

Versuchsauswertung Mechanische Verfahrenstechnik
FLUIDISATION

Gruppe 4

Kai Che (*21113225*)

Florian Enzenberger (*2033971*)

Christoph Knollmann (*2033685*)

Daniel Ludwig (*2033774*)

Sebastian Werner (*2033878*)

Versuchsbetreuer: Dipl.-Ing. M. Meier

Durchgeführt am 10.02.2005

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsbeschreibung	1
1.1	Zielsetzung	1
1.2	Grundlagen	1
1.3	Charakterisierung des Fludisationsverhaltens	2
1.4	Versuchsdurchführung	3
2	Auswertungsverfahren	3
2.1	Lockerungspunkt	3
2.2	Druckverlust	3
2.3	Minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit	4
2.3.1	Berechnung	4
2.3.2	Graphische Ermittlung	5
3	Versuchsergebnisse	5
4	Fehlerquellen	9
5	Diskussion der Messergebnisse	9
6	Anhang A	I
6.1	Röhre A	I
6.2	Röhre B	I
6.3	Röhre C	II
6.4	Röhre D	II
6.5	Röhre E	III
6.6	Röhre F	III
7	Anhang B	IV

1 Versuchsbeschreibung

1.1 Zielsetzung

Im Praktikumsversuch Fluidisation soll die Bestimmung der Lockerungsgeschwindigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit, bei der das Festbett in eine Wirbelschicht übergeht, erfolgen. Anschliessend sollen die im Versuch ermittelten Werte mit den theoretischen Werten verglichen werden. Zudem soll das Fluidisierungsverhalten verschiedener Materialien mit der Klassifikation bzw. Vorhersage von GELDART verglichen werden.

1.2 Grundlagen

Eine Wirbelschicht ist eine Schüttung von Feststoffpartikeln, die durch eine vertikale Strömung durch ein Gas oder eine Flüssigkeit in einen flüssigkeitsähnlichen Zustand versetzt wird. Dieser Zustand ist von der Strömungsgeschwindigkeit \dot{v} abhängig. Ab einer Geschwindigkeit \dot{v}_{mf} tritt dieses flüssigkeitsähnliche Verhalten auf.

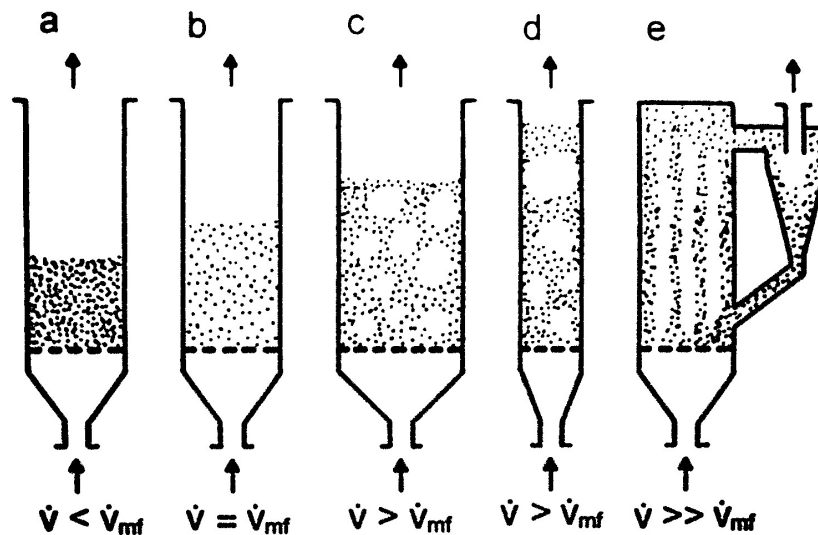


Abbildung 1: Übersicht der verschiedenen Wirbelschichttypen

Wie aus der Abb. 1 ersichtlich können folgende Zustände unterschieden werden:

- **Festbett**
Strömungsgeschwindigkeit ist geringer als die zur Lockerung der Partikel notwendigen Geschwindigkeit: $\dot{v} < \dot{v}_{mf}$
- **Minimale Fluidisation = Lockerungszustand**
Die Strömungsgeschwindigkeit reicht gerade aus, um die Partikel gegen die Schwerkraft anzuheben: $\dot{v} = \dot{v}_{mf}$. Partikelkontakte werden ständig neu gebildet und gelöst.
- **Wirbelschicht**
Die minimale Fluidisationsgeschwindigkeit wurde überschritten. Es kommt zu Blasenbildung. $\dot{v} > \dot{v}_{mf}$. In dieser Kategorie gibt es zwei Untertypen:

– **Stoßende Wirbelschicht**

Wenn der Reaktorquerschnitt viel kleiner als die Füllhöhe des Festbettes ist, so können Blasen entstehen, die den gesamten Querschnitt des Bettes ausfüllen.

– **Blasenbildende Wirbelschicht**

Die Wirbelschicht wird von aufsteigenden Gasblasen durchzogen. Aussehen wie eine leicht siedende Flüssigkeit.

• **Zirkulierende Wirbelschicht**

Ist die Gasströmungsgeschwindigkeit größer als die Sinkgeschwindigkeit eines Einzelkorns, so werden die Partikel von der Gasströmung mitgerissen. Ein Betrieb als Wirbelschicht ist nur mit kontinuierlicher Rückführung des Feststoffes möglich.

1.3 Charakterisierung des Fluidisationsverhaltens

Durch die Auswertung von zahlreichen Messungen erstellte GELDART eine Einteilung von Schüttgütern, die sich in ihrem Fluidisationsverhalten charakteristisch unterscheiden.

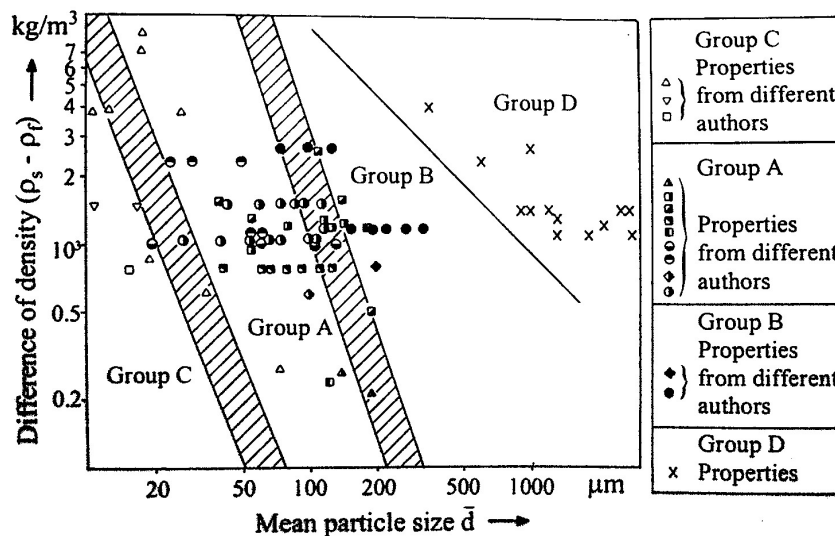


Abbildung 2: Klassifikation von Schüttgütern nach GELDART

Es ergeben sich die folgenden Gruppen:

- A Schüttgüter, deren Partikel von geringer Größe, Dichte und signifikanten **adhäsiven** Kräften geprägt sind. In Folge dessen kommt es zu einer deutlichen Expansion des Schüttgutes, bevor es zur Blasenbildung kommt.
- B Schüttgüter, die von früh einsetzender **Blasenbildung** geprägt sind. Es liegt eine geringe Expansion des Bettes vor und die Wirbelschicht bricht sehr schnell zusammen.
- C Sehr **kohäsive** Schüttgüter, die sich nur extrem schwierig fluidisieren lassen.
- D Schüttgüter mit hoher **Dichte** und/oder hoher Partikelgröße. Es kommt oftmals vor der Ausbildung einer Wirbelschicht zur Bildung von Kanälen durch die das Gas ungehindert "vorbeiströmt".

1.4 Versuchsdurchführung

Die in Abb. 3 angefügte Versuchsanlage ermöglicht die Untersuchung der vorgenannten Parameter an verschiedenen Versuchszylindern, welche von unten (einzeln regelbar) mit Druckluft durchströmt werden. Die Zylinder unterscheiden sich in Durchmesser und Art der Schüttung (Material).

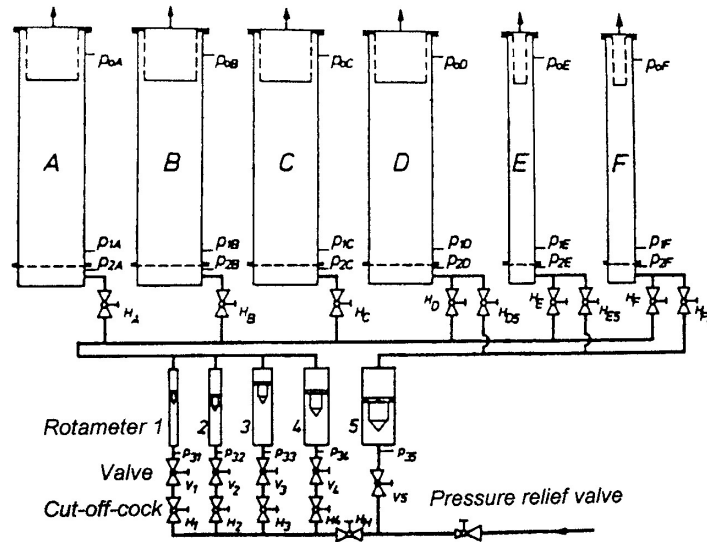


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

Die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit wird über Rotameter festgelegt. Jeder Versuchszylinder hat zudem 3 Messpunkte für den Druck: Unterhalb des Anströmbodens, direkt über dem Anströmboden sowie am Kopf des Zylinders. Die Druckmessung erfolgt über U-Rohr-Manometer. Es werden nun, laut Vorgabe durch den Assistenten, verschiedene Messreihen erstellt, welche stets mit der höchsten Strömungsgeschwindigkeit beginnen und dann Intervallweise vermindert werden. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit geschieht über die "Schwebhöhe" des Rotameter-Messkörpers und anschließende Umrechnung über Kalibriergeraden. Zu jeder Strömungsgeschwindigkeit werden Druck und Höhe der Wirbelschicht notiert.

2 Auswertungsverfahren

2.1 Lockerungspunkt

Mit Lockerungspunkt wird der Übergang zwischen Festbett und Wirbelschicht bezeichnet.

$$\Delta p_{ws} = \Delta p_{fb} \quad (1)$$

2.2 Druckverlust

Der Druckverlust in der Wirbelschicht ergibt sich aus dem Gleichgewicht des hydrostatischen Anteil und dem Gewicht der Schüttung. Den allein durch den Feststoff bewirkten Druckanteil erhält man durch eine geeignete Messanordnung. Der Druckverlust ist dann berechenbar durch:

$$\Delta p_{ws} = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \Delta \rho \cdot g \cdot h \cdot A}{A} \quad (2)$$

Für den Druckverlust im Festbett ergibt sich nach der ERGUN Gleichung:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = 4,17 \cdot S_v^2 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \eta \cdot u + 0,292 \cdot S_v \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \rho_f \cdot u^2 \quad (3)$$

Diese berücksichtigt neben dem Widerstandsanteil aus laminarer Strömung auch den Teil, welcher durch turbulente Strömung verursacht wird. Mit der mittleren Korngröße

$$d = \frac{6}{\phi_s} \cdot \frac{1}{S_v} \quad (4)$$

ergibt sich zusammen mit Gleichung 1 für das Gleichgewicht am Lockerungszustand:

$$(1 - \varepsilon_l) \cdot \Delta \rho \cdot g = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_l)^2}{\varepsilon_l^3 \cdot d_p^2 \cdot \phi_s^2} \cdot \eta \cdot u + 1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon_l}{\varepsilon_l^3 \cdot d_p \cdot \phi_s} \cdot \rho_f \cdot u^2 \quad (5)$$

Setzt man nun die REYNOLDS-Zahl

$$Re_{mf} = \frac{u_{mf} \cdot d}{\nu} \quad (6)$$

und die ARCHIMEDES-Zahl

$$Ar = \frac{d^3 \cdot g}{\nu^2} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho_f} = \frac{d^3 \cdot g}{\left(\frac{\eta}{\rho_{air}}\right)^2} \cdot \frac{\Delta p}{\rho_f} \quad (7)$$

ein, so lässt sich Gleichung 5 dimensionslos darstellen:

$$\underbrace{\frac{d_p^3 \cdot \Delta \rho \cdot g}{\nu^2 \cdot \rho_f}}_{Ar} = 150 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon_l^3 \cdot \phi_s^2} \cdot \underbrace{\frac{u_l \cdot d_p}{\nu}}_{Re} + 1,75 \cdot \frac{1}{\varepsilon_l^3 \cdot \phi_s} \cdot \underbrace{\left(\frac{u_l \cdot d_p}{\nu}\right)^2}_{Re^2} \quad (8)$$

Mit der quadratischen Lösungsformel ergibt sich für Re_{mf}

$$Re_{mf} = \frac{42,9 \cdot (1 - \varepsilon_l)}{\phi_s} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{4 \cdot 1,75}{150^2} \cdot \frac{\varepsilon_l^3 \cdot \phi_s^3}{(1 - \varepsilon_l)^2} \cdot Ar} - 1 \right] \quad (9)$$

2.3 Minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit

2.3.1 Berechnung

Zur Berechnung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit wird Gleichung 6 nach u_{mf} aufgelöst:

$$u_{mf} = \frac{Re_{mf} \cdot \nu}{d_p} \quad (10)$$

In diese Gleichung wird nun Gleichung 9 eingesetzt, um die REYNOLDS-zahl zu ermitteln. Die Berechnung von Re_{mf} benötigte Spärizität ϕ_s kann aus der Tabelle auf Seite B16 in der Versuchsanleitung ermittelt werden. Die Porosität der Schüttung wird über die Beziehung

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\rho_{bett}}{\rho_{part}} = 1 - \frac{4 \cdot m_{smbc}}{D^2 \cdot \pi \cdot h_{mf} \cdot \rho_p} \quad (11)$$

berechnet. Der Index *smbc* steht hierbei für *solid material bed content*. Als h_{mf} wird der erste Höhenmesswert nach der Fluidisierung verwendet. Die ARCHIMEDES-Zahl kann über Gleichung 7 berechnet werden

2.3.2 Graphische Ermittlung

Die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit kann auch graphisch bestimmt werden. Eine idealisierte Darstellung des Verfahrens ist in Abbildung 4 angefügt.

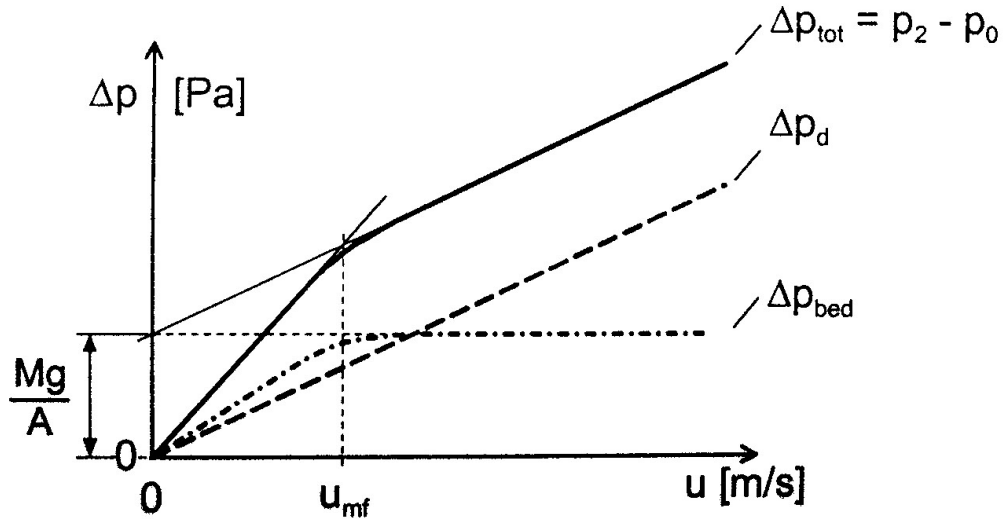


Abbildung 4: Graphische Ermittlung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit

Im Versuch wird der totale Druckabfall Δp_{total} aufgenommen. Somit kann analog der obigen Kurve u_{mf} ermittelt werden, indem man den x-Wert des Schnittpunkt der beiden Trendlinien bestimmt. Dieser x-Wert entspricht dann u_{mf} .

Alternativ misst man zusätzlich $\Delta p_{total} \cdot \Delta p_d$ (so geschehen in Versuch E und F) und berechnet Δp_{bed} mit der Gleichung:

$$\Delta p_{bed} = \Delta p_{total} - \Delta p_d \quad (12)$$

Der Kurvenverlauf für Δp_{bed} ist ähnlich dem von Δp_{tot} , weshalb u_{mf} auf die gleiche Art und Weise bestimmt werden kann.

3 Versuchsergebnisse

Mit dem vorgenannten Verfahren wurde nun u_{mf} graphisch bzw. durch berechnung bestimmt. Die rechnerischen Werte befinden sich in Anhang A.

Graphisch ergeben sich die folgenden Diagramme. Hierbei wurde wie folgt vorgegangen (Bett A bis D): Die Werte von u werden gegen Δp aufgetragen. Nun wird eine Trendgerade eingezeichnet (Δp_{tot}), zu welcher eine parallel verschobene Gerade durch den Ursprung angelegt wird. Diese Gerade (Δp_d) wird nun von der Wertegerade (Δp_{tot}) abgezogen. Es ergibt sich der Druckverlust im Festbett (Δp_{bed}). Für Bett E und F wurde dann einfach die Strömungsgeschwindigkeit gegen den Druckverlust aufgetragen. Somit ergibt sich:

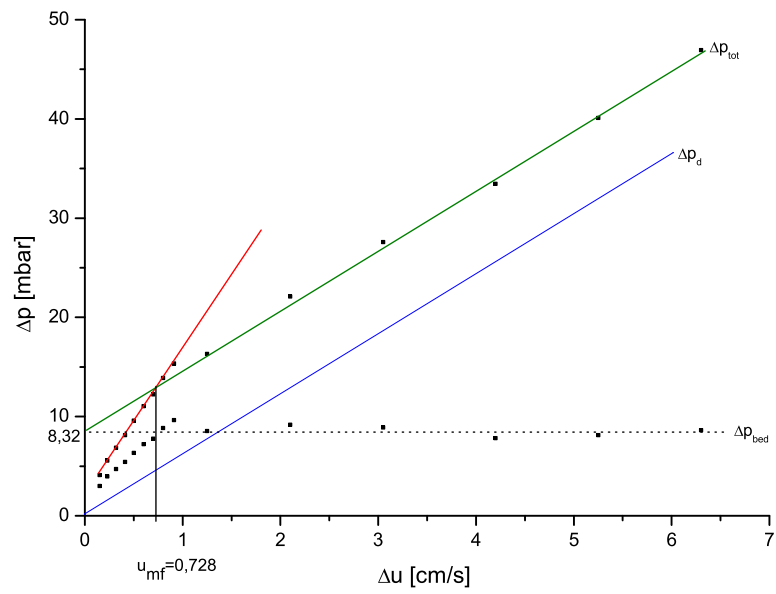


Abbildung 5: Druckverlust in Bett A

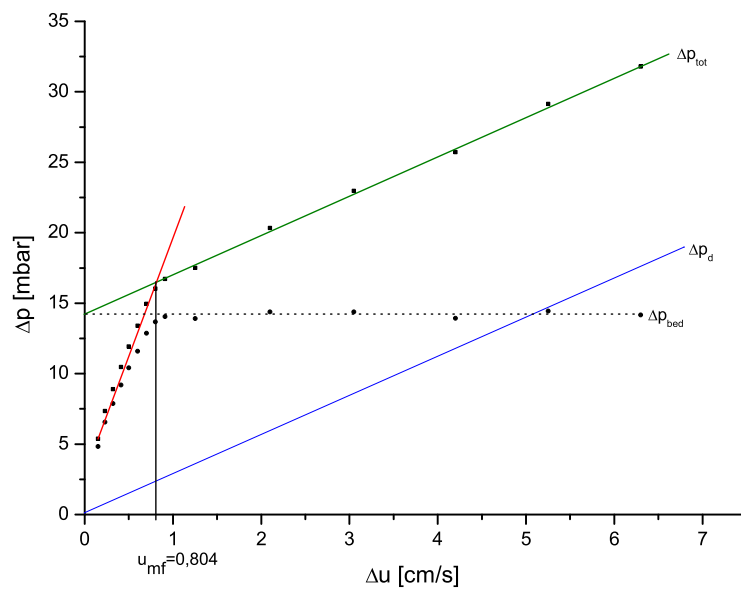


Abbildung 6: Druckverlust in Bett B

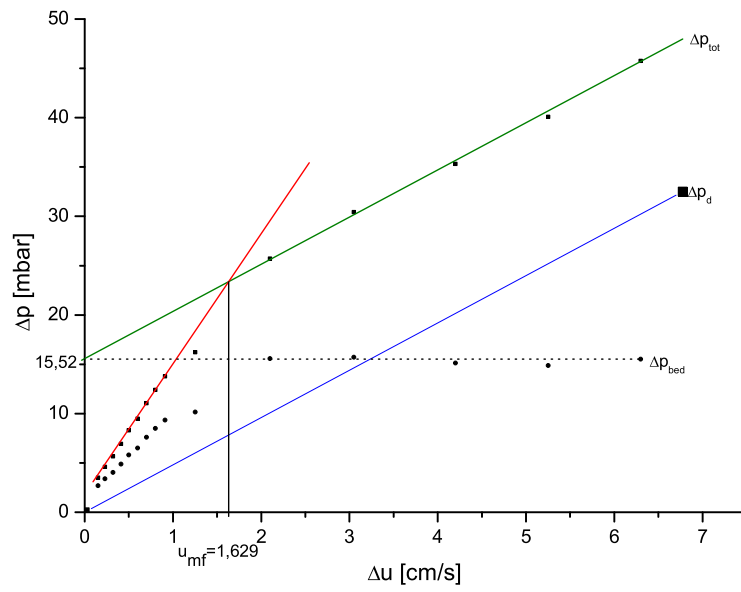


Abbildung 7: Druckverlust in Bett C

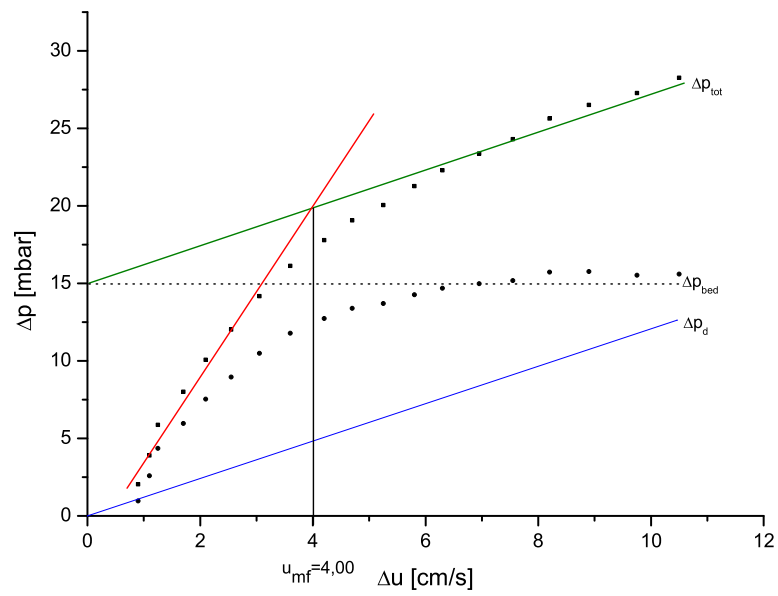


Abbildung 8: Druckverlust in Bett D

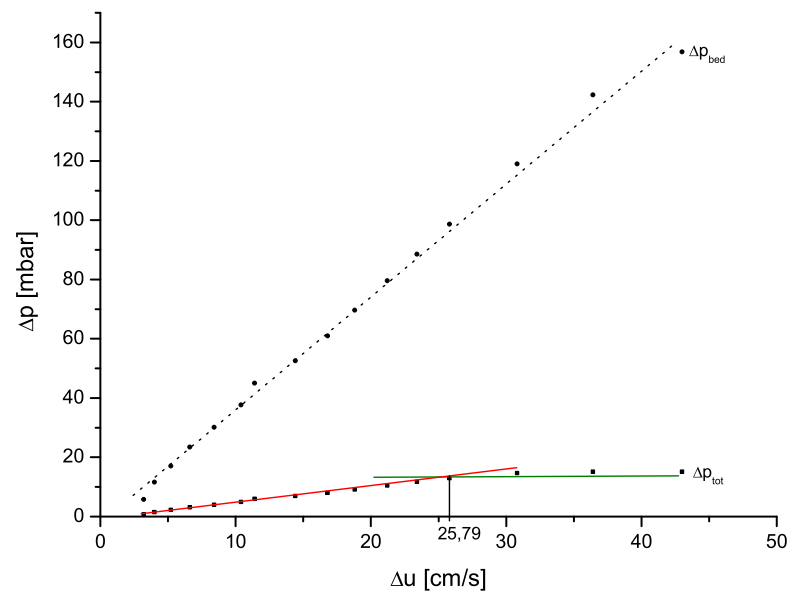


Abbildung 9: Druckverlust in Bett E

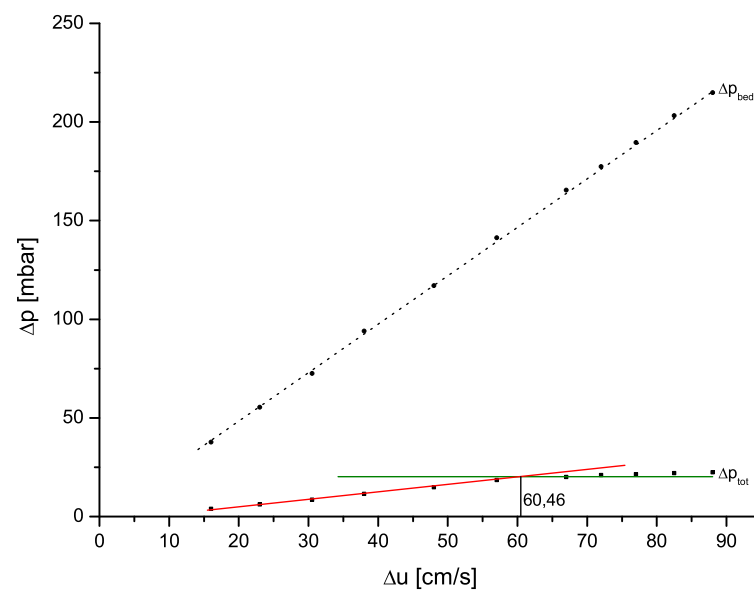


Abbildung 10: Druckverlust in Bett F

Die angefügte Tabelle 1 zeigt diese beiden Werte im Vergleich.
Die Werte aus den Diagrammen sind allerdings von cm/s auf m/s umgerechnet.

Zylinder	A	B	C	D	E	F
$U_{\text{graphisch}}$ [m/s]	0,00728	0,00804	0,01629	0,04	0,2579	0,6046
U_{rechnung} [m/s]	0,0072	0,0067	0,0150	0,0306	0,2167	0,6207

Tabelle 1: Ergebnisse der Bestimmung von u_{mf} durch graphische bzw. rechnerische Ermittlung

4 Fehlerquellen

Wie in Tabelle 1 zu erkennen ist, weisen die u_{mf} durch graphische und rechnerische Ermittlung deutliche Differenzen auf. Gründe hierfür sind:

- Zuluft (Druckluft) hat Druckschwankungen \rightarrow Rotameter schwanken \rightarrow Ungenaue Bestimmung von u_{Luft}
- Ablesefehler aus Kalibriergraphen
- Genaue Bestimmung der Wirbelschichthöhe auf Grund starker Schwankungen sehr schwierig und ungenau
- Ableseungenauigkeiten am U-Rohr verursacht durch o.g. Druckschwankungen und Parallaxenfehler

5 Diskussion der Messergebnisse

Analog Abbildung 2 auf Seite 2 kann unter Verwendung der Tabelle auf B16 in der Versuchsanleitung eine Klassifizierung der Wirbelschichten nach GELDART geschehen.

- A** Nach GELDART: Gruppe A
Im Versuch verhielt sich die Wirbelschicht wie erwartet: Vor dem Auftreten erster Blasen war ein deutlicher Anstieg des Volumens zu erkennen.
- B** Nach GELDART: Gruppe A
Auch hier war im Versuch das erwartete Verhalten anzutreffen.
- C** Nach GELDART: Übergangsbereich Gruppe A/B
Im Versuch war kein Verhalten anzutreffen, welches eine eindeutige Zuordnung zu A oder B ermöglicht hätte. Deswegen scheint der Übergangsbereich gerechtfertigt.
- D** Nach GELDART: Gruppe B
Frühe Blasenentwicklung und geringe Bettausdehnung lassen auf Gruppe B schließen.
- E** Nach GELDART: Gruppe B
Auch hier ist eine eindeutige Klassifikation in Gruppe B möglich, da auch hier frühe Blasenbildung beobachtet werden konnte.
- F** Nach GELDART: Gruppe D
Hier konnte ein träges Wirbelschichtverhalten beobachtet werden, obwohl sehr hohe Gasgeschwindigkeiten eingestellt wurden.

6 Anhang A

6.1 Röhre A

D [cm]	10
Feststoff	Quarzsand
d _p [mm]	0,086
ρ _s [g/cm ³]	2,63
Einwaage [g]	933
Spherizität	0,57

h _{mf} [cm]	9,6
Ar - Zahl	60,082
ε	0,529
Re-Zahl	0,0410
U _{mf} [m/s]	0,0072

	Schwebkörper	U	p2 - p0	Betthöhe	p2 - p0
	mm	cm/s	cmWS	cm	N/m ²
Rotameter 4	140,0	6,30	48,0	10,5	46,95
	120,0	5,25	41,0	10,4	40,10
	100,0	4,20	34,2	10,3	33,45
	80,0	3,05	28,2	10,2	27,58
	60,0	2,10	22,6	10,0	22,10
	40,0	1,25	16,7	9,6	16,33
Rotameter 3	200,0	0,91	15,7	10,3	15,36
	180,0	0,80	14,2	10,2	13,89
	160,0	0,70	12,5	10,2	12,23
	140,0	0,60	11,3	10,0	11,05
	120,0	0,50	9,8	9,6	9,58
	100,0	0,41	8,3	9,0	8,12
	80,0	0,32	7,0	9,0	6,85
	60,0	0,23	5,7	9,0	5,57
40,0	0,15	4,2	9,0	4,11	

6.2 Röhre B

D	10
Feststoff	Katalysator
d _p [mm]	0,075
ρ _s [g/cm ³]	3,04
Einwaage [g]	1183
Spherizität	0,41

h _{mf} [cm]	13,2
Ar - Zahl	46,066
ε	0,623
Re-Zahl	0,0331
U _{mf} [m/s]	0,0067

	Schwebkörper	U	p2 - p0	Betthöhe	p2 - p0
	mm	cm/s	cmWS	cm	N/m ²
Rotameter 4	140,0	6,30	32,5	15,0	31,79
	120,0	5,25	29,8	14,5	29,15
	100,0	4,20	26,3	14,0	25,72
	80,0	3,05	23,5	13,5	22,98
	60,0	2,10	20,8	14,0	20,34
	40,0	1,25	17,9	14,0	17,51
Rotameter 3	200,0	0,91	17,1	13,70	16,72
	180,0	0,80	16,4	13,30	16,04
	160,0	0,70	15,3	13,15	14,96
	140,0	0,60	13,7	13,00	13,40
	120,0	0,50	12,2	12,90	11,93
	100,0	0,41	10,7	12,80	10,47
	80,0	0,32	9,1	12,70	8,90
	60,0	0,23	7,5	12,65	7,34
40,0	0,15	5,5	12,60	5,38	

6.3 Röhre C

D [cm]	10
Feststoff	Glaskugeln
d_p [mm]	0,1109
ρ_s [g/cm ³]	2,864
Einwaage [g]	1311
Spherizität	1

h_{mf} [cm]	9,9
Ar - Zahl	140,307
ε	0,411
Re-Zahl	0,1101
U_{mf} [m/s]	0,0150

	Schwabkörper	U	p2 - p0	Betthöhe	p2 - p0
	mm	cm/s	cmWS	cm	N/m2
Rotameter 4	140,0	6,30	46,8	10,5	45,77
	120,0	5,25	41,0	10,6	40,10
	100,0	4,20	36,1	10,5	35,31
	80,0	3,05	31,1	10,4	30,42
	60,0	2,10	26,3	10,1	25,72
	40,0	1,25	16,6	10,0	16,24
Rotameter 3	200,0	0,91	14,1	9,90	13,79
	180,0	0,80	12,7	9,90	12,42
	160,0	0,70	11,3	9,80	11,05
	140,0	0,60	9,7	9,80	9,49
	120,0	0,50	8,5	9,80	8,31
	100,0	0,41	7,1	9,80	6,94
	80,0	0,32	5,8	9,80	5,67
	60,0	0,23	4,7	9,80	4,60
40,0	0,15	3,6	9,80	3,52	

6.4 Röhre D

D [cm]	10
Feststoff	Glaskugeln
d_p [mm]	0,203
ρ_s [g/cm ³]	2,864
Einwaage [g]	994
Spherizität	1

h_{mf} [cm]	6,9
Ar - Zahl	860,542
ε	0,359
Re-Zahl	0,4124
U_{mf} [m/s]	0,0306

	Schwabkörper	U	p2 - p0	Betthöhe	p2 - p0
	mm	cm/s	cmWS	cm	N/m2
Rotameter 4	200	10,50	28,90	7,40	28,27
	190	9,75	27,90	7,30	27,29
	180	8,90	27,10	7,20	26,51
	170	8,20	26,20	7,10	25,63
	160	7,55	24,85	7,00	24,30
	150	6,95	23,90	7,00	23,38
	140	6,30	22,80	7,00	22,30
	130	5,80	21,75	6,95	21,27
	120	5,25	20,50	6,90	20,05
	110	4,70	19,50	6,85	19,07
	100	4,20	18,20	6,70	17,80
	90	3,60	16,50	6,60	16,14
	80	3,05	14,50	6,55	14,18
	70	2,55	12,30	6,50	12,03
	60	2,10	10,30	6,50	10,07
	50	1,70	8,20	6,50	8,02
	40	1,25	6,00	6,50	5,87
	30	1,10	4,00	6,50	3,91
20	0,90	2,10	6,50	C	

6.5 Röhre E

D [cm]	5
Feststoff	Quarzsand
d _p [mm]	0,468
ρ _s [g/cm ³]	2,63
Einwaage [g]	328
Spherizität	0,74

h _{mf} [cm]	12,2
Ar - Zahl	9682,516
ε	0,479
Re-Zahl	6,7222
U _{mf} [m/s]	0,2167

	Schwebkörper	U	p1 - p0	p2 - p0	Betthöhe	p1 - p0	p2 - p0
	mm	cm/s	cmWS	cmTBE	cm	N/m2	N/m2
Rotameter 4	200	43,00	15,5	54,00	14,00	15,16	156,80
	180	36,40	15,5	49,00	13,00	15,16	142,28
	160	30,80	15,0	41,00	12,50	14,67	119,05
	140	25,80	13,3	34,00	12,20	13,01	98,73
	130	23,40	12,0	30,50	12,20	11,74	88,56
	120	21,20	10,7	27,40	12,15	10,47	79,56
	110	18,80	9,4	24,00	12,15	9,19	69,69
	100	16,80	8,2	21,00	12,10	8,02	60,98
	90	14,40	7,1	18,10	12,10	6,94	52,56
	80	11,40	6,1	15,50	12,10	5,97	45,01
	70	10,40	5,1	13,00	12,10	4,99	37,75
	60	8,40	4,1	10,40	12,10	4,01	30,20
	50	6,60	3,2	8,10	12,10	3,13	23,52
	40	5,20	2,3	5,90	12,10	2,25	17,13
30	4,00	1,6	4,00	12,10	1,56	11,62	
20	3,20	0,8	2,00	12,10	0,78	5,81	

6.6 Röhre F

D [cm]	5
Feststoff	Quarzsand
d _p [mm]	1,099
ρ _s [g/cm ³]	2,63
Einwaage [g]	442
Spherizität	0,72

h _{mf} [cm]	15,8
Ar - Zahl	125384,464
ε	0,458
Re-Zahl	45,2226
U _{mf} [m/s]	0,6207

	Schwebkörper	U	p1 - p0	p2 - p0	Betthöhe	p1 - p0	p2 - p0
	mm	cm/s	cmWS	cmTBE	cm	N/m2	N/m2
Rotameter 5	100	88,00	23,0	74,0	38,00	22,50	214,88
	95	82,50	22,5	70,0	37,00	22,01	203,26
	90	77,00	22,0	65,3	28,00	21,52	189,62
	85	72,00	21,5	61,1	24,00	21,03	177,42
	80	67,00	20,5	57,0	17,50	20,05	165,51
	70	57,00	19,0	48,7	15,80	18,58	141,41
	60	48,00	15,2	40,3	15,70	14,87	117,02
	50	38,00	11,8	32,4	15,60	11,54	94,08
	40	30,50	8,8	25,0	15,50	8,61	72,59
	30	23,00	6,3	19,1	15,50	6,16	55,46
	20	16,00	4	13,0	15,50	3,91	37,75

7 Anhang B