

Protokoll zur Laborübung Verfahrenstechnik

Übung: Zentrifugieren

Betreuer: DI Peter Wlaschitz

Durchgeführt von:

Marion Pucher	Mtk.Nr.:0125440	Kennzahl: S26
Matthias Steiger	Mtk.Nr.:0125435	Kennzahl: S29

Datum der Übung: 9.6.2004



Abbildung der Versuchsapparatur

Inhaltsverzeichnis

1	<u>ZIEL DER ÜBUNG</u>	3
2	<u>ÜBUNGSPRINZIP</u>	3
3	<u>VERSUCHSDURCHFÜHRUNG</u>	4
4	<u>AUSWERTUNG</u>	5
4.1	ERLÄUTERUNG DER BERECHNUNGEN	5
4.2	VERWENDETE SYMBOLE UND FORMELZEICHEN:	7
4.3	MESSERGESULTNISSE UND AUSWERTUNG	8
4.3.1	BESTIMMUNG DER KONSTANTEN A_w UND B BEI 1900 U/MIN.	8
4.3.2	RECHNERISCHE ERMITTLUNG DES ZENTRIFUGIERVERLAUFS MIT HILFE DER BERECHNETEN WERTE VON ALPHA UND BETA	9
4.4	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	11
5	<u>DISKUSSION UND FEHLERBETRACHTUNG</u>	11
6	<u>ANHANG</u>	13

1 Ziel der Übung

Bei dieser Übung sollten mit Hilfe einer diskontinuierlich arbeitenden Laborzentrifuge durch Auftrennung von wässrigen Kieselgursuspensionen bei konstant gehaltener Drehzahl der Filtrationswiderstand und der Filtermittelwiderstand des eingesetzten Septums aufgrund des zeitlichen Verlaufs der Klarflüssigkeitsmenge bestimmt werden.

Im zweiten Teil der Übung wurde mit den Daten des 1. Teils der zeitliche Verlauf der anfallenden Klarflüssigkeitsmengen bei geänderten Drehzahlen rechnerisch bestimmt und die so erhaltenen Daten wurden mit den praktischen Versuchsergebnissen verglichen.

2 Übungsprinzip

Der Filtrationswiderstand α_w und der Filtermittelwiderstand β aus drei Messungen, die jeweils bei 1900 U min^{-1} durchgeführt wurden, wurden bestimmt.

Die Masse des Filtrats wurde in 2 Sekundenabständen von einer Waage gemessen und mit Hilfe des Computers aufgezeichnet. Diese Werte wurden bei der Auswertung mit Hilfe der Dichte in Volumina umgerechnet.

Aus diesen Daten ließen sich die Gesamtkuchenmasse sowie der Innen- und Außenradius des Suspensionsringes in der Zentrifuge berechnen.

Daraus konnte der Überdruck Δp ermittelt werden, der durch den Suspensionsring und das Wasser aufgebaut wurde.

In diesem Modell entsprach der Überdruck dem Gesamtdruckverlust und hing nur vom Filtrationswiderstand und Filtermittelwiderstand ab.

Um die Berechnung des Zentrifugiervorganges zu vereinfachen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Strömung im Kuchen und im Filtermittel sei laminar ($Re \leq 10$).
- Die Porosität des Kuchens sei über die ganze Dicke unveränderlich.
- Die Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Suspensionsringes sei über die ganze Dicke konstant.
- Der Einfluss der radialen Geschwindigkeitsänderung der kontinuierlichen Phase auf die wirksame Druckdifferenz kann als bedeutungslos angesehen werden.

Im 2. Teil der Übung wurde mit den α_w und β Werten, die im 1. Teil ermittelt wurden (diese wurden als drehzahlunabhängig angenommen), der zeitliche Verlauf der anfallenden Klarflüssigkeitsmenge bei zwei weiteren Versuchen mit unterschiedlichen Drehzahlen (1700 U min^{-1} und 2200 U min^{-1}) berechnet und mit den Werten aus dem praktischen Versuch verglichen. Als Vergleichsparameter wurde die Gesamtzentrifugierzeit herangezogen.

3 Versuchsdurchführung

Zu Beginn wurde die Zentrifuge auf ihre Funktionsfähigkeit geprüft, die Waage und der Computer in Betrieb genommen.

Da bei Beladung der Zentrifuge die Drehzahl deutlich abnahm, wurde vor Beginn der Versuche mit 2 L reinem Wasser der Abfall der Drehzahl während der Zugabe der Flüssigkeit bestimmt. Um diesen Wert wurde bei den Versuchen die Drehzahl vor der Zugabe der Suspension erhöht.

Aufgrund der Vorversuche konnten die drei Drehzahlen relativ gut eingestellt werden und somit betrug die Schwankungsbereite zur gewünschten Drehzahl nur $\pm 10 \text{ U min}^{-1}$.

Anschließend wurden die ersten drei Versuche bei einer Drehzahl von 1900 U min^{-1} , dann bei 1700 U min^{-1} und zum Schluss bei 2200 U min^{-1} .

Die vorgeschriebene Kieselgursuspension sollte 1,72 L Wasser und 0,28 kg Kieselgur enthalten. Diese Komponenten wurden mit Hilfe der Waage eingewogen. Es wurde darauf geachtet, dass die Suspension gut aufgeschlämmt war, und dass sie erst bei der höchsten Umdrehungszahl, die bei den Vorversuchen ermittelt worden war, zugeleert wurde.

Zu Beginn der einzelnen Versuche wurde die Waage tariert und die Aufzeichnung der Messdaten gestartet. Die Daten der Waage wurden alle 2 Sekunden zum Computer weitergeleitet und dort aufgezeichnet.

Wie bereits erwähnt, wurde eine überhöhte Drehzahl eingestellt. Aufgrund des Filtrataustrags nahm die Gesamtmasse der Zentrifuge ab und deswegen wurde, um den Anstieg der Drehzahl zu verhindern, die Drehzahl kontinuierlich nachgeregelt werden.

Der Versuch wurde abgebrochen, als mehr als 75 % des aufgegebenen Flüssigkeitsvolumens ins Auffanggefäß ausgetragen waren. Anschließend wurde die Drehzahl kurzfristig erhöht um die Restfeuchte im Kuchen zu verringern. Danach wurde der Motor abgeschaltet, der Filtersack mit dem Kuchen vorsichtig aus der Zentrifuge entnommen, der Filterkuchen entsorgt und der Filtersack mit Wasser gereinigt.

4 Auswertung

4.1 Erläuterung der Berechnungen

Für die zur Auswertung notwendigen Berechnungen kommen folgende im Übungsskriptum hergeleiteten Formeln zur Verwendung. Eine Liste der verwendeten Symbole und Formelzeichen findet sich im direkten Anhang.

Angaben:

Trommelradius	r_T	0,1	[m]
Trommelhöhe	b	0,115	[m]
Porosität	ε	0,85	[-]
Feststoffdichte Kieselgur	ρ_s	2150	[kg/m ³]
Filtratdichte	ρ_F	1000	[kg/m ³]
Dynamische Viskosität	η_F	0,0013	[kg/ms]
Masse des dispersen Anteils	M_s	0,25	[kg]
Masse des reinen Fluids	M_F	1,75	[kg]

Aus diesen Angaben können bereits die für die späteren Berechnungen notwendigen folgenden Werte berechnet werden:

Feststoffgehalt:

$$w = \frac{M_s}{V_{Fluid}} = \frac{0,28}{0,00172} = 162,79 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Gl.1})$$

Massenbeladung:

$$X = \frac{M_s}{M_F} = \frac{M_s}{\rho_F \cdot V_{Fluid}} = \frac{0,28}{1000 \cdot 0,00172} = 0,163 \quad (\text{Gl.2})$$

Mittlere Dichte des Suspensionsringes:

$$\rho_m = \frac{(1 + X) \cdot \rho_s \cdot \rho_F}{\rho_s + X \cdot \rho_F} = \frac{(1 + 0,143) \cdot 2150 \cdot 1000}{2150 + 0,143 \cdot 1000} = 1081,04 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Gl.3})$$

Gesamtvolumen der in die Zentrifuge eingebrachten Suspension:

$$V_g = V_{Fluid} + \frac{M_s}{\rho_s} = 0,00172 + \frac{0,28}{2150} = 0,00185 \text{ m}^3 \quad (\text{Gl.4})$$

Feststoffgehalt	w	162,79	[kg/m ³]
Massenbeladung	X	0,163	[-]
Mittlere Dichte des Suspensionsrings	ρ_m	1081,04	[kg/m ³]
Suspensionsgesamt volumen	V_g	0,00185	[m ³]

Mit diesen Daten und den Messwerten konnten aus

$$M_g = \pi \cdot b \cdot \rho_s \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (r_T^2 - r_a^2) = w \cdot V_F \quad (\text{Gl.5})$$

die beiden Werte $r_a = \sqrt{r_T^2 - \frac{M_g}{\pi \cdot b \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s}}$ (Gl.6) und $r_i = \sqrt{r_T^2 - \frac{(V_g - V_F)}{\pi \cdot b}}$ (Gl.7)

errechnet werden. Nun wurde der Volumenstrom zwischen zwei diskreten Messwerten nach folgender Formel errechnet:

$$\dot{V}_{Fm(i)} = \frac{V_{F(i+1)} - V_{F(i)}}{t_{F(i+1)} - t_{F(i)}} \quad (\text{Gl.8})$$

Auch für r_a und r_i wurden jeweils die mittleren Radien berechnet:

$$r_{am} = \frac{r_{a(i+1)} + r_{a(i)}}{2} \quad (\text{Gl.9}) \quad \text{sowie} \quad r_{im} = \frac{r_{i(i+1)} + r_{i(i)}}{2} \quad (\text{Gl.10})$$

Aus den soweit errechneten Werten lässt sich nun der in der Zentrifuge durch die Fliehkraft aufgebaute Überdruck Δp berechnen:

$$\Delta p = \left(\frac{\omega^2}{2} \right) \cdot \left[\rho_m \cdot (r_a^2 - r_i^2) + \rho_F \cdot (r_T^2 - r_a^2) \right] \quad (\text{Gl.11})$$

mit

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (\text{Gl.12})$$

Dieser Überdruck wird nun dem Druckverlust von Kuchen und Filtermittel gleichgesetzt:

$$\Delta p = \frac{\eta_F \cdot \dot{V}_F}{2 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left[\alpha_w \cdot \ln \left(\frac{r_T}{r_a} \right) + \frac{\beta}{r_T} \right] \quad (\text{Gl.13})$$

Durch Linearisierung erhält man:

$$\frac{\Delta p}{V_F} = \frac{\eta_F}{2 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left[\alpha_w \cdot \ln \left(\frac{r_T}{r_a} \right) + \frac{\beta}{r_T} \right] \quad (\text{Gl.14})$$

Wird nun in einem Diagramm $\frac{\Delta p}{V_F}$ über $\ln \left(\frac{r_T}{r_a} \right)$ aufgetragen, erhält man durch lineare Regression eine Gerade mit der Steigung k und dem Ordinatenabschnitt d . Aus diesen beiden Werten lassen sich der Filtrationswiderstand α_w sowie der Filtermittelwiderstand β berechnen:

$$\alpha_w = \frac{2 \cdot k \cdot \pi \cdot b}{\eta_F} \quad (\text{Gl.15}) \quad \text{sowie} \quad \beta = \frac{2 \cdot d \cdot \pi \cdot b \cdot r_T}{\eta_F} \quad (\text{Gl.16})$$

Aus diesen Werten wird für den zweiten Teil der Übung nun die Filtrationszeit rechnerisch bestimmt und mit den gemessenen Werten verglichen.

Für die Berechnungen werden, ausgehend von 0,1 L Filtrat – Inkrementen (bis 1,72L) analog zu den oben durchgeführten Rechnungen r_a , r_i , r_{am} und r_{im} berechnet und für jeden Schritt der Volumenstrom nach folgender Formel berechnet:

$$\dot{V}_F = \frac{\pi \cdot b \cdot \omega^2 \cdot [\rho_m \cdot (r_a^2 - r_i^2) + \rho_F \cdot (r_T^2 - r_a^2)]}{\eta_F \cdot \left[\alpha_w \cdot \ln\left(\frac{r_T}{r_a}\right) + \left(\frac{\beta}{r_T}\right) \right]} \quad (\text{Gl.17})$$

Die Filtrationszeit für das vorgegebene Volumen von 0,1 L wird mit folgender Gleichung erhalten:

$$\Delta t = \frac{\Delta V_F}{\dot{V}_F} \quad (\text{Gl.18})$$

Um zuletzt die Gesamtzentrifugierzeit zu erhalten, müssen noch alle so erhaltenen Zeitintervalle aufsummiert werden:

$$t = \sum_i \Delta t_{(i)} \quad (\text{Gl.19})$$

4.2 Verwendete Symbole und Formelzeichen:

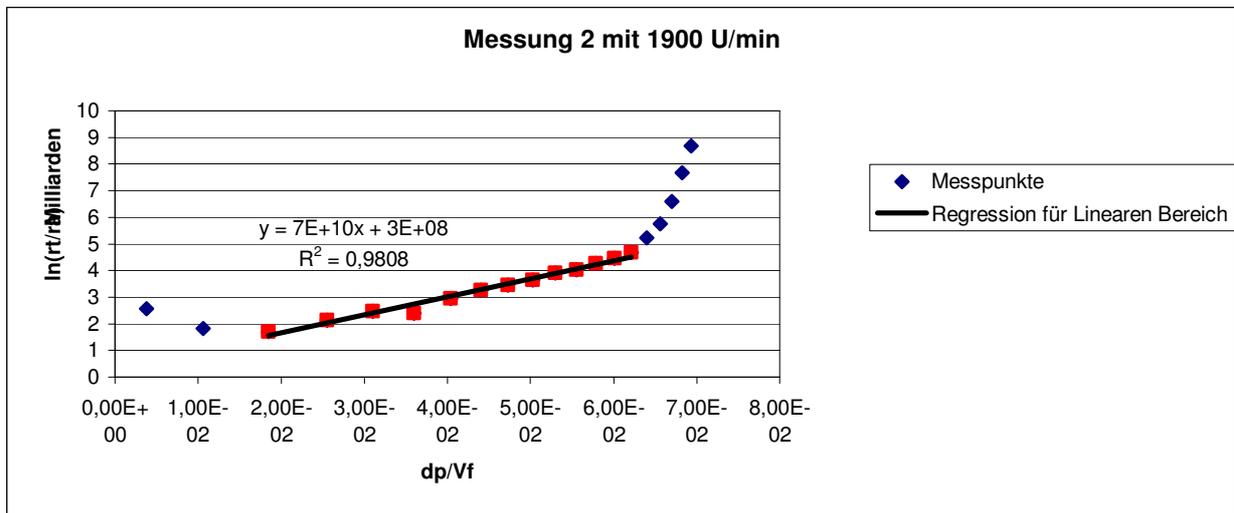
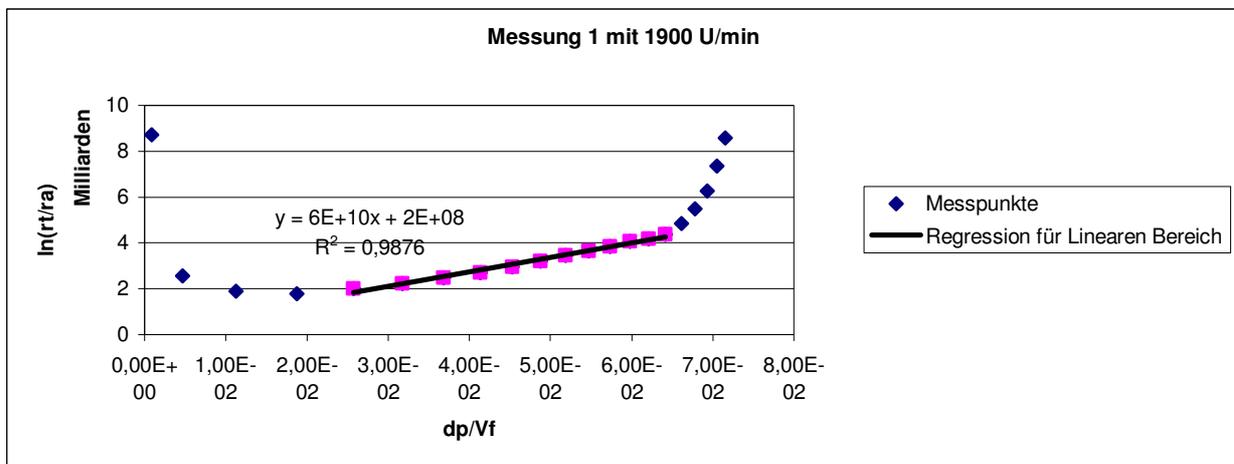
Mg	...	Gesamtkuchenmasse [kg]
Ms	...	Masse des dispersen Anteils [kg]
MF	...	Masse des reinen Fluids [kg]
mF	...	Masse des angefallenen Filtrats [kg]
VFluid	...	Volumen des reinen Fluids [m ³]
VF	...	erreichtes Klarflüssigkeits(Filtrats-)volumen [m ³]
Vg	...	Gesamtvolumen der in der Zentrifuge eingebrachten Suspension [m ³]
\dot{V}_F	...	Klarflüssigkeitsvolumenstrom [m ³ /s]
ρ_s	...	Dichte des festen, dispersen Anteils [kg/m ³]
ρ_F	...	Dichte des reinen Fluids [kg/m ³]
ρ_m	...	mittlere Dichte des Suspensionsringes [kg/m ³]
w	...	Feststoffgehalt [kg/m ³]
X	...	Massenbeladung [-]
b	...	Zentrifugentrommelhöhe [m]
rT	...	Trommelinnenradius [m]
ra	...	Kuchenschichtinnenradius [m]
ri	...	Suspensionsringinnenradius [m]
ε	...	Kuchenporosität [-]
η_F	...	dynamische Viskosität des Filtrats [kg/ms]
n	...	Drehzahl [1/min]
α_w	...	Filtrationswiderstand [1/m ²]
β	...	Filtermittelwiderstand [1/m]
Δp	...	Druckverlust über der Filterschicht [kg/ms ²]
ω	...	Winkelgeschwindigkeit [1/s]
k	...	Steigung [kg/m ⁴ s]
d	...	Ordinatenabschnitt [kg/m ⁴ s]
t	...	Gesamtzentrifugierzeit [s]

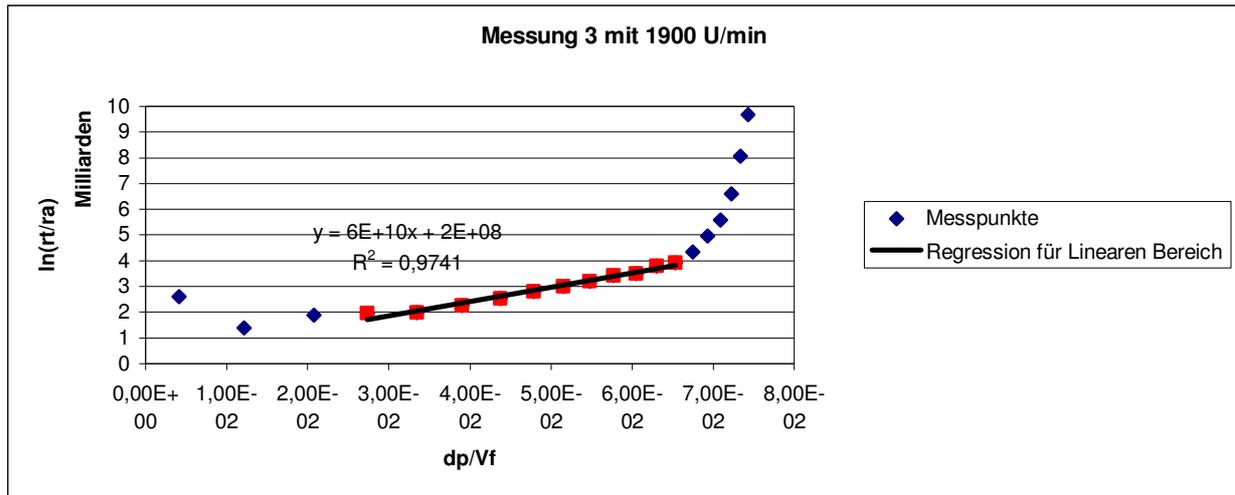
4.3 Messergebnisse und Auswertung

4.3.1 Bestimmung der Konstanten α_w und β bei 1900 U/min.

Von den erhaltenen Messwerten sollen im Folgenden nur die ersten 50 Sekunden der Aufzeichnung dargestellt werden. Diese sind für die Auswertung von Relevanz. Es wurden zwar mehr Messwerte aufgezeichnet, diese wurden aber dann auch durch Erhöhung der Drehzahl auf 3000 U/min erhalten um eine weitere Entfeuchtung des Kuchens zu erhalten, sind aber für diese Auswertung nicht von Bedeutung. Diese Werte seien daher nur anhand von Diagrammen dargestellt.

In den folgenden Diagrammen wird $\ln(r_t/r_a)$ gegen $\Delta p_m/V_{Fm}$ aufgetragen und durch den linearen Bereich, der wenige Sekunden nach Beginn des Zuschüttens für wenige Sekunden gegeben war, wurde eine Regressionsgerade gelegt.





Somit ergeben sich die Werte für Alpha und Beta, welche in der nächsten Tabelle angeführt sind und aus denen der Mittelwert gebildet wurde für die kommenden Rechnungen.

	Steigung k	d Achsenabschnitt	Alpha α_w [1/m ²]	Beta β [1/m]
Messung 1	6,34E+10	1,95E+08	3,52E+13	1,09E+10
Messung 2	6,80E+10	2,92E+08	3,78E+13	1,62E+10
Messung 3	5,52E+10	2,14E+08	3,07E+13	1,19E+10
	Mittelwert		3,46E+13	1,30E+10
		Standardabweichung	2,95E+12	2,32E+09
		Standardabweichung in % des Mittelwertes	9%	18%

4.3.2 Rechnerische Ermittlung des Zentrifugierverlaufs mithilfe der berechneten Werte von Alpha und Beta

Die beiden weiteren Versuche dienen zur Überprüfung der berechneten Filterkennwerte mit tatsächlich gemessenen Werten.

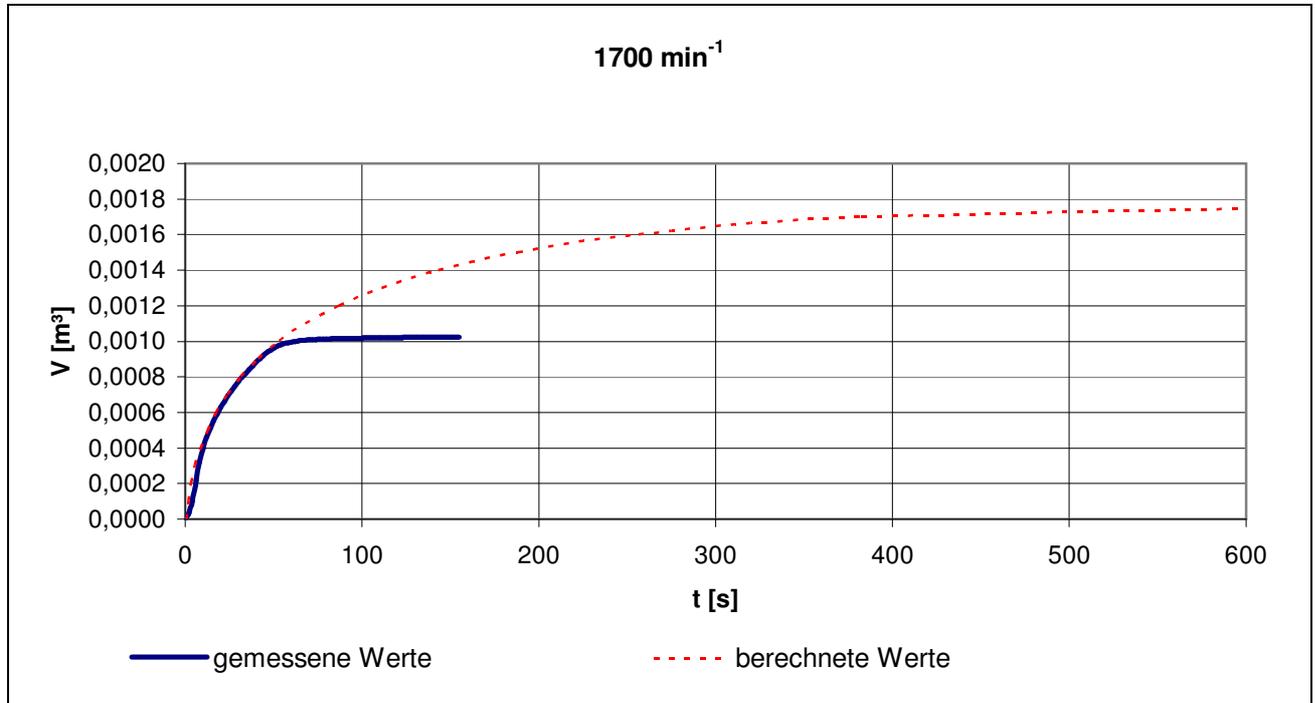
Die Versuchsdurchführung blieb unverändert, jedoch wurde bei der Auswertung die Filtrationszeit zunächst rechnerisch bestimmt und dann mit den gemessenen Ergebnissen verglichen.

Es wurde je eine Messserie bei 1700 U/min und 2200 U/min angefertigt.

Messerie 1700 U/min

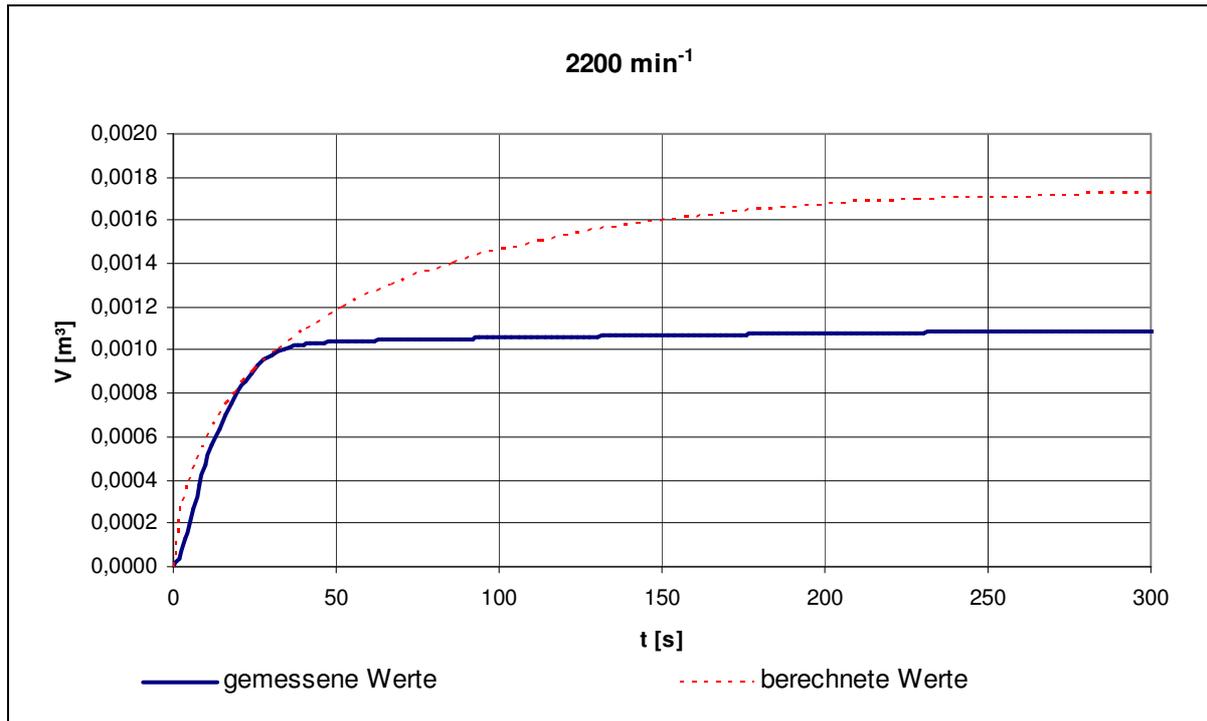
Gemessene Werte			Berechnete Werte		
t [s]	V [kg]	V [m ³]	t [s]	Δt [s]	V [m ³]
0	0,0000	0,00000	0,74	0,742	0
2	0,0364	0,00004	1,75	1,010	0,0001
4	0,1010	0,00010	3,35	1,599	0,0002
6	0,2152	0,00022	5,62	2,273	0,0003
8	0,3202	0,00032	8,67	3,050	0,0004
10	0,3998	0,00040	12,63	3,952	0,0005
12	0,4592	0,00046	17,64	5,010	0,0006
14	0,5094	0,00051	23,90	6,266	0,0007
16	0,5536	0,00055	31,68	7,778	0,0008
18	0,5928	0,00059	41,31	9,628	0,0009
20	0,6284	0,00063	53,25	11,938	0,001
22	0,6616	0,00066	68,14	14,896	0,0011
24	0,6922	0,00069	86,95	18,807	0,0012

26	0,7212	0,00072	111,16	24,208	0,0013
28	0,7480	0,00075	143,28	32,121	0,0014
30	0,7738	0,00077	188,07	44,793	0,0015
32	0,7978	0,00080	256,34	68,267	0,0016
34	0,8202	0,00082	382,68	126,337	0,0017
36	0,8420	0,00084	888,14	505,467	0,0018



Messerie 2200 U/min

Gemessene Werte			Berechnete Werte		
t [s]	V [kg]	V [m ³]	t [s]	Δt [s]	V [m ³]
0	0	0	0,44	0,443	0
2	0,0392	0,0000392	1,05	0,603	0,0001
4	0,1314	0,0001314	2,00	0,955	0,0002
6	0,2656	0,0002656	3,36	1,357	0,0003
8	0,3812	0,0003812	5,18	1,821	0,0004
10	0,4728	0,0004728	7,54	2,360	0,0005
12	0,5622	0,0005622	10,53	2,991	0,0006
14	0,6366	0,0006366	14,27	3,742	0,0007
16	0,7016	0,0007016	18,92	4,644	0,0008
18	0,759	0,000759	24,67	5,749	0,0009
20	0,811	0,000811	31,79	7,128	0,001
22	0,8572	0,0008572	40,69	8,894	0,0011
24	0,8976	0,0008976	51,92	11,230	0,0012
26	0,9314	0,0009314	66,37	14,455	0,0013
28	0,9582	0,0009582	85,55	19,180	0,0014
30	0,9796	0,0009796	112,30	26,746	0,0015
32	0,9958	0,0009958	153,06	40,763	0,0016
34	1,008	0,001008	228,50	75,437	0,0017
36	1,0162	0,0010162	530,32	301,818	0,0018



4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ermittelten Werte für α & β

	Alpha α_w [1/m ²]	Beta β [1/m]
Mittelwert	3,46E+13	1,30E+10

Gegenüberstellung der benötigten Zentrifugierzeiten:

Versuch	Im praktischen Versuch erreichtes Filtratvolumen:	Im Rechenmodell benötigte Zeit um diese Menge an Filtratvolumen zu erreichen
	[L]	[s]
1700 U/min	1,0238	56,8
1900 U/min	1,0564 (Versuch 3)	33,9
2200 U/min	1,1058	33,5

5 Diskussion und Fehlerbetrachtung

Die Bestimmung von Filtrations- und Filtermittelwiderstand α_w und β ist bis zu einem gewissen Grad wirkungsvoll, da das Modell für kleine und große Zeiten versagt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass kein idealer Suspensionsring vorliegt, und daher der potentiell lineare Bereich, in dem das Modell als gültig angenommen wird, sehr klein ist.

Die für α_w und β in den Versuchen ermittelten Werte stimmen größenordnungsmäßig überein, eine genauere Bestimmung würde jedoch weitere Messungen erfordern. Bei nur drei Messungen lässt sich

nicht mit Sicherheit sagen, ob die 2 zusammenpassenden Messungen eine bessere Beschreibung liefern oder ob es sich um einen systematischen Fehler bei der Messung handelt.

Bei der Überprüfung der Messergebnisse und der getroffenen Vereinfachungen (laminare Strömung, gleich bleibende Porosität des Kuchens, konstante Winkelgeschwindigkeit) durch zwei weitere Versuche zeigt sich in den beiden Graphiken bezüglich des gemessenen und berechneten Zeitverlaufs, dass die berechnete Kurve zu Beginn des Versuchs im Verlauf gut mit den gemessenen übereinstimmen, v.a. bezüglich der Steigung. Dies ist deshalb nicht verwunderlich, da die Werte für α_w und β in dieser Zeitperiode ermittelt wurden.

Jedoch ist die praktische Kurve, besonders auffällig ist dies bei 2200 U/min, gegenüber der theoretischen zu etwas größeren Zeiten hin verschoben. Dies lässt sich durch die Dauer der Probenaufgabe erklären (vor allem bei der größeren Drehzahl wirkt sich dies merkbar aus).

Die praktischen Kurven flachen rascher und somit früher ab als die berechneten. Dies kann durch die Tatsache erklärt werden, dass der Kuchen in der Theorie als wasserfrei betrachtet wird. Tatsächlich darf die Kuchenfeuchte jedoch nicht vernachlässigt werden, da der als Restfeuchte verbleibende Anteil des Klarflüssigkeitsvolumens zu einem großen Teil zur Differenz von theoretischer und praktischer Zentrifugierzeit sowie zum tatsächlich abzentrifugierbaren Volumen beiträgt.

Der größte Fehler liegt sicher in der Einstellung und Konstanthaltung (durch die Verringerung der Flüssigkeitsmenge musste im Laufe des Versuchs die Drehzahl korrigiert werden) der Drehzahl der Zentrifuge, vor allem am Beginn jeder Messreihe. Die lange Ansprechzeit der Zentrifuge auf Drehzahlregelungen führt zu mitunter stark schwankenden Werten. Es wurde aber versucht, die Drehzahl in einem Bereich von ± 10 U/min zu halten. Dies dürfte auch den größten Effekt auf die Ergebnisse von α_w und β haben und deren Schwankung bei den 3 Messungen bei 1900 U/min.

Die Drehzahl geht durch ω quadratisch in die Berechnungen mit ein.

Weiters ist das Zugeben der Suspension ebenfalls fehlerbehaftet, da bereits während der Aufgabezeit, trotz möglichst rascher Aufgabe, schon ein Teil der Suspension abzentrifugiert wird. Der auf die Zentrifuge aufgesetzte Trichter stellt einen Engpass dar, der auch bei Verwendung eines Zugabemechanismus auftreten würde. Durch die kontinuierliche, bei verschiedenen Messreihen nicht gleiche, Zugabe des aufzutrennenden Gemischs kommt es zu Abweichungen des Überdrucks am Beginn der Messung, bis sich der Suspensionsring laut Modell gebildet hat. Durch Verwendung eines Zugabemechanismus wäre aber wenigstens der Verlauf der Zugabe von Messung zu Messung gleich.

Die geringe Anzahl der Messwerte im linearen Bereich der Diagramme zur Bestimmung von α_w und β stellt ebenfalls eine Fehlerquelle dar. Bei unveränderter Versuchsanordnung könnte durch ein kürzeres Intervall der Messwernerfassung (z.B. Intervall von 1 s) eine statistische Verbesserung der Auswertungen erreicht werden.

Beim Vergleich der gemessenen Werte mit den berechneten (siehe Diagramm 6-8) fällt eine wesentliche Differenz zwischen den erreichten Endwerten der Kurven auf. Die Modellbildung vernachlässigt zur Durchführbarkeit der Berechnungen die Restfeuchtigkeit des Filterkuchens, der in der Realität nicht vollkommen von der Flüssigkeit zu befreien ist, oder nur bei sehr hohen Drehzahlen.

Es kann zu Beginn der Messung zu einer Verzögerung der Messergebnisse, bedingt durch die größere Menge der anfallenden Klarflüssigkeit und den damit verbundenen Rückstau am Auslass, sowie gegen Ende der Messung durch die niedrigere Fließgeschwindigkeit der geringen Flüssigkeitsmenge auftreten.

Der Wägefehler bei der Erfassung der Masse der Klarflüssigkeit beträgt $\pm 0,0002$ kg.

Dieser sowie Volumenfehler bei der Herstellung der Suspension kann in Relation zu den vorher genannten vernachlässigt werden.

6 Anhang

Darstellung der berechneten Werte für die Erstellung der Diagramme zur Ermittlung von α und β

Zeit [s]	M_{g1} [kg]	M_{g2} [kg]	M_{g3} [kg]	r_{a1} [m]	r_{a2} [m]	r_{a3} [m]	r_{am1} [m]	r_{am2} [m]	r_{am3} [m]	r_{i1} [m]	r_{i2} [m]	r_{i3} [m]	r_{im1} [m]	r_{im2} [m]	r_{im3} [m]	Δp_{mi1} [kg/ms ²]	Δp_{mi1} [kg/ms ²]	Δp_{mi1} [kg/ms ²]
0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-01	1,00E-01	1,00E-01	1,00E-01	1,00E-01	1,00E-01	6,95E-02	6,96E-02	6,95E-02	6,95E-02	6,96E-02	6,95E-02	1,11E+05	1,10E+05	1,11E+05
2	4,06E-03	1,98E-03	2,90E-03	9,98E-02	9,99E-02	9,99E-02	9,99E-02	1,00E-01	9,99E-02	7,00E-02	6,99E-02	6,98E-02	6,97E-02	6,98E-02	6,96E-02	1,10E+05	1,10E+05	1,10E+05
4	1,75E-02	1,55E-02	1,62E-02	9,92E-02	9,93E-02	9,93E-02	9,95E-02	9,96E-02	9,96E-02	7,16E-02	7,15E-02	7,14E-02	7,08E-02	7,07E-02	7,06E-02	1,07E+05	1,07E+05	1,07E+05
6	3,45E-02	3,33E-02	3,95E-02	9,85E-02	9,86E-02	9,83E-02	9,89E-02	9,89E-02	9,88E-02	7,36E-02	7,36E-02	7,42E-02	7,26E-02	7,26E-02	7,28E-02	1,01E+05	1,01E+05	1,00E+05
8	5,15E-02	5,12E-02	5,52E-02	9,78E-02	9,78E-02	9,76E-02	9,81E-02	9,82E-02	9,79E-02	7,56E-02	7,57E-02	7,60E-02	7,46E-02	7,46E-02	7,51E-02	9,43E+04	9,41E+04	9,26E+04
10	6,56E-02	6,46E-02	6,87E-02	9,71E-02	9,72E-02	9,70E-02	9,75E-02	9,75E-02	9,73E-02	7,72E-02	7,72E-02	7,75E-02	7,64E-02	7,64E-02	7,67E-02	8,83E+04	8,82E+04	8,70E+04
12	7,77E-02	7,56E-02	8,20E-02	9,66E-02	9,67E-02	9,64E-02	9,69E-02	9,69E-02	9,67E-02	7,85E-02	7,84E-02	7,90E-02	7,78E-02	7,78E-02	7,82E-02	8,33E+04	8,36E+04	8,19E+04
14	8,79E-02	8,63E-02	9,30E-02	9,62E-02	9,62E-02	9,59E-02	9,64E-02	9,65E-02	9,62E-02	7,96E-02	7,95E-02	8,02E-02	7,91E-02	7,90E-02	7,96E-02	7,91E+04	7,95E+04	7,73E+04
16	9,69E-02	9,46E-02	1,02E-01	9,58E-02	9,59E-02	9,55E-02	9,60E-02	9,60E-02	9,57E-02	8,06E-02	8,04E-02	8,12E-02	8,01E-02	8,00E-02	8,07E-02	7,54E+04	7,58E+04	7,34E+04
18	1,05E-01	1,02E-01	1,10E-01	9,54E-02	9,55E-02	9,51E-02	9,56E-02	9,57E-02	9,53E-02	8,14E-02	8,12E-02	8,20E-02	8,10E-02	8,08E-02	8,16E-02	7,22E+04	7,29E+04	7,01E+04
20	1,12E-01	1,08E-01	1,18E-01	9,51E-02	9,52E-02	9,48E-02	9,52E-02	9,54E-02	9,50E-02	8,21E-02	8,19E-02	8,28E-02	8,18E-02	8,15E-02	8,24E-02	6,94E+04	7,03E+04	6,72E+04
22	1,18E-01	1,14E-01	1,24E-01	9,48E-02	9,50E-02	9,45E-02	9,49E-02	9,51E-02	9,47E-02	8,28E-02	8,25E-02	8,34E-02	8,25E-02	8,22E-02	8,31E-02	6,68E+04	6,79E+04	6,46E+04
24	1,24E-01	1,20E-01	1,30E-01	9,45E-02	9,47E-02	9,43E-02	9,47E-02	9,48E-02	9,44E-02	8,34E-02	8,31E-02	8,40E-02	8,31E-02	8,28E-02	8,37E-02	6,46E+04	6,57E+04	6,22E+04
26	1,29E-01	1,25E-01	1,36E-01	9,43E-02	9,45E-02	9,40E-02	9,44E-02	9,46E-02	9,41E-02	8,39E-02	8,36E-02	8,46E-02	8,37E-02	8,33E-02	8,43E-02	6,25E+04	6,37E+04	6,00E+04
28	1,34E-01	1,30E-01	1,40E-01	9,41E-02	9,43E-02	9,38E-02	9,42E-02	9,44E-02	9,39E-02	8,44E-02	8,41E-02	8,51E-02	8,42E-02	8,38E-02	8,48E-02	6,06E+04	6,18E+04	5,80E+04

30	1,38E-01	1,34E-01	1,45E-01	9,39E-02	9,41E-02	9,36E-02	9,40E-02	9,42E-02	9,37E-02	8,49E-02	8,45E-02	8,56E-02	8,46E-02	8,43E-02	8,53E-02	5,88E+04	6,01E+04	5,62E+04
32	1,42E-01	1,38E-01	1,49E-01	9,37E-02	9,39E-02	9,34E-02	9,38E-02	9,40E-02	9,35E-02	8,53E-02	8,49E-02	8,60E-02	8,51E-02	8,47E-02	8,58E-02	5,71E+04	5,85E+04	5,46E+04
34	1,46E-01	1,42E-01	1,53E-01	9,35E-02	9,37E-02	9,32E-02	9,36E-02	9,38E-02	9,33E-02	8,57E-02	8,53E-02	8,63E-02	8,55E-02	8,51E-02	8,61E-02	5,56E+04	5,71E+04	5,31E+04
36	1,49E-01	1,45E-01	1,56E-01	9,34E-02	9,36E-02	9,31E-02	9,34E-02	9,37E-02	9,32E-02	8,60E-02	8,56E-02	8,66E-02	8,58E-02	8,54E-02	8,65E-02	5,43E+04	5,58E+04	5,19E+04
38	1,52E-01	1,48E-01	1,58E-01	9,32E-02	9,35E-02	9,30E-02	9,33E-02	9,35E-02	9,30E-02	8,63E-02	8,59E-02	8,68E-02	8,61E-02	8,57E-02	8,67E-02	5,32E+04	5,47E+04	5,09E+04
40	1,54E-01	1,50E-01	1,60E-01	9,31E-02	9,34E-02	9,29E-02	9,32E-02	9,34E-02	9,29E-02	8,65E-02	8,61E-02	8,70E-02	8,64E-02	8,60E-02	8,69E-02	5,22E+04	5,38E+04	5,00E+04
42	1,56E-01	1,52E-01	1,62E-01	9,30E-02	9,33E-02	9,28E-02	9,31E-02	9,33E-02	9,28E-02	8,67E-02	8,63E-02	8,72E-02	8,66E-02	8,62E-02	8,71E-02	5,14E+04	5,30E+04	4,93E+04
44	1,58E-01	1,53E-01	1,63E-01	9,30E-02	9,32E-02	9,27E-02	9,30E-02	9,32E-02	9,28E-02	8,68E-02	8,64E-02	8,73E-02	8,68E-02	8,64E-02	8,73E-02	5,07E+04	5,23E+04	4,88E+04
46	1,59E-01	1,55E-01	1,64E-01	9,29E-02	9,31E-02	9,27E-02	9,29E-02	9,31E-02	9,27E-02	8,70E-02	8,66E-02	8,74E-02	8,69E-02	8,65E-02	8,74E-02	5,02E+04	5,17E+04	4,84E+04
48	1,60E-01	1,56E-01	1,65E-01	9,29E-02	9,31E-02	9,27E-02	9,29E-02	9,31E-02	9,27E-02	8,71E-02	8,67E-02	8,75E-02	8,70E-02	8,67E-02	8,75E-02	4,97E+04	5,11E+04	4,80E+04
50	1,61E-01	1,57E-01	1,65E-01	9,28E-02	9,30E-02	9,26E-02	9,28E-02	9,30E-02	9,27E-02	8,72E-02	8,68E-02	8,76E-02	8,71E-02	8,68E-02	8,75E-02	4,93E+04	5,07E+04	4,78E+04