



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Skalierung und experimentelle Modellierung zur Charakterisierung des Ab-/Brandverhaltens im Fließbett

**Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
(Dr.-Ing.)**

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Bergische Universität Wuppertal

verfasst von

Dipl.-Ing. Leopold Manfred Hucke
aus Berlin

Wuppertal, Dezember 2023

Danksagung

Einen herzlichen Dank an meinen Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth, für die Möglichkeit, als externer Promotionsstudent an der Bergischen Universität Wuppertal in der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik im Fachgebiet Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung ein Promotionsvorhaben durchzuführen. Ich bin dankbar für die fachliche Unterstützung bei der Bearbeitung dieses Themas das zu einem erfolgreichen Ergebnis dieser Arbeit führte. Vielen Dank für die gute Zusammenarbeit am Lehrstuhl „Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung“.

Einen ganz besonderen Dank an Univ.-Prof. Dipl.-Chem. Dr rer. nat. Roland Goertz der mich betreute, nachdem Univ.-Prof. Dr.Ing. Uli Barth in den Ruhestand ging.

Vielen Dank für die fachliche Unterstützung und das angenehme Arbeitsumfeld an seinem Lehrstuhl „Chemische Sicherheit und abwehrender Brandschutz“.

Herrn Dr.-Ing. Alexey Leksin danke ich ganz herzlich für die hilfreichen Ideen und die fachliche Betreuung dieses Vorhabens sowie bei der Durchführung der Laborversuche.

Für die finanzielle Förderung einen aufrichtigen Dank an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt, Dekan der Fakultät Maschinenbau und Sicherheitstechnik.

Der Autor bedankt sich bei Herrn Peter Ossowski für die Herstellung der Versuchsvorrichtung und bei Herrn Julian Hemke für die Unterstützung bei der Erstellung des Computerprogramms zur Auswertung der Messwerte, sowie bei der Unterstützung bei den Laborversuchen.

Ebenso danke ich Herrn Dr.-Ing. Oswald Losert und der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) für das Teil sponsoring dieses Projektes.

Mein besonderer Dank gilt meiner Ehefrau Eva-Maria für die große und hilfreiche Unterstützung sowie Verständnis bei diesem Promotionsvorhaben.

Abstrakt

Ein Fließbett wird in der Verfahrenstechnik zum Nachtrocknen von Rohmaterialien, Halbfabrikaten und Fertigprodukten wie Staub, Pulver oder Granulat eingesetzt. Die Trocknung erfolgt durch einen erwärmten Luftstrom. Bei diesem Vorgang wurde bislang das Produkt als brennbarer abgelagerter Staub angesehen. Allerdings liegt im verfahrenstechnischen Prozess der Staub im Fließbett in einer Übergangsform vor, zwischen abgelagertem und aufgewirbeltem, die auch als quasi-stationärer Zustand bezeichnet wird.

Da Untersuchungen an einer realen Anlage nicht durchgeführt werden können, werden experimentelle Untersuchungen im Labor zur Bestimmung des Brandverhaltens und Ermittlung der sicherheitstechnischen Kenngröße mit einer Prüfapparatur, die ein Fließbett darstellt, durchgeführt. Ziel ist es, eine Bemessungsgrundlage zu schaffen, mit der Betreiber bei bestimmten verfahrenstechnischen Prozessen solche quasi-stationären Zustände erkennen, entsprechend bewerten und geeignete Schutzmaßnahmen ableiten können.

Die Laboruntersuchungen werden nach Ermittlung des mathematischen Skalierungsfaktors für zwei ähnliche Modelle (Prototyp und Prüfapparatur) mit einer elektrischen Wärmequelle durchgeführt. Folgend wurde das thermische Temperaturfeld des Schüttgutes/Probe für beide Modelle bestimmt, gegenübergestellt und der ermittelte Skalierungsfaktor auf Übereinstimmung mit dem theoretischen Faktor überprüft. Bei Übereinstimmung ist die Ähnlichkeit bestätigt und die Laborergebnisse können für beide Modelle verwendet werden.

Der experimentelle Versuchsaufbau mit Thermoelementen wird dargestellt und die Versuchsergebnisse werden diskutiert. Die sicherheitstechnischen Kennzahlen für den abgelagerten Staub Brennzahl (BZ) und für den quasi-stationären Zustand Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) werden bestimmt und bei der Gefahrenermittlung in einer Feldstudie für eine Fließbetтанlage berücksichtigt und als Praxisbeispiel dargestellt.

Bei Produkten mit unterschiedlichen Brandverhaltenszahlen (BVZ_{qs}) erfolgt die Risiko-bewertung mit der dynamischen Risikobewertung.

Ziel ist es einen Skalierungsfaktor zu ermitteln um eine Bewertungsgrundlage zu schaffen damit Laborversuchsergebnisse auf eine reale Prozessanlage übertragen werden können. Diese Methode soll dem Betreiber helfen bei bestimmten verfahrenstechnischen Prozessen den Fertigungsablauf zu optimieren, Gefahren zu erkennen und zu bewerten um geeignete Schutzmaßnahmen vorzusehen.

Abstract

A fluidized bed is used in process engineering for the post-drying of raw materials, semi-finished products, and finished products such as dust, powder, or granules. Drying is accomplished using a heated air stream. During this process, the product was previously regarded as combustible sediment dust. However, in the process engineering process, the dust in the fluidized bed exists in a transitional form between sediment and dispersed, also referred to as a quasi-stationary state.

As investigations cannot be carried out on a real plant, experimental studies are conducted in the laboratory to determine the combustion behavior and to calculate safety-related parameters using a test apparatus representing a fluidized bed. The goal is to establish a basis for operators to recognize and assess such quasi-stationary states in specific process engineering processes and derive appropriate protective measures.

The laboratory investigations are conducted after determining the mathematical scaling factor for two similar models: the prototype and the test apparatus, both equipped with an electric heat source. The thermal temperature field of the bulk material/sample is determined for both models, compared, and the calculated scaling factor is checked for compliance with the theoretical factor. When there is a match, similarity is confirmed, and the laboratory results can be used for both models.

The experimental setup with thermocouples is presented, and the test results are discussed. Safety-related parameters for the accumulated dust, such as the burning number (BZ), and for the quasi-stationary state, such as the quasi-stationary state combustion behavior number (BVZ_{qs}), are determined. These parameters are used in a hazard assessment in a field study of a fluidized bed and presented as a practical example.

For products with different combustion behavior numbers, risk assessment is performed using a developed dynamic risk assessment method.

The aim is to determine a scaling factor to create an assessment basis so that laboratory test results can be transferred to a real production process. This method is intended to assist operators in optimizing the production process, identifying and determine hazards, and providing appropriate protective measures for the process in question.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Abstrakt	III
Inhaltsverzeichnis	V
Symbole.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Forschung	6
2.1 Brennzahl als Sicherheitskenngröße für abgelagerten Staub	8
2.2 Fließbett	10
2.3 Brandverhaltenszahl als Sicherheitskenngröße für Staub im quasi-stationären Zustand im Fließbett	13
3 Zielsetzung	16
4 Lösungsweg	20
4.1 Dimensionslose Analyse für Prüfapparatur und Prototyp.....	21
4.2 Zündquelle	32
5 Verfahrenstechnische Anforderungen für die Fließbett-Modellierung.....	33
6 Versuchsaufbau zur Ermittlung des Skalierungsfaktors	37
6.1 Vertikaler Versuchsaufbau	37
6.2 Horizontaler Versuchsaufbau	39
7 Versuchsdurchführung.....	41
7.1 Vertikaler Versuch mit dem Prototyp.....	43
7.2 Horizontaler Versuch mit dem Prototyp.....	46
7.3 Vertikaler Versuch mit der Prüfapparatur	47
7.4 Beurteilung der Versuchsergebnisse	49
7.5 Berechnungsbeispiel für die Ermittlung des Temperaturgradienten.....	60
7.6 Ermittlung der Brandverhaltenszahl/Flammenhöhe mit der Prüfapparatur.....	63

8 Sicherheitsbetrachtung an einem Fließbett	66
8.1 Methodik der Gefahrenermittlung	68
8.2 Gefahrenbewertung	73
8.3 Prozessbeschreibung für eine staubführende Sprühtrocknungsanlage	75
8.4 Systematische Sicherheitsbetrachtung eines externen Fließbettes	76
8.5 Einfluss der Brandverhaltenszahl auf die dynamische Risikobewertung.....	92
8.6 Zusammenfassung der Sicherheitsbetrachtung	96
9 Fazit und Ausblick	97
Bilderverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Literaturverzeichnis	XI
Glossar	XV
Anhangsverzeichnis	XX
Anhang I – Zusammenfassung der Brennzahlbestimmung	XXI
Anhang II – Zusammenfassung der Brandverhaltenszahl	XXVI
Anhang III – Gegenüberstellung Brennzahl und Brandverhaltenszahl	XXIX
Anhang IV – Bestimmung der dimensionslosen Gruppen	XXX
Anhang V – Transfer Daten von Siphcon/Autodesk in Excel	XXXIV
Anhang VI – Zusammenfassung der Messdaten in elektronischer Form	XXXV

Symbole

A	Produkt (Staub) Kontaktfläche [mm ²]
B	Produktbreite (Staub) [mm]
E	Energie [kg·m ² /s ²]
F	Kraft, Gewicht [kg·m/s ²]
F_K	Kraft des Luftstromes [kg·m/s ²]
F_A	Auftrieb des Luftstromes [kg·m/s ²]
F_S	Schüttgewicht des Produktes [kg·m/s ²]
F_G	Gewicht des Gases [kg·m/s ²]
c_p	spezifische Wärmekapazität [J/kg·K]
H	Produktdicke (Staub) [mm]
H_f	Flammenhöhe [mm]
ΔH	Thermische Ausdehnung [mm]
k	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]
L	Gesamtlänge Staub [mm]
L_k	Staub-Kontaktlänge mit der Wärmequelle [mm]
Nu	Nusselt Zahl [-]
P	Leistung [W]
p	Druck [kg/m·s ²]
Δp	Druckverlust [kg/m·s ²]
Q	Wärmemenge [J]
\dot{Q}	Wärmestrom [W]
q	Wärmestromdichte [W/m ²]
S	Linearer Skalierungsfaktor [-]
T	Temperatur nicht simultan gemessen [°C]
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen der Ausgangstemperatur T_1 und der erreichten Temperatur T_2 [°C]
t	Zeit, in der ein Staubelement in Kontakt mit der zugeführten Wärmemenge ist [s]
v_s	Geschwindigkeit einer sich bewegenden Wärmequelle/Staubgeschwindigkeit [m/s]
x	Lineare Länge [mm]
x_1	Referenzdicke in x-Richtung [mm]
x_2	Referenzdicke in x-Richtung [mm]

Δx	Abstand zwischen x_1 und x_2 [mm]	
α	Längenausdehnungskoeffizient [1/K]	
β	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]	
Δ	Differenz zwischen den Werten [-]	
θ	Simultan gemessene Temperatur [°C]	
θ_1	Temperatur in x-Richtung [°C]	
θ_2	Temperatur in x-Richtung [°C]	
$\Delta\theta$	Temperaturdifferenz zwischen θ_1 und θ_2 in x-Richtung [°C]	
$\Delta\theta/\Delta x$	Temperaturgefälle in Richtung Wärmefluss [°C/mm]	
$d\theta/dx$	Temperaturgefälle in Richtung Wärmefluss [°C/mm]	
ρ	Materialdichte [kg/m ³]	
M	Masse	} Benutzte primäre Mengen in der dimensionslosen Analyse
L	Länge	
T	Zeit	
θ	Temperatur	
\dots_p	Tiefergestellter Index ist hinweisend für Modell Prototyp	
\dots_m	Tiefergestellter Index ist hinweisend für Modell Prüfapparatur	
\dots_a	} Indizes verschiedener Parameter in Gleichung (4.4a)	
\dots_b		
\dots_c		
\dots_d		
\dots_e		

1 Einleitung

In der chemischen Industrie und in der Verfahrenstechnik ist der Produktionsprozess bei der Behandlung von Stoffen oft mit einem Wärmeaustausch verknüpft. Solche Prozesse finden beispielsweise Anwendung in der Lebensmittel- und pharmazeutischen Industrie.

Ein in der betrieblichen Praxis häufiges Verfahrensbeispiel sind Fließ- bzw. Wirbelbette (Bild 1). Sie werden zum Trocknen von Lösungen oder Suspension eingesetzt, bis diese von einem flüssigen in den pulverförmigen Aggregatzustand übergehen.

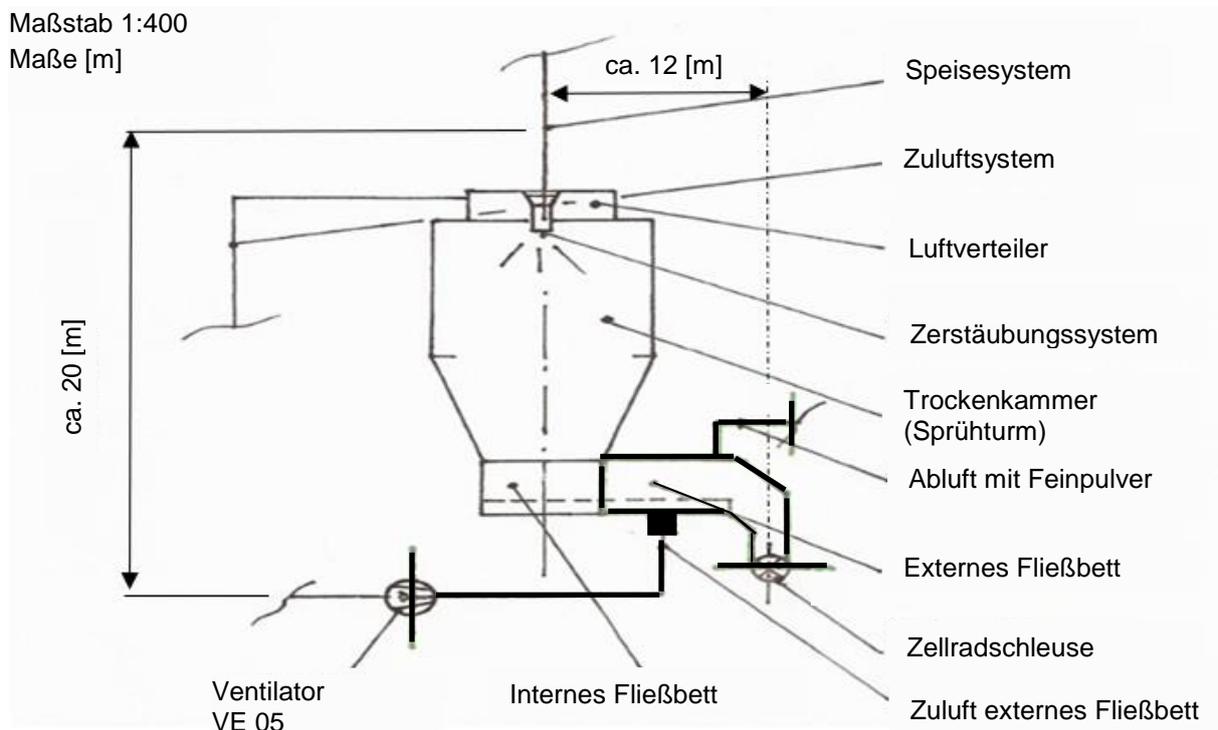


Bild 1. Vereinfachtes Fließbild einer Sprühtrocknungsanlage mit externem Fließbett

Dabei erfolgt die Trocknung in mehreren Teilschritten. Über Düsen wird das eingebrachte Produkt zerstäubt. Diese Zerstäubung erfolgt in einem Heißluftstrom, in dem der Wasser- und Lösungsanteil in einer Trocknungskammer, die über einen konischen Boden verfügt, verdunstet. Da der Wasseranteil nicht gänzlich entfernt werden kann, wird ein Fließbett nachgeschaltet, um das noch feuchte Produkt zu trocknen. Dort wird angewärmte Luft von unten über ein Lochblechboden (Anströmboden) in das Fließbett geblasen. Dort entsteht eine Wirbelschicht und das restliche Wasser verdampft. Von dort wird das Produkt über eine Zellradschleuse zur Verpackung oder als Halbprodukt zur Weiterverarbeitung geführt. Ausführliche Erläuterungen zur Verfahrenstechnik finden sich beispielsweise bei Suhrenbrock [33].

Die Produkte können feuchte Schüttgüter sein wie Granulate, Agglomerate, Kristalle, Pulver oder Staub¹.

Bei der Bearbeitung von staubfähigen und explosionsfähigen Produkten werden diese vielfach mit dem Gefährlichkeitsmerkmal „brennbar“ charakterisiert. Diese Charakterisierung erfolgt in der Regel nach der VDI-Richtlinie 2263 und bezieht sich auf den sogenannten abgelagerten Staub. Diese Situation beschreibt Anhang 2 der Gefahrstoffverordnung [1] als nationale Umsetzung zur Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1999. In der industriellen Anwendung kommen brennbare Stäube allerdings nicht ausschließlich als abgelagerter oder aufgewirbelter Staub (Staub-/Luftgemische) vor, sondern auch in einem quasi-stationären Zustand. Schadensereignisse gaben Anlass für die Besorgnis, dass innerhalb solcher Fließbette, Phänomene vorkommen, die weder dem klassischen Abbrennen noch der Explosion von Staub-/Luftgemischen zugerechnet werden können.

Die Untersuchungen werden daher an einer modifizierten Prüfapparatur (weiter als „Prototyp“ bezeichnet) nach VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1 [31] durchgeführt. Mit Hilfe dieser Apparatur soll eine neue Sicherheitskenngroße, die „Brandverhaltenszahl“ (BVZ_{qs}) bestimmt werden, da sich die klassische Kenngroße die Brennzahl (BZ) auf abgelagerten Staub bezieht und sich als ungeeignet erwiesen hat, um für die Gefährdungsbeurteilung quasi-stationärer Zustände als Bemessungsgroße hinzugezogen zu werden.

Die Laborergebnisse weichen häufig von Betriebsergebnissen ab. Dies hat schon oft zu qualitäts- und sicherheitstechnischen Problemen geführt. In der Regel werden die realen Betriebsverhältnisse auf den Labormaßstab runter skaliert, beispielsweise eine $1 [m^3]$ Anlage auf eine 20 Liter Apparatur [1]. Das Defizit bei allen neu entwickelten Prüfverfahren besteht in der fehlenden nachvollziehbaren Skalierung. In bisherigen Literaturrecherchen wurde keine Quelle gefunden, in der die nachvollziehbare Skalierung für einen Laboraufbau behandelt wurde. Ziel dieser Arbeit ist, diese fachliche Lücke zu schließen und ein Bewusstsein für die Notwendigkeit der zusammenhängenden Betrachtung zu schaffen. Sie soll helfen, die betrieblichen Forderungen wirksamer Sicherheitseinrichtungen für staubführende Anlagen wie bei Fließbetten zu optimieren. Aus diesem Grunde ist charakteristisch für dieses Vorhaben, dass die mathematische Beziehung zwischen „labormaßstäblichen Prüfapparatur“ und der in der Praxis

¹ Staub ist ein feinzerteilter Feststoff beliebiger Form, Struktur und Dichte unterhalb einer Korngröße von $500 \mu m$ [1].

betriebenen „industriemaßstäblichen Anlagen“ ermittelt werden soll. Für die Ähnlichkeitsbetrachtung werden zwei Anlagen unterschiedlicher Größe untersucht. Eine existierende Anlage [10] wird in der Betrachtung mit Prototyp (Bild 2) bezeichnet.



Bild 2. Prototyp (Barth, Laudénbacher, Leksin 2014) [11]

Eine nach der dimensionslosen Analyse bestimmten Anlage wird Prüfapparatur genannt. Voraussetzung für die Ähnlichkeitsbetrachtung ist, dass die physikalischen Parameter wie die Temperaturdifferenz $\Delta\theta$, die Wärmeleitfähigkeit k , Staubdicke Δx , Materialdichte ρ , spezifische Wärme des Materials c_p und Wärmestromdichte q im gleichen dimensionslosen Verhältnis stehen. Gleichungen, die das thermische Verhalten des Prototyps System beschreiben müssen ebenfalls das Prüfapparatur-System zufriedenstellen.

Da beim realen Produktionsprozess Wärme generiert wird, wird bei diesem Forschungsvorhaben zur Überprüfung der mathematisch ermittelten Skalierungsfaktoren, für die einzelnen Parameter der Stauboberfläche ein gerichteter Wärmestrom zugeführt. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Wärmeleitfähigkeit an der Kontaktzone zwischen der Wärmequelle und der Stauboberfläche. Bei diesem Vorgang ist der Temperaturanstieg an der Stauboberfläche höher als im unteren Bereich. Innerhalb der Staubschüttung findet die Wärmeübertragung ausschließlich durch Wärmeleitung statt, wobei an der Oberfläche Wärme konvektiv abgeführt wird.

Die Temperatur eines Körpers beschreibt seinen thermodynamischen Gleichgewichtszustand. Sie ist abhängig von der spezifischen Wärmekapazität des Materials, seiner Masse, sowie der in ihm enthaltenen Mengen an Wärmeenergie. Zwei gleichförmige Aufbauten aus den gleichen Werkstoffen, aber unterschiedlichen Abmessungen, weisen daher einen proportionalen Zusammenhang zwischen deren Massen und der enthaltenen Wärmeenergie auf. Die thermischen Versuchsergebnisse werden für die

Parameter Temperatur, Temperaturgradient und Wärmemenge gemessen. Der Temperaturgradient ist eine physikalische Größe, welcher an jedem Punkt eines Temperaturfeldes anzeigt, wie hoch die Temperatur ist und wie stark sie steigt oder fällt. Dieser Temperaturverlauf wird innerhalb einer Staubschüttung mithilfe von Temperaturmessungen abgebildet. Hierzu sind in vertikaler Richtung im Prototyp und in der Prüfapparatur Thermoelemente angebracht. Die sich aus den Versuchen ergebenden Temperaturgradienten für Prototyp und Prüfapparatur werden verglichen. Sind sie vergleichbar, ist das ein Beweis für die Ähnlichkeit beider Modelle.

Die Intention besteht darin, (Kapitel 3) ein Bewusstsein zu schaffen die betrieblichen Rahmenbedingungen auf die Anwendung für Laborversuche zu transferieren und hinsichtlich Verständlichkeit und Anwendbarkeit auf Fließbetten zu prüfen. Dabei wird im Kapitel 2 der aktuelle Wissenstand über sicherheitstechnische Kenngrößen, wie Brennzahl (BZ) für abgelagerten Staub und Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) für den quasi-stationären Zustand im Fließbett, dargestellt. Im Anschluss daran wird in Kapitel 4 für die Modellbetrachtung der Lösungsweg mit einer dimensionslosen Analyse vorgestellt und der Skalierungsfaktor für die einzelnen Parameter ermittelt. Das Verfahren beschreibt mathematisch den chemischen und physikalischen Prozessablauf. Systematisch wird die dimensionslose Vorgehensweise in einzelnen Schritten präsentiert. Ziel ist, dem Anwender die Möglichkeit zu geben, ein Bewusstsein für die Ähnlichkeit zwischen einem realen Produktionsprozess und einer Modellanlage zu entwickeln, um Informationen über Auslegung, Sicherheitseinrichtungen und Dimensionierung von verfahrenstechnischen Anlagen zu erlangen. Nachdem in Kapitel 4 die Erfordernisse für eine Modellierung aufgezeigt wurden, erfolgt in Kapitel 5 die verfahrenstechnische Grundlage für eine Fließbett-Modellierung mit dem Hinweis auf die Problematik des quasi-stationären Zustandes von Staub im Fließbett. Anschließend wird in Kapitel 6 der vertikale und horizontale Versuchsaufbau für Prototyp und Prüfapparatur mit erforderlicher Wärmequelle und installierten Thermoelementen dargestellt. Nachdem in Kapitel 6 der Versuchsaufbau aufgezeigt wurde, erfolgt in Kapitel 7 die Versuchsdurchführung. Es wird die Kalibrierung der Thermoelemente sowie das Temperaturfeld für Prototyp und Prüfapparatur aufgezeigt. Der mathematisch ermittelte Skalierungsfaktor für das Temperaturfeld, das Temperaturgefälle (Temperaturgradient) und benötigter Energieaufwand wird mit den Versuchsergebnissen auf Übereinstimmung überprüft. Für den quasi-stationären Zustand werden die Brandverhaltenszahlen (BVZ_{qs}) ermittelt. In Kapitel 8 erfolgt die praxisbezogene Anwendung im Rahmen einer Feldstudie

am Beispiel einer ausgewählten externen Fließbetтанlage einer staubführenden Sprühtrocknungseinrichtung unter Berücksichtigung der in Kapitel 7 ermittelten Brandverhaltenszahlen für den quasi-stationären Zustand. Der ermittelte Wert wird bei der Risikobewertung bei einer Gefahrenanalyse (HAZOP) an der realen Fließbetтанlage berücksichtigt um einen modifizierten Ansatz bei der Bewertung im Rahmen der HAZOP Analyse zu entwickeln. Der Betrieb solcher verfahrenstechnischen Anlage kann durch technisches Versagen von Anlagenteilen, durch Bedienungsfehler, sowie durch naturbedingte wie umgebungsbedingte Gefahren gestört werden. Das Gefahrenpotential der Anlage hängt dabei von den Zustandsgrößen wie zum Beispiel Druck, Temperatur, Stoffkonzentration und den Größen Volumen und Masse ab. Das heutige Verständnis eines sicheren Betriebes von Maschinen und Anlagen, verlangt ein systematisches Vorgehen um Risiken zuverlässig zu erkennen und auszuschalten oder auf ein tragbares Maß zu begrenzen, bevor Personen, Umwelt oder Sachwerte geschädigt werden. Die technische Risikoanalyse umfasst dabei drei aufeinanderfolgende Schritte [1]:

- Gefahrenquellen erkennen
- Gefahren bewerten
- Gegenmaßnahmen vorsehen

Die Risikoanalyse an einem externen Fließbett an einer Sprühtrocknungsanlage (Bild 1) in der Lebensmittelindustrie wurde gemeinsam mit dem Betreiber durchgeführt. Bei der durchgeführten Untersuchung wurde auf die zu erwartenden verfahrenstechnischen und sicherheitstechnischen Probleme hingewiesen und durch Gegenmaßnahmen die Vermeidung von unerwünschten Vorgängen sichergestellt.

In der abschließenden Zusammenfassung werden in Kapitel 9 die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit diskutiert und darauf aufbauend ein Ausblick gegeben.

2 Stand der Forschung

Zur deduktiven sicherheitstechnischen Beurteilung von verfahrenstechnischen Anlagen und Prozessen ist es notwendig, zuerst Kenntnis über die Stoffeigenschaften des zu verarbeitenden Produktes sowie über den Rohstoff, Halbfabrikat und das Endprodukt zu haben. Die Stoffeigenschaften geben bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen eine Auskunft über das Verhalten der Stoffe. Dies sind notwendige Informationen über die relevanten physikalisch-chemischen Eigenschaften der vorhandenen brennbaren oder oxidierenden Gefahrstoffe und deren Beurteilung hinsichtlich der Brandgefährdung respektive Explosionsgefährdung. Die Stoffeigenschaften werden mit den sicherheitstechnischen Kenngrößen angegeben und können aus den Sicherheitsdatenblättern entnommen werden. In Einzelfällen werden sie vom Hersteller mitgeliefert. Die meisten Kenngrößen sind quantitative Werte für die Beurteilung von Gefahren sowie für Maßnahmen zur Verhütung von Unfällen, einschließlich deren gefährlichen Auswirkungen. Bei der Anwendung der sicherheitstechnischen Kenngrößen ist zu berücksichtigen, dass bei der Datenermittlung abweichende Randbedingungen zugrunde liegen können. Die Kenngrößen gelten generell für atmosphärische Bedingungen. Nachfolgend werden einige wichtige sicherheitstechnische Kenngrößen für Stäube aufgeführt:

- Mindestzündtemperatur des aufgewirbelten Staubes
- untere Explosionsgrenze
- Mindestzündenergie
- Sauerstoffgrenzkonzentration
- Maximaler Explosionsdruck
- Mindestzündtemperatur einer Staubschicht (Glimmtemperatur)

Im Laufe der Zeit wurden verfahrenstechnische Abläufe aufgrund von neu zu entwickelnden Produkten verändert. Zur Optimierung des Produktionsablaufs wurden auch die verfahrenstechnischen Anlagen neu konzipiert und die Laborversuche und Prüfverfahren der veränderten Situation angepasst. Dabei sind die realen Betriebsverhältnisse einfach auf den Labormaßstab runter skaliert worden. Der Mangel bei allen Prüfverfahren besteht in der fehlenden nachvollziehbaren Skalierung. Deshalb wird sich in Kapitel 4 auf den Erwerb neuer Erkenntnisse, die zur Ermittlung und Anwendung eines nachvollziehbaren Größenmaßstabes führen, konzentriert.

Die Vorgehensweise berücksichtigt zuerst die theoretische Bestimmung des Skalierungsfaktors im Hinblick auf die vorhandenen Zustandsgrößen wie Stoff, Menge, Druck, Strömungsgeschwindigkeit und den entsprechenden Randbedingungen. Nach der theoretischen Ermittlung des Skalierungsfaktors erfolgt:

- Skalierung des Prototyps zu einer Prüfapparatur
- Bau der Prüfapparatur
- Laboruntersuchungen mit Prototyp und Prüfapparatur

Die oben aufgeführte Betrachtung gilt für Stäube aber nicht für Gase und Dämpfe. Bei der Bearbeitung von staubförmigen Produkten können unerwünschte Ereignisse auftreten, die zu einer Brand- sowie Explosionsgefahr führen können. Dabei wird über das Vorhandensein von brennbaren Stoffen oder das Entstehen von explosionsfähigen Staub-/Luftgemischen gesprochen. Anhand des Brennverhaltens kann beurteilt werden, ob eine Staubschüttung nach Kontakt mit einer externen Zündquelle oxidierend reagiert. Zudem wird gemessen, inwieweit sich die lokale Reaktion in der Staubschüttung ausbreitet. Das Brennverhalten wird mit einer Kenngröße beschrieben. Die in der Praxis bewährten und verwendeten sicherheitstechnischen Kenngrößen, wie Brennzahl (BZ), Glimmtemperatur usw., sind in der VDI 2263 Blatt 1 [3] verankert.

Die VDI-Richtlinie 2263 [4] beschreibt verschiedene diskrete Gefahrenansätze, die nachfolgend vorgestellt werden (Bild 3):

- Bei einer abgelagerten Staubschüttung kann sich durch eine äußere Entzündung ein eingeleiteter Brand ausbreiten [VDI 2263] [4] (Bild 3).
- Staubexplosionen sind dann gegeben, wenn in einem Staub-/Luftgemisch nach der Zündung eine Flammenausbreitung mit einer Drucksteigerung auftritt. Solche Reaktionen verlaufen deutlich schneller als Brände [VDI 2263] [4] (Bild 3).

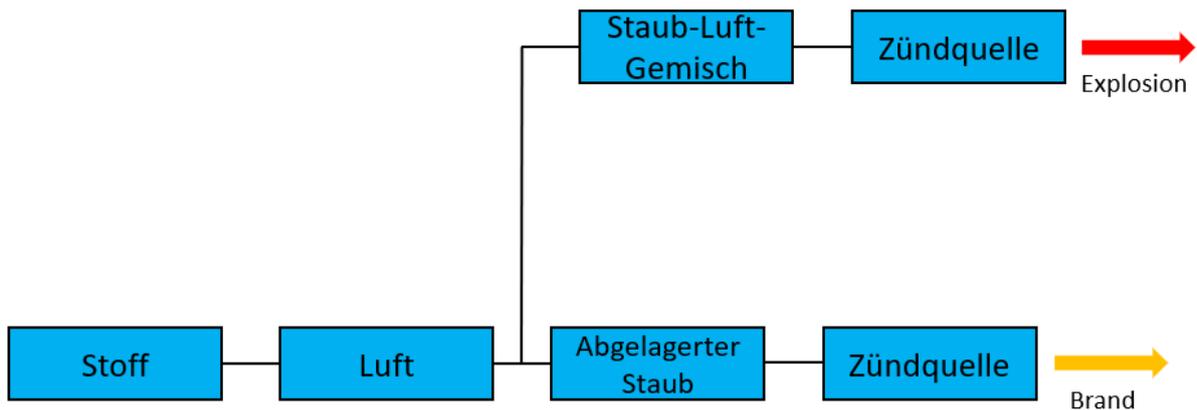


Bild 3. Bisheriger Gefahrenansatz Brand und Explosion

Staub-/Luftgemische können in Sprüh- oder Zerstäubungsanlagen zum Beispiel in der pharmazeutischen Industrie auftreten, bei denen die zu trocknende Lösung durch Düsen in winzige Tropfen in einen Heizluftstrom gesprüht wird. Aus der Flüssigkeit wird unmittelbar Pulver, welches beispielsweise über ein Zyklonabscheider vom Luftstrom getrennt wird.

Im Zuge der Entwicklung von verfahrenstechnischen Prozessen und Anlagen wurde beobachtet, dass Zustände entstehen, die man nicht nur diskret mit Brand- oder Explosionsbetrachtungen behandeln kann, sondern dass diese Vorgänge dazwischen liegen. Diese Erscheinungsformen können in Wirbelschichtverfahren und Fließbetten auftreten und wurden früher auch mit der Sicherheitskenngroße Brennzahl (BZ) definiert. Die „Untersuchungen zur Standardisierung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Ab-/Brandverhaltens in quasi-stationären Zuständen“ von Leksin, Maiwald und Barth ergaben, dass dieser Sachverhalt nicht mit einer Brennzahl (BZ) bewertet werden kann. Sie charakterisierten diesen quasi-stationären Zustand mit einer neuen sicherheitstechnischen Kenngröße, der sogenannten Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) [5].

2.1 Brennzahl als Sicherheitskenngroße für abgelagerten Staub

Die normgerechte Bestimmung der Brennzahl (BZ) erfolgt nach VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1 [3] und DIN EN 17077 [6]. Innerhalb der Norm wird zwischen dem Plattenverfahren und dem Verfahren mit der Lütolf-Apparatur unterschieden. Bei dem Plattenverfahren wird die Staubprobe in Form einer Staubschüttung und einer Grundfläche von 20 [mm]×40 [mm] auf eine „nicht brennbare, wärmeisolierende Platte oder Fliese“ [7] aufgebracht und mit einer Zündquelle entzündet (Bild 4).

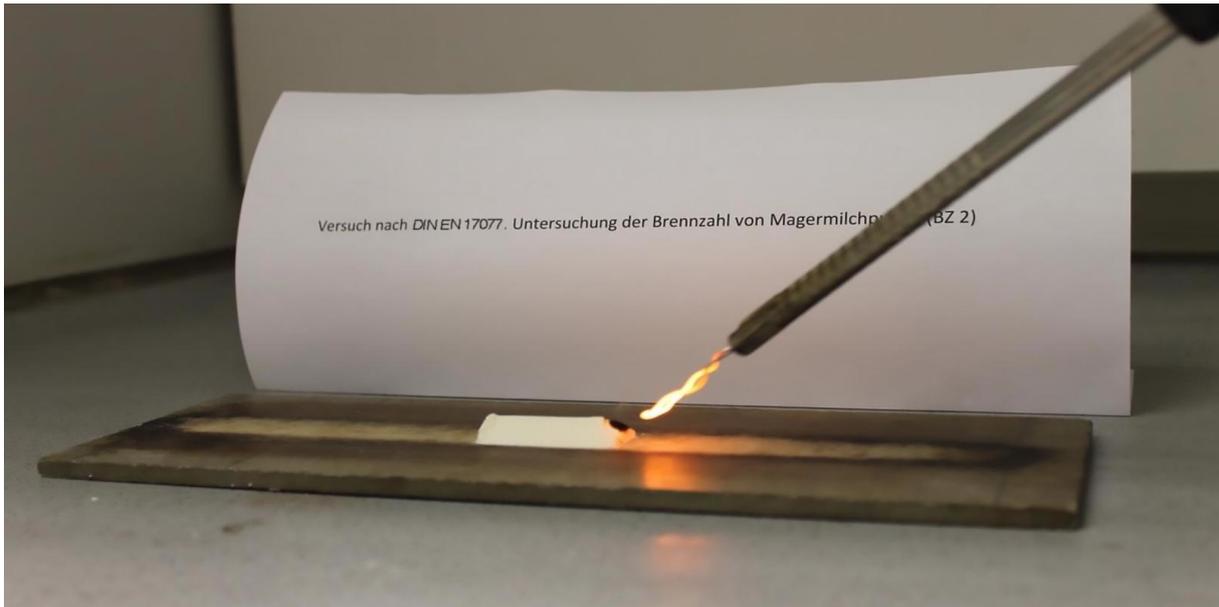


Bild 4. Versuchsaufbau zur Brennzahlbestimmung von Magermilchpulver nach DIN EN 17077 [6]

Die Zündquelle kann entweder ein „elektrisch erhitzter glühender Platindraht mit einer Temperatur von etwa 1000 [°C]“ [6] oder die Flamme eines Gasbrenners mit ebenfalls 1000 [°C] sein [7]. Kommt es zu keiner Entzündung, muss der Entzündungsversuch bei derselben Probe 5-10-mal wiederholt werden. Je nach Brandverhalten werden der Staubprobe konkrete Zahlenwerte, die Brennzahl (BZ), zugeordnet. Beispiele und Erkenntnisse für das Brennverhalten verschiedener Stoffe bei Raumtemperatur werden in Tabelle 1 vorgestellt.

Tabelle 1. Beschreibende Definitionen und Klassifizierungen der Brennzahl [6]

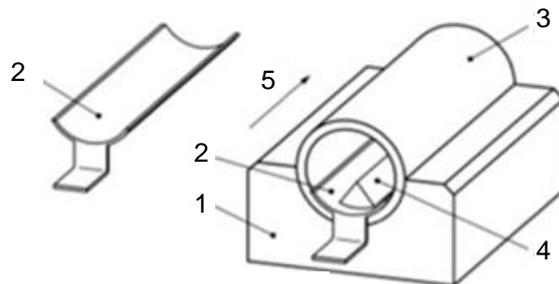
Prüfergebnis		Brennzahl (BZ)
keine Entzündung		1
kurze Entzündung, schnelles Erlöschen	keine Ausbreitung des Brandes	2
örtlich begrenztes Verbrennen oder Glimmen nahezu ohne Ausbreitung oder nur unter örtlicher Ausbreitung		3
Glimmen oder Schwelen (ohne Funken oder Flammen) oder langsames Zersetzen ohne Flammen	vollständige Ausbreitung des Brandes durch die gesamte Staubschüttungen von drei Anwendungen	4
langsame Verbrennung mit Flammen oder Funken		5
sehr schnelle Verbrennung mit Flammen oder sehr schnelles Zersetzen		6

Je nach Brandverhalten liegt der Zahlenwert zwischen Brennzahl 1 (BZ 1) und Brennzahl 6 (BZ 6) sowie in Tabelle 1 dargestellt. Die Höhe der Brennzahl (BZ) gibt Auskunft über das Gefahrenpotential der entsprechenden Proben und ermöglicht somit eine

Ableitung der durchzuführenden Schutzmaßnahmen. Je größer der Wert der Brennzahl (BZ) ist, umso kritischer ist das Brandverhalten einzuschätzen. Besonders gefährlich ist das Brandverhalten abgelagerter Stäube ab einer Brennzahl von 4 (BZ 4), da es hier zu einer Ausbreitung des Brandes kommt [12].

Im Regelfall wird die Brennzahlprüfung unter atmosphärischen Bedingungen im Labor durchgeführt. Prozessbedingt kann es jedoch notwendig sein, die Brennzahl (BZ) als sicherheitstechnische Kenngröße unter anderem für die im Betrieb erforderlichen Bedingungen durchzuführen. Üblich sind Versuchstemperaturen bei 100 [°C], wobei sich die Brennzahl (BZ) und damit das Gefahrenpotential erhöhen können.

Wie auch beim Plattenverfahren ist die gleiche Vorgehensweise bei der Brennzahlprüfung mit der Lütolf-Apparatur durchzuführen. Die Probe mit derselben Form wird auf einem Probenträger aus Edelstahl erstellt. Anschließend wird der Probenträger in ein Glasrohr mit einem Durchmesser von 43 [mm] geschoben, das auf einem wärmeisolierenden, temperaturbeständigen Gestell gelagert ist (Bild 5) [7]:



Legende

1. Gestell
2. Probenträger ($l=[80\pm 1]$ mm)
3. Glasrohr ($\varnothing=[43\pm 1]$ mm, $l=[121\pm 1]$ mm)
4. Staubprobe
5. Luftstrom (0,2 m/s bis 0,4 m/s)



Bild 5. Brennzahlprüfung nach Lütolf [6]

2.2 Fließbett

In verfahrenstechnischen Vorgängen, wie bei Trocknungsprozessen von Feststoffen, tritt brennbarer Staub nicht nur als abgelagerter oder aufgewirbelter Staub auf. Ein weiterer Zustand ist die Übergangs- bzw. Zwischenform, die als quasi-stationärer Zustand bezeichnet wird. Durch einen intensiven Energie- und Stoffaustausch werden im Fließbett fluidähnliche Eigenschaften hervorgerufen (Bild 6) [8].

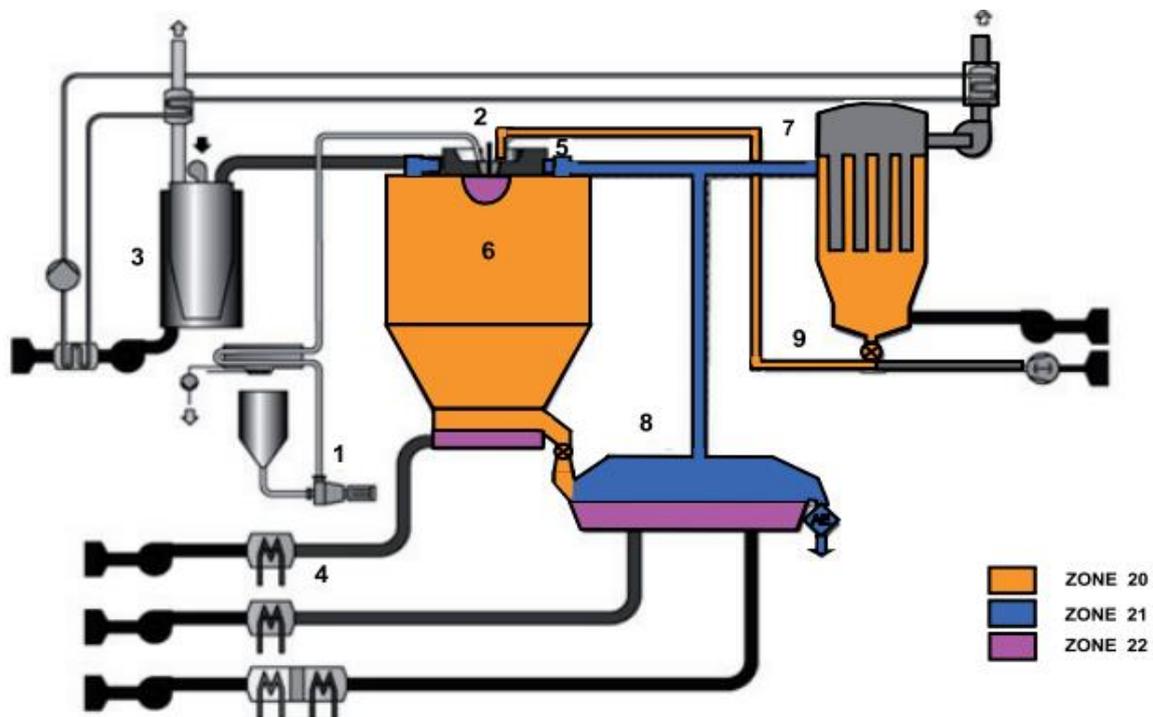


Bild 6. Quasi-stationärer Zustand (© GEA Engineering)

Dieser Zustand entsteht, indem die ruhende Schüttung durch Anströmen von Gas in den Schwebезustand versetzt und gehalten wird und sich thermodynamisch und strömungstechnisch analog wie eine Flüssigkeit verhält [8]. Die fluidähnlichen Zustände werden durch Druckluftzuführung von unten über ein Maschengitter, den sogenannten Anströmboden, erreicht. Die Staubpartikel können dabei einer starken vertikalen Luftströmung ausgesetzt werden [8]. Bei diesem Vorgang wird der Staub aufgewirbelt und es kann ein quasi-stationärer Zustand mit einer explosionsfähigen Atmosphäre entstehen, der zu Bränden und Staubexplosionen führen kann. Ein Beispiel für ein derartiges Schadensereignis in der Industrie ist das tatsächliche Auftreten eines Brandes und als Folge einer Staubexplosion im extern liegenden Fließbett während der Inbetriebnahme einer Sprühtrocknungsanlage [9]. Somit ist in diesem Zusammenhang nicht nur von einem theoretisch denkbaren Ereignis die Rede, sondern vielmehr von einer hohen Wahrscheinlichkeit solcher Brand- respektive Explosionsereignisse.

Die Zündquellen im Fließbett sind vermutlich auf Selbstzündungsprozesse organischer Produkte zurückzuführen. Zündvorgänge dieser Art können sich durch Ablagerungen an Sprühturmwänden oder Düsen bilden und z.B. durch die Zellradschleuse in das nachgeschaltete Fließbett transportiert werden. Des Weiteren kann eine Produktanhäufung in einem Fließbett nicht ausgeschlossen werden, die ab einer gewissen Größe aufgrund von Folgereaktionen in ein Glimmnest übergehen und somit als Zündquelle fungieren kann. Aufgrund dieser Gegebenheit wird beim vibrierenden Fließbett die Anlage in Schwingung gehalten, um ein Zerfallen von eventuell entstehenden Produktanhäufungen (Produktklumpen) zu bewirken und damit die Bildung von

Glimmnestern zu vermeiden. Anwendungsbereiche sind die chemische-, pharmazeutische- und Nahrungsmittelindustrie, in denen in Sprühtrocknungsanlagen (Bild 7) Lösungen oder Suspensionen konvektiv getrocknet werden, bis sie vom flüssigen in den pulverförmigen Aggregatzustand übergehen.



- | | | |
|---|---|--------------------------------|
| 1. Speisesystem | 2. Zerstäubungssystem | 3. Zuluftsystem |
| 4. Zuluft für Nachrocknungs-/Kühlsysteme – Zuluftkanäle | 5. Abluftsystem – Abluftleitungen | 6. Trocknungssystem |
| 7. Schlauchfilter | 8. Nachgeschaltetes Fließbett als Nachrocknungs-/Kühlsystem | 9. Feinpulver – Rückführsystem |

Bild 7. Sprühtrocknungsanlage Typ G [10]

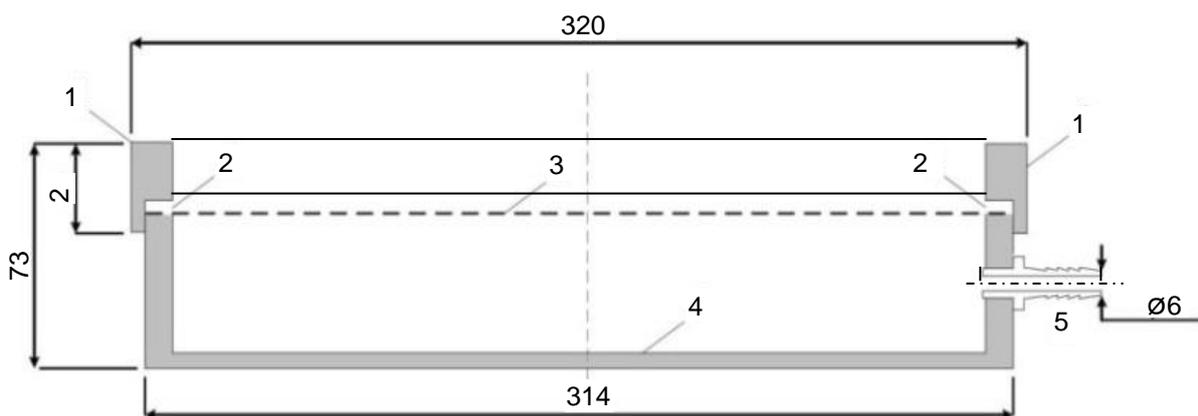
Dabei erfolgt die Trocknung in mehreren Teilschritten. Über Düsen wird das eingebrachte Produkt in sehr feine Tröpfchen zerstäubt. Diese Zerstäubung erfolgt in einem Heißluftstrom, in dem der Wasser- oder Lösungsmittelanteil in einer Trocknungskammer, die über einen konischen Boden verfügt, verdunstet. Da der Wasseranteil nicht gänzlich entfernt werden kann wird ein Fließbett nachgeschaltet, welches intern oder extern sein kann. In diesem Fließbett erfolgt bei einer längeren Aufenthaltszeit die Nachtrocknung des feuchten Produktes. Ferner stellt sich die Frage, inwieweit eine für abgelagerten Staub gemäß VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1 [3] ermittelte Brennzahl (BZ) zur sicherheitstechnischen Beurteilung für diesen Vorgang in Fließbetten geeignet ist.

Die folgende Ausführung beschreibt die Herangehensweise zur Brennzahlprüfung dieser genannten Zustände.

2.3 Brandverhaltenszahl als Sicherheitskenngröße für Staub im quasi-stationären Zustand im Fließbett

Das Ab-/Brandverhalten in quasi-stationären Zuständen, die beispielweise in Vibrations-Fließbett-Trocknern herrschen, kann nicht analog mit den Ergebnissen der Brennzahlprüfung nach VDI 2263 Blatt 1 [3] verglichen werden.

Ziel war es, eine Bemessungsgrundlage zu schaffen, mit der Betreiber bei bestimmten verfahrenstechnischen Prozessen solche quasi-stationären Zustände erkennen, bewerten und geeignete Schutzmaßnahmen ableiten können. Aufgrund dieser Gegebenheit wurde eigens für diesen Zweck der Untersuchung von Barth und Leksin eine modifizierte Prüfapparatur, die einem Fließbett im Labormaßstab gleicht, entwickelt (Bild 8) [11].



1. Metallrahmen 2. Dichtung 3. Drahtgewebe 4. Metallkasten 5. Druckluftzuleitung

Bild 8. Modifizierte Prüfapparatur – Schnittdarstellung (Barth/Leksin) [11]

Die Apparatur besteht aus einem Metallgehäuse, welches nach oben offen und mit einem Anströmboden versehen ist. Oberhalb ist ein Metallrahmen befestigt, der den Anströmboden (30 [mm]×300 [mm]) fixiert und eine Anströmfläche von 90 [cm²] festlegt. Die Unterseite des Metallgehäuses ist von der Oberseite mit einem 2,5 [mm] starken PTFE-Gummi abgedichtet. Im unteren Teil des Metallgehäuses wird trockene Druckluft zugeführt, die durch den aus einem Drahtgewebe bestehenden Anströmboden in den oberen Bereich strömt. Dort kann sich ein quasi-stationärer oder fluidähnlicher Zustand bilden. Auf das Drahtgewebe wird die Staubprobe mit einer Schichtdicke von 15 [mm] bis 20 [mm] locker aufgetragen und anschließend die vorher

experimentell ermittelte Druckluft angelegt [5]. Je nach Stoffeigenschaften sind unterschiedliche Maschenweiten des Drahtgewebes nötig, um die Wirbelschicht zu erzeugen. Kann die Wirbelschicht verlässlich erzeugt werden, wird mit Hilfe eines Platindrahtes (Bild 9) oder einer Gasflamme ca. zwei Sekunden [s] lang versucht, die Wirbelschicht zur Entzündung zu bringen.

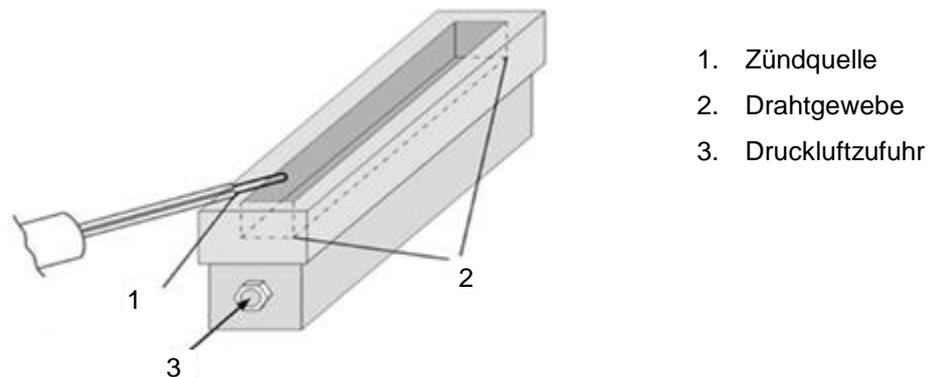


Bild 9. Modifizierte Prüfapparatur (Barth und Leksin) [11]

Das Brandverhalten der Probe wird aufgrund des Ab-/Brandverhaltens durch die Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) im quasi-stationären Zustand charakterisiert und mit einer der vier Brandverhaltenszahlen (BVZ_{qs}) in Tabelle 2 zugeordnet.

Tabelle 2. Definition der Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) [8]

BVZ_{qs}	Art der Reaktion	Bemerkung
I	Kein Ab-/Brennen	-
II	Örtliches Ab-/Brennen der Wirbelschicht oder Stichflamme bei Vorhandensein einer Zündquelle	Keine Ausbreitung eines Brandes
III	Fortlaufendes Ab-/Brennen unter Flammenerscheinung (stehende Fackel)	Ausbreitung eines Brandes
IV	Fortlaufendes Ab-/Brennen über die gesamte Länge oder rasches Ab-/Brennen	Ausbreitung eines Brandes

Im Anhang III werden die ermittelten Brennzahlen (BZ) und Brandverhaltenszahlen (BVZ_{qs}) gegenübergestellt. Die untersuchten Staubproben lassen sich entsprechend ihres Anwendungsbereiches einer von drei Anwendungskategorien zuordnen:

- Nahrungsmittelstäube aus der Milchindustrie A
- Nahrungsmittelstäube aus der Aromaindustrie B
- Stäube aus der chemischen Industrie C

Im Rahmen von mehreren Versuchsreihen wurde bei insgesamt 48 Stäuben die Brennzahl (BZ), Anhang I, ermittelt.

Ein Vergleich zwischen den definierten BVZ_{qs} -Werten und den standardisierten Brennzahlwerten (BZ) ist aus Bild 10 zu entnehmen:

Art der Reaktion bei Bestimmung der Brennzahl		Art der Reaktion bei Bestimmung der Brandverhaltenszahl	
	BZ	BVZ_{qs}	
Kein Anbrennen	1	I	Kein Ab-/Brennen
Kurzes Entzünden und rasches Erlöschen	2	II	Örtliches Ab-/Brennen der Wirbelschicht oder Stichflamme bei Vorhandensein einer Zündquelle
Örtliches Brennen oder Glimmen mit höchstens geringer Ausbreitung	3		
Durchglühen ohne Funkenwurf (Glimmbrand) oder langsame flammenlose Zersetzung	4	III	Fortlaufendes Ab-/Brennen unter Flammeneerscheinung (stehende Fackel)
Abbrennen unter Flammeneerscheinung oder Funkensprühen	5		
Verpuffungsartiges Abbrennen oder rasche flammenlose Zersetzung	6	IV	Fortlaufendes Ab-/Brennen über die gesamt Länge oder rasches Ab-/Brennen

Bild 10. Gegenüberstellung von BZ und BVZ_{qs} [12]

Während sich ein nicht tolerierbares Risiko ab einer Brennzahl von 4 (BZ 4) definieren lässt, ist dieses mit einer Brandverhaltenszahl von II (BVZ_{qs} II) bereits erfüllt. Das Brennverhalten kann durch physikalische Eigenschaften wie Partikelgröße, sowie durch externe Faktoren beispielweise Temperatur oder Luftbewegungen über der Stauboberfläche beeinflusst werden. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, müssen die Randbedingungen zur Bestimmung des Brandverhaltens für alle Versuche identisch sein.

3 Zielsetzung

In vergangenen Kapiteln wurde aufgezeigt, dass keine etablierte Methode existiert, in der die nachvollziehbare Skalierung für Laborversuche behandelt wird. Ziel dieser Arbeit ist es diese fachliche Lücke zu schließen und ein Bewusstsein für die Notwendigkeit der zusammenhängenden Betrachtung zu schaffen. Sie soll helfen, die betrieblichen Forderungen wirksamer Sicherheitseinrichtungen für staubführende Anlagen wie bei Fließbetten zu optimieren.

Hierzu werden im ersten Schritt die Rahmenbedingungen entwickelt, mit denen die realen Parameter eines Produktionsprozesses auf den Laborversuch transferiert werden sollen. Im zweiten Schritt werden die Parameter in die dimensionslose Analyse integriert und der Skalierungsfaktor ermittelt. Mit dem Skalierungsfaktor werden zwei ähnliche Modelle (Bild 11) unterschiedlicher Abmessungen bestimmt mit denen die Laborversuche durchgeführt werden. Eine existierende modifizierte Prüfapparatur [13] wird in der Betrachtung mit Prototyp (Bild 11) bezeichnet. Eine nach der dimensionslosen Analyse spezifizierte Anlage wird Prüfapparatur (Bild 11, Tabelle 3) genannt.

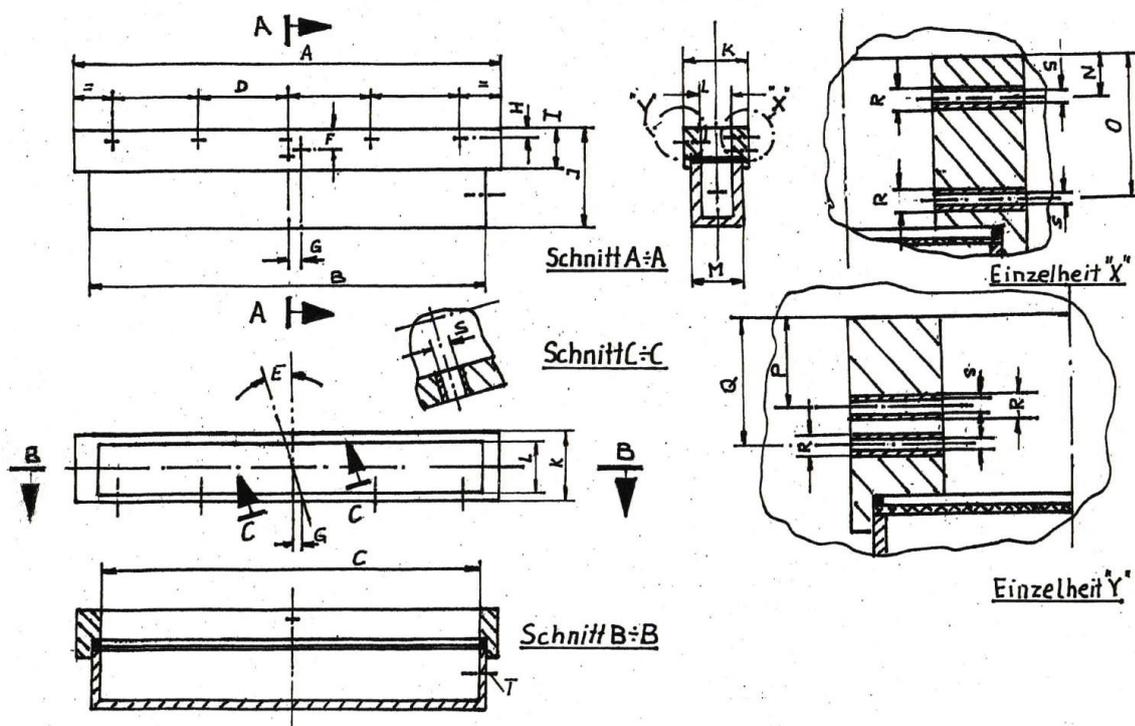


Bild 11. Prototyp und Prüfapparatur

Die Bemaßung für Prototyp und Prüfapparatur ist in Tabelle 3 dargestellt:

Tabelle 3. Maße für Prototyp und Prüfapparatur

Bezeichnung	Prototyp [mm]	Prüfapparatur [mm]	Bemerkung
Material	S 235 JR	S 235 JR	St. 37
A	320	640	-
B	314	628	-
C	296	592	-
D	69	138	-
E	15	0	-
F	14	0	-
G	10	0	-
H	4	8	-
I	29	58	-
J	73	146	-
K	49	98	-
L	27	54	-
M	40	80	-
N	4	8	-
O	16	32	-
P	10	20	-
Q	0	28	-
R	0	5	-
S	1,5	1,5	-
T	6	6	-

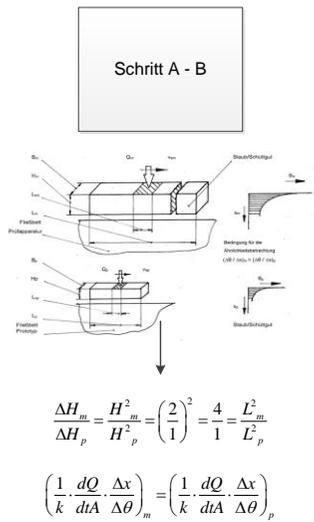
Die thermischen Versuchsergebnisse für Temperatur, Temperaturgradient und Wärmemenge werden von Prototyp und Prüfapparatur gegenübergestellt und bewertet. Die praxisbezogene Validierung erfolgt im Rahmen einer Feldstudie mit einer Sicherheitsanalyse am Beispiel eines ausgewählten staubführenden externen Fließbettes einer Sprühtrocknungsanlage.

Die acht Schritte (A bis H) bilden den ersten Teil eines Gesamtkonzeptes, die nachfolgend aufgeführt werden:

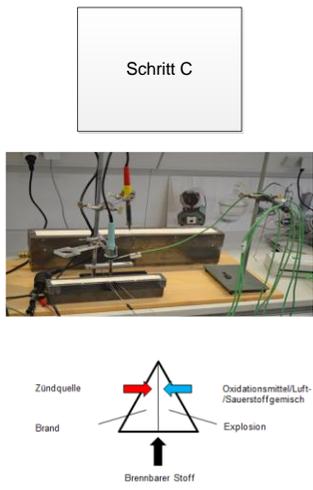
- (A) Bestimmung der thermischen Rahmenbedingungen für die dimensionslose Analyse.
- (B) Dimensionslose Analyse und mathematische Ermittlung der Skalierungsfaktoren für das Prototyp und Prüfapparatur.
- (C) Bestimmung des Temperaturfeldes zur Überprüfung der angenommenen Rahmenbedingungen für die thermische Ähnlichkeitsbetrachtung.
- (D) Ermittlung des Temperaturgradienten durch Laborversuche.
- (E) Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse und Bewertung.
- (F) Bestimmung der Brennzahl (BZ) für abgelagerten Staub mit der Lütolf-Apparatur.

- (G) Bestimmung der Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) für den quasi-stationären Zustand mit dem Prototyp und der Prüfapparatur.
- (H) Sicherheitsanalyse (Feldstudie) an einer realen Fließbetтанlage unter Berücksichtigung der ermittelten Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) für eine definierte Staubprobe.

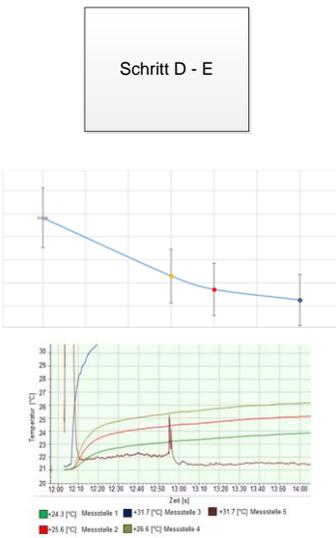
Die praxisbezogene Anwendung wird am Beispiel einer ausgewählten externen Fließbetтанlage einer in der Produktion eingesetzten staubführenden Sprühtrockeneinrichtung durchgeführt. Für die Sicherheitsanalyse dieser Anlage wird für eine ausgesuchte Staubprobe für den quasi-stationären Zustand die Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) mit dem Prototyp ermittelt und bei der HAZOP - Risikobewertung berücksichtigt. Für die mit dem Skalierungsfaktor bestimmte Prüfapparatur wird ebenfalls die Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) bestimmt und bei der Risikobeurteilung herangezogen, um am Beispiel einer Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}), Zustandsgröße der HAZOP Studie, mit unterschiedlichen Randbedingungen ein Verfahren für eine dynamische HAZOP - Bewertung zu entwickeln. Dieses Konzept ist aus dem nachfolgenden Bild 12 zu entnehmen:



Bau der Prüfapparatur



Schritt F - G
(Bestimmung der BZ und BVZqs)



Bestimmung der BVZqs mit der Prüfapparatur

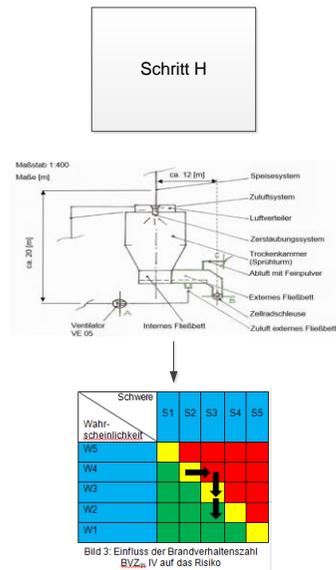


Bild 12. Ablaufkonzept

4 Lösungsweg

Untersuchungen, die das Ab-/Brandverhalten des Staubes im quasi-stationären Zustand ermitteln, können aus wirtschaftlicher Sicht nicht während dem laufenden Produktionsbetrieb durchgeführt werden. Das Risiko, dass bei Versuchen unter Umständen die Anlage beschädigt, zerstört oder im ungünstigen Fall Personen verletzt werden können, ist zu hoch. Daher werden die Untersuchungen an einem skalierten Modell durchgeführt, bei dem der Skalierungsfaktor durch eine dimensionslose Analyse ermittelt wird. Folglich wurde in der vorliegenden Arbeit eine Skalierung und experimentelle Modellierung zum Zweck der Charakterisierung des Ab-/Brandverhaltens am Beispiel einer staubführenden Fließbettanlage entwickelt und bewertet, um festzustellen, wie das quasi-stationäre System im Fließbett auf Energieeintrag reagiert und wie wirksam potentielle Zündquellen sein können, einerseits in Hinblick auf eine lokale Entzündung des Materials vor Ort andererseits im Hinblick auf das weitere Brandverhalten im System.

Die dimensionslose Analyse ist ein Verfahren, das mathematisch den chemischen und/oder physikalischen Prozessablauf beschreibt. Der Zusammenhang der einzelnen Parameter wird dimensionslos formuliert, damit das Verfahren für ähnliche Dimensionssysteme anwendbar ist [14].

Die Dimension beschreibt qualitativ den physikalischen Zustand. Zum Beispiel kann die Masse als leichter oder schwerer Körper präsentiert werden. Die Länge kann als Höhe, Tiefe oder Breite angezeigt werden. Die Dimension einer Länge ist die Länge L , die Masse ist die Masse M , die Kraft ist die Kraft MLT^{-2} und die Kraft eines Gewichtes wird ebenfalls mit der Dimension MLT^{-2} angezeigt [14].

Die physikalische Größe ist eine quantitative Beschreibung einer physikalischen Eigenschaft [14]. Die Angabe erfolgt als Zahlenwert und einer Maßeinheit. Als Beispiel sei nachfolgend eine kurze Gegenüberstellung präsentiert:

Tabelle 4. Gegenüberstellung der physikalischen Größen, Maßeinheiten und Dimensionen

Physikalische Größe	Symbol	Maßeinheit	Dimension
Kraft	F	kg·m/s ²	MLT ⁻²
Leistung	P	kg·m ² /s ³	ML ² T ⁻³
Lineare Länge	x	m	L

4.1 Dimensionslose Analyse für Prüfapparatur und Prototyp

In den bisherigen Literaturrecherchen wurden keine Quellen identifiziert, in der die Skalierung eines Prüfaufbaus für Versuche zur Brennprüfung im quasi-stationären Zustand erläutert wurde. Für die Ähnlichkeitsbetrachtung werden zwei Anlagen unterschiedlicher Größen gegenübergestellt. Die Voraussetzung für die Ähnlichkeitsbetrachtung ist, dass die physikalischen Eigenschaften für das Modell Prüfapparatur sowie Prototyp im gleichen dimensionslosen Verhältnis stehen. Gleichungen, die das thermische Verhalten des Prototyps beschreiben, müssen ebenfalls für die Prüfapparatur gelten.

Für die von einer Zündquelle zugeführten Wärmemenge Q über eine Fläche $A = B \cdot L_k$ mit einer Staubgeschwindigkeit v_s und einer Gesamtlänge des Staubes L (Bild 13) wird die Ähnlichkeit für die thermischen Bedingungen für Prüfapparatur und Prototyp dann erreicht, wenn beide Systeme den gleichen Temperaturgradienten haben [15]:

$$\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\right)_m = \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\right)_p \quad (4.1)$$

Wie in Bild 13 zu erkennen ist, wird bei den Laborversuchen die Wärmemenge Q der Stauboberfläche durch eine sich bewegende Wärmequelle zugeführt. Jedoch wird im realen Fertigungsprozess das erwärmte Produkt bewegt. Die dem Schüttgut zugeführte Wärmemenge breitet sich über die gesamte Länge des Modells aus. Da der Temperaturanstieg an der Stauboberfläche höher ist als im unteren Bereich, würde durch thermische Ausdehnung bei einem festen Stoff eine Biegung des Materials hervorgerufen werden. Dieser Sachverhalt kann ausgeschlossen werden, weil bei den Laborversuchen Staub behandelt wird und die Staubpartikel auf dem Boden der Anlage sedimentieren. Da die Zeit für die Wärmezuführung sehr kurz ist, wird angenommen, dass die Wärmemenge konstant über die Oberfläche $A = B \cdot L_k$ verteilt ist. Der Laborversuch bestätigt diese Annahme (Bild 25, 26).

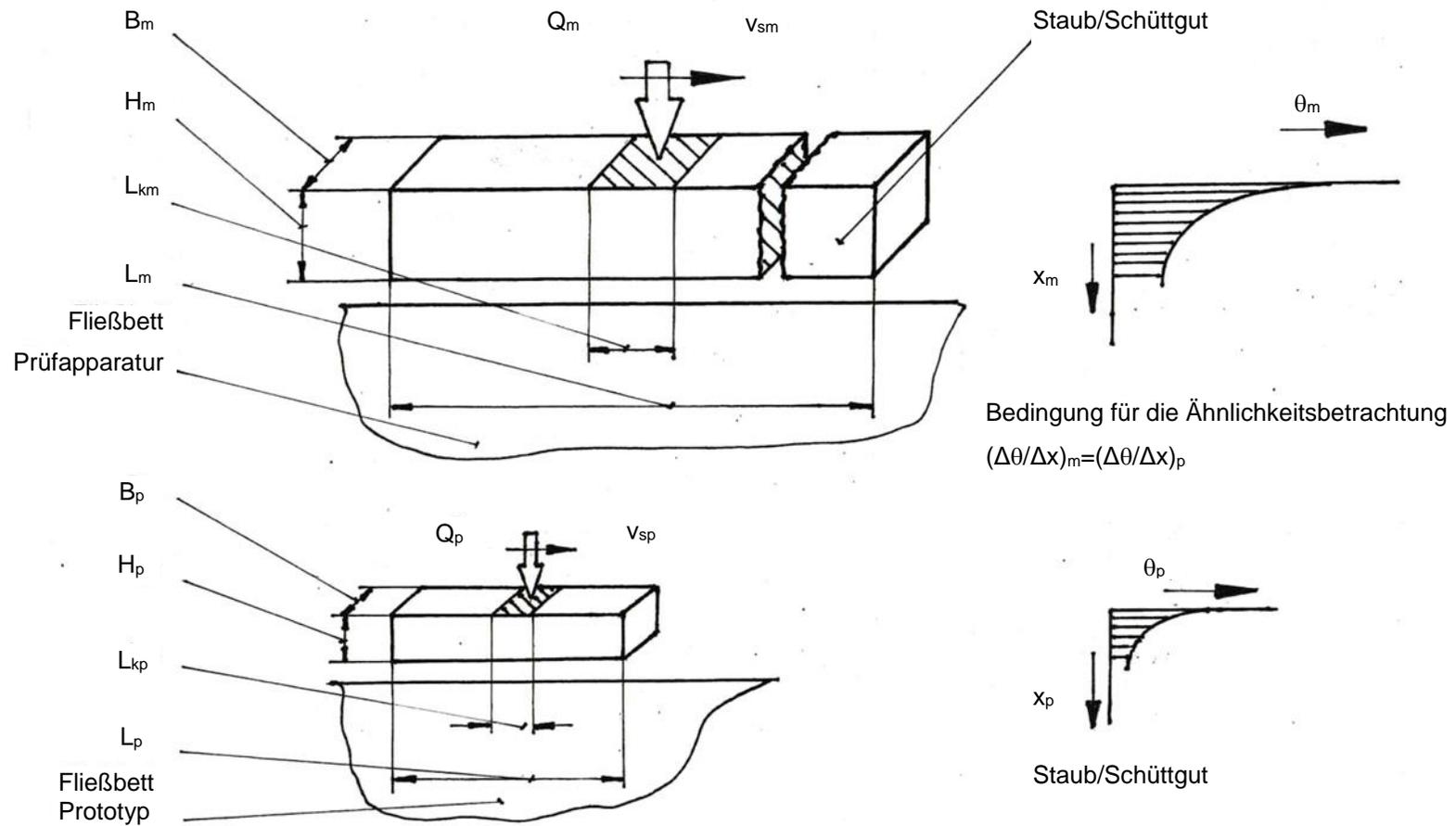


Bild 13. Modell für die thermische Ähnlichkeitsbetrachtung von einem Fließbett

Ausgehend davon, dass die Wärmestrahlung und Konvektion so gering sind, dass sie vernachlässigt werden können, wird für die Analyse nur die Wärmeübertragung durch die Wärmeleitfähigkeit an der Kontaktzone zwischen Wärmequelle und Stauboberfläche betrachtet. Diese Randbedingung ist die Basis für die weitere Vorgehensweise der dimensionslosen Analyse. Für diese Situation des gerichteten Wärmestromes in der eindimensionalen Schreibweise lautet die Fourier Gleichung:

$$\dot{Q} = -kA \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (4.2)$$

Wobei:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad (4.2a)$$

Dabei bedeuten:

- Q = Wärmemenge [J]
- \dot{Q} = Wärmestrom [W] – Wärmemenge pro Zeiteinheit normal zur Fläche A
- k = Wärmeleitfähigkeit des Produktes [W/m·K]
- A = Querschnittsfläche [m²], senkrecht zur Richtung x des Wärmeflusses
- $d\theta/dx$ = Temperaturgradient [°C/mm]
- t = Zeit [s]

Das negative Zeichen in Gleichung (4.2) bedeutet, dass der Wärmefluss sich in Richtung abnehmender Temperatur bewegt.

Da die Wärmemenge pro Zeiteinheit und Kontaktfläche unverändert ist, kann die Gleichung (4.2) wie folgt geschrieben werden:

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = -\frac{\dot{Q}}{kA} \cdot \int_{x_1}^{x_2} dx \quad (4.3)$$

Nach Integration ergibt sich:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta x} = \frac{\dot{Q}}{kA} \quad (4.3a)$$

Dabei ist:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{dQ}{A dt} = q = \text{Wärmestromdichte} \quad (4.3b)$$

Die Wärmestromdichte q ist die zeitliche Änderung der thermischen Energie Q bezogen auf den Querschnitt A senkrecht zur Wärmeeinbringung. Gleichung (4.3a) zeigt, dass die thermische Ähnlichkeit von unterschiedlichen Systemen mit den gleichen Temperaturgradienten Gleichung (4.1) und der gleichen thermischen Leitfähigkeit (Wärmeleitfähigkeit) k , der Wärmestromdichte q für Prüfapparatur und Prototyp die gleiche ist. Die Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ für einen festen Stoff kann als Funktion der thermischen Leitfähigkeit k , Staubbicke Δx , Materialdichte ρ , spezifischer Wärme des Materials c_p und der Wärmestromdichte q ausgedrückt werden:

$$\Delta\theta = f(k, \Delta x, \rho, c_p, q) \quad (4.4)$$

oder

$$\Delta\theta = k^a \cdot (\Delta x)^b \cdot \rho^c \cdot c_p^d \cdot q^e \quad (4.4a)$$

Werden die Dimensionen Masse M , Länge L , Zeit T und Temperatur θ (Tabelle 5) als wesentliche Größen in die einzelnen Variablen eingesetzt, dann kann diese Gleichung wie folgt geschrieben werden:

$$\Delta\theta = (L \cdot M \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1})^a \cdot (L)^b \cdot (M \cdot L^{-3})^c \cdot (L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1})^d \cdot (M \cdot T^{-3})^e \quad (4.4b)$$

Dabei ist:

$$\beta = \frac{k}{\rho c_p} = \text{Temperaturleitfähigkeit}$$

k = Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]

β = Temperaturleitfähigkeit [m²/s]

ρ = Materialdichte [kg/m³]

c_p = Spezifische Wärmekapazität [J/kg·K]

Die Temperaturleitfähigkeit β wird gelegentlich als Wärmediffusivität (thermal diffusivity) bezeichnet und ist in dieser Betrachtung eine Materialkonstante für den Staub im Fließbett. Sie beschreibt, wie schnell ein Stoff auf eine Temperaturänderung als Folge eines Temperaturgefälles reagiert.

Aus Gleichung (4.5b) ergibt sich eine dimensionslose Gruppe, die für Prototyp und Prüfapparatur verwendet werden kann. Diese ist als Nusselt Zahl bekannt.

$$\frac{q\Delta x}{k\Delta\theta} = Nu \quad (4.5c)$$

Die Nusselt Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl für die Wärmeübertragung zwischen einer festen Oberfläche und einem strömenden Fluid (wie beispielsweise im Fließbett der bewegendes Staub). Eine gut verständliche Übersicht über häufig verwendete Dimensionslose Kenngrößen enthält der VDI-Wärmeatlas [35]. Buckingham [34] und Wetzler [36] setzen sich detailliert mit solchen Kenngrößen auseinander. Wetzler beschreibt dazu noch ein Vorgehen zur universellen Ableitung [37].

Für zwei geometrisch ähnliche Konstruktionen wie Prüfapparatur und Prototyp muss die Nusselt Zahl identisch sein:

$$Nu_m = Nu_p$$

Daraus folgt:

$$\left(\frac{q \Delta x}{k \Delta \theta}\right)_m = \left(\frac{q \Delta x}{k \Delta \theta}\right)_p \quad (4.6)$$

Wird q durch Gleichung (4.3a) ersetzt, ergibt sich:

$$\left(\frac{1}{k} \cdot \frac{dQ}{dtA} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta \theta}\right)_m = \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{dQ}{dtA} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta \theta}\right)_p \quad (4.6a)$$

Gleichung (4.6) zeigt, dass das Verhältnis der Temperaturdifferenz von Prüfapparatur und Prototyp ($\Delta \theta_m / \Delta \theta_p$) durch diesen linearen Skalierungsfaktor ausgedrückt werden kann:

$$\frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_p} = \frac{\Delta x_m}{\Delta x_p} \quad (4.7)$$

Der Skalierungsfaktor für die Wärmemenge kann mit Gleichung (4.6a) kalkuliert werden, wenn die Wärmemenge für die Prüfapparatur und den Prototyp im gleichen Zeitraum zugeführt wird:

$$t_p = t_m \quad (4.8)$$

Aus Gleichung (4.6a) ergibt sich:

$$\left(\frac{dQ}{dA}\right)_m = \left(\frac{dQ}{dA}\right)_p \quad (4.9)$$

oder

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{A_m}{A_p} \quad (4.9a)$$

Gleichung (4.9a) zeigt, dass die Ähnlichkeit für den Wärmeaustausch dann eintritt, wenn die Wärmezuführung Q für beide Systeme im gleichen Verhältnis steht, wie die Flächen senkrecht zum Wärmeeintrag. Somit hängt die Ähnlichkeit für die zugeführte Wärmemenge vom geometrischen Skalierungsfaktor ab.

Die Thermische Ausdehnung ΔH von Staub im Fließbett mit einem linearen Ausdehnungskoeffizient α und einem Temperaturanstieg ΔT wird wie folgt bestimmt:

$$\Delta H_m = H_m \cdot \alpha_m \cdot \Delta T_m \quad (4.10)$$

$$\Delta H_p = H_p \cdot \alpha_p \cdot \Delta T_p \quad (4.10a)$$

Wird Gleichung (4.10) durch Gleichung (4.10a) geteilt ergibt sich folgendes:

$$\frac{\Delta H_m}{\Delta H_p} = \frac{H_m \alpha_m \Delta T_m}{H_p \alpha_p \Delta T_p} \quad (4.11)$$

Von Gleichung (4.7) ist bekannt, dass:

$$\frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_p} = \frac{\Delta x_m}{\Delta x_p}$$

Somit ist:

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_p} = \frac{H_m}{H_p}$$

Unter dieser Voraussetzung kann Gleichung (4.11) wie folgt dargestellt werden:

$$\frac{\Delta H_m}{\Delta H_p} = \frac{H_m}{H_p} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_p} \cdot \frac{H_m}{H_p} \quad (4.12)$$

oder

$$\frac{\Delta H_m}{\Delta H_p} = \frac{H_m^2}{H_p^2} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_p} \quad (4.13)$$

Da für die Versuche mit dem Modell Prüfapparatur und der Versuchsvorrichtung Prototyp ein Prüfstoff (Staub) mit dem gleichen linearen Ausdehnungskoeffizienten α verwendet wird, das bedeutet $\alpha_m = \alpha_p$ kann in Gleichung (4.13) wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{\Delta H_m}{\Delta H_p} = \frac{H_m^2}{H_p^2} \quad (4.13a)$$

Die existierende Versuchsvorrichtung Prototyp hat eine Gesamtlänge von 300 [mm]. Aufgrund der im Labor vorhandenen Arbeitsfläche mit installierter Luftabsaugung wird das Modell Prüfapparatur mit einer Gesamtlänge von 600 [mm] geplant. Für diese Randbedingung wird der lineare Skalierungsfaktor wie folgt bestimmt:

$$S = \frac{H_m}{H_p} = \frac{L_m}{L_p} = \frac{600}{300} = \frac{2}{1} \quad (4.14)$$

Gleichung (4.14) kann auch wie folgt ausgedrückt werden:

$$S = \frac{H_m}{H_p} = \frac{\Delta x_m}{\Delta x_p} = \frac{L_m}{L_p} \quad (4.14.a)$$

Dann ergibt sich für die lineare Ausdehnung ΔH :

$$\frac{\Delta H_m}{\Delta H_p} = \frac{H_m^2}{H_p^2} = \left(\frac{2}{1}\right)^2 = \frac{4}{1} = \frac{L_m^2}{L_p^2} \quad (4.14.b)$$

Wird der ermittelte lineare Skalierungsfaktor in Gleichung (4.9a) eingesetzt, kann das Verhältnis der Wärmemenge und Temperatur von Modell Prüfapparatur und Prototyp nachfolgend ermittelt werden:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{A_m}{A_p} = S^2 = \frac{4}{1} \quad (4.15)$$

und

$$\frac{\Delta Q_m}{\Delta Q_p} = \frac{\Delta x_m}{\Delta x_p} = \frac{2}{1} \quad (4.16)$$

Zur Bestimmung der Flammenhöhe wird der lineare Skalierungsfaktor angewendet:

$$S = \frac{H_{fm}}{H_{fp}} = \frac{\Delta x_m}{\Delta x_p} = \frac{2}{1} \quad (4.17)$$

Die ermittelten dimensionslosen Parameter sind in Tabelle 6 aufgeführt:

Tabelle 6. Skalierungsfaktor für die Ähnlichkeitsbetrachtung

Parameter	Symbol	Skalierungsfaktor
Lineare Länge	H_m/H_p	2/1
Thermische Ausdehnung	$\Delta H_m/\Delta H_p$	4/1
Temperaturdifferenz	$\Delta\theta_m/\Delta\theta_p$	2/1
Wärmemenge	Q_m/Q_p	4/1
Wärmefluss	q_m/q_p	1
Temperaturgefälle	$(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$	1
Fläche	A_m/A_p	4/1
Linearer Ausdehnungskoeffizient	$\alpha_m = \alpha_p$	1
Wärmeleitfähigkeit	k_m/k_p	1
Zeit	t_m/t_p	1
Flammenhöhe	H_{fm}/H_{fp}	2/1
Nusselt Zahl	Nu_m/Nu_p	1

Die Tabelle 6 präsentiert den Skalierungsfaktor für die einzelnen oben aufgeführten Parameter. Die Werte werden zur Bemaßung der Prüfapparatur herangezogen und bei der Gegenüberstellung der ermittelten Temperaturfelder verwendet, um die Ähnlichkeit beider Modelle (Prototyp und Prüfapparatur) zu prüfen.

4.2 Zündquelle

Vorraussetzungen für Brand- und Explosionsereignisse (Bild 14) sind:

- eine wirksame Zündquelle
- ein brennbarer Stoff
- ein Oxidationsmittel (z.B. Luft-/Sauerstoffgemisch)

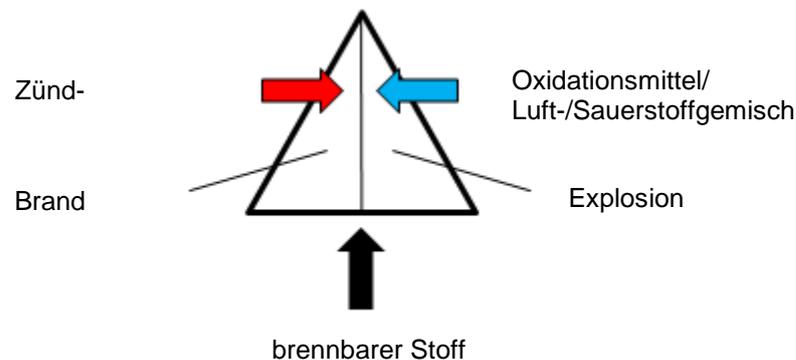


Bild 14. Vereinfachte Darstellung für einen Brand bzw. eine Explosion [16]

Die Zündquelle ist eine Energie, die mit einem Oxidationsmittel eine Verbrennung auslöst [17]. Die DIN EN 1127 definiert 13 Zündquellen [18]. Die häufigsten Zündquellen sind:

- Flammen und heiße Gase
- heiße Oberflächen
- Elektrische Geräte und Komponenten
- Mechanisch erzeugte Schlag-, Reib- und Abtragvorgänge
- Statische Elektrizität
- Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben

Zur Ermittlung der sicherheitstechnischen Kenngröße für abgelagerten Staub wird ein Platindraht oder eine Flamme verwendet, wie in Kapitel 2.1 beschrieben. Zündquellen im Fließbett der Lebensmittel- und chemischen Industrie sind im Wesentlichen auf die Selbstentzündung organischer Produkte zurückzuführen. Zündvorgänge dieser Art können sich durch Ablagerungen an Sprühturmwänden oder Düsen ausbilden und (beispielsweise durch die Zellenradschleuse) in das anschließende Fließbett transportiert werden. Zudem kann eine Anhäufung des Staubes in einem Fließbett auftreten, der ab einer bestimmten Größe in ein Glimmnest übergeht und ebenfalls als Zündquelle fungieren kann [5].

5 Verfahrenstechnische Anforderungen für die Fließbett-Modellierung

Chemische Vorgänge und Wärmegeneration gehören in der Verfahrenstechnik zusammen. Bei Laborversuchen verhält sich der Prozess häufig anders als beim Fertigungsprozess, da die Versuche in einem anderen Maßstab gefahren werden.

Die verfahrenstechnische Situation, die in einer Fließbetтанlage in der Produktion vorkommt, sollte auch im Modell charakterisiert sein. Bei dieser Betrachtung wird der Temperaturgradient als Messgröße herangezogen, da die Temperatur eines Körpers seine thermodynamische Situation (Wärmezustand) beschreibt. Sie wird in Grad Celsius [°C] gemessen und als relative Temperatur bezeichnet. Sie ist von der spezifischen Wärmekapazität des Materials, des Gewichtes und der enthaltenen Wärmeenergie eines Körpers abhängig.

Daraus ergibt sich, dass zwei ähnliche Anlagen (Prototyp, Prüfapparatur) anhand des Temperaturgradienten verglichen werden können (Gleichung 4.1).

$$\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\right)_p = \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\right)_m \quad (4.1)$$

Wobei:

...*p* = Tiefergestellter Index ist hinweisend für Modell Prototyp

...*m* = Tiefergestellter Index ist hinweisend für Modell Prüfapparatur

Der in der dimensionslosen Analyse ermittelte Skalierungsfaktor wird zur Bestimmung der Parameter und der Zustandsgrößen herangezogen. Dieser ist ein wichtiges Werkzeug für die Konstruktion von Neuanlagen und der Auslegung von Versuchsvorrichtungen wie Prüfapparaturen.

In einer Fließbetтанlage wird das Schüttgut durch einen Luftstrom in Bewegung versetzt. Durch die Erhöhung der Geschwindigkeit des Luftstromes wird ein Zustand erreicht, der das Absetzen des Staubes verhindert und somit zu einem Schwebезustand führt. In diesem Zustand entsteht ein Gleichgewicht zwischen dem Schüttgut F_S , dem Gewicht des Gases in den Hohlräumen des Schüttgutes F_G und dessen Auftrieb F_A . Dieser Zustand wird auch Lockerungszustand genannt [19] und muss identisch für Prototyp und Prüfapparatur sein.

Die hierzu benötigte Kraft des Luftstromes, auf das Schüttgut und das Gewicht des eingeschlossenen Gases, kann wie folgt ermittelt werden:

$$\Delta p \cdot A = F_K = F_S + F_G - F_A \quad [19] \quad (5.1)$$

wobei:

F_K = Kraft des Luftstromes [kg·m/s²]

F_A = Auftriebskraft des Luftstromes [kg·m/s²]

F_S = Schüttgewicht des Produktes [kg·m/s²]

F_G = Gewicht des Gases in den Hohlräumen des Schüttgutes [kg·m/s²]

A = Fläche [m²]

Δp = Druckverlust [kg/m·s²]

Der Druckverlust in der Praxis ist meist größer als in der theoretischen Betrachtung [19]. Das ist auf die Gewichtskraft des Schüttgutes, das Gewicht des Gases in den Hohlräumen des Schüttgutes, sowie das Gewicht der Luft zurückzuführen.

Die Konstruktion des Anströmbodens hat einen großen Einfluss auf den Versuchsaufbau. Der Boden kann mit entsprechenden Maschen oder als Sieb ausgeführt werden. Die Lochgestaltung ist ein wesentlicher Punkt bei der Projektierung, da dadurch die Luftführung und somit der Produktstrom bestimmt werden kann.

Die Maschenweite des Siebes ist von der Dichte, der Korngröße, der fluidisierten Stoffe, der Beschaffenheit der Wirbelschicht und den Fluideigenschaften des eingesetzten Gases (temperierte Luft) abhängig. Es können auch Anströmböden verwendet werden, deren Maschenweite größer als der Korndurchmesser des verwendeten Produktes ist. Dies ist möglich, da durch die Bildung von Produktbrücken kein Durchrieseln des Stoffes durch den Anströmboden stattfindet [19]. Bild 15 stellt eine schematische Darstellung einer Fließbetanlage dar.

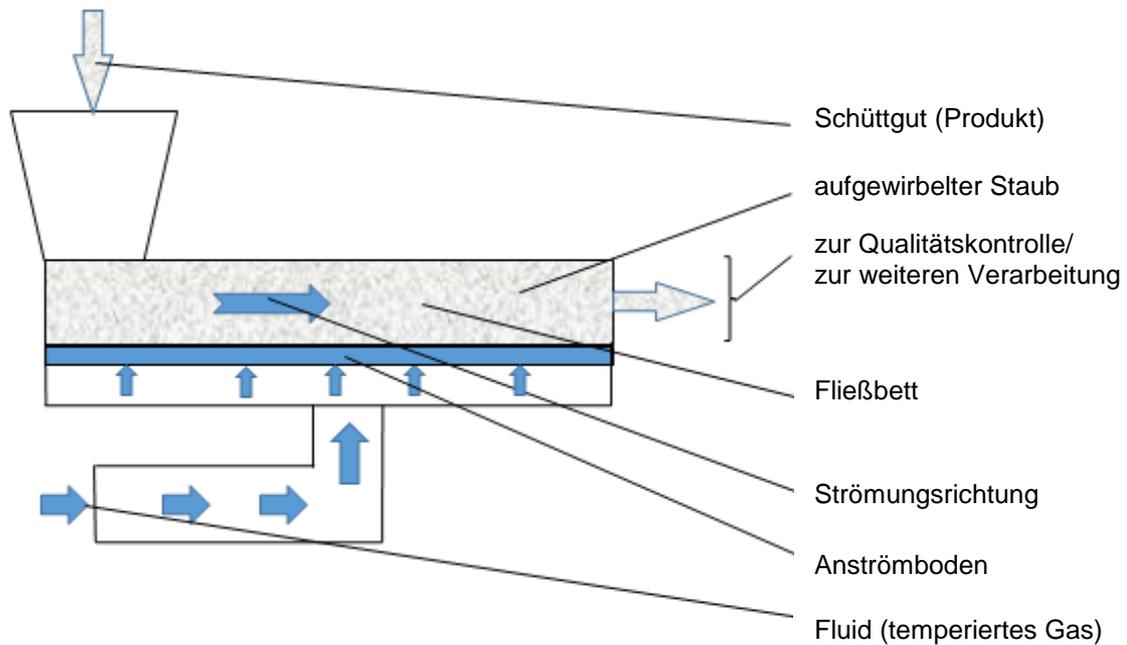


Bild 15. Schematischer Aufbau einer Fließbett-Anlage

Die oben aufgeführten Betrachtungen sind die Grundlage für die Entwicklung eines Fließbett-Modells im Rahmen dieser Dissertation. Als Basis für die Entwicklung der Prüfapparatur dient der Prototyp [12]. Für die Laborversuche mit dem Prototyp und der Prüfapparatur wurden folgende Punkte berücksichtigt:

- Genaue Formulierung der Problemstellung, so dass diese für Prüfapparatur und Prototyp gültig sind.
- Bestimmung der Abmessung (Größe) von Prototyp und der Prüfapparatur.
- Bestimmung unterschiedlicher Prüfapparatur-Größen, die benötigt werden könnten, um die Zielvorstellung zu erreichen.
- Ermittlung der Prozess-Zustandsgrößen: Produkt, Menge, Mengenstrom, Temperatur, Druck, Zeit, Prozessrichtung, die für die Versuchsdurchführung erforderlich sind.
- Bestimmung von Produkten, die für den Versuch benötigt werden und identisch sind für Prototyp und Prüfapparatur.
- Ermittlung der Rahmenbedingungen für den Prozessablauf.
- Ermittlung und Verwendung des Skalierungsfaktors für alle Zustandsgrößen.

Die Vorgehensweise für die Ähnlichkeitsbetrachtung ist aus Bild 16 zu entnehmen:

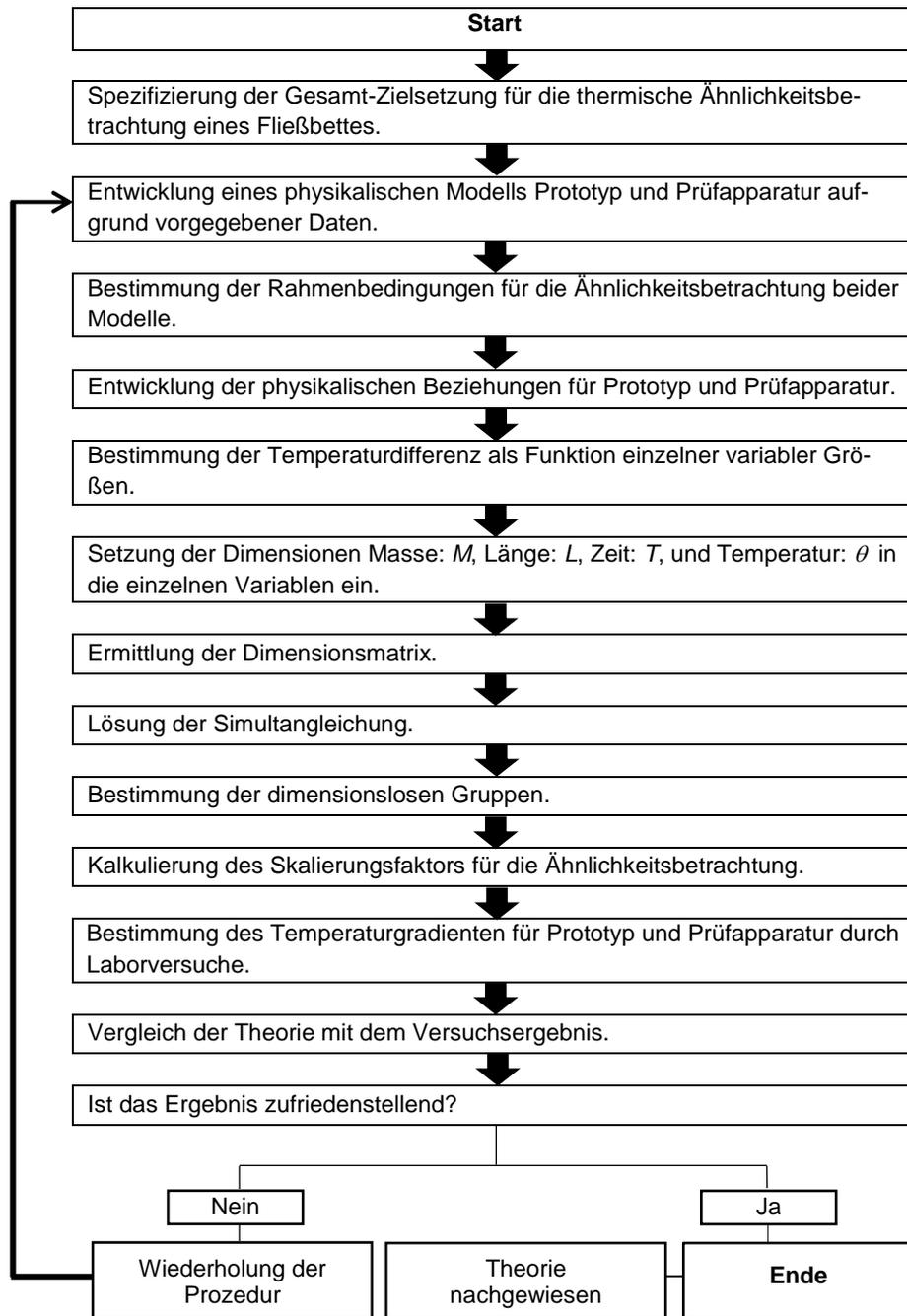


Bild 16. Vorgehensweise für die Ähnlichkeitsbetrachtung Prototyp und Prüfapparatur

6 Versuchsaufbau zur Ermittlung des Skalierungsfaktors

Die Untersuchung des Temperaturfeldes mit einer sich bewegenden punktförmigen elektrischen Wärmequelle kann in sechs Stufen unterteilt werden:

1. Vorbereitung der Wärmequelle
2. Simulierung des Fließbettes (vertikal und horizontal)
3. Bestimmung des Temperaturfeldes im Prototyp
4. Bestimmung des Temperaturfeldes in der Prüfapparatur
5. Dokumentation der Versuchsergebnisse
6. Gegenüberstellung und Beurteilung der Versuchsergebnisse

Für die Versuche mit dem Prototyp wurde als punktförmige elektrische Wärmequelle ein Weller Lötkolben LR-21 mit einem elektronisch stufenlosen, regelbaren Versorgungsteil WECP-20 Temtronic der Firma Cooper Tools GmbH verwendet. Das Versorgungsteil für den Lötkolben ist für einen Temperaturbereich von 150 [°C] bis 450 [°C] ausgelegt und in 50 [°C] Schritten unterteilt. Die Kalibrierung des Lötkolbens ergab für 150 [°C] einen Wert von 52 [°C] und für die 450 [°C] wurden 163 [°C] gemessen. Alle weiteren Werte sind aus Tabelle 7 zu entnehmen. Ein Ni-Cr-Ni Typ K Thermoelement wurde eingesetzt, um die Temperatur an der Spitze der Wärmequelle zu messen. Das Thermoelement wurde mit einem Multi Channel Measurement System verbunden.

Tabelle 7. Gegenüberstellung angezeigter vs. gemessener Lötkolbentemperatur

Angezeigte Temperatur [°C] am Versorgungsteil WECP-20 Temtronic	Gemessene Temperatur an Lötkolben Spitze LR-21 [°C]	Angezeigte Temperatur [°C] am Versorgungsteil WECP 20 Temtronic	Gemessene Temperatur an Lötkolben Spitze LR-21 [°C]
150	52	350	121
200	78	400	136
250	94	450	163
300	108	-	-

6.1 Vertikaler Versuchsaufbau

Die Versuche werden an einem Prototyp und an einer Prüfapparatur durchgeführt. Der Prototyp ist ein nach oben offener Metallkasten aus S 235 JR (St. 37) mit den Außenmaßen 320 [mm]×50 [mm]×70 [mm]. Der innere Bereich zur Aufnahme der Proben (Öffnung nach oben) hat eine Fläche von 300 [mm]×30 [mm]. Ein Drahtgewebe mit

20 [µm] Maschenweiten teilt das Modell in einen oberen und unteren Bereich. Der Raum unterhalb des Drahtgewebes kann an eine Druckluftleitung angeschlossen werden. Mit einem Regelventil ist ein Druckaufbau zwischen 1 [bar] und 4 [bar] möglich [5].

Zur Bestimmung des Temperaturfeldes sind im Prototyp und in der Prüfapparatur vertikal je 4 Mantel-Thermoelemente vorgesehen. Beim Modell Prototyp sind die Messpunkte von der Oberkante des Schüttguts im Abstand von 4 [mm], 10 [mm] und 16 [mm] angeordnet. Aus Platzgründen wurde ein weiteres Thermoelement, 14 [mm] von der Schüttgutoberkante vertikal nach unten und 10 [mm] von der Mitte versetzt, im Winkel von 15 [°] eingebaut. Alle Thermoelemente sind so installiert, dass sie in der Mitte des Modells senkrecht übereinander liegen (Bild 17).

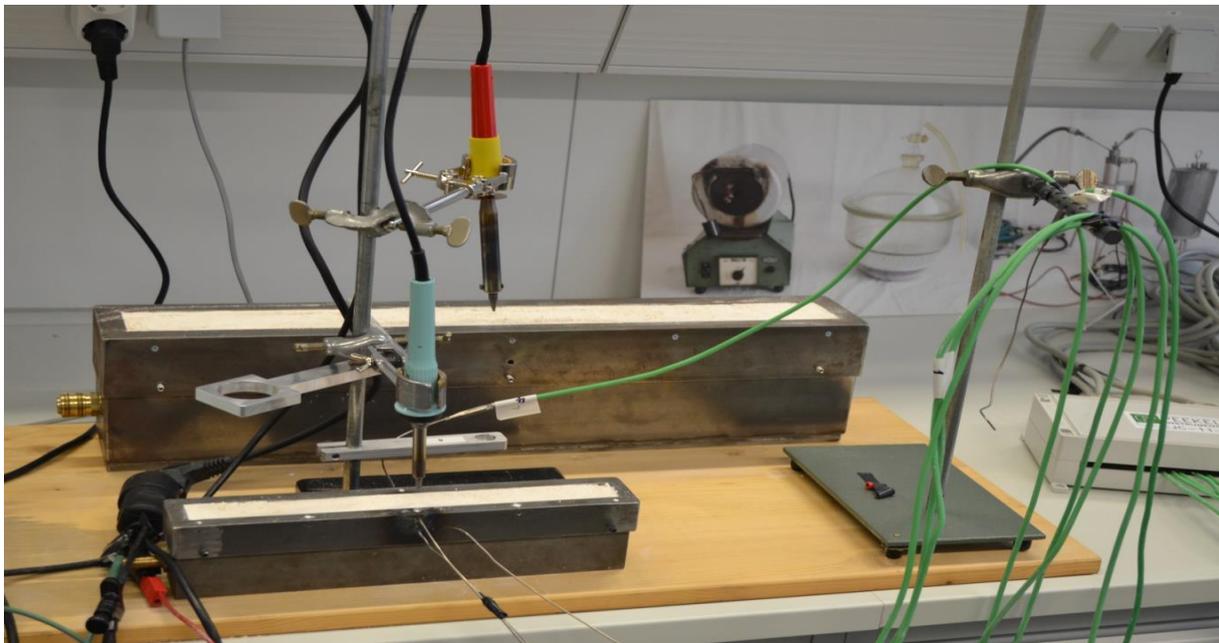


Bild 17. Prototyp und Prüfapparatur

Mit dem Skalierungsfaktor 2/1 von Prototyp zu Prüfapparatur wurde die Modelllänge von 320 [mm] beim Prototyp auf 640 [mm] für die Prüfapparatur geändert. Für alle anderen Maße wurde ebenfalls der Skalierungsfaktor angewandt. Grund für die Wahl des Skalierungsfaktors 2/1 waren die Abmessungen des Laborabzugs. Die Abmessungen der Modelle sind im Bild 11 und Tabelle 3 dargestellt.

6.2 Horizontaler Versuchsaufbau

Zur Bestimmung des Temperaturfeldes in horizontaler Richtung sind fünf Thermoelemente 5 [mm] von der Oberkante des Prototyps nebeneinander installiert. Ausgehend von der Mitte des Prototyps beträgt der Abstand zwischen den Thermoelementen 69 [mm] und zur Außenkante der Fließbettnachbildung 10 [mm].

Eingesetzt wurden Mantel-Thermoelemente NiCr – Ni Typ K mit einem Durchmesser von 1,5 [mm] und eine Ausgleichsleitung nach DIN 43710 [20] und DIN 60584 [21]. Der Mantelwerkstoff ist 2.4816². Da Temperaturen zwischen 300 [°C] und 400 [°C] zu erwarten waren, wurden Thermoelemente für eine Einsatztemperatur von –200 [°C] bis +1200 [°C] mit einer Toleranzklasse K2 ($\pm 0,0075 \cdot \theta$) eingesetzt. Bild 35 in Kapitel 7.5 ist eine Gegenüberstellung von Temperatur [°C] und der dazugehörigen Toleranzklassen [K] für unterschiedliche Thermoelement Typen.

Die installierten Thermoelemente sind am Peket CJ 11 über dem Multi Channel Measurement System an den Computer angeschlossen (Bild 18). Als Programm wird Autolog 3000 verwendet damit die gemessenen Daten grafisch dargestellt werden können.

² Bei dem Stoff 2.4816 handelt es sich um eine Nickel-Chrom-Eisen-Legierung (NiCr15Fe8).

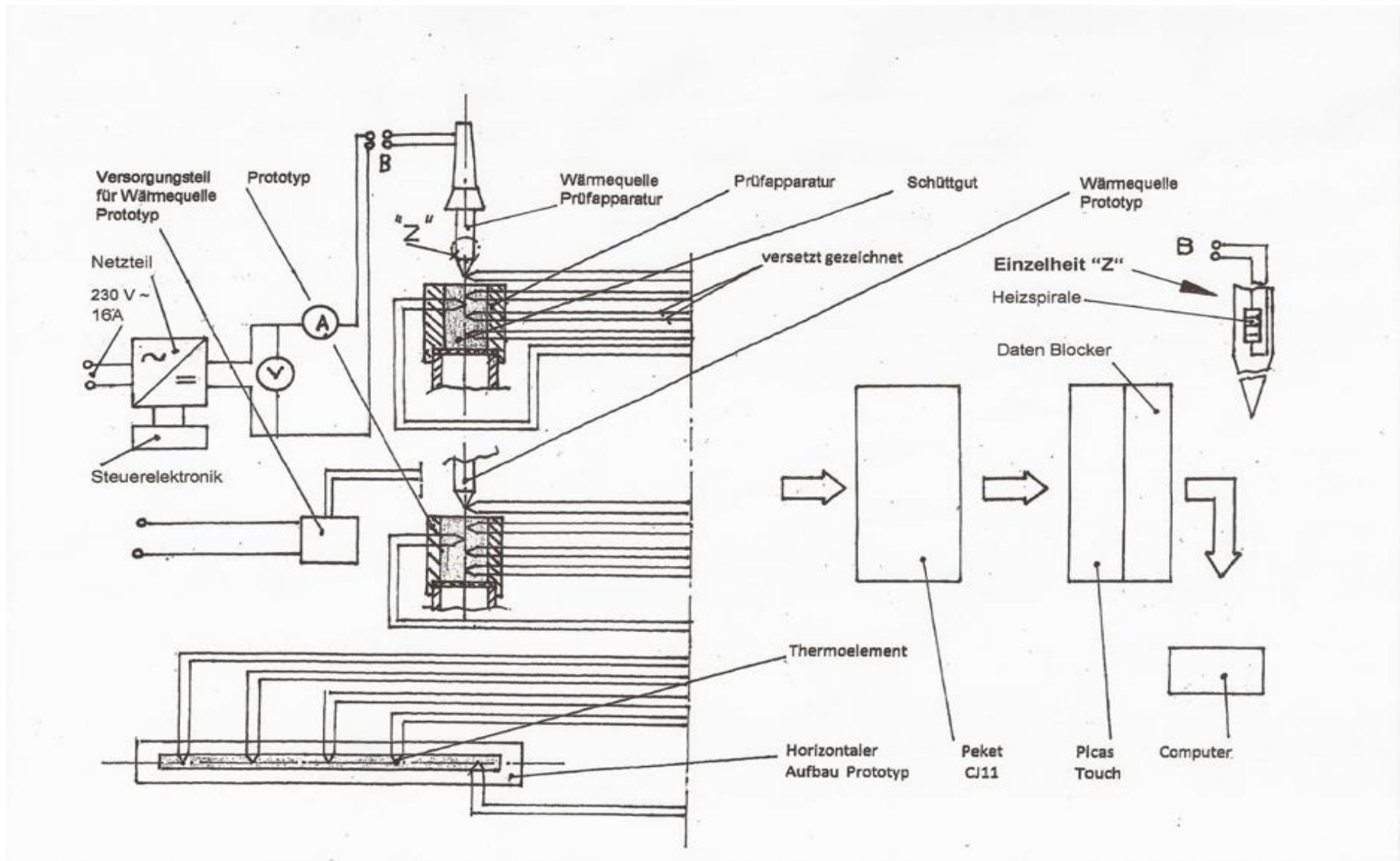


Bild 18. Blockdiagramm mit Installation der Thermoelemente

7 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden die Versuche zur Ermittlung des vertikalen und horizontalen Temperaturfeldes beschrieben. Mit der Bestimmung des vertikalen Temperaturfeldes soll der in der dimensionslosen Analyse ermittelte Skalierungsfaktor für die Parameter Temperaturdifferenz $\Delta\theta_p/\Delta\theta_m = 1/2$ und das Temperaturgefälle $(\Delta\theta/\Delta x)_p/(\Delta\theta/\Delta x)_m = 1$ nachgewiesen werden.

Zu Beginn der Versuchsreihe wurde die Messgenauigkeit der Thermoelemente bestimmt. Hierzu sind die Sensoren bei 0 [°C] in Eiswasser kalibriert worden. Da der Eiswasserbehälter nicht isoliert war, wurde die Kalibrierung durch die von außen einwirkende Umgebungstemperatur beeinflusst. Messpunkt 7 wurde deswegen in der Zeit zwischen 60 [s] und 80 [s] für Testzwecke kurz entnommen und wieder platziert, um die Genauigkeit der Kalibrierung zu überprüfen. Wie aus Bild 19 zu ersehen ist, wurde nach Entnahme der gleiche Wert wie vorher gemessen.

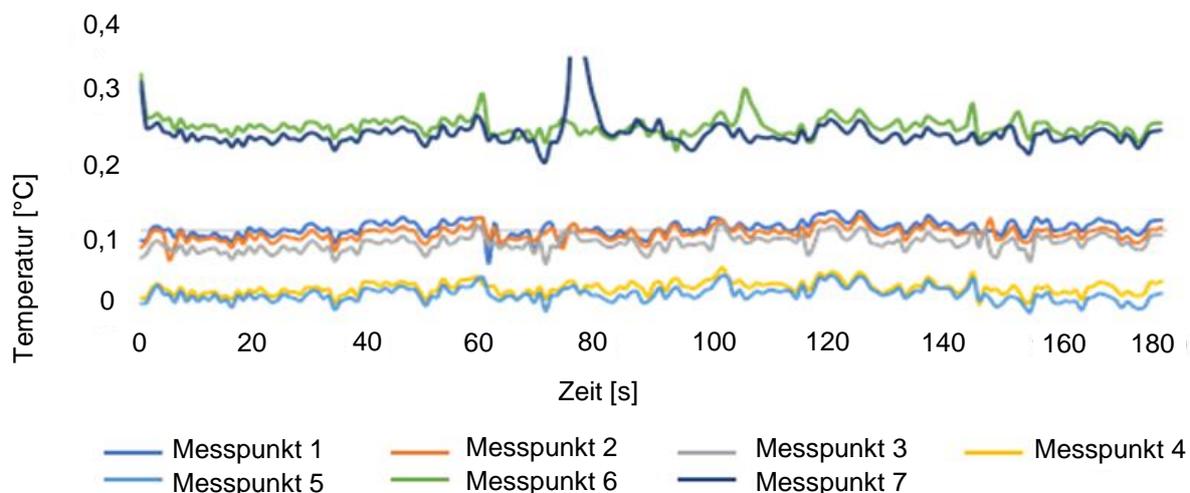


Bild 19. Kalibrierung der Thermoelemente in Eiswasser

So wird angenommen, dass die Temperatur des Eiswassers für die Kalibrierung konstant gehalten wurde. Die Kalibrierung dient zur Bestimmung möglicher Abweichungen der einzelnen Komponenten untereinander. Die gemessenen Abweichungen werden bei der Versuchsauswertung berücksichtigt.

Das Ergebnis der Kalibrierung ist in Tabelle 8 wiedergegeben:

Tabelle 8. Kalibrierung der Thermoelemente

Position	Abweichung [°C]	Korrekturfaktor [°C]	Position	Abweichung [°C]	Korrekturfaktor [°C]
1	-0,1	+0,1	4	-0,15	+0,15
2	-0,1	+0,1	5	-0,15	+0,15
3	-0,1	+0,1	-	-	-

Um die Brandgefahr gering zu halten, wurde für das Fließbett als Schüttgut Weizenmehl 1050 mit der Brennzahl 2 (BZ 2) verwendet. Die Schüttgutfüllung wurde plan mit der Oberfläche des Prototyps erstellt. Die elektrische Wärmequelle (LötKolben) wurde außerhalb des Modells erwärmt (Bild 20).

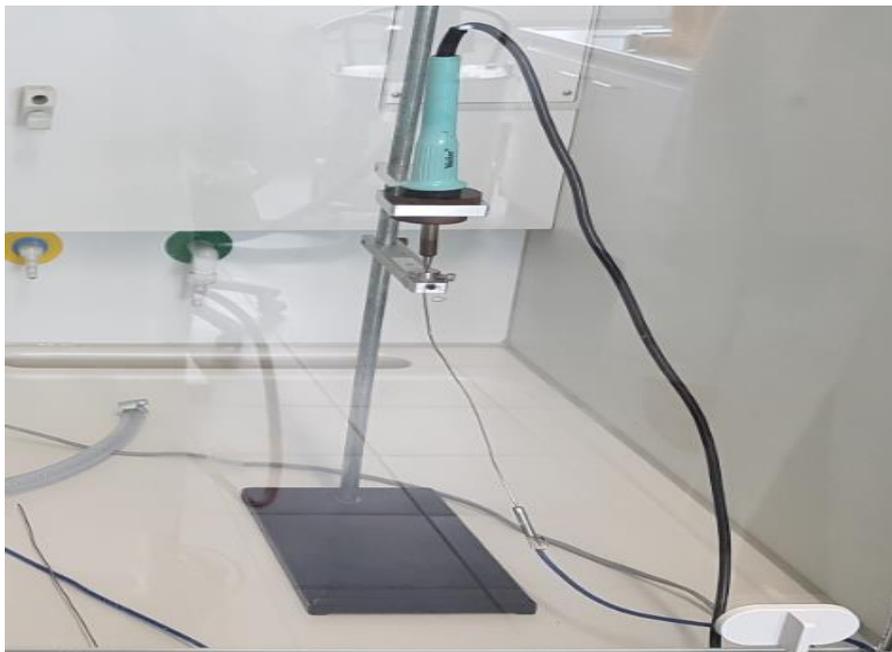


Bild 20. Aufheizen der Wärmequelle

Die Temperatur der aufgeheizten LötKolbenspitze wurde fortlaufend überwacht und dokumentiert, bis eine Gleichgewichtsbedingung (Bild 21) erreicht wurde:

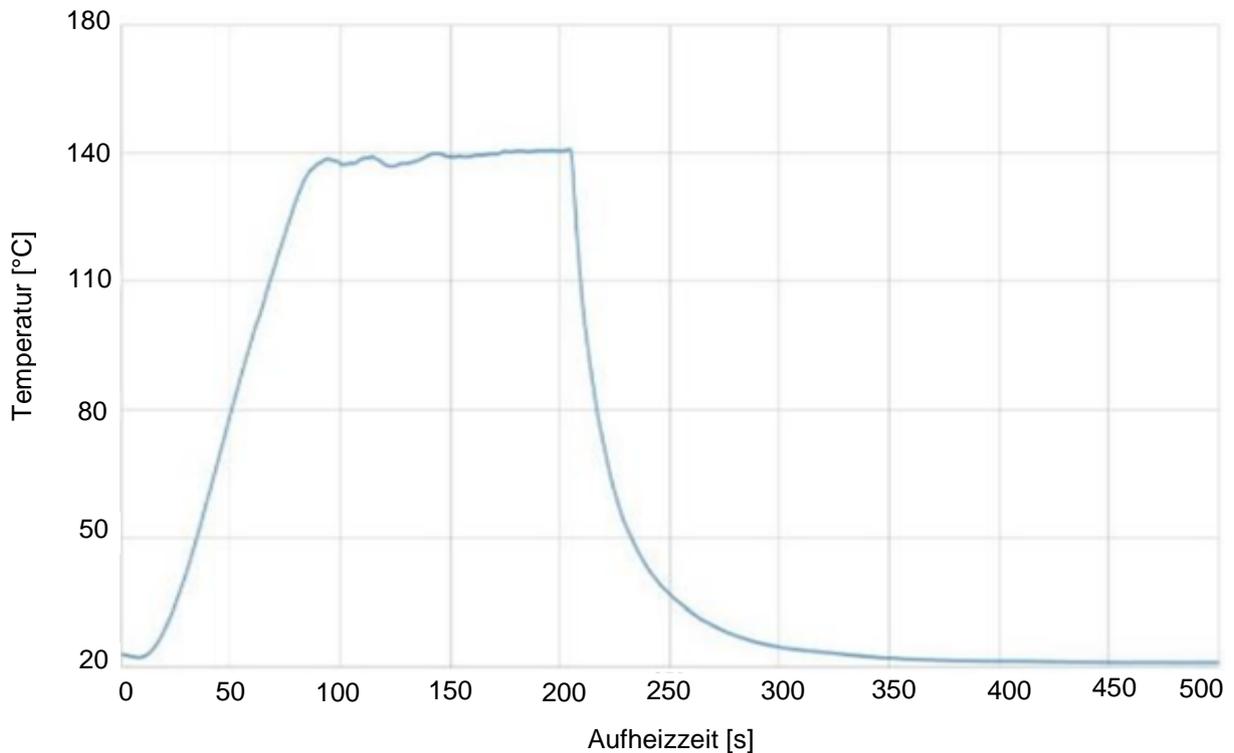


Bild 21. Gleichgewichtsbedingungen beim Aufheizen der Wärmequelle für den vertikalen Versuch mit dem Prototyp

Wie aus Bild 21 ersichtlich, wurde eine konstante Temperatur nach einer Aufheizzeit von 100 [s] angezeigt. Die gleichbleibende Temperatur weist darauf hin, dass die zugeführte und abgeführte Wärmemenge identisch sind und eine permanente Wärmeenergie der Stauboberfläche zugeführt werden kann. Bei 200 [s] zeigt die Grafik eine abfallende Kurve, da das Thermoelement zu diesem Zeitpunkt von der LötKolbenspitze entfernt wurde.

7.1 Vertikaler Versuch mit dem Prototyp

Nach Erreichen der Gleichgewichtssituation wurde die Wärmequelle oberhalb der Schüttung über die vertikalen Messpunkte positioniert und der Versuch gestartet. Um ein Anbrennen zu verhindern, beträgt der Abstand zwischen erwärmter LötKolbenspitze und dem Schüttgut 3 [mm]. Die Positionierung der Wärmequelle oberhalb des Schüttgutes erfolgte mit einer Stativstange. Die Wärmezufuhr in die Schüttung erfolgt über Wärmestrahlung. Innerhalb der Probe erfolgt der Wärmetransport durch Wärmeleitung. An der Oberfläche der Schüttung wird die Wärme konvektiv an die Umgebung abgeführt. Die jeweilige Einwirkdauer der Wärmestrahlung auf die Schüttung sowie die

Temperaturänderung an den einzelnen Messpunkten wurde gemessen und mit Hilfe des Datenloggers dokumentiert. Bild 22 zeigt den Versuchsaufbau.

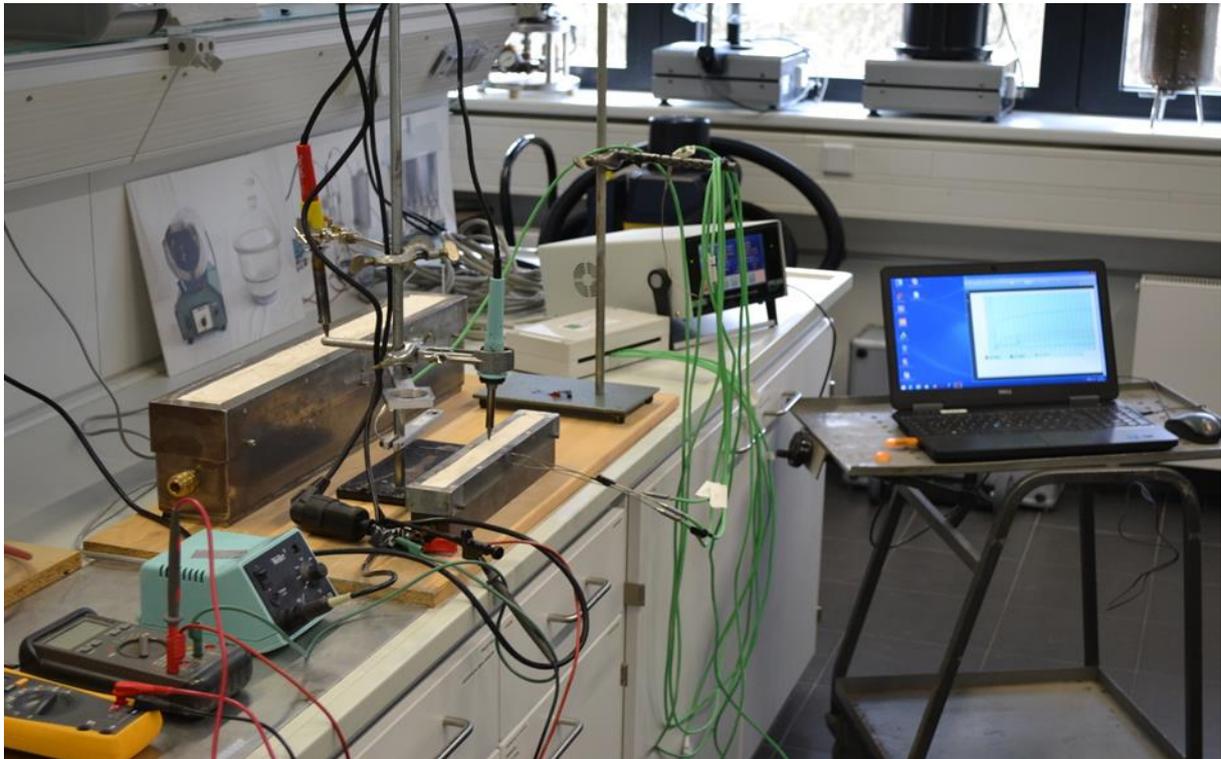


Bild 22. Versuchsaufbau

Die ersten Versuche wurden im Abzug durchgeführt. Die Temperaturmessung im Abzug wurde aufgrund der hohen Abluftgeschwindigkeiten stark beeinflusst. Da keine aussagefähigen Ergebnisse erreicht wurden, sind weitere Versuche außerhalb des Abzugs gefahren worden. Für den gesamten vertikalen Versuch außerhalb des Abzugs ist der Temperaturverlauf innerhalb der Schüttung beim Prototyp aus Bild 23 ersichtlich. Die einzelnen Kurven Blau, Orange, Gelb, und Grau repräsentieren die Werte der vertikalen Messpunkte über den gesamten Zeitraum des Versuches von 12 000 [s].

Diese Zeit wurde benötigt um vergleichbare Bedingungen für Prototyp und Prüfapparatur zu schaffen, da für die Versuche mit der Prüfapparatur der Skalierungsfaktor für die Energiezufuhr das Vierfache der gebrauchten Energie bei der Untersuchung mit dem Prototyp betrug und dadurch die Gleichgewichtsbedingungen erst bei 12000 [s] erreicht wurden.

Der Skalierungsfaktor für den Parameter Zeit $t_m = t_p = 1$ muss nach der Dimensionslosen Analyse ebenfalls eingehalten werden, aus diesem Grunde wurden für beide Versuchsreihen die Temperaturen immer an den gleichen Messzeitpunkten dokumentiert: $t = 4000, 6000, 8000$ und 10000 [s].

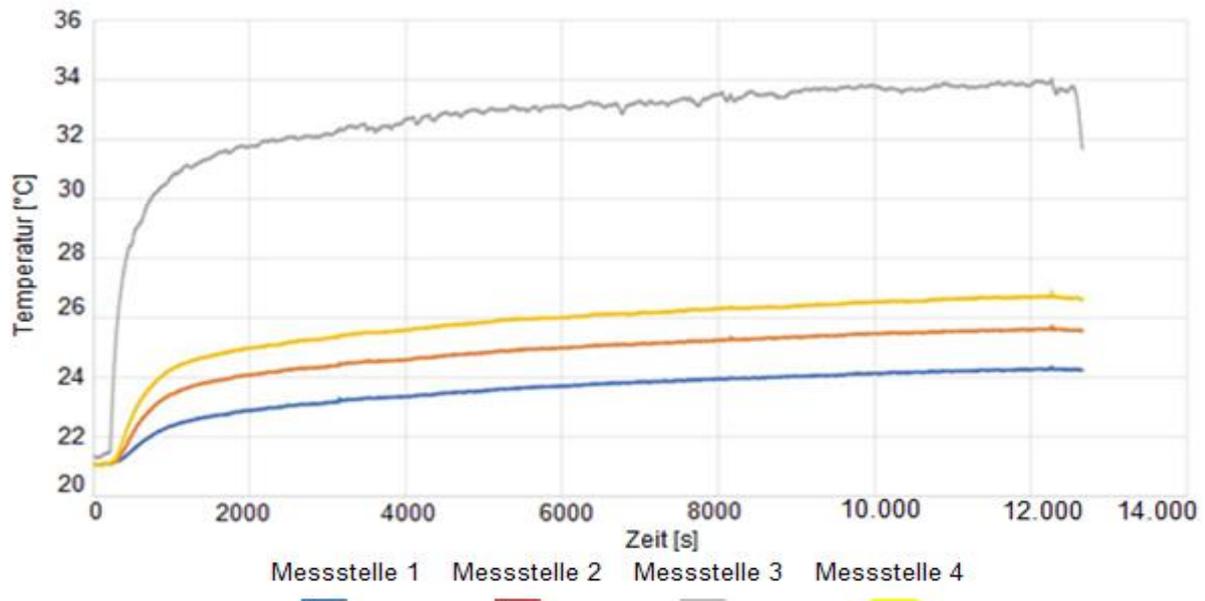


Bild 23. Vertikaler Temperaturverlauf in der Schüttung Prototyp bis 12000 [s]

Der vertikale Temperaturverlauf innerhalb der Schüttung und zu einem Zeitpunkt $t = 8000$ [s] ist im Bild 24 dargestellt:

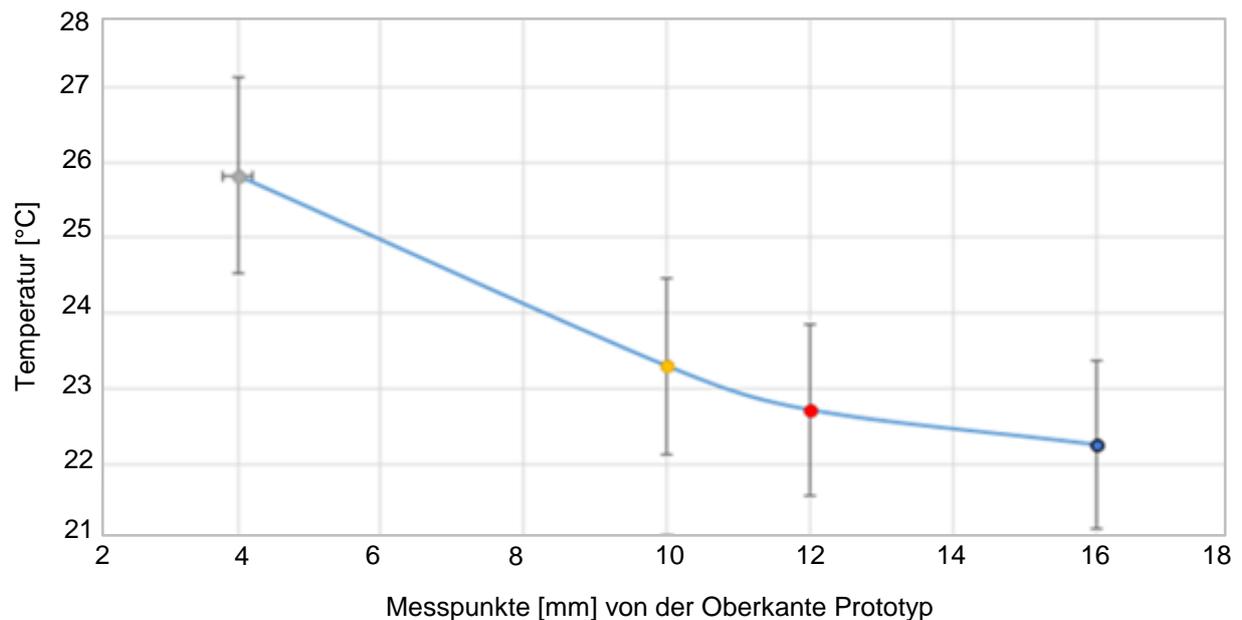


Bild 24. Temperaturverlauf in der Schüttung Prototyp über den gesamten Versuch

Die Maße der Messpunkte von der Oberkante des Prototyps sind im Kapitel 6.1 und 6.2 aufgeführt. Die für die Bilder 19, 21, 23, 24 und 25 erforderlichen Programme wurden im Rahmen des Projektes Best Praxis [32] erstellt (Anhang V).

7.2 Horizontaler Versuch mit dem Prototyp

Der LötKolben wurde auch hier wieder auf Gleichgewichtsbedingung gebracht und danach manuell 3 [mm] über der Schüttgutoberfläche in Längsrichtung bewegt. Die Zeitintervalle für einen Messpunkt und zwischen den einzelnen Positionen lagen bei ca. 30 [s]. Ein Durchlauf dauerte ca. 4,5 Minuten. Bild 25 präsentiert das Ergebnis dieser Versuche:

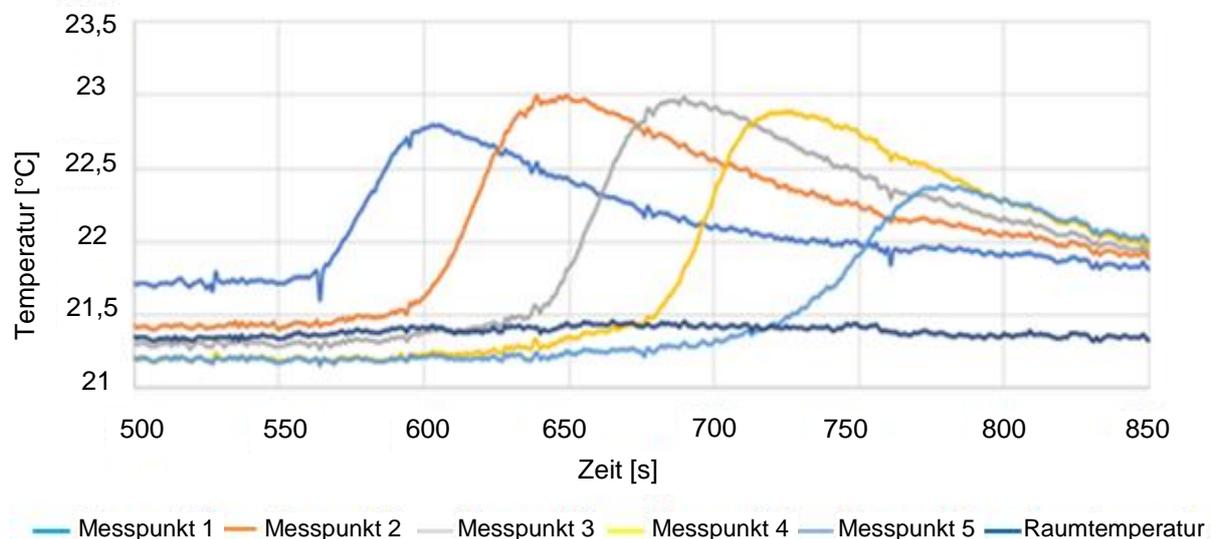


Bild 25. Horizontaler Versuch

Die maximal gemessenen Werte lagen bei 22,38 [°C] und 23 [°C]. Die Messpunkte 1 und 5 wiesen von den übrigen Messwerten eine starke Abweichung auf. Diese Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund der manuellen und nicht gleichmäßigen Bewegung keine konstante Wärmezuführung zum Schüttgut erfolgte und auch der LötKolben zu früh vom Fließbettmodell Prototyp entfernt wurde. Eine weitere Ursache kann darin gesehen werden, dass das Modell Prototyp nicht isoliert war. Die aufgenommene Wärmemenge wurde deshalb durch Konvektion im Grenzbereich an die Umgebung abgeführt.

Aufgrund der Rahmenbedingung und der Versuchsergebnisse werden nur die Messpunkte 2, 3, 4 betrachtet. Als Ergebnis dieser Betrachtung kann die bewegliche Wärmequelle, wie aus Bild 26 ersichtlich, durch eine feststehende Wärmequelle

beispielsweise durch die Installation eines elektrischen Widerstandsdrahtes ersetzt werden. Dies ist eine wichtige Erkenntnis für Versuche im Werkzeugmaschinenbau, um die Auswirkung der Wärmegenerierung zwischen Werkzeug und dem zu bearbeitendem Werkstück auf die Maßgenauigkeit und Formgebung des herzustellenden Bauteiles festzustellen. Weitere Untersuchungen zur Bestimmung des Temperaturfeldes sind hierzu erforderlich, die aber nicht im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt werden.

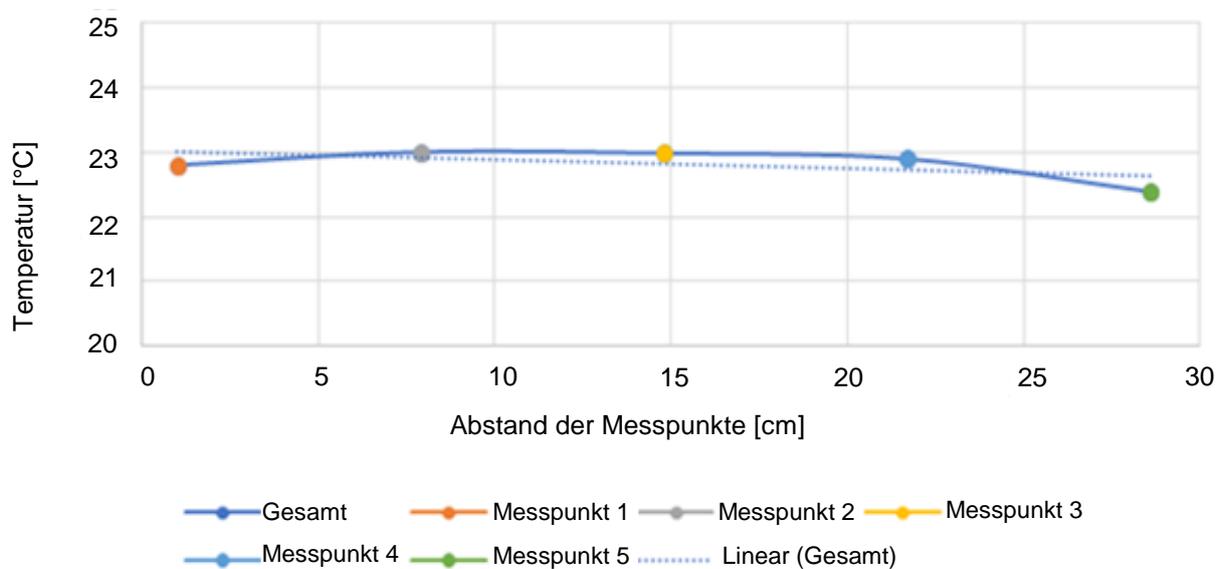


Bild 26. Horizontaler Versuch – geglättete Kurve

7.3 Vertikaler Versuch mit der Prüfapparatur

Der in der dimensionslosen Analyse entwickelte Skalierungsfaktor wird bei dieser Versuchsreihe angewendet. Der Versuch wird wie folgt unterteilt:

- Herstellung der Prüfapparatur im Maßstab 2/1 aus dem gleichen Material wie der Prototyp. Die Detailbemaßung ist aus dem Bild 11 und Tabelle 3 zu entnehmen.
- Modifizierung der LötKolbenspitze auf die Maße 2 [mm]×2 [mm] wie vom Skalierungsfaktor für die eindimensionale lineare Länge vorgegeben.
- Vorbereitung und Kalibrierung einer Wärmequelle für Versuche mit der Prüfapparatur.

Der LötKolben LR- 21, der für die Versuche mit dem Prototyp verwendet wurde, war leistungsmäßig nicht für die Untersuchung mit der Prüfapparatur ausgelegt. Deshalb wurde diese Wärmequelle durch einen 100 [W] LötKolben (Firma Rothenberger) ersetzt. Die Leistung wurde mit einem Dimmer der Firma OBI reguliert. Der Dimmer war für 230 [V], 50 [Hz] und maximal 200 [W] ausgelegt. Zur Kontrolle der Leistung war der LötKolben an ein Watt- und Voltmeter angeschlossen.

Beim Versuch mit dem Prototyp wurde an der LötKolbenspitze mit einer maximalen Temperatur von 163 [°C] gearbeitet. Unter Berücksichtigung der Raumtemperatur von 23 [°C] ergab sich eine Temperaturdifferenz von $\Delta\theta_p = 140$ [°C]. Mit der 100 [W] Wärmequelle wurden für diesen Wert 16,14 [W] benötigt. Für die nach der dimensionslosen Analyse ermittelte Temperaturdifferenz $\Delta\theta_m=2 \cdot \Delta\theta_p = 280$ [°C] wurden bei Versuchen mit der 100 [W] Wärmequelle 62,56 [W] gemessen. Dieser Wert steht dem theoretischen Wert von 64,56 [W] gegenüber. Das entspricht einer Abweichung von ca. 3 [%]. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in Tabelle 9 festgehalten:

Tabelle 9. Gegenüberstellung Wärmequelle Prototyp vs. Prüfapparatur

Prototyp vs. Prüfapparatur	Spitzenbreite	LötKolben Temperatur	Raum	Differenz $\Delta\theta$	Leistung theoretisch	Leistung „Ist“	Abweichung
Dimensionen	[mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[W]	[W]	[%]
LötKolben Prototyp	1x1	163	23	140	-	16,14	-
LötKolben 100 [W] Prüfapparatur	2x2	323	23	280	64,56	62,56	3
Skalierung Prototyp/ Prüfapparatur	-	-	-	1/2	1/4	-	-

Der Temperaturverlauf über die Gesamtlänge des Versuches ist in Bild 27 dargestellt:

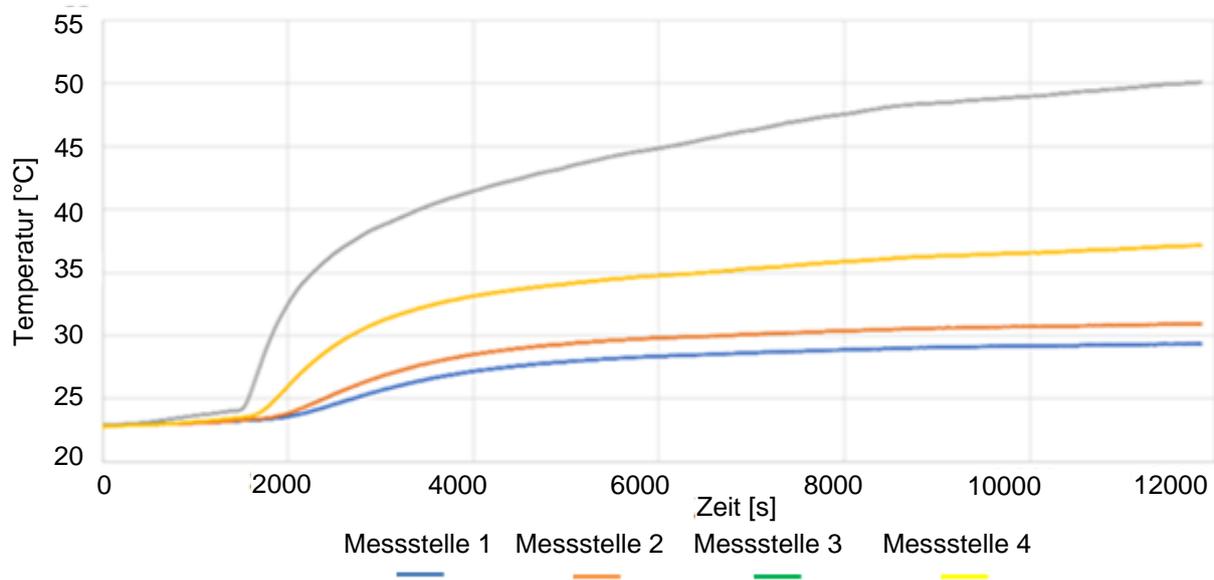


Bild 27. Vertikaler Temperaturverlauf in der Schüttung Prüfapparatur bis 12000 [s]

Anhand dieser Versuche wurden die Gleichgewichtsbedingungen bestätigt und die Querschnittskurven bei 12000 [s] ermittelt.

7.4 Beurteilung der Versuchsergebnisse

Um eine Langzeitaussage zu erhalten, wurden die Versuche mit dem Prototyp und der Prüfapparatur über einen Zeitraum von jeweils 12000 [s] gefahren. Die Ergebnisse der zwei Versuchsreihen wurden ausgewertet und mit dem in der dimensionslosen Analyse ermittelten Skalierungsfaktor auf Vergleichbarkeit überprüft. Bei den einzelnen Thermoelementen wurden innerhalb der Analyse die Temperaturabweichungen, die bei der Eiswasser-Kalibrierung gemessen wurden, berücksichtigt. Ebenfalls wurde auch der angegebene Toleranzbereich ($\pm 0,0075 \cdot \theta$) für die Thermoelemente Typ K2 in die Auswertung mit einbezogen. Der gemessene Leistungsunterschied der 100 [W] Wärmequelle beträgt 3 [%] und wurde nicht bei der Auswertung berücksichtigt, da sich der Zustand bei allen Versuchen wiederholte. Die Versuchsergebnisse sind in den Tabellen 10 - 17 und in den Bildern 28 bis 33 dargestellt.

Beide Versuchsreihen wurden parallel zum gleichen Zeitpunkt ausgewertet, damit die Rahmenbedingungen der dimensionslosen Analyse $t_m/t_p = 1$ erfüllt werden. Tabelle 18 ist eine Gegenüberstellung der gesamten Versuchsergebnisse von Prototyp und Prüfapparatur. Wie in dieser Tabelle zu erkennen ist, wird der theoretische

Skalierungsfaktor für $\Delta\theta_m/\Delta\theta_p = 2/1$ mit einem Wert von 1,96/1 erreicht und entspricht einer Genauigkeit von 98 [%].

Das Temperaturgefälle $(\theta\Delta/\Delta x)_m/(\theta\Delta/\Delta x)_p = 1$ wurde im Schnitt mit 0,98 ermittelt und entspricht der gleichen Genauigkeit wie die erlangten Werte bei der Temperaturdifferenz. Tabelle 19 ist eine Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse mit den theoretisch ermittelten Werten.

Bei den Messpunkten 2 und 3 des Prototyps wurde bei 4000 [s] eine Abweichung von ca. 19 [%] festgestellt. Die Ursache ist eine elektrostatische Aufladung (Bild 34), die durch eine Reibung beim Entfernen von zwei Thermoelementen entstanden ist.

Wie in den Bildern 28 und 29 zu sehen ist, weist der Messpunkt 2 bei allen Versuchen Unstimmigkeiten auf. Die Ursache war ein defektes Thermoelement. Der gemessene Widerstand lag bei 8,8 [Ohm] und sollte zwischen 9,1 [Ohm] und 9,2 [Ohm] liegen.

Tabelle 10. Vertikale Temperaturmessung bei 4000 [s]

Prototyp Messpunkt	P1 16 [mm]	P2 14 [mm]	P3 4 [mm]	P4 10 [mm]	P5 Raumtemperatur	$\theta_{p \max}$	$\theta_{p \min}$	$\Delta\theta_p$	Δx_p	$\Delta\theta_p/\Delta x_p$	$2 \cdot \Delta\theta_p = \Delta\theta_m$
Zeit [s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]	[°C]
4000	23,36922	-	-	-	-	23,29	21,76	1,53	16	0,095	3,06
4000	-	24,60188	-	-	-	24,52	21,76	2,76	14	0,197	5,52
4000	-	-	32,68109	-	-	32,58	21,76	10,82	4	2,705	21,64
4000	-	-	-	25,60122	-	25,94	21,76	4,18	10	0,418	8,36
4000	-	-	-	-	21,45743	21,76	21,44	-	-	-	-

Prüfapparatur Messpunkt	P1 32 [mm]	P2 28 [mm]	P3 8 [mm]	P4 20 [mm]	P5 Raumtemperatur	$\theta_{m \max}$	$\theta_{m \min}$	$\Delta\theta_m$	Δx_m	$\Delta\theta_m/\Delta x_m$
Zeit [s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]
4000	27,19113	-	-	-	-	27,49	24,37	3,12	32	0,097
4000	-	28,53878	-	-	-	28,84	24,37	4,47	28	0,159
4000	-	-	41,47866	-	-	41,88	24,37	17,51	8	2,188
4000	-	-	-	33,14557	-	33,05	24,73	8,32	20	0,416
4000	-	-	-	-	24,55457	24,73	24,37	-	-	-

Tabelle 11. Skalierungsfaktor $(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$ bei 4000 [s]

Zeit [s]	Position	$(\Delta\theta/\Delta x)_p$ [°C/mm]	$(\Delta\theta/\Delta x)_m$ [°C/mm]	Skalierungs- faktor „ist“	Skalierungs- faktor „soll“
4000	1	0,095	0,097	1,02	1
4000	2	0,197	0,159	0,80	1
4000	3	2,705	2,188	0,80	1
4000	4	0,418	0,416	0,99	1

Tabelle 12. Vertikale Temperaturmessung bei 6000 [s]

Prototyp Messpunkt	P1 16 [mm]	P2 14 [mm]	P3 4 [mm]	P4 10 [mm]	P5 Raumtemperatur	θ_p max	θ_p min	$\Delta\theta_p$	Δx_p	$\Delta\theta_p/\Delta x_p$	$2 \cdot \Delta\theta_p = \Delta\theta_m$
Zeit [s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]	[°C]
6000	23,73	-	-	-	-	23,66	21,88	1,78	16	0,111	3,56
6000	-	25,00	-	-	-	24,92	21,88	3,04	14	0,217	6,08
6000	-	-	33,11	-	-	32,97	21,88	11,09	4	2,772	22,18
6000	-	-	-	26,030	-	26,37	21,56	4,81	10	0,481	9,42
6000	-	-	-	-	21,5723	21,88	21,56	-	-	-	-

Prüfapparatur Messpunkt	P1 32 [mm]	P2 28 [mm]	P3 8 [mm]	P4 20 [mm]	P5 Raumtemperatur	θ_m max	θ_m min	$\Delta\theta_m$	Δx_m	$\Delta\theta_m/\Delta x_m$
Zeit [s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]
6000	28,408	-	-	-	-	28,29	24,71	3,58	32	0,111
6000	-	29,849	-	-	-	30,16	24,71	5,45	28	0,194
6000	-	-	44,893	-	-	45,32	24,71	20,61	8	2,576
6000	-	-	-	34,797	-	34,72	25,07	9,65	20	0,482
6000	-	-	-	-	24,743	25,07	24,71	-	-	-

Tabelle 13. Skalierungsfaktor $(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$ bei 6000 [s]

Zeit [s]	Position	$(\Delta\theta/\Delta x)_p$ [°C/mm]	$(\Delta\theta/\Delta x)_m$ [°C/mm]	Skalierungs- faktor „ist“	Skalierungs- faktor „soll“
6000	1	0,111	0,111	1,00	1
6000	2	0,217	0,194	0,89	1
6000	3	2,772	2,576	0,92	1
6000	4	0,481	0,482	1,00	1

Tabelle 14. Vertikale Temperaturmessung bei 8000 [s]

Prototyp Messpunkt	P1 16 [mm]	P2 14 [mm]	P3 4 [mm]	P4 10 [mm]	P5 Raumtemperatur	θ_p max	θ_p min	$\Delta\theta_p$	Δx_p	$\Delta\theta_p/\Delta x_p$	$2 \cdot \Delta\theta_p = \Delta\theta_m$
Zeit [s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]	[°C]
8000	23,968	-	-	-	-	23,88	21,78	2,10	16	0,131	4,20
8000	-	25,269	-	-	-	25,17	21,78	3,39	14	0,242	6,78
8000	-	-	33,476	-	-	33,36	21,78	11,58	4	2,895	23,16
8000	-	-	-	26,331	-	26,67	21,46	5,21	10	0,521	10,42
8000	-	-	-	-	21,474	21,78	21,46	-	-	-	-

Prüfapparatur Messpunkt	P1 32 [mm]	P2 28 [mm]	P3 8 [mm]	P4 20 [mm]	P5 Raumtemperatur	θ_m max	θ_m min	$\Delta\theta_m$	Δx_m	$\Delta\theta_m/\Delta x_m$
Zeit [s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]
8000	28,8883	-	-	-	-	29,19	25,12	4,07	32	0,127
8000	-	30,3818	-	-	-	30,70	24,76	5,94	28	0,212
8000	-	-	47,571	-	-	48,02	24,76	23,26	8	2,907
8000	-	-	-	35,881	-	35,76	25,12	10,64	20	0,532
8000	-	-	-	-	24,798	25,12	24,76	-	-	-

Tabelle 15. Skalierungsfaktor $(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$ bei 8000 [s]

Zeit [s]	Position	$(\Delta\theta/\Delta x)_p$ [°C/mm]	$(\Delta\theta/\Delta x)_m$ [°C/mm]	Skalierungs- faktor „ist“	Skalierungs- faktor „soll“
8000	1	0,131	0,127	0,96	1
8000	2	0,242	0,212	0,87	1
8000	3	2,895	2,907	1,00	1
8000	4	0,521	0,532	1,02	1

Tabelle 16. Vertikale Temperaturmessung bei 10000 [s]

Prototyp	P1	P2	P3	P4	P5	$\theta_{p \max}$	$\theta_{p \min}$	$\Delta\theta_p$	Δx_p	$\Delta\theta_p/\Delta x_p$	$2 \cdot \Delta\theta_p = \Delta\theta_m$
Messpunkt	16 [mm]	14 [mm]	4 [mm]	10 [mm]	Raumtemperatur	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]	[°C]
Zeit [s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]	[°C]
10000	24,148	-	-	-	-	24,42	22,03	2,39	16	0,149	4,78
10000	-	25,489	-	-	-	25,39	22,03	3,36	14	0,240	6,72
10000	-	-	33,754	-	-	34,10	21,71	12,39	4	3,090	24,78
10000	-	-	-	26,544	-	26,89	21,71	5,18	10	0,518	10,36
10000	-	-	-	-	21,729	22,03	21,71	-	-	-	-

Prüfapparatur	P1	P2	P3	P4	P5	$\theta_m \max$	$\theta_m \min$	$\Delta\theta_m$	Δx_m	$\Delta\theta_m/\Delta x_m$
Messpunkt	32 [mm]	28 [mm]	8 [mm]	20 [mm]	Raumtemperatur	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]
Zeit [s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C/mm]
10000	29,204	-	-	-	-	28,51	24,74	4,77	32	0,149
10000	-	30,746	-	-	-	31,07	24,74	6,33	28	0,226
10000	-	-	48,990	-	-	49,45	24,74	24,71	8	3,088
10000	-	-	-	36,588	-	36,48	25,10	11,38	20	0,569
10000	-	-	-	-	24,775	25,10	24,74	-	-	-

Tabelle 17. Skalierungsfaktor $(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$ bei 10000 [s]

Zeit [s]	Position	$(\Delta\theta/\Delta x)_p$ [°C/mm]	$(\Delta\theta/\Delta x)_m$ [°C/mm]	Skalierungs- faktor „ist“	Skalierungs- faktor „soll“
10000	1	0,149	0,149	1,00	1
10000	2	0,240	0,226	0,94	1
10000	3	3,090	3,088	1,00	1
10000	4	0,518	0,569	1,09	1

Tabelle 18. „Soll – Ist“ Vergleich Prototyp und Prüfapparatur

Messzeit	Messpunkt	Prototyp $\Delta\theta_p$	Skalierungs- faktor	Theoretisch/ Versuchsergebnis	Prüfapparatur		Abweichung		$(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$	Skalierungs- faktor	Abweichung	Abweichung
					„ $\Delta\theta_m$ soll“ [°C]	„ $\Delta\theta_m$ ist“ [°C]	[°C]	[%]				
4000	1	1,53	2	2,03	3,06	3,12	0,06	+1,96	1,02	1	+0,02	+2,00
	2	2,76		1,61	5,52	4,47	-1,05	-19,02	0,80		-0,20	-20,00
	3	10,82		1,61	21,64	17,51	-4,13	-19,08	0,80		-0,20	-28,00
	4	4,18		1,99	8,36	8,32	-0,04	-0,47	0,99		-0,01	-1,00
6000	1	1,78	2	2,01	3,56	3,58	+0,02	+0,56	1,00	1	0,00	0,00
	2	3,04		1,79	6,08	5,45	-0,63	-10,36	0,89		-0,11	-11,00
	3	11,09		1,85	22,18	20,61	-1,57	-7,07	0,92		-0,08	-8,00
	4	4,81		2,00	9,62	9,65	+0,23	+0,31	1,00		0,00	0,00
8000	1	2,10	2	1,93	4,20	4,07	-0,13	-3,09	0,96	1	-0,04	-4,00
	2	3,39		1,75	6,78	5,94	-0,84	-12,00	0,87		-0,13	-13,00
	3	11,58		2,00	23,16	23,26	+0,10	-0,43	1,00		0,00	0,00
	4	5,21		2,04	10,42	10,64	+0,22	+2,11	1,02		+0,02	+2,00
10000	1	2,39	2	1,99	4,78	4,77	+0,01	+0,21	1,00	1	0,00	0,00
	2	3,36		1,88	6,72	6,33	-0,39	-5,80	0,94		-0,06	-6,00
	3	12,39		1,99	24,78	24,71	-0,07	0,28	1,00		0,00	0,00
	4	5,18		2,19	10,36	11,38	+1,02	+9,84	1,09		+0,09	+9,00
Durchschnitt		-	2	1,96	-	-	-	-	0,98	1	-	-

Tabelle 19. Skalierungsfaktor vs. Versuchsergebnisse

Parameter	Symbol	Skalierungsfaktor	Versuchsergebnis
Lineare Länge	H_m/H_p	2/1	2/1
Thermische Ausdehnung	$\Delta H_m/\Delta H_p$	4/1	4/1
Temperatur	$\Delta\theta_m/\Delta\theta_p$	2/1	1,96/1
Wärmemenge	Q_m/Q_p	4/1	3,93/1
Wärmefluss	q_m/q_p	1	1
Temperaturanstieg	$(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$	1	0,98
Fläche	A_m/A_p	4/1	4/1
Linearer Ausdehnungskoeffizient	α_m/α_p	1	1
Koef. Wärmeleitfähigkeit	k_m/k_p	1	1
Zeit	t_m/t_p	1	1
Flammenhöhe	H_{fm}/H_{fp}	2/1	1,96
Nusselt Zahl	Nu_m/Nu_p	1	1

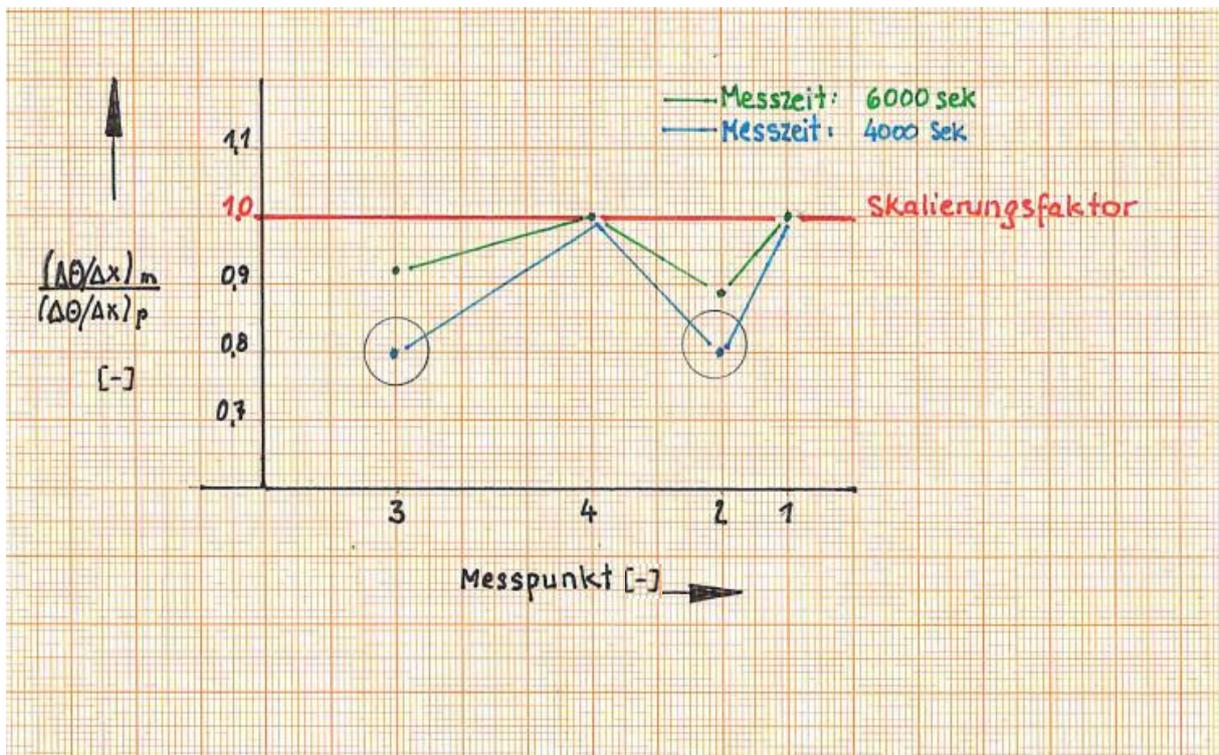


Bild 28. Temperaturgradient für die Messzeiten von $t = 6000$ und 4000 [s]

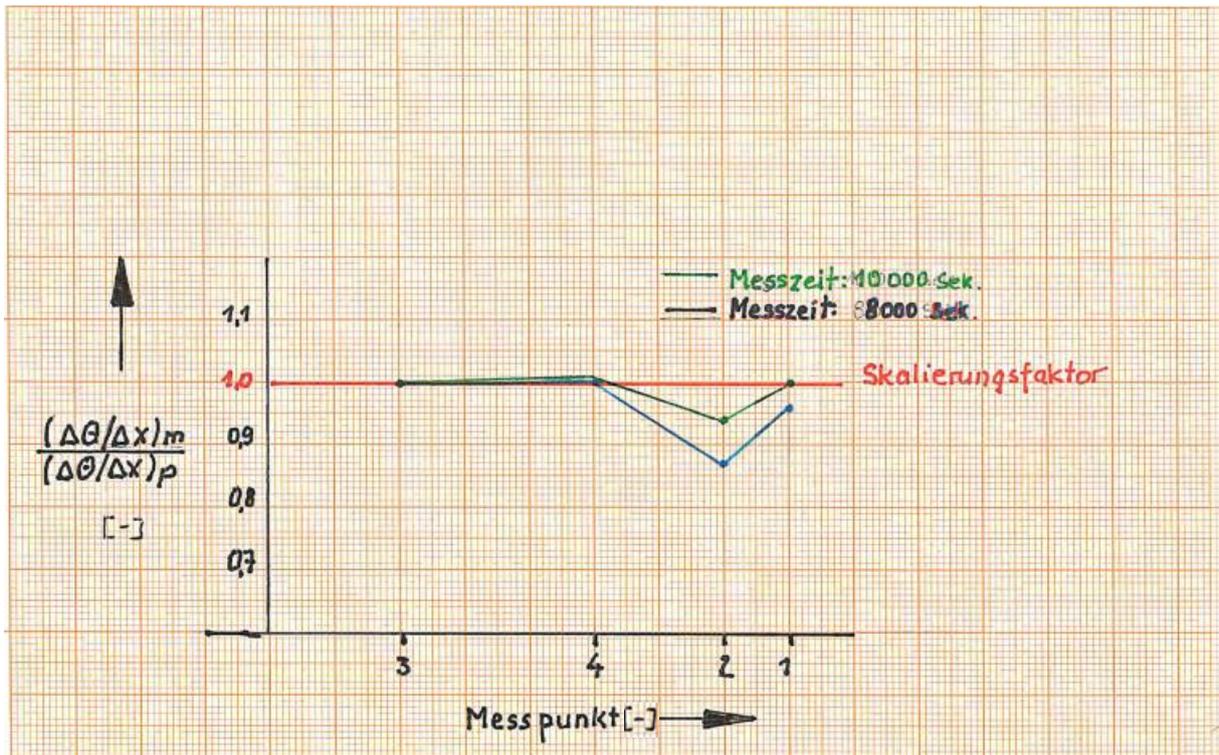


Bild 29. Temperaturgradient für die Messzeiten von $t = 10000$ und 8000 [s]

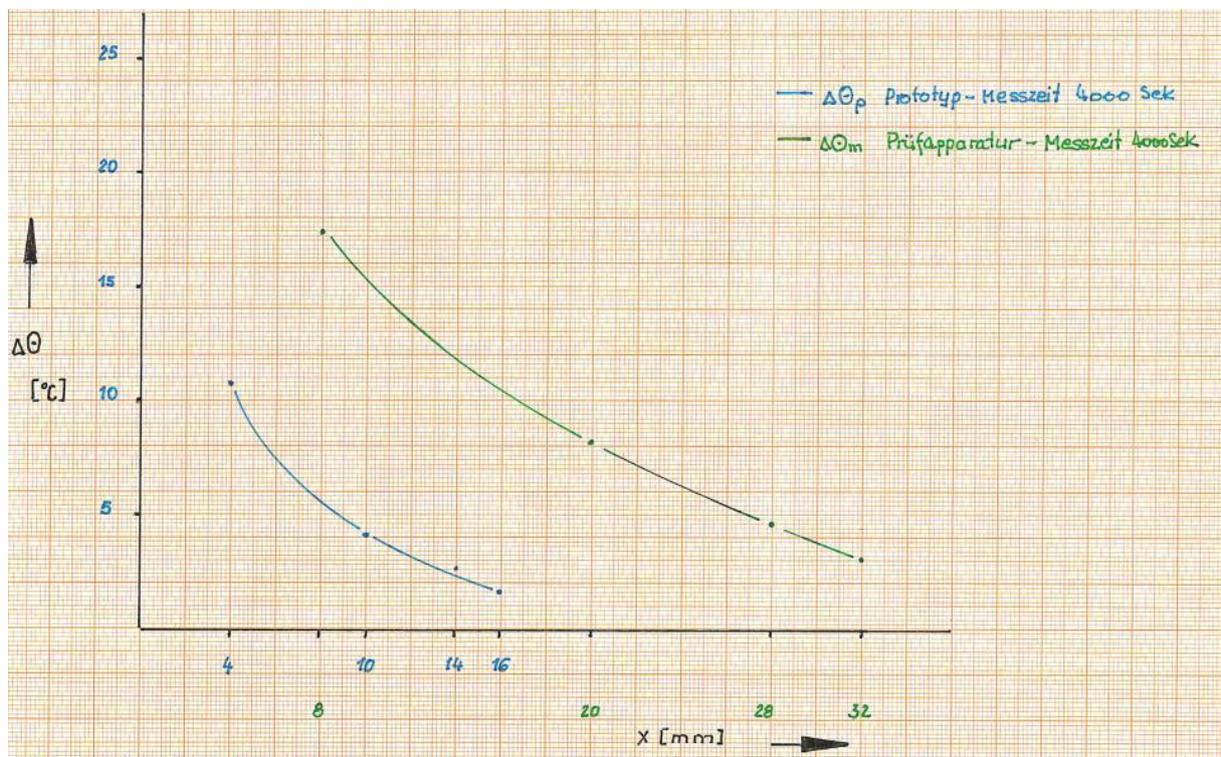


Bild 30. Temperaturdifferenz Prototyp vs. Prüfapparatur bei einer Messzeit von 4000 [s]

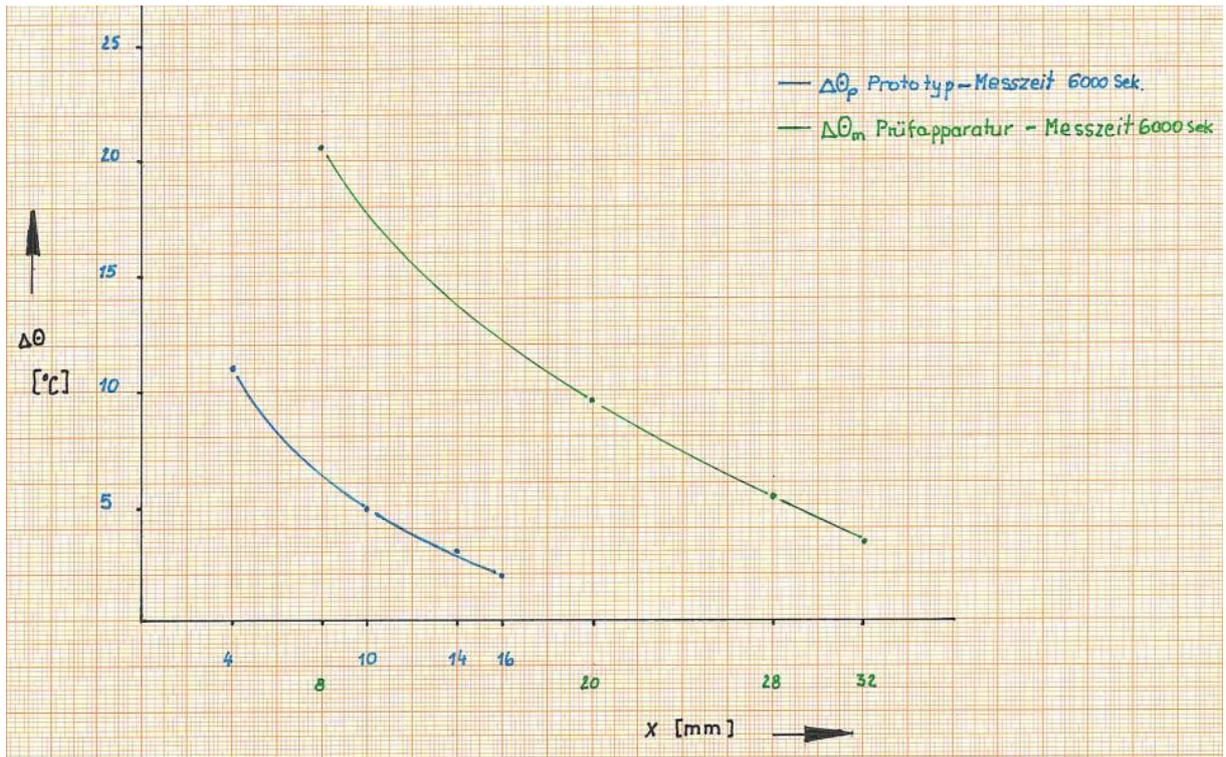


Bild 31. Temperaturdifferenz Prototyp vs. Prüfapparatur bei einer Messzeit von 6000 [s]

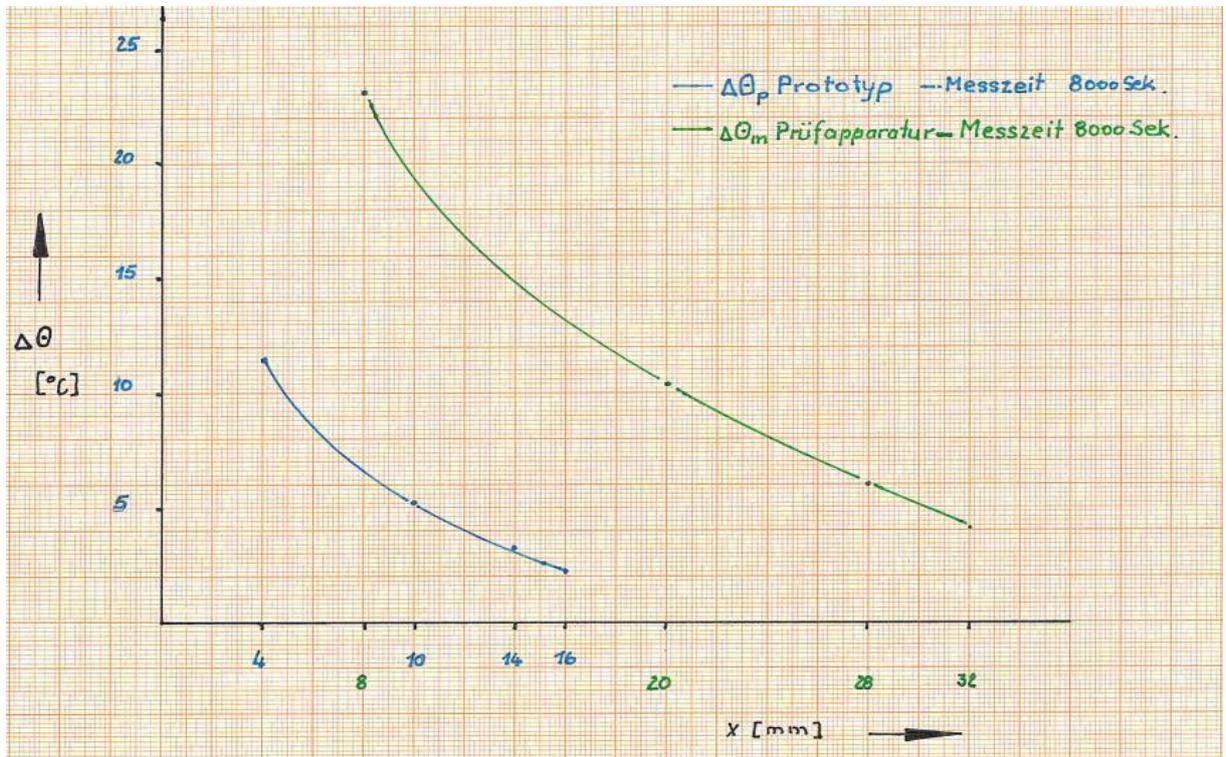


Bild 32. Temperaturdifferenz Prototyp vs. Prüfapparatur bei einer Messzeit von 8000 [s]

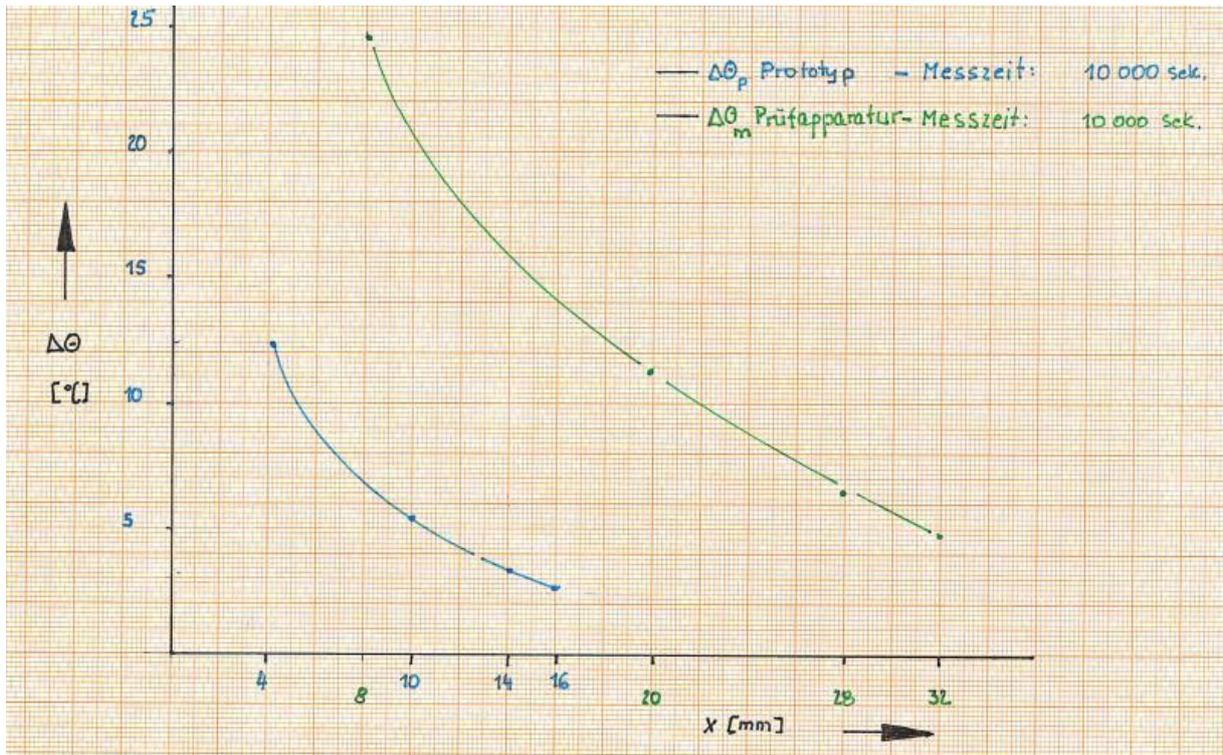
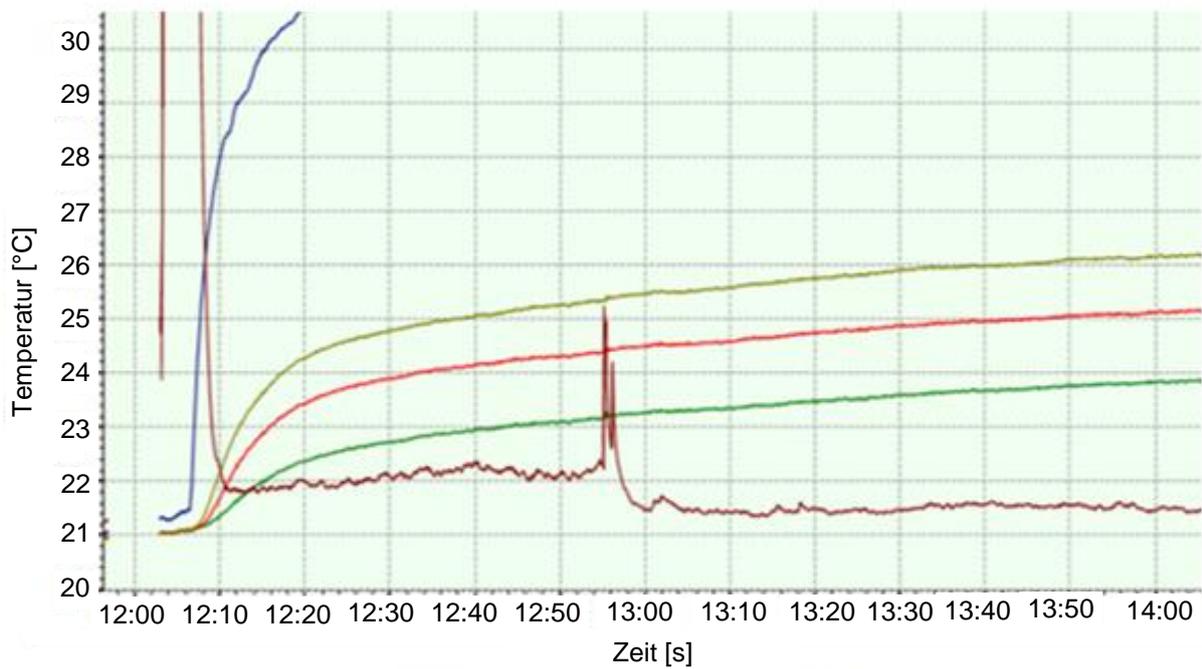


Bild 33. Temperaturdifferenz Prototyp vs. Prüfapparatur bei einer Messzeit von 10000 [s]



- +24.3 [°C] Messstelle 1
 ■ +31.7 [°C] Messstelle 3
 ■ +31.7 [°C] Messstelle 5
- +25.6 [°C] Messstelle 2
 ■ +26.6 [°C] Messstelle 4

Bild 34. Elektrostatistische Aufladung

7.5 Berechnungsbeispiel für die Ermittlung des Temperaturgradienten

Das nachfolgende Beispiel ist eine Detailausarbeitung für die in den Tabellen 10 und 11 aufgeführten Daten. Die Ausarbeitung wurde für die Messwerte bei 4000 [s] durchgeführt. Nachfolgend werden alle 4 Versuchsreihen von Prototyp und Prüfapparatur betrachtet. Die Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ wird unter Berücksichtigung der Toleranzzahl K nach Herstellerangaben (Firma Jumo) und der Ergebnisse der Thermoelement Kalibrierung (Tabelle 8) bestimmt.

Tabelle 20. Kalibrierung der Thermoelemente

Position	Abweichung [°C]	Korrekturfaktor [°C]	Position	Abweichung [°C]	Korrekturfaktor [°C]
1	-0,1	+0,1	4	-0,15	+0,15
2	-0,1	+0,1	5	-0,15	+0,15
3	-0,1	+0,1	-	-	-

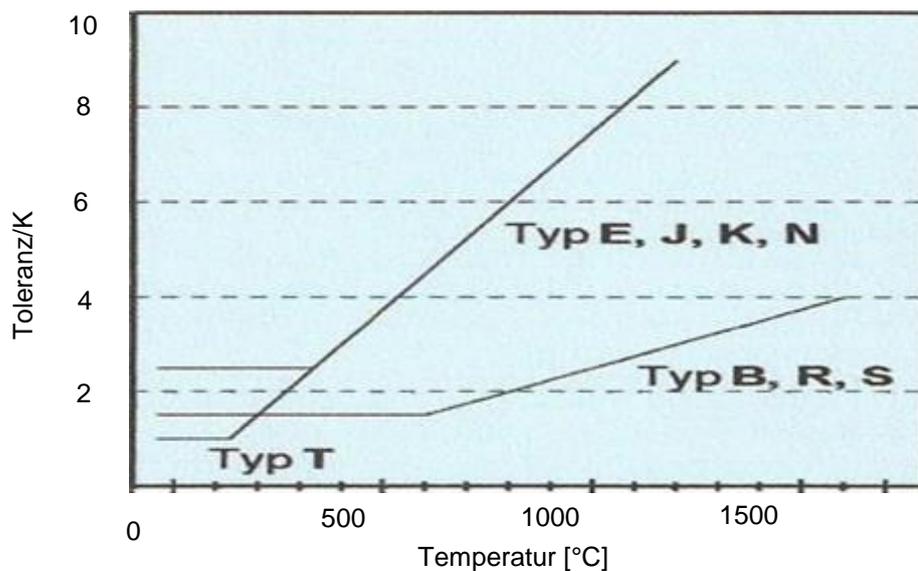


Bild 35. Temperatur vs. Toleranzzahl nach Herstellerangaben

Für das Thermoelement Typ K wird bei erwarteten 350 [°C] die Toleranzzahl K2 (Bild 35) empfohlen. Für K2 wird von dem Hersteller ein Toleranzwert von $\pm 0,0075 \cdot \theta$ angegeben. Die Detailausarbeitung benutzt die Daten der Tabelle 10 und berücksichtigt die Ergebnisse der Kalibrierung der Thermoelemente und die Toleranzzahl K2 des Thermoelementherstellers. Die Berechnung gilt als Musterbeispiel für die Ermittlung aller Daten der Tabellen 10-17.

Anhand der Werte aus der Tabelle 10 wurden folgende Daten für die Berechnung von P1 bis P4 berücksichtigt:

Messwerte bei 4000 [s]

Prototyp: Berechnung θ_{\max} und θ_{\min}

Messpunkt P5 bleibt konstant für alle Messwerte P1 bis P4

	P 5 [°C]	P 1 [°C]	P 2 [°C]	P 3 [°C]	P 4 [°C]
Messwert	21,45	23,36	24,6	32,68	25,60
Kalibrierkorrektur Tabelle 7	+0,15	+0,10	+0,10	+0,10	+0,15
Theoret. Wert	21,60	23,46	24,70	32,78	25,75
Toleranzklasse K2	±0,16	±0,17	±0,18	±0,24	±0,19
Temperatur θ_{\max}	21,76	23,63	24,88	33,02	25,94
Temperatur θ_{\min}	21,44	23,29	24,52	32,58	25,56

Prüfapparatur: Berechnung θ_{\max} und θ_{\min}

Messpunkt P5 bleibt konstant für alle Messwerte P1 bis P4

	P 5 [°C]	P 1 [°C]	P 2 [°C]	P 3 [°C]	P 4 [°C]
Messwert	24,55	27,19	28,53	41,47	33,14
Kalibrierkorrektur Tabelle 7	+0,15	+0,10	+0,10	+0,10	+0,15
Theoret. Wert	24,70	27,29	28,63	41,67	33,29
Toleranzklasse K2	±0,18	±0,20	±0,21	±0,31	±0,24
Temperatur θ_{\max}	24,73	27,49	28,84	41,88	33,53
Temperatur θ_{\min}	24,73	27,09	28,42	41,26	33,05

Prototyp – Messpunkt P1

Messpunkt				
θ_{1p} [°C]	23,63	23,63	23,29	23,29
θ_{5p} [°C]	21,76	21,44	21,76	21,44
$\Delta\theta_p$ [°C]	1,87	2,19	1,53	1,85
$2 \cdot \Delta\theta_p$ [°C]	3,74	4,38	3,06	3,70

In Tabelle 10 aufgeführt:

$$\theta_{p \max} = 23,29 \text{ [°C]}$$

$$\theta_{p \min} = 21,76 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_p = 1,53 \text{ [°C]}$$

Prüfapparatur – Messpunkt P1

Messpunkt P 1				
θ_{1m} [°C]	27,49	27,49	27,09	27,09
θ_{5m} [°C]	24,73	24,73	24,73	24,37
$\Delta\theta_m$ [°C]	2,76	3,12	2,36	2,72

In Tabelle 10 aufgeführt:

$$\theta_{p \max} = 27,49 \text{ [°C]}$$

$$\theta_{p \min} = 24,37 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_m = 3,12 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_m/\Delta\theta_p = 3,12/3,06 = 1,96 \text{ [%]}$$

Prototyp – Messpunkt P2

Messpunkt P 2				
θ_{2p} [°C]	24,88	24,88	24,52	24,52
θ_{5p} [°C]	21,76	21,44	21,76	21,44
$\Delta\theta_p$ [°C]	3,12	3,44	2,76	3,08
$2 \cdot \Delta\theta_p$ [°C]	6,24	6,88	5,52	6,16

In Tabelle 10 aufgeführt:

$$\theta_p \max = 24,52 \text{ [°C]}$$

$$\theta_p \min = 21,76 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_p = 2,76 \text{ [°C]}$$

Prüfapparatur – Messpunkt P2

Messpunkt P				
θ_{2m} [°C]	28,84	28,84	28,15	28,15
θ_{5m} [°C]	24,73	24,37	24,73	24,37
$\Delta\theta_m$ [°C]	4,11	4,47	3,42	3,78

In Tabelle 10 aufgeführt:

$$\theta_p \max = 28,84 \text{ [°C]}$$

$$\theta_p \min = 24,37 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_m = 4,47 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_m/\Delta\theta_p = 4,47/5,52 = 23,48 \text{ [%]}$$

Prototyp – Messpunkt P3

Messpunkt P 3				
θ_{3p} [°C]	33,02	33,02	32,58	32,58
θ_{5p} [°C]	21,76	21,44	21,76	21,44
$\Delta\theta_p$ [°C]	11,26	11,56	10,82	11,14
$2 \cdot \Delta\theta_p$ [°C]	22,52	23,16	21,64	22,28

In Tabelle 10 aufgeführt:

$$\theta_p \max = 32,58 \text{ [°C]}$$

$$\theta_p \min = 21,76 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_p = 10,82 \text{ [°C]}$$

Prüfapparatur – Messpunkt P3

Messpunkt P 3				
θ_{3m} [°C]	41,88	41,88	41,26	41,26
θ_{5m} [°C]	24,73	24,37	24,73	24,37
$\Delta\theta_m$ [°C]	17,15	17,51	16,53	16,89

In Tabelle 10 aufgeführt:

$$\theta_p \max = 41,88 \text{ [°C]}$$

$$\theta_p \min = 24,37 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_m = 17,51 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_m/\Delta\theta_p = 17,51/21,64 = 19,08 \text{ [%]}$$

Prototyp – Messpunkt P4

Messpunkt P 4				
θ_{4p} [°C]	25,94	25,94	25,56	25,56
θ_{5p} [°C]	21,76	21,44	21,76	21,44
$\Delta\theta_p$ [°C]	4,18	4,50	3,80	4,12
$2 \cdot \Delta\theta_p$ [°C]	8,36	9,00	7,60	8,24

In Tabelle 10 aufgeführt:

$$\theta_p \max = 25,94 \text{ [°C]}$$

$$\theta_p \min = 21,76 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_p = 4,18 \text{ [°C]}$$

Prüfapparatur – Messpunkt P4

Messpunkt P 4				
θ_{4m} [°C]	33,53	33,53	33,05	33,05
θ_{5m} [°C]	24,73	24,37	24,73	24,37
$\Delta\theta_m$ [°C]	8,8	9,16	8,32	8,68

In Tabelle 10 aufgeführt:

$$\theta_{m \max} = 33,05 \text{ [°C]}$$

$$\theta_{m \min} = 24,73 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_m = 8,32 \text{ [°C]}$$

$$\Delta\theta_m/\Delta\theta_p = 8,32/8,36 = 0,47 \text{ [%]}$$

7.6 Ermittlung der Brandverhaltenszahl/Flammenhöhe mit der Prüfapparatur

In Kapitel 2.3 wurde das Ab-/Brandverhalten im quasi-stationären Zustand vorgestellt. Die Versuchsergebnisse wurden mit dem Prototyp gefahren. Für vier ausgewählte Proben wurden weitere Versuche mit der skalierten Prüfapparatur (Bild 36, 37) durchgeführt, um die Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) und die Flammenhöhe zu ermitteln. Daraus wurde der Skalierungsfaktor für die Flammenhöhe bestätigt.



Bild 36. Prüfapparatur

Zuerst wurde die benötigte Druckluftzufuhr eingestellt und dann das Schüttgut in der Prüfapparatur gezündet. Das Ergebnis nach der Zündung ist in Bild 38 dargestellt.

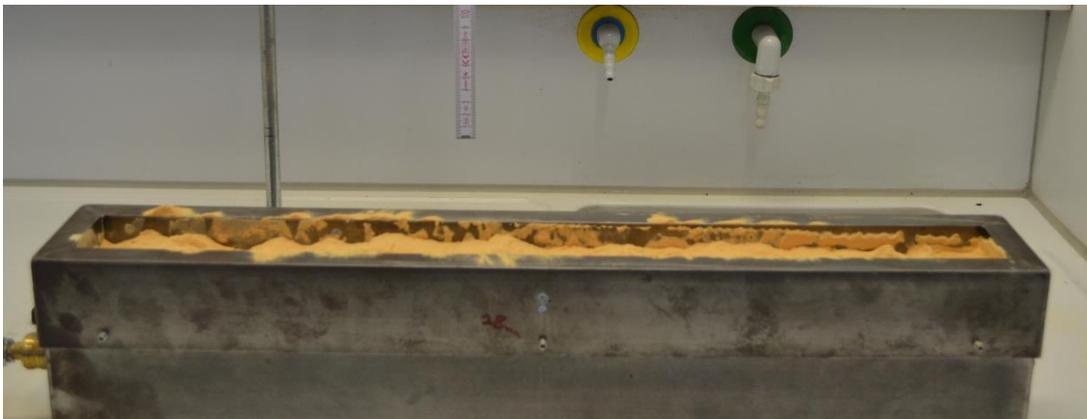


Bild 37. Prüfapparatur mit Probe B 16 vor Drucklufteinstellung

Die Untersuchungen mit der Prüfapparatur haben bestätigt, dass die ermittelten BVZ_{qs} für Prototyp und Prüfapparatur gleich sind. Eine Ausnahme macht die Probe B 16. Für die Probe B 16 wurde eine BVZ_{qs} IV anstatt BVZ_{qs} III ermittelt.

Diese Erkenntnis ist eine wesentliche Aussage für die Sicherheitsbetrachtung und Gefährdungsbeurteilung von verfahrenstechnischen Anlagen, die im Kapitel 8 im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung/Risikobewertung behandelt wird.



Bild 38. Probe B 16 nach Zündung

Beim Vergleich der Flammenhöhe von Prototyp und Prüfapparatur (Tabelle 21) für die Proben B 6, B 11 und B 30 wurde ein linearer Skalierungsfaktor von 2,03 ermittelt. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt, dass auch für die Flammenhöhe der Skalierungsfaktor 2/1 eingehalten wird.

Aufgrund des verbrennenden flüchtigen Anteils der Probe B 16 war die Flammenhöhe zum Anfang ca. 90 [cm] die sich dann zwischen 50 [cm] und 60 [cm] einpendelte.

Tabelle 21. Ergebnisgegenüberstellung von Flammenhöhe und Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) für Versuche mit dem Prototyp und der Prüfapparatur

Probe	Prototyp	Flammenhöhe	Prüfapparatur	Flammenhöhe	Skalierungsfaktor	
	BVZ_{qs}	[cm]	BVZ_{qs}	[cm]	Ist	Soll
B 6	IV	ca. 50	IV	ca. 90	1,8	2
B 11	IV	ca. 30	IV	ca. 60	2,0	2
B 16	III	ca. 25	IV	ca. 50	2,0	2
B 30	IV	ca. 20	IV	ca. 40	2,0	2

Diese Versuchsergebnisse werden im Rahmen der Risikobetrachtung mit Hilfe des HAZOP/PAAG Verfahrens (Kapitel 8) an einer Industrieanlage behandelt und daraus eine dynamische Risikobewertung entwickelt. Diese ermöglicht nicht nur die Eintrittswahrscheinlichkeit, sondern auch den Schweregrad zu ändern. Abhängig von einer veränderten BVZ_{qs} kann diese Sachlage (Kapitel 8.5) die Analyse positiv oder negativ beeinflussen und sich wesentlich auf die Investitionskosten für die Sicherheitseinrichtungen auswirken.

8 Sicherheitsbetrachtung an einem Fließbett

In der chemischen Industrie mit der Weiterentwicklung und Optimierung neuer Produktionsverfahren und Produkte ist die vorausschauende Analyse der Gefahrenquellen eine anspruchsvolle Aufgabe. Verschiedene Methoden sind entwickelt worden und haben sich in der Praxis bewährt [22]:

- Intuitive Methoden (z. B. Brainstorming)
- Induktive Methoden (z. B. Ereignisablauf Analyse)
- Deduktive Methoden (z. B. Fehlerbaumanalyse)
- HAZOP/PAAG mit intuitiven und deduktiven Elementen

Das heutige Verständnis eines sicheren Betriebes von Maschinen und Anlagen verlangt ein systematisches Vorgehen um Risiken zuverlässig zu erkennen und auszuschalten oder auf ein tragbares Maß zu begrenzen, bevor Personen, Umwelt oder Sachwerte geschädigt werden [22]. Zu dieser Thematik wurde in Deutschland das bekannte HAZOP/PAAG-Verfahren 1978 durch die IVSS veröffentlicht [22]. HAZOP und PAAG haben die folgende Bedeutung:

HAZOP:

Hazard and Operability

PAAG:

Prognose von Störungen

Auffinden der Ursache

Abschätzen der Auswirkung

Gegenmaßnahmen

Das Sicherheitskonzept einer Anlage ist darauf gerichtet, den sicheren Einfluss der Gefahrenpotentiale zu gewährleisten. Bei diesen Maßnahmen erfolgt die Auslegung der Anlage gegen Belastungen des bestimmungsgemäßen Betriebes und Auslegung gegen Belastungen aus gestörtem Betrieb (Bild 39). Das HAZOP und PAAG-Verfahren wird wie aus Bild 39 ersichtlich zur Überprüfung des verfahrenstechnischen Ablaufs eingesetzt und soll sicherstellen, dass keine Notfallsituation auftritt.

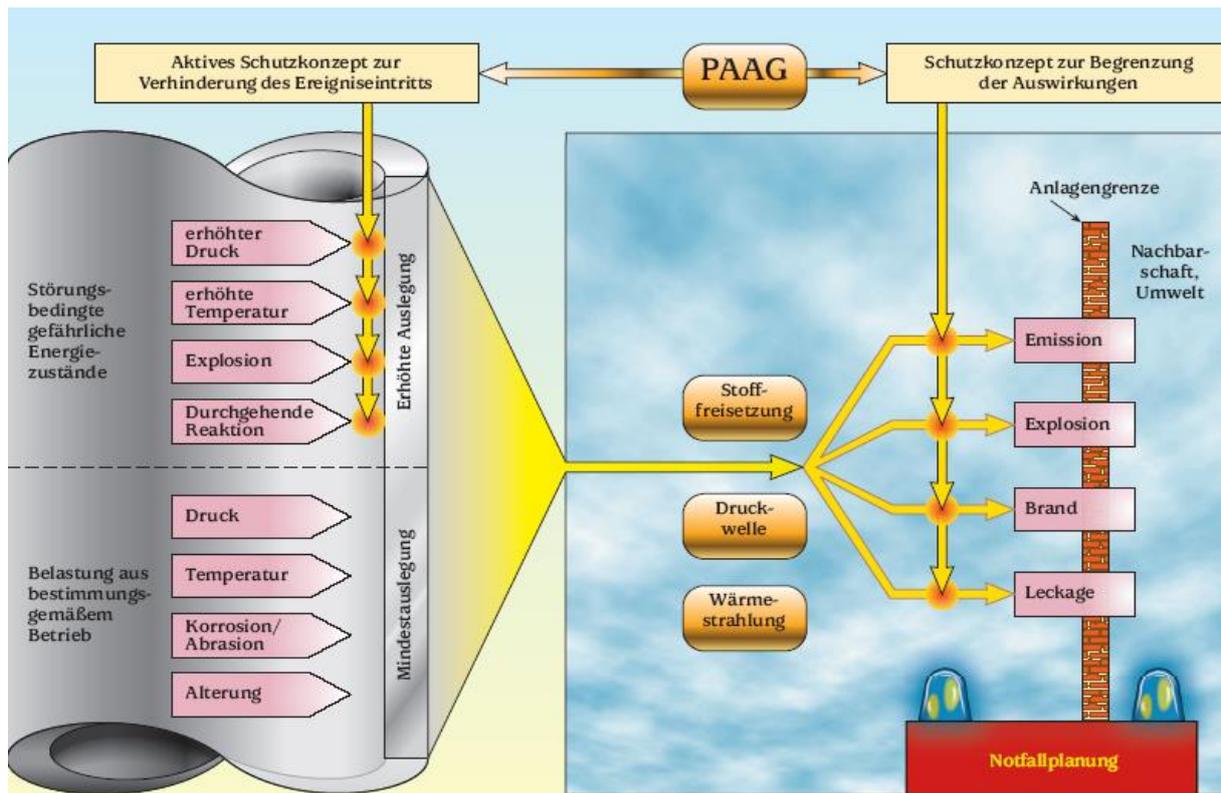


Bild 39. Sicherheitsmaßnahmen in verfahrenstechnischen Anlagen [22]

Die Sicherheitsanalyse betrachtet mit Hilfe eines R&I Fließbildes den Verfahrensablauf und identifiziert gegenüber dem geplanten verfahrenstechnischen Prozess auftretende Unregelmäßigkeiten. Das R&I Fließbild ist ein Rohr- und Instrumentenwarnsystem nach DIN 19227 [23] und EN 62424 [23], in dem die Steuer- und Regelorgane dargestellt sind. Das Fließbild wird als Grundlage für eine Sicherheitsanalyse genommen und muss auf dem neuesten Stand der Technik sein. Die Analyse wird nicht von einer Person, sondern mit einem multidisziplinären Team durchgeführt, um die Erfahrungen unterschiedlicher Teilnehmer und unterschiedliche Sachgebiete in die Untersuchung einfließen zu lassen. Der Moderator hat eine wichtige Aufgabe, die darin besteht, die Untersuchung zu koordinieren und den Wissenstand der einzelnen Teammitglieder zu erfassen. Als Hilfe bedient er sich der im Bild 40 dargestellten Methode. In diesem Bild wird als Beispiel die Sachkenntnis jedes Teilnehmers durch ein grünes, rotes und blaues Viereck dargestellt. Die gelbe Fläche stellt den Kenntnisstand dar, der in die Untersuchung einfließt. Ziel ist es, die gelbe Fläche zu optimieren, um maximale Erfahrung in die Untersuchung einzubringen.

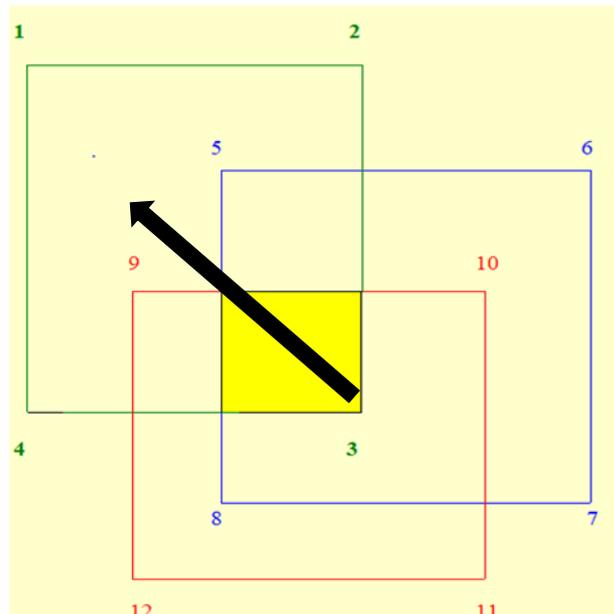


Bild 40. Moderationsmanagement

8.1 Methodik der Gefahrenermittlung

Mit dieser Methode werden hypothetische erzeugte Abweichungen vom Prozess auf die reale Situation übertragen. Der methodische Aufbau ist in sechs Schritte unterteilt:

1. Ermittlung von Informationen über Gefährlichkeit des Materials
2. Identifizierung von Risiken für Mensch und Umwelt
3. Ermittlung von Abweichungen für den bestimmungsgemäßen Prozess
4. Ermittlung von Störungen nach Montageabschluss
5. Überprüfung des Prozessablaufs nach Funktionstest
6. Überprüfung des Fertigungsprozesses nach Anfahren der Anlage

Bei der Anwendung der Methode im Rahmen der Prozess Sicherheitsanalyse ist mit dem ersten Schritt zu beginnen. Die nachfolgenden Schritte sind von den Zwischenergebnissen abhängig. In Bild 41 werden die einzelnen Projektaktivitäten (hier wird vorausgesetzt, dass der Leser mit dem HAZOP/PAAG-Verfahren vertraut ist) mit den sechs Schritten gegenübergestellt.

Die Schritte werden nachfolgend beschrieben:

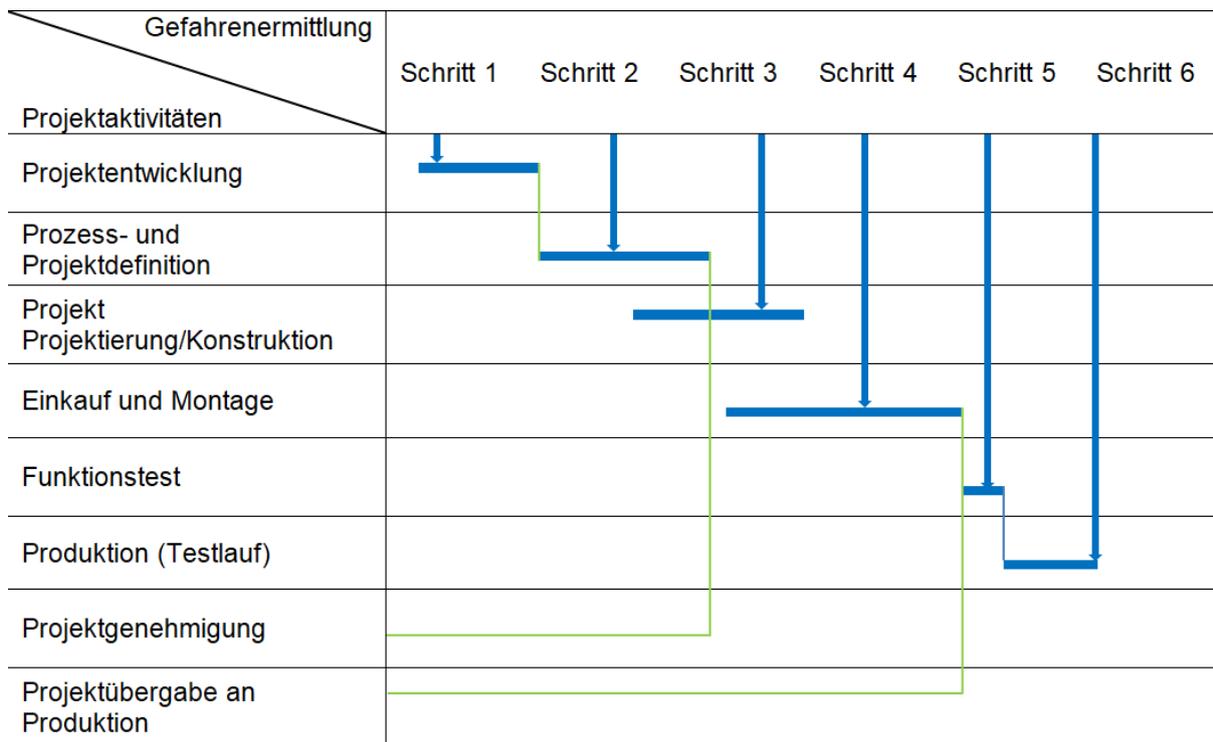


Bild 41. Gegenüberstellung von Projektaktivitäten und Schritte der Gefahrenermittlung

Schritt 1: Ermittlung von Informationen über Gefährlichkeit des Materials

Materialien können Rohmaterial, Halbfabrikate oder Endprodukte sein.

Zwei Fragen sind im sicheren Umgang mit Materialien wichtig:

1. Wie gefährlich ist das Material?
2. Unter welchen Bedingungen wird das Material verwendet?

Als Beispiel sei Wasser betrachtet:

Das Wasser selbst ist nicht gefährlich, aber heißes Wasser kann schwere Verbrennung hervorrufen [15]. Bei dieser Studie wird das im Prozess verwendete oder hergestellte Produkt für Mitarbeiter, Umwelt und Einrichtungen auf seine Gefährlichkeit hin untersucht. Diese Studie erfolgt am Anfang eines Projektes und wird projektbegleitend durchgeführt. Sie dient auch zur Beschaffung von Informationen wie gesetzliche Vorschriften, Auflagen der Behörde, Lieferanteninformation, Materialdatenblätter, Arbeitsabläufe, Rezepturen und Kenntnisse über verfahrenstechnische Arbeitsmittel.

Schritt 2: Identifizierung von Risiken für Mensch und Umwelt

Diese Stufe behandelt die Brand- und Explosionsgefahr unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Laborversuchen bezüglich der Brennzahl (BZ) und Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}). Ebenfalls wird das geplante/vorhandene Mess- und Warnsystem überprüft. Die im Betrieb, in der Bereitstellzone und dem Lager verwendeten Produkte werden auf ihre Wechselwirkung zu anderen bereitgestellten Materialien bei der Gefahrenermittlung mit einbezogen.

Schritt 3: Ermittlung von Abweichungen beim bestimmungsgemäßen Betrieb

Diese Analyse wird am Ende einer Projektplanung/Konstruktion durchgeführt, um mögliche Schwachstellen im Prozessablauf zu ermitteln. Gefahren für Beschäftigte und Umwelt werden mitberücksichtigt. Die Ergebnisse der Schritte 1 und 2 fließen mit in diese Betrachtung ein. Die Vorgehensweise für diese Analyse ist in Bild 42 wiedergegeben.

Die Prozess-Analyse wird nach der folgenden Betrachtungsweise durchgeführt:

- Ermittlung von Abweichungen zum geplanten Prozess
- Ermittlung von Ursachen
- Abschätzen von Gefährdungen/Auswirkungen
- Erarbeitung von Gegenmaßnahmen

Bei der Ermittlung von Störungen wird zuerst der gesamte Fertigungsprozess in Systemgrenzen unterteilt. Die Systemgrenzen werden wiederum in Teilsysteme gegliedert. Für den Fertigungsprozess in einem Teilsystem wird eine Sollfunktion erstellt. Sie beschreibt, wie die ausgewählte Funktionseinheit arbeitet und erklärt mit den vorgesehenen Prozessparametern den bestimmungsgemäßen Produktionsablauf. Relevante Prozessparameter können sein:

- Material
- Menge
- Strömungsgeschwindigkeit
- Temperatur
- Druck
- Zeitraum
- Zeitpunkt
- Ort
- Richtung

Durch die systematische Anwendung von Leitworten auf die Parameter der Sollfunktion werden Abweichungen auf den bestimmungsgemäßen Betrieb erzeugt und verschiedene Störungen des Systems ermittelt. Die Abweichung wird aus einer Kombination von Leitwort und Parameter (Leitwort + Parameter) bestimmt. Als Leitworte können eingesetzt werden:

nein, nicht, kein:	Sollfunktion wird nicht erfüllt
mehr:	Quantitative Größen nehmen zu
weniger:	Quantitative Größen nehmen ab
sowohl als auch:	Zusätzliche Stoffe/Situationen können entstehen
teilweise:	Betrachtung verschiedener Phasen
Umkehrung:	Falsche Richtung
anders als:	Andere Stoffe, andere Richtung

Die Aufstellung von möglichen Abweichungen vom Produktionsprozess ist ein Ansatzpunkt für das Abschätzen der Auswirkungen und das Festlegen angemessener Gegenmaßnahmen bevor die potentiellen Gefahren wirksam werden. Ergeben sich aus den getroffenen Maßnahmen neue Sicherheitsprobleme, muss der Prozess erneut durchlaufen werden [22].

Schritt 4: Ermittlung von Störungen nach Montageabschluss

Diese Studie wird nach Fertigstellung einer Anlage durchgeführt. Es werden Ausrüstung, Maschinen, Arbeitsmittel und Verfahren, die in der vorausgegangenen Gefährdungsbeurteilung ermittelt wurden, auf Einhaltung überprüft. Diese Untersuchung muss vor Inbetriebnahme der Anlage abgeschlossen sein.

Schritt 5: Überprüfung des Fertigungsprozesses nach Anfahren der Anlage

Nach Abschluss der Montage und Inbetriebnahme der Anlage wird überprüft, ob das Unternehmen interne Richtlinien bezüglich Sicherheit, Gesundheit, Umwelt und die gesetzlichen Auflagen erfüllt. Diese Untersuchung muss vor Produktionsstart abgeschlossen sein.

Schritt 6: Rückblick nach Projektübergabe an die Produktion

Dieser wird 3 bis 6 Monate nach zufriedenstellender Produktion durchgeführt. Es wird überprüft, ob alle festgelegten Maßnahmen umgesetzt und eingehalten wurden.

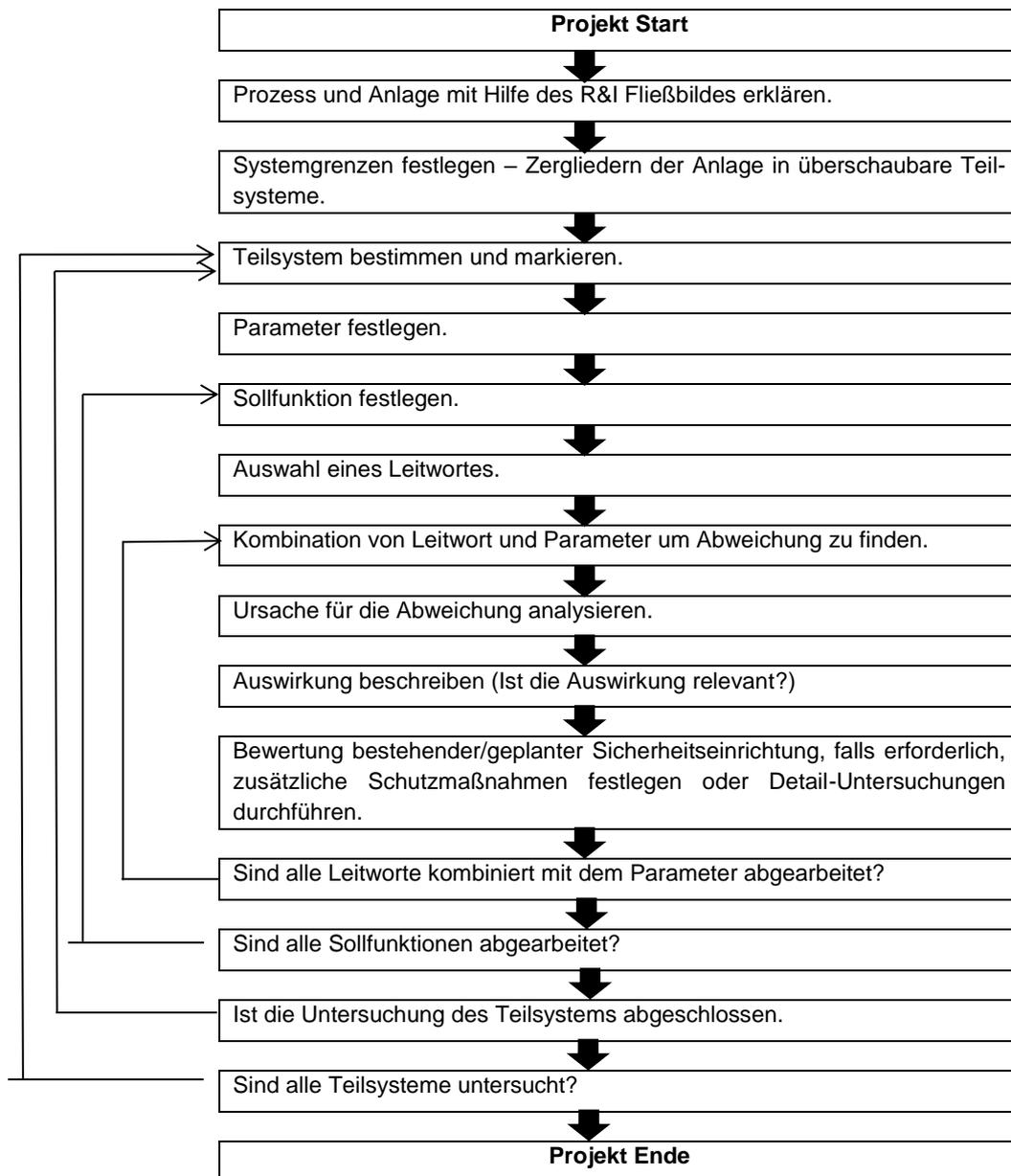


Bild 42. Vorgehensweise bei der Prozess-/Gefahrenermittlung

8.2 Gefahrenbewertung

Nach Diagnostizierung der Abweichung vom geplanten Produktionsprozess und Ermittlung der Ursachen werden die Schutzmaßnahmen zur Beseitigung der Auswirkung festgelegt. Die Entscheidung über zusätzlich benötigte Maßnahmen erfolgt nach der Gefahrenbewertung mit der „Fehler-Möglichkeiten und Einflussanalyse“ (FMEA) oder mit der Risiko-Matrix. Die Besonderheit mit der FMEA liegt in der Zuordnung von drei Zahlen und deren Produkt zu jeder Fehlerursache. Mit den Zahlen bewertet (jeweils 1 bis 10) werden:

- die Auftrittswahrscheinlichkeit
- die Bedeutung/Tragweite
- die Wahrscheinlichkeit der Fehlererkennung vor Schadenseintritt

Das Produkt daraus wird Risiko-Prioritätszahl (RPZ) genannt und liegt im Bereich 1 bis 1000. Eine Bewertung mit der RPZ sowie mit der Risiko-Matrix erfolgt immer im Team.

Wahr- schein- lichkeit	Schwere	S1	S2	S3	S4	S5
	W5	S1W5	S2W5	S3W5	S4W5	S5W5
W4	S1W4	S2W4	S3W4	S4W4	S5W4	
W3	S1W3	S2W3	S3W3	S4W3	S5W3	
W2	S1W2	S2W2	S3W2	S4W2	S5W2	
W1	S1W1	S2W1	S3W1	S4W1	S5W1	

geringes Risiko



weitere Untersuchungen notwendig



nicht akzeptabel



Bild 43. Risiko-Matrix

Für die Bewertung der nachfolgenden Sicherheitsanalyse eines externen Fließbettes wurde die Risiko-Matrix (Bild 43) verwendet. Für die Risikoeinstufung wurde die Schwere und Wahrscheinlichkeit beim Auftreten eines unerwünschten Ereignisses berücksichtigt und in 5 Stufen unterteilt. Der Schweregrad (Tabelle 22) behandelt den

Bereich von keinen Verletzungen (S1) bis zum schweren Unfall mit Todesfolge (S5). Die Wahrscheinlichkeit (Tabelle 23) ist klassifiziert für den Bereich Unwahrscheinlichkeit des Auftretens (W1) bis häufiges Auftreten (W5). Mit den aus beiden Tabellen erhaltenen Daten wird in der Risiko-Matrix (Bild 43) die Gefährlichkeit des unerwünschten Ereignisses ermittelt.

Das Ergebnis ist wie folgt unterteilt:

- Geringes Risiko Farbe grün
- Weitere Untersuchungen notwendig Farbe gelb
- Nicht akzeptables Risiko Farbe rot

Im Rahmen dieser Dissertation sind die in den Tabellen 22 und 23 aufgeführten Informationen Annahmen, die in der Industrie firmenspezifisch erstellt werden (siehe nachfolgende Beispiele).

Tabelle 22. Schweregrad

Schweregrad	Verletzungen (Sicherheit)	Umweltschäden (Umwelt)	Sachschäden oder Schaden in der Produktion.
S1	Keine Verletzungen	Keine Umweltschäden	Eine Sachbeschädigung oder Produktionsschäden.
S2	Erhöhte Verletzung	Geringer Schaden	Kleiner Schaden an Eigentum oder Produktion (einige Stunden Produktionsausfall).
S3	Ernste Verletzungen	Ernster Schaden, der korrigierbar ist	Schwerer Schaden an Eigentum oder Produktion (einige Tage Produktionsverlust).
S4	Potentielle Todesgefahr	Ernster und langfristiger Schaden	Schwerer Schaden an Eigentum, der einen langfristigen Verlust der Produktion zur Folge hat.
S5	Schwerer Unfall mit Todesfolgen	Wirtschaftliche Katastrophe	Massive Zerstörung an Eigentum oder Betriebsstätten oder Totalverlust der Produktion.

Die Häufigkeit/Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines unerwünschten Ereignisses wird in Tabelle 23 der Klassifizierung gegenübergestellt.

Tabelle 23. Häufigkeit/Wahrscheinlichkeit

Wahrscheinlichkeit	Klassifizierung	Eintrittswahrscheinlichkeit/ Jahr	Eintritt oder Häufigkeit
W1	Unwahrscheinlich	10^{-5}	Ereignisse dieser Art sind nicht bekannt
W2	Sehr selten	10^{-4}	Ereignis erfordert eine Kombination von seltenen Ereignissen
W3	Selten	10^{-2}	Ereignis, das an redundanten Ereignissen vorgekommen ist
W4	Möglich	10^{-1}	Ereignis, das einmal alle 1000 Jahre bis einmal alle 10 Jahre auftritt
W5	Oft	10^{-1}	Ereignis, das häufiger als alle 10 Jahre vorkommt

8.3 Prozessbeschreibung für eine staubführende Sprühtrocknungsanlage

Am Beispiel einer realen staubführenden Sprühtrocknungsanlage (Bild 44) aus der chemischen- und Lebensmittelindustrie soll der Umgang mit dem Produkt B 16 sowie die Brand- und Explosionsgefahr im externen Fließbett behandelt werden. Die Sicherheitsrisiken und die Verfügbarkeit der Anlage stehen im Fokus dieser Analyse. Um die Anonymität des Herstellers zu wahren, wurde auf die Firmenbezeichnung verzichtet.

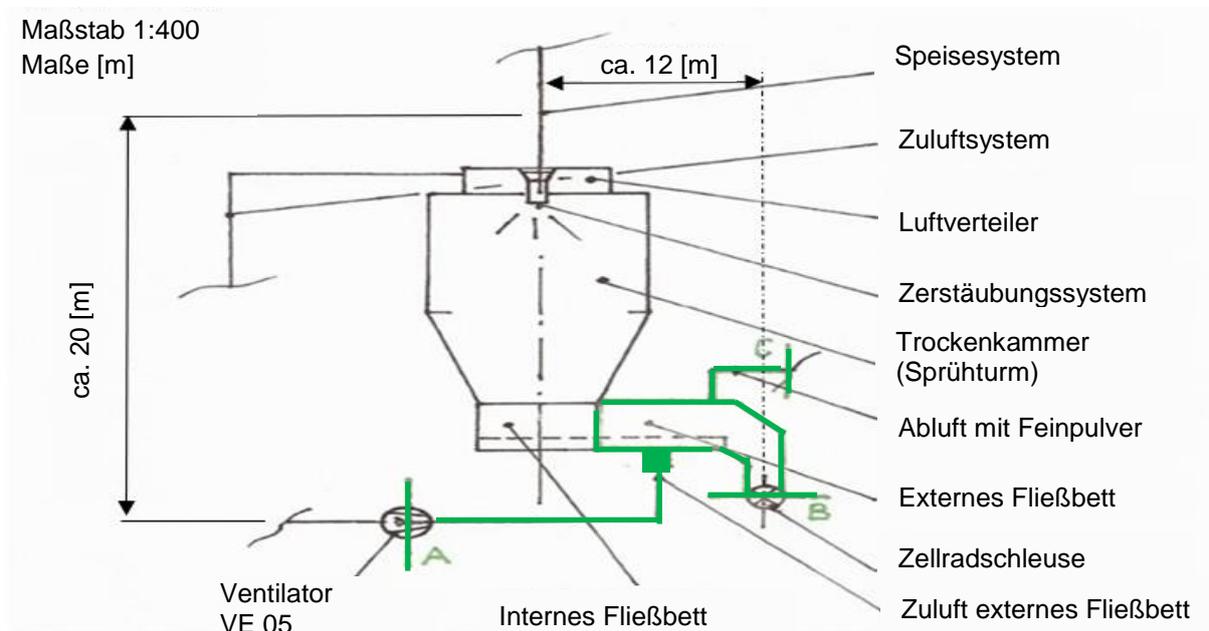


Bild 44. Vereinfachtes Fließbild einer Sprühtrocknungsanlage mit externem Fließbett

Bei dem zu betrachtenden Fertigungsprozess wird von einer zentralen Produktaufbereitungsanlage das Halbfabrikat B 16 in einen Vorlagebehälter gefördert. Der Vorlagebehälter besitzt ein Rührwerk, das je nach Füllstand geregelt werden kann. Von dort wird das Produkt mit drei Düsen im Sprühturm zerstäubt. Bei der Zerstäubung des Produktes in einem 200 [°C] Heizluftstrom erfolgt die Verdampfung des flüssigen Produktanteils.

Die Trocknung erfolgt in zwei Stufen:

Die erste Stufe ist die Trockenkammer, bei der bis 97 [%] Wasserverdampfung erfolgt. Das pulverförmige Produkt geht von dort in den Konusbereich und anschließend zur Resttrocknung in einen internen Fließbettrockner. Hier wird Heißluft oder angewärmte Luft von unten über einen Lochblechboden in das Fließbett geblasen. Es entsteht eine Wirbelschicht, in der das restliche Wasser bis zu einer Restfeuchte verdampft wird. Durch Rotation wird das erzeugte Pulver in das nachfolgende externe Fließbett (Bild 44, grüne Markierung) gefördert. Das externe Fließbett besitzt einen speziellen Lochblechboden respektive Siebboden, durch den von unten gekühlte und entfeuchtete Luft zugegeben wird. Der Lochblechboden ist so gestaltet, dass die Luftführung in Richtung Produktaustrag erfolgt. Die Luft für das externe Fließbett wird über einen zweistufigen Filter angesaugt und über einen Luftkühler und Tropfenabscheider entfeuchtet. Über ein Regelventil im Heizluftkanal wird die benötigte Temperatur eingestellt und über einen Ventilator VO5 in das externe Fließbett geführt.

Ein Zyklon dient zum Abscheiden von Pulverpartikel aus dem Abluftstrom. Das Feinpulver wird entweder zum Ende des externen Fließbettes geführt oder zur Düsenzerstäubung am Turmkopf. Die Abluft wird über ein firmeneigenes Abluftreinigungssystem behandelt.

Das externe Fließbett dient ausschließlich zur Kühlung des Pulvers. Das gekühlte Pulver gelangt über eine Zellradschleuse zu einem Konusmischer. Von dort wird es mittels einer zweiten Zellradschleuse zur Verpackung geführt. Das An- und Abfahren der Anlage sowie die Verpackung sind nicht Bestandteil der nachfolgenden Sicherheitsbetrachtung.

8.4 Systematische Sicherheitsbetrachtung eines externen Fließbettes

Die Untersuchung benutzt für die Prozessanalyse die in Kapitel 8.1, Schritt 3 beschriebene systematische Vorgehensweise. Im vorliegenden Kapitel ist die Intention des Verfassers dem Anwender Grundlagen zu vermitteln, um an einer eigenen Anlage

Untersuchungen auf Prozessrisiken zu ermöglichen. Die Untersuchung beschränkt sich nur auf das externe Fließbett, da die Rahmenbedingungen und Parameter vom realen externen Fließbettprozess, skaliert und für die Laborversuche zur Ermittlung der Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) für das Produkt B 16 übernommen wurden.

Nachfolgende Parameter sind die Basis für die Analyse:

Prozess-Zustandsgröße:

- Stoff: B 16
- Menge: 275 [kg/h]
- Korngröße: 77,7 [μm]
- Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}): BVZ_{qs} III ermittelt mit dem Prototyp
- Strömungsgeschwindigkeit: 300 [m/h]; 0,4 [m/s]
- Betriebstemperatur: 20 [°C] bis 40 [°C]
- Druck: atm. Druck oberhalb Sprühturm, unterhalb 107 [mbar] (Ventilator)
- Zeitpunkt: 48 Stunden nach Nassreinigung
- Richtung: Teilsystem ABC, Prozessluft CA

Prozess-Randbedingung:

- Reinheit des Produktes: rein, Übernahme von laufender Produktion
- Zellradschleuse: läuft permanent
- Durchmischung: NA
- Stickstoff: wird nicht benutzt
- Ventil geschossen: 111 260 y, Hersteller: Anhydro
- Druckauslegung Fließbett: 0,6 [bar]
- Druckauslegung Ventilator: 50 [mbar]
- Lochblech: Maschinenweite 1
- Arbeitsunterlage: vereinfachtes Fließbild – Bild 46
die Anlage ist geerdet und spannungslos

Da eine Zündquelle ausschlaggebend für eine Brand- und Explosionsgefahr ist, wurde bei der Sicherheitsbetrachtung durch Gegenmaßnahmen die Vermeidung von Zündquellen sichergestellt. Eine mögliche Zündquelle kann eine elektrostatische Aufladung

sein. Mit Hilfe von Erdung wird eine Gegenmaßnahme vorgesehen, um diesen Vorgang zu vermeiden (siehe Randbedingung). Zusätzlich sollten die einzelnen Bauteile dicht verbunden sein. Ebenfalls ist sicherzustellen, dass keine Spannungsunterschiede zwischen den Anlagenteilen bestehen. Eine andere Möglichkeit der Zündquelle ist eine exotherme Reaktion einschließlich einer Selbstentzündung von Stäuben durch Glimmnester wie in Kapitel 2.2 beschrieben.

Nach Aufstellung der Zustandsgrößen und Festlegung der Rahmenbedingungen für das zu betrachtende System wird für den Prozessablauf im externen Fließbett eine Sollfunktion bestimmt. Die Sollfunktion lautet:

*Auflockerung und Abkühlung des Produktes B 16 mit der
Brandverhaltenszahl BVZ_{qs} III im externen Fließbett.
Weitere Informationen siehe Prozess-Zustandsgrößen
und Randbedingungen.*

Danach erfolgt die Gefahrenermittlung wie im Schritt 3 von Kapitel 8.1 beschrieben und die Gefahrenbewertung mit der Risiko-Matrix (Kapitel 8.2). Das Ergebnis dieser Sicherheitsuntersuchung einschließlich Risikobewertung ist in nachfolgender Ausarbeitung (Tabellen 24.1 und 24.2) wiedergegeben. Die Auswirkungen unterschiedlicher Brandverhaltenszahlen (BVZ_{qs}) wie BVZ_{qs} III und BVZ_{qs} IV auf die Risikobewertung wird mit der dynamischen Risikobewertung in Kapitel 8.5 behandelt.

Tabelle 24.1. Sicherheitsbetrachtung HAZOP/PAAG am externen Fließbett.

Sicherheitsbetrachtung HAZOP – Externes Fließbett					
Projektname:	Fließbett				
Projektnummer:	GER 3292	Firma:	-	Bemerkung:	S = Sicherheit, B = Betrieb
Anlage:	-	Datum der Besprechung:	12.02.2020	Fließbild:	Anhydro Spray Dryer
Teilnehmer:	-	Schriftführer/Moderator:	Hucke (BUW)	Zeichnungs Nr.:	F-888285 G
Zustandsgröße:	-	Randbedingung:	-	Sollfunktion:	Auflockerung und Abkühlung des Produktes B 16 im externen Fließbett. Weitere Informationen siehe Zustandsgrößen und Randbedingungen.
Stoff:	B 16	Reinheit des Produktes:	rein, Übernahme von laufender Produktion		
Brennzahl (BZ):	BZ: 5	Zellradschleuse:	läuft permanent		
Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}):	BVZ _{qs} III	Durchmischung:	NA		
Menge/h:	275 [kg/h]	Stickstoff:	wird nicht benutzt		
Korngröße:	77,7 [µm]	Ventil geschlossen:	111 260y, Hersteller: Anhydro		
Strömungsgeschwindigkeit:	300 [m/h]; 0,4 [m/s]	Druck im Fließbett:	0,6 [bar]		
Betriebstemperatur:	20 [°C] bis 40 [°C]	Lochblech:	Maschinenweite 1		
Ventilator, Druck VE05:	atm. Oberhalb Sprühturm, unterhalb				
Zeit/Zeitpunkt:	107 [mbar] (Ventilator)				
Richtung:	50 [mbar] 48 [h] nach Nassreinigung ABC				
				Bemerkung:	Anfahren und Abfahren der Anlage ist nicht Teil dieser Studie.

Tabelle 24.2. Sicherheitsbetrachtung HAZOP/PAAG am externen Fließbett

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
					S/B	Schwere	Wahrscheinlichkeit				Risiko	Schwere	Wahrscheinlichkeit
1	Stoff B 16												
2	Kein Stoff/Pulver B 16	Keine Lieferung, logistisches Problem	Keine Auswirkung, auch wenn Zellrad-schleuse steht	Optimierung der Logistik	B	S1	W1		Keine Aktion erforderlich		Materialwirtschaft	S1	W1
3		Es kommt kein Pulver in das Fließbett	Keine Auswirkung, auch wenn Zellrad-schleuse steht	Sicherstellen, dass keine Pulverablagerungen an der Kammerwand sind	B	S1	W1		eine Aktion erforderlich		Produktion	S1	W1
4	Pulver ist im Fließbett, aber keine Pulverschicht	Pulver entweicht mit Abluft, wird zum Zyklon oder Filter geführt	Keine Auswirkung, auch wenn Zellrad-schleuse steht	Reduzierung der Luftmenge im Fließbett, folglich fluidisierte Pulverschicht	B	S1	W1		Keine Aktion erforderlich		Produktion	S1	W1
5	Mehr Stoff	NA			B								
6	Weniger Stoff	NA			B								

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	S/B	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
						Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
7	Sowohl B 16 als ein anderer Stoff	Falsche Lieferung	Kontamination möglich	Planung stellt sicher, dass nur B16 in die Produktion geht.	B	S3	W3		Produktüberprüfung in der Produktion durch zweiten Mitarbeiter		Produktion	S3	W2	
8	Teilweise	NA			B									
9	Umkehrung	NA			B									
10	Ein Anderer Stoff als B 16	Falsche Lieferung	Kontamination	QC überprüft RM oder Halbfabrikat u. stellt sicher, dass der richtige Stoff in die Produktion gelangt.	B	S3	W3		Produktüberprüfung des angelieferten Rohmaterials durch zweiten Mitarbeiter		Produktion	S3	W2	
11		Unzureichende Fluidisierung auf den Lochblechen	Pulverablagerung im Fließbett	Luftmenge erhöhen	B	S1	W3		Automatische Mess- und Regeleinrichtung zur Kontrolle des Luftstromes		QC	S1	W2	
12	Menge 275 [kg/h]													

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	S/B	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
						Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
13	Keine Menge	Keine Lieferung, logistisches Problem	Keine	Optimierung der Logistik	B	S1	W1		Keine Aktion		Materialwirtschaft	S1	W1	
14	Mehr als 275 [kg/h]	Bei Anreicherung im internen Fließbett, wird auch im externen Fließbett angereichert	Prozess steht, Temperaturerhöhung im externen Fließbett möglich (max. 40 [°C]). Läuft das Zellrad, erfolgt Temperaturerhöhung durch Reibung, dadurch Verkleben an der Schleuse und Brandgefahr möglich	Durch Regenerieren des Ventilators wird der Luftstrom korrigiert und der Prozess im Fließbett beibehalten	S	S3	W3		Automatische Regenerierungseinrichtung für den Ventilator		MSR	S3	W2	

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	S/B	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
						Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
15	Weniger als 275 [kg/h]	Weniger Einspeisung vom internen Fließbett	Keine	Siehe An/Abfahren der Anlage	S									
16	Sowohl als auch	Siehe weniger, Position 15	Keine	Siehe An/Abfahren der Anlage	S									
17	Teilweise	NA												
18	Umkehrung	NA												
19	Anders als	Keine ausreichende Trocknung nach Reinigung	Ablagerung am Rotor, folglich Motor Überhitzung, Brand- und Explosionsgefahr	Ausreichende Trocknung sicherstellen	S	S4	W3		Produktionsstart erst nach Freigabe eines trockenen Fließbettes		Produktion	S4	W2	
20									Qualitätssicherung gibt Fließbett nach Überprüfung frei		QC	S4	W1	
21	Korngröße 77,7 [µm]													
22	Keine Korngröße	NA												

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion			
					S/B	Schwere	Wahrscheinlichkeit				Risiko	Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
23	Korngröße mehr als 77,7 [µm]	Prozessabweichung, Falsche Lieferung	Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre, ist Zündquelle vorhanden dann Explosion	Laufende Prozessüberwachung und damit Prozessanpassung, Zündquellenvermeidung durch Erdung	S	S4	W2		Qualitätssicherung stellt sicher, dass die korrekte Korngröße verwendet wird		QC	S4	W1	
24	Korngröße weniger als 77,7 [µm]	Prozessabweichung, Falsche Lieferung	Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre, ist Zündquelle vorhanden dann Explosion	Laufende Prozessüberwachung und damit Prozessanpassung, Zündquellenvermeidung durch Erdung	S	S4	W2		Qualitätssicherung stellt sicher, dass die korrekte Korngröße verwendet wird		QC	S4	W1	

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	S/B	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
						Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
25	Sowohl mehr als 77,7 [µm] als auch weniger als 77,7 [µm]	Prozessabweichung, Falsche Lieferung, siehe Pos. 22,23	Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre, ist Zündquelle vorhanden dann Explosion	Laufende Prozessüberwachung und damit Prozessanpassung, Zündquellenvermeidung durch Erdung	S	S4	W2		Qualitätssicherung stellt sicher, dass die korrekte Korngröße verwendet wird		QC	S4	W1	
26	Teilweise	NA												
27	Umkehrung	NA												
28	Anders als - große, nasse Klumpen im Fließbett	Lochblech ist nass oder blockiert	Qualitätsproblem	Anlage anhalten, entleeren und reinigen, Anlage nach Inbetriebsetzung anfahren	B	S2	W3		Produktion stellt sicher, dass das Lochblech trocken und nicht blockiert ist.		Produktion	S2	W2	
29	Strömungsgeschwindigkeit 300 [m/h]													

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	S/B	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
						Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
30	Keine Strömungsgeschwindigkeit	Kein Prozess	Keine Auswirkung, keine Produktion	Produktion stellt sicher, dass im ext. Fließbett die Luftzufuhr vorhanden ist	B	S1	W1		Keine Aktion		Produktion	S1	W1	
31	Mehr als 300 [m/h]	höhere Luftzufuhr vom Ventilator - Regelproblem	Temperaturerhöhung im externen Fließbett möglich (max.40 [°C]) Läuft das Zellrad, erfolgt Temperaturerhöhung durch Reibung, dadurch Verkleben an der Schleuse möglich und folglich Brandgefahr	Durch Regenerierung des Ventilators wird der Luftstrom auf den Prozess eingestellt	S	S3	W3		Installation einer Steuer-/Regeleinheit, die sicherstellt, dass die Strömungsgeschwindigkeit von 300 [m/h] gehalten wird.		MSR – Technik	S1	W2	

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	S/B	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
						Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
32	Weniger als 300 [m/h]	Weniger Luftzufuhr vom Ventilator – Regelproblem	Keine Auswirkung	Siehe An-/Abfahren	S									
33	Sowohl als auch	NA												
34	Teilweise	NA												
35	Umkehrung	NA												
36	Anders als	NA												
37	Betriebstemperatur 40 [°C]													
38	Keine Temperatur	NA												
39	Mehr als 40 [°C]	Regelfehler	Das Produkt wird klebrig, Folge Verklumpung des Zellrades, durch Reibung Brandgefahr	Installation eines Temperatursensors nach Ventilator (VE05)	S	S3	W3		Test des Temperatursensors vor Start des Fließbettes		Produktion	S3	W2	

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	Risiko vor Aktion				Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
					S/B	Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
40	Weniger als 20 [°C]	Kühlmaschine liefert weniger als 20 [°C]	Kondensation, folglich Verklumpung und Ablagerung an der Zellrad-schleuse, durch Reibung Brand-gefahr	Installation eines Temperatursensors nach Ventilator (VE05)	S	S3	W3		Test der Kühlmaschine vor Start des Fließbettes		Produktion	S3	W2	
41	Sowohl als auch	NA												
42	Teilweise	NA												
43	Umkehrung	NA												
44	Anders als	NA												
45	Druck – Atmosphäre im System	NA												
46	Mehr als 50 [mbar] von VE05 ins externe Fließbett	Falscher Ventilator	Keine, Fließbett ist für 0,6 [bar] ausgelegt	Test des Ventilators auf 50 [mbar] vor Inbetriebnahme	B	S1	W3		Bei allen Wartungsarbeiten Test des Ventilators – in Wartungsplan aufnehmen		Instandhaltung	S1	W2	

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	Risiko vor Aktion				Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
					S/B	Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
47	Weniger als 50 [mbar]	Falscher Ventilator	Keine	Test des Ventilators auf 50 [mbar] vor Inbetriebnahme	B	S1	W3		Bei Wartungsarbeiten Test des Ventilators – in Wartungsplan aufnehmen		Instandhaltung	S1	W2	
48	Zeit/ Zeitpunkt													
49	Keine Zeit	NA												
50	Mehr als 48 [h] Produktionsdurchlauf	Regelfehler	Nicht relevant	Funktionsprüfung des Reglers bei der Wartung	B	S1	W2		Keine Aktion		Instandhaltung	S1	W2	
51	Weniger als 48 [h] Produktionsdurchlauf	Regelfehler	Keine sicherheits-technische Auswirkung aber Qualitätsprobleme	Funktionsprüfung des Reglers bei der Wartung	B	S1	W2		Rücksprache mit Fachabteilung wegen Produktqualität		Instandhaltung, Fachabteilung	S1	W2	
52	Start zu früh	Regelfehler	Keine sicherheitstechnische Auswirkung	Funktionsprüfung des Reglers bei der Wartung	B	S1	W2		Keine Aktion		Instandhaltung	S1	W2	

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	S/B	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
						Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
53	Start zu spät	Regelfehler	Keine sicherheitstechnische Auswirkung	Funktionsprüfung des Reglers bei der Wartung	B	S1	W2		Keine Aktion		Instandhaltung	S1	W2	
54	Sowohl als auch	NA												
55	Umkehrung/Falsche Abfolge	NA												
56	Anders als	NA												
57	Richtung ABC-Produkt vom Turm ins Fließbett													
58	Keine Richtung/Mehr/Weniger	NA												
59	Sowohl vom Turm ins Fließbett als auch umgekehrt	Nicht möglich												

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	Risiko vor Aktion				Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
					S/B	Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
60	Luftstrom in andere Richtung als ins externe Fließbett	Ventilator VE 05 falsch angeschlossen	Wenn Ventilator nicht EX geschützt, Luftgemisch mit Produkt führt zu Brand und Explosion durch Zündquelle Ventilator	Vor Start des Fließbettes Drehrichtung des Ventilators vom Elektriker überprüfen	S	S4	W2		Installation eines Durchflussmessgerätes mit Alarmgeber und Produktionsstopp bei falscher Strömungsrichtung des Luftstromes		MSR - Technik, Instandhaltung Elektrik	S4	W1	
61	An und Abfahren der Anlage	nicht behandelt												

8.5 Einfluss der Brandverhaltenszahl auf die dynamische Risikobewertung

Die Sicherheitsanalyse wurde für den Stoff B 16 mit der Brandverhaltenszahl BVZ_{qs} III durchgeführt, die sich aus Laborversuchen mit dem Prototyp ergeben hat.

Wahr- scheinlichkeit \ Schwere	S1	S2	S3	S4	S5
	W5	Yellow	Red	Red	Red
W4	Green	Yellow	Red	Red	Red
W3	Green	Green	Yellow	Red	Red
W2	Green	Green	Green	Yellow	Red
W1	Green	Green	Green	Green	Yellow

Bild 45. Einfluss der Brandverhaltenszahl BVZ_{qs} III auf das Risiko

Wahr- scheinlichkeit \ Schwere	S1	S2	S3	S4	S5
	W5	Yellow	Red	Red	Red
W4	Green	Yellow	Red	Red	Red
W3	Green	Green	Yellow	Red	Red
W2	Green	Green	Green	Yellow	Red
W1	Green	Green	Green	Green	Yellow

Bild 46. Einfluss der Brandverhaltenszahl BVZ_{qs} IV auf das Risiko

Mit der Prüfapparatur wurde der Wert für die BVZ_{qs} IV ermittelt. Die Auswirkungen unterschiedlicher Brandverhaltenszahlen (BVZ_{qs}) auf die Risikoeinstufung sind aus der Tabelle 24.2 (Nr. 7) und folgenden Tabellen 24.4 und 24.5 zu entnehmen.

In der Tabelle 24.2 unter der Nr. 7 wird der Stoff B 16 behandelt, der laut Randbedingungen der HAZOP/PAAG-Analyse als „rein“ vorgegeben wurde. Diese Information bezieht sich auf das hergestellte Halbfabrikat B 16. Da das Halbfabrikat über Rohrleitungen zur Sprühtrocknungsanlage und von dort zum externen Fließbett geführt wird, besteht die Möglichkeit, dass durch Abrieb in den Rohrleitungen Verunreinigungen entstehen können und das Produkt kontaminieren. Bei der Sicherheitsanalyse wurde dieses Thema mit der Frage „sowohl B 16 als auch ein anderes Produkt“ behandelt. Die Bewertung S2/W4 (gelber Bereich) erfolgte ohne Betrachtung von Risikobewältigungsmaßnahmen. Nach dem nicht zulässigen Risikowert wurde in der Produktion ein zusätzlicher Mitarbeiter für die Produktüberprüfung vorgesehen. Es ist dann Stand der Technik, dass bei gleichbleibender Schwere die Wahrscheinlichkeit des Auftretens um 1 Stufe abgesenkt und so das Risiko S2/W3 erreicht wird. Die Risikobeurteilung für die BVZ_{qs} III ist aus dem Bild 45 und Tabelle 24.4 zu entnehmen. Bei der Brandverhaltenszahl BVZ_{qs} IV erfolgte die Sicherheitsbeurteilung mit der entwickelten dynamischen Risikobewertung. Die Prozedur für die Risikoeinstufung ist in Bild 46 und Tabelle 24.5 dargestellt. Aus diesen ist ersichtlich, dass sich die Schwere eines Ereignisses von S2 auf S3 für BVZ_{qs} IV verändert und in einem nicht akzeptablen Bereich (rot) liegt.

Mit Einplanung von Sicherheitsmaßnahmen verändert sich die Wahrscheinlichkeit auf W2 und somit wird ein geringeres Risiko S3/W2 erreicht (grün).

Tabelle 24.3 ist eine Gegenüberstellung der Risikoeinstufung für die zwei unterschiedlichen Brandverhaltenszahlen (BVZ_{qs}).

Tabelle 24.3. Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) vs. Risikoeinstufung

Brandverhaltenszahl (BVZ _{qs})	Risikoeinstufung ohne Maßnahmen	Risikoeinstufung mit Maßnahmen	Tabelle	Bild
BVZ _{qs} III	S2/W4	S2/W3	24.4	45
BVZ _{qs} IV	S3/W4	S3/W2	24.5	46

Tabelle 24.4. Position 7 - HAZOP-Betrachtung - Probe B16 mit BVZ_{qs} III – ermittelt mit dem Prototyp

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	S/B	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
						Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
7	Sowohl B 16 als ein anderer Stoff	Falsche Lieferung	Kontamination möglich	Planung stellt sicher, dass nur Orange 650961 in die Produktion geht.	B	S2	W4		Produktüberprüfung in der Produktion durch zweiten Mitarbeiter		Produktion	S2	W3	

The diagram illustrates the risk reduction process for entry 7. A vertical yellow bar is present in the 'Risiko vor Aktion' column. A black arrow points downwards from the 'W4' value in the 'Wahrscheinlichkeit' column to the 'W3' value in the 'Wahrscheinlichkeit' column of the 'Risiko nach Aktion' section. A long black arrow points horizontally from the 'W4' cell towards the right, ending at the 'W3' cell, indicating the transition from the initial risk state to the residual risk state after the action is implemented.

Tabelle 24.5. Position 7 – HAZOP-Betrachtung - Probe B16 mit BVZ_{qs} IV- ermittelt mit der Prüfapparatur

Nr.	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme	S/B	Risiko vor Aktion			Aktion	Wann/Status	Wer	Risiko nach Aktion		
						Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko				Schwere	Wahrscheinlichkeit	Risiko
7	Sowohl B 16 als ein anderer Stoff	Falsche Lieferung	Kontamination möglich	Planung stellt sicher, dass nur B16, BVZ _{qs} III in die Produktion gelangt	B	S2	W4	-	Die Brandverhaltenszahl BVZ _{qs} III hat sich auf BVZ _{qs} IV geändert		QC	S3	W4	-
7	-	-	-	-	B	S3	W4	-	Produktüberprüfung in der Produktion durch zweiten Mitarbeiter		Produktion	S3	W3	-
7	-	-	Kontamination möglich	Planung stellt sicher, dass nur B16, BVZ _{qs} IV in die Produktion gelangt	B	S3	W3	-	Stichproben / Produktüberprüfung durch das Labor		QC	S3	W2	-

8.6 Zusammenfassung der Sicherheitsbetrachtung

Für die Ermittlung eines unerwünschten Prozess-Ereignisses bei der Verarbeitung eines Produktes B 16 mit der Brandverhaltenszahl BVZ_{qs} III wurde das HAZOP/PAAG-Verfahren angewendet. Mit der Risiko-Matrix wurde die Gefährlichkeit des unerwünschten Ereignisses ermittelt. Bei der durchgeführten Untersuchung wurde auf die zu erwartenden verfahrenstechnischen und sicherheitstechnischen Probleme hingewiesen und durch Gegenmaßnahmen die Vermeidung von unerwünschten Vorgängen sichergestellt. Da bei diesem Fertigungsprozess ein Produkt mit zwei unterschiedlichen Brandverhaltenszahlen (BVZ_{qs}) verwendet wurde, ist für diese Sachlage eine dynamische Risikobewertung entwickelt worden, mit deren Hilfe bei der Risikoeinstufung nicht nur die Wahrscheinlichkeit, sondern auch die Schwere des Ereignisses verändert werden kann.

9 Fazit und Ausblick

In der verfahrenstechnischen Industrie werden in der Regel betriebliche Prozesse vor Produkteinführung in Laborversuchen überprüft, um Kenntnisse über das Verhalten der zu verarbeitenden Stoffe zu erfahren. Jedoch sind die Laborergebnisse häufig unterschiedlich zu den Produktionsergebnissen. Dieser Umstand hat schon häufig zu Qualitäts- und Sicherheitstechnischen Problemen im Betrieb geführt.

Diese Schwachstelle wurde ebenfalls durch die im Rahmen der beruflichen Tätigkeit des Verfassers im Bereich der Sicherheitstechnik, Ingenieurwesen und Produktion beobachtet. Deshalb wurde in der vorliegenden Arbeit eine Skalierung und experimentelle Modellierung zur Charakterisierung des Ab-/Brandverhaltens am Beispiel einer staubführenden Fließbettanlage entwickelt mit dem Ziel, dass der Anwender diese Vorgehensweise an jeden betrieblichen Einzelfall anpassen oder weiter entwickeln kann.

Als zusammenfassendes Ergebnis dieser Untersuchung kann folgendes festgehalten werden:

1. Die theoretisch ermittelten linearen Skalierungsfaktoren wurden für Prototyp und Prüfapparatur durch Versuche bestätigt.
2. Der Temperaturgradient war für beide Modelle (Prototyp und Prüfapparatur) identisch.
3. Bei der Ermittlung der Flammenhöhe für Stäube mit gleicher Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) wird der lineare Skalierungsfaktor eingehalten.
4. Bei der Risikobewertung der staubführenden Anlagen, kann nach Festlegung angemessener Sicherheitsmaßnahmen für Produkte unterschiedlicher Brandverhaltenszahlen (BVZ_{qs}) nicht nur die Eintrittswahrscheinlichkeit, sondern auch der Schweregrad eines unerwünschten Ereignisses mit Hilfe der dynamischen Risikobewertung verändert werden.

Ergänzend darf erwähnt werden, dass dieser Ansatz zur Risikobeurteilung mit der neu entwickelten dynamischen Risikobewertung zur Reduzierung des Zeitaufwandes bei der Anwendung beim HAZOP/PAAG - Verfahren führt.

Mit der Erfahrung bei der Skalierung und Modellierung von Fließbetten sowie bei der Beobachtung bei der Ermittlung der Brennzahl (BZ) und der Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) gelang es mit dieser Arbeit die Beziehung betrieblicher Anforderung

bezüglich realer Prozessabläufe und Laboruntersuchungen zu beantworten, da Laborergebnisse unter Berücksichtigung eines bestehenden Skalierungsfaktors zur realen Industrieanlage umgerechnet werden können. Somit werden Qualitäts- sowie sicherheitstechnische Probleme erkannt und Vorkehrungen getroffen, um unerwünschte Ereignisse zu vermeiden.

Es wird vorgeschlagen das Thema weiter zu verfolgen und die gewonnenen Erkenntnisse aufzuarbeiten, damit die Implementierung in der Praxis gelingt. Ziel ist es, den Prozessablauf, die Sicherheit in Brand- und Explosionsschutz, Umwelt- und Gesundheitsschutz zu optimieren. Als Arbeitsfelder zukünftiger Aktivitäten sind in dem Zusammenhang folgende Bereiche zu nennen:

- Ermittlung der Wärmemenge, die der Stauboberfläche durch eine Wärmequelle zugeführt wird.
- Bau und Test einer realen Pilotanlage zur Vertiefung der ermittelten Ergebnisse.
- Ermittlung des theoretischen Skalierungsfaktors für Stäube unterschiedlicher Produktspezifikationen (Korngröße, chemische Zusammensetzung), die in einem verfahrenstechnischen Prozess behandelt werden.
- Vertiefung in der Anwendung der Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) bei der Risikobewertung.

Es darf darauf hingewiesen werden, dass die in dieser Arbeit entwickelte Systematik zur Ermittlung des Skalierungsfaktors als ein neuer Ansatz zur Fortschreibung des Standes der Technik dienen kann. Im Rahmen der dimensionslosen Analyse wäre eine Veröffentlichung in der VDI-Richtlinie denkbar. Bei der Ausbildung von Sicherheitsingenieuren wäre bezüglich der Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) und der dynamischen Risikobewertung eine Erweiterung des Ausbildungsinhaltes zu empfehlen.

Bilderverzeichnis

Bild 1. Vereinfachtes Fließbild einer Sprühtrocknungsanlage mit externem Fließbett	1
Bild 2. Prototyp (Barth, Laudenbacher, Leksin 2014) [11]	3
Bild 3. Bisheriger Gefahrenansatz Brand und Explosion	8
Bild 4. Versuchsaufbau zur Brennzahlbestimmung von Magermilchpulver nach DIN EN 17077 [6]	9
Bild 5. Brennzahlprüfung nach Lütolf [6]	10
Bild 6. Quasi-stationärer Zustand (© GEA Engineering)	11
Bild 7. Sprühtrocknungsanlage Typ G [10]	12
Bild 8. Modifizierte Prüfapparatur – Schnittdarstellung (Barth/Leksin) [11]	13
Bild 9. Modifizierte Prüfapparatur (Barth und Leksin) [11]	14
Bild 10. Gegenüberstellung von BZ und BVZqs [12]	15
Bild 11. Prototyp und Prüfapparatur	16
Bild 12. Ablaufkonzept	19
Bild 13. Modell für die thermische Ähnlichkeitsbetrachtung von einem Fließbett	22
Bild 14. Vereinfachte Darstellung für einen Brand bzw. eine Explosion [16]	32
Bild 15. Schematischer Aufbau einer Fließbett-Anlage	35
Bild 16. Vorgehensweise für die Ähnlichkeitsbetrachtung Prototyp und Prüfapparatur	36
Bild 17. Prototyp und Prüfapparatur	38
Bild 18. Blockdiagramm mit Installation der Thermoelemente	40
Bild 19. Kalibrierung der Thermoelemente in Eiswasser	41
Bild 20. Aufheizen der Wärmequelle	42
Bild 21. Gleichgewichtsbedingungen beim Aufheizen der Wärmequelle für den vertikalen Versuch mit dem Prototyp	43
Bild 22. Versuchsaufbau	44
Bild 23. Vertikaler Temperaturverlauf in der Schüttung Prototyp bis 12000 [s]	45
Bild 24. Temperaturverlauf in der Schüttung Prototyp über den gesamten Versuch	45
Bild 25. Horizontaler Versuch	46
Bild 26. Horizontaler Versuch – geglättete Kurve	47
Bild 27. Vertikaler Temperaturverlauf in der Schüttung Prüfapparatur bis 12000 [s]	49
Bild 28. Temperaturgradient für die Messzeiten von $t = 6000$ und 4000 [s]	56
Bild 29. Temperaturgradient für die Messzeiten von $t = 10000$ und 8000 [s]	57

Bild 30. Temperaturdifferenz Prototyp vs. Prüfapparatur bei einer Messzeit von 4000 [s].....	57
Bild 31. Temperaturdifferenz Prototyp vs. Prüfapparatur bei einer Messzeit von 6000 [s].....	58
Bild 32. Temperaturdifferenz Prototyp vs. Prüfapparatur bei einer Messzeit von 8000 [s].....	58
Bild 33. Temperaturdifferenz Prototyp vs. Prüfapparatur bei einer Messzeit von 10000 [s].....	59
Bild 34. Elektrostatische Aufladung	59
Bild 35. Temperatur vs. Toleranzzahl nach Herstellerangaben	60
Bild 36. Prüfapparatur.....	63
Bild 37. Prüfapparatur mit Probe B 16 vor Drucklufteinstellung.....	63
Bild 38. Probe B 16 nach Zündung.....	64
Bild 39. Sicherheitsmaßnahmen in verfahrenstechnischen Anlagen [22]	67
Bild 40. Moderationsmanagement	68
Bild 41. Gegenüberstellung von Projektaktivitäten und Schritte der Gefahrenermittlung	69
Bild 42. Vorgehensweise bei der Prozess-/Gefahrenermittlung.....	72
Bild 43. Risiko-Matrix.....	73
Bild 44. Vereinfachtes Fließbild einer Sprühtrocknungsanlage mit externem Fließbett.....	75
Bild 45. Einfluss der Brandverhaltenszahl BVZ_{qs} III auf das Risiko.....	92
Bild 46. Einfluss der Brandverhaltenszahl BVZ_{qs} IV auf das Risiko.....	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Beschreibende Definitionen und Klassifizierungen der Brennzahl [6]	9
Tabelle 2. Definition der Brandverhaltenszahl (BVZ _{qs}) [8]	14
Tabelle 3. Maße für Prototyp und Prüfapparatur	17
Tabelle 4. Gegenüberstellung der physikalischen Größen, Maßeinheiten und..... Dimensionen.....	20
Tabelle 5. Gegenüberstellung der physikalischen Größen, Symbole, Maßeinheiten und Dimensionen.....	25
Tabelle 6. Skalierungsfaktor für die Ähnlichkeitsbetrachtung	31
Tabelle 7. Gegenüberstellung angezeigter vs. gemessener LötKolbentemperatur ...	37
Tabelle 8. Kalibrierung der Thermoelemente.....	42
Tabelle 9. Gegenüberstellung Wärmequelle Prototyp vs. Prüfapparatur.....	48
Tabelle 10. Vertikale Temperaturmessung bei 4000 [s].	51
Tabelle 11. Skalierungsfaktor $(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$ bei 4000 [s].....	51
Tabelle 12. Vertikale Temperaturmessung bei 6000 [s]	52
Tabelle 13. Skalierungsfaktor $(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$ bei 6000 [s].....	52
Tabelle 14. Vertikale Temperaturmessung bei 8000 [s]	53
Tabelle 15. Skalierungsfaktor $(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$ bei 8000 [s].....	53
Tabelle 16. Vertikale Temperaturmessung bei 10000 [s]	54
Tabelle 17. Skalierungsfaktor $(\Delta\theta/\Delta x)_m/(\Delta\theta/\Delta x)_p$ bei 10000 [s].....	54
Tabelle 18. „Soll – Ist“ Vergleich Prototyp und Prüfapparatur.....	55
Tabelle 19. Skalierungsfaktor vs. Versuchsergebnisse	56
Tabelle 20. Kalibrierung der Thermoelemente.....	60
Tabelle 21. Ergebnisgegenüberstellung von Flammenhöhe und Brandverhaltenszahl (BVZ _{qs}) für Versuche mit dem Prototyp und der Prüfapparatur	64
Tabelle 22. Schweregrad.....	74
Tabelle 23. Häufigkeit/Wahrscheinlichkeit	75
Tabelle 24.1. Sicherheitsbetrachtung HAZOP/PAAG am externen Fließbett.	79
Tabelle 24.2. Sicherheitsbetrachtung HAZOP/PAAG am externen Fließbett	80
Tabelle 24.3. Brandverhaltenszahl (BVZ _{qs}) vs. Risikoeinstufung.....	93
Tabelle 24.4. Position 7 - HAZOP-Betrachtung - Probe B16 mit BVZ _{qs} III – ermittelt mit dem Prototyp.....	94
Tabelle 24.5. Position 7 – HAZOP-Betrachtung - Probe B16 mit BVZ _{qs} IV- ermittelt mit der Prüfapparatur.....	95

Literaturverzeichnis

- [1] Leitlinien zur Gefahrstoffverordnung (2010). Anhang II. 2010.
- [2] Richtlinie 1999/92/EG (1999). Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können. 1999.
- [3] Richtlinie VDI 2263, Blatt 1 (1990). Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren – Beurteilungen Schutzmaßnahmen; Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben. 1990.
- [4] Richtlinie VDI 2263 (1992). Staubbrände und Staubexplosionenrichtlinien; Gefahren – Beurteilungen – Schutzmaßnahmen. 1992.
- [5] Leksin, A., K. Maiwald & U. Barth (2016). Untersuchungen zur Standardisierung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Ab-/Brandverhaltens in quasi-stationären Zuständen. 2016.
- [6] DIN EN 17077 (2018). Bestimmung des Brandverhaltens von Staubschichten, Deutsche Fassung EN 17077. 2018.
- [7] Kerkhoff, J. (2020). Ermittlung der Brennzahl und der Brandverhaltenszahl verschiedener Stäube. Studienarbeit Sicherheitstechnik. Bergische Universität Wuppertal. 2020.
- [8] Leksin, A., K. Maiwald, L. Kues & U. Barth (2017). Sicherheitstechnische Kenngrößen als Grundlage zur Charakterisierung des Ab-/Brandverhaltens im quasi-stationären Zustand. *Technische Sicherheit*. Vol. 7. 2017.
- [9] Linne, A. (2011). Staubexplosion bei Fude und Serrahn in Gransee wird untersucht. <http://www.moz.de/artikel-ansicht/dg/0/1/984973>. V.: Juli, 2020.
- [10] Richtlinie VDI 2263, Blatt 7 (2013). Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren-Beurteilung-Schutzmaßnahmen. 2013
- [11] Barth, U. & A, Leksin (2017). Brennbarer Staub im quasi-stationären Zustand, Auftreten-Ausmaß-Beurteilung. VDI Tagung. 2017.
- [12] Leksin, A., K. Maiwald & U. Barth (2016). Brandverhalten in Fließbetten mit Auswirkungen auf die Brandschutzmaßnahmen. 2016.

- [13] Barth, U., S. Laudenbacher & A. Leksin (2014). Ab-/Brandverhalten von Stäuben im Fließbett, Modifizierung der Brennprüfung nach VDI 2263 Blatt 1. VDI-Fachtagung mit Ausstellung Nürnberg. 2014.
- [14] Zlokarnik, M. (2000). Scale – up, Modellübertragung in der Verfahrenstechnik Blatt 1. 2000.
- [15] Hucke, L.M (1973). On the Modeling of Thermal Deformation of a Workpiece in Surface Grinding. Master Thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada. Juni 1973.
- [16] Lottermann, J. (2012). Ansätze zur integrierten Brand- und Explosionssicherheit Entwicklung, Validierung und normative Verankerung einer bilateralen, kohärenten Beurteilungssystematik am Beispiel staubführender Anlagen. *Berlin Pro Business 2012. Dissertation.* Bergische Universität Wuppertal. 2012.
- [17] BGRCI T054 (2014). Brennbare Stäube. Antworten auf häufig gestellte Fragen. 2014.
- [18] DIN EN 1127 (2014). Zündquellenarten nach DIN EN 1127. 2014.
- [19] Gallegos Lopéz, S. Lehrveranstaltungsunterlagen zum Fachlabor Mechanische Verfahrenstechnik – Wirbelschichttechnik, Ruhr-Universität Bochum.
- [20] DIN 43710 (1985). Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturnachnehmer; Grundwerte der Thermospannung für Thermopaare Typ U und Typ L. 1985.
- [21] DIN EN 60584 (2014). Thermoelemente Teil 1; Thermospannungen und Grenzabweichungen. 2014.
- [22] Internationale Sektion der IVSS für Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie (2008). Das PAAG- Verfahren. Methodik Anwendung Beispiele. 2008.
- [23] DIN 19227 & DIN EN 62424 (2016). Deutsches Institut für Normung. Aufbau eines R&I Fließbettschemas. 2016.
- [24] TRGS 720 (2020). Technische Regel für Gefahrstoffe – Gefährliche explosionsfähige Gemische-Allgemeines, vormals TRBS 2152 (2006). Technische Regeln für Betriebssicherheit. Bundesanzeiger Nr.103 a. 2006.
- [25] DIN EN 13478 (2002). Sicherheit von Maschinen – Brandschutz. 2002.
- [26] Zirpke, K. (1959). Technische Mechanik Band III, Fachverlag Leipzig. 1959.

- [27] VDI-Richtlinie 2263 Blatt 7 (2010). Dust fires and dust explosions; Hazards – assessment- protective measures: Dust fires and explosion protection in spraying and drying integrated equipment. Technical regulation. 2010.
- [28] Skiba, R (2002). Taschenbuch Arbeitssicherheit. 2002.
- [29] Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie (2000). Das PAAG-Verfahren. Methodik Anwendung Beispiele. ISSA Series No. 2002 (G). 2000.
- [30] Internationale Sektion der IVSS für Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie (1997). Gefahrenermittlung/Gefahrenbewertung, praxisbewährte systematische Methoden, mISSA Prevention Series No. 2027 (G). 1997.
- [31] Richtlinie VDI 2263, Blatt 1 (2022). Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren – Beurteilungen Schutzmaßnahmen; Sicherheitstechnische Kenngrößen von Schüttgütern. 2022.
- [32] Julian Hemke, Temperaturgradienten einer Staubschüttung im Fließbett – Brennverhalten einer Staubschüttung im quasi-stationären Zustand. Studienarbeit am Lehrstuhl für Methoden der Sicherheitstechnik /Unfallforschung, Bergische Universität Wuppertal. 2021.
- [33] Suhrenbrock, L.R.: Effizienz und Geschwindigkeit von Prozessen zur Wirkstoffbeschichtung von Pellets- ein Technologievergleich. Dissertation an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, August 2011.
- [34] Buckingham, E.: On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations. American Physical Society, Phys. Rev. 4, 345, pp. 345-376, October 1914.
- [35] Martin, H.: Dimensionslose Kenngröße. In: VDI-Wärmeatlas – Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. S. Bc 1ff, ISBN 3-540-62719-7 VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen [Hrsg.], Springer-Verlag, 8. Überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg 1997.
- [36] Wetzler, H.: Kennzahlen der verfahrenstechnik. ISBN 3-7785-1060-6 Dr. Alfred Hüthig Verlag. Heidelberg 1985

- [37] Wetzler, H.: Mathematisches System für die universelle Ableitung der Kennzahlen. ISBN 3-7785-1500-4 Dr. Alfred Hüthing Verlag. Heidelberg 1987.
- [38] ISSA. Ermittlung und Bewertung von Gefährdungen, Festlegen von Maßnahmen – Teil 7 Gefährdungen durch Explosionen. 2. Ausgabe, 2/2021, ISBN 978-92-843-0156-0, hrsg. von der IVSS Sektion Chemie und IVSS Sektion für Maschinen- und Systemsicherheit. Heidelberg, Mannheim, 2021

Glossar

Atmosphärische Bedingungen	liegen bei Gesamtdrücken von 0,8-1 [bar] und Temperaturen von -20 [°C] bis +60 [°C] vor [24].
Bestimmungsmäßiger Betrieb	ist der zulässige Betrieb, für den eine Anlage nach ihrem technischen Zweck bestimmt, ausgelegt und geeignet ist (Störfall VwV, 2015)
Brandgefahr	Möglichkeit des Auftretens eines Brandes, unabhängig von der Zündquelle
Brandverhaltenszahl	Kenngroße für fluidisierten Staub; beschreibt den Abbrand eines abgelagerten Staubes
Brennbar	Fähigkeit mit oder ohne Flamme brennen zu können [25].
Brennzahl	Kenngroße für abgelagerten Staub; beschreibt den Abbrand eines abgelagerten Staubes [31]
Dimensionslose Analyse	beschreibt physikalische Größen dimensionslos
Eintrittswahrscheinlichkeit	Ist die geschätzte Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines betrachteten Ereignisses; in der Praxis oft durch Schadenshäufigkeiten ausgedrückt
Element	Ist Teil einer Menge
Energie	Unter Energie versteht man die Fähigkeit Arbeit zu leisten [26]
Explosion	Plötzliche Oxidationsreaktion mit Anstieg der Temperatur [38]
Explosionsgefahr	Im Sinne dieser Dissertation als Raumexplosion von Brennstoff-Luft-Gemischen zu verstehen.

Fließbett	Geräte, in denen mittels Luft eine Pulverschicht oberhalb einer perforierten Platte fluidisiert wird; die Praxis kennt interne und externe Fließbetten [27]
Gefahr	Zustand eines Sicherheitsdefizits ohne augenblickliche Möglichkeit einer Schädigung [28]
Gefährdung	Zustand infolge eines Sicherheitsdefizits mit augenblicklicher Möglichkeit einer Schädigung [28]
Kraft	Ist die Ursache für jede Veränderung des Bewegungszustandes eines Körpers
Leistung	ist die Arbeit in der Zeiteinheit
Leitworte	Begriff bei der HAZOP- bzw. PAAG-Analyse; Leitworte werden auf die Sollfunktion angewendet und ermöglichen die hypothetische Abweichung vom bestimmungsmäßigen Betriebszustand zu finden [29]
Linearer Ausdehnungskoeffizient	linearer thermischer -oder Wärmeausdehnungskoeffizient, ist eine Kennzahl, die das Verhalten eines Stoffes bezüglich Veränderung seiner Abmessung aufgrund der Wärmeausdehnung bei Temperaturveränderung beschreibt
Materialdichte	ist das Verhältnis von Masse (Gewicht) zu Volumen
Methode	Systematisiertes Verfahren zur Gewinnung von Erkenntnissen
Methodik	Gesamtheit von Methoden

Moderator	Eine in der Sicherheitsfragetechnik versierte Person, die die Diskussion im Prüfungsteam lenkt
Nusselt Zahl	ist eine dimensionslose Kennzahl aus der Ähnlichkeitstheorie der Wärmeübertragung. Sie dient zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs zwischen einer festen Oberfläche und einem strömenden Fluid
Parameter	ist essentieller Bestandteil von Zustandsgrößen eines bestimmungsmäßigen Betriebes
Prototyp	Im Sinne dieser Dissertation wird damit die Apparatur in einem gegenüber dem industriellen Maßstab verkleinerten Ausführung bezeichnet
Prozess	Im Sinne dieser Dissertation wird darunter der Verfahrenstechnische Ablauf in einer industriellen Anlage verstanden
Prüfapparatur	Im Sinne dieser Dissertation wird die Apparatur im vergrößerten Maßstab zum Prototypen bezeichnet
Risiko	Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadens und seines Schadensausmaßes
Schwere	Schadenspotential [30]
Sicherheit	Gefahrenfreier Zustand [16]
Skalierung	ist eine Größenveränderung
Skalierungsfaktor	gibt den Maßstab der Größenveränderung an

Spezifische Wärme	spezifische Wärmekapazität eines Stoffes gibt an, wie viel Wärme von einem Kilogramm 1 [kg] dieses Stoffes abgegeben oder aufgenommen wird, wenn sich seine Temperatur um ein Kelvin 1 [K] ändert
Staub	ist ein feinzerteilter Feststoff beliebiger Form, Struktur und Dichte unterhalb einer Korngröße von 500 [µm] (Pulver, Staub, Puder, Mehl) [4]
Sollfunktion	Begriff bei der HAZOP- bzw. PAAG-Analyse; die Sollfunktion beschreibt den bestimmungsgemäßen Produktionsablauf in einer betrieblichen Anlage
Temperaturfeld	ist das Feld der Temperaturen in einem Bauteil
Temperaturgradient/ Temperaturgefälle	Beschreibt, wie sehr die Temperatur mit der Höhe zu oder abnimmt und besagt, dass Wärme vom warmen Bereich zum kühleren Bereich fließt
Wärmefluss	Ist eine physikalische Größe zur quantitativen Beschreibung von Wärmeübertragungsvorgängen. Er ist die in der Zeit übertragene Wärmeenergie
Wärmeleitfähigkeit	Ist die Wärmemenge, die innerhalb von 1 [s] durch einen 1×1×1-Würfel eines Materials fließt, wenn zwischen zwei gegenüberliegenden Seiten ein Temperaturgradient von genau 1 [K] vorhanden ist
Wärmemenge	Ist die Wärmeenergie, die vom wärmeren auf den kälteren Körper übertragen wird
Wärmestrom	Ist definiert als die in einer bestimmten Zeit übertragene Wärmeenergie

Wärmestromdichte

Ist die thermische Energie, die sich zeitlich verändert, bezogen auf den Querschnitt senkrecht zur Wärmeeinbringung

Zustandsgröße

Beschreibt den aktuellen Zustand eines Systems und ist unabhängig davon, auf welchem Weg es zu diesem Zustand gekommen ist. Es sind Prozessparameter, die zur Planung des betrieblichen Produktionsablaufs benötigt werden

Anhangsverzeichnis

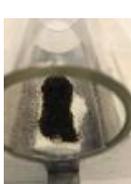
Anhangsverzeichnis	XX
Anhang I – Zusammenfassung der Brennzahlbestimmung	XXI
Anhang II – Zusammenfassung der Brandverhaltenszahl	XXVI
Anhang III – Gegenüberstellung Brennzahl und Brandverhaltenszahl	XXIX
Anhang IV – Bestimmung der dimensionslosen Gruppen	XXX
Anhang V – Transfer Daten von Siphcon/Autodesk in Excel	XXXIV
Anhang VI – Zusammenfassung der Messdaten in elektronischer Form	XXXV

Anhang I – Zusammenfassung der Brennzahlbestimmung

Tabelle I. Brennzahl für Aromastäube

Proben-Nr.	Name	BZ	Bilder	
			Vor Entzündung	Nach Entzündung
B 1	–	2		
B 2	–	2		
B 3	–	2		
B 4	–	5		
B 5	–	6		
B 6	–	5		
B 7	–	6		

Proben-Nr.	Name	BZ	Bilder	
			Vor Entzündung	Nach Entzündung
B 8	-	5		
B 9	-	3		
B 10	-	6		
B 11	-	4		
B 12	-	6		
B 13	-	6		
B 14	-	6		
B 15	-	2		

Proben-Nr.	Name	BZ	Bilder	
			Vor Entzündung	Nach Entzündung
B 16	-	5		
B 18	-	6		
B 19	-	1		
B 20	-	3		
B 21	-	6		
B 22	-	6		
B 24	-	1		
B 25	-	5		

Proben-Nr.	Name	BZ	Bilder	
			Vor Entzündung	Nach Entzündung
B 26	-	5		
B 27	-	6		
B 28	-	5		
B 29	-	2		
B 30	-	6		

Tabelle II. Brennzahl für Chemiestäube

Proben-Nr.	Name	BZ	Bilder	
			Vor Entzündung	Nach Entzündung
C 1	-	2		
C 2	-	3		
C 3	-	6		
C 4	-	1		

Tabelle III. Brennzahl für Milchstäube

Produkt-Nr.	BZ
A 3	3
A 5	3
A 7	3
A 8	3
A 9	3
A 10	3
A 11	3

Anhang II – Zusammenfassung der Brandverhaltenszahl

Tabelle IV. Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) für Milchstäube

Proben-Nr.	Name	BVZ _{qs}	Bilder	
			Vor Entzündung	Nach Entzündung
A 3	–	IV		
A 4	–	-		Abgebrochen, nicht fluidisierbar
A 5	–	IV		
A 6	–			Abgebrochen, nicht fluidisierbar
A 7	–	II		
A 8	–	II		
A 9	–	IV		
A 10	–	IV		
A 11	–	IV		

Tabelle V. Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) für Aromastäube

Proben-Nr.	Name	BVZ _{qs}	Bilder		Beobachtungen
B 1	–	IV			Flammenhöhe ~25 [cm]
B 6	–	IV			Flammenhöhe ~100 [cm]
B 9	–	I			
B 11	–	IV			Flammenhöhe ~40 [cm] (Foto links), Nachbrennen der Probe (Foto rechts)
B 15	–	IV			Flammenhöhe ~30 [cm] (Foto links), Nachbrennen der Probe (Foto rechts)
B 16	–	III			Flammenhöhe ~25 [cm] (Foto links), Nachbrennen der Probe (Foto rechts)
B 17	–	I			
B 19	–	I			

B 21	–	IV			Flammenhöhe ~50 [cm], Nachbrennen der Probe
B 27	–	IV			Flammenhöhe ~40 [cm] (Foto links), Nachbrennen der Probe (Foto rechts)
B 30	–	IV			Flammenhöhe ~60 [cm] (Foto links), Nachbrennen der Probe (Foto rechts)

Tabelle VI. Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) für Chemiestäube

Proben-Nr.	Name	BVZ _{qs}	Bilder	Beobachtungen
C 7	–	IV		
C 8	–	IV		

Anhang III – Gegenüberstellung Brennzahl und Brandverhaltenszahl

Tabelle VII. Gegenüberstellung BZ/BVZ_{qs} Milchstäube

Produkt-Nr.	BZ	BVZ _{qs}
A 3	3	IV
A 5	3	IV
A 7	3	II
A 8	3	II
A 9	3	IV
A 10	3	IV
A 11	3	IV

Tabelle VIII. Gegenüberstellung BZ/BVZ_{qs} Aromastäube

Produkt-Nr.	BZ	BVZ _{qs}
B 6	2	IV
B 11	5	IV
B 14	3	I
B 16	4	IV
B 20	2	IV
B 21	5	III
B 22	2	II

Anhang IV – Bestimmung der dimensionslosen Gruppen

Die Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ aus Gleichung (4.4a, Seite 19), kann wie folgt geschrieben werden:

$$\Delta\theta = k^a \cdot (\Delta x)^b \cdot \rho^c \cdot c_p^d \cdot q^e \quad (\text{A4.1})$$

Werden die Dimensionen Masse M Länge L , Zeit T und Temperatur θ (Tabelle 4, Seite 16) von den einzelnen Variablen in Gleichung (A4.1) eingesetzt, so kann diese Gleichung wie folgt geschrieben werden:

$$\Delta\theta = (L \cdot M \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}) \cdot (L)^b \cdot (M \cdot L^{-3})^c \cdot (L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1})^d \cdot (M \cdot T^{-3})^e \quad (\text{A4.2})$$

Von Gleichung (A4.2) wird nachstehende Beziehung bestimmt:

$$\begin{aligned} a + d &= 0 & (\theta) \\ a + c + e &= 0 & (M) \\ a + b - 3c + 2d &= 0 & (L) \\ 3a + 2d + 3e &= 0 & (T) \end{aligned}$$

Die Lösungen der vier simultanen Gleichungen bezogen auf d ergeben:

$$a = -1 - d \quad (\text{A4.3})$$

$$a + b - 3c + 2d = 0$$

$$b = -2d + 3c - a$$

$$= -2d + 3\left(\frac{2}{3}d\right) + 1 + d$$

$$= -2d + 2d + 1 + d$$

$$b = 1 + d \tag{A4.4}$$

$$a + c + e = 0$$

$$c = -a - e$$

$$= 1 + d - \left(1 + \frac{d}{3}\right)$$

$$c = \frac{2}{3}d \tag{A4.5}$$

$$3a + 2d + 3e = 0$$

$$3a + 2d = -3e$$

$$\frac{3}{3}a + \frac{2}{3}d = -\frac{3}{3}e$$

$$-\frac{3}{3} - \frac{3}{3}d + \frac{2}{3}d = -e$$

$$\frac{3}{3} + \frac{3}{3}d - \frac{2}{3}d = e$$

$$e = 1 + \frac{d}{3} \tag{A4.6}$$

Werden a, b, c und e in die Gleichung (A4.1) eingesetzt, ergibt sich für:

$$\Delta\theta = k^{(-1-d)} \cdot (\Delta x)^{(d+1)} \cdot \rho^{(2/3)d} \cdot c_p^{(d)} \cdot q^{(d/3+1)} \tag{A4.7}$$

Die Gleichung ist identisch mit Gleichung (4.4d).

Zur Vereinfachung wird Gleichung (A4.7) mit $\Delta\theta/\Delta\theta$ multipliziert, was zu folgender Situation führt:

$$\Delta\theta = k^{(-1-d)} \cdot (\Delta x)^{(d+1)} \cdot \rho^{(2/3)d} \cdot c_p^{(d)} \cdot q(d/3+1) \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta} \quad (\text{A4.8})$$

Gleichung (A4.1) kann auch in einer anderen Schreibweise dargestellt werden:

$$\Delta\theta = k^{(-1)} \cdot k^{(-d)} \cdot \Delta x^{(d)} \cdot \Delta x^{(1)} \cdot \rho^{(2/3)d} \cdot c_p^{(d)} \cdot q^{(d/3)} \cdot q^{(1)} \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta} \quad (\text{A4.9})$$

Wird $k^{(-d)}$ durch $k^{(-3/3)d}$ und Δx^d durch $\Delta x^{(3/3)d}$ ersetzt, dann wird aus Gleichung (A4.9):

$$\Delta\theta = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{k^{(3/3)d}} \cdot \Delta x^{(1)} \cdot \rho^{(2/3)d} \cdot c_p^{(d)} \cdot q^{(d/3)} \cdot q^{(1)} \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta}$$

$$\Delta\theta = \left(\frac{q \cdot \Delta x}{k \cdot \Delta\theta} \right) \cdot \left(\frac{\Delta x^3 \cdot \rho^{(2)} \cdot c_p^3 \cdot q}{k^{(3)}} \right)^{d/3} \cdot \Delta\theta \quad \text{Siehe Gleichung (4.5a, Seite 20)} \quad (\text{A4.10})$$

$$\left(\frac{q \cdot \Delta x}{k \cdot \Delta\theta} \right) = \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta} \cdot \left(\frac{k^3}{\Delta x^3 \cdot p^2 \cdot c_p^3 \cdot q} \right)^{d/3} = \left(\frac{k^3}{\Delta x^3 \cdot p^2 \cdot c_p^3 \cdot q} \right)^{d/3}$$

$$\left(\frac{q \cdot \Delta x}{k \cdot \Delta\theta} \right) = \left(\frac{k^3}{\Delta x^3 \cdot p^2 \cdot c_p^3 \cdot q} \right)^{d/3} \quad (\text{A4.11})$$

multipliziert mit $(p^{(3/3)d})/(p^{(3/3)d})$ ergibt folgende Situation:

$$\begin{aligned} \left(\frac{q \cdot \Delta x}{k \cdot \Delta\theta} \right) &= \left(\frac{k^{(3/3)d}}{\Delta x^{3d/3} \cdot p^{2/3d} \cdot c_p^{3d/3} \cdot q^{d/3}} \right) \\ &= \left(\frac{k^d}{\Delta x^d \cdot c_p^d} \right) \cdot \left(\frac{p^{3/3d}}{p^{2/3d} \cdot q^{d/3} \cdot p^{3/3d}} \right) = \left(\frac{k^d}{\Delta x^d \cdot c_p^d} \right) \cdot \left(\frac{1}{p^{2/3d} \cdot q^{d/3}} \right) \end{aligned}$$

multipliziert mit $(p^{(3/3)d})/(p^{(3/3)d})$ ergibt:

$$\left(\frac{k^d}{\Delta x^d \cdot c_p^d}\right) \cdot \left(\frac{p^{3/3d}}{p^{2/3d} \cdot q^{d/3} \cdot p^{3/3d}}\right) = \left(\frac{k^d}{\Delta x^d \cdot c_p^d \cdot q^d}\right) \cdot \left(\frac{p^{3/3d} \cdot p^{-2/3d}}{q^{d/3}}\right)$$

$$c \left(\frac{k}{c_p \cdot p \cdot \Delta x}\right)^d \cdot \left(\frac{p}{q}\right)^{d/3} = \text{konstant, wenn } \beta = \frac{k}{p \cdot c_p}$$

dann ergibt sich folgende dimensionslose Gruppe:

$$\left(\frac{q \cdot \Delta x}{k \cdot \Delta \theta}\right) = \left(\frac{\beta}{\Delta x}\right)^d \cdot \left(\frac{p}{q}\right)^{d/3} = \text{konstant, siehe Gleichung (4.5b)} \quad (\text{A4.12})$$

Anhang V – Transfer Daten von Siphcon/Autodesk in Excel

Im Rahmen einer Studienarbeit wurde deshalb das Programm „New File to convert the Data from Siphcon/Autodesk into some form utilizable with Excel“ erstellt. Mit diesen Daten wurde die Möglichkeit geschaffen die entsprechenden Tabellen und Graphiken in Kapitel 7 zu erstellen.

```
text-2 (1)
#New File to convert the Data from Siphcon/Autodesk into some form utilizable
with Excel
import numpy as np
from matplotlib import pylab as pl
import matplotlib.pyplot as plt

dateiname_in='Lötkolben_vertikal_außerhalb_Abzug_t_relativ_.txt'
dateiname_out = 'Lötkolben_vertikal_außerhalb_Abzug_t_relativ_excel.txt'

#specify the number of rows
zeilen = 1630

#Open the file you want to convert and import it
with open(dateiname_in, 'r+') as f:
    text = f.read()
    f.seek(0)
    f.truncate()
    f.write(text.replace(',','.'))

#Create a data array containing your data in the original format
data1 = np.genfromtxt(dateiname_in)

#Create an empty array in the format that you want
data_array1 = np.zeros((zeilen,4)) #You need to specify the number of rows and
columns
counter = -1

#Conversion happens here
for i in range(zeilen):
    N = i
    for j in range(8):
        counter += 1
        n = counter
        if j == 0:
            data_array1[i,0] = data1[n,1]
        elif j == 1:
            data_array1[i,1] = data1[n,1]
        elif j == 2:
            data_array1[i,2] = data1[n,1]
        elif j == 3:
            data_array1[i,3] = data1[n,1]

#Create a new file to save the converted data to
f = open(dateiname_out,'w')

#Load the data into the new file
for i in range(zeilen):
    str_test =
'{}\t{:.3f}\t{:.3f}\t{:.3f}\t{:.3f}\n'.format(i,data_array1[i,0],data_array1[i,1]
],data_array1[i,2],data_array1[i,3])
    f.write(str_test)
```

Anhang VI – Zusammenfassung der Messdaten in elektronischer Form

Übersicht:

- Thermoelement-Kalibrierung mit Eiswasser
- Vertikaler Versuch mit dem Prototyp
- Vertikaler Versuch mit der Prüfapparatur