser Zündquellen basiert auf der retrospektiven Betrachtung bisheriger Ereignisse. Aus Überlieferungen betriebsinterner Untersuchungen ist bekannt, dass Fremdkörper z. B. in Form von Edelstahlschrauben sowie Glimmnester (und dabei insbesondere aufgebrochene Glimmnester) als wirksame Zündquelle im Turm fungierten. Die Zündwirksamkeit im freien Fall beim Durchqueren explosionsfähiger Staub-Luft-Gemische wurde in Kapitel 6.2.2 experimentell bewertet und stützte auch Untersuchungen der Vergangenheit. Mit den vorgestellten Versuchsaufbau sollten nun jedoch zusätzlich Aussagen über das Maß der Auswirkungen getroffen werden.

Unter Nutzung der Zündquellen Glimmnest und heiße Oberfläche lassen sich zwar Produktagglomerationen erkennen, eine Zündung erfolgte jedoch unter den gegebenen Versuchsbedingungen und -Merkmale nicht bzw. nur kurzzeitig und ohne Auswirkungen auf benachbarte Anlagenteile. Jedoch war deutlich ersichtlich, dass eine Zündung der entstehenden Schwelgase aus beiden Glimmnesttypen möglich war. Erst mit den Versuchen des Platindrahts als Referenz-Zündquelle konnte eine plötzliche Entzündung beobachtet werden. Trotzdem eine erfolgreiche Druckaufnahme den Versuchsbedingungen nicht standhalten konnte, kann die Verbrennung augenscheinlich als Explosion betitelt werden. Die Zündung weitete sich auf die Wirbelschicht des Fließbetts unter Flammenerscheinung aus. Auch reichten die Flammen schließlich weit in die Trocknungskammer hinein. Dies wird auch anhand der Temperaturaufzeichnungen mittels Thermoelemente in Bild 56 erkennbar.



**Bild 56:** Temperaturverlauf der Zündversuche im Fließbett, vgl. Kulosa 2017

Aus den Versuchen kann abgeleitet werden, dass aufgrund des Erlöschens der Flammen nach Abschaltung der Druckluft, ein Fluidisieren der Partikeln als Voraussetzung für einen flammenden Abbrand gilt. Diese Beobachtung machte auch (Leksin et al. 2017) in einer Reihe von standardisierten Tests zum Abbrandverhalten im Fließbett mit verschiedenen Produkttypen. Auch wird in der (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7, unveröffentlichter Entwurf) dem Umstand Rechnung getragen, dass bei integrierten Fließbetten bis zur Abschaltung der Zuluft mit einer größeren Abbrandgeschwindigkeit und schnelleren Brandausbreitung gerechnet werden muss.

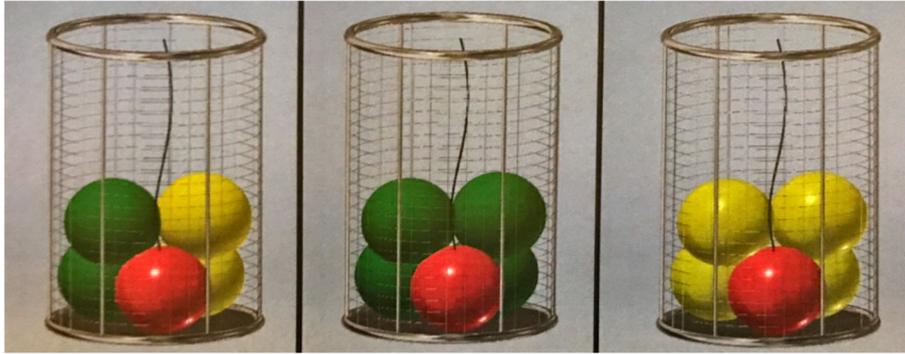
Die in den Versuchen eingesetzten Zündquellen lassen darauf schließen, dass eine fortlaufende Verbrennung nur mit einer großen Zündenergie initiiert werden kann. Als Zündquelle für eine Brandausbreitung im gesamten Fließbett mit Auswirkungen in die konische Trocknungskammer und darüber hinaus, wird auch die besondere Gefahr durch den flammenden Abbrand von freigesetzten Gasen der Glimmnest hervorgehoben.

Trotzdem mit diesen Versuchen ein physisch vereinfachtes, wenn auch zum Teil standardisiertes Modell, gewählt wurde, setzt ein „Upscaling“ von gewonnenen Erkenntnissen weitere Details und Berechnungen voraus. Dieses Ziel kann heuer auch digital erreicht werden, ist doch nach (Steck 2022) „*der digitale Zwilling (...) die Basis, um alle Stationen des Produktlebenszyklus zu evaluieren*“, wengleich sich (Steck 2022) mit diesem Zitat auf die ökologischen Bilanzen bezieht.

### 6.3.2.2 Auswirkungen partiell explosionsfähiger Atmosphären

Die Bewertung der Hypothese, dass Teilvolumen in Gemischen bzw. inhomogene Gemische sich hinsichtlich der Phänomenologie und der Explosionscharakteristika im Vergleich zu homogenen Gemischen andersartig verhalten, wurde in der Vergangenheit z. B. durch (Hauert et al. 1996a) untersucht. Diese Erkenntnisse finden bis heute Anwendung in der Berechnung zu Druckentlastungsflächen nach DIN 3673. Die umfangreichen Untersuchungen wurden dabei insbesondere für Silos angestellt. Die Explosionsdrücke bei der tangentialen Silobefüllung, die nach Staubkonzentrationsmessungen durch (Hauert und Vogl 1995) nur lokal Gemische innerhalb der Explosionsgrenzen bilden, fallen deutlich geringer aus als die der vertikalen Befüllung, bzw. eine Zündung hat nicht immer stattgefunden. Auch war die Abhängigkeit der Position der Zündquelle auf den maximalen Explosionsüberdruck und den Druckanstieg deutlich erkennbar. In einem Versuchsaufbau durch (Jung 2018) sollte die oben genannte Hypothese verallgemeinert abgebildet werden, d. h. ohne direkten Bezug zu einem Anlagentyp, um eine allgemeingültige Übertragbarkeit zu gewährleisten. Für den Versuchsaufbau wurde ein klassischer zylindrischer Behälter gewählt, welcher aus einem Holzgestell gefertigt wurde und mit Ballons mit verschiedenen Konzentrationsmerkmalen befüllt war. Die Ballons bilden somit die Teilvolumen explosionsfähiger Atmosphären, mit anderen Worten ein inhomogenes Gemisch, ab. Die Wahl eines Ballonmodells erfolgte, um die verschiedenen Konzentrationsbereiche aus Brennstoff-Luft-Gemisch unterhalb und nahe der UEG sowie innerhalb der Explosionsgrenzen einander angrenzend abdecken zu können. Tests bei der Heranführung an den Versuchsaufbau zeigten, dass die Membran dabei geeignet ist, um eine Reaktion auf benachbarte Gemische (Ballons) innerhalb eines Behälters zu übertragen.

Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde zudem ein Referenzmodell aus homogener Atmosphäre geschaffen, welches eine optimale Konzentration innerhalb der Explosionsgrenzen aufweist. In Summe ergaben sich daraus die in Bild 57 aufgeführten Versuchsaufbauten:



**Bild 57: Versuchmodell inhomogener Gemische zur Auswirkungsbetrachtung (Legende: grün: 100% O<sub>2</sub>, gelb: größer/gleich UEG, rot: innerhalb Explosionsbereich), vgl. (Jung 2018)**

Die Ergebnisse über die Beobachtungen (visuell mittels Kamera und Zustand der Ballons sowie auditiv) der verlaufenden Explosion nach Zündung des jeweils roten Ballons von jeweils fünf Wiederholungsversuchen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Wenngleich nicht für alle Versuchsdurchgänge der gleiche Reaktionsübergang zwischen den verschiedenen stöchiometrischen Verhältnissen erkennbar ist, so bildet dennoch die Mehrheit der Versuche die folgenden Erwartungen ab: Während die Übertragung eines idealen Gemisches auf „leere“ Teilvolumen (d. h. unterhalb der UEG befindliche Gemischzustände) keine bzw. durch die Verbrennung des roten Ballons nur die mechanische Zerstörung des benachbarten Ballons bewirkte, sind fortlaufende Reaktionen innerhalb der inhomogenen experimentellen Simulation bei Übertragung zwischen idealen und unterstöchiometrischen (d. h. nahe der UEG) Verhältnissen erkennbar. Eine Bestätigung über diese Trends und die Funktionalität des Modells liefert das Referenzmodell und die nahezu vollständige Zerstörung aller Ballons.

Dieses verallgemeinerte Modell bestätigt die bereits an ausgewählten Anlagentypen durchgeführten umfassenden Untersuchungen, wenngleich Versuchsaufbau und Quantität deutlich auszuweiten sind und diese Ergebnisse weiterhin eher als Orientierung heranzuziehen sind.

Um derartige Explosionscharakteristika in Berechnungen des konstruktiven Explosionsschutzes zu berücksichtigen, bedarf es bislang eingehender Untersuchungen im Sinne von Einzelbetrachtungen oder fundierte Experimente und eine resultierende valide Datengrundlage, wie die eingangs benannten. Daher finden in den einschlägigen Normen, bislang nur die zwischenzeitlich in weiter Vergangenheit zurückliegenden Ergebnisse über inhomogene Zustände der Silobefüllvorgänge sowie der konventionellen Sprühtrocknung Anwendung, gleichwohl das Phänomen der reduzierten Explosionsdrücke für inhomogene Gemische übertragbar ist. Ein dahingehender Paradigmenwechsel ist bislang jedoch nur Fallbezogen zu erwarten. Eine Erweiterung der einschlägigen Normen aus Untersuchungen und Zugänglichmachen der Öffentlichkeit

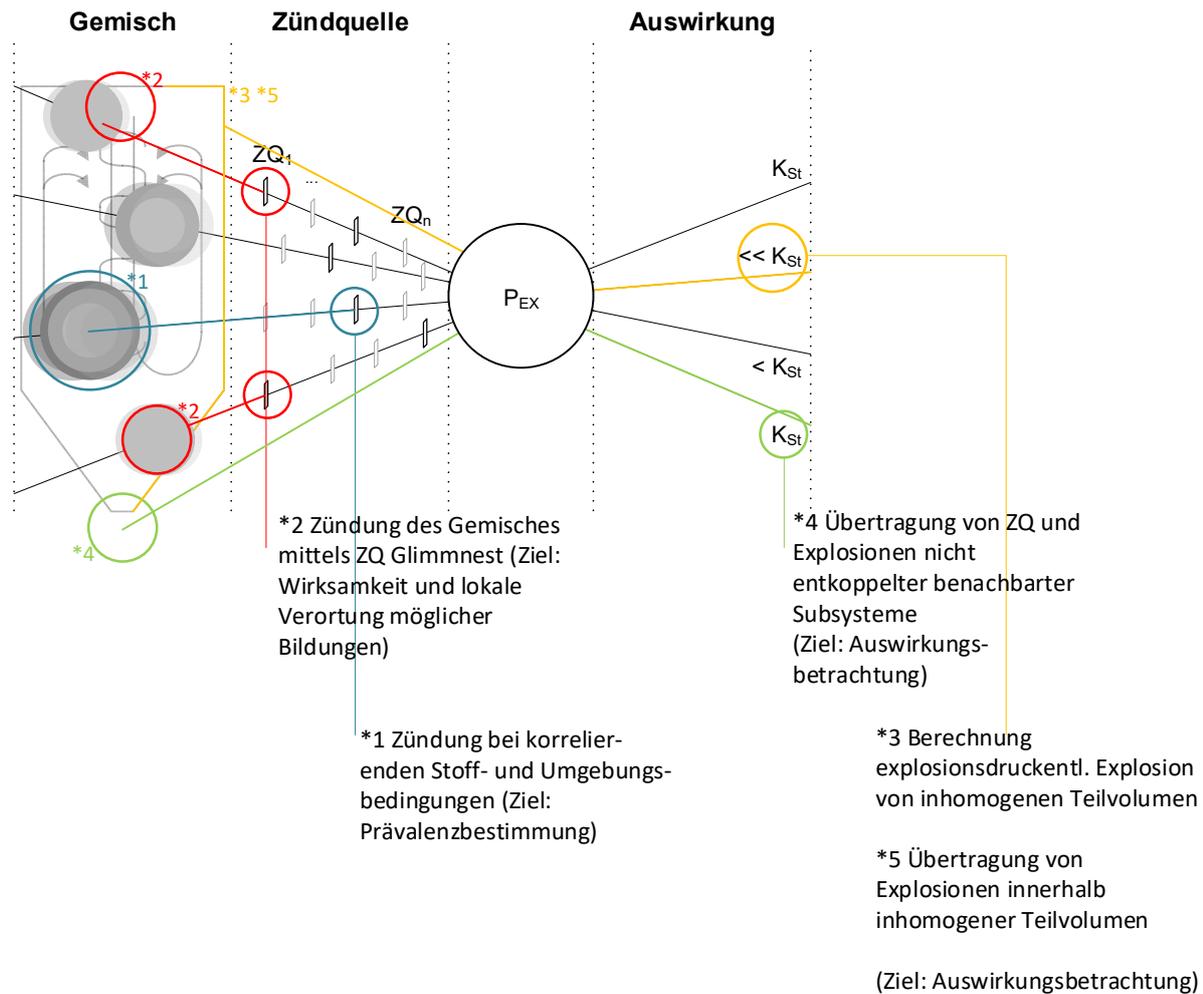
bedarf weiterer Untersuchungen. Das Knowhow liegt jedoch im Wesentlichen bei den Herstellern konstruktiven Explosionsschutzes, bzw. den involvierten Institutionen. Die Kenntnis über die Integration verschiedener Teilvolumen in die Auswirkungsbetrachtung entzieht sich jedoch den betrieblichen Anwendern und dann zum Teil auch die Möglichkeit die final-orientierten Maßnahmen Schutzzielorientierter zu planen, ohne eine Überdimensionierung zu befürchten. Damit dies stattfindet, gilt es die Auswirkungsbetrachtung in den Bereich der Gefährdungsbeurteilung zu integrieren.

### 6.4 Zwischenfazit

Die Nutzung des Kritikalitätsmodells unter Erfüllung der Verlässlichkeitsaspekte erfordert ein fundiertes phänomenologisches Verständnis über die Mechanismen am koinzidierenden Wirkungsort. Ein erheblicher Einfluss der Bedingungen hinsichtlich Zündmechanismus und Auswirkungen von Explosionen, die mit dem Modell eine Spezifikation über ein „übliches Maß“ hinaus erfahren, sind zu erwarten. Daher wurden mit dem Kapitel 6.2 und 6.3 Versuchsdurchführungen vorgestellt, die das Ziel einer Beschreibung ebendieser Mechanismen im Wirkungsort verfolgten. Das folgende Bild 58 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Kritikalitätsmodell und den beschriebenen Untersuchungsgegenständen. Die Bezifferung \*1 bis \*5 entspricht der Reihenfolge der in den beiden vorangegangenen Kapiteln beschriebenen methodischen und experimentellen Untersuchungen und ihrer kausal- und final-orientierten Bedeutung.

Die angewandte Methode der Fehlerbaumanalyse (\*2) in der hier verwendeten Abwandlung zeigt beispielsweise die Eignung zur Lokalisierung eines Glimmnestes (exemplarisch für eine der 13 möglichen Zündquellen) innerhalb der Apparatur, um folglich die Koinzidenzbedingung mit den charakterisierten Gemischzuständen herzustellen. Untersuchungen bezüglich des Zündmechanismus stellen sich jedoch aufgrund schwerlich zu erzeugender Standardisierung bzw. der jeweiligen realistischen Abbildung noch immer nicht als fundiert bewiesen heraus.

Auch die Untersuchung zur Übertragung einer Explosion zwischen den verschiedenen Clustern (\*5) innerhalb eines Apparates (Subsystems) kann nur als Ansatz ohne allgemeingültige Ableitung bezeichnet werden, wengleich unter den vorgegebenen Bedingungen der Trend abzuleiten ist, dass eine idealisierte Explosion nur bei gleichbleibend angrenzen Clustern einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre gegeben ist. Eine Durchmischung der neu-definierten Zonen 200, 210 und 220 innerhalb der Cluster eines Apparatevolumens führt zum Teil sogar zum Erliegen einer beginnenden Explosion.



**Bild 58: Zusammenhang von Kritikalitätsmodell und experimentellen Bewertungen**

Auch für den Versuchsaufbau zur Übertragung einer beginnenden Explosion in einem benachbarten Anlagenteil (Subsystem) (\*4) kann trotz fehlenden Detailierungsgrad im „Downscaling“ eine Bestätigung der getroffenen Annahmen mit dem Orientierungsversuch erzielt werden und eine wirksame Zündquelle (in diesem Fall vom Fließbett ausgehend) identifiziert werden, die erst bei fehlender Abschaltung zu einer wirksamen Ausbreitung (in diesem Fall in die Trocknungskammer) führt.

Mit Hilfe derartiger Versuche kann es dem Beurteiler gelingen, die Verlässlichkeit seiner zu treffenden Maßnahmen bei der Nutzung der mikroskopischen Herangehensweise des Kritikalitätsmodells zu begründen. Zeitgleich zeigt die Übersicht in Bild 58 und die dazugehörigen Ausführungen die Notwendigkeit, die Akzeptanz ebendieser Verlässlichkeit mit einer Anzahl an Versuchen und Argumenten überhaupt erst als valide Grundlage erzielen zu können. Die Recherche vergleichender Bedingungen publizierter Studien stehen dem gegenüber.

# 7 Optimieren der systematischen Sicherheitsbetrachtung

## Inhalt

---

7.1 Anforderungen an die Kritikalitätsbewertung.....	134
7.2 Zugewinn für die Zuverlässigkeit.....	135
7.3 Zugewinn für die Ökonomie .....	137
7.4 Zugewinn für die Sicherheit .....	140
7.5 Abgeleitete Vorgehensweise .....	142

---

Bevor die vorgestellten Erkenntnisse und das Modell zur klassierten Kritikalität (auch: Kritikalitätsmodell) in das Vorgehen nach *Duktus* einfließen können, gilt es die Anforderungen zu prüfen und den Zugewinn - den Mehrwert - für Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit sowie schließlich die Sicherheit herauszustellen.

### 7.1 Anforderungen an die Kritikalitätsbewertung

Der *Duktus* zur Explosionsgefährdungsbeurteilung folgt seit Jahrzehnten einem bewährten und anerkannten dreistufigen monokausalen Ansatz und deckt mit der Rangfolge seines Abfrageschemas die gesetzlich vorgegebene Priorisierung ab, vgl. (Maiwald et al. 2017b). Nichtsdestotrotz stellt die Beantwortung des Abfrageschemas den Anwender in der Praxis vor große Herausforderungen und eine Kompetenzbildung wird vorausgesetzt. Um an dieses Vorgehen und seine Konventionen anzuknüpfen, ohne das hohe Sicherheitsniveau anzugreifen, gilt es die Anforderungen verschiedener Stakeholder zu berücksichtigen. Primär sind die Gesetzgeber und die Betreiber zu nennen, die zum einen Anforderungen an die Anerkennung und Akzeptanz stellen und zum anderen hilfreiche Werkzeuge und Tools für die Realisierbarkeit fordern.

Die rechtliche Verankerung des *Duktus* in der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS 720) geht mit der sogenannten Vermutungswirkung einher; m. a. W. wird beim Vorgehen nach *Duktus* unterstellt, dass bei Anwendung die übergeordneten gesetzlich verpflichtenden Forderungen erfüllt sind. Entscheidet sich der Anwender von diesem Vorgehen abzuweichen, muss er nachweislich aufzeigen, dass selbige Vermutungswirkung dennoch besteht. In der Regel bezieht er hierbei direkt einen Behördenvertreter, z. B. in Form der zuständigen Aufsichtsperson, ein. Schließlich muss der Beurteiler ebenso die übergeordneten Pflichten mit Sorgfalt erfüllen. Darüber hinaus wird eine fachliche Sorgfalt zwingend vorausgesetzt, um die mit dem *Duktus* postulierte intrinsische Sicherheit und die geltenden Konventionen überhaupt elastisch zu interpretieren. Die TRGS 720 beschreibt in diesem Kontext eine Gefahr (explosionsfähige Atmosphäre oder Zündquellen) „sicher zu vermeiden“ und stellt allein durch diesen Wortlaut den Anwender vor eine Herausforderung hinsichtlich rechtlicher Akzeptanz und Haftungsfragen. Ein „belegbares Wissen“ über die Beantwortung des Abfrageschemas muss gegeben sein. Es ist nicht mehr ausreichend über „Möglichkeiten“ zu diskutieren. Eine Anzahl weiterer Normen, Technischer Regeln und Informationen erschweren die Umsetzung zusätzlich und nehmen durch neue technische Möglichkeiten (z. B. Einsatz sicherheitsgerichteter Steuerungen) weiterhin im Detaillierungsgrad zu. Der Betreiber hat somit hohen Anforderungen Genüge zu tun. Insofern die Beurteilung betriebsintern vorgenommen wird, sind Anforderungen hinsichtlich der Handlungskompetenz (u. a. Methoden- und Fachkompetenz, vgl. (Lehmann und Nieke 2000)) und Erfahrung zu stellen. Der *Duktus* selbst kann eine erfolgreiche Beurteilung ohne diese Attribute nicht garantieren. Anforderungen an eine Befähigung im Sinne einer Qualifizierung gibt es hierbei nicht, wie z. B. vergleichbar im Brandschutz, wo neben dem Brandschutzbeauftragen eines Unternehmens, Brandschutz-Sachverständige für die Erstellung von Brandschutzkonzepten heranzuziehen sind. Derartige Vorgaben sind erst mit der Befähigung zur Prüfung geregelt. Doch auch nach Beauftragung eines externen Sachverständigen für die Erstellung des Explosionsschutzkonzeptes, sind diesem Informationen bereitzustellen, die der Betreiber nicht immer vorliegen hat.

Darüber hinaus ergeben sich weitere Anforderungen der Arbeitnehmer und Arbeitnehmervertreter, der Versicherer sowie Kunden. Auch der Hersteller hat seinerseits gleichartige Anforderungen und Herausforderungen zu erfüllen.

### **7.2 Zugewinn für die Zuverlässigkeit**

Die Zuverlässigkeit als eines der nach (Bertsche et al. 2018) geltenden Aspekte der Verlässlichkeit soziotechnischer Systeme stellt einen zentralen Baustein für eine Übertragung zur

Beschreibung von getroffenen Maßnahmen dar. Die Bedienung einer Anlage mit dem Ziel der Produktion kann einem solchen System zugeordnet werden. Im Folgenden wird der Aspekt der Zuverlässigkeit im Wesentlichen der Wirksamkeit von Maßnahmen zugeschrieben. Eine Übertragung des Verlässlichkeitskriteriums, oder m. a. W. besagter Wirksamkeit, kann im Folgenden für technische und organisatorische (wenn zweiteres auch nachrangig anzuwenden ist) Maßnahmen Anwendung finden. Bei der Betrachtung des Zugewinns für die Zuverlässigkeit unter Nutzung des Kritikalitätsmodells innerhalb einer optimierten - in seinem Vorgehen auch systemischen - Sicherheitsbetrachtung ergibt sich allein für die getroffenen Maßnahmen eine Zuverlässigkeitsbeschreibung auf zwei Ebenen. Diese können einer inhärenten, kausal-orientierten oder final-orientierten Maßnahmenarchitektur entspringen.

Auf der ersten Ebene kann die Festlegung von Maßnahmen und deren Qualität mit Hilfe des Kritikalitätsmodells durch ihren gezielten Einsatz an dem tatsächlich örtlich und zeitlich koinzidierenden Wirkungsort von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre und Zündquelle verbessert werden, was die Zuverlässigkeit jener Maßnahmen gleichsam erhöht. Mit dem mikroskopischen Ansatz der Erhebung observabler Größen und der genauen Kenntnis über sowohl Stoff- als auch Umgebungsbedingungen kann eine zuverlässige Maßnahme abgeleitet werden. Als Beispiel sei die Gleitstielbüschelentladung flexibler Leitungen herausgegriffen. Tritt sie innerhalb des Subsystems auf, so ist ihre Zündwirksamkeit für dieses Subsystem zu bewerten und auszuschließen. Unter Zuhilfenahme des Kritikalitätsmodells kann demgegenüber eine Beschreibung des Gemischzustandes in örtlicher und zeitlicher Koinzidenz am genauen Wirkungsort erfolgen, d. h. innerhalb von Teilvolumen eines Subsystems. Dies kann dazu führen, dass die Zündwirksamkeit für das Teilvolumen der auftretenden Entladung ausgeschlossen werden kann und folglich für das gesamte Subsystem keine Relevanz mehr hat.

Über diese Ebene der Zuverlässigkeit hinaus lässt sich zudem die technische Zuverlässigkeit eines zum Einsatz kommenden technischen Gerätes, z. B. der Mess-, Steuer-, Regeleinrichtungen als Überwachungsfunktion, beschreiben. Für die Beschreibbarmachung von technischer Zuverlässigkeit gibt es eine Reihe von relevanten Größen, nachzulesen in Grundlagenwerken wie z. B. (Meyna und Pauli 2010). Daraus abgeleitet lässt sich bereits erkennen, dass es sich um technische Zuverlässigkeit handelt, die eine Zuverlässigkeit weiterer z. B. organisatorischer Maßnahmen nicht beinhaltet. Die Überführung der technischen Zuverlässigkeit in die Explosionssicherheit wurde zuletzt mit der TRGS 725 vorgenommen. Diese Technische Regel basiert auf den zugrunde liegenden Normen der DIN EN 61511, DIN EN 62061, DIN ISO 13849-1 sowie der DIN ISO 80079-37 und somit auf den elektrisch quantifizierbaren Größen der PLT-Betriebseinrichtung - das Safety Integrated Level (SIL) oder das Performance Level (PL).

Dieses Vorgehen bleibt mit der Nutzung des klassierten Kritikalitätsmodells bestehen, kann jedoch entsprechend der ersten Ebene der Zuverlässigkeit gezielter Anwendung finden.

Der Zugewinn für die Zuverlässigkeit ergibt sich somit auf beiden Ebenen aus dem gezielten Einsatz von Maßnahmen innerhalb definierter Teilvolumen. Es kann daher von einer semi-quantitativen Zuverlässigkeit gesprochen werden.

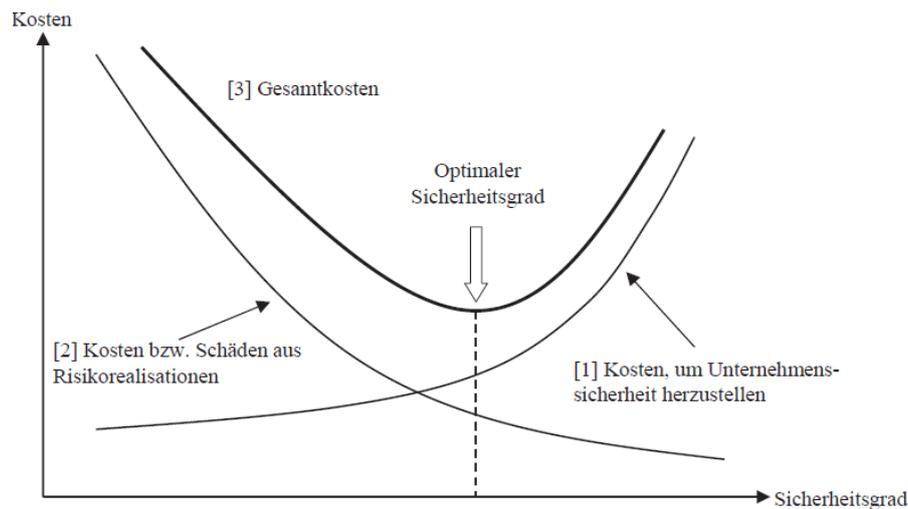
### 7.3 Zugewinn für die Ökonomie

Das ökonomische Ziel eines Unternehmens kann zusammengefasst werden als Bereitstellung ausreichender Liquidität und der Erzielung von Gewinnen. Jedes Projekt und seine Ausgaben werden unter den Kosten-Nutzen-Aspekt bemessen, um diese betriebswirtschaftlichen Kennzahlen zu erreichen. Investitionen in Sicherheitsmaßnahmen nehmen in diesem Kontext eine Sonderstellung ein, da der Gewinn für das Unternehmen nur schwerlich anhand von Zahlen zu belegen ist. Schließlich ist die Sicherheit auf den ersten Blick abstrakt, verursacht Kosten und wird dennoch von allen Seiten gefordert und ist daher bei sämtlichen Projekten von der Ideenphase an bereits mit zu berücksichtigen. Sie bildet einen großen Beitrag im Management of Change ab.

Mit dem Kosten-Nutzen-Verhältnis bezogen auf Sicherheitsmaßnahmen beschäftigten sich in der Vergangenheit z. B. (Kaack 2012; Federrath 2005; Custer et al. 2016), die sich stets auf selbiges Diagramm berufen, siehe Bild 59.

Die Investitionen in Sicherheitsmaßnahmen beziehen sich auf alle Risikofaktoren von der Arbeits-, Gesundheits- und Umweltsicherheit über Güter- und Ressourcensicherheit bis hin zur Sicherheit vor kriminellen Angriffen. Der Begriff des Risikos ist demnach im wirtschaftlichen Kontext aufzuweiten. Der charakteristische Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang bleibt dabei bestehen, wobei die Wirkung in Form eines Schadens dem Vermögensverlust gleichzustellen ist. Auch der Ansatz, dass sich das Risiko aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensschwere ergibt, ist übertragbar.

Vor diesem Hintergrund zeigt Bild 59, dass hohe Schadenskosten mit der Akzeptanz eines hohen Risikos aufgrund eines geringen Sicherheitsgrades verursacht werden. Eine Annäherung von Risiko und Sicherheit, m. a. W. ein steigender Sicherheitsgrad, geht zwar mit einem Anstieg der Unternehmensinvestitionen zur Erreichung einher, reduziert jedoch gleichsam die Kosten aufgrund potentieller Schadensauswirkungen. Ein optimaler Sicherheitsgrad in Einklang von für das Unternehmen geringsten Gesamtkosten ergibt sich gemäß dem referenzierten Diagramm zum sogenannten Zielkonflikt nicht aus einer idealisiert verlaufenden Parabel, sondern verläuft zu Gunsten des Sicherheitsgrades versetzt, siehe Bild 59.



**Bild 59: Zielkonflikt bei der Herstellung von Unternehmenssicherheit**

Wie eine Übertragung dieser Umstände für die Realisierung von Sicherheitsinvestitionen in einem Unternehmen verfolgt wird, veranschaulicht Bild 60. Es zeigt die Möglichkeit einer Verknüpfung der beteiligten Personen sowie der verwendeten Methoden im Entscheidungsprozess für Sicherheitsinvestitionen auf. Auffallend hierbei ist die Ausgangslage der Risikobeurteilung und die differenzierenden Blickwinkel von Controller und Sicherheitsfachkraft.<sup>5</sup>

(Kaack 2012) setzt sich mit den komplexen Risikocharakter und seinen Merkmalen im ökonomischen Kontext auseinander und definiert spezielle, operationelle und asymmetrische Risiken als Gefahren, dessen Ursachen in der Unangemessenheit und dem Versagen interner Verfahren, Menschen oder Systeme oder auf externen Einflüssen fußen. Risiken treten nach (Kaack 2012) mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ein und entfalten ihr ökonomische Wirkung in Form von Schäden mit bestimmten Schadensausmaß. Mit dieser ökonomisch geprägten Risikodefinition arbeitet der Controller eines Unternehmens, der i. d. R. auch die Funktion des Risikomanagers innehat. Er erarbeitet eine interdisziplinäre (unternehmensbezogene) Risikobeurteilung unter Berücksichtigung aller Risikofaktoren, bei der die Explosions- und flankierenden Brandgefahren nur eine Teilmenge, wenn aufgrund des potentiellen Schadensausmaßes auch keine unrelevante, darstellen. Das dabei z. B. verwendete qualitative Szenarienmodell basiert im Wesentlichen auf den Best Practice Vorgaben des Versicherers. Von diesem Versicherer und den berechneten Prämien sowie der Monetarisierung potentieller Anlagenschäden und Betriebsunterbrechungen (= Summe Kosten Schadensausmaß) ergibt sich eine Priorisierung zur Maßnahmenverfolgung seitens Controller. „Direkte“ Maßnahmen werden durch ihn jedoch nicht abgeleitet. Hierzu wird anschließend die Sicherheitsfachkraft des Unternehmens einbezogen.

<sup>5</sup> Sicherheitsfachkraft als Sammelbegriff für die jeweilige fachliche Beauftragtenfunktion, z. B. Brandschutzbeauftragter.

Diesem obliegt es die ermittelten Szenarien genauer zu untersuchen und mittels (anlagen- und prozessbezogener) Risikoanalyse (z. B. HAZOP-Analyse) die Ursachen zu identifizieren und „direkte“ Maßnahmen zur Reduzierung und/oder Vermeidung abzuleiten. Unter Verwendung des Modells zur klassierten Kritikalität kann es der Sicherheitsfachkraft gelingen, eine Priorisierung der Maßnahmen über  $f(P_{Ex}, S) = \sum max$  zu treffen und durch Erhöhung der Zuverlässigkeit von Maßnahmen aus  $f(P_{Atm(x,y,z,t)}; \sum P_{ZQ(x,y,z,t)}) = P_{Ex} = < \sum max$  unter Erhalt des Schutzniveaus zusätzlich Anzahl und Kosten für Maßnahmen zu reduzieren. Werden alle Maßnahmen der Kritikalitätsbewertung umgesetzt, ergibt sich eine Risikovermeidung, wohingegen die Abarbeitung einer priorisierten Maßnahmenverfolgung eine Reduzierung des Risikos ausgehend von den kritischsten Ursachen darstellt, vgl. (Federrath 2005).

	Qualitative Verfahren	Quantitative Methoden	Priorisierung
Controller/ Risikomanager	Interdisziplinäre Risikobeurteilung - unternehmensbezogen - alle Risikofaktoren betreffend	Anlagenschäden, Wiederbeschaffungs- kosten und -zeit  Betriebsunterbrechung, Reparatur- und IBN-Kosten	Größtmögliche Summe Anlagenschäden, Betriebsunterbrechung
Sicherheits- fachkraft	Detaillierte Risikobeurteilung - anlagen- und prozessbezogen - Risikofaktoren der Anlagensicherheit	Angebotseinholung über Explosions- und flankierende Brandschutzmaßnahmen	Summe aller Maßnahmen gem. $f(P_{Ex}, S) = \sum max$ bzw. gem. Klassierte Kritikalität $f(P_{Atm(x,y,z,t)}; \sum P_{ZQ(x,y,z,t)})$ $= P_{Ex} = < \sum max$
Entscheider		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Kosten Risikovermeidung</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Kosten Schadensausmaß</p> </div> </div>	

**Bild 60: Risikobewertung an den Schnittstellen von Controller und Sicherheitsfachkraft**

Die Priorisierung der Maßnahmen der Sicherheitsfachkraft setzt demnach primär bei der mikroskopischen Bewertung der Gefahren und seiner Wahrscheinlichkeiten an. Eine Monetarisierung ergibt sich anschließend aus der Angebotseinholung über konkrete Maßnahmen (= Summe

Risikoreduzierung) und können denen des Controllers über die Summe potentieller Versagenskosten gegenübergestellt werden. Die Gegenüberstellung setzt jedoch ein Eintreffen des Schadens voraus, weshalb die Kosten wiederum über die Betriebslaufzeit und/oder die Eintrittswahrscheinlichkeit aus weiteren Datengrundlagen zu korrigieren sind.

Mit diesem objektivierten Vorgehen zur Erreichung eines erhöhten Informationsgehalts kann die Effizienz der Entscheidungsfindung und somit die Reduzierung von Ursachen von Risiken vgl. (Helten 1974) und zudem von Fehlinvestitionen erreicht werden. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit und ein Zusammenwirken und Verständlich-machen verschiedener Risikoansätze fördert diesen Ansatz, welcher bislang keine Selbstverständlichkeit ist. „*Innovationen entstehen an den Schnittstellen der Disziplinen*“ kann auch hierfür als allseits bekannter Aufruf für eine gewinnbringende Herangehensweise und Ableitung von Maßnahmen unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Unternehmensziele herangezogen werden.

### 7.4 Zugewinn für die Sicherheit

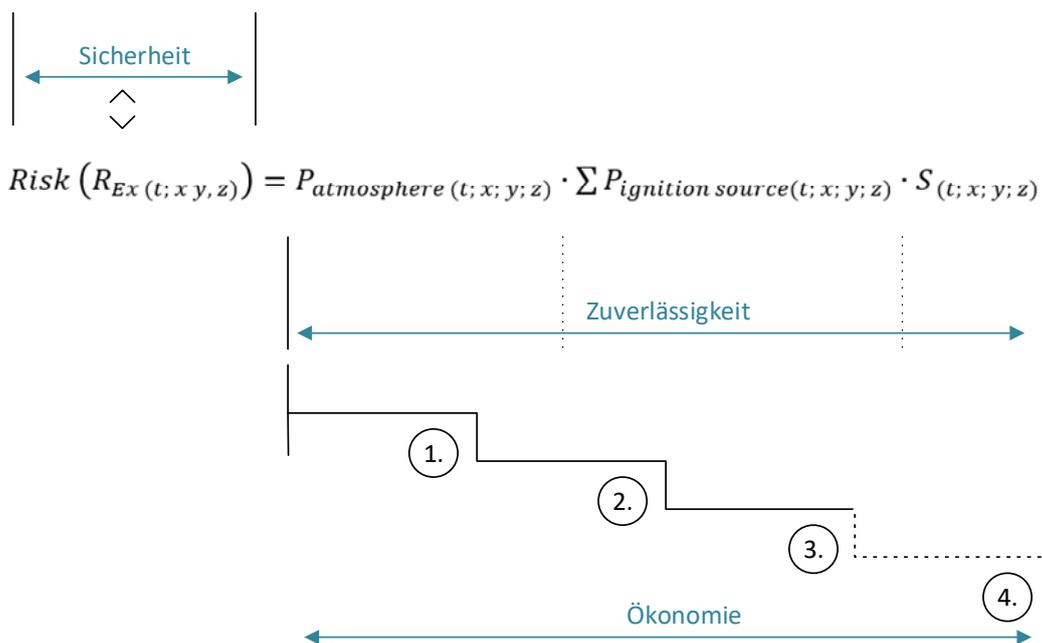
Wie aus dem Wortlaut der „Sicherheitsbetrachtung“ bereits hervorgeht, ist mit der Verlässlichkeit abgeleiteter Maßnahmen auch ein Zugewinn für die Sicherheit zu erwarten. Bereits das Anforderungsprofil für ein optimiertes Vorgehen in der Sicherheitsbetrachtung in Kapitel 7.1 stellt als oberste Prämisse den Erhalt des Sicherheitsniveaus heraus. Die Sicherheit beschreibt das übergeordnet geltende Ziel von Personen- und Sachschutz (sowie Umweltschutz). Die Sicherheit der Anlage im Kontext geltender Explosionsgefahren lässt sich im Umkehrschluss aus der erweiterten Risikoformel [13] ableiten und zeigt auf, dass das Produkt des Gesamtrisikos einer Explosion mit den Faktoren von  $P_{\text{mixture}}$  und  $P_{\text{ignition source}}$  in Abhängigkeit von  $(t, x, y, z)$  unter Nutzung des Kritikalitätsmodells abnehmen kann und auch die auswirkungsbeschreibenden Maße nicht in allen Teilvolumen von einer maximal erwartbaren Schadensschwere (ausgedrückt als (maximale) Druckanstiegsgeschwindigkeit einer Explosion, dem  $K_{St}$ -Wert) ausgehen, siehe Kapitel 6.1. Ein hohes Risiko erfordert zuverlässige Maßnahmen, oder m. a. W. ein hohes Maß an Sicherheit, zur Reduzierung ebendieses Risikos.

Ein Zugewinn für die Sicherheit kann final nur gegeben sein, wenn der Zugewinn für die Ökonomie dem nicht entgegenwirkt. Folglich dürfen die drei Aspekte des hier verwendeten „ZÖS-Konstruktes“ (als Ableitung des RAMSS-Konstruktes (kurz für: Reliability, Availability, Maintainability, Safety und Security) nach (Bertsche et al. 2018)) nicht miteinander konkurrieren,

sondern für eine ganzheitliche Sicherheitsbetrachtung integrativ zur Gewährleistung der Verlässlichkeit beitragen.

Da der ökonomische Aspekt in erster Linie eine Rangfolge für die wirtschaftliche Ertüchtigung einer Bestandsanlage liefert, ohne notwendige Maßnahmen langfristig auszuschließen (Bild 61), ist die geforderte Verlässlichkeit dennoch gegeben. Bei der Ertüchtigung von Bestandsanlagen können diese jedoch einem z. B. 3- oder 5-Jahresplan zugeschrieben werden, insofern die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens davon direkt abhängt. Eine Reduzierung der Anzahl von Maßnahmen (und somit ein Ausbleiben des 4. Schrittes in der Maßnahmenrealisierung zum Zwecke der ökonomischen Effizienz gem. Bild 61) kann sich ergeben, wenn eine für das Subsystem „zum-Teil-wirkende“ Maßnahme, siehe auch Kapitel 2.4, aufgrund der Anwendung des Kritikalitätsmodells innerhalb der Cluster ihre Wirksamkeit verlässlich beweist.

Grundsätzlich ist bei den Zugewinn-liefernden Aspekten der Zuverlässigkeit in Einvernehmen mit Wirksamkeit und Qualität von Maßnahmen bereits der überwiegend positiv beschreibende Beitrag der Sicherheit gegeben.



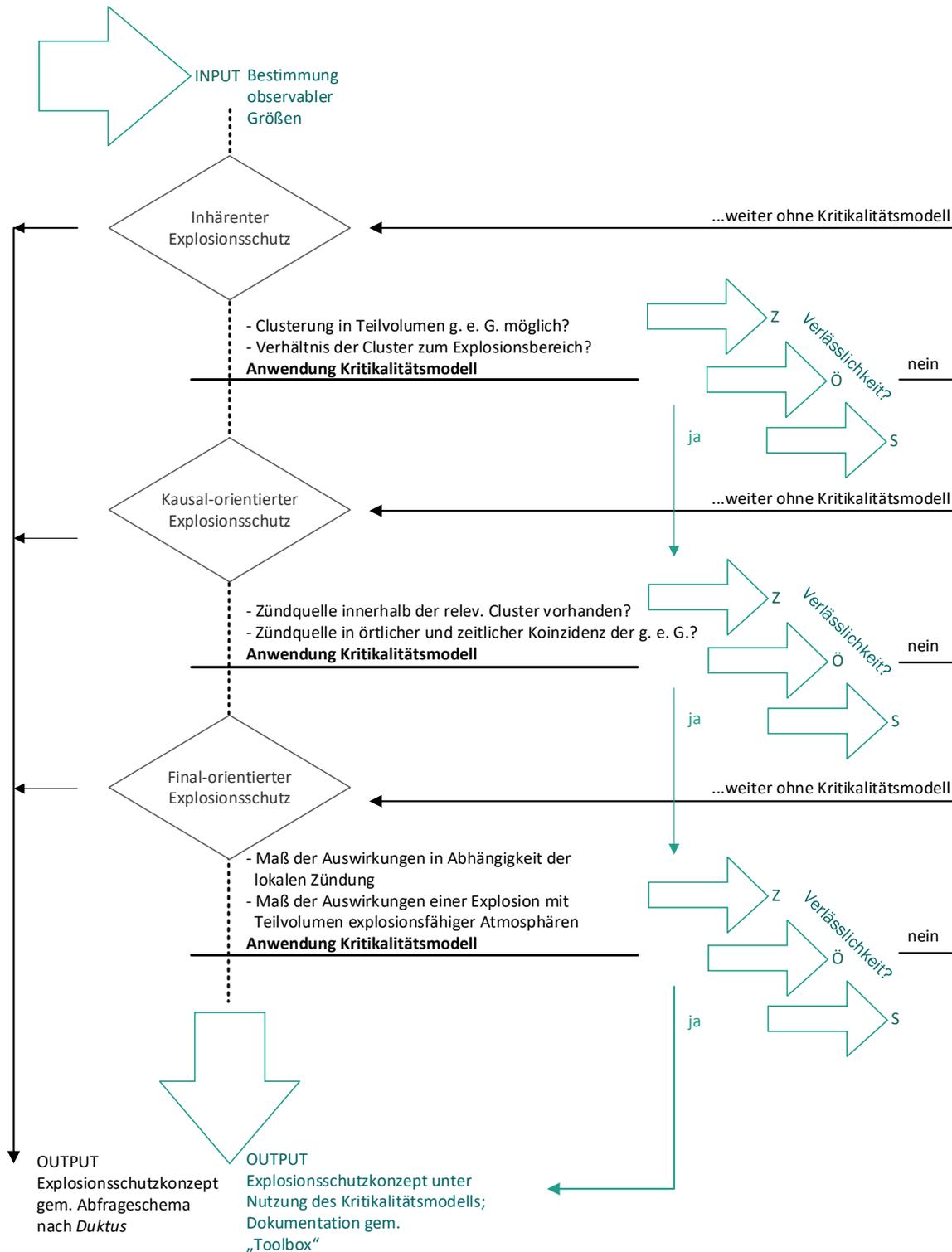
**Bild 61:** Verlässlichkeitsaspekte des ZÖS-Konstrukts

Bild 61 visualisiert anhand der Ausführungen zum Aspekt der Sicherheit im ZÖS-Konstrukt und anhand der Risikoformel, dass die Aspekte Zuverlässigkeit und Ökonomie auf der Seite der Maßnahmen greifen und langfristig einen gleichbleibenden Aspekt der Sicherheit, in ihrer Summe der Verlässlichkeit, erzielen und miteinander nicht konkurrieren.

### 7.5 Abgeleitete Vorgehensweise

Das abgeleitete Vorgehen zur Optimierung der systematischen Sicherheitsbetrachtung kann durch das Grobschema in Bild 62 bzw. durch das detaillierte Ablaufdiagramm in Bild 63 wiedergegeben werden. Im Hinblick auf die Anforderungsbeschreibung in Kapitel 7.1, insbesondere hinsichtlich der Akzeptanz, wurde für eine Erweiterung das Abfrageschema zur Bewertung und Festlegung von Schutzmaßnahmen (kurz: *Duktus*) nach (TRGS 720) als Basis herangezogen.

Den Start der Sicherheitsbetrachtung bildet die Schaffung einer Transparenz von Anlagendesign und Prozessbedingungen durch Systemabgrenzung und Zerlegung des Prozesses in Phasen. Dies dient durch Erhebung der erforderlichen apparativ-technischen und prozessual-betrieblichen Parameter einer für komplizierte oder komplexe Anlagen notwendigen Systematik des Vorgehens. Relevante Parameter können sein: Volumen und Höhe/Durchmesser-Verhältnis des Behälters auf der apparativen Seite oder Temperatur, Drücke, Massen- und Luftvolumenströme auf der prozessbeschreibenden Seite. Der Austausch dieser Information in enger Zusammenarbeit mit dem Anlagenbetreiber soll dem Beurteiler nicht nur die notwendigen Prozesseinsichten für eine ganzheitliche Sicherheitsbetrachtung gewährleisten, sondern auch die Hinweise für die Interpretation hinsichtlich Stoffströme und Korrekturen der sicherheitstechnischen Kenngrößen liefern. Eine gemeinsam durchgeführte Risikoanalyse (z. B. HAZOP-Analyse) zur Identifikation weiterer Szenarien, die durch Prozessabweichungen zur Bildung explosionsfähiger Atmosphäre führen können, ist anzustreben. Dient diese Form der Risikoanalyse doch auch zeitgleich der systematischen Erfassung betriebsüblicher Störungen im Sinne des Normalbetriebes. Je nach Erfahrungen und Eintrittswahrscheinlichkeit sind diese Szenarien somit in die weitere Bewertung zu integrieren. Die Beantwortung über das Vorliegen des Gemisches in gefährdender Menge durch Charakterisierung von Quellen und Mengen kann durch die Schaffung eines erweiterten Inputs zur Generierung neuen Outputs unter Nutzung des Kritikalitätsmodells (Kapitel 6.1) in allen Bereichen des dreistufigen Abfrageschemas führen, siehe Bild 62.



**Bild 62:** Abstrahierte abgeleitete Vorgehensweise eines "Bikausalen Duktus" bei Teilvolumen explosionsfähiger Atmosphäre

Der Input wird dadurch generiert, dass eine Abschätzung von Quellen und Mengen nicht lediglich auf der Berechnung der mittleren Gas-/Staub-Konzentration basiert, sondern auf einer Verifizierung dieser Annahme durch die Erhebung observabler Größen (Kapitel 4 und Kapitel 5) oder durch valide Simulationsberechnungen sowie durch Studien über vergangene Verifizierungen und Einzelfallbetrachtungen. Letzteres setzt nachvollziehbare Publikationen voraus, um

eine Vergleichbarkeit erzielen zu können. Die Ergebnisse können zur Charakterisierung des Bemessungsvolumens durch Bildung von sogenannten Clustern explosionsfähiger Bereiche und nicht-explosionsfähiger Bereiche führen. Ein Informationsgewinn entsteht, welcher die Zuverlässigkeit von Maßnahmen durch gezielten Einsatz erhöht, eine Priorisierung und strategische Auslegung von Maßnahmen im wirtschaftlichen Sinne festlegt und die Sicherheit der Anlage erhöhen kann (= ZÖS-Konstrukt, siehe Kapitel 7.2 bis Kapitel 7.4).

Mit Hilfe des generierten Inputs erfolgt die Beurteilung über die Wahrscheinlichkeit und Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre bzw. selbiger Wahrscheinlichkeit innerhalb der Cluster, erweitert um die Abstände dieser Cluster zu den geltenden Explosionsgrenzen und dem durch die observablen Größen definierbaren stöchiometrischen Verhältnissen; beschreibbar durch Zone 200, Zone 210, Zone 220 gemäß Kapitel 6.1).

Kann die Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre durch inhärente Maßnahmen nicht sicher verhindert werden, wird die Wahrscheinlichkeit über Vorhandensein, Entstehen und Wirksamwerden von Zündquellen innerhalb der Cluster in örtlicher und zeitlicher Koinzidenz bewertet. Es besteht demnach keine Unabhängigkeit, wie in den Technischen Regeln gefordert, sondern vielmehr eine direkte Abhängigkeit. Dies führt zu einer Festlegung von Bereichen und Clustern, in denen kausal-orientierte Maßnahmen erforderlich sind und z. B. durch gezielten Einsatz von Detektionsmöglichkeiten zur Früherkennung von Selbstentzündungsvorgängen örtlich näher am Wirkungsort positioniert werden können und somit zuverlässiger reagieren. Ggf. kann dadurch die Anzahl eingesetzter Sensorik auf Teilvolumen reduziert werden, da der Einsatz nicht in allen Bereichen aufgrund fehlender Koinzidenzbedingungen notwendig und zweckdienlich ist, was einen weiteren Effekt des ökonomischen Zugewinns darstellt. Je nach Nutzung der Möglichkeit der Zoneneinteilung gelten die für die Zone und auszuwählenden Schutzmaßnahmen postulierten Anforderungen. Ist eine Entzündung nicht sicher verhindert, ist in Abhängigkeit der Cluster und seiner vorgangs bewerteten Verhältnisses zum Explosionsbereich mathematisch (rechnerisch oder simulativ) oder experimentell das Maß der potentiellen Auswirkung über die starren Grenzen des üblichen Maßes einer Auswirkung (mit tödlichen Folgen und Anlagenzerstörungen) hinaus vorzunehmen. Somit können final-orientierte Maßnahmen gezielt und zuverlässig abgeleitet werden, um die (differenzierten) potentiellen Auswirkungen auf ein unbedenkliches Maß zu reduzieren.

Alle Annahmen, Berechnung und erfassten Größen sowie die resultierenden Maßnahmen sind in einem Explosionsschutzkonzept zusammenzuführen und schlussendlich inkl. Zonen-

einteilung und Prüffristen im Explosionsschutzdokument festzuhalten. Die Dokumentation wird durch das in Kapitel 4.4 und Kapitel 5.4 sowie in (Maiwald et al. 2017b) aufgezeigte „Toolbox“ unterstützt. Nicht zu vernachlässigen sind jedoch auch die Personen, auf welche die Gefahr einer Explosion im konkreten Anwendungsfall wirken kann und damit verbundene Vorsorge für den Notfall.

Für den Fall der Bewertung von Bestandsanlagen kann das beschriebene Vorgehen und die Ableitung von Zuverlässigkeit im Rahmen einer Bewertung mittels Clusterung zu einer Priorisierung von Maßnahmen führen, die eine Zumutbarkeit der Ertüchtigung und die damit verbundene Wirtschaftlichkeit im gemeinsamen Austausch mit allen Entscheidungsträgern argumentativ vertritt.

Die abgeleitete Vorgehensweise behält das dreistufige Abfrageschema in Anlehnung an die rechtlich postulierte Maßnahmenrangfolge bei, ist jedoch durch die Wahl eines Vorgehens für explosionsfähige Teilvolumen und die Charakterisierung durch Cluster in einigen Punkten nicht mehr gänzlich monokausal. Der Bruch der Monokausalität begann bereits mit der Überarbeitung des früheren *Duktus* hin zu seiner derzeit geltenden Fassung durch die Aufspaltung der Freiwilligkeit der Zoneneinteilung und erfährt durch die Charakterisierung über die Quellen und Mengen sowie die Beurteilung innerhalb und außerhalb von Clustern eine erneute Aufspaltung.

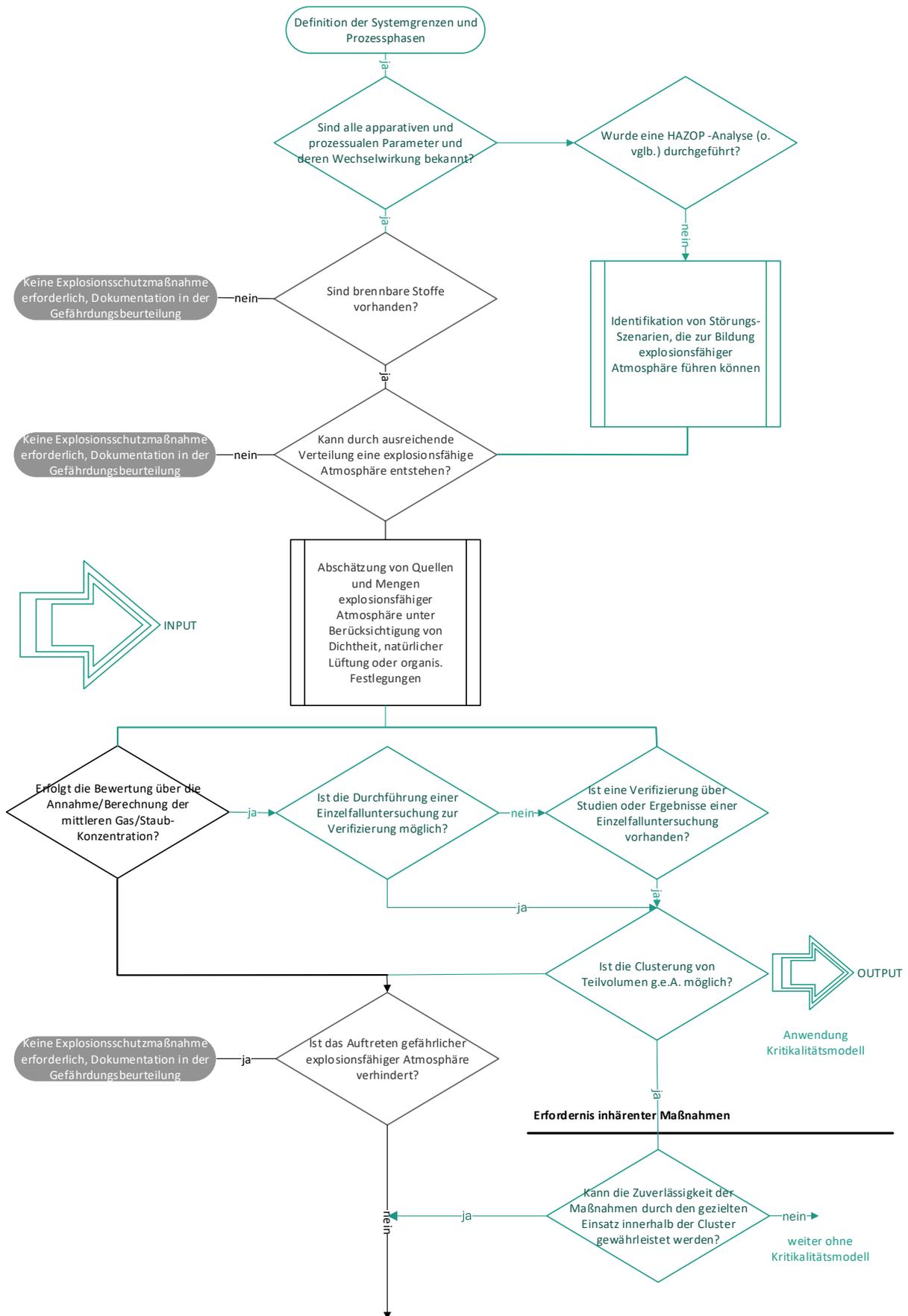
Zudem werden die geltenden Konventionen (siehe Kapitel 2.4) zur Beschreibung eines erweiterten, auf Detailkenntnissen basierenden Outputs in den folgenden Punkten angegriffen.

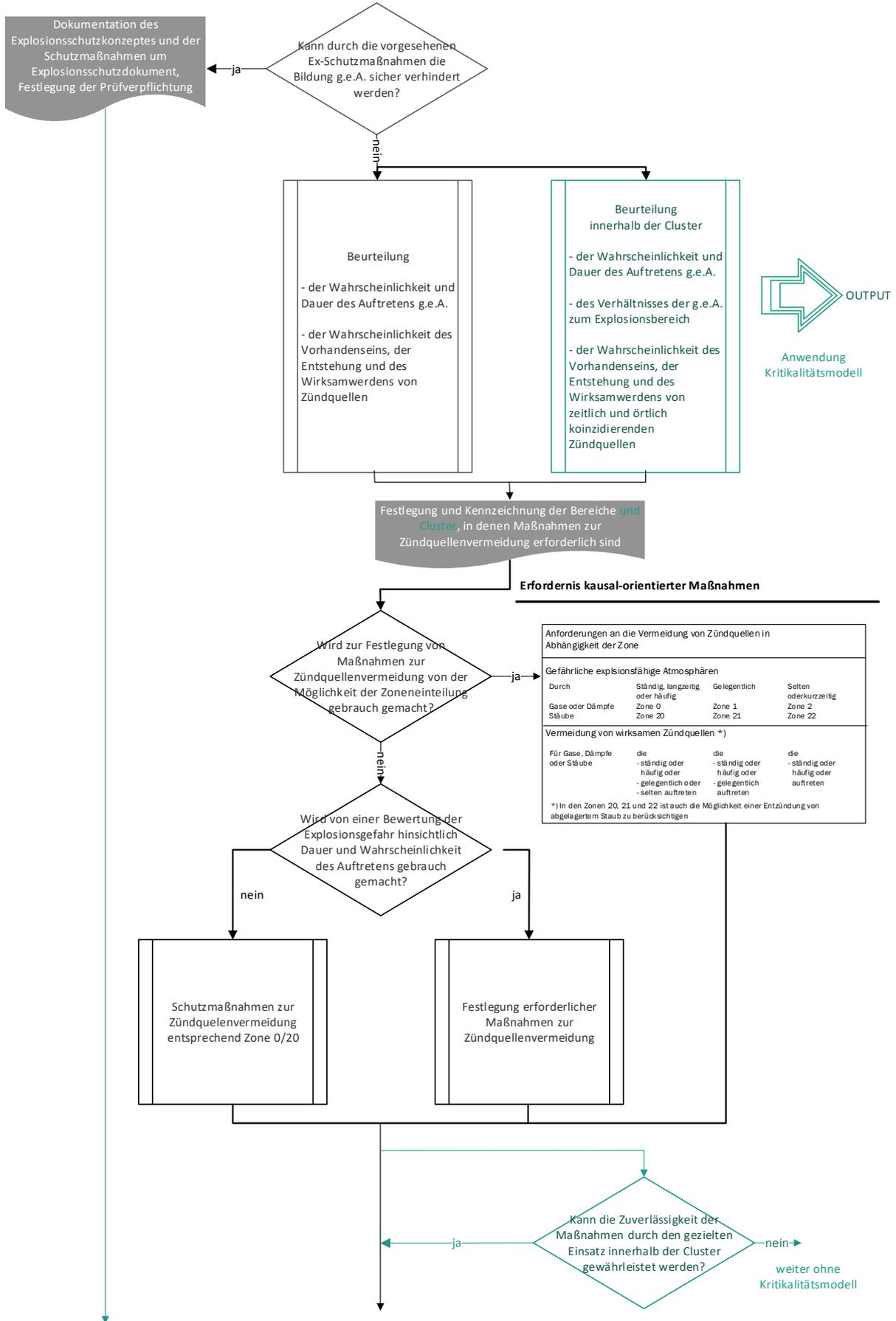
- Eine Risikoanalyse im Rahmen der Sicherheitsbetrachtung von Explosionsgefahren liefert Szenarien von Störungen durch Prozessabweichungen und menschliches Fehlverhalten (Bedienerfehler), die zur Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre führen können und als betriebsübliche Störungen (u. a.) dem Normalbetrieb zuzuweisen sind. Jene Szenarien sind somit zu integrieren und setzen eine systematische Risikoanalyse voraus.
- Die Wahrscheinlichkeit über Vorhandensein, Entstehen und Wirksamwerden von Zündquellen ist in örtliche und zeitliche Koinzidenz zum Gemischzustand zu setzen und zu bewerten. Die bislang postulierte Unabhängigkeit wird dadurch ausgeschlossen.
- Das Maß der Auswirkungen wird in Abhängigkeit der örtlichen und zeitlichen Koinzidenz von Zündquelle und gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Anlehnung an die Verhältnisse innerhalb des Explosionsbereichs hin bewertet. Es wird nicht von einem generalisierten üblichen Maß als Bewertungsgrundlage ausgegangen bzw. es

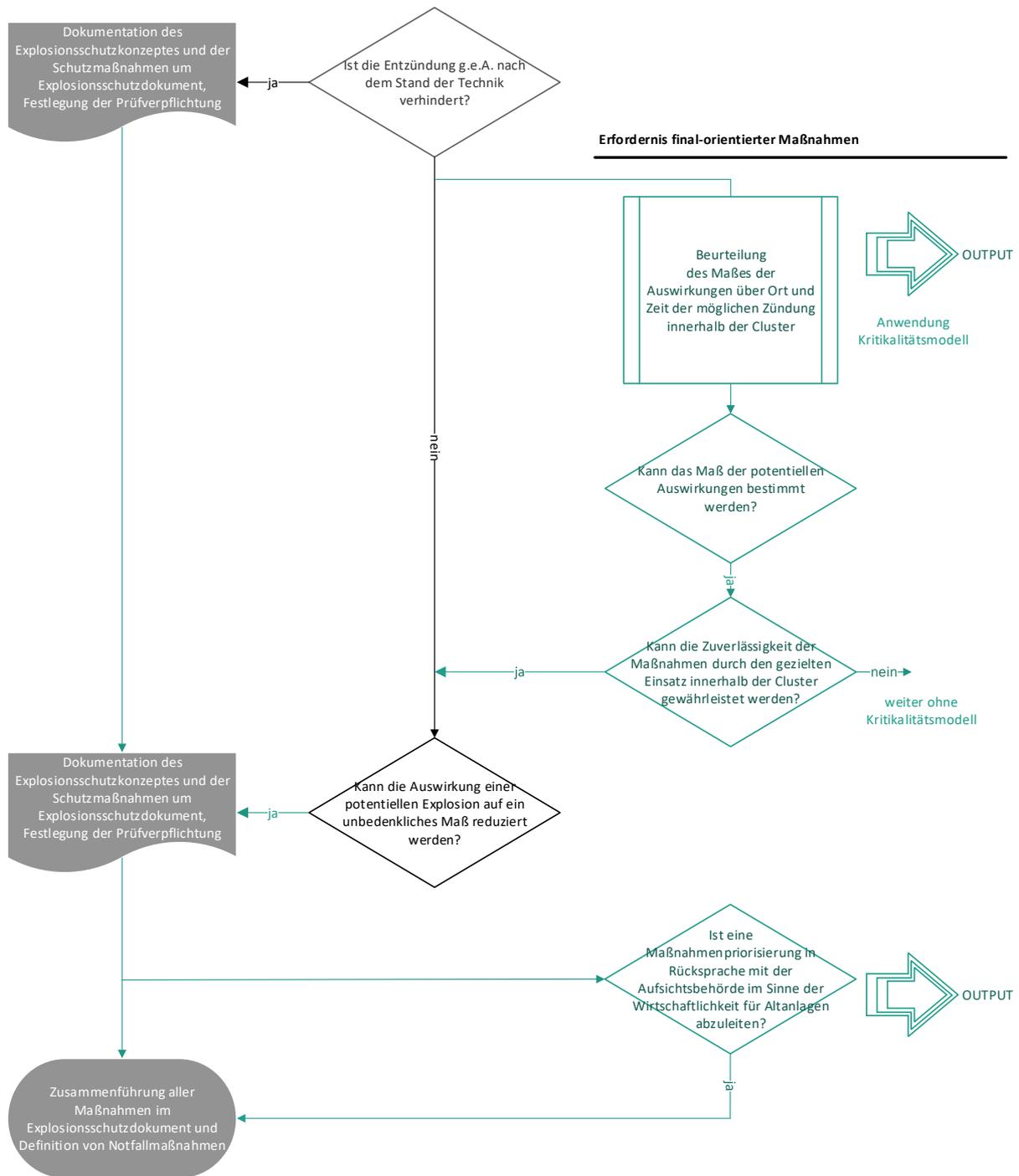
werden nicht die das übliche Maß überschreitenden Auswirkungen einer Explosion ausgegrenzt.

- Das monokausale Abfrageschema zum Erkennen und Vermeiden von Explosionsgefahren geht in die Möglichkeit der Bikausalität bei Schaffung eines erweiterten Inputs durch die Erhebung observabler Größen über. Sobald die Verlässlichkeit nicht sicher durch den Output beschreibbar gemacht werden kann, ist der Übergang in den bisherigen *Duktus* und eine weitere Bewertung ohne Nutzung des Kritikalitätsmodells die Folge.
- Ein frühzeitiger erfolgreicher Abschluss des erweiterten Vorgehens zur Explosions-Gefährdungsbeurteilung ist auch dann gegeben, wenn festgelegte Maßnahmen unter Nutzung des Kritikalitätsmodells nicht für das gesamte Subsystem sicher greifen, sondern nur innerhalb der tatsächlich wirkenden Koinzidenz. Sobald die Verlässlichkeit nicht sicher durch den Output beschreibbar gemacht werden kann, ist der Übergang in den bisherigen *Duktus* und eine weitere Bewertung ohne Nutzung des Kritikalitätsmodells die Folge.

Die starren Grenzen des *Duktus* werden durch dieses Vorgehen elastisch, ohne das hohe Maß an Sicherheit zu reduzieren, sondern gleiches Sicherheitsniveau zielorientiert zuverlässig zu erreichen und damit auch die Wirtschaftlichkeit im Blick zu behalten. Voraussetzung dafür ist die geschaffene Datengrundlage des Inputs.







**Bild 63:** Detaillierte abgeleitete Vorgehensweise eines „Bikausalen Duktus“ bei Teilvolumen explosionsfähiger Atmosphäre

# 8 Fazit und Ausblick

## Inhalt

---

8.1 Ergebnis.....	150
8.2 Diskussion und Ausblick.....	152
8.2.1 Ergänzung zum Stand der Technik Sprühtrocknung.....	155
8.2.2 Ergänzung zum Stand der Technik Brennofen .....	157

---

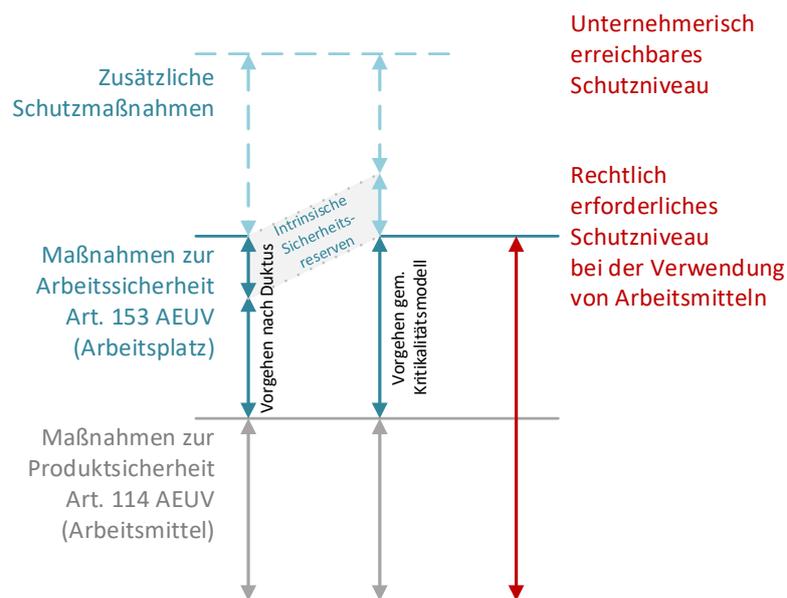
Mit dem abschließenden Kapitel 8 werden die Beiträge der bisherigen Ausführungen zum gegenwärtigen Stand der Technik sowie den identifizierten Herausforderungen herausgestellt. Diese Ergebnisse beziehen sich zum einen auf die zu erzielende Kompetenzbildung sowie insbesondere die Methodenoptimierung und zum anderen auf den Wissenszugewinn der Validierungsobjekte.

### 8.1 Ergebnis

Die Beschreibung von potentiell explosionsfähigen Gemischzuständen - insbesondere innerhalb geschlossener Apparaturen - und die Ableitung vorliegender Explosionsgefahren stellt die Betreiber regelmäßig vor Herausforderungen. Dies lässt sich neben den steigenden rechtlichen Anforderungen und dessen Detailierungsgrad für Neuanlagen auch durch betrieblichen Optimierungsbedarf des bislang geltenden Sicherheitskonzeptes aufgrund einer Effizienzsteigerung oder schlichtweg aufgrund einer notwendigen Anpassung an den Stand der Technik für Bestandsanlagen begründen. Auch unterstreicht die wiederkehrende und in Kapitel 1.1 beschriebene Motivation zweier in ihren Grundzügen gänzlich unterschiedlichen Anlagentypen die Notwendigkeit einer Kompetenzbildung zur Beurteilung einer Explosionsgefahr. Davon ausgehend wurde mit der ausführlichen Beschreibung der messtechnischen Möglichkeiten zur Datenerhebung und ihrer Auswertung zur Gewinnung observabler Größen mit Kapitel 4 und Kapitel 5

ein möglichst breites Spektrum von Analysetechniken vorgestellt und erfolgreich exemplarisch angewendet. Auch das Hinzuziehen klassischer Methoden wie der HAZOP-Analyse (Kapitel 3.2.2) oder die in Ansätzen normative Verfolgung der Zündquellenbewertung (Kapitel 4.3) liefern durch exemplarische Anwendung einen kompetenzbildenden Beitrag für den Beurteiler. Mit den Zwischenfazits der Kapitel 4.4 und Kapitel 5.4 konnte eine „Toolbox“ zur Erfüllung der Dokumentationspflicht für die Identifizierung eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches vorgestellt werden.

Die eingehende Fragestellung, ob Annahmen über den Gemischzustand auf Grundlage der berechneten mittleren Staub-/Gaskonzentrationen mittels Massenbilanzen bisweilen zu konservativ bewertet wurden und als eine der eingehenden Grundlagen zum Explosionsschutzkonzept zu einer Maßnahmenarchitektur mit intrinsischen Sicherheitsreserven führte, konnte mit der Gegenüberstellung von Berechnungen, Messergebnissen und sicherheitstechnischen Kenngrößen in Kapitel 4.2.4 und 5.2.4 für den jeweiligen Anwendungsfall verifiziert oder falsifiziert werden. Zur Erreichung des erforderlichen Schutzniveaus zur Betriebssicherheit sind diese benannten Sicherheitsreserven bei Anwendung des Duktus nach TRGS 720 und der unterstellten Vermutungswirkung Bestandteil der rechtlichen Erfordernisse. Unter Verwendung des Kritikalitätsmodells und der Ableitung eines risikoorientierten Schutzkonzeptes gehen diese „Reserven“ in den Bereich der zusätzlichen Schutzmaßnahmen des Betreibers über, die er zum Zwecke eines unternehmerisch erreichbaren Schutzniveaus wählt. Das rechtlich erforderliche Schutzniveau wird dennoch erreicht. Bild 4 ist dahingehend wie folgt zu erweitern:



**Bild 64:** Schutzniveaus zur sicheren Verwendung von Arbeitsmitteln unter Berücksichtigung der Verschiebung von Sicherheitsreserven

Zur Nutzbarmachung der gewonnenen Merkmale (observablen Größen) wurde ein Kritikalitätsmodell entwickelt, welches mit der Clusterung des Subsystems das Gemisch innerhalb geschlossener Apparaturen beschreibbar macht. Der Verfasser griff hierzu die gängige Bezifferung der Zoneneinteilung in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit und Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären auf und ergänzte diese um eine führende „Null“ (Kapitel 6.1.1). Entgegen der bewährten Zoneneinteilung beschreiben die Zonen 200, 210 und 220 jedoch die Näherung eines Gemisches in Teilvolumen des Subsystems an den Explosionsbereich. Grundlage für die Visualisierung des Modells lieferte die erweiterte Risikoformel, die diese beschreibenden Merkmale aufgreift und um die in der Dissertation im Fokus stehenden örtlichen und zeitlichen Koinzidenzbedingungen  $(t, x, y, z)$  ergänzt. Es ist dem Verfasser gelungen, dieses Modell als Bestandteil in ein optimiertes systematisches Vorgehen der Sicherheitsbetrachtung (einen bikausalen *Duktus*) zu integrieren und unter dessen Zuhilfenahme die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses ( $R_{Ex}(t, x, y, z)$ ) genauer zu charakterisieren. Dies wiederum führt zu einer Schärfung des Outputs - d. h. der Verlässlichkeitsaspekte, welche im Rahmen des Modells durch Z-Zuverlässigkeit, Ö-Ökonomie und S-Sicherheit definiert wurden. Die Bikausalität des erweiterten *Duktus* (Bild 63) ergibt sich somit aus der Nutzung einer Clusterung von Teilvolumen als Teil des Kritikalitätsmodells sowie der Möglichkeit, direkte Koinzidenzen in allen drei Stufen des Abfrageschemas erfolgreich in die Beurteilung zu integrieren (z. B. Bild 46). Gängige Vorgehen, wie die Bewertung der (technischen) Zuverlässigkeit von MSR-Einrichtungen, können gezielt am Wirkungsort der Koinzidenz ansetzen, ohne eine Gültigkeit der Reduzierungsstufe für das gesamte Subsystem gewährleisten zu müssen. Die Maßnahme wirkt somit „zum Teil“, jedoch effektiv und verlässlich. Kann diese Verlässlichkeit nicht sicher garantiert werden, ist ein Übergang in den bisherigen *Duktus* die Folge.

## 8.2 Diskussion und Ausblick

So wie die Kritikalitätsbewertung unter Nutzbarmachung observabler Größen nach heutigen Gesichtspunkten naturwissenschaftlicher Philosophen wie (La Laguna de Vera, R. und Ramge 2021) eher einer „*Pfadabhängigkeit*“ mit einer maximal „*inkrementell innovierenden*“ Wirkung zuzuordnen ist und denen der Sprunginnovation nachsteht, wird auch die klassische Denkweise der Forschungslogik nach (Popper 1976) durch die Aufstellung und Fortschreibung von Hypothesen und Theorien charakterisiert, die mit Erfahrung und (experimentellen) Beobachtungen überprüft werden. So auch in der vorliegenden Arbeit eines deduktiven Ansatzes zur Sicherheitsbetrachtung.

Aufgrund diverser Messgrößen, Analysetechniken, Messmethoden und Hersteller sowie Anlagentypen und brennbarer Stoffe sei zu erwähnen, dass die Machbarkeitsstudien und Messkampagnen schlussendlich nur beispielhaft die Erhebung observabler Größen abbilden. Auch führen die fehlende konkrete Ableitung von Maßnahmen dazu, dass das Kritikalitätsmodell im Hinblick auf die Maßnahmenableitung und dessen Erfüllung der Verlässlichkeitsaspekte final nicht als validiert bezeichnet werden können. Die Methodik der erweiterten systematischen Sicherheitsbetrachtung (Kapitel 1427.5) in Form einer iterativen Vorgehensweise, wie bereits der *Duktus* oder auch der *Doppelduktus*, vgl. (Lottermann 2015), lässt jedoch eine anwendungsbezogene Beantwortung zu.

Dennoch sind der Methodik Voraussetzungen zuzuschreiben, die diesen detaillierten Ansatz erschweren und im Bearbeitungsverlauf herausstachen. Dies betrifft insbesondere das Erfordernis zeitlicher und finanzieller Ressourcen. In der Regel unerprobte Messbereiche und Anwendungsfelder müssen z. T. aufwendig mittels Machbarkeitsstudien und Wiederholungsmessungen bis hin zu einer Anzahl statistisch auswertbarer Daten untersucht werden. Die Ausbildung von Superpositionen erschweren den Anwendungsbereich zusätzlich. Die Auswertung dieser gewonnenen Informationen eines jeden Subsystems im betrieblich interdisziplinären Expertenkreis resultieren in einem weiterhin erhöhten Zeitaufwand sowie der Notwendigkeit personeller Ressourcen.

Recherchen im Bearbeitungsverlauf sowie diese Studien zeigten, dass das beschriebene Vorgehen zur Informationsermittlung in seinen Zügen nicht unüblich ist, aber nicht das gängige Vorgehen im Rahmen einer betriebspraktischen Gefährdungsbeurteilung nach *Duktus* widerspiegelt, sondern in Ansätzen eher im Rahmen von Forschungsarbeiten vorzufinden ist. Um von den Erfahrungen der Anlagenbetreiber hin zu handfesten Schlüssen im Rahmen der Sicherheitsbetrachtung zu gelangen, sollte dies jedoch gängige Praxis sein, wohlwissend der Erschwernis aufgrund oben benannter Tatsachen.

Positiv hervorzuheben sind jedoch nicht nur die theoretisch erreichten Ziele hinsichtlich der Verlässlichkeit (wenngleich nicht praktisch anhand von Zahlen und Beispielen belegt), sondern auch, dass den detaillierten gesetzlichen Anforderungen genüge getan werden konnte, was die Erfüllung der Vermutungswirkung und somit eine Akzeptanz des Ansatzes vermuten lässt. Die Herausforderung dieser Erfüllung liegt zum Beispiel in den stetigen gesetzlichen Fortschreibungen, die sich z. T. im Detail verstecken und im betrieblichen Alltag, insbesondere der Klein- und mittelständischen Unternehmen, nicht zwingend ins Auge fallen. In diesem Zusammenhang sei auch auf die fehlenden Anforderungen an das Hinzuziehen eines Sachverständigen bzw. das fehlende Anforderungsprofil betrieblich benannter Explosionsschutzbeauftragter als

rechtlich undefinierter Begriff verwiesen. Doch genau dieser Punkt der gesetzlichen Novellierungen wird auch durch das Hinzuziehen externer Sachverständiger herausfordernd, kann er sich doch im Zuge seiner Bestellung in der Praxis z. T. nicht die zeitlichen Ressourcen erlauben, die Anlage im Detail kennenzulernen. Der Verfasser möchte anhand eigener Erfahrungen sowie von Erfahrungsaustausch die Behauptung aufstellen, dass die Qualität von Explosionsschutzdokumenten bisweilen unter diesen Gesichtspunkten leiden kann. Das beschriebene Vorgehen sowie die zu nutzende „Toolbox“ können den externen und internen Beurteilern bei den notwendigen Fragestellungen jedoch gezielt unterstützen.

Die Schaffung eines erweiterten Inputs sowie die Akzeptanz der vorgestellten Werkzeuge lassen im Ausblick auf die folgenden rechtlich zu schaffenden Voraussetzungen schließen:

- Der Einsatz von Prozessanalysetechniken ist Voraussetzung für die Sicherheitsbetrachtung von Neuanlagen, insofern valide Daten oder Simulationen nicht vorliegen.
- Die bisherigen Einzelanlagenbetrachtungen und ihre Anlageneckdaten sowie neu gewonnene Anlagendaten im Kontext der Bewertung von Explosionsgefahren und der Vergleichbarkeit mit sicherheitstechnischen Kenngrößen sind in einer zentralen Datenbank zusammenzutragen, inklusive eingesetzter Messprinzipien und getroffenen Annahmen.
- Die HAZOP-Analyse (oder vergleichbare Risikoanalysen) sind nicht nur für sicherheitsrelevante Anlagen der Störfallverordnung verpflichtend, sondern auch für Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen gemäß Gefahrstoffverordnung.

Eine Mindestanforderung ist jedoch in der Definition zu erwarten, welche Annahmen und Datengrundlagen als ausreichend anzusehen sind - „ausreichend“ im Sinne einer haftungssicheren Dokumentation.

Die vorgestellten Anlagen liefern Beispiele dahingehend, wie ungenau und z. T. sogar falsch grundlegende Berechnungsmodelle aufgrund von Massenbilanzen als Eingangsgröße für die Explosionsgefährdungsbeurteilung sein können. Diese sind nicht zwingend als konservativ anzusehen, sondern können im Gegensatz zur angenommenen gleichmäßigen Verteilung im Bemessungsvolumen unterhalb oder nahe der unteren Explosionsgrenze für einige Cluster auch eine deutliche Näherung an den idealen Explosionsbereich annehmen.

Die o. g. Forderungen würden nachhaltig dazu führen, die bislang notwendigen zeitlichen und finanziellen Ressourcen eines erweiterten Inputs zu reduzieren und legen sowohl Betreiber als auch Beurteiler und Prüfer oder Aufsichtsperson die verwendeten Grundlagen offen. Natürlich ist dem Verfasser bewusst, dass Anlagentypen sich im Detail unterscheiden können, dies jedoch

für die Bildung potentieller explosionsfähiger Gemische einen zeitgleich erheblichen Einfluss liefern kann. Eine große Datenbasis ist von Nöten, um dieses Ziel dennoch zu erreichen, ähnlich den seinerzeit aufwendig gewonnenen Ergebnissen einer großen Anzahl sicherheitstechnischer Kenngrößen. Da auch bei der Erfassung der Messdaten zur Konzentration und ihrer möglichen Clusterung zur Ausbildung von Teilvervolumen explosionsfähiger Gemische standardisierten Messprinzipien zu Grunde liegen, lässt sich wiederum eine Analogie der Sinnhaftigkeit eines derartigen Datenpools ableiten, denn auch sicherheitstechnische Kenngrößen können zum Teil nur näherungsweise aus der Datensammlung übernommen werden.

Um auf Grundlage des Abfrageschemas nach erweitertem *Duktus* ggf. in einem vergleichweisen früheren Schritt ein Explosionsschutzkonzept mit einem sicheren Anlagenzustand zu erreichen, sind Maßnahmen auch weiterhin mittels Zuverlässigkeit zu beschreiben. Dies kann im Zuge inhärenter Maßnahmen durch Konzentrationsbegrenzung und den Einsatz sicherheitsanalytischer Technologien der Fall sein, die - im Vergleich zu prozessanalytischen Technologien mit Fokus auf Produktqualität (siehe Kapitel 3.3) - für die Anwendung auf das Sicherheitskonzept Einzug finden. Neben der technischen Zuverlässigkeit von MSR-Einrichtungen ist das Anwendungsfeld der TRGS 725 auch auf „zuverlässige“ organisatorische Maßnahmen auszuweiten. Dies Bedarf jedoch weiteren Forschungsbedarf, insbesondere hinsichtlich eines akzeptierten Ansatzes und der Implementierung. Auch diesem Feld wurde in der Vergangenheit bereits Berücksichtigung geschenkt, stellt sich doch die Frage, ab wann eine Grundlage als verifiziert gilt. Gleiche Fragestellungen sind z. B. auf Problemstellungen bezüglich Zündwirksamkeiten von Glimmnestern zu übertragen und den z. T. bereits mehrfach durchgeführten Studien.

### **8.2.1 Ergänzung zum Stand der Technik Sprühtrocknung**

Die folgenden Ergänzungen zum Stand der Technik für die Trocknungskammer einer Sprühtrocknungsanlage beziehen sich im Wesentlichen auf die Ableitungen bezüglich der Charakterisierung der Gemischzustände aus den Messkampagnen aus Sicht des Verfassers, was die Verortung in das Kapitel zu Diskussion und Ausblick begründet.

Mit der (VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7) liegt dem Beurteiler ein für den präzisen Anwendungsfall der Sprühtrocknung aussagekräftige Rechtsgrundlage zur Verfügung, die im Speziellen auf die Explosions- und Brandgefahren eingeht und somit die übergeordneten gesetzlichen Grundlagen im Detail aufgreift und dem Bewerter verschiedener Bautypen Hilfestellung liefert. Aufgrund ihrer besonderen Spezifizierung und dem damit verbundenen Stellenwert, findet die Richtlinie auch international Akzeptanz. Bezogen auf die Charakterisierung über das Vorhandensein eines

explosionsfähigen Gemisches wird die Annahme formuliert, dass „*grundsätzlich mit dem Auftreten explosionsfähiger Staub Luft Gemische zu rechnen ist*“. Bezogen auf die Bedingungen hierzu werden darüber hinaus die folgenden Abhängigkeiten mit der novellierten Fassung der VDI-Richtlinie 2263, Blatt 7, vgl. (VDI Verein Deutscher Ingenieure 2023) formuliert.

- der Produktmenge und dem Luftvolumenstrom, in dem das Produkt getrocknet wird,
- der Produktmenge, die über das Pulvertransportsystem zugeführt wird,
- der unteren Explosionsgrenze (UEG) des Staubs unter Berücksichtigung des Einflusses der Lufttemperatur auf die UEG,
- der Aufteilung des Produkts in den Luftströmen innerhalb der Sprühtrocknungsanlage
- der Luftführung innerhalb der Trocknungskammer (die Umlenkung der Abluft zur Trocknungskammerdecke erhöht die Staubkonzentration in der Trocknungskammer des Trocknungssystems Konfiguration 6),
- der Bauform der Trocknungskammer (im konischen Teil der Trocknungskammer erhöht sich die Staubkonzentration, wenn die Abluft vorher abgeführt wird - siehe Trocknungssystem Konfiguration 1,3,4,5,6,9).

Damit sind alle Möglichkeiten einer Verteilung umrissen und werden mit der Beispielsammlung zur Zoneneinteilung visualisiert. Lediglich mit der Eindüsung wasserfeuchter Partikeln wird ein Cluster innerhalb der Trocknungskammer zugelassen, ausgedrückt in Zone 22.

Bisherige Sprühtrocknungsprozesse gehen von einer maximalen mittleren Staubkonzentration von  $80 \text{ g/m}^3$  im Apparatvolumen der Trocknungskammer aus, um eine gewünschte Trocknungsqualität überhaupt noch erreichen zu können. Multipliziert mit dem Faktor 2 bis 3 aufgrund der Rückführung, ergibt dies eine aufsummierte maximale Staubkonzentration von bis zu  $240 \text{ g/m}^3$ . Mit entsprechendem Sicherheitsabstand wird diese Größe ( $250 \text{ g/m}^3$ ) nach (Lottermann 2016) auch zur Berechnung der erforderlichen konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen herangezogen. Massenbilanzen eines modernen mehrstufigen Sprühtrockners zeigen jedoch, dass je nach Volumen der Trocknungskammer auch mit höheren mittleren Staubkonzentrationen von  $90 \text{ g/m}^3$  zu rechnen ist. Dies führt unter Zuhilfenahme des klassischen Berechnungsansatzes und mit gleichen Bewertungsmaßstäben (Multiplikation um den Faktor 3) zu einer Aufsummierung auf  $270 \text{ g/m}^3$ , wobei diese Werte lediglich für die Sommermonate gelten. Im Winter können technisch Staubkonzentrationen von bis zu  $330 \text{ g/m}^3$  erreicht werden. Insofern von einer Änderung des benannten Korrekturfaktors abgesehen werden soll, ist eine Trockenzumischung (z. B. mittels Rückführung) direkt in die Berechnung zur mittleren Konzentration zu ergänzen, was auch die Genauigkeit der Resultate erhöht. Die Begrenzung für  $\bar{c}$

auf maximal  $80 \text{ g/m}^3$  aufgrund der andernfalls nicht mehr zu gewährleistenden Trockenqualität kann in einigen modernen Sprühtrocknungsanlagen mit ebendieser Zumischung im Trocknungskammer-Zylinder ausgeschlossen werden, da das zugemischte Produkt bereits pulverförmig vorliegt.

Der beschriebene Stand der Technik geht von einer Multiplikation aufgrund der Rückführung in die Zerstäuberzone aus, was demnach auch zu einer erhöhten mittleren Staubkonzentration führt, ungeachtet zeitlicher und örtlicher Schwankungen. Aufgrund der durchgeführten Staubkonzentrationsmessungen wird ersichtlich, dass ebendiese örtlichen Schwankungen, ausgehend von der mittleren Konzentration um  $80 \text{ g/m}^3$ , eine bis zu 40fache Konzentrationssteigerung hervorrufen können. Dieser Trend ist jedoch lokal auf den Bereich der Rezirkulierung begrenzt, bei dem aufgrund der Prozessbedingungen, wie der Abluftpositionierung, auch mit der höchsten Konzentration im Subsystem der Trocknungskammer zu rechnen ist.

### **8.2.2 Ergänzung zum Stand der Technik Brennofen**

Die folgenden Ergänzungen zum Stand der Technik für den Brennofen beziehen sich im Wesentlichen auf die Ableitungen bezüglich der Charakterisierung der Gemischzustände aus den Messkampagnen aus Sicht des Verfassers, was die Verortung in das Kapitel zu Diskussion und Ausblick begründet.

Der rechtliche Rahmen bzgl. der Sicherheitsanforderungen für den Brennofen ergibt sich aus der DIN EN 1539, vgl. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2016b), und bezieht sich auf Trockner und Öfen, in denen brennbare Stoffe freigesetzt werden. Für die Sicherheitsanforderungen im Subsystem Feuerzone bzw. dem Subsystem der dort verorteten Gasbrennerbrücken gilt zudem die DIN EN 746-1 für industrielle Thermoprozessanlagen. Im Fokus steht hierbei jedoch erstgenannte normative Grundlage. Sie charakterisiert in Abhängigkeit von Trocknungstemperatur und dem Verhältnis zur prozentualen Erreichung der unteren Explosionsgrenze drei Betriebsbereiche und leitet demnach Mindestanforderungen zum Sicherheitskonzept ab. Die dazugehörige tabellarische Übersicht spiegelt die Rangfolge von Explosionsschutzmaßnahmen nach der ATEX-Richtlinie 1999/92/EG, vgl. (EU-Kommission 16.12.1999), wieder. Nach bisherigen Kenntnissen und der rechnerischen Bewertung der mittleren Gaskonzentration freigesetzter brennbarer Stoffe ergeben sich im Betriebsbereich „1“ Maßnahmen des inhärenten Explosionsschutzes; insbesondere hinsichtlich Überwachung und Aufrechterhaltung des Mindestvolumenstroms. Die durchgeführten Messungen bestätigen diese Einordnung und somit das derzeit geltende Explosionsschutzkonzept.

Der Feuerwechsel als Bestandteil des Normalbetriebes, welcher durchschnittlich alle 42 h stattfindet, kann mit diesem Diagramm dagegen nicht abgebildet werden. Auch die Umstellung zur Berechnung der mittleren Gaskonzentration in Abhängigkeit des zeitlichen Verlustes des Volumenstroms und die dabei verursachte linear ansteigende Gaskonzentration, konnte mit den Messungen nicht bestätigt werden. Dass eine zeitliche Abhängigkeit des Feuerwechsels jedoch den entscheidenden Faktor in der Kritikalitätsbewertung liefert, ist dem Berechnungsmodell gleichzusetzen. Annahmen zu Folge findet zur Zeit des Unterdruckverlustes in Brennkammer 4 (von insgesamt neun Brennkammern eines Feuerzuges) der höchste Anstieg gefahrdrohender Mengen explosionsfähiger Gemische - ob linear oder exponentiell - statt. Nach Interpretation der Messergebnisse der vorangegangenen Brennkammern (Deckel 1 - 3) nach Wiederherstellung des Zuges kann diesen Kammern aufgrund dessen eine Näherung der unteren Explosionsgrenze zugeschrieben werden. Folglich sind der Einstufung nach DIN EN 1539 die Anforderungen der explosionsschutztechnischen Regelwerke gegenüberzustellen. Mit der im Brennofen herrschenden Temperatur und der erreichten Gaskonzentration bei Feuerwechsel entfällt der Anwendungsbereich der Zuordnung von Betriebsbereichen nach normativem Diagramm, siehe Bild 38. Die Explosionsgefährdungsbeurteilung ist im Hinblick auf die Zuverlässigkeit inhärenter Maßnahmen zur Zonenreduzierung aufzuweiten, insofern eine Zonenfestlegung zur Erreichung von Reduzierungsstufen stattfand. Für die inhärenten Maßnahmen gilt dies für die über das Betriebskonzept hinausgehenden Notwendigkeiten. Auch die identifizierten betriebsüblichen technischen Störungen und Bedienerfehler, die zu der (noch immer konservativen) Annahme einer gefahrdrohenden Menge explosionsfähigen Gas-Luft-Gemisches führen, bestätigen den Abgleich zur Erfüllung von Anforderungen über die DIN EN 1539 hinaus, bzw. deren Gleichwertigkeit unter Berücksichtigung aller explosionsschutzrelevanter Verpflichtungen.

Für die bisherigen Stellungnahmen zum Explosionsschutz fehlten Verifizierungen der auf den Massenbilanzen basierenden mittleren Gaskonzentrationen. Diese Verifizierung konnte mit der Messkampagne zum Teil geliefert werden, können jedoch daraus entstehende Hypothesen nicht abschließend bestätigen. Weiterer Input ist insbesondere für das Subsystem Brennkammern der Vorwärmzone und die nachfolgenden Anlagenteile (Subsysteme) der Filter anzustreben. Derzeitige Annahmen kommen zu dem Schluss, dass eine Übertragung des explosionsfähigen Bereiches über die Ringleitung in die Filter nicht ausgeschlossen werden kann. Dies kann (je nach Erreichung des inhärenten Schutzziels) einen erheblichen Einfluss auf die erforderliche Anlagenauslegung und auf die ökonomische Belastung der Ertüchtigung haben. Die Verifizierung ist ausstehend.

Rechtliche Grundlagen speziell für den vorliegenden Anwendungsfall des Brennofens zur Primär-Aluminiumproduktion, ebenso für die weiteren Schritten der Wertschöpfungskette (z. B. Herstellung Grüner Anoden mittels Wärmeträgeranlage) bezüglich der Anforderungen im Explosions- und flankierenden Brandschutz in Analogie zur im vorangegangenen Kapitel benannten VDI-Richtlinie gibt es bislang nicht. Dies gilt sowohl für Bestandsanlagen, die über Dekaden existieren und sukzessive dem Stand der Technik anzupassen sind, ebenso für Neuanlage und der Fortentwicklung dieser Maßnahmenarchitektur im Vergleich sowie deren reduzierte Notwendigkeit aufgrund apparativ-technischer und prozessual-betrieblicher Optimierungen.

# Bilderverzeichnis

Bild 1: Forschungshypothese inhomogener Gemische .....	4
Bild 2: Elementevielzahl der Zielgrößen und deren Wechselwirkung, in Anlehnung an die Darstellung nach (Peterjohann 2020).....	8
Bild 3: Methodische Herangehensweise .....	11
Bild 4: Schutzniveaus zur sicheren Verwendung von Arbeitsmitteln.....	13
Bild 5: Branddreieck und Explosionstetraeder im Kontext der Maßnahmenrangfolge des Explosionsschutzes.....	14
Bild 6: Qualitative Abweichungsmöglichkeiten in den Prozessphasen der UEG-Bestimmung im 1 m <sup>3</sup> -Behälter (nach (Kues 2016)) .....	17
Bild 7: Vergleich experimentell und rechnerisch ermittelter UEGs (vgl. (Hesener et al. 2015)); links Berechnungsverfahren nach Wiemann [1], rechts Berechnungsverfahren nach Burghes-Wheeler [2].....	18
Bild 8: Standardabweichung für die Explosionskenngrößen brennbarer Stäube, vgl. (Bartknecht 1993).....	19
Bild 9: Beziehung „gefährliches explosionsfähiges Gemisch“ und „gefährliche explosionsfähige Atmosphäre“, nach (Losert 2018).....	23
Bild 10: Prüfung nach BetrSichV für überwachungsbedürftige Anlagen, nach (Hesener 2022) .....	26
Bild 11: Prozessschritte und Produktströme des Nass- und Trockenprozesses der Sprühtrocknung .....	30
Bild 12: Fließschema Sprühtrocknungsprozess (Kombination Typ G, Typ C gem. (VDI Verein Deutscher Ingenieure 2010) .....	31
Bild 13: Aufbau Brennofen, (Keller und Sulger 2007).....	36
Bild 14: Aufbau Brennkammer, inkl. Wärmeströmung (Vorderansicht).....	36
Bild 15: Prozessschritte und Produktströme des Anoden-Brennens .....	37
Bild 16: Angewandte Leitworte am Beispiel des Brennofens, nach (IVSS Sektion Chemie 2020) .....	39
Bild 17: Rauchgasentwicklung in der Anlagenumgebung nach Stromausfall, (Hydro Aluminium Rolled Products GmbH 2018a).....	40
Bild 18: Beispiele für Anlagen instantaner Zustände der Staubkonzentrationsverteilung, vgl. ....	49

Bild 19: Messgerät Labasys 100, rechts vgl. (MSE Meili AG 2011) .....	56
Bild 20: Messgerät SKG 5, rechts vgl. (FSA e.V.) .....	57
Bild 21: Schematische Darstellungen des Versuchsaufbau, vgl. (Maiwald et al. 2017a).....	58
Bild 22: Ausrichtung Messapparatur an MP 1 [links: Seitenansicht; rechts: Draufsicht] .....	59
Bild 23: Vergleich UEG - c, Turmdecke, vgl. (Maiwald et al. 2017a) .....	60
Bild 24: Vergleich UEG - c, Zylindermitte, vgl. (Maiwald et al. 2017a) .....	61
Bild 25: Konzentrations-Zeit-Diagramm, Konus (MP 3), 50 sec .....	61
Bild 26: Struktur der Regionen eines Luftstrahls (H.Z. Li, J. Wang, J.M. Fan 2009) .....	63
Bild 27: Gemessenes Partikelgeschwindigkeitsprofil MP 4, Konus.....	64
Bild 28: Zusammenhang zw. minim. MZE und Zündverzögerungszeit (Turbulenz), vgl. (Bartknecht 1987).....	66
Bild 29: Zusammenhang der Zündquellendefinitionen nach (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2016a), ergänzt um (Barth 2023) .....	68
Bild 30: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 4.1 - 4.2 (Teil 1) ...	73
Bild 31: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 4.1 - 4.2 (Teil 2) ...	74
Bild 32: Temperaturverläufe aller Brennkammern, inkl. Feuerwechsel.....	79
Bild 33: Messprinzip Infrarot-Gassensor (NDIR), nach (Wiegleb).....	86
Bild 34: Messprinzip Flammenionisationsdetektor (FID), nach (Förster et al. 2019) .....	87
Bild 35: Messaufbau inkl. Entnahmesonde am Brennofen Deckel 3.....	87
Bild 36: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.....	88
Bild 37: Vergleich der rechnerisch ermittelten Gaskonzentration zu den gemessenen flüchtigen brennbaren Bestandteilen im Gasgemisch .....	89
Bild 38: Betriebsbereiche für Trockner Typ A, gem. DIN EN 1539.....	90
Bild 39: Messergebnisse Deckel 2 und Deckel 3, 08.03.2022 für CO und Cges (rechte Ordinate) sowie CO <sub>2</sub> und O <sub>2</sub> (linke Ordinate) in Vol% .....	92
Bild 40: Diagramm zur Trendableitung in Abhängigkeit der Zeit des Feuerwechsels.....	94
Bild 41: Konzentrationsverhältnisse im Dreistoffsystem.....	95
Bild 42: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 5.1 - 5.2 (Teil 1) ...	99
Bild 43: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 5.1 - 5.2 (Teil 2) .	100
Bild 44: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse aus Kapitel 5.1 - 5.2 (Teil 3) .	101
Bild 45: Kritikalitätsmodell basierend auf dem Ansatz der mittleren Staubkonzentration....	106
Bild 46: Kritikalitätsmodell basierend auf den Messergebnissen zur Staubkonzentration....	108
Bild 47: Kritikalitätsmodell basierend auf dem Ansatz der mittleren Gaskonzentration .....	109
Bild 48: Kritikalitätsmodell basierend auf den Messergebnissen zur Gaskonzentration.....	110

Bild 49: Superposition, exemplarisch Trocknungskammer .....	112
Bild 50: Zündversuche im Hartmannrohr von Verhältnis Konzentration und Feuchtigkeit (rot: keine Zündung; grün: Zündung) .....	117
Bild 51: Lokalisierung möglicher Glimmnestbildungen über den Turmquerschnitt eines Sprühtrockners .....	119
Bild 52: Charakteristische Explosionsdruckverläufe gem. DIN EN 14491 .....	121
Bild 53: Sicherheitstechnische Kenngrößen $p_{\max}$ und $(dP/dt)$ des exemplarischen Milchpulvers .....	123
Bild 54: Auswirkungen einer Explosion und dessen Einwirkung auf Mensch und Umgebung, nach (Pepperl+Fuchs).....	125
Bild 55: Versuchsmodell einer nicht-entkoppelten Trocknungskammer zur Auswirkungsbetrachtung, vgl. (Kulosa 2017).....	128
Bild 56: Temperaturverlauf der Zündversuche im Fließbett, vgl. Kulosa 2017 .....	129
Bild 57: Versuchsmodell inhomogener Gemische zur Auswirkungsbetrachtung (Legende: grün: 100% O <sub>2</sub> , gelb: größer/gleich UEG, rot: innerhalb Explosionsbereich), vgl. (Jung 2018)....	131
Bild 58: Zusammenhang von Kritikalitätsmodell und experimentellen Bewertungen .....	133
Bild 59: Zielkonflikt bei der Herstellung von Unternehmenssicherheit .....	138
Bild 60: Risikobewertung an den Schnittstellen von Controller und Sicherheitsfachkraft....	139
Bild 61: Verlässlichkeitsaspekte des ZÖS-Konstrukts.....	141
Bild 62: Abstrahierte abgeleitete Vorgehensweise eines "Bikausalen Duktus" bei Teilvolumen explosionsfähiger Atmosphäre .....	143
Bild 63: Detaillierte abgeleitete Vorgehensweise eines „Bikausalen <i>Duktus</i> “ bei Teilvolumen explosionsfähiger Atmosphäre .....	149
Bild 64: Schutzniveaus zur sicheren Verwendung von Arbeitsmitteln unter Berücksichtigung der Verschiebung von Sicherheitsreserven .....	151

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug HAZOP-Analyse, „zu geringer Unterdruck“ .....	40
Tabelle 2: Analysetechniken zur Bestimmung observabler Größen, nach (Bakeev 2010).....	44
Tabelle 3: Vergleich relevanter stofflich, prozessual, apparativer Bedingungen .....	46
Tabelle 4: Einflussparameter und resultierende Trends auf die Untere Explosionsgrenze.....	52
Tabelle 5: Exemplarische Zündquellenbewertung (Auszug Exotherme Reaktion).....	71
Tabelle 6: Anteile flüchtiger Bestandteile beim Anodenbrennen .....	79
Tabelle 7: Sicherheitstechnische Kenngrößen relevanter flüchtiger Bestandteile.....	80
Tabelle 8: Messkomponenten und zugeiwesenes Messverfahren.....	85
Tabelle 9: Faktorielle Versuchsplanung (Auszug für < 125 µm).....	116
Tabelle 10 Merkmale experimentell hergestellter Zündquellen .....	128

# Literaturverzeichnis

Amyotte, P. R.; Chippett, S.; Pegg, M. J. (1988): Effects of turbulence on dust explosions. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 1988 (Volume 14, Issue 4), S. 293–310.

ATEX Explosionsschutz GmbH (2010): Explosion Protection for Dairy Food Industry. Unter Mitarbeit von F. Alfert, W. Kaar, D. A. Guaricci und D. Barry. Online verfügbar unter [http://atexus.com/explosion\\_protection\\_the\\_dairy\\_industry.pdf](http://atexus.com/explosion_protection_the_dairy_industry.pdf), zuletzt aktualisiert am 24.08.2010, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Backsmann, M. (2017): Analyse und Optimierung von Prozessparametern bei der Herstellung pulverförmiger Säuglingsmilchnahrung. Braune Partikel Reduktion. Bachelor-Thesis. Hochschule Fulda, Fulda. Fachbereich Lebensmitteltechnologie.

Bakeev, K. A. (2010): Process analytical technology. Spectroscopic tools and implementation strategies for the chemical and pharmaceutical industries. 2nd ed. Chichester, West Sussex: Wiley.

Barth, U. (2018): Betriebssicherheit überwachungsbedürftiger Anlagen. Vorlesung (PO17 MScS SSI-b BüA) im Masterstudiengang Sicherheitstechnik. Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik, 2018.

Barth, U. (2019): Austausch zum Promotionsvorhaben. Wuppertal, 11.2019. Persönliches Gespräch an K. Maiwald.

Barth, U. (2023): Fachlicher Austausch. Wuppertal, 06.01.2023. persönliches Gespräch an K. Maiwald.

Barth, U.; Grund, S.; Losert, O. (2020): Aus einem Duktus werden zwei. Bewährtes und Neues bei der Sicherheitsbetrachtung zur betrieblichen Explosionsgefahr. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Sichere Handhabung brennbarer Stäube 2020. VDI-Berichte Nr. 2376. 1. Auflage. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI-Berichte, 2376), S. 123–143. Online verfügbar unter [https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL\\_Praevention/Explosionsschutzportal/Dokumente/Aktuelles/DUKTUS\\_VDI-Berichte\\_2376\\_\\_Auszug\\_.pdf](https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL_Praevention/Explosionsschutzportal/Dokumente/Aktuelles/DUKTUS_VDI-Berichte_2376__Auszug_.pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Bartknecht, W. (1987): Staubexplosionen. Ablauf und Schutzmaßnahmen. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.

Bartknecht, W. (1993): Explosionsschutz. Grundlagen und Anwendung. Unter Mitarbeit von G. Zwahlen. Berlin: Springer Berlin.

Bartknecht, W.; Pellmont, G. (2018): Entwicklung der Explosionstechnik. Grundlagen und Anwendung. Sicherheitskenngrößen. 6 Bände. Basel (Entwicklung der Explosionstechnik, 1).

Berghaus, C. (2016): Reproduzierbarkeit der Glimmnestherstellung zur Untersuchung des Verhaltens in partikelbeladenen Strömungen. Bachelorthesis. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fachgebiet Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung.

Bertsche, B.; Beyerer, J.; Digmayer, C. et al. (2018): Integrative Theorie der Verlässlichkeit (iTV) für soziotechnische Systeme (STS), S. 59–72. Online verfügbar unter [http://web.archive.org/web/20181117000045/http://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/10/acatech\\_DISKUSSION\\_Systemtheorie\\_WEB.pdf](http://web.archive.org/web/20181117000045/http://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/10/acatech_DISKUSSION_Systemtheorie_WEB.pdf), zuletzt geprüft am 11.03.2023.

Berufsgenossenschaftliche Regel für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit (2007): BGR 104: Explosionsschutz-Regeln. Sammlung technischer Regeln für 2007. Online verfügbar unter [file:///C:/Users/A201078/OneDrive%20-%20Norsk%20Hydro%20ASA/13\\_DISS/01\\_Literatur/00\\_Gesamt/BGR%20104.pdf](file:///C:/Users/A201078/OneDrive%20-%20Norsk%20Hydro%20ASA/13_DISS/01_Literatur/00_Gesamt/BGR%20104.pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Beyer, M. (2004): Systematische Zündquellenbewertung an explosionsgeschützten mechanischen Geräten. In: *Technische Überwachung* 2004, 2004 (Bd. 45, Nr. 3 - März), S. 27–31. Online verfügbar unter [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_3/explosionsschutz/Veroeffentlichungen/373/zuendgefahrenbewertung.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_3/explosionsschutz/Veroeffentlichungen/373/zuendgefahrenbewertung.pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

BG RCI (2020): PAAG/HAZOP I - Eine Methode zur Sicherheitsbetrachtung an verfahrenstechnischen Anlagen. Basisseminar. Qualifizierungsangebot der BG RCI - Anlagensicherheit. BG RCI. Maikammer, 27.01.2020.

BG RCI (2023a): Welche Betriebszustände gehören hinsichtlich der Zoneneinteilung gemäß Anhang 1 Nr. 1.7 der Gefahrstoffverordnung zum „Normalbetrieb“? 2.21. EXINFO. Hg. v. BG RCI Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie. Online verfügbar unter <https://www.bgrci.de/exinfode/ex-schutz-wissen/antworten-auf-haeufig-gestellte-fragen/explosionsschutz/2-umsetzung-der-explosionsschutz-regeln-ex-rl-dguv-regel-113-001/221-welche-betriebszustaende-gehoren-hinsichtlich-der-zoneneinteilung-gemaess-anhang-1-nr-17-der-gefahrstoffverordnung-zum-normalbetrieb>, zuletzt geprüft am 19.03.2023.

BG RCI (2023b): Wie unterscheidet sich die Zündgefahrenbewertung bereits in Verkehr gebrachter Maschinen von der neuer Maschinen? 3.15. EXINFO. Hg. v. BG RCI

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie. Online verfügbar unter <https://www.bgrci.de/exinfode/ex-schutz-wissen/antworten-auf-haeufig-gestellte-fragen/explosionsschutz-an-maschinen/315-wie-unterscheidet-sich-die-zuendgefahrenbewertung-bereits-in-verkehr-gebrachter-maschinen-von-der-neuer-maschinen>, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Bundesanzeiger Verlag GmbH (2022): Bundesgesetzblatt Teil I 2000 Nr. 19 vom 02.05.2000. Verordnung zur Umsetzung EG-rechtlicher Vorschriften betreffend die Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen. Köln. Online verfügbar unter [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl100s0603.pdf%27%5D#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl100s0603.pdf%27%5D\\_\\_1663414595573](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl100s0603.pdf%27%5D#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl100s0603.pdf%27%5D__1663414595573), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Recommendations For Fire Prevention In Spray Drying Of Milk Powder (1986). Doc 128. Unter Mitarbeit von Commission B - Technology & Engineering. The Hague (Netherlands).

Compes, P. C. (Hg.) (1982): Risiken komplizierter Systeme - ihre komplexe Beurteilung und Behandlung. GfS-Sommer-Symposium '79. Wuppertal. Gesellschaft für Sicherheitswissenschaft (GfS). 2. Aufl.

Custer, R.; Fischer, K.; Schubert, M.; Güngerich, A. (2016): Grenzkosten als Festsetzung im Rahmen von Nutzen-Kosten-Analysen für Sicherheitsmassnahmen. Schlussbericht. Matrisk GmbH. Affoltern a.A. (Schweiz). Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/320076056\\_Grenzkosten\\_als\\_Festsetzung\\_im\\_Rahmen\\_von\\_Nutzen-Kosten-\\_Analysen\\_fur\\_Sicherheitsmassnahmen](https://www.researchgate.net/publication/320076056_Grenzkosten_als_Festsetzung_im_Rahmen_von_Nutzen-Kosten-_Analysen_fur_Sicherheitsmassnahmen), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Dammann, L. (2015): Brand- und Staubexplosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen der Milchindustrie. In: REMBE GmbH Safety+Control (Hg.): REMBE Fachtagung. Entwicklungen und Trends im (konstruktiven) Explosionsschutz. Brilon, 22.-23.09.2015, S. 77–97.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.: GESTIS-Stoffdatenbank. Online verfügbar unter <https://gestis.dguv.de/>, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2007): Schutzsysteme zur Druckentlastung von Gasexplosionen. DIN EN 14994:2007. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2009): Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen, Teil 1: Grundlagen und Anforderungen. DIN EN 13463-1:2009. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2012): Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen. DIN EN 14491:2012. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2013): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Massenkonzentration des gesamten gasförmigen organisch gebundenen Kohlenstoffs – Kontinuierliches Verfahren mit dem Flammenionisationsdetektor. DIN EN 12619:2013. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2016a): Explosionsfähige Atmosphären - Teil 36: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären - Grundlagen und Anforderungen. DIN EN ISO 80079-36:2016. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2016b): Trockner und Öfen, in denen brennbare Stoffe freigesetzt werden - Sicherheitsanforderungen. DIN EN 1539:2016. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2017a): Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen und Dämpfen und Bestimmung der Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) für brennbare Gase und Dämpfe. DIN EN 1839:2017. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2017b): Emissionen aus stationären Quellen - Bestimmung der Massenkonzentration von Kohlenmonoxid - Standardreferenzverfahren: Nicht-dispersive Infrarotspektrometrie. DIN EN 15058:2017. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Drost, D. (2017): Qualitative und sensorische Beurteilung von Glimmnestern in pneumatischen Fördersystemen. Bachelorthesis. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fachgebiet Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung.

Dyrba, P. (2009): Verkleinerung des Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5. Diplomarbeit. Fachhochschule Heidelberg und FSA e.V., Heidelberg.

Eckhoff, R. (1993): Dust explosion research. State-of-the-art and outstanding problems. In: *Journal of Hazardous Materials* 1993 (35), S. 103–117.

Eckhoff, R. (2003): Dust Explosions in the Process Industries. Identification, Assessment and Control of Dust Hazards. 3. Aufl. s.l.: Elsevier professional.

ESCIS (2001): Trocknen von Feststoffen. Schriftenreihe Sicherheit. 2. vollständig überarbeitete Auflage. Expertenkommission für Sicherheit in der Chemischen Industrie der Schweiz. Basel (Switzerland) (Heft 6).

EU-Kommission (16.12.1999): Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können. ATEX 1999/92/EG. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0092&from=DE>, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

EXAM BBG Prüf- und Zertifizierer GmbH (2004): Gutachtliche Stellungnahme zum Explosionsschutzkonzept einer Ofenanlage zum Brennen von Kunstkohle/Carbon. Unter Mitarbeit von U. Hesener und K. Wörsdörfer. Bochum, 02.03.2004 (1100/002/04 BVS-Wö).

Federrath, H. (Hg.) (2005): Ansätze zur Evaluierung von Sicherheitsinvestitionen. Sicherheit - Schutz und Zuverlässigkeit. Regensburg, 8.04.2005. Lehrstuhl Management der Informationssicherheit. Bonn: Gesellschaft für Informatik (GI-Edition Proceedings, 62).

fmlld-Förder-Misch-Mess-Lager und Dosiertechnik-Vertriebsges. m.b.H. (2023): Hammermühlen. Rohrbrunn. Online verfügbar unter <https://www.fmlld.at/?product=hammermuehlen>, zuletzt geprüft am 18.02.2023.

Food and Drug Administration (FDA) (2004): Guidance for Industry PAT - A Framework for Innovative Pharmaceutical Development, manufacturing, and Quality Assurance. Online verfügbar unter <https://www.fda.gov/media/71012/download>, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Förster, J.; Kuipers, W.; Lenz, C.; Ziesche, S.; Bechold, F. (2019): An autonomous flame ionization detector for emission monitoring. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 2019, 2019, S. 67–73. Online verfügbar unter <https://jsss.copernicus.org/articles/8/67/2019/>, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Frauendorfer, E.; Hergeth, W.-D. (2016): Prozessanalytik bei der Zerstäubungstrocknung. Beispiele und Herausforderungen. In: *Chemie Ingenieur Technik* (88, No. 6), S. 777–785.

Freytag, H. (Hg.) (1965): Handbuch der Raumexplosionen. Unter Mitarbeit von F. Boberg. Weinheim: Verlag Chemie.

FSA e.V.: Staubkonzentrationsmessung mit dem SKG 5. Unter Mitarbeit von Dirk Lorenz. Mannheim.

GEA Niro A/S (2015): Milchpulvertechnologie. Online verfügbar unter [http://www.niro.com/niro/cms-resources.nsf/8b1b2ddcca6e3e4bc1256dde0033bfc1/FB34FC2E0AB7DDADC1257569005160DE/\\$FILE/de\\_MilchpulvertechnologieBuch\\_2\\_Spr%FChrocknung.pdf](http://www.niro.com/niro/cms-resources.nsf/8b1b2ddcca6e3e4bc1256dde0033bfc1/FB34FC2E0AB7DDADC1257569005160DE/$FILE/de_MilchpulvertechnologieBuch_2_Spr%FChrocknung.pdf); heute:

<https://www.yumpu.com/de/document/read/51419312/milchpulvertechnologie>, zuletzt aktualisiert am 2015, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

TRGS 725, Januar 2016: Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre. Online verfügbar unter [file:///C:/Users/A201078/Downloads/TRGS-725%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/A201078/Downloads/TRGS-725%20(2).pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

TRGS 720, Juli 2020: Gefährliche explosionsfähige Gemische. Online verfügbar unter [file:///C:/Users/A201078/Downloads/TRGS-720%20\(11\).pdf](file:///C:/Users/A201078/Downloads/TRGS-720%20(11).pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

TRGS 724, Juli 2019: Gefährliche explosionsfähige Gemische. Online verfügbar unter [file:///C:/Users/A201078/Downloads/TRGS-724%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/A201078/Downloads/TRGS-724%20(1).pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Gehrmann, D.; Esper, G.; Schuchmann, H. (2009): Trocknungstechnik in der Lebensmittelindustrie. 1. Aufl. Hamburg: B. Behr's Verlag GmbH & Co. KG.

Grund, S. (2022): Fachlicher Austausch. Brilon, 21.11.2022. persönliches Gespräch an K. Maiwald.

Grund, S.; Wenzel, M.; Gehrke, M. (2010): Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen. Praxisorientierte Umsetzung von Explosionsschutzkonzepten in der Nahrungsmittelindustrie. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Nürnberg, 16. und 17. November 2010, VDI-Berichte 2096. VDI Wissensforum GmbH; VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt; Fachtagung mit Ausstellung Sichere Handhabung Brennbarer Stäube. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2096), S. 1–14.

H.Z. Li, J. Wang, J.M. Fan (2009): Analysis and modelling of particle velocities in micro-abrasive air jet. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2009, 09.06.2009 (49), S. 850–858.

Hartung, A. (2011): Prozess Analytische Technologien "PAT" zur Optimierung von Wirbelschichtgranulationsprozessen. Dissertation. Johannes Gutenberg-Universität, Mainz. Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften.

Hauert, F.; Fogt, H.; Vogl, A.; Wennerberg, D.; Radandt, S. (1996a): Staubverteilung und Geschwindigkeitsparameter in einem pneumatisch befüllten Silo mit numerischen Simulationen. In: VDI Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Berichte 1272. Tagung Nürnberg, 23. bis 25. Oktober 1996. Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Düsseldorf. Kommission Reinhaltung der Luft. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 1272).

Hauert, F.; Vogl, A. (1995): Measurement of Dust Cloud Characteristics in Industrial Plants (PL 910695).

- Hauert, F.; Vogl, A.; Radandt, S. (1996b): Turbulenz und Staubkonzentration beim Befüllen eines 12-m<sup>3</sup>-Silos. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 1996, 1996 (Nr. 56), S. 375–381.
- Helten, E. (1974): Wahrscheinlichkeitsrechnung. In: J. van Koolwijk und M. Mayser-Wieken (Hg.): *Techniken der empirischen Sozialforschung*, Bd. 6, S. 9–38.
- Hesener, U. (2022): Explosionsschutz in der chemischen Industrie - Technische Grundlagen. Qualifizierungsangebot der BG RCI. BG RCI. Maikammer, 12.05.2022.
- Hesener, U.; Beck, M. (2015): Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben. Kann man das Verhalten außerhalb atmosphärischer Bedingungen abschätzen? In: *Technische Sicherheit* 2015 (Bd. 5, Nr. 6 - Juni), S. 25–28.
- Hesener, U.; Beck, M.; Kampe, B. (2015): Sicherheitstechnische Kenngrößen von Stäuben bei nicht-atmosphärischen Bedingungen. Hg. v. DEKRA EXAM GmbH. Bochum.
- Hesener, U.; Reinecke, M. (2012): Staubexplosionsrisiko an Mischern mit bewegten Werkzeugen zur Erstellung und Abgrenzung möglicher Explosionsschutzkonzepte. Forschungsbericht. Projekt Nr. 617.0 - FP290. Hg. v. DEKRA EXAM GmbH. Bochum.
- Himstedt, M.; Beyer, M. (2004): Explosionsgeschützte Rührwerke. Beispiele für eine Zündquellenbewertung. In: *Technische Überwachung* 2004, 2004 (Bd. 45, Nr. 5 - Mai), S. 36–40. Online verfügbar unter [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_3/explosionsschutz/Veroeffentlichungen/373/ruehrwerke.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_3/explosionsschutz/Veroeffentlichungen/373/ruehrwerke.pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.
- Hirsch, W.; Brandes, E. (2014): Sicherheitstechnische Kenngrößen bei nichtatmosphärischen Bedingungen. Gase und Dämpfe. Hg. v. Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Braunschweig.
- Holden, I.; Bergli, K. (2003): NEC -DRAFT. Internal Report, 29.04.2003.
- Hydro Aluminium Rolled Products GmbH (2018a): Ereignis Benachrichtigung - Stromausfall der GRA im Brennbetrieb. Neuss, 02.03.2018. Ereignisdatenbank. Intranet Hydro GmbH.
- Hydro Aluminium Rolled Products GmbH (2018b): NE010302 SOP Verhalten bei Stromausfall. Standard Operational Procedure (SOP). Unter Mitarbeit von J. Schöwerling, 01.06.2018.
- Inburex Consulting GmbH (2006): Explosionsschutzmaßnahmen für einen Elektroden-Brennofen der Hydro Aluminium Deutschland GmbH, Stade. Unter Mitarbeit von B. Broeckmann und S. Schwing, 14.02.2006 (Ex/3077/06).

IVSS Sektion Chemie (2020): Das PAAG-/HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden. Risikobeurteilung in der Anlagensicherheit. 5. Ausgabe 3/2020. Heidelberg: IVSS Sektion Chemie. Online verfügbar unter [https://downloadcenter.bgrci.de/resource/downloadcenter/downloads/issa-01\\_Gesamtdokument.pdf](https://downloadcenter.bgrci.de/resource/downloadcenter/downloads/issa-01_Gesamtdokument.pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Jung, S. (2018): Explosionsverhalten von partiell explosionsfähigen Atmosphären in Behältern. Masterthesis. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.

Kaack, J. (2012): Performance Measurement für die Unternehmenssicherheit. Entwurf eines Kennzahlen- und Indikatorensystems und die prozessorientierte Implementierung. Wiesbaden: Gabler Verlag (SpringerLink Bücher).

Keller, F.; Sulger, P. O. (2007): Anode Baking. Baking of Anodes for the Aluminium Industry: R&D Carbon Ltd.

Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH (1999): 50 Jahre Vibra Traditionelles Familienunternehmen setzt auf Innovation. Online verfügbar unter <https://prozesstechnik.industrie.de/allgemein/50-jahre-vibra-traditionelles-familienunternehmen-setzt-auf-innovation/#slider-intro-3>, zuletzt aktualisiert am 01.02.1999, zuletzt geprüft am 18.02.2023.

Kues, L. (2016): Bestimmung und Berechnung der unteren Explosionsgrenze als sicherheitstechnische Kenngröße zur Beurteilung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre. Abhängigkeiten und Unsicherheiten. Bachelor-Thesis. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik.

Kulosa, J. (2017): Auswirkungen von Brandereignissen in Fließbetтанlagen. Bachelor-Thesis. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik;

La Laguna de Vera, R.; Range, T. (2021): Sprunginnovation. Wie wir mit Wissenschaft und Technik die Welt wieder in Balance bekommen. Berlin: Econ.

Lehmann, G.; Nieke, W. (2000): Zum Kompetenz-Modell. Online verfügbar unter [https://www.sozialberufe.net/fileadmin/daten/formulare/Einf%C3%BChrung\\_kompetenzorientierter\\_Unterricht.pdf](https://www.sozialberufe.net/fileadmin/daten/formulare/Einf%C3%BChrung_kompetenzorientierter_Unterricht.pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Leksin, A.; Barth, U.; Laudénbacher, S. (2014): AB-/Brandverhalten von Stäuben im Fließbett - Modifikation der Brennprüfung nach VDI 2263 Blatt 1. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Sichere Handhabung brennbarer Stäube // VDI-Fachtagung mit Ausstellung Sichere Handhabung Brennbarer Stäube. Nürnberg, 21. und 22. Oktober 2014, Bd. 2225. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2225), S. 1–15.

Leksin, A.; Maiwald, K.; Kues, L.; Barth, U. (2017): Sicherheitstechnische Kenngrößen als Grundlage zur Charakterisierung des Ab-/Brandverhaltens im quasi-stationären Zustand. In: *Technische Sicherheit* 2017 (Bd. 7, Nr.6 - Juni), S. 30–33.

Liske, B. (2016): Analyse der chemischen und physikalischen Selbsterwärmungsprozesse von Milchpulverablagerungen. Ein Phänomen in Sprühtrocknungsanlagen. Masterthesis. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik, Lehrstuhl Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung.

Liske, B. (2018): Characterization of effective ignition sources. Final Report: Part 3. In: K. Maiwald, B. Liske, L. Kues, U. Barth und P. Lerena (Hg.): Final Report. Explosion Protection of Spray Dryers.

Lorenz, D. (2005): Gefahr erkannt, Gefahr gebannt. Eine neue zuverlässige Detektionsmethode für Glimmnester. erschienen in VDI-Berichte 1873. Hg. v. Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. (FSA e.V.). Mannheim. Online verfügbar unter [https://www.fsa.de/fileadmin/user\\_upload/forschung/brand\\_und\\_explosionschutz/glimmnestdetektion\\_vdiberichte1873.pdf](https://www.fsa.de/fileadmin/user_upload/forschung/brand_und_explosionschutz/glimmnestdetektion_vdiberichte1873.pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Losert, O. (2018): Arbeitsschutzregelungen zum Explosionsschutz. Änderungen der Umsetzung europäischer Richtlinien 2015 und aktueller Stand. In: *Technische Sicherheit*, 2018 (Bd. 8, Nr. 11/12 - November/Dezember), S. 55–59.

Lottermann, J. (2012): Ansätze zur integrierten Brand- und Explosionssicherheit. Entwicklung, Validierung und normative Verankerung einer bilateralen, kohärenten Beurteilungssystematik am Beispiel staubführender Anlagen. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fachbereich D - Abt. Sicherheitstechnik.

Lottermann, J. (2016): Fachlicher Austausch. Wuppertal, 2016. persönliche Korrespondenz an K. Maiwald.

Lühr Filter GmbH: Schlauchfilter. Stadthagen. Online verfügbar unter <https://www.luehr-filter.de/lieferspektrum/schlauchfilter>, zuletzt geprüft am 18.02.2023.

Maiwald, K. (2016): Erfahrungen in der Beurteilung von Brand- und Explosionsgefährdungen unkonventioneller Sprühtrocknungsprozesse. In: 11. GreCon-Brandschutzsymposium. Sicherheit vor Staubbränden und Explosionen in der Industrie. Hannover, 14.-15.04.2016, S. 39–42.

Maiwald, K. (2017a): Dust-air mixtures in non-conventional spray dryers in the context of explosion risk. In: REMBE GmbH Safety+Control (Hg.): REMBE Safety Days 2017 Spray Dryer. Brilon, 28.-29.11.2017.

- Maiwald, K. (2017b): Dust-air mixtures in non-conventional spray dryers in the context of explosion risk. Rembe Safety Days - Spray Dryer 2017. REMBE GmbH Safety+Control. Brilon, 2017.
- Maiwald, K. (2018a): Characterization of explosive mixtures. Final Report: Part 2. In: Final Report Explosion Protection of Spray Dryers, S. 18–47.
- Maiwald, K. (2018b): Characterization of explosive mixtures in unconventional spray drying processes. Final Report: Part 2. In: K. Maiwald, B. Liske, L. Kues, U. Barth und P. Lerena (Hg.): Final Report. Explosion Protection of Spray Dryers.
- Maiwald, K.; Lerena, P.; Barth, U. (2017a): Charakterisierung potentiell explosionsfähiger Gemische in unkonventionellen Sprühtrocknungsprozessen. In: VDI Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Fachtagung mit begleitender Fachausstellung Sichere Handhabung Brennbarer Stäube 2017. Nürnberg, 24. und 25. Oktober 2017. Nichtredigierter Manuskriptdruck. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2314), S. 181–192.
- Maiwald, K.; Liske, B.; Barth, U. (2017b): Der "Duktus" zur Explosionsgefährdungsbeurteilung. In: *Technische Sicherheit* 2017 (Bd. 7, Nr. 9 - September), S. 12–17.
- Manotura GmbH & Co. KG (2022): Hydro-Zyklonfilter. Online verfügbar unter <https://www.aqua-technik-shop.de/hydro-zyklonfilter.html>, zuletzt aktualisiert am 2022, zuletzt geprüft am 18.02.2023.
- Masters, K. (1991): Spray Drying Handbook. 5. Aufl. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Meili, R. (2000): Data Compilation. data measured within the project 'Explosion Protection of Spray Dryers' (EPSD). Zürich (Switzerland).
- Meili, R. T. (2017): Persönliche Mitteilung. Schaffhausen, Switzerland, 14.06.2017 an K. Maiwald und L. Kues. Protokoll.
- Meyna, Arno; Pauli, Bernhard (2010): Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik. Quantitative Bewertungsverfahren. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. München, Wien, München: Hanser; Ciando (Praxisreihe Qualitätswissen).
- Miranda, J.; Camacho, E. M.; Latorre, C.; Galdo; M. (2015): A Simple Methodology Based on the Pittsburgh Coal Method for Assessing Specific Explosion Risks in Dust-Generated Explosive Atmospheres: A Case Study from Galicia (NW Spain). In: *Drying Technology* 2015, 2015 (33), S. 301–314.

MSE Meili AG (2011): Labasys 100. Messsystem für Konzentration und Geschwindigkeit. Schaffhausen (Schweiz).

MSE Meili AG (2016): User's Guide. LabaSoft/ LabaSoft Control. Data Acquisition & Analysis Software for the 'Labasys' Measuring System. Schaffhausen.

Nicolai, R.; Reh, L. (1995): Measurements of Solids Concentration, Velocity and Momentum Distribution in a Cold CFB Unit. In: Kay J. Heinschel (Hg.): Proceedings of the 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Orlando. International Conference on Fluidized Bed Combustion; American Society of Mechanical Engineers; International Conference on Fluidized Bed Combustion (FBC). New York: ASME.

Occupational Safety and Health Service (Hg.) (1993): Approved code of practice for the prevention, detection and control of fire and explosion in New Zealand dairy industry spray drying plant. New Zealand. Wellington, N.Z.: Occupational Safety and Health Service, Dept. of Labour (Health and Safety in Employment Act 1992).

Pabst, S. (2010): Prozessanalysetechnik (PAT) setzt sich langsam durch. In: *Chemie Technik* (03.2010). Online verfügbar unter <https://www.chemietechnik.de/prozessanalysetechnik-pat-setzt-sich-langsam-durch/>.

Pellmont, G. (2016a): Prüfbericht 16/014. unveröffentlichtes Dokument. Hg. v. Dr. PELLMONT Explosionsschutz. Basel.

Pellmont, G. (2016b): Prüfbericht 16/015, Bestimmung der Unteren Explosionsgrenze in der 20-l-Kugel. Unter Mitarbeit von L. Kues. Hg. v. PELLMONT Explosionsschutz GmbH. Binningen.

Pepperls+Fuchs: Grundlagen Ex-Schutz. Physikalisch-Technische Grundlagen. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/23926784-Grundlagen-grundlagen-ex-schutz.html>, zuletzt geprüft am 20.03.2023.

Peterjohann, H. (2020): Komplex vs. Kompliziert. Erläuterungen und Einsatz. Hg. v. Peterjohann Consulting. Online verfügbar unter <https://www.peterjohann-consulting.de/komplex-vs-kompliziert/>, zuletzt aktualisiert am 02.04.2020, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Physik IV. Einführung in die Quantenmechanik (Skript). Online verfügbar unter [https://qudev.phys.ethz.ch/static/content/courses/phys4/phys4\\_fs11/PhysikIV.pdf](https://qudev.phys.ethz.ch/static/content/courses/phys4/phys4_fs11/PhysikIV.pdf), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Polimak A.S.: Funktion der Entstaubungsfilter. Ankara. Online verfügbar unter <https://polimak.com/de/urun/funktion-der-entstaubungsfilter/>, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Popper, K. R. (1976): Logik der Forschung. 6., verb. Aufl. Tübingen: Mohr (Die Einheit der Gesellschaftswissenschaften, 4).

Preiss, Reinhard (2009): Methoden der Risikoanalyse in der Technik. Systematische Analyse komplexer Systeme. Identifikation, Bewertung, Darstellung, Anwendung. Wien: TÜV Austria Akademie (Edition TÜV Austria).

Radandt, S. (2019): Technologietag AZO GmbH & Co KG. Osterburken, 2019. Vortrag.

Rausand, Marvin (2011): Risk Assessment. Theory, Methods, and Applications. Online-Ausg. Hoboken, N.J: Wiley (Statistics in practice).

Reinecke, M.; Hesener, U. (2012): Explosionsschutz an Mischern - Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben und Schlussfolgerungen für die Praxis. In: Sichere Handhabung brennbarer Stäube. VDI-Fachtagung mit Ausstellung, VDI-Berichte Nr. 2182. Nürnberg, 06. und 07.11.2012. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2182), S. 95–113.

Röthlein, Brigitte (2007): Schrödingers Katze. Einführung in die Quantenphysik. Orig.-Ausg., 6. Aufl. München: Dt. Taschenbuch-Verl. (Naturwissenschaftliche Einführungen im dtv, 33038).

Scheid, M. (2005): Experimentelle Untersuchungen zum Ablauf von Gas- und Staubexplosionen in druckentlasteten Reaktionsgefäßen. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale). Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät.

Scheid, M.; Kusche, C.; Schröder, V.; Barth, U. (2013): Test on Suitability of the Ignition Source "Exploding Wire" for the Determination of Explosion Characteristics of Combustible Dusts in the 20-L-Sphere. In: E. de Rademaeker (Hg.): 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. 12 - 15 May 2013, Florence, Italy. Unter Mitarbeit von B. Fabiano und S. Buratti. European Federation of Chemical Engineering; Associazione Italiana di Ingegneria Chimica; EFCE International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries; LP. Milano: AIDIC (Chemical engineering transactions, 31), S. 703–708.

Schmidt, B. (2017): Untersuchung der Staubwolkenentstehung durch Befüllvorgänge mit Holzpellets. In: VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (Hg.): Sichere Handhabung brennbarer

Stäube 2017. VDI Wissensforum GmbH. 1. Auflage. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI-Berichte, 2314).

Schröder, V. (2002): Explosionsgrenzen von Wasserstoff und Wasserstoff/Methan-Gemischen. Forschungsbericht 253. Berlin: Wirtschaftsverlag NW - Verlag für neue Wissenschaft GmbH. Online verfügbar unter [file:///C:/Users/A201078/Downloads/fb253\\_vt%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/A201078/Downloads/fb253_vt%20(3).pdf).

Shi, J., Xinguang, L., Ping, Z. u. Radandt, S. (2009): Dust Explosion Simulations in a Filter Using DESC. In: Proceedings of the 8th International Conference on Measurement and Control of Granular Materials (MCGM). Shenyang, China, S. 353–357.

Siwek, R. (2000): Explosionsschutz an Zerstäubungstrocknern. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 2000 (Nr. 3).

Siwek, R. (2012): Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen. In: *Technische Sicherheit* 2012, 2012 (Bd. 2, Nr. 6), S. 16–18.

Siwek, R.; van Wingerden, K.; Hansen, O. R. (2004): Dust Explosion Venting and Suppression of Conventional Spray Dryers. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. 11th International Symposium, 2004.

Stahmer, K.-W.; Gerhold, M. (2014): Brenn- und Explosionskenngrößen von Zuckerstaub. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 2014, 2014 ((74) Nr.7/8 Juli/August), S. 279–285.

VDI-Richtlinie 2263 - 7.1, 03.2013: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen, Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen, Beispiele.

Steck, R. (2022): Die Konstruktion prägt die CO<sub>2</sub>-Bilanz. In: *VDI Nachrichten* 2022, 20.05.2022 (Nr. 10), S. 16.

Steen, H. (2009): Handbuch des Explosionsschutzes. Weinheim: Wiley-VCH.

Suter, G.; van Wingerden, K.; Siwek, R.; Kubainsky, C. (2000-2002): Minutes of Sponsor Meeting of the Project Explosion Protection of Spray Dryers. Basel (Switzerland).

Thiele, P. (2014): Mindestzündenergie von Staubgemischen. Masterthesis. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg. Fachbereich Bauwesen.

Tödt, J.-N. (2020): Simulation von Staubverteilung und Turbulenz während der pneumatischen Befüllung von Silos. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Sichere Handhabung brennbarer

Stäube 2020. VDI-Berichte Nr. 2376. 1. Auflage. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI-Berichte, 2376), S. 49–58.

TOT Manejo De Sólidos: Mezclador de Cintas (Ribbon Blender). Colombia. Online verfügbar unter <https://tot.com.co/mezclador-de-cintas-ribbon-blender/>, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Tremblay, F.; Charette, A. (1988): Cinétique de dégagement des matières volatiles lors de la pyrolyse d'électrodes de carbone industrielles. In: *The Canadian Journal of Chemical Engineering* February 1988 (Volume 66). Online verfügbar unter <https://constellation.uqac.ca/id/eprint/1695/1/1438107.pdf>, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

VDI Verein Deutscher Ingenieure (2002): Druckentlastung von Staubexplosionen - Pressure venting of dust explosions. VDI 3673, Blatt 1:2002. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI Verein Deutscher Ingenieure (2010): VDI Richtlinie: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen - Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen. VDI 2263, Blatt 7:2010. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI Verein Deutscher Ingenieure (2013): VDI Richtlinie: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen. VDI 2263, Blatt 7.1:2013. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI Verein Deutscher Ingenieure (2023): Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen - Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen. VDI 2263, Blatt 7:2023 (unveröffentlichter ENTWURF). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019): Staubbrände und Staubexplosionen - Sicherheitstechnische Kenngrößen von Schüttgütern. VDI 2263, Blatt 1:2019. Berlin: Beuth Verlag GmbH (2263, Blatt 1).

TRGS 722, Februar 2021: Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Gemische. Online verfügbar unter [file:///C:/Users/A201078/Downloads/TRGS-722%20\(6\).pdf](file:///C:/Users/A201078/Downloads/TRGS-722%20(6).pdf), zuletzt geprüft am 19.03.2023.

VirtualExpo Group: Hammermühle. Marseille. Online verfügbar unter <https://www.directindustry.de/prod/schenck-process-holding-gmbh/product-14361-2085643.html>, zuletzt geprüft am 22.07.2022.

Wiegleb, G.: Gasesstechnik in Theorie und Praxis. IR-Gassensor. Online verfügbar unter [http://gasesstechnik-wiegleb.de/?page\\_id=50](http://gasesstechnik-wiegleb.de/?page_id=50), zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Zenke, M. (2018): Brand- und Explosionsereignisse Brennofen. Neuss, 2018. persönliches Gespräch an K. Maiwald.

Zockoll, C. (Kolloquium 1988): Zündwirksamkeit von Glimmnestern in Staub/Luft-Gemischen. Sichere Handhabung brennbarer Stäube. VDI-Verlag GmbH. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft. Nürnberg, Kolloquium 19.10.1988.

# Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der elektronischen Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

