

# SEDIMENTATIONSUNTERSUCHUNGEN ZUM TRENNVERHALTEN VON FASER-PARTIKEL SUSPENSIONEN

Dipl.-Math. techn. Markus Feist<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Hermann Nirschl<sup>1</sup>, Prof. Dr. Willy Dörfler<sup>2</sup>

Dipl.-Ing. Georg Hirsch<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM), Universität Karlsruhe(TH), Straße am Forum 8, Karlsruhe, [markus.feist@mvm.uni-karlsruhe.de](mailto:markus.feist@mvm.uni-karlsruhe.de)

<sup>2</sup>Institut für Angewandte und Numerische Mathematik (IANM), Universität Karlsruhe(TH)

<sup>3</sup>Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV), Technische Universität Darmstadt

## Kurzfassung

Dieses Paper beschäftigt sich mit grundlegenden Untersuchungen zum Sedimentationsprozess von Faser-Partikel Suspensionen am Beispiel des Recycling-Prozesses von Papiersuspensionen. Die Experimente wurden mit zwei speziell produzierten Papieren, einem gestrichenen und einem ungestrichenen, sowie dessen einzelnen Bestandteilen durchgeführt. Nach Wiederauflösung des Papiers wurde die Suspension über einem 150 µm Siebkorb gesiebt, so dass sich in den für die Experimente verwendeten Suspensionen nur Partikel, die kleiner als 150 µm sind, befinden.

Es wird gezeigt, dass sich das Sedimentationsverhalten der Suspensionen, von dem Sedimentationsverhalten der Einzelkomponenten unterscheidet. Weiterhin findet sich eine Abhängigkeit sowohl von der Feststoffkonzentration, als auch von den Anteilen der einzelnen Komponenten in der Suspension sowie der physiko-chemischen Wechselwirkungen, die über eine Änderung des  $\zeta$ -Potentials untersucht wurde. Neben grundlegenden Experimenten mit einer Langarm-Zentrifuge und einer Sedimentationswaage ist die mathematische Modellierung und numerische Simulation ein Hauptbestandteil für die Untersuchungen. Die Herausforderung hierbei ist unter anderem den Einfluss der Faserrichtung in geeigneter Weise zu betrachten.

## 1 Einleitung

Die Sedimentation von organischen Fasern und anorganischen Partikeln ist in der Industrie Grundlage vieler Anwendungen. Bei der Abwasseraufbereitung wird mit Hilfe der Sedimentation die Flüssigkeit, das Wasser, von den Feststoffen, die sowohl anorganisch als auch organisch und sowohl länglich als auch rund sind, gereinigt. Einige Filtrationsprozesse verwenden ebenfalls Fasern als Filterhilfsmittel. Eins der wichtigsten Beispiele für Faser-Partikel

Sedimentation findet sich in der Papierindustrie beim Recyclingprozess. Die Fasern, die aus Zellulose bestehen, müssen dabei von den Druckfarben und Füllstoffen, die meist aus anorganischen und eher runden Partikeln bestehen, getrennt werden. Mit den Fasern wird anschließend neues Papier hergestellt, wohingegen die Partikel entsorgt werden. Mit heutigen Methoden, wie Siebung und Flotation ist es leider nicht zufriedenstellend möglich die feinen Fasern von den Partikeln zu trennen. Die Schwierigkeit dabei ist, dass die organischen Fasern in der Regel größer sind als die Partikel, aber eine geringere Dichte haben, was zu ähnlichen Sedimentationsgeschwindigkeiten führt. Allerdings sind diese feinen Fasern wichtig für die Eigenschaften des neuen Papiers. Daher ist eine gute Trennung erforderlich um einen möglichst kostengünstigen Prozess zu gewährleisten. Die drei Beispiele zeigen die Notwendigkeit die Unterschiede im Sedimentationsverhalten von Fasern und Partikeln zu untersuchen.

Erste Untersuchungen auf dem Gebiet der Sedimentation wurden vor mehreren Jahrzehnten von Stokes [11] durchgeführt. Er entwickelte eine analytische Formel zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit einer langsamen Kugel in einem newtonschen Fluid. Mehrere Jahrzehnte später wurden von Durlowsky et al. [6] die hydrodynamischen Wechselwirkungen zwischen einer Vielzahl von Partikeln numerisch berechnet. Experimente zum Sedimentationsverhalten von Beiser [2] und Bickert [3] liefern folgende Ergebnisse. Das Sedimentationsverhalten von Partikeln in Suspensionen hängt zum einen von den Materialien als auch von der Volumenkonzentration sowie dem pH-Wert der Suspension ab. In einer verdünnten Suspension kann man in der Regel von der stokeschen Sedimentationsgeschwindigkeit ausgehen, d. h. die Sedimentation ist unbehindert und langsam. Bei Erhöhung der Konzentration werden Cluster gebildet, die schneller absedimentieren als die Primärpartikel. Nach weiterer Konzentrationserhöhung kommt es zur Schwarm sedimentation, die zu einer Entmischung der Suspension führt und eine noch höhere Sedimentationsgeschwindigkeit zur Folge hat. Die nächste Stufe ist der Bereich der Zonensedimentation. Die gegenseitige Behinderung der Partikel wird so groß, dass die Sedimentationsgeschwindigkeit sogar noch unter die stokesche Sedimentationsgeschwindigkeit fällt. Trennvorgänge finden sehr oft im Bereich der Zonensedimentation statt, wohingegen die Schwarm sedimentation zur Klassifikation der Partikel ausgenutzt werden kann. Diese Experimente sind unter der Annahme durchgeführt worden, dass die Partikel während der Sedimentation nicht agglomerieren oder sich auf irgendeine andere Weise verändern.

Ein anderes Sedimentationsverhalten wird bei der Sedimentation von Fasersuspensionen beobachtet. Happle und Brenner [7] geben eine exakte analytische Formel zur Sedimentation einer Ellipse an. Eine weitere analytische Formel zur Beschreibung der

Fasersinkgeschwindigkeit wurde von Batchelor [1] mit der Slender Body Theorie entwickelt. Die Herleitung beruht auf zwei Lösungen, einer inneren und fasernahen Lösung sowie einer äußeren und faserfernen Lösung, die im Übergangsbereich geeignet gekoppelt werden. Diese analytische Lösung und die Lösung für die Ellipsensedimentation zeigen bei der Sedimentationsgeschwindigkeit eine Abhängigkeit von der Richtung des Körpers relativ zur Strömung. Dies ist gleichzeitig der Hauptunterschied zwischen einer Partikel und einer Fasersedimentation. Kumar und Ramaro [9] untersuchten die Trennspiegel in einem Standzylinder in einer verdünnten Suspension aus Fasern in Abhängigkeit der Volumenkonzentration. Das Ergebnis lieferte eine konzentrationsabhängige Trennspiegelgeschwindigkeit. Des Weiteren sollte der Standzylinder mehr als einhundert Mal größer sein als die Faserlänge, um Randeffekte ausschließen zu können. Man erkennt, dass sich die Fasern während der Sedimentation ausrichten und Agglomerate bilden. Dieses Phänomen entdeckten mit Hilfe numerischer Simulation auch Bulter und Shaqfeh [5] sowie experimentell Herzhaft und Guazelli [8]. Sie verfolgten die Sedimentationsbahnen einzelner Teilchen und erkannten, dass sich Agglomerate bilden, die allerdings nur bis zu einer limitieren Größe wachsen.

Die bisher beschriebenen Experimente wurden mit reinen Partikel oder reinen Fasersuspensionen durchgeführt. Allerdings sind kaum Untersuchungen zu Faser - Partikelsuspensionen zu finden, in denen beide Teilchenarten gleichberechtigt an der Sedimentation beteiligt sind. Zusammenfassend kann man erkennen, dass der gegenseitige Einfluss der Fasern und der Partikeln während der Sedimentation Unterschiede im Verhalten zu reinen Faser- bzw. reinen Partikelsuspensionen vermuten lässt. Diese Unterschiede werden sicherlich größer werden je ähnlicher die Sedimentationsgeschwindigkeiten von Fasern und Partikeln werden. Im speziellen besteht Papier aus Partikeln und Fasern. Eine Herausforderung beim Recyclingprozess ist die Trennung der Feinstoffe, dass heißt Faserbruchstücke und Partikel bis zu 150 µm. Die Sedimentation solcher Stoffe wird im Folgenden beschrieben.

## **2 Theoretische Grundlagen**

Das die Fasern und Partikel umgebende Fluid wird als newtonsch und inkompressibel angenommen. Es gelten daher die Navier-Stokes Gleichungen,

$$-\text{ReSl} \frac{\partial \mathbf{v}^F}{\partial t} + \text{Re}(\mathbf{v}^F \cdot \nabla) \mathbf{v}^F = -\nabla p^F + \Delta \mathbf{v}^F + \mathbf{f}, \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}^F = 0. \quad (2.2)$$

Unter der Annahme kleiner Reynoldszahlen, welche bei der Sedimentation kleiner Partikel in Wasser ihre Gültigkeit besitzt, können die Gleichungen (2.1) und (2.2) zu den Stokes Gleichungen vereinfacht werden,

$$-\Delta \mathbf{v}^F + \nabla p^F = \mathbf{f}, \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}^F = 0. \quad (2.4)$$

Bis auf wenige Spezialfälle sind diese Gleichungen nur numerisch und nicht analytisch lösbar. Stokes [11] entwickelte die bekannte analytische Formel für die Geschwindigkeit einer langsam sedimentierenden Kugel

$$\mathbf{v}^{\text{ST}} = \frac{(\rho^s - \rho^F) \cdot a^2}{18\mu^F} \mathbf{g}. \quad (2.5)$$

Es ist nicht möglich, die Sedimentation mehrerer Teilchen analytisch zu beschreiben. Eine Möglichkeit bieten mathematische Modelle und numerische Simulation. Die Euler-Lagrange Methode in Verbindung mit der Stokesian Dynamics, die von Brady [4] entwickelt wurde, erlaubt es die Sedimentation mehrerer Kugeln zu berechnen. Die Lösung der Stokes Gleichungen (2.3) und (2.4), welche durch die Fluid-Partikel Interaktion erweitert ist, wird hier mit dem Code Alberta [10] gelöst. Die Interaktion, die über die Kraft, die die Partikel auf das Fluid ausüben, beschrieben wird, berechnet sich mit Hilfe der Stokesian Dynamics. Wegen der Gültigkeit dieser Methode für Kugeln einer Größe wird eine Faser als Kugelkette simuliert. In der Präsentation werden die ersten Ergebnisse der Simulationen vorgestellt und validiert.

### 3 Materialien und Methoden

#### 3.1 Materialien

Die zu analysierenden Faser-Partikelsuspensionen wurden aus zwei speziell produzierten und wieder resuspendierten Papieren hergestellt. Eines dieser Papiere wird als ungestrichen bezeichnet. Es besteht lediglich aus Fasern und einem Füllstoff, der wiederum aus 100 % CaCO<sub>3</sub> besteht. Das andere wird als gestrichenes Papier bezeichnet. Es besteht aus dem oben beschriebenen ungestrichenen Papier, allerdings mit einem zusätzlichen Vorstrich aus 100 % CaCO<sub>3</sub> und einem Deckstrich aus CaCO<sub>3</sub> und Kaolin mit einem geringen Anteil an Bindern und Stabilisatoren (siehe Tabelle 1).

*Tabelle 1: Inhaltsstoffe des Deckstrichs*

Material	Anteil / %
CaCO <sub>3</sub>	43,3
Kaolin	43,2
Binder	11,0
Carboxymethylcellulose	0,5
Polyvinyl-alkohol	0,4
Blancophor	0,6

Der Binder dient zur besseren Haftung der Partikel an den Fasern. Die Carboxymethylcellulose und der Polyvinyl-alkohol verändern die rheologischen Eigenschaften. Das Blancophor macht das Papier weißer. Nach dem resuspendieren des Papiers wurde die Suspension über einem Siebkorb mit einem Lochdurchmesser von 150 µm gewaschen. Das daraus anfallende Filtrat wurde wieder eingedickt und bildet das Material für die weiteren Analysen. Man kann also annehmen, dass die Teilchen in dem Versuchsprodukt kleiner als 150 µm sind. Zur Vereinfachung bezeichne ich ab jetzt die vorher beschriebenen Suspensionen mit gestrichenem Papier und ungestrichenem Papier. Diese Suspensionen haben folgende Zusammensetzungen, die mit Hilfe der Thermogravimetrischen-Analyse (TGA) bestimmt wurden (siehe Tabelle 2).

*Tabelle 2: Inhaltsstoffe des gestrichenen und ungestrichenen Papiers*

Material	gestrichenes Papier	ungestrichenes Papier
Organisch/%	25	45
Anorganisch/%	75	55
davon CaCO <sub>3</sub> /%	53	43
davon Kaolin/%	22	12

Mit diesen Modellsuspensionen ist man nun in der Lage, Unterschiede im Sedimentationsverhalten in Abhängigkeit der Partikelkonzentration als auch vom Faser-Partikel Verhältnis zu erkennen. Im Gegensatz zu der Suspension aus gestrichenem Papier, die lediglich 25% Faserfeinstoffe und 75% Partikel enthält, besteht die Suspension des ungestrichenem Papiers aus 45% Faserfeinstoffen und 55% Partikeln. Zusätzlich wurden die Einzelkomponenten, wie Streichfarbe, CaCO<sub>3</sub>, etc. untersucht, um die Unterschiede zu reinen Partikelsuspensionen hervorzuheben. Alle Versuche wurden bei Massenkonzentrationen (Ma%) von 0,5 Ma% bis 3,0 Ma% durchgeführt. Bei den reinen Partikelsuspensionen sogar bis 20 %. Weiterhin wurde der pH-Wert verändert, um die physikalischen-chemischen Wechselwirkungen zu untersuchen.

### 3.2 Methoden

Für die Sedimentationsuntersuchungen im Erdschwerefeld wurde die Sedimentationswaage (Mettler HE 10) benutzt. Wegen der Größe der Partikel und der daraus resultierenden sehr langsamen Sedimentationsgeschwindigkeit, reicht das Erdschwerefeld für die Sedimentation oft nicht aus, so dass die Gravitationskraft mit Hilfe einer Zentrifuge erhöht werden muss. Hierzu wurde eine Langarmzentrifuge benutzt, siehe Abbildung 3-1.

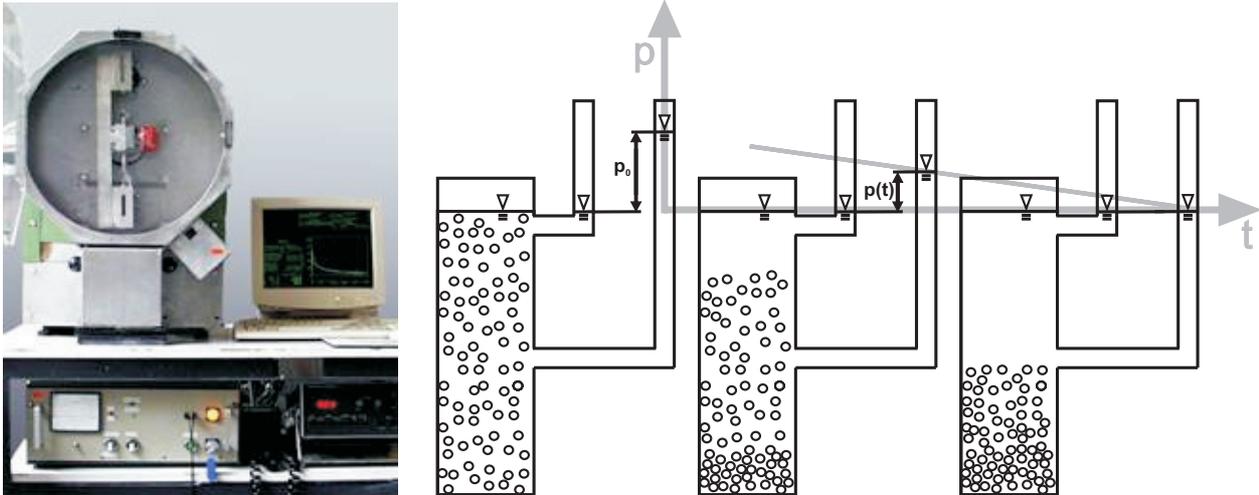


Abbildung 3-1: Messprinzip der Manometerzentrifuge

Diese Messmethode nutzt die Druckunterschiede zwischen zwei Messpunkten aus. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Arbeiten von Beiser [2] und Stolarski [12]. Die zu untersuchende Suspension wird in eine Küvette, die sich am Ende eines langen Zentrifugenarms befindet, gefüllt. Die Druckdifferenz zwischen den zwei Messpunkten in der Küvette hängt von der Konzentration der Partikel ab. Diese Konzentration nimmt während der Sedimentation ab, weil die Partikel aus dem Messbereich sedimentieren. Das Ergebnis ist eine Druckdifferenz, die in Abhängigkeit der Zeit geringer wird. Zusätzlich gilt folgender Zusammenhang zwischen der Sedimentationsgeschwindigkeit-Verteilung und der Partikelkonzentration bzw. der Druckdifferenz (3.1)

$$-Q_3(u_p) = \frac{\Delta p(t_1)}{\Delta p_0} + \frac{t_1}{\Delta p_0} \left| \frac{d\Delta p(t)}{dt} \right|_{t_1} \quad (3.1)$$

Bei den Experimenten wurden sowohl die Massenkonzentration als auch der Faseranteil der Suspensionen variiert, um den Einfluss der Fasern auf die Sedimentation zu erkennen. Die pH-Wert Variation, welche im basischen Bereich mit NaOH und im sauren Bereich mit HNO<sub>3</sub> vorgenommen wurde, diente zur Untersuchung des Einflusses des  $\zeta$ -Potentials auf die

Sedimentationsgeschwindigkeit. Dies wurde mit dem AcoustoSizer II und der Pen Kem 501 gemessen.

## 4 Diskussion

### 4.1 Einzelkomponenten

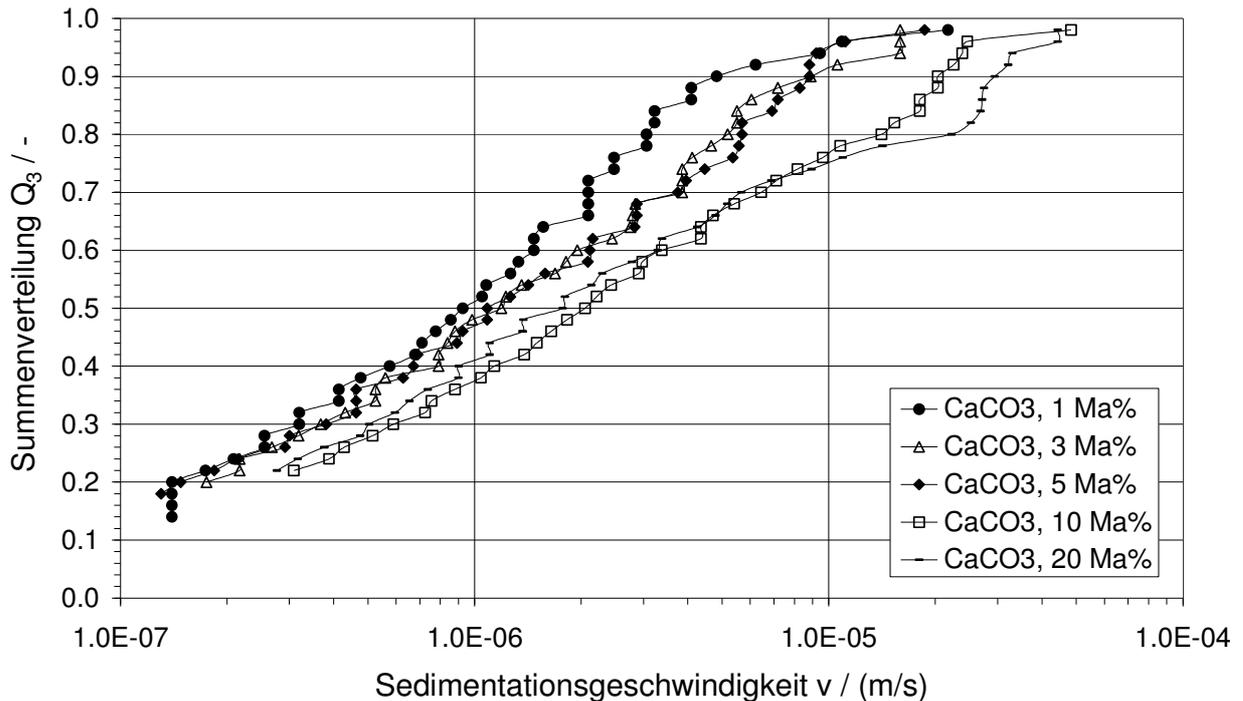


Abbildung 4-1: Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung gemessen mit der Manometerzentrifuge:  $\text{CaCO}_3$ -Suspension bei verschiedenen Ma%

Abbildung 4-1 zeigt die Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung von  $\text{CaCO}_3$ , einer Komponente der Streichfarbe, in Abhängigkeit von der Massenkonzentration. Man erkennt, dass für 3 Ma% und 5 Ma% nahezu die gleiche Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung vorherrscht. Die mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit der Suspensionen mit einer Massenkonzentration von 10 Ma% bzw. 20 Ma% ist etwas schneller als bei 5 Ma%. Dies kann mit dem Effekt der Cluster- und Schwarm sedimentation erklärt werden, wie er schon von Beiser [2] und Bickert [3] beschrieben wird. Die Messungen wurden bei einem C-Wert von 200 und einer Zeit von 1000 s durchgeführt. Während dieser Zeit sedimentieren fast 80 % des Feststoffes. Im Vergleich dazu sedimentiert nur ca. 60 % des Kaolins, die zweite Komponente der Streichfarbe (Abbildung 4-2).

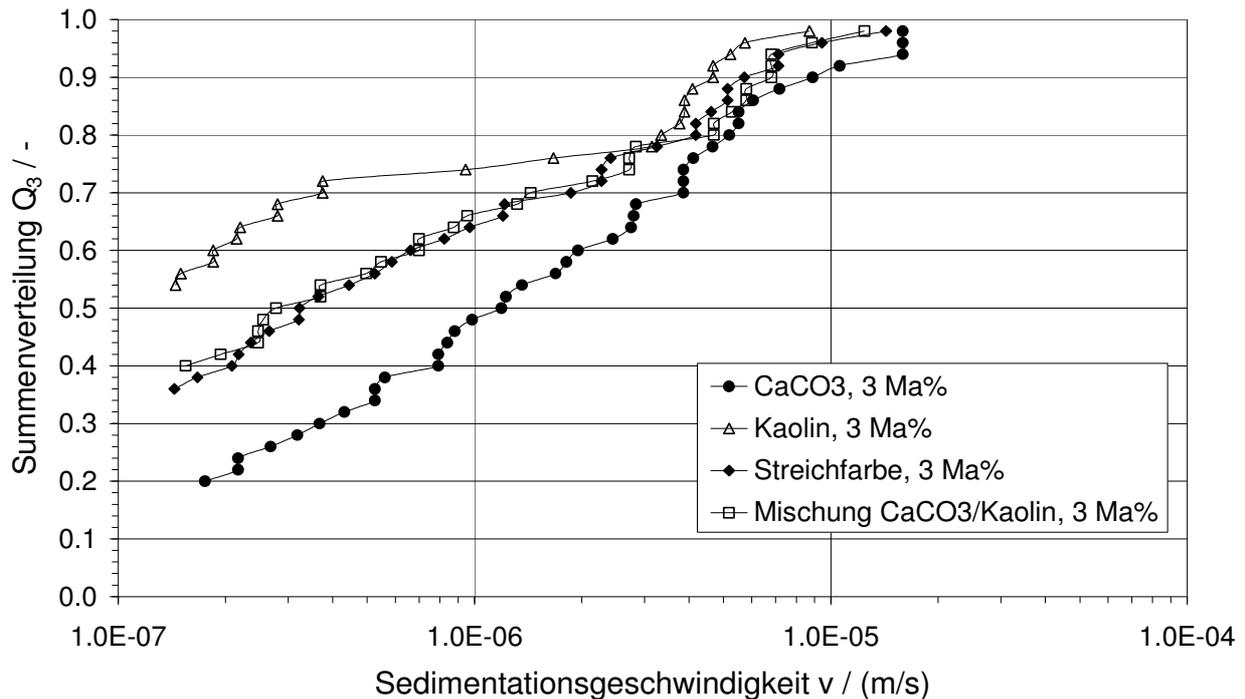


Abbildung 4-2: Sedimentationsgeschwindigkeitsverteilung von CaCO<sub>3</sub>, Kaolin, der Streichfarbe und der CaCO<sub>3</sub>-Kaolin Mischung bei 3 Ma%. Die Ergebnisse sind auf g normiert.

Daraus lässt sich schließen, dass die Kaolinpartikel kleiner als die CaCO<sub>3</sub> Partikel sind. Des Weiteren zeigt Abbildung 4-2, dass 20 % des Kaolins eine zehn Mal höhere Sedimentationsgeschwindigkeit haben als die restlichen 80 %. Dies ist auf die Agglomerationseigenschaften des Kaolins zurückzuführen. Einige Große Agglomerate sedimentieren zuerst, wohingegen die restlichen 80 % der Partikel nachsedimentieren. In Abbildung 4-2 wird auch das Sedimentationsverhalten des CaCO<sub>3</sub>, des Kaolins, einer Mischung aus diesen und der Streichfarbe verglichen. Wie erwartet liegt die Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung der Mischung zwischen den Verteilungen der Einzelkomponenten. Sie ist aber gleich der Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung der Streichfarbe. Dies lässt vermuten, dass die Binder und andere Zusätze, siehe Tabelle 1, keinen Einfluss auf die Sedimentationsgeschwindigkeit haben. Im oberen Geschwindigkeitsbereich haben die vier Suspensionen ähnliche Sedimentationsgeschwindigkeiten. Daher sind wenige große Agglomerate in allen Suspensionen vorhanden.

Die mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit des ungestrichen Papiers (siehe Abbildung 4-3) ist größer, je weniger Feststoff in der Suspension ist, weil die gegenseitige Behinderung

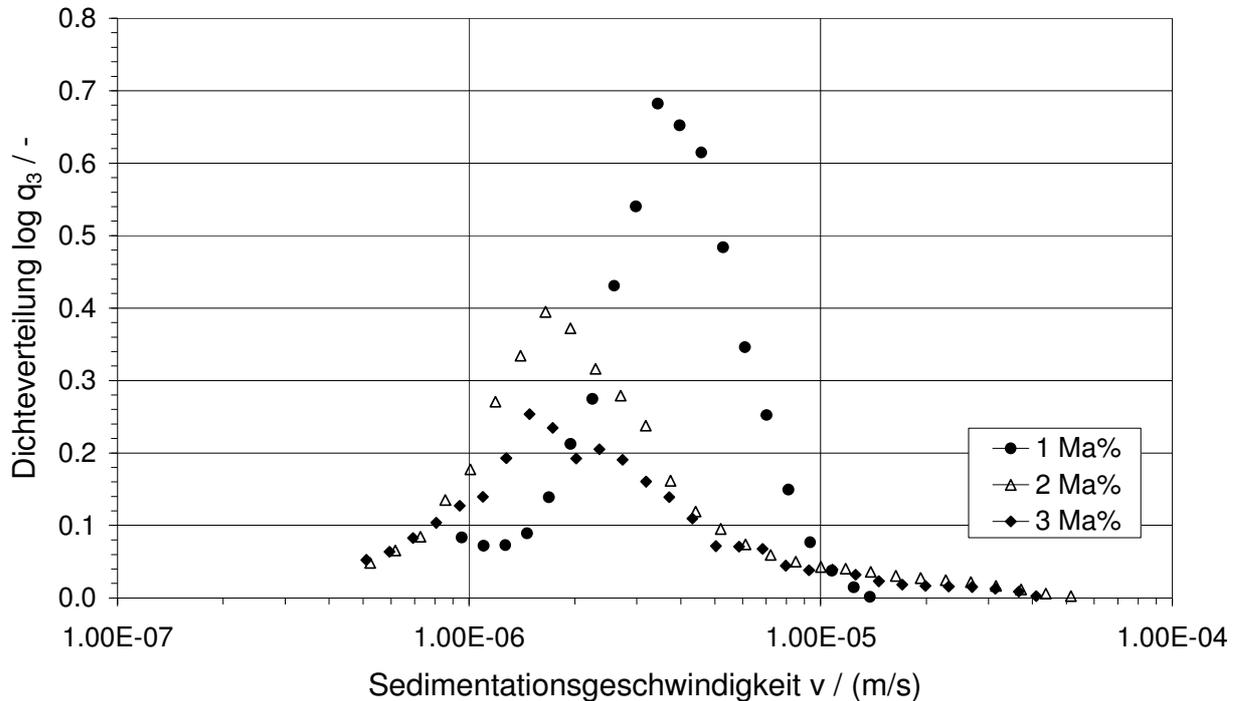


Abbildung 4-3: Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung des ungestrichen Papiers, bei verschiedenen Ma%, gemessen mit der Sedimentationswaage

während der Sedimentation kleiner ist, je geringer die Feststoffkonzentration in der Suspension ist. Die Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung ist auf Grund des hohen Faseranteils von 45 Fa% monomodal. Die gegenseitige Behinderung durch die langen aber dünnen Faserstücke ist so groß, dass die langsamen Teilchen die schnelleren ausbremsen bzw. die schnellen die langsamen mitreißen. Die Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung des gestrichen Papiers, siehe Abbildung 4-4, zeigt ein anderes Verhalten. Die Verteilung ist bei 0,5 Ma%, 1 Ma% und 2 Ma% bimodal, denn Agglomerate und größere Teilchen sedimentieren zuerst und die Feinstoffe sedimentieren danach. Zum einen ist der Feinstoffanteil, der hauptsächlich aus anorganischen Partikeln besteht, größer als beim ungestrichenen Papier, zum anderen ist auf Grund des geringeren Faseranteils die gegenseitige Behinderung und das Abbremsen während der Sedimentation nicht so groß wie beim ungestrichenen Papier. Bei 3 Ma% dagegen ist wegen des hohen Feststoffgehaltes und der dadurch zugenommenen gegenseitigen Behinderung die Verteilung monomodal.

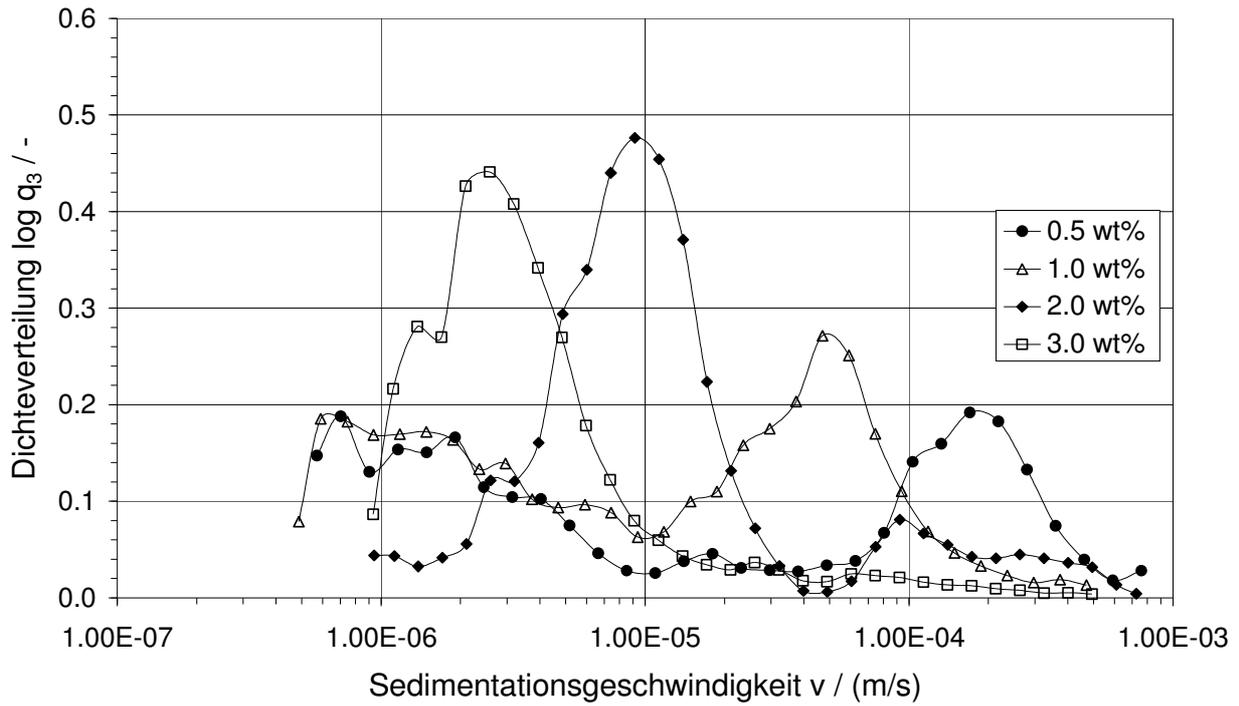


Abbildung 4-4: Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung des gestrichen Papiers, bei verschiedenen Ma%, gemessen mit der Sedimentationswaage

Die Druck-Zeit Graphen in Abbildung 4-5 von Suspensionen mit Faseranteil bis zu 45 Fa% sind

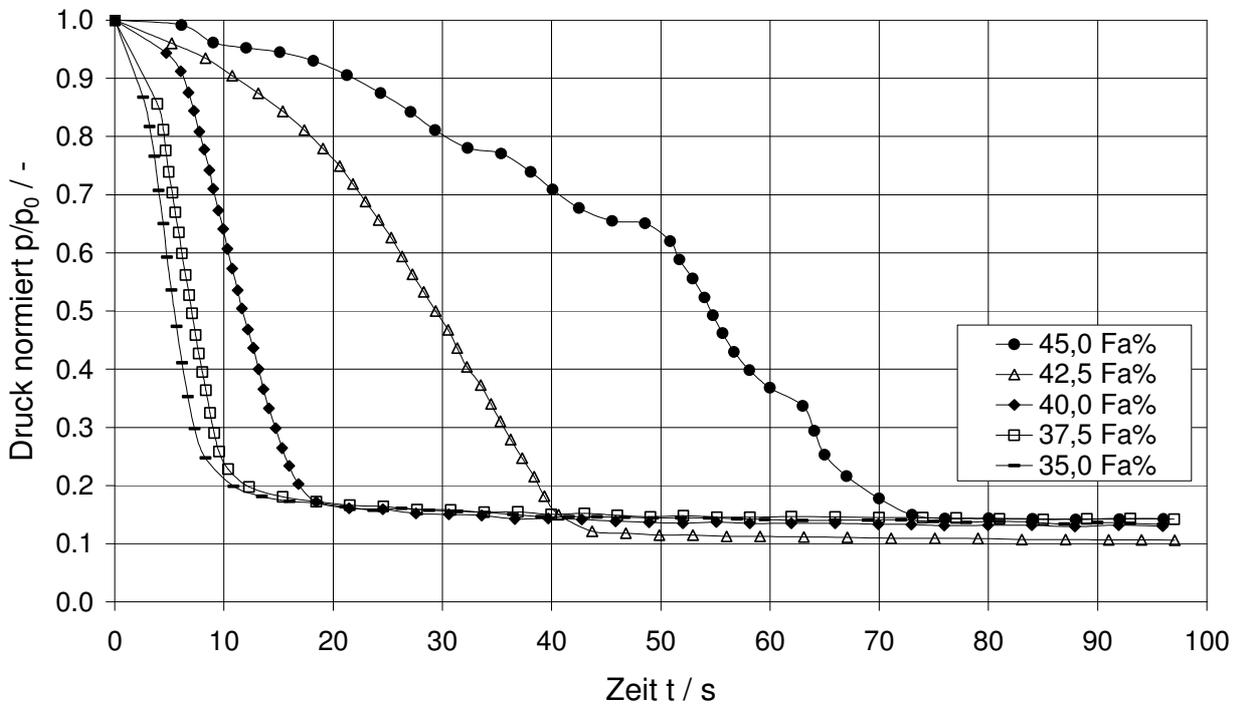


Abbildung 4-5: Druck-Zeit Graph einer Papiermischung von gestrichenem und ungestrichenem Papier, 2 Ma%, gemessen mit der Manometerzentrifuge. Die Ergebnisse sind auf g normiert.

bei höheren Faseranteilen konvex. Es ist dadurch zu erklären, dass sich die Feststoffmenge, die sedimentiert, während des Sedimentationsvorgangs erhöht. Durch Agglomeration und Ausrichtung der Fasern während der Sedimentation bilden sich Cluster, die schneller sedimentieren als einzelne Fasern. Dies wird auch von Bulter und Shaqfeh [5] sowie Herzhaft und Guazelli [8] beschrieben.

Das Ziel ist zu erkennen, bei welchem Faseranteil der Umkehrpunkt zwischen einem konkaven Druck-Zeit Graphen, dem eine partikeldominierte Sedimentation zugrunde liegt, und dem konvexen Graphen, der aus einer faserdominierten Sedimentation resultiert, ist. Um den Umkehrpunkt zu bestimmen, wurden Mischungen aus dem gestrichenen Papier und dem ungestrichenen Papier mit verschiedenen Faseranteilen hergestellt. Man erkennt aus den Druck-Zeit Graphen in Abbildung 4-5, dass der Umkehrpunkt zwischen 40 Fa% und 45 Fa% liegt. Unterhalb dieses Umkehrpunktes in der Partikeldominierten Sedimentation wird ebenfalls die Sedimentationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Faseranteils untersucht (siehe Abbildung 4-6).

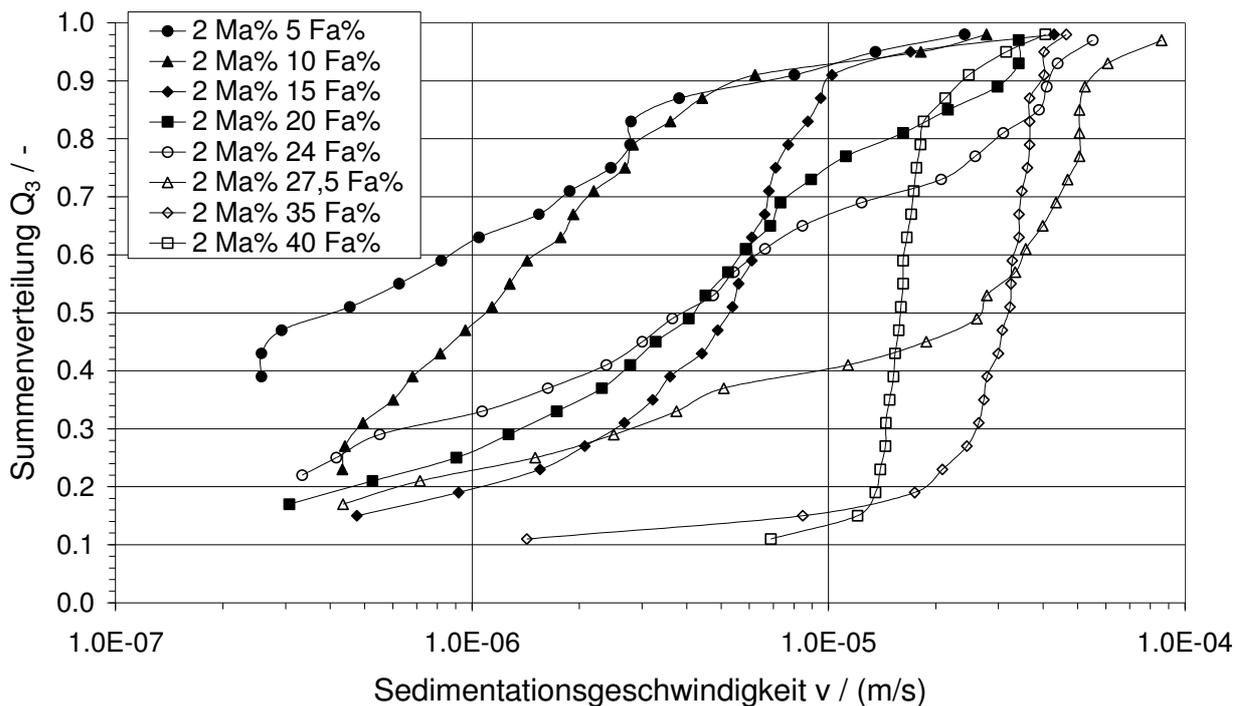


Abbildung 4-6: Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung der Mischungen der ungestrichenen und gestrichenen Papiers, bei 2 Ma% und verschiedenen Faseranteilen, gemessen mit der Langarm Zentrifuge. Die Ergebnisse sind auf g normiert.

Die Ausgangssuspension ist das gestrichene Papier. Dieses wird mit Hilfe des ungestrichenen Papiers gemischt, um Faseranteile über 25 Fa% zu erhalten. Bei Mischung mit der reinen Streichfarbe erhält man Faseranteile unter 25 Fa%. Zwischen 24 Fa% und 40 Fa% erkennt man,

dass je höher der Faseranteil, desto mehr Fasern sedimentieren mit der gleichen Sedimentationsgeschwindigkeit. Zwischen 30 Fa% und 40 Fa% erhöht sich die Geschwindigkeit der feinen Stoffe wohingegen die Geschwindigkeit der Agglomerate und großen Teilchen langsamer wird. Dies spricht für eine gegenseitige Behinderung, die zunimmt je mehr Fasern in der Suspension sind. Bei 35 Fa% oder 40 Fa% sedimentieren schließlich 85 % des Feststoffes mit der gleichen Sedimentationsgeschwindigkeit, bei 27,5 Fa% sind es nur 50 % des Feststoffes und bei 24 Fa% kann man keinen ausgeprägten Bereich feststellen. Dies liegt ebenfalls an der zunehmenden Behinderung zwischen den Partikeln und Fasern. Zwischen 5 Fa% und 24 Fa% wird die mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit langsamer, denn je weniger Fasern in der Suspension, desto weniger Agglomerate werden gebildet und desto langsamer sinkt der gesamte Feststoff. In Abbildung 4-7 ist das  $\zeta$ -Potential der Papiersuspensionen und der Suspensionen der einzelnen Komponenten in Abhängigkeit des pH-Wertes aufgetragen.

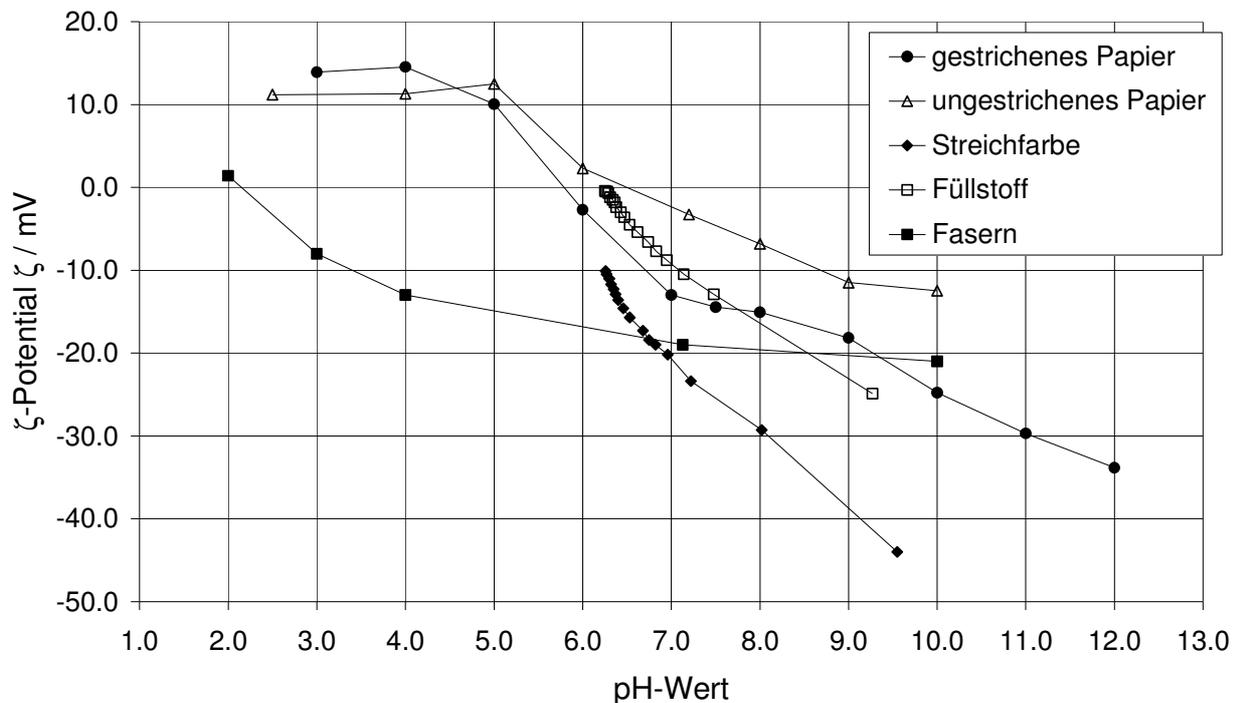


Abbildung 4-7:  $\zeta$ -Potential der gestrichen und ungestrichen Papiers bei verschiedenen pH-Werten

Im sauren Bereich ist das  $\zeta$ -Potential der Papiersuspensionen positiv und das  $\text{CaCO}_3$  löst sich. Beim Ur pH-Wert (ca. 7.5) der Suspensionen ist das  $\zeta$ -Potential des ungestrichenen Papiers höher, als das der Einzelkomponenten. Das des gestrichenen Papiers liegt zwischen dem der einzelnen Komponenten. Bei Erhöhung des pH-Wertes verringert sich das  $\zeta$ -Potential der einzelnen Komponenten schneller, als das der Papiersuspensionen, so dass bei einem pH-Wert von 10 die Füllstoffe und Streichfarben ein geringeres  $\zeta$ -Potential haben als die

Papiersuspensionen. Auf Grund des niedrigeren  $\zeta$ -Potentials bei einem pH-Wert von 10 sollten die Agglomerate kleiner sein. Dies zeigt auch die Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung in Abbildung 4-8.

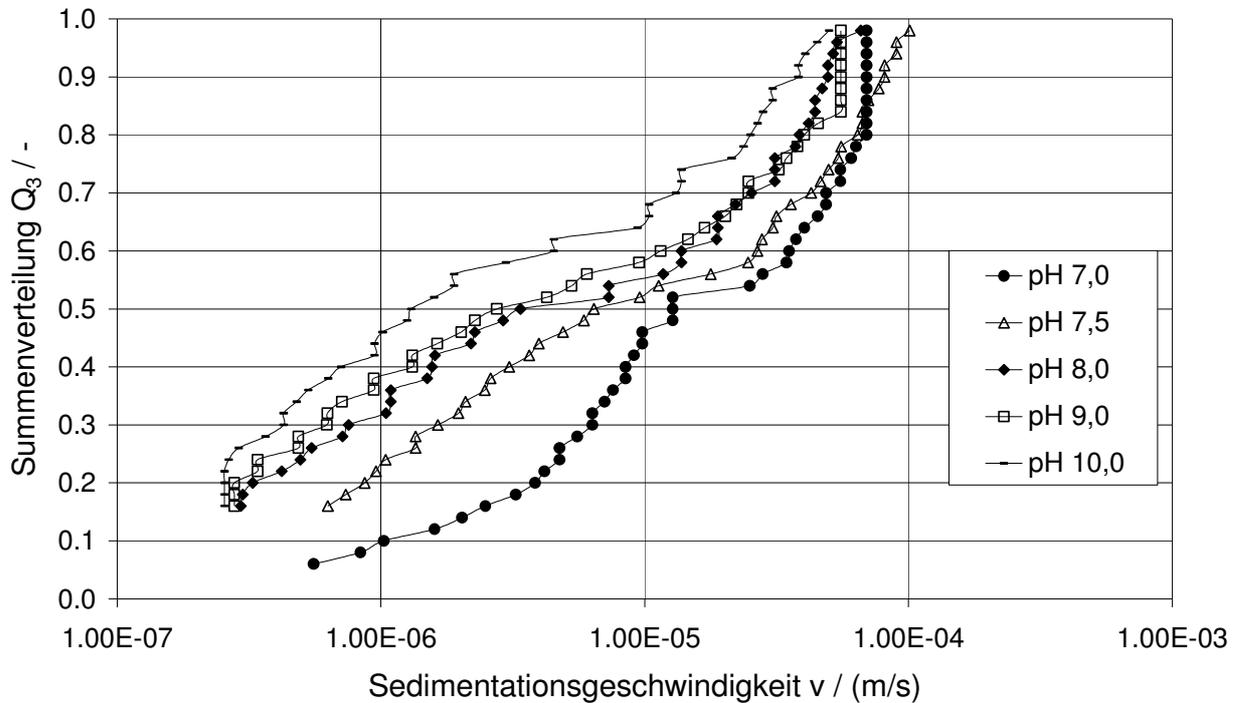


Abbildung 4-8: Sedimentationsgeschwindigkeits-Verteilung des gestrichenen Papiers bei verschiedenen pH-Werten

## 5 Zusammenfassung

Es wurde am Beispiel von Papierfeinstoffen gezeigt, dass die Sedimentationsgeschwindigkeit von Faser-Partikel Suspensionen von der Massenkonzentration des Feststoffes, von dem Faser-Partikel Verhältnis und von dem pH-Wert der Suspension abhängt. Bei Erhöhung der Massenkonzentration der Suspension aus ungestrichenem Papier nimmt die gegenseitige Behinderung so zu, dass die Sedimentationsgeschwindigkeit abnimmt. Des Weiteren sedimentiert eine große Menge an Feststoff gleich schnell. Das gestrichene Papier zeigt eine bimodale Sinkgeschwindigkeitsverteilung, da sein Partikelanteil größer ist als der Partikelanteil des ungestrichenen Papiers. Außerdem binden sich die Streichfarbenpartikel an die Fasern, so dass der Sedimentationsgeschwindigkeits-Unterschied der einzelnen Bereiche noch größer wird. Durch Veränderung des Faseranteils über die Mischung des gestrichenen und ungestrichenen Papiers erkennt man, dass bei einem Faseranteil von über 40 Fa% die Sedimentation faserdominiert ist, d. h. dass Ausrichtungseffekte im Sedimentationsverlauf klar zu erkennen

sind. Schließlich bewirkt eine  $\zeta$ -Potentialänderung eine geringere Agglomeration und dadurch eine geringere mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit.

## 6 Literatur

- [1] G. K. Batchelor. The stress system in a suspension of force free particles. *J. Fluid Mech.*, 41:545-570
- [2] M. Beiser. Sedimentation submikroner Partikel in Abhängigkeit physikalisch-chemischer Einflüsse und ihr Separationsverhalten in Dekantierzentrifugen. Dissertation. Universität Karlsruhe (TH), 2006.
- [3] G. Bickert. Sedimentation feinsten suspendierter Partikeln im Zentrifugalfeld. Dissertation. Universität Karlsruhe (TH), 1997.
- [4] J. F. Brady and G. Bossis. Stokesian Dynamics. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 20:111-157, 1988.
- [5] J. E. Butler and E. S. G. Shaqfeh. Dynamic simulations of the inhomogeneous sedimentation of rigid fibres. *J. Fluid Mech.*, 468:205-237, 2002.
- [6] L. Durlofsky, J.F. Brady and G. Bossis. Dynamic simulations of hydrodynamically interacting particles. *J. Fluid Mech.*, 180:21-49, 1987.
- [7] J. Happel und H. Brenner. *Low Reynolds Number Hydrodynamics*, Martinus Nijhoff Publishers. The Hague, The Netherlands, 3<sup>rd</sup> edition, 1983.
- [8] B. Herzhaft und E. Guazzelli. Experimental study of the sedimentation of dilute and semi-dilute suspensions of fibres. *J. Fluid Mech.* 384:133-158, 1999.
- [9] P. Kumar und B.V. Ramarao. Enhancement of the sedimentation rates of fibrous suspensions. *Chem Eng. Comm.* 108:381-401, 1991.
- [10] A. Schmidt and K. G. Siebert. *Design of Adaptive Finite Element Software*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.

[11] G. G. Stokes. On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion of Pendulums. Trans. Cambridge Phil. Soc., 9:8-106, 1851.

[12] M. Stolarski, C. Eichholz, B. Fuchs and H. Nirschl. Sedimentation acceleration of remanent iron oxide by magnetic flocculation. China Particuology, 3:145-150, 2007.