

Abschlussbericht

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

März 2021

der beiden Kooperationspartner:

Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Lehrstuhl Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

und

Die Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische
Industrie
Kurfürstenanlage 62
69115 Heidelberg

Projektnummer: H0309 602A
Projektlaufzeit: 2019-07-22 bis 2020-12-31
Berichterstattung: zum 31.03.2021

Autoren: Barth, U.
Hucke, M.

Vorwort

In der chemischen- und pharmazeutischen Industrie treten vielfach Stube auf, die mit dem Gefahrlichkeitsmerkmal „brennbar“ charakterisiert werden. Diese Charakterisierung erfolgt in der Regel nach der VDI-Richtlinie 2263 und bezieht sich auf den sogenannten abgelagerten Staub. In der industriellen Anwendung kommen brennbare Stube allerdings nicht ausschlielich nur als abgelagerter oder als aufgewirbelter Staub (Staub-/Luftgemische) vor, sondern oft auch in einem quasi-stationären Zustand. Ein in der betrieblichen Praxis häufiges Verfahrensbeispiel sind Flie- bzw. Wirbelbette. Schadensereignisse gaben Anlass für die Besorgnis, dass innerhalb solcher Fliebette Phänomene vorkommen, die weder dem klassischen Abbrennen von Stuben noch der Explosion von Staub-/Luftgemischen zugerechnet werden können.

Die Untersuchungen des Antragstellers werden daher an einer neuartigen „Prüfapparatur“ durchgeführt. Mit Hilfe dieser Apparatur soll eine neue Sicherheitskenngroe, die „Brandverhaltenszahl“, bestimmt werden, da sich die klassische Kenngroe der Brennzahl als ungeeignet erwiesen hat, um für die Gefährdungsbeurteilung quasi-stationärer Zustände als Bemessungsgroe beigezogen zu werden. Charakteristisch für das Projekt ist auch, dass die mathematische Beziehung zwischen „labormastablichen Prüfapparatur“ und der in der Praxis betriebenen „industriemastablichen Anlagen“ ermittelt werden soll.

Das Projekt zielt darauf ab, einen wichtigen Beitrag zur weiteren Verbesserung der Sicherheit in der chemischen Industrie zu leisten.

Dieses Forschungsvorhaben wurde teilweise finanziell von der BG RCI gefördert. Die Mitglieder des Forschungsteams unterstützten das Projekt durch die aktive fachliche Mitarbeit. An dieser Stelle möchten wir uns herzlichst für die Unterstützung bei der BG RCI und für die enge Zusammenarbeit mit den Herren Dr.-Ing. Oswald Losert und Dr.-Ing. Joachim Sommer bedanken. Die Mitglieder des Forschungsteams unterstützten das Projekt durch die aktive fachliche Mitarbeit. Herrn Dr.-Ing. Alexey Leksin von der Bergischen Universität Wuppertal auch einen herzlichen Dank für die hilfreichen wissenschaftlichen Beiträge.

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Produkt (Staub) Kontaktfläche	$[m^2]$
B	Breite des Fließbettes	$[m]$
c_p	Spezifische Wärme	$[Kcal / ^\circ C \times kg]$
H	Produkt (Staub) Dicke	$[m]$
ΔH	Thermische Ausdehnung	$[m]$
k	Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitzahl)	$[W / ^\circ C \times m]$
L	Gesamtlänge der Vorrichtung	$[m]$
l_k	Kontaktlänge der Produktschicht (Staub) mit der Wärmemenge	$[m]$
Nu_p	Nusselt Zahl „Prototyp“	$[dimensionslos]$
Nu_m	Nusselt Zahl „Prüfapparatur“	$[dimensionslos]$
Q	Wärmemenge	$[W \times sek.]$
Q'	Wärmestrom	$[W]$
S	Linearer Skalierungsfaktor	$[dimensionslos]$
t	Zeit für einen Kontakt	$[sek.]$
v_s	Strömung der erhitzten Luft	$[m / min]$
x	Lineare Dimension in x Richtung	$[m]$
x_1	Referenzstärke in x -Richtung	$[m]$
x_2	Referenzstärke in x -Richtung	$[m]$
Δx	Abstand zwischen x_1 und x_2	$[m]$
α	Wärmeübergangskoeffizient	$[W / ^\circ C \times m^2]$
Δ	Differenz zwischen den Werten	$[dimensionslos]$
θ	Simultan gemessene Temperatur	$[^\circ C]$
$\Delta \theta$	Temperaturdifferenz in x -Richtung	$[^\circ C]$
$\Delta \theta / \Delta x$	Temperaturgefälle in Richtung Wärmefluss	$[^\circ C / m]$
α	Längenausdehnungskoeffizient	$[1 / ^\circ C]$
$p:m$	Tiefgestellter Index für „Prototyp“ und „Prüfapparatur“	$[-]$

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	i
Symbolverzeichnis	ii
1 Einleitung	1
2 Projektzweck.....	2
3 Vorgehensweise	3
4 Erkenntnisstand	4
4.1 Sicherheitsbetrachtung.....	4
4.2 Brennzahl und Brandverhaltenszahl.....	5
5 Versuche.....	8
6 Erkenntnisse	9
7 Fazit.....	16
8 Ausblick	17
Anhang	
A I Quellenverzeichnis.....	v
A II Bilderverzeichnis.....	vi
A III Tabellenverzeichnis	vii

1 Einleitung

In der chemischen-, pharmazeutischen- und Lebensmittelindustrie werden Sprühtrocknungsanlagen zum Trocknen von Lösungen oder Suspension eingesetzt, bis diese von einem flüssigen in den pulverförmigen Aggregatzustand übergehen.

Dabei erfolgt die Trocknung in mehreren Teilschritten. Über Düsen wird das eingebrachte Produkt zerstäubt. Diese Zerstäubung erfolgt in einem Heißluftstrom, wo der Wasser- oder Lösungsmittelanteil in einer Trocknungskammer, die einen konischen Boden hat, 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, wo eine Wirbelschicht entsteht und das restliche Wasser verdampft. Von dort wird das Produkt über eine Zentralschleuse zur Verpackung geführt. Die Produkte können feuchte Schüttgüter sein wie Granulate, Agglomerate, Kristalle, Staub oder Pulver. Staub ist ein feinzerteilter Feststoff beliebiger Form, Struktur und Dichte unterhalb einer Korngröße von $500 \mu\text{m}$ [1]. Bei der Bearbeitung von staubfähigen und explosionsfähigen Produkten können Situationen auftreten, bei denen nicht nur das Produkt als abgelagerter oder aufgewirbelter Staub auftritt, sondern in einem Zwischenstadium in einem quasi-stationären Zustand. Bild 1 ist ein Beispiel für eine solche verfahrenstechnische Anlage.

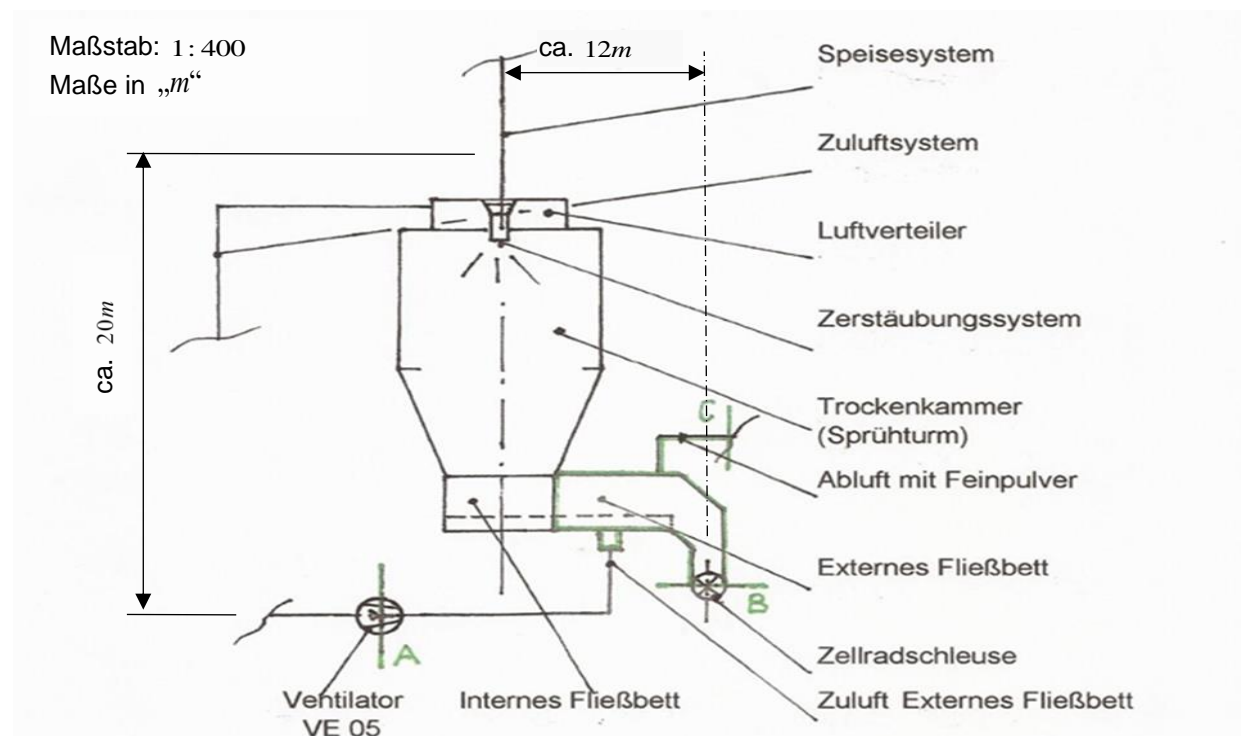


Bild 1. Vereinfachtes Fließbett einer Sprühtrocknungsanlage mit externem Fließbett (Lehrstuhl MSU 2020)

2 Projektzweck

In der Regel sind die realen Betriebsverhältnisse einfach auf den Labormaßstab runter skaliert worden, z.B. 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. Deshalb ist der Fokus dieser Arbeit auf den Gewinn neuer Erkenntnisse, mit der Ermittlung und Anwendung eines nachvollziehbaren Skalierungsfaktors, gerichtet.

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 staubführenden Anlagen wie bei Fließbetten zu optimieren.

3 Vorgehensweise

Hierzu werden im ersten Schritt die Rahmenbedingungen entwickelt, mit der die realen Parameter eines Produktionsprozesses auf den Laborversuch transferiert werden können. Im zweiten Schritt werden die Parameter in die dimensionslose Analyse integriert und der Skalierungsfaktor ermittelt. Mit dem Skalierungsfaktor werden zwei ähnliche Modelle, „Prototyp“ und „Prüfapparatur“, unterschiedlicher Abmessungen bestimmt, mit denen die Laborversuche durchgeführt werden. Die thermischen Versuchsergebnisse für Temperatur, Temperaturgradient und Wärmemenge werden von zwei skalierten Modellen gegenübergestellt und bewertet.

Die Untersuchung umfasst:

- (A) Bestimmung der thermischen Rahmenbedingungen für die dimensionslose Analyse.
- (B) Dimensionslose Analyse und mathematische Ermittlung des Skalierungsfaktors für das Basismodell „Prototyp“ und einer „Prüfapparatur“.
- (C) Bestimmung des Temperaturfeldes zur Überprüfung der angenommenen Rahmenbedingungen für die thermische Ähnlichkeitsbetrachtung.
- (D) Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse von „Prüfapparatur“ und „Prototyp“ sowie Überprüfung des ermittelten Skalierungsfaktors auf Übereinstimmung mit dem theoretischen Skalierungsfaktor.
- (E) Bestimmung der Brennzahl „BZ“ für abgelagerten Staub.
- (F) Bestimmung der Brandverhaltenszahl „BVZ_{qs}“ für den quasi-stationären Zustand für den „Prototyp“ und der „Prüfapparatur“.
- (G) Sicherheitsanalyse (Feldstudie) an einer realen Fließbetтанlage unter Berücksichtigung der ermittelten Brandverhaltenszahl „BVZ_{qs}“ für das Produkt „B16“.

4 Erkenntnisstand

In der chemischen Industrie und in der Verfahrenstechnik ist der Produktionsprozess bei der Behandlung von Stoffen mit einem Wärmeaustausch verknüpft. Bei der Bearbeitung von staubfähigen und explosionsfähigen Produkten können unerwünschte Situationen durch explosionsfähige Staub-/Luftgemische auftreten, die zu einer Brand- sowie Explosionsgefahr führen können. Diese Situation beschreibt Anhang 2 der Gefahrstoffverordnung [2] als nationale Umsetzung zur RL 1999/92/EG [3]. Die beiden Gefahrenarten werden bei der Bestimmung der sicherheitstechnische Kenngröße, der Brennzahl „BZ“, ermittelt.

4.1 Sicherheitsbetrachtung

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, das Halbprodukt und das Endprodukt zu haben. Die Stoffeigenschaften geben bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen eine Auskunft über das Verhalten der Stoffe. Es sind notwendige Informationen über die relevanten physikalisch-chemischen Eigenschaften der vorhandenen brennbaren oder oxidierenden Gefahrstoffe und deren Beurteilung hinsichtlich der Brandgefährdung. Die Stoffeigenschaften werden mit der sicherheitstechnischen Kenngröße angegeben und können aus den Sicherheitsdatenblättern entnommen werden. Die Kenngröße ist eine quantitative Aussage für die Beurteilung von Gefahren und für Maßnahmen zur Verhütung von Unfällen einschließlich deren gefährlichen Auswirkungen. Die Kenngröße gilt für atmosphärische Bedingungen.

Nachfolgend werden einige wichtige sicherheitstechnische Kenngrößen für Stäube aufgeführt:

- Zündtemperatur
- 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.

4.2 Brennzahl und Brandverhaltenszahl

Bei der Bearbeitung von staubförmigen und explosionsförmigen Produkten können unerwünschte Situationen auftreten, die zu einer Brand- sowie Explosionsgefahr führen können. Anhand des Brennverhaltens kann beurteilt werden, ob eine Staubschüttung nach Kontakt mit einer externen Zündquelle reagiert. Zudem wird gemessen, inwieweit sich die lokale Reaktion in der Staubschüttung ausbreitet. Das Brennverhalten wird mit einer Kenngröße beschrieben. Die in der Praxis bewährte und verwendete sicherheitstechnische Kenngröße ist die Brennzahl „BZ“. Diese wird zwischen „BZ 1“ und „BZ 6“ klassifiziert (Tabelle 1) [4].

In der VDI 2263 gibt es für die Brand- oder Explosionssituation verschiedene diskrete Gefahrenansätze, die nachfolgend vorgestellt werden:

- Bei einer abgelagerten Staubschüttung kann sich durch äußere Entzündung ein eingeleiteter Brand ausbreiten [1].
- Staubexplosionen sind dann gegeben, wenn in einem Staub-/Luftgemisch nach der Zündung eine Flammenausbreitung mit einer Drucksteigerung auftritt [1].
- Solche Reaktionen verlaufen deutlich schneller als Brände [1].

Tabelle 1. Beschreibende Definitionen und Klassifizierungen der Brennzahl [4]

Prüfergebnis		Brennzahl
keine Entzündung	keine Ausbreitung des Brandes	1
kurze Entzündung, schnelles Erlöschen		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

Während sich ein nicht tolerierbares Risiko ab einer Brennzahl „BZ 4“ für abgelagerten Staub definieren lässt, ist dieses mit einer Brandverhaltenszahl „BVZ_{qs} II“ für den quasi-stationären Zustand bereits erfüllt (Bild 3).

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 Flammenerscheinung (stehende Fackel)
Abbrennen unter Flammenerscheinung oder Funkensprühen	5		
Verpuffungsartiges Abbrennen oder rasche flammenlose Zersetzung	6	IV	Fortlaufendes Ab-/Brennen über die gesamte Länge oder rasches Ab-/Brennen

Bild 3. Gegenüberstellung Brennzahl „BZ“ und Brandverhaltenszahl „BVZ_{qs}“ [6]

5 Versuche

Die Untersuchung des Temperaturfeldes wurde mit einer punktförmigen nicht bewegenden elektrischen Wärmequelle durchgeführt. Ein Thermoelement wurde eingesetzt, um die Temperatur an der Spitze der Wärmequelle zu messen. Das Thermoelement wurde mit einem „Multi Channel Measuring System“ verbunden. Die Versuche werden an einem Prototyp und an einer Prüfapparatur durchgeführt. Der Prototyp ist ein nach oben offener Metallkasten aus S235JR (St.37) mit den Außenmaßen $320\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 73\text{ mm}$. Der innere Bereich, zur Aufnahme der Proben (Öffnung nach oben), hat eine Fläche von $300\text{ mm} \times 30\text{ mm}$. Ein Drahtgewebe mit $20\mu\text{m}$ Öffnung teilt das Modell in einen oberen und einen unteren Bereich. Der Raum unterhalb des Drahtgewebes kann an eine Druckluftleitung angeschlossen werden [7]. Zur Bestimmung des Temperaturfeldes sind im „Prototyp“ und in der „Prüfapparatur“ vertikal je 4 Mantel-Thermoelemente vorgesehen. Die installierten Thermoelemente sind am Peket CJ 11 angeschlossen. Von dort über das Multi Channel Measuring System an den Computer (Bild 9). Als Programm wird Autolog 3000 verwendet.

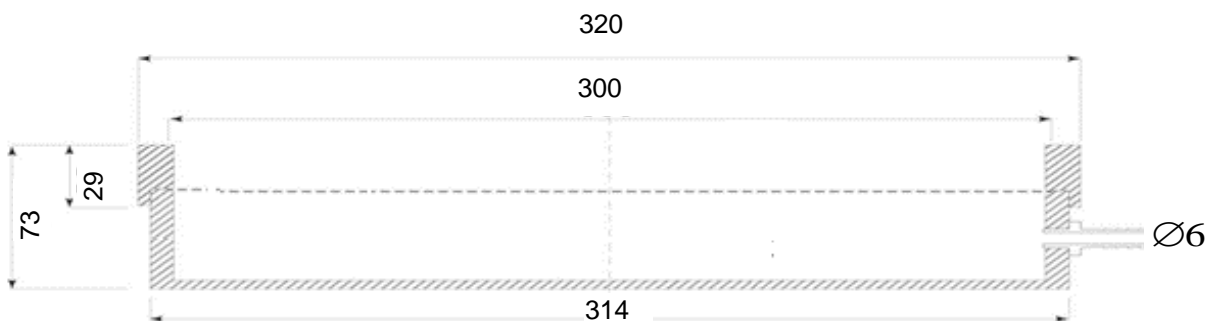


Bild 4. Modifizierte Prüfapparatur [5]



Bild 5. Prototyp (Barth, Laudénbacher, Leksin 2014)

6 Erkenntnisse

Die Voraussetzung für die Ähnlichkeitsbetrachtung ist, dass die physikalischen Eigenschaften für das Modell „Prüfapparatur System“ sowie „Prototyp System“ im gleichen dimensionslosen Verhältnis stehen.

Für die von einer Zündquelle zugeführten Wärmemenge Q über eine Fläche $A = B \times L_k$ mit einer Staubgeschwindigkeit v_s und einer Länge L des Fließbettes (Bild 4) wird die Ähnlichkeit für die thermischen Bedingungen, für „Prüfapparatur“ und „Prototyp“, dann erreicht, wenn beide Systeme den gleichen Temperaturgradienten haben [8]:

$$\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x} \right)_m = \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x} \right)_p \quad (1)$$

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 der zugeführten Wärmemenge 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:

$$\dot{Q} = -kA \frac{d\theta}{dx} \quad (1.1)$$

wobei

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad (1.2)$$

hierin bedeuten:

Q = Wärmemenge ($Ws, kcal$)

\dot{Q} = Wärmestrom ($W, kcal/s$) – Wärmemenge pro Zeiteinheit normal zur Fläche A

k = Wärmeleitfähigkeit des Produktes (W / m^0C)

A = Querschnittsfläche (m^2), senkrecht zur Richtung x des Wärmeflusses

$\frac{d\theta}{dx}$ = Temperaturgradient ($^0C / m$)

t = Zeit (*sek.*)

Von hier erfolgt die Ermittlung der dimensionslosen Nusselt-Zahl, eine Kennzahl aus der Ähnlichkeitstheorie der Wärmeübertragung. Die Nusselt-Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl für die Wärmeübertragung zwischen einer festen Oberfläche und einem strömenden Fluid (sich bewogender Staub). Sie muss für „Prüfapparatur“ und „Prototyp“ identisch sein. Nach der Ähnlichkeitstheorie ist die Wärmeübertragung zweier geometrisch ähnlicher Konstruktionen gleich, wenn ihre Nusselt-Zahl identisch ist:

$$Nu_m = Nu_p \tag{2}$$
$$Nu = \frac{\alpha L}{k}$$

Nu_m ist die Nusselt-Zahl für das Modell „Prüfapparatur“. Nu_p ist die Nusselt-Zahl für die bestehende Vorrichtung „Prototyp“. α ist der Wärmeübergangskoeffizient, der den Wärmeübergang zwischen Zündquelle und Fluid (Produkt) beschreibt. k ist die Wärmeleitfähigkeit des Fluids und L ist die maßgebende Abmessung der Konstruktion für die Strömung. Das kann zum Beispiel die Länge einer überströmten Fläche in Strömungsrichtung sein.

Ausgehend davon, dass die Wärmemenge für „Prototyp“ und „Prüfapparatur“ im gleichen Zeitraum zugeführt wird:

$$t_m = t_p \tag{2.1}$$

tritt die Ähnlichkeit für den Wärmeaustausch dann ein, wenn die Wärmezuführung Q für beide Systeme im gleichen Verhältnis steht wie die Flächen senkrecht zum Wärmeeintrag.

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{A_m}{A_p} \quad (2.2)$$

Somit hängt die Ähnlichkeit für die zugeführte Wärmemenge vom geometrischen Skalierungsfaktor ab. Für folgende Parameter wurde der Skalierungsfaktor bestimmt und auf Übereinstimmung mit den Laborergebnissen überprüft (Tabelle 3).

Tabelle 3. Skalierungsfaktor für die Ähnlichkeitsbetrachtung (Lehrstuhl MSU 2020)

Parameter	Symbol	Skalierungsfaktor	
		ermittelt	überprüft
Lineare Dimension	$\frac{H_m}{H_p}; \frac{L_m}{L_p}; \frac{B_m}{B_p}$	erledigt	überprüft
Thermische Ausdehnung	$\frac{\Delta H_m}{\Delta H_p}; \frac{\Delta L_m}{\Delta L_p}; \frac{\Delta B_m}{\Delta B_p}$	erledigt	entfällt
Temperatur	$\frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_p}$	erledigt	überprüft
Wärmemenge	$\frac{Q_m}{Q_p}$	erledigt	überprüft
Wärmefluss	$\frac{q_m}{q_p}$	erledigt	überprüft
Temperaturanstieg	$\frac{(\Delta \theta / \Delta x)_m}{(\Delta \theta / \Delta x)_p}$	erledigt	überprüft
Fläche	$\frac{A_m}{A_p}$	erledigt	überprüft
Linearer Ausdehnungskoeffizient	$\frac{\alpha_m}{\alpha_p}$	erledigt	überprüft
Wärmeleitfähigkeit	$\frac{k_m}{k_p}$	erledigt	überprüft
Zeit	$\frac{t_m}{t_p}$	erledigt	überprüft
Flammenhöhe	$\frac{H_m}{H_p}$	erledigt	überprüft

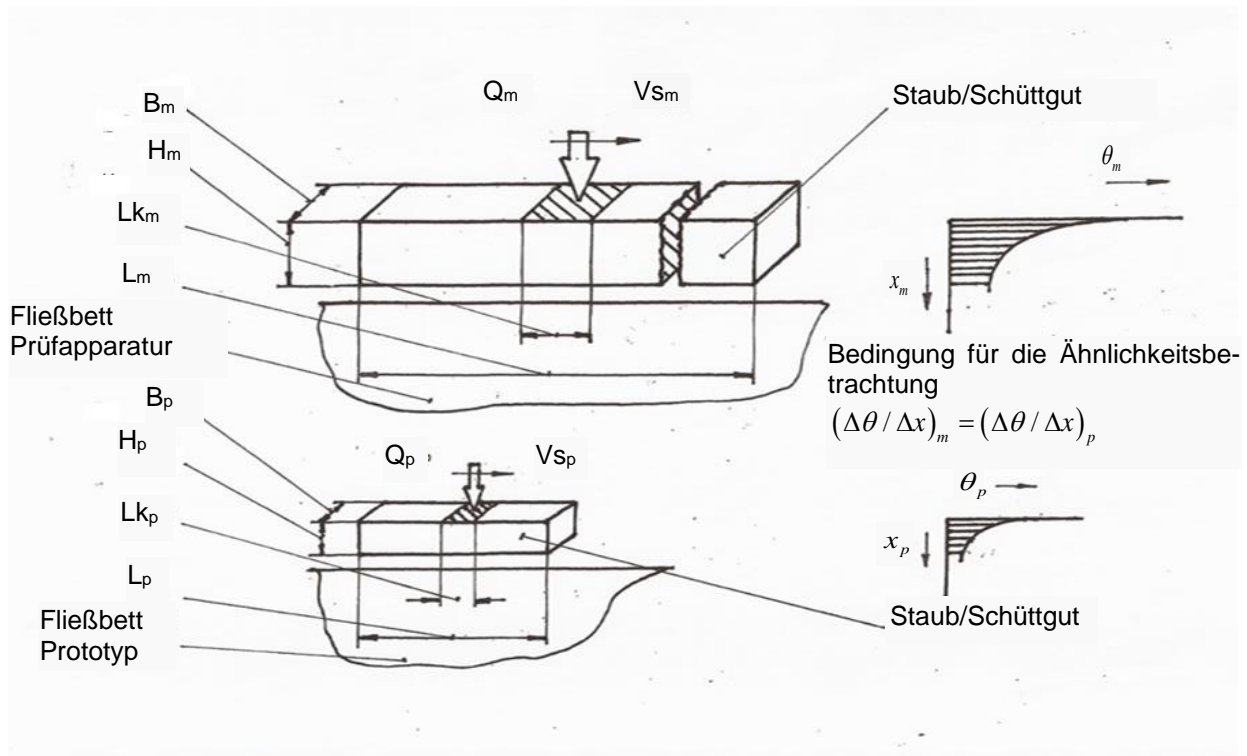


Bild 6. Modell für die thermische Ähnlichkeitsbetrachtung von einem Fließbett (Lehrstuhl MSU 2020)

Die elektrische Wärmequelle wurde außerhalb des Modells erwärmt, bis eine Gleichgewichtsbedingung erreicht wurde (Bild 7, 8). Nach dem Erreichen der Gleichgewichtsbedingung wurde die Wärmequelle oberhalb des Schüttgutes positioniert. Die jeweilige Einwirkdauer der Wärmestrahlung auf die Probe sowie die Temperaturänderung an den einzelnen Messpunkten wurde gemessen und mit Hilfe des Datenloggers dokumentiert. Der Versuchsaufbau ist in Bild 9 präsentiert. Eine Wärmequelle mit höherer Leistung wurde für die Untersuchung mit der „Prüfapparatur“ verwendet. Die Versuchsdurchführung erfolgte wie zu Anfang beschrieben.



Bild 7. Wärmequelle (Lehrstuhl MSU 2020)

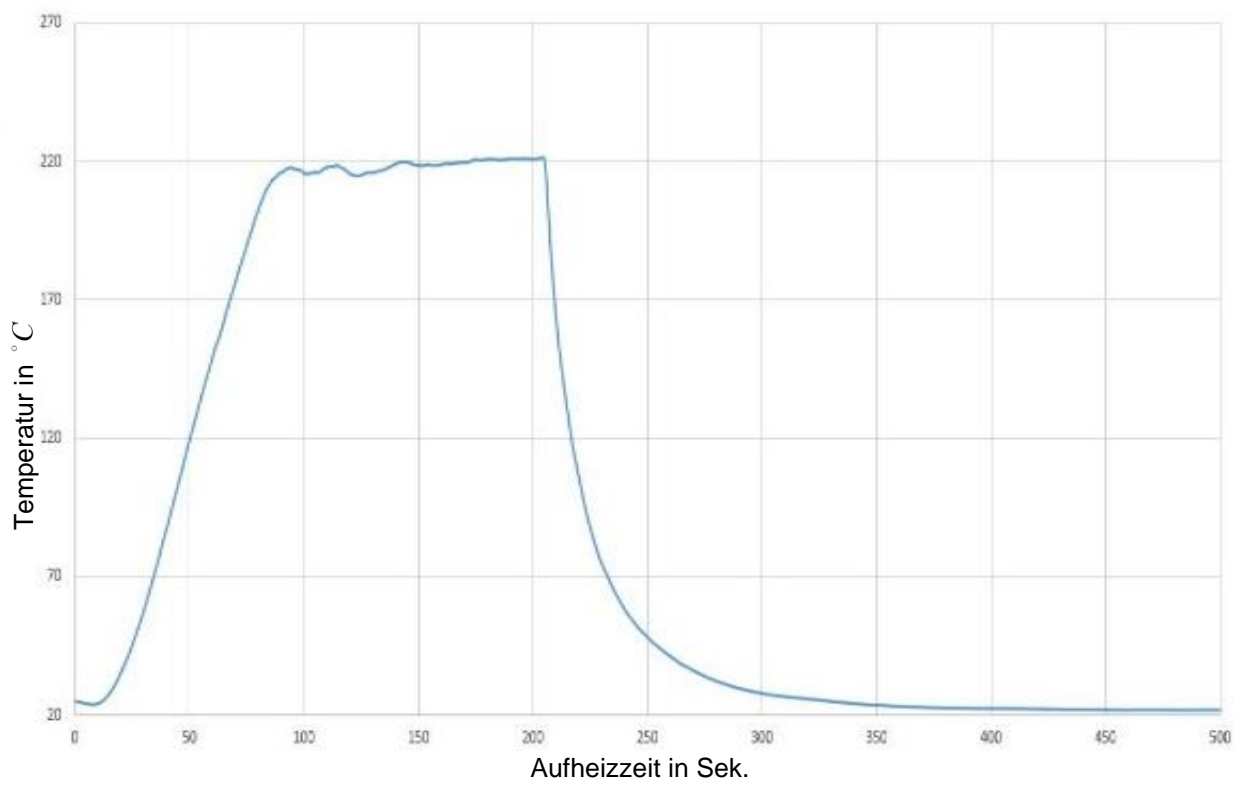


Bild 8. Gleichgewichtsbedingung (Lehrstuhl MSU 2020)

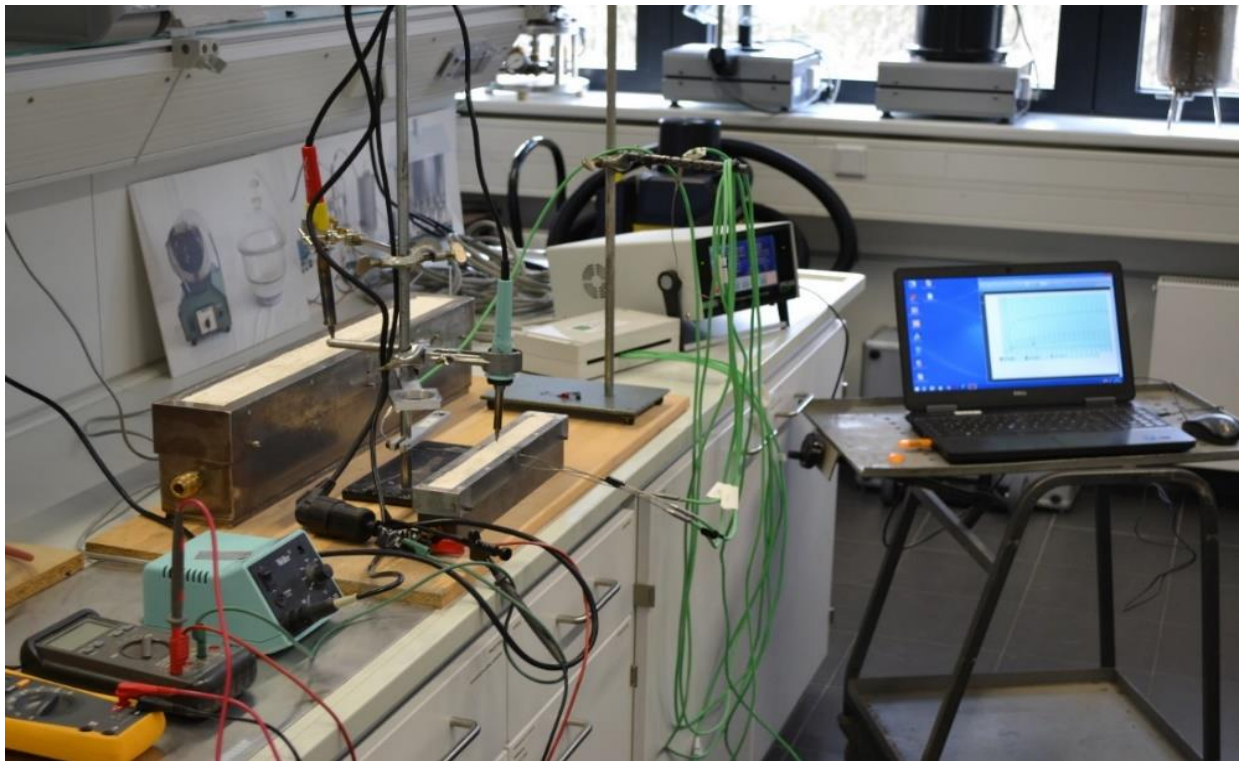


Bild 9. Versuchsaufbau (Lehrstuhl MSU 2020)

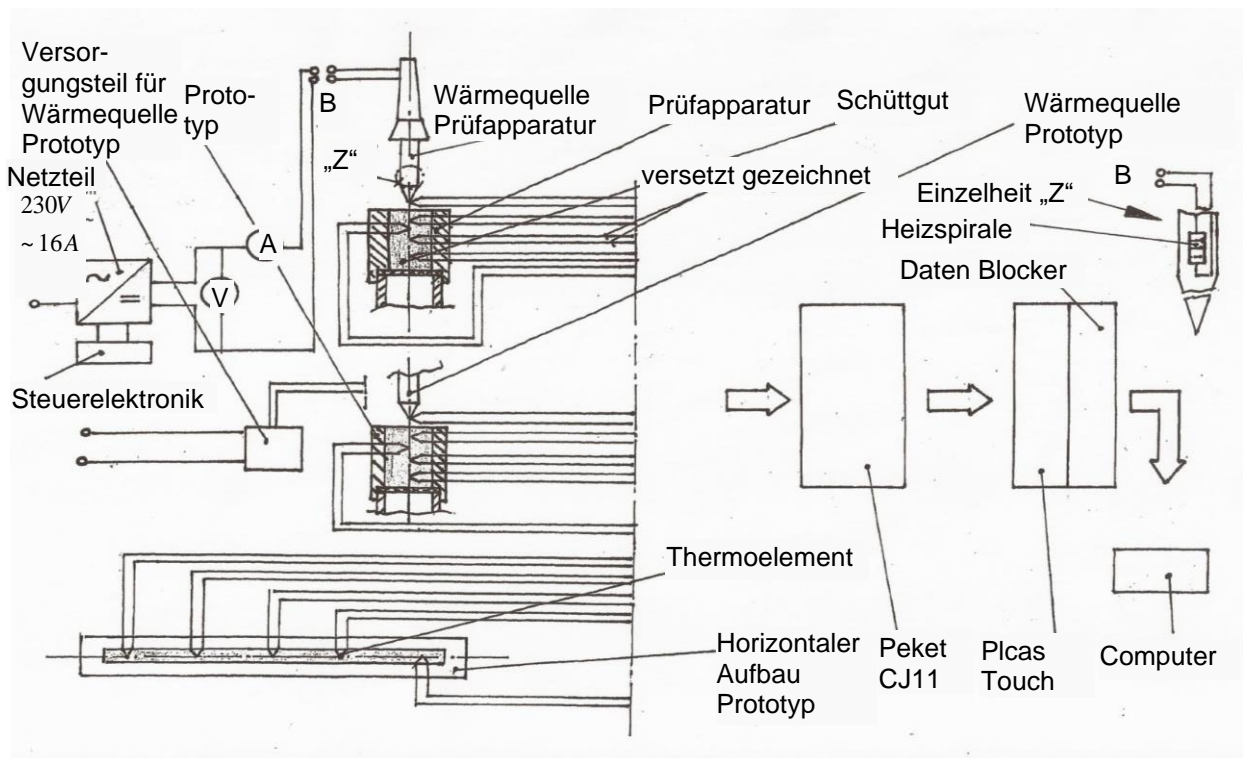



Bild 10. Blockdiagramm mit Installation der Thermoelemente (Lehrstuhl MSU 2020)

Um eine Langzeitaussage zu erhalten, wurden die Versuche mit dem „Prototyp“ und der „Prüfapparatur“ über einen Zeitraum von 10000 Sekunden gefahren. Die Ergebnisse der zwei Versuchsreihen wurden ausgewertet und auf Vergleichbarkeit mit dem in der dimensionslosen Analyse ermittelten Skalierungsfaktor überprüft. Das Ergebnis der Überprüfung ist in Tabelle 3 dargestellt.

Mit dem Prototyp und der Prüfapparatur wurden Versuche gefahren, um die Brandverhaltenszahl „BVZ_{qs}“ für das Produkt B16 zu ermitteln. Der ermittelte Wert „BVZ_{qs} III“ wurde bei der Gefahrenanalyse (Hz ) an einer realen Fließbetтанlage berücksichtigt.

Die ermittelte Flammenhöhe für „Prototyp“ und „Prüfapparatur“ zeigt, dass auch hier der lineare Skalierungsfaktor eingehalten wurde.

7 Fazit

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 weichen Laborergebnisse häufig von Betriebsergebnissen ab, da eine nachvollziehbare Skalierung fehlt, was schon häufig zu qualitäts- und sicherheitstechnischen Problemen geführt hat. Diese Schwachstelle wurde ebenfalls während 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 Fließbetтанlage entwickelt. Als zusammenfassendes Ergebnis kann folgendes festgehalten werden:

1. Der theoretisch ermittelte lineare Skalierungsfaktor wurde für Prototyp und Prüfapparatur durch Versuche bestätigt.
2. Der Temperaturgradient war für beide Systeme identisch.
3. Bei der Ermittlung der Flammenhöhe für Stäube mit gleicher Brandverhaltenszahl „BVZ_{qs}“ wird der lineare Skalierungsfaktor eingehalten.

Mit der Erfahrung bei der Skalierung und Modellierung von Fließbetten sowie bei der Beobachtung bei der Ermittlung der Brennzahl „BZ“ und Brandverhaltenszahl „BVZ_{qs}“ gelang es mit der Forschungsarbeit die Beziehung betrieblicher Anforderung bezüglich realer Prozessabläufe und Laboruntersuchungen zu beantworten. Werden Laboruntersuchungen unter Berücksichtigung des Skalierungsfaktors durchgeführt, können Qualitätsprobleme reduziert und sicherheitstechnische Vorkehrungen getroffen werden, um unerwünschte Ereignisse zu reduzieren.

8 Ausblick

Eine ausführliche wissenschaftliche Publikation ist in Arbeit. In dieser Veröffentlichung wird auf die einzelnen Rahmen- und Randbedingungen für eine dimensionslose Analyse eingegangen. Detailergebnisse der durchgeführten Versuche werden präsentiert und Einzelergebnisse diskutiert. Ebenso wird anhand einer Feldstudie mit Hilfe einer Sicherheitsanalyse auf die auftretenden Probleme beim Fertigungsprozess mit einer Fließbettanlage hingewiesen. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse sind als weitere Arbeitsfelder 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, Zusammensetzung), die in einem verfahrenstechnischen Prozess behandelt werden.
- Vertiefung in der Anwendung der Brandverhaltenszahl „BVZ_{qs}“ bei der Risikobewertung.

Es wird vorgeschlagen das Forschungsprojekt 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, Umweltschutz und Gesundheitsschutz zu optimieren.

Ergänzend darf darauf hingewiesen werden, dass die in der Forschungsarbeit entwickelte Systematik für einen neuen Baustein 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 eine Anpassung an den Ausbildungsinhalt möglich.

Anhang

A I Quellenverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinie VDI 2263, Blatt 1: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren – Beurteilungen – Schutzmaßnahmen; Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben (1990)
- [2] Leitlinien zur Gefahrstoffverordnung. Anhang II (2010)
- [3] 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 (1992)
- [4] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 17077. Bestimmung des Brandverhaltens von Staubschichten. Deutsche Fassung EN 17077 (2018)
- [5] Barth, U. und Leksin, A.: Brennbarer Staub im quasi-stationären Zustand, Auftreten-Ausmaß-Beurteilung, VDI Tagung (2017)
- [6] Leksin, A., Maiwald, K. und Barth, U.: Brandverhalten in Fließbetten mit Auswirkungen auf die Brandschutzmaßnahmen (2016)
- [7] Leksin, A., Maiwald, K. und Barth, U.: Untersuchungen zur Standardisierung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Ab-/Brandverhaltens in quasi-stationären Zuständen (2016)
- [8] L. Kops und L. M. Hucke: Thermal Simulation of the Grinding Process, Proceedings of the North American Metalworking Research Conference, McMaster University, Hamilton, Ont (1973)

A II Bilderverzeichnis

Bild 1. Vereinfachtes Fließbett einer Sprühtrocknungsanlage mit externem Fließbett (Lehrstuhl MSU 2020).....	1
Bild 2. Schematischer Aufbau einer Fließbett-Anlage (Lehrstuhl MSU 2020)	6
Bild 3. Gegenüberstellung Brennzahl „BZ“ und Brandverhaltenszahl „BVZ _{qs} “ [6].....	7
Bild 4. Modifizierte Prüfapparatur [5]	8
Bild 5. Prototyp (Barth, Laudenbacher, Leksin 2014)	8
Bild 6. Modell für die thermische Ähnlichkeitsbetrachtung von einem Fließbett (Lehrstuhl MSU 2020).....	12
Bild 7. Wärmequelle (Lehrstuhl MSU 2020)	13
Bild 8. Gleichgewichtsbedingung (Lehrstuhl MSU 2020).....	13
Bild 9. Versuchsaufbau (Lehrstuhl MSU 2020)	14
Bild 10. Blockdiagramm mit Installation der Thermoelemente (Lehrstuhl MSU 2020)..	14

A III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Beschreibende Definitionen und Klassifizierungen der Brennzahl [4].....	5
Tabelle 2. Definition der Brandverhaltenszahl „BVZ _{qs} “ [6].....	6
Tabelle 3. Skalierungsfaktor für die Ähnlichkeitsbetrachtung (Lehrstuhl MSU 2020) ...	11