

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften

Wirkungsweise und Dosierung von FHM in der mechanischen Überschussschlammwässerung

Graz, September 2011

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Dipl. – Ing. Wolfgang TITZ

Erstbegutachter:

o. Univ. Prof. DDipl.- Ing. Dr. h.c. Dr. techn. Harald KAINZ
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau
Technische Universität Graz

Zweitbegutachter:

Prof. Dr. - Ing. Norbert DICHTL
Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Technische Universität Braunschweig

meinem Vater Johann TITZ

DANKSAGUNG

Allen voran möchte ich mich bei meinem Betreuer, Prof. Harald KAINZ für seine Begleitung bedanken. Er hatte unendlich viel Geduld mit mir und schuf optimale Arbeitsbedingungen.

Weiters gilt mein Dank dem Zweitbegutachter, Prof. Norbert DICHTL der das Korreferat übernahm.

Weiterhin danke ich den Mitarbeitern vom Institut für Prozess- und Partikeltechnik, insbesondere Herrn Siegfried WOLF, Johann GRUBBAUER, Johann FISCHER, Lydia FRAIDL und Rudolf HÖTZL. Dem Team rund um Herrn Bernd STOJANOVIC vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau danke ich für die Unterstützung bei den technischen Versuchen in den Jahren 2009 und 2011.

Ebenfalls zu großem Dank verpflichtet bin ich all jenen Menschen die mich während meiner Dissertation begleitet und unterstützt haben. Hier möchte ich besonders meiner Familie speziell meiner Mutter und meinem, plötzlich verstorbenen Vater danken, dem auch diese Arbeit gewidmet sein soll.

Ein großer Dank gilt auch meiner Lebenspartnerin Sandra da Sie immer für mich da war, ein offenes Ohr für meine Probleme hatte und meine schlechte Laune viel zu oft ertragen musste.

Kurzfassung

Wirkungsweise und Dosierung von FHM in der mechanischen Entwässerung

Die mechanische Überschussschlamm-entwässerung in Kläranlagen gewinnt zunehmend an Bedeutung, da immer mehr Klärschlamm entsorgt werden muss. Durch die Zugabe von Flockungshilfsmitteln wird die Entwässerungseigenschaft der Schlammsuspension positiv beeinflusst. Trotz großer Fortschritte in der Schlamm-entwässerung treten im Betrieb Schwankungen hinsichtlich der Entwässerungsqualität auf, weil sich die Entwässerungseigenschaft im Laufe des Tages ändert.

Um die Abtrennung der festen von der flüssigen Phase zu beschleunigen, werden der fest-flüssig Suspension Polymere zugesetzt. Diese verbinden sich mit dem Feststoff und bilden eine große Flocke, die sich wesentlich schneller und besser absetzen kann, als einzelne Partikel in der Suspension. Durch die unterschiedlichen Anforderungen an die Abwässer, ist die Auswahl der unterschiedlichen Polymere zur optimalen mechanischen Überschussschlamm-entwässerung technisch oft mit sehr großen Problemen behaftet. Derzeit ist viel Wissen und Erfahrung notwendig um eine subjektive Einschätzung über das geeignete Polymer für die entsprechenden Aggregate zu verifizieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss von unterschiedlichen Flockungshilfsmitteln auf Basis der Flockenfestigkeit zu ermitteln. Die Dosierung kann dadurch in Bezug auf die Entwässerungsleistung, im Hinblick auf die Produktauswahl, als auch die Wirtschaftlichkeit optimiert werden. Ein wesentliches Ziel ist es zu ermitteln, inwieweit die Beigabe des FHM mit der interpartikulären Kraft zusammenhängt. Dies bedeutet im Hinblick auf die Dosierung, jenen Punkt zu ermitteln, an dem die Dosierung optimal für die Entwässerung und die Wirtschaftlichkeit ist.

Mit Hilfe eines am Institut für Prozess- und Partikeltechnik der TU-Graz entwickelten Analysegerätes wird der Durchdringungswiderstand des geflockten Schlammes bestimmt. Es wurde eine neue Größe, der E_{ST} -Index, eingeführt, der die Flockenkompaktheit beschreibt. Eine solche Einführung bringt einen Mehrwert für den Kläranlagenbetreiber, Polymermittelhersteller und Aggregatenhersteller.

Mittels Penetrationsprinzip konnte gezeigt werden, dass eine Messung der Dosierung des FHM's über die Flockenkraft möglich ist. Die Gewichtsabnahmekurve charakterisiert die Flockenstruktur individuell in Abhängigkeit von der Dosierkonzentration, in einem wesentlich schnelleren Zeitraum als es bis dato möglich ist.

Abstract

Mode of operation and dosage of polymers in the mechanical dewatering process

The importance of mechanical dewatering in wastewater treatment plants is increasing because more and more sewage sludge has to be disposed. To influence dewatering properties positively, polymers are added. Although there is a big progress concerning sludge dewatering, there are consistent variations in dewatering quality because the dewatering properties are changing throughout the day.

To make the separation of the solid and the liquid phase easier, polymers are added. These connect with the solid substance and build a big flock that is able to sink faster and better than unique particles in the suspension. Due to different demands relating to sewage the selection of polymers for the optimal mechanical dewatering is connected with various technical problems. Today know how and experience is necessary to make a subjective assessment about the right polymer for the appropriate aggregate.

The aim of this paper is to investigate the influence of different polymers on the basis of the flock strength. As a consequence, one should be able to optimize the dosage concerning dewatering result, product selection as well as economic efficiency. A further result of this paper should be the examination of the relation between interparticular forces and the addition of polymers. This means regarding to the dosage to find the point where the dosage can be described as optimal for the dewatering and the dosage.

On the basis of a measurement that was developed at the technical university Graz, the penetration resistance of the flocked sludge is determined. A new quantity- the E_{ST} - Index- is introduced. This quantity characterises the compaction of the flock. Such a introduction is an advantage for the dewatering plant operator, producer of the polymers as well as the producer of the aggregates.

Because of the penetration principal, it could be approved that the measurement of the dosage of the polymer is possible. The curve that shows the decreasing of the weight characterises the flock structure individually in dependence of the dosage concentration faster than it was possible so far.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Allgemeiner Teil „Überschussschlammwässerung“	3
1.2 Problemstellung	4
1.3 Zielsetzung	6
2 BEGRIFFSERKLÄRUNGEN UND DEFINITIONEN	7
3 GRUNDLAGEN	10
3.1 Grundlagen der Partikelhaftung	10
3.2 Elektrochemische Doppelschicht und Zetapotential.....	18
3.3 Entstehung von Ladungen	25
3.4 Koagulation und Flockung	30
3.5 FHM in der Abwasserreinigung.....	43
3.5.1 Einteilung FHM	44
3.5.2 Lösungsstruktur (Wirkungsweise)	45
4 CHARAKTERISIERUNG VON FLOCKEN	48
4.1 Bisherige Forschungsergebnisse.....	49
4.2 Messmethoden zur Ermittlung der Dosierung von FHM	56
5 DAS PENETRATIONSPRINZIP ZUR CHARAKTERISIERUNG VON FLOCKEN	64
5.1 Einleitung	64
5.2 Erläuterung des Messprinzips.....	65
5.3 Beschreibung des Messaufbaus.....	70
5.3.1 Eindringen in Wasser	73
5.3.2 Eindringen in geflockten Klärschlamm	74
6 MESSDATEN UND AUSWERTUNG	84
6.1 Messungen mit Strength Tester	84
6.2 Messungen mit anderen Verfahren.....	96
6.2.1 SWW- Modell.....	96

6.2.2	Rotationsviskosimeter	99
6.2.3	Zeta- Potentialmessung	100
6.3	Vergleich zwischen Strength Tester und anderen Verfahren	101
6.4	Auswertung	104
6.5	Rückschlüsse auf Zusammenhänge der eruierten Parameter	115
6.6	Praktische Verwertung der Daten	115
6.7	Regelung statt Steuerung	117
6.8	Mathematische Formulierungen des Penetrationsprinzips	119
7	ERGEBNISSE / DISKUSSION	124
8	ZUSAMMENFASSUNG	128
9	VERZEICHNISSE	132
9.1	Literatur.....	132
9.2	Tabellen.....	138
9.3	Abbildungen.....	139
ANHANG	I

1 Einleitung

1.1 Allgemeiner Teil „(Überschussschlammmentwässerung)“

In unserer heutigen Gesellschaft nehmen Luxusgüter einen immer größeren Stellenwert ein, da ein ständig steigender Lebensstandard auch zu einer Zunahme des Rohstoffverbrauches und damit zu einer erhöhten Belastung der Umwelt führt. Soll auch in Zukunft ein hoher Lebensstandard beibehalten werden, so sind wir verpflichtet mit den vorhandenen Ressourcen dementsprechend schonend und verantwortungsvoll umzugehen, um unseren Lebensraum lebenswert zu erhalten.

Unter den angesprochenen Ressourcen versteht man nicht nur die Rohstoffe zur Energiegewinnung und Güterproduktion, sondern es sind dies auch jene die, scheinbar unbegrenzt zur Verfügung stehen wie Luft und Wasser. Durch diese beiden Rohstoffe ist Leben auf unserem Planeten überhaupt erst möglich. Weiters werden sie in beinahe allen Produktionsprozessen eingesetzt, Luft in Verbrennungsprozessen als Transportmittel oder in Trocknungsanlagen und Wasser als Grundsubstanz zur Güterproduktion sowie als Hilfsstoff zur Reinigung und Kühlung.

Durch diese Nutzung werden diese Ressourcen mehr oder weniger stark verunreinigt. Mit dem Ansteigen der Weltbevölkerung und steigendem Lebensstandard weltweit werden die negativen Auswirkungen der uneingeschränkten Nutzung von Luft und Wasser auf die Natur immer deutlicher ersichtlich.

Die Notwendigkeit, Abwasser mittels technischen Hilfsmitteln zu reinigen ergab sich durch das Entstehen menschlicher Ballungszentren.

Durch den Einsatz von Kläranlagen vor allem biologischen Kläranlagen in kommunalen sowie im industriellen Bereich entsteht Klärschlamm als Folge der Abtrennung von der Fest Flüssig Phase. Der Klärschlamm ist eine kolloide Suspension die aus organischen, anorganischen, gelösten und festen Bestandteilen besteht, die von Kläranlage zu Kläranlage unterschiedlich vorliegen. Die mechanische Überschussschlammmentwässerung nimmt immer mehr an Bedeutung zu, da immer mehr Klärschlamm entsorgt werden muss. Die Entwässerung ist ein sehr wichtiger Schritt da für die Verbrennung eine gute Entwässerung wesentlich ist. Die Qualität der Entwässerung von Klärschlamm hängt von vielen Einflussgrößen wie, z.B. dem Anteil der organischen Trockensubstanz, dem Ladungspotential, den Oberflächeneigenschaften, dem Anteil von Kolloiden, dem Ionenhintergrund u.v.m.

im Abwasser ab. Durch die Zugabe von Flockungshilfs- bzw. Flockungsmitteln wird die Entwässerungseigenschaft der Schlammsuspension positiv beeinflusst. Trotz großer Fortschritte in der Schlammentwässerung treten im Betrieb große Schwankungen hinsichtlich der Entwässerungsqualität auf, weil sich die Entwässerungseigenschaften im Laufe des Tages aufgrund wechselnder Schlammbelastung ändern. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren ist es sehr schwierig konstant gute Entwässerungsergebnisse zu bekommen.

Eine Möglichkeit zur Optimierung des Entwässerungsschrittes soll diese Dissertation aufzeigen.

1.2 Problemstellung

Die biologische Abwasserreinigung nutzt die Mikroorganismen um die Inhaltsstoffe im Abwasser abzubauen. Dabei bildet sich biologischer Schlamm (Klärschlamm) den es gilt in der letzten Reinigungsstufe von der Flüssig- Phase vom Wasser abzutrennen.

Um die Abtrennung der festen von der flüssigen Phase zu beschleunigen, und die Notwendigkeit großer Absetzbecken zu vermeiden, und höhere Feststoffkonzentrationen zu erreichen werden der fest-flüssig Suspension Polymere hinzugefügt. Diese Polymere, auch Flockungshilfsmittel, im Folgenden kurz FHM genannt, verbinden sich mit dem Feststoff und bilden eine große Flocke, die sich wesentlich schneller und besser absetzt, als die Suspension. Werden der Schlammsuspension Polymere hinzugeführt, bilden sich aufgrund von Ladungen Flocken aus. Die Zusammensetzung der Polymere ist von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich.

In der Abwassertechnik erfolgt die Optimierung von Fest/Flüssig-Trennprozessen empirisch. Vorhersagen über die Eignung unterschiedlicher FHM für spezielle Trennprobleme sind zumeist nicht möglich. Polyelektrolyte, die sich bei einem System als überaus effizient erweisen, können für andere Abwässer mit ähnlicher stofflicher Zusammensetzung weniger geeignet sein. Auch die kombinierte Zugabe verschiedener FHM (Dualflockung) zeigt nicht an jeder Abwassersuspension synergistische Effekte, die zu Einsparungen im FHM- Verbrauch führen.

Es ist es teilweise von Vorteil, zwischen Flocken, die mehr Wasser und Flocken, die weniger Wasser enthalten zu unterscheiden. Diese Vielfalt an Flocken und Arten hängt immer vom Schlamm sowie auch von den Entwässerungsaggregaten ab.

Die unterschiedlichen Eigenschaften dieser Flocken sind ein Garant dafür, dass die Trennung an den unterschiedlichen Aggregaten funktioniert. Die am häufigsten verwendeten Entwässerungsaggregate sind:

- Seihbänder
- Entwässerungsscheiben
- Entwässerungstrommeln

Alleine diese drei Entwässerungsaggregate weisen unterschiedliche Merkmale der Entwässerungsqualität auf, die Auswahl der unterschiedlichen Polymere zur optimalen mechanischen Überschussschlamm-Entwässerung oft vor technische Probleme stellen.

Eine optimale Flocke für das Entwässerungsaggregat Seihband bindet einerseits sehr viel Feststoff. Die Kräfte innerhalb der Flocke sollen jedoch sehr instabil sein. Bei diesem Entwässerungsaggregat wird am Beginn die Suspension auf ein Seihband aufgebracht. Dieses trennt die fest/flüssig Phase durch Vibrationsbewegungen, die dazu führen, dass das Wasser in der Flocke nach außen dringt. Daraus kann eine Entwässerung des Schlammes von 6-8% erreicht werden. Durch die instabilen interpartikulären Kräfte kann die Entwässerungsleistung optimiert werden.

Bei den anderen erwähnten Entwässerungsmethoden sind andere Eigenschaften wie z.B. kompaktere Flockenstrukturen gefragt, damit der geflockte Schlamm von der Scheibe oder der Trommel mitgenommen werden kann und das Wasser leichter abfließt. Der Feststoff, also die Flocke, wird dann mittels Schaber von der Scheibe oder Trommel abgetragen und mittels einer Förderschnecke ausgebracht.

Derzeit ist viel Wissen und Erfahrung notwendig um eine subjektive Einschätzung über das geeignete Polymer für die entsprechenden Aggregate zu verifizieren. Eine Hilfestellung dafür ist eine Methode, die in mehreren Varianten angewendet wird. Diese Methode bestimmt die Trockensubstanz und lässt somit auf das geeignete Polymer schließen. Sie ist zeitaufwändiger und liefert erst nach 1-2 Tagen Ergebnisse.

1.3 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, den Einfluss von unterschiedlichen FHM auf die Flockenfestigkeit zu ermitteln. Die Dosierung kann dadurch in Bezug auf die Entwässerungsleistung, im Hinblick auf die Produktauswahl, als auch die wirtschaftliche Dosierungsmenge optimiert werden.

Dies bedeutet, je mehr Flockungsmittel hinzugefügt wird, umso stärker wirken die interpartikulären Kräfte. Daher muss die Zugabe von Flockungsmittel auf die verschiedenen Entwässerungsaggregate (z.B. Seihtische, Siebbandpresse, Entwässerungsscheibe) abgestimmt werden, um den Schlamm optimal zu entwässern. Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zu ermitteln, in wie weit die Beigabe des Flockungshilfsmittels mit der Aufwendung der Kraft im nachstehenden Entwässerungsprozess zusammenhängt. Dies bildet eine wesentliche Grundlage für die Auswahl und Dosierung des Flockungshilfsmittels. Im Hinblick auf die Dosierung, besteht ein Ziel darin, den Punkt zu ermitteln, an dem die Dosierung optimal für die Entwässerung und die Wirtschaftlichkeit ist. Es wird angenommen, dass durch die Ermittlung dieses Punktes Polymer eingespart werden kann, da eine Überdosierung keinen Mehrwert im Hinblick auf die Entwässerungsqualität bringt. Die Auswahl des Polymers wird zurzeit mit Hilfe von subjektiven Einschätzungen der Experten vorgenommen. Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation sollen Grundlagen für die Entwicklung eines Verfahrens darstellen, das die Auswahl des FHM objektiviert und somit eine Hilfestellung für die Experten bietet.

Es ist anzunehmen, dass die unterschiedlichen Entwässerungsmethoden auch unterschiedliche Anforderungen an die Kompaktheit der Flocke haben. Somit besteht ein wesentliches Ziel des Projektes darin, Aussagen über die verschiedenen Anforderungen an die Feststoffkonzentration der diversen Entwässerungsmethoden treffen zu können.

Indem die Flockenkraft sowie die Daten der Betreiber unterschiedlicher Kläranlagen berücksichtigt werden, sollen Eigenschaften gefunden werden, die Einfluss auf die Dosierung des Flockungshilfsmittels haben. Eine sinnvolle Vorauswahl des FHM und eine Prognose des Dosierungsbereiches werden dadurch ermöglicht.

Weiters sollen Aussagen über die verschiedenen Anforderungen an die Flockenkompaktheit getroffen werden. Ein übergeordnetes Ziel dieser Forschung ist es, ein Messverfahren zu entwickeln, das die oben genannten Bereiche zeiteffizienter und wirtschaftlicher abdecken kann, als bisher verwendete Verfahren.

2 Begriffserklärungen und Definitionen

Brückenbildungsmechanismus

Der Brückenbildungsmechanismus wird in der Literatur auch als Flockulation bezeichnet [49].

Dickschlamm

Der entwässerte Schlamm, der durch das Entwässerungsaggregat entsteht.

Dünnschlamm

Der Schlamm der auf das Entwässerungsaggregat aufgegeben wird und jener Schlamm der noch zu entwässern ist.

Entwässerung

In dieser Arbeit wird unter Entwässerung die mechanische Überschussschlamm-entwässerung bezeichnet. Dieser Schritt findet bei der Entwässerung von Rücklaufschlamm ihren Einsatz. Die Trockensubstanz liegt hier bei ca. 7 % hingegen zur Entwässerung am Ende der Klärschlammbehandlung von Kläranlagen es ca. 25% beträgt. In vielen Literaturstellen wird die mechanische Entwässerung auch Eindickung genannt.

EPS

Extra zelluläre Zellsubstanz. Der sich um den Zellkern bildende Schleim der als Nahrung dient.

Flocke

Man unterscheidet zwischen zwei Arten von Flocken einerseits Belebtschlammflocken, die durch die Belüftung von Klärschlamm entstehen. Andererseits wird in dieser Arbeit die Bildung von Feststoffzusammenschlüssen durch Flockungshilfsmittel als „FLOCKE“ bezeichnet.

Flockenfestigkeit- Flockenkompaktheit

Darunter versteht man die Verflechtung einzelner Schlammfäden bzw. von Mikroschlammflocken zu Makroschlammflocken. Diese Struktur weist eine bestimmte Kompaktheit oder Festigkeit auf, die als Flockenfestigkeit oder Flockenkompaktheit bezeichnet wird.

Flockenkraft

Ist jene Kraft die die Schlammstruktur einem äußeren System entgegensetzt.

Kolloide „(Abwasser – Inhaltsstoffe und Behandlung)“

Die Bezeichnung „Kolloid“ geht auf T. GRAHAM (1805-1869) zurück, der 1861 bei seinen Forschungen entdeckte, dass Lösungen aus Salz, Zucker oder Kupfersulfat durch Pergamentpapier diffundieren, während andere wie Leim, Eiweiss, Stärke, Gelatine oder Gummi arabicum dieses Verhalten nicht zeigen. Aufgrund dieser Eigenschaft teilte er die Stoffe in "Kristalloide" und "Kolloide" ein. Dabei verwendete er den ersten Begriff für die Stoffe, die Kristalle bilden können und den zweiten für diejenigen, die nicht durch Membranen diffundieren wie zum Beispiel Leim. Nach dessen griechischer Übersetzung (κολλα,kolla) und dem griechischen Wort für "Form" oder "Aussehen" (εἶδος,eidos) benannte er die Kolloide, kolloidal heisst somit "leimartig". GRAHAM erkannte als erster, dass es sich bei kolloidal um eine gemessene Art der Aggregation handelt, also eine gemessene Zerteilungsform der Materie vorliegt. [15]

Kolloide sind sehr kleine Partikel, die sich fein verteilt im Wasser befinden. Der Durchmesser dieser Teilchen beträgt 1 bis 100 Nanometer. Diese Partikel können nicht durch Sedimentation oder Flotation entfernt werden. Deshalb werden Koagulation, Flockung und nachfolgende Fällung zur Reinigung von kolloidhaltigem Wasser verwendet. [16]

Konformationsänderung

Vorhersagbare Bewegungen, keine zufälligen, innerhalb eines Proteins, die durch Bindungen eines ganz bestimmten Moleküls ausgelöst werden, wird als Konformationsänderung bezeichnet.

Hexon

Hexosen sind Monosaccharide(Einfachzucker), deren Kohlenstoffgrundgerüst sechs Kohlenstoff-Atome enthält.

Hydrodynamische Partikelradius r_H

Der Diffusionskoeffizient eines freien Brown'schen Teilchens kann nach Stokes-Einstein aus der Viskosität des Lösungsmittels η bei der Temperatur T und dem hydrodynamischen Partikelradius r_H bestimmt werden.

[33]<http://de.wikipedia.org/wiki/Hexosen> - cite_note-Bruice-0

Pentosen

Pentosen sind Monosaccharide, deren Kohlenstoffgrundgerüst fünf Kohlenstoff-Atome enthält.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen der Partikelhaftung, elektrochemische Doppelschicht und Zetapotential, einer der wichtigsten Standardgröße zur Bestimmung der Dosierung von Flockungshilfsmittel sowie auf die Entstehung von Ladungen eingegangen.

3.1 Grundlagen der Partikelhaftung

Hier werden kurz Grundlagen über die Wechselwirkungen durch die van-der-Waals-Kraft und die elektrostatische Kraft gegeben, die für die Agglomeration in der mechanischen Entwässerung die zwei hauptsächlich verantwortlichen Kräfte sind [9,18,19]. Diese Kräfte stellen die Basis für die bereits vorhandenen Lösungsansätze sowie die daraus resultierenden Messmethoden nach Stand der Wissenschaft dar. Weiters sind diese Grundlagen zur Charakterisierung des Penetrationsprinzips von Bedeutung.

Schubert [9,17] legt vier Kräfte der Partikelhaftung zu Grunde. Diese Theorien wurden von Rumpf [19] weiter untersucht und auf 5 Kategorien erweitert die wiederum genauer unterteilt wurden. In weiterer Folge erscheinen die Grundlagen von Isrealachvili [10] von Bedeutung, da dieser eine Einteilung trifft, die für die dispersen Stoffe zweckmäßig erscheint.

Für Schubert sind vier Kräfte von Bedeutung, wovon zwei der Kernphysik zu geordnet werden und auf sehr kurze Entfernung wirken $a < 10^{-5}$ [nm]. Weiters beschreibt er die Gravitationskraft und die elektrostatische Kraft als Einflussfaktoren für die Partikelhaftung. Sind Partikel in Flüssigkeiten suspendiert, so sind weiters Auftriebskraft und Strömungswiderstand zu beachten. Das Ergebnis der resultierenden Kraft führt entweder zu einer Partikelagglomeration oder zu einer Stabilisierung der Dispersion. In vielen realen Stoffsystemen überlagern sich die einzelnen Kräfte [9,17].

In der Literatur findet man folgende Wechselwirkungskräfte zwischen Feststoffteilchen in Flüssigkeiten, die für Partikelhaftungen und die Stabilisierung von dispersen kolloiden Stoffen verantwortlich sind [62-63]:

- Van-der-Waals- Kräfte
- Wechselwirkungskräfte infolge polymerer Sorbationsschichten
- Adhäsionskräfte kurzer Reichweite
- Struktur- und Solvationskräfte
- Elektrische Doppelschichtkräfte [62-63]

J.H. ISREALACHVILI fasst diese Kräfte, die vor allem für die Partikelhaftung von dispersen Stoffen zweckmäßig erscheinen, umfassender zusammen:

- Reine elektrostatische Kräfte
- Kräfte infolge induzierter Dipole
- Quantenmechanische Kräfte [10]

Diese erwähnten Kräfte haben wesentlichen Einfluss auf die Haftmechanismen auf die im Folgenden weiter eingegangen wird.

Die Haftkraft kann formal als Produkt aus Zerreißfestigkeit und Brückenquerschnitt angegeben werden [18]. Die für diese Arbeit bedeutenden Kräfte sind die van der Waals- Kraft und elektrostatische Abstoßungskräfte.

Der Haftmechanismus wird von den anziehenden Kräften und den abstoßenden Kräften beeinflusst. In der Literatur ist vereinbart, dass die Vorzeichen bei anziehender Kraft positiv sind und bei abstoßender Kraft negativ. Die wichtigsten anziehenden Kräfte sind die van-der Waals Kraft mit kurzer Reichweite so wie die Coloumb- Kraft mit langer Reichweite. Die van-der-Waals Kraft ist die wichtigste Haftkraft zwischen den Partikeln in Flüssigkeiten. Diese Anziehungskraft resultiert aus der Energiegewinnung bei einer Überlagerung von elektromagnetischen Feldern. Derartige Felder haben ihren Ursprung in einer zeitlich fluktuierenden Ladungsverteilung in der Elektronenhülle von Atomen oder Molekülen. Zur Berechnung von den Van-der-Waals Kräften sind zwei Theorien aus der Literatur zu entnehmen.

Einerseits die HAMAKER- Theorie, die durch mikroskopische Überlegungen auf sehr einfache Ausdrücke für die Wechselwirkungsenergie in Abhängigkeit vom Oberflächenabstand (a) zwischen den Atomkernen mit einer Proportionalitätskonstanten (A) auch HAMAKER- Konstante genannt, kommt. Er geht davon aus, dass sich die inneratomaren Kräfte paarweise addieren lassen und er somit unterschiedliche Haftparameter erhält [64].

Andererseits die Theorie von LIFSCHITZ der nicht davon ausgeht, dass sich die atomaren Wechselwirkungen addieren lassen, sondern makroskopische Stoffeigenschaften heranzieht. Die Kräfte hängen jedoch in komplexer Art und Weise von der Frequenzbestimmenden Polarisierbarkeit des Dielektrikums (dielektrischen Suszeptibilitäten) ab [41,65].

HOUGH und WHITE [66,67] kombinieren beide Theorien in ihrer Arbeit wobei sie die HAMAKER- Konstante mit einer einfachen LIFSCHITZ- Approximation für eine bestimmte Haftgeometrie ersetzen. Der zeitliche Einfluss der Schwächung der Wechselwirkungsenergien aufgrund der Phasenverschiebung der elektromagnetischen Wellen mit zunehmenden Oberflächenabstand, im Fachjargon Retardierung genannt, kann durch einen empirischen Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Diese Wechselwirkungen zeigen ab einem Abstand von 30-50[nm], bei reinem Wasser 100 [nm], keine Wirkung mehr. Für die unterschiedlichen Zahlenangaben zu denen es in der Literatur kommt, sind verschiedene Autoren, die mit unterschiedlichen Materialien und Methoden gearbeitet haben, verantwortlich. Schubert beschreibt die Kraft von zwei Partikeln mit folgender Formel Glg(1)

$$F_{(a)} = \frac{dV}{da} = \frac{n * A}{a^{n+1}} \quad \text{Glg.(1) [9]}$$

$F_{(a)}$... Partikelkraft

a... Teilchenabstand

V... Dispersions- Energie

A... Lenard- Jones- Potential

n... Molekül Wert (2≈ Wasserstoffbrücken)

Daraus ergibt sich für die Coloumb- Kraft: $F = -\frac{Q_1 * Q_2}{4 * \pi * \epsilon_0 * a^2}$ Glg.(2) [9]

F... Couloumb- Kraft

ϵ_0 ... Dielektrizitäts- Konstante

Q... Ladung

a... Teilchenabstand

und der van-der Waals Kraft: $F = \frac{6 \cdot A}{a^7}$ Glg.(3) [9]

Die Van-der Waals Kraft basiert auf der Wechselwirkung von Elektronen und einem sich zeitlich und räumlich auszubildenden instabilen Dipol.

Über Adhäsionskräfte kurzer Reichweite ist noch wenig bekannt, offensichtlich handelt es sich um spezifische Wechselwirkungen, die bis hin zu chemischen Bindungen reichen können. Adhäsionskräfte treffen zwischen Oberflächen auf, die sich in molekularem Kontakt befinden. Für diese Arbeit ist aber eine genaue Definition nicht relevant, da ohnehin die Summe aller anziehenden Kräfte den abstoßenden Kräften gegenüber gestellt wird und somit eine Aussage für die Dosierung des Polymers getroffen werden kann [8].

Als nächstes werden Struktur und Solvationskräfte in der Aufzählung erwähnt. Diese Kräfte bewirken mit abnehmendem Abstand eine stark zunehmende Abstoßung. In wässriger Umgebung werden sie auch Hydrationskräfte genannt und wurden bei Oberflächenabständen unter 5 [nm] nachgewiesen [68,69,70,71,100,101,102]. Eine zeitlichere und übersichtlichere Einteilung fand man in der Literatur auf der Homepage von Particle Metrix [26]. Sie nennen und unterteilen die wichtigsten Abstoßungskräfte, die für diese Arbeit relevant sind. Diese sind die elektrostatische Abstoßung, sterische Abstoßung sowie die Abstoßung von viskosen Hüllen. Diese sind in der folgenden Abbildung 1 dargestellt.

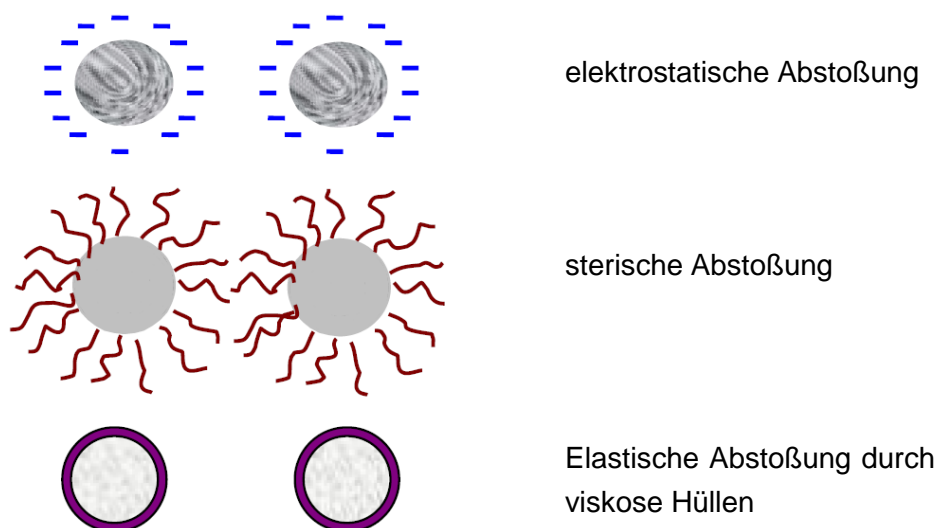


Abbildung 1: Abstoßungskräfte

Bei elektrostatischer Abstoßung geht man davon aus, dass an der Partikeloberfläche Ladungen vorhanden sind, die mit den Gegenionen in der diffusen Schicht kompensiert werden. Die sterische Abstoßung kann auftreten wenn sich Makromoleküle an den Teilchenoberflächen ansetzen. In dieser Arbeit ist die elektrostatische Abstoßung wichtig, da diese Größe beeinflussbar ist und auch gemessen werden kann. Die elastische Abstoßung entsteht aufgrund von viskosen Hüllen die sich voneinander abstoßen. Sie ist vollständigheitshalber erwähnt und wird nicht näher beschrieben. Jedoch steht für diese Arbeit nicht die einzelne Unterscheidung der Kräfte im Vordergrund, sondern die Transaktion zwischen der Summe der anziehenden Kräfte und der abstoßenden Kräfte. Stoßen sich die Teilchen durch die Oberflächenbeschaffenheit ab, so bleibt das Stoffsystem stabil und es findet keine Phasentrennung statt. Die Oberflächenladung von dispergierten Stoffen kann durch adsorbierte, ungeladene Substanzen so vollständig bedeckt werden, dass eine ausreichende Bedingung für eine erfolgreiche Annäherung, die zu einer Haftung führt, nicht mehr vorhanden ist.

Die adsorbierten Schichten von synthetischen und natürlichen hochmolekularen Stoffen erzeugen besonders hohe abstoßende Kräfte und schützen daher die Dispersion gegen Aggregation (Schutzkolloidwirkung) [49]. Polymere ändern diesen Zustand in Richtung anziehenden Kräften. Sind die anziehenden Kräfte groß genug, kommt es zur Agglomeration der Schlammpartikel. Bei ausreichendem Dichteunterschied zum Medium kann Sedimentation eintreten. Das Verhältnis von abstoßenden und anziehenden Kräften wirkt sich auf die Festigkeit der Schlammflocken aus. Bei überwiegend anziehenden Kräften kann von einer festeren Flocke ausgegangen werden, als bei überwiegend abstoßenden Kräften. Daher ist die Festigkeit eine maßgebliche Eigenschaft für das Agglomerationsverhalten. Diese hängt unter anderem von der Porosität, dem Flüssigkeitsanteil, der Benetzung und der Partikelgröße ab. Die Dispersionseigenschaften werden mit zunehmend kleiner werdenden Partikelgrößen durch die Oberflächenkräfte bestimmt. Eine genaue Zusammenstellung über die Haftmechanismen ist in der Tabelle 3 im Anhang zu entnehmen. Eine weitere wichtige Eigenschaft die sich auf den Haftmechanismus auswirkt, ist die Rauigkeit bzw. Oberflächenbeschaffenheit des Partikels [18].

Weiters bildet sich in einer Suspension eine Potentialdifferenz, als Folge einer Adsorption von Ionen an der Feststoffoberfläche aus. Es kann sich durch das Herauslösen von Ionen oder einer hydratisierten funktionellen Gruppe von der Feststoffoberfläche eine Potentialdifferenz ausbilden. Das Oberflächenpotential fällt mit zunehmender Entfernung von der Grenzfläche exponentiell gegen Null ab, so dass ein Zustand der Elektroneutralität im Gesamtsystem entsteht wie im Kapitel 3.2 näher erklärt ist.

Diese elektrischen Doppelschichtkräfte treten also auf, wenn die Doppelschichten zweier Oberflächen miteinander in Wechselwirkung treten. Von der Natur aus haben sie abstoßende Wirkung, da die Wassermoleküle aufgrund ihrer Dipole eine negative Oberflächenladung aufweisen. Auch der Klärschlamm weist von Natur aus eine negative Oberflächenladung auf. Dieses System wird als stabiles System bezeichnet. Dispersionen sind physikalisch dann stabil, wenn sich innerhalb einer Zeit die Teilchengrößenverteilung nicht ändert. Entscheidend für die physikalische Stabilität ist die Dicke der diffusen Ionenschicht, wobei mit steigendem Nernst-Potential oder anders gesagt bei abnehmender Elektrolytkonzentration die Schichtdicke zunimmt. Daraus resultiert eine Erhöhung der elektrostatischen Abstoßungskräfte. Daraus folgt, dass die Partikel infolge der Überlappung der ausgedehnten Ionenschicht, in der die kurz reichenden Van der Waals- Wechselwirkungen die Abstoßungskräfte kompensieren, annähern können. Anders gesagt wird die Summe der anziehenden Van der Waals-Wechselwirkung (V_A) mit der elektrostatischen Abstoßungskraft (V_R) zu einer Gesamtkurve (V_T) gebildet [47,48]. Dies ist in der folgenden Abbildung 2 dargestellt.

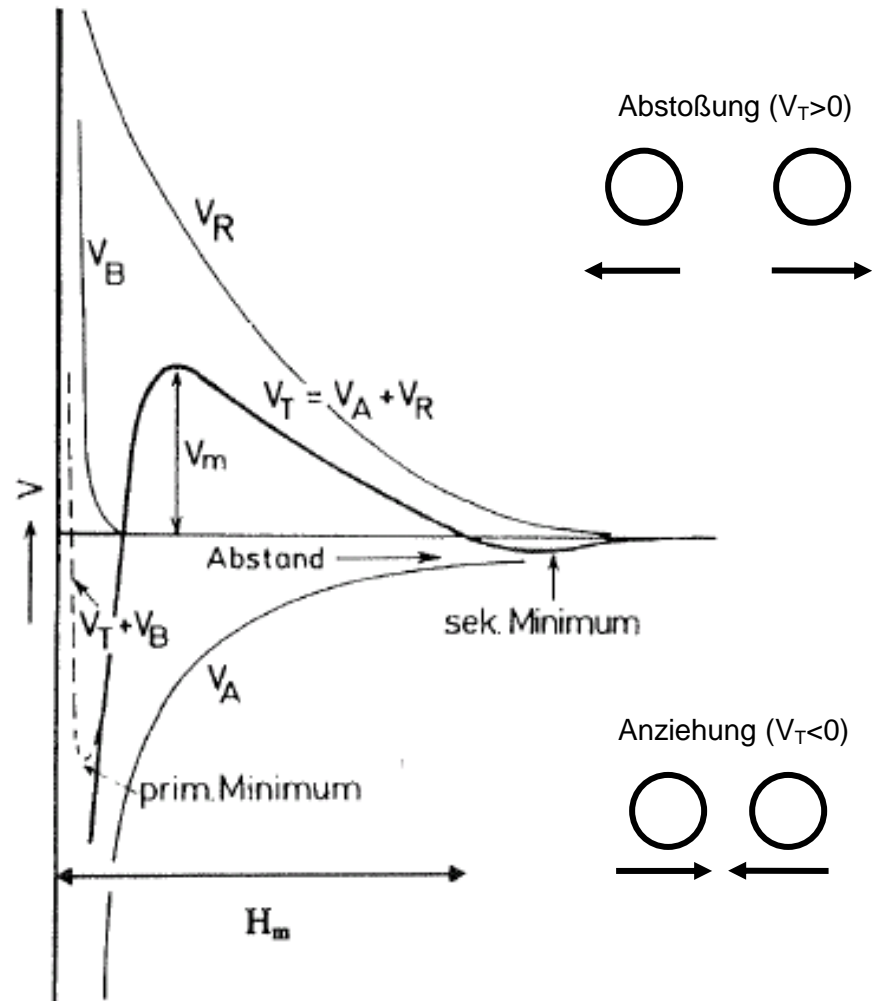


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Energie/Abstandskurve [30]

V_R ... elektrostatische Abstoßungsenergie

V_T ... Gesamtenergie

V_A ... Van der Waals- Wechselwirkung

H ... Partikelabstand (Teilchenabstand)

V_m ... mittlere Energie

V_B ... Born'sche Abstoßung

durch die folgende Formel beschrieben [33].

$$V_R = \frac{a}{v} * 4.62 * 10^{-6} * \gamma^2 * e^{-\kappa * H} \quad \text{Glg.(4)}$$

K... DEBYE- Hückel Parameter	v... Ionenwertigkeit
H... Partikelabstand	a... Partikelradius
V_R ...elektrostatische Abstoßungsenergie	γ ... eine von der Oberflächenpotential ψ_0 abhängige Funktion

Wird der Partikelabstand (H) verringert, nimmt die anziehende Van der Waals-Wechselwirkung (V_A) die näherungsweise mit nachstehender Gleichung beschrieben wird, zu. Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, dass die anziehenden Van- der Waals-Kräfte (V_A) mit kleinerem Abstand zunehmen.

Bei der Entfernung von 1[nm] überwiegen die Anziehungskräfte ($V_A > V_R$), so dass die resultierende Gesamtenergie (V_T) einen negativen Wert annimmt [48].

$$V_A = \frac{-A * a}{12 * H} \quad \text{Glg.(5)}$$

V_A ...Van- der Waals- Kräfte

a... Partikelradius

H... Partikelabstand

Überwinden die annähernden Partikel die Energiebarriere ($V_{T,max}$), wird der Teilchenabstand so weit verringert, dass die anziehenden Wechselwirkungen gegenüber den Abstoßungskräften überwiegen und es zur Koagulation der Teilchen kommt.

Bei sehr geringen Abständen von wenigen Å, dominiert eine weitere abstoßende Kraft. Dies ist die sterische Abstoßung, bei Ionen- auch Bornsche Abstoßung genannt. Das Abstoßungspotential oder die Bornsche Abstoßungsenergie (V_B) ist in der Abbildung 2 dargestellt. Diese ergibt sich daraus, dass für eine weitere Annäherung der Partikel die endotherme Entfernung der Hydrathülle notwendig ist.

Für die Stabilisierung von Dispersionen ist die Born'sche Abstoßungskraft weniger von Bedeutung, da es keinen Unterschied für die Praxis macht, ob aggregierte Feststoffpartikel noch durch eine Hydrathülle getrennt sind oder nicht.

Addiert man die Kurve der Gesamtenergie (V_T) mit der Bornschen Abstoßungsenergie (V_B) als Funktion des Partikelabstandes x , kann dies zum so genannten Minimum führen. Daraus resultiert eine irreversible Koagulation. Die Partikel können nur mehr mit großem Energieaufwand z.B. durch mechanisches Rühren redispersiert werden. Bei größeren Abständen überwiegen die anziehenden Van der Waals Kräfte (V_A) die ein sekundäres Minimum ausbilden. Dabei kommt es zur Ausbildung von lockeren Flocken bzw. Aggregaten, die sich leicht durch mechanische oder durch thermische Einwirkung redispersieren lassen. Im sekundären Minimum können nur große Partikel koagulieren, da die Van der Waals-Wechselwirkung entsprechend der Gleichung (5) verhältnismäßig zur Partikelgröße ist [30].

In diesem Kapitel wurde ein Überblick über die Wechselwirkungen von Partikeln gegeben. Speziell jene Kräfte, die für die Koagulation von Teilchen in der mechanischen Überschussschlammwässerung von großer Bedeutung sind wurden dargestellt. Die wichtigsten Einflussfaktoren für die Kräfte wurden aufgezeigt und resultieren in den energetischen Erklärungen. Im folgenden Kapitel wird als weitere Grundlage die elektrochemische Doppelschicht beschrieben.

3.2 Elektrochemische Doppelschicht und Zetapotential

Um das Zeta- Potential beschreiben zu können, welches eines der wichtigsten Messgrößen zur Bestimmung des Flockungshilfsmittels in der mechanischen Entwässerung darstellt, ist es notwendig ein Verständnis der elektrochemischen Doppelschicht zu wecken. Daher werden in diesem Kapitel Grundlagen der elektrochemischen Doppelschicht beschrieben, um in weiterer Folge dieses Kapitels auf das Zeta- Potential genauer eingehen zu können.

Helmholtz entwarf vor dem Doppelschichtmodell ein Modell, welches die Adsorption von Ionen in einer starren Doppelschicht annimmt, aus der ein linearer Potentialabfall das Ergebnis war. Diese Helmholtz-Schicht lässt sich in eine äußere und innere Helmholtz-Schicht unterteilen. Diese Theorie wurde von Gouy und Chapmann weiterentwickelt. Sie gingen von einer thermischen Bewegung der Gegenionen aus. Diese Bewegung führt zur Bildung über mehrere Moleküllagen zur diffusen Schicht (Gouy-Chapmann Doppelschicht) [29].

Um die Ladungsverhältnisse zu beschreiben wird das Doppelschichtmodell nach Stern herangezogen. Wobei diese eine Kombination aus der Helmholtz und Gouy-Chapmann Doppelschicht ist. Die Stern-Theorie beschreibt die Ionenschicht von geladenen Partikeln in elektrolythaltigen Lösungen.

Der Potentialverlauf ist in der Abbildung 3 ersichtlich [46]. Dagegen wird bei geladenen Partikeln in elektrolythaltigen Medien ein komplexer Aufbau der Ionenschicht angenommen [30].

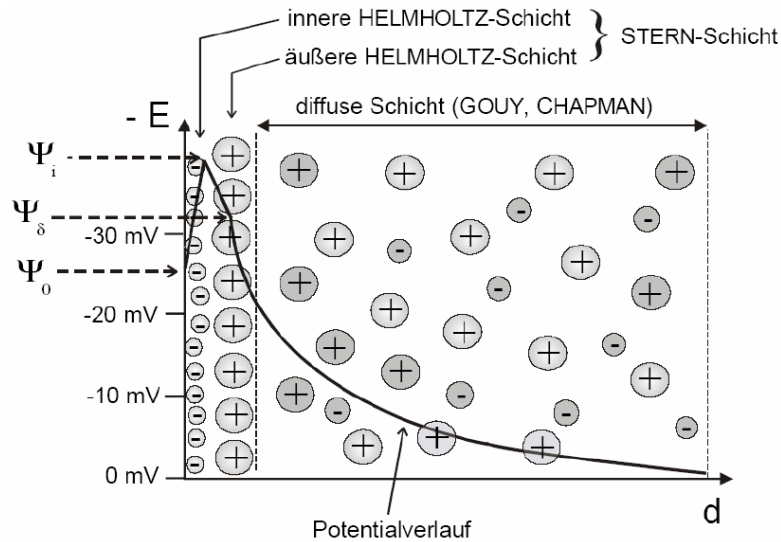


Abbildung 3: Elektrochemisches Doppelschichtmodell [30]

E ...Potentialverlauf

Ψ_i ... innerer Helmholtzschicht

d ... Partikeloberflächenabstand

Ψ_δ ... äußere Helmholtzschicht (Stern-Potential Ψ_s oder Ψ_a)

ψ_0 ...Oberflächenpotential

In der Abbildung 3 ist der Aufbau von einer elektrochemischen Doppelschicht an ein negativ geladenes Partikel bzw. deren Partikeloberfläche in einem elektrolythaltigen Dispergiermittel zu sehen. Dabei ist der Potentialverlauf (E) in Abhängigkeit vom Abstand (d) der Partikeloberfläche aufgetragen. Das Ψ_0 ist das Oberflächenpotential bzw. Nernst-Potential des Partikels. Ψ_i ist das Potential der inneren Helmholtzschicht und Ψ_δ der äußeren Helmholtz Schicht bzw. das Stern-Potential. [30].

Die Van-der-Waals-Kräfte hängen sehr stark von der Partikelumgebung ab. Die starken Unterschiede der Oberflächenrauigkeit verändern den Abstand zwischen den Phasengrenzen. Diese Veränderung ist gekoppelt mit dem Adsorption- und Desorptions-Gleichgewicht das folglich starken Einfluss auf die Kraftwirkung hat.

An der Phasengrenzfläche lagert sich eine Schicht aus Gegenionen an, diese mono- bis bimolekulare Schicht wird als Stern-Schicht bezeichnet [3]. Aufgrund des erhöhten Raumbedarfs der hydratisierten Kationen ist das Zahlenverhältnis Anionen/Kationen innerhalb dieser Stern-Schicht größer, d.h. es liegen mehr Anionen als Kationen vor, woraus ein negativer Ladungsüberschuss resultiert. Um diesen Ladungsüberschuss kompensieren zu können befinden sich die Gegenionen in der diffusen Schicht, in der die Kationen und Anionen der Diffusionsbewegung unterliegen und nicht mehr fixiert sind. Aufgrund der elektrostatischen Anziehung liegt in der Nähe von der Partikeloberfläche ein großer Überschuss an positiven Gegenionen vor, die mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche zugunsten der Anionen abnehmen. Dadurch nähert sich das Potential exponentiell gegen Null. Idealerweise ist die Oberflächenladung in der flüssigen Phase in unendlicher Entfernung vollständig durch Ionen kompensiert und Elektronenneutralität im Gesamtsystem hergestellt. Aufgrund des Potentialverlaufes müsste die diffuse Schicht eine unendliche Ausdehnung besitzen. Daher wird die Dicke der diffusen Schicht als Abstand von der Oberfläche definiert, in dem das Stern-Potential (Ψ_δ) auf den Wert $1/e$ abgefallen ist. Die Dicke der diffusen- Schicht entspricht hierbei dem reziproken Wert des Debye-Hückel- Paramters (κ) der ein Maß für die Ausdehnung der diffusen Doppelschicht ist. Dies ist u.a. von der Konzentration und Wertigkeit der gelösten Ionen sowie der Dielektrizitätskonstante (ϵ) des Dispersionsmediums abhängig [46].

Die Dicke der diffusen Schicht wird von mehreren Faktoren beeinflusst:

- Ein geringes Nernst-Potential führt zu einer Abnahme der Schichtdicke, da weniger Gegenionen zur Ladungskompensation angelagert werden.
- Hohe Elektrolytkonzentrationen im Dispersionsmittel verringern die Ausdehnung der diffusen Schicht, da diese zu einer Erhöhung der Gegenionenkonzentration in der Nähe der Stern-Schicht führen. Dadurch fällt das Potential steiler ab.
- Mit steigender Ladungszahl der Gegenionen, bei gleich bleibender Elektrolytkonzentration, nimmt ebenfalls die Schichtdicke ab. Dieses Verhalten wird in der Schulz-Hardy-Regel quantitativ beschrieben, wobei der Einfluss von ein-, zwei- und dreiwertigen Gegenionen mit dem Verhältnis 1:50:10000 angegeben wird [28].

Da man nach Stand der Technik diesen mikroskopischen Vorgang nicht messen kann wird eine Hilfsgröße das Zetapotential herangezogen. Das Zetapotential ist jenes Potential, das sich bei der Scherebene einstellt, wenn die das Partikel umgebende Ionenwolke infolge einer aufgegebenen Relativgeschwindigkeit zwischen Feststoff und Flüssigkeit gesichert wird. Diese Definition des Zetapotentials ist keine eindeutig definierte physikalische Zustandsgröße. Diese Größe ist weiter noch abhängig von der äußeren Helmholtz-Schicht (Stern- Potential) ψ_s , in manchen Literaturstellen auch ψ_a genannt, und dem Potentialabfall über dem Abstand von der Partikeloberfläche. Der Potentialverlauf für ein kugelförmiges Partikel ergibt sich aus der Glg.(6)

$$\psi = \frac{\psi_s * a}{s * e^{(-K(s-a))}} \quad \text{Glg.(6)}$$

ψ ... Zetapotential

s... Abstand zum Partikelmittelpunkt

ψ_s ... äußere Helmholtz- Schicht (Stern-
Potential)

K... Debye- Hückel- Parameter

a... Partikelradius

ψ_0 ...Oberflächenpotential

Um die Dicke der diffusen Schicht zu beschreiben wird der Reziprok des Debye-Hückel-Parameters herangezogen. Der Debye-Hückel-Parameter ist von den Konstanten, die in der Glg. (7) zu sehen sind, abhängig.

$$K = \left(\frac{e^2 * \sum n * z^2}{\epsilon * k * T} \right)^{0,5} \quad \dots \text{Glg. (7)}$$

K... Debye- Hückel- Parameter

T... absolute Temperatur

ϵ ... Dielektrizitätskonstante

n... Ionenzahl

e... Elementarladung

z... Wertigkeit

k... Boltzmann- Konstante

Daraus ist zu sehen, dass K ausschließlich von den Parametern Temperatur und der Elektrolytenkonzentration bestimmt wird. Wird die Umgebungsbedingung verändert, kann zwischen einer Veränderung des Oberflächenpotentials und einer Änderung des Potentialabfalls in der diffusen Ionenhülle nicht unterschieden werden.

Eine Hauptabhängigkeit des Zetapotentials stellt jedoch der pH-Wert dar, der häufig nicht berücksichtigt wird.

DERJAGUIN und LANDAU sowie VERWEY und OVERBEEK kurz DLVO genannt, konnten durch eine Überlagerung von z. B. sterischen, elektrostatischen oder van-der-Waalschen Wechselwirkungen zwischen den dispergierten Teilchen, das Stabilisationsverhalten kolloidaler Systeme sehr gut beschreiben (DLVO-Theorie). Theoretisch werden die Oberflächen der kolloiden Teilchen als Kondensatorplatten angesehen, an deren Oberflächen sich in einer Elektrolytlösung elektrochemische Doppelschichten ausbilden. Nähern sich die Teilchen an, so überlappen sich die Doppelschichten. Die daraus resultierenden Kräfte haben eine größere Reichweite als die anziehenden Van-der-Waals-Kräfte. Ungeschützte Dispersionen werden so elektrostatisch stabilisiert. Obwohl diese Theorie in den 50iger Jahren entwickelt wurde, hat sie heute noch große praktische Bedeutung [30].

Die diffuse Schicht besteht aus nicht fixierten beweglichen Ionen. Da dies kein starres Gebilde ist werden bei den Diffusionsbewegungen Reibungskräfte frei, die teilweise zu Verringerungen der diffusen Schicht führen können. Durch diesen Verlust von äußeren Teilchen der diffusen Schicht fehlen dem Teilchen Gegen- Ionen zur Kompensation der Stern- Schicht. Daraus resultiert, dass das Stern-Potential nicht mehr vollständig durch die diffuse Schicht ersetzt werden kann. Durch die Entfernung der Gegen- Ionen entsteht eine Potentialdifferenz. Dieses Potential an der Scherebene wird als Zetapotential (ζ -Potential) bezeichnet. Im Gegensatz zum Nernst-Potential bzw. Oberflächenpotential ist das Zetapotential messtechnisch realisierbar. Nach dem Stokes'schen Gesetz ist die auftretende Reibungskraft mit der Teilchengeschwindigkeit (v) nach der Gleichung(8) verknüpft. Daraus resultiert mit Zunahme der Teilchengeschwindigkeit eine Erhöhung der Reibungskraft, so dass sich die diffuse Schicht immer mehr reduziert [30].

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot a \cdot \eta \cdot v \quad \text{Glg.(8)}$$

a... Teilchenradius

F_R ... Reibungskraft

η ... dynamische Viskosität

v... Teilchengeschwindigkeit

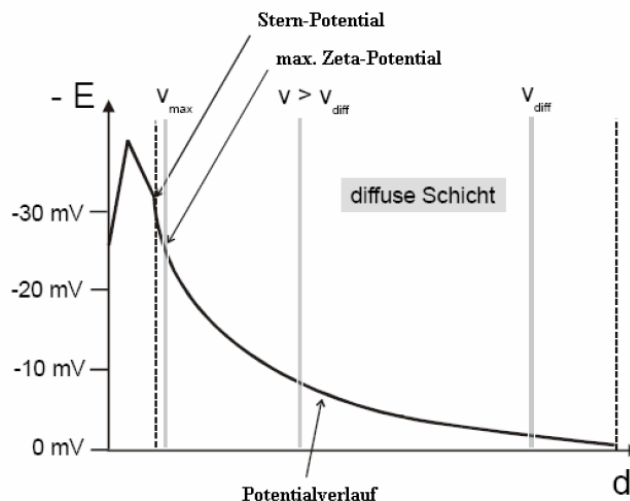


Abbildung 4: Zetapotential als Funktion der Partikelgeschwindigkeit [28]

Die diffuse Schicht wird durch Reibungskräfte nicht vollständig entfernt, daher kann das Zetapotential nur einen maximalen Wert, der geringer als das Stern-Potential ist, annehmen. Daher werden Elektrophoretische Mobilitätsmessungen bei großen Feldstärken durchgeführt, wo die diffuse Schicht am meisten abgestreift wird, und das Zetapotential ein Maximum erreicht [30].

Das Nernst-Potential kann soweit abgeschwächt werden, dass immer die Van-der-Waalschen Anziehungskräfte die Abstoßungskräfte überwinden und es zur Flockenbildung kommt. Aus der Theorie ist zu entnehmen, dass die Flockenbildung der Teilchen am größten ist, wenn das Zeta-Potential gegen null geht. Dieser Punkt wird auch Isoelektrischer Punkt genannt. Weiters wird dieses Potential vom Metabolismus der Bakterien stark beeinflusst. Aus der Praxis weiß man, dass die bestmögliche Flockenbildung bei einem Zeta-Potential von -6 bis -10 [mV] stattfindet. In diesem Fall sind ein geringer Schlammindex und eine hervorragende Flockungseigenschaft beobachtbar. Darum wurde diese Oberflächenladung als das „natürliche Zeta-Potential“ von belebten Schlämmen bezeichnet. Ist der Zeta-Potentialwert außerhalb des oben genannten Bereiches, so wurde eine schlechte Flockenbildung und ein höherer Schlammindex prognostiziert. Bei größeren Abweichungen des natürlichen Zeta-Potentials geringer als -20 [mV] und größer als +10 [mV] wurde ein Eigenzerfall der Flocken beobachtet [3].

Da mehrere Größen auf die Potentialausbildung wirken, kann es zu Interpretationsschwierigkeiten der Messgröße „Zetapotential“ kommen. Das Zetapotential messtechnisch zu erfassen ist sehr anspruchsvoll da die Geräte hochsensibel sind. Die Absolutwerte können bezüglich der Reproduzierbarkeit um bis zu 10% schwanken [2].

Es gibt mehrere Einflussfaktoren bei der Zetapotential- Messung.

- Probenvorbereitung
- Ionenhintergrund
- Zeitlicher Einfluss auf die Potentialausbildung
- Einflüsse der Umgebung
- Einfluss der Überlagerung mehrere Vorgänge und der Wahl des Titrationsregimes [2]

Diese sind bei der Anwendung zu beachten, jedoch nicht immer objektiv in der Praxis umsetzbar.

Fazit ist, dass die Zetapotential- Messung die gängigste Methode um elektrostatische Eigenschaften von Partikeln in Suspensionen zu beschreiben ist. Es ist keine eindeutig definierte physikalische Zustandsgröße da:

- es sich um ein Potential in einer meist nicht eindeutig bestimmten Scherebene handelt
- es einen Mittelwert über ein großes Partikelkollektiv darstellt
- es stark vom meist nicht erfassten Gleichgewichtszustand der elektrostatischen Doppelschicht beeinflusst wird [2].

In der Messtechnik, für die Ermittlung des Oberflächenpotentials, wurden eine Menge unterschiedlicher Geräte entwickelt. Eine Übersicht von Messgeräten ist in der Tabelle1 im Anhang zu sehen.

Diese liefern relativ gute Ergebnisse wenn die Messbedingungen an den Prozess angeglichen werden. Jedoch ist dazu zu erwähnen, dass die theoretischen Untersuchungen und die daraus idealisierten Bedingungen selten mit der Realität in praktischen Prozessen zusammenhängen.

Die Komplexität der Einflussfaktoren bei der Untersuchung des Zetapotentials erfordert eine genaue Versuchsdurchführung des Untersuchenden [2].

Nachdem hier auf das Doppelschichtmodell nach Stern eingegangen wurde, das sich auf Ladungsverhältnisse bezieht, soll in weiterer Folge die Entstehung von Ladungen beschrieben werden.

3.3 Entstehung von Ladungen

Dass nahezu alle Oberflächen ein erhebliches Ladungspotential tragen hat jeder schon einmal erfahren. Z.B. Beim Aussteigen aus einem Auto, in einem Büros mit Kunststoffböden oder wenn man einen Pullover auszieht.

Mikroorganismen bzw. das Leben hängen von den Eigenschaften der Atome ab und unterliegen denselben chemischen und physikalischen Bedingungen wie alle anderen Formen der Materie. Wechselwirkungen findet man bei Molekülen ebenso wie bei Organismen. Welche Eigenschaften Zellen bzw. Mikroorganismen haben hängt direkt von den Aktivitäten der Moleküle ab, die darin vorgehen. Energieflüsse können aus chemischer, mechanischer und elektrischer Energie bestehen sowie deren Umwandlung untereinander [20]. Die Oberflächenladungen können daher auf unterschiedliche Weise entstehen und durch gezielte Änderungen des Milieus z.B. durch pH-Wert, Ionenkonzentration beeinflusst werden [8].

In der Abbildung 5 sind Möglichkeiten zu sehen, wie Oberflächenladungen entstehen können. (A) Ionisierung von Oberflächengruppen, (B) Adsorption bzw. Desorption von potentialbestimmenden Ionen, (C) spezifische Adsorption eines anionischen Tensids an einem Metallkolloid, (D) isomorphe Substitution (Si^{4+} durch Al^{3+}) bei Tonmineralen, (E) Protonierung von AlOH - Gruppen an den Bruchkanten von Tonmineralplättchen [28].

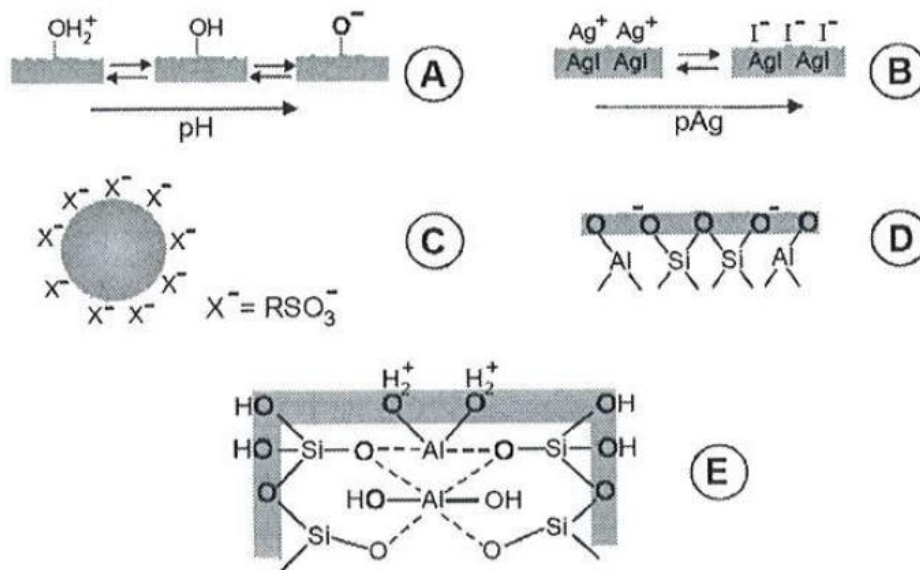


Abbildung 5: Oberflächenladungen [28]

An vielen Feststoffoberflächen sind Gruppen wie Alkohole [-OH] oder Säuregruppen [-COOH], die durch Anlagerung oder durch Abspaltung von Protonen ionisierbar sind, verantwortlich. Die Oberflächenladung die in eine negative oder in eine positive Richtung gehen kann, hängt vom pH- Wert ab, wobei dieser von der Art der funktionellen Gruppen unterschiedlich sein kann. Die Ladungsdichte ist im sauren Bereich durch einen Überschuss von Protonen positiv. Mit ansteigendem pH- Wert nimmt die Ladung zu. Somit kann über Potentialbestimmung der Ionen die Ladungsdichte bestimmt werden [8].

Auf den biologischen Prozess wirken die Änderungen des pH-Wert's und der Temperatur ein. Bei sehr niedrigen Temperaturen läuft der Metabolismus der Mikroorganismen nur sehr langsam ab. Bei Temperaturen über 39°C sind die herkömmlichen Mikroorganismen des belebten Schlamms nicht mehr lebensfähig und sterben ab [3].

Alle chemischen Prozesse eines Organismus sind im Stoffwechsel (Metabolismus) vereint. Der Stoffwechsel ist für den Energie- und Materialnachschub der Zelle verantwortlich. Wobei der katabole Stoffwechsel Energie frei setzt z.B. für den Atmungsprozess und der anabole Stoffwechsel Energie verbraucht [21]. Die Verbindungen, die aus einem Stoffwechsel entstehen, sind Stoffwechselzwischenprodukte oder Metaboliten, aus denen letztlich ein Endprodukt entsteht [25].

Ein Ablaufschema über das Wachstum von aeroben und anaeroben Mikroorganismen ist in der Abbildung 6 zu sehen und wird in weiterer Folge beschrieben [24]. Dabei sind die biologischen Abläufe dargestellt und nach der Abbildung 6 erklärt.

Für diese Arbeit ist das Schema sehr wichtig da auf der einen Seite sehr schön die Komplexität wie es zur Ladungen und deren Einfluß auf die Bakterien kommt dargestellt ist. Auf der anderen Seite ist es wichtig zu verstehen, dass es am Ende des biologischen Prozesses zu Messparametern kommt. Diese Messparameter stellen oft die Grundlage für die Dosierung von Flockungshilfsmittel in der mechanischen Entwässerung dar. Einflussgrößen wie Trockenmasse also die Biomassegewinnung oder Wachstumskontrolle durch optische Dichtemessungen sollen auf das dementsprechende Dosierungsverhalten schließen. Schon seit vielen Jahren hat man die Erkenntnis, dass der Bedarf an Flockungshilfsmittel in einem Verhältnis zur Oberflächenladung des vorhandenen Feststoffes steht. Im nach hinein bekommt man einen Einblick welche Komplexe biologische Abläufe vorhergehen damit der Klärschlamm sein Ladungspotentialwert erhält. Die biologischen Abläufe werden in der Abbildung 6 dargestellt und nachfolgend erklärt.

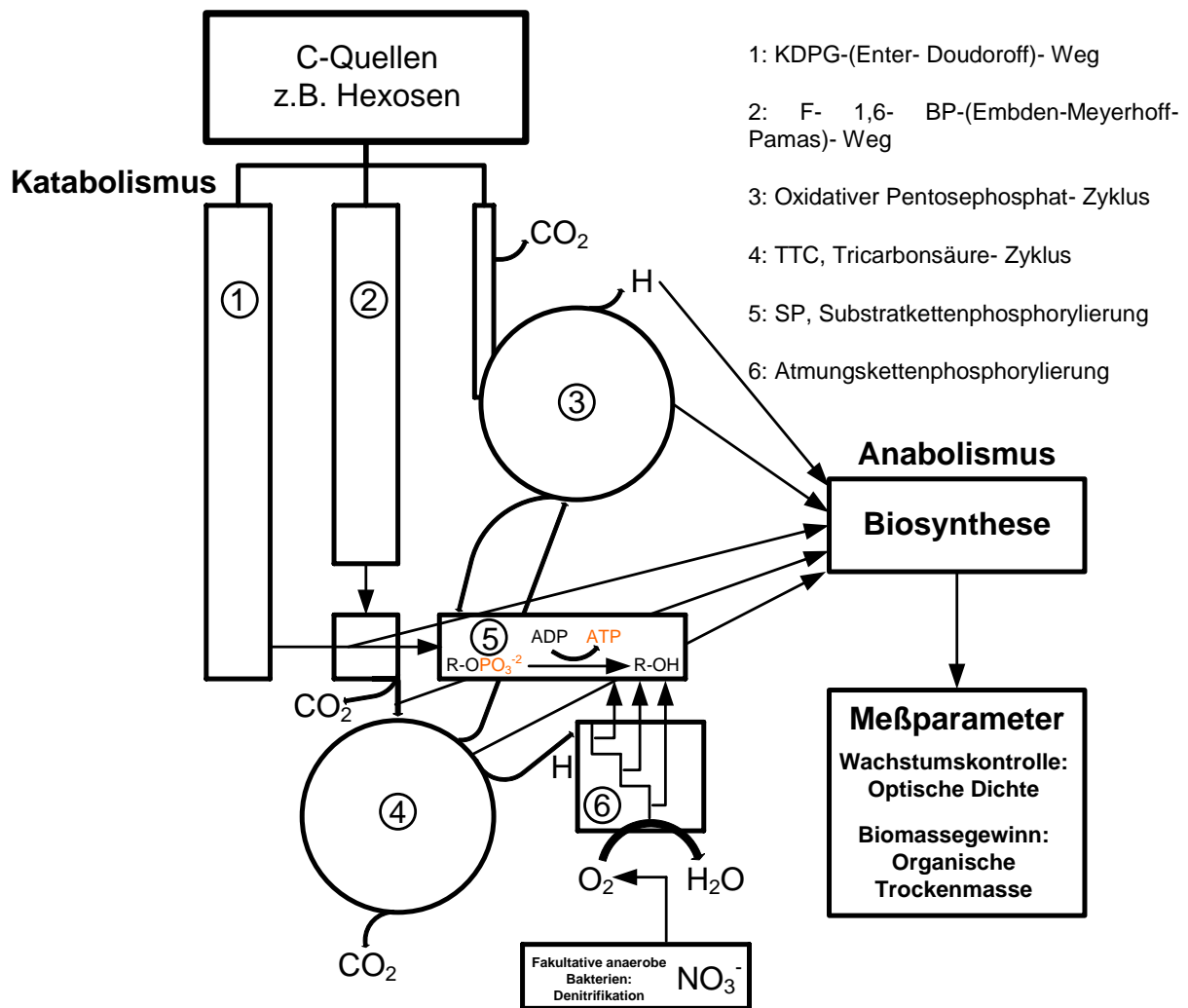


Abbildung 6: Biologischer Ablauf [24]

KDPG (Entner-Doudoroff-Weg) Dabei wird Zucker zum Zweck der Energiegewinnung abgebaut. Dieser kommt ausschließlich in Bakterien vor. Die Energieausbeute in Form von Adenosintriphosphat (ATP) beträgt 1 [22,23].

FBP-(Embden-Meyerhoff.Parnas-Weg) Der Embden-Meyerhof-Parnas-Weg (Glykolyse), der von den meisten anderen Lebewesen besprochen wird, hat eine Energieausbeute von 2 ATP. [25]

Der **Oxidative Pentosephosphat- Cyclus** dient dazu, Hexosen in Pentosen umzuwandeln, die für die Nukleinsäure und Coenzyme benötigt werden. Außerdem dient der Prozess zur Bildung von 2 NADPH. Dazu wird Glucose-6-phosphat durch zwei Dehydrogenierungsschritte zu Ribulose-5-phosphat oxidiert [25].

TTC Tricarbonsäure- Cyclus auch Citronensäurezyklus, Citratzyklus oder auch nach seinem Entdecker Hans Krebs, Krebs-Zyklus. Der Zyklus dient zur Oxidation von Acetyl-CoA zu Kohlendioxid unter Abspaltung des Wasserstoffs [25].

Substratkettenphosphorylierung Bei der Substratkettenphosphorylierung wird bei allen Organismen als unentbehrlicher Energieüberträger des Zellstoffwechsels Adenosintriphosphat (ATP) oder Guanosintriphosphat (GTP) produziert. Bei dem Vorgang überträgt ein phosphoryliertes Zwischenprodukt seine Phosphorylgruppe (anorganisches Phosphat) auf ADP, da das Übertragungspotential von ATP geringer als das des Zwischenproduktes ist, findet die Reaktion in eine Richtung statt [25].

Atmungskettenphosphorylierung Die Atmungskette ist ein wichtiger Teil des Energiestoffwechsels der aus einer Reihe von biochemischen Redoxreaktionen besteht. Die Kette dient den Lebewesen zur Energiegewinnung durch die Oxidation von Wasserstoff zu Wasser erhält die Zelle einen Energieschub wie in einer Rakete [25].

Die biologischen Vorgängen lassen sich mit Hilfe von Messparametern beschreiben diese sind, z.B. Schlammindex, pH-Wert, Feststoffgehalt usw. Für diese Arbeit werden Teile der Informationen, die wir bereits zwischen dem Belebungsbecken und Nachklärbecken erhalten, verarbeitet. Genauere Lösungsansätze und Beschreibungen werden im Kapitel 6 näher dargestellt.

Für die eben beschriebenen Prozesse sind kovalente Bindungen von besonderer Bedeutung. Daher soll an dieser Stelle kurz auf diese eingegangen werden. Mit kovalenten Bindungen sind die Atome, aus denen ein Molekül besteht, fest verbunden. Diese chemischen Verbindungen können bei der Energieaufnahme und somit bei lebenswichtigen Prozessen wie bei der Atmung tätig sein.

NAD spielt eine entscheidende Rolle im Energiestoffwechsel, weil es Elektronen aufnimmt und abgibt. Dieses Coenzym transportiert Wasserstoffatome und ist ähnlich kompliziert aufgebaut wie das ATP- Molekül. Die reduzierte Form des Coenzym ist NADH und gilt als energiereiche Verbindung, weil es so leicht Elektronen auf andere Moleküle übertragen kann, die Elektronen anziehen.

NADH hat im Vergleich zu anderen Elektronenakzeptoren der Zelle ein hohes Elektronenübertragungspotential siehe Tabelle 2 im Anhang. Der Elektronentransport ist ein sehr komplexer Prozess. Das aktive Zentrum und das Substrat haben komplementäre Oberflächen, so dass sie bei der Bindung so exakt wie zwei Puzzelstücke zusammenpassen wie in Abbildung 7 zu sehen ist.

Die Bindung des Substrats an das Enzym erfolgt über nichtkovalente Wechselwirkungen (Ionenbindungen, Wasserstoffbrückenbindung, hydrophobe Wechselwirkungen) [20].

Mit Hilfe der Computertechnik kann man komplexe Wechselwirkungen darstellen. Weiters versucht man Datenmengen wie z.B. Längen, Winkel der Bindungen, die elektrostatischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte sowie die der van-der-Waals-Kräfte des Moleküls in den Computer einzuspeisen. Anhand dieser Informationen konnte man verschiedene Bewegungen der relevanten Atome rekonstruieren und somit die in Abbildung 7 dargestellten Konformationsänderungen darstellen [20].

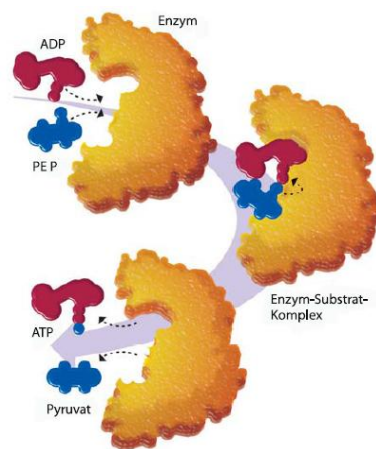


Abbildung 7: Konformationsänderung [20]

Diese Konformationsänderungen die beim Einsatz von Polymeren trails, loops und trains genannt werden, werden im nachstehenden Kapitel näher beschrieben. Diese kommen in weiterer Folge in Dupot's Modellen zur Anwendung die die Flockung von kolloidalen Partikeln durch Polyelektrolyte beschreiben. Im nachstehenden Kapitel werden die bereits beschriebenen Grundlagen auf die praktische Anwendung bezogen um die Vorgänge der Flockung mittels Flockungshilfsmittels in der mechanischen Überschussschlammwässerung erklären zu können.

3.4 Koagulation und Flockung

Die Adsorption von Polymeren hat oft eine Schlüsselfunktion für die Partikelhaftung und letztendlich für ein erfolgreiches Entwässern von Klärschlamm, das letztendlich den Fokus auf diese Arbeit legt. Der am Wahrscheinlichsten in der Lösung befindliche Zustand eines Polymers ist die eines Knäuels, das nach vorherrschenden Wechselwirkungen einen bestimmten Zustand aufweist. Doch vorher ist es wichtig Grundlagen wie Koagulation und Flockungsvorgänge zu verstehen, die in der Abwasserreinigung ihr Haupteinsatzgebiet haben.

Dabei kommen ausschließlich negativ geladene Partikel, deren Ladung durch Abspaltung oder Austausch von Kationen sowie Adsorption von anionischen Stoffen verursacht wird, vor. Feinverteilte Mineralien wie Silikate, Ton, Oxide und Hydroxide zeigen neben einer elektrischen Ladung auch eine deutliche Hydratation und können zusätzlich stabilisierte Stoffe adsorbieren. Durch chemische Einflüsse kann dieser stabile Zustand aufgehoben werden indem man die Einflüsse der abstoßenden Kräfte herabsetzt, so dass die Anziehungskräfte überwiegen [49]. Treten die negativ geladenen Feststoffpartikel mit kationischen Polymeren zusammen, kommt es spontan zu einer Adsorption aufgrund elektrostatischer Wechselwirkungen. Weiters ist aber auch eine Adsorption mit anionischen Polymeren über eine Komplexbildung mehrwertiger Kationen (z.B. Ca^{2+}) möglich [38]. Zusammengefasst führt der Koagulationsprozess eines am Anfang homogenen Systems in ein immer mehr und mehr heterogenes System über. Es gibt verschiedene Arten von Polymeren, deren unterschiedliche Einsatzgebiete und Bezeichnungen wie z.B. Flockungshilfsmittel im nachstehenden Kapitel genauer zusammengefasst werden.

Wenn elektrisch gleich geladene Kolloide mit Elektrolyten versetzt werden, d.h. mit Anionen und Kationen dissoziierender Salze, kann es zu einer Aggregation der Partikel kommen. Weiters kommt es durch unterschiedliche Aggregate der Partikel zu unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten und es kann wiederum zu zusätzlichen Kontakten zwischen den Partikeln bzw. den Aggregaten und somit zu einer erneuten Flockung kommen. Das optimale Ergebnis eines Flockungsvorganges wird in der Realität häufig über die Wasserqualität nach dem jeweiligen mechanischen Abtrennprozess beurteilt. Die Art und Eigenschaften der Flockenausbildung hat daher eine große Bedeutung da z.B. Flotation und Sedimentation unterschiedliche Flockenstrukturen erfordern. Während für die Absetzung Flocken mit hoher Dichte und Durchmesser erreicht werden sollen, sind bei der Flotation eine kleine Dichte und ein kleiner Durchmesser gefragt. Die Filtration fordert hingegen dichte Flocken mit einer hohen Scherfestigkeit und hohem Haftvermögen am Filtermedium. Die gute Abtrennung der Flocken ist aber nicht alleine das Maß für einen guten Reinigungseffekt. Weiters ist es erforderlich, dass die zu entfernenden Stoffe auch ausreichend in die Flocke eingebunden werden [49].

Der Flockungsvorgang ist in der Literatur schon von vielen Autoren beschrieben worden unter anderem von SEHN und GIMBEL der die Einteilung Stofftransport, Anlagerung und Rekonformation trifft, wie es in der Abbildung 8 zu sehen ist [30].

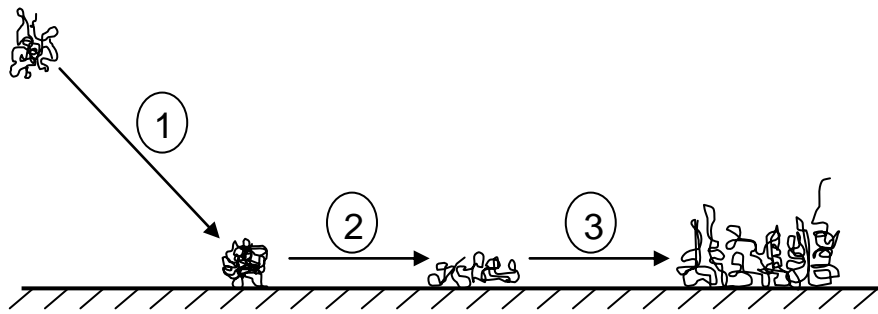


Abbildung 8: Konformationsänderung eines Polymerknäuels [30]

Zunächst werden die Moleküle aus der freien Lösung an die Feststoffoberfläche (Punkt 1) transportiert. Dann erfolgt der Übergang eines freien gelösten Moleküls in den adsorbierten Zustand (Punkt 2). Diese geht mit einer Konformationsänderung einher und beruht auf einer Zunahme von adsorbierten Segmenten. Im dritten Schritt -der Rekonformation- kommt eine zusätzliche Konformationsänderung vor, wobei die Beladung weiter zunimmt (Punkt 3). Der Anteil der adsorbierten Segmente pro Makromolekül nimmt allerdings ab, dass somit auch längere Polymerketten die kürzeren verdrängen könnten [30].

HAHN [12] unterteilt den Flockungsvorgang in zwei Mechanismen- Entstabilisierung und Transport. In der Entstabilisierung wird durch Zugabe von Flockungshilfsmitteln das stabile kolloidale System in einen instabilen Zustand versetzt. Mit anderen Worten versteht man darunter den physikalischen- chemischen Vorgang der für das Aneinanderhaften verantwortlich ist. Der Transportvorgang sorgt letztlich für den Kontakt der Partikel [12]. Transportvorgänge bringen die Partikel in gegenseitigen Kontakt und bilden somit die Voraussetzungen für die Aggregation. Aufgrund der Zusammenstöße nimmt die Zahl der ursprünglich vorhandenen Partikel ständig ab. Diese Zusammenstöße werden durch physikalische Parameter wie Strömungsbedingungen und Temperatur bestimmt. Für den Flockungsprozess sind die Transportvorgänge gegenüber dem Entstabilisierungsvorgang der Geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Für die Kollision dispergierter Partikel in einer Suspension kommen im Wesentlichen drei Mechanismen des Partikeltransportes in Betracht:

- Partikel aggregieren aufgrund ihrer thermischen Energie (Brown'sche Molekularbewegung)
- Wenn die Partikel ausreichend große Aggregate gebildet haben, ist der Partikeltransport durch Geschwindigkeitsgradienten sehr stark bestimmend (orthokinetische Flockung)

Bei Sedimentationsvorgängen kann die unterschiedliche Sinkgeschwindigkeit der Partikel zu Kollisionen und damit zu einer Aggregation führen (Flockung aufgrund differentieller Sedimentation) [49].

Bei dispergierten Partikeln mit einem kleineren Durchmesser als $1\text{ }\mu\text{m}$ dominiert der Partikeltransport durch die Brown'sche Molekularbewegung. Bei größeren Partikeln $\geq 1\text{ }\mu\text{m}$ sind die Brown'schen Bewegungen unerheblich. Die Aggregation kolloidaler Partikel wird in diesem Fall durch den Geschwindigkeitsgradienten bestimmt [49]. Mit anderen Worten ist ein sehr hoher Flockungshilfsmittelbedarf bei kleineren Partikeln zur Ladungsneutralisation notwendig, da die Oberfläche der Partikel, neben der Wertigkeit des Polymers, einer der bestimmenden Faktoren ist.

Der Entstabilisierungsvorgang lässt sich selbst wiederum in zwei Mechanismen einteilen- die Koagulation und die Flockulation. Diese Vorgänge können separat oder in Kombination miteinander auftreten [12].

Bei den Fest/Flüssig Trennprozessen sind Koagulation und Flockung also der entscheidende Prozess der mechanischen Trennung.

Meist werden diese zwei Begriffe im selben Kontext erwähnt. In Anlehnung an Bratby soll eine genauere Differenzierung vorgenommen werden:

Koagulation ist jener Vorgang, der eine Destabilisierung einer Dispersion durch Überkompensation von elektrostatischen Abstoßungskräften hervorruft. Bei der Flockung bilden sich destabilisierte Partikel zu größeren Agglomeraten zusammen [47].

Bei der Koagulation werden durch Zugabe von Salzen (Gegenionen) in die Suspension die negativen Oberflächenladungen abgeschwächt, das bedeutet gleichzeitig die Verringerung der elektrostatischen Abstoßung der Partikel untereinander. Durch die Verringerung der Reichweite wird das Kräfteverhältnis der anziehenden van-der-Waal'schen und der abstoßenden Kräfte zwischen den Partikeln verschoben. Durch die van-der-Waal'schen Kräfte wird eine Wasserhülle um das geladene Teilchen erzeugt, die eine Sedimentation von Kolloiden verhindert. Eine fest gebundene Schicht aus Wassermolekülen verhindert bei Partikelkollisionen eine ausreichende Annäherung, so dass die anziehenden Kräfte mit geringer Reichweite nicht wirksam sind [11]. In der Aggregationsphase (Partikelwachstum) werden die entstabilisierten Partikel durch Brown'sche Molekularbewegungen bzw. Geschwindigkeitsgradienten in einen so engen Kontakt gebracht, dass Kräfte mit kürzeren Reichweiten wie die van- der-Waals- Kraft oder Molekülbindungsmechanismen wirksam werden und einen permanenten Kontakt

zwischen den Partikeln bewirken [49]. Wenn also nach dem Koagulationsprozess die anziehende Kraft überwiegt, dann kommt es zur Agglomeration der Partikel.

Der Entstabilisierung liegen unterschiedliche Mechanismen zugrunde:

- Kompressionen der elektrischen Doppelschicht durch Gegenionen
- Reduktion des Oberflächenpotentials durch spezifische Adsorption von geladenen Spezies mit entgegengesetzten Ladungsvorzeichen
- Adsorption von organischen Makromolekülen an der Partikeloberfläche, die die Ausbildung von molekularen Brücken zwischen den Partikeln ermöglicht
- Einschluss kolloidaler Partikel durch das Flockungshilfsmittel

Jeder dieser Entstabilisierungsmechanismen kann entweder für sich alleine wirken oder in Kombination auftreten [49].

Sind die Feststoffpartikel hinreichend entstabilisiert kommt es zur Zusammenlagerung. Dabei ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt bei der Flockung der Transport der Polymere an die Feststoffoberfläche. Durch die Entstabilisierung und den Transport der Polymere an die Feststoffoberfläche kann es zum Wachsen der Flocken kommen [12]. Es werden Feststoffe die sich nur sehr langsam oder gar nicht absetzen würden geflockt, damit es zur besseren Abscheidung und somit zur Verbesserung der Trennung von der Fest/Flüssig Phase kommt. Dadurch werden größere Partikel, die man Agglomerate nennt, gebildet, die eine wesentlich bessere Abscheidung aufzeigen als die ungeflockten Partikel. Ungeflockte Belebtschlammflocken bilden eine Hydrathülle aus. Dadurch stoßen sie sich aufgrund der gleichen Oberflächenladung gegenseitig ab. Jenes Wasser das außerhalb des Ladungseinflusses ist, kann abgeschieden werden wie es in der Abbildung 9 zu sehen ist [27].

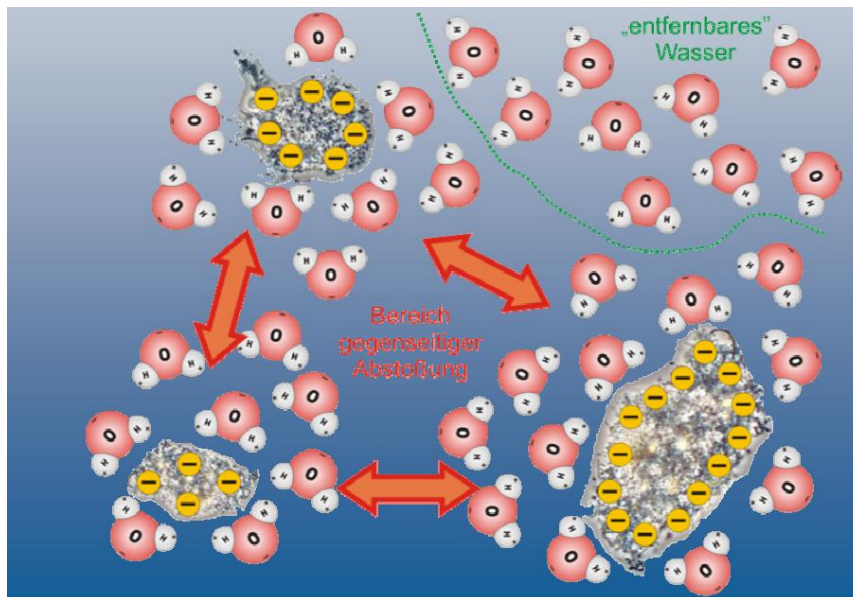


Abbildung 9: Schematische Darstellung Flockung [27]

Die Anlagerung der Makromoleküle an die Partikeloberfläche kann durch einen oder mehrere der nachstehenden Mechanismen erfolgen [13]:

- ✓ Wasserstoffbrückenbildung zur Hydrathülle des Teilchens
- ✓ elektrostatische Wechselwirkungskräfte
- ✓ Ausbildung von Ionenbrücken zwischen gleichsinnig geladener Feststoffoberfläche und reaktiver Gruppe des geladenes Polymermoleküls
- ✓ Gelbildung infolge höherer Ionenkonzentration in Feststoffnähe [13].

All diese Mechanismen und Vorgänge sind mit Energie behaftet. Um irgendwelche Veränderungen durchführen zu können muss man ein Verständnis dafür aufbringen, welche energetischen Abläufe zur erfolgreichen Flockung notwendig sind.

Wird die Elektrolytkonzentration erhöht, führt dies zu einer Abnahme der Ionenschicht und dem zu Folge kommt es zu einer Verringerung des abstoßenden Energieterms (V_R). Daraus resultiert, dass die Energiebarriere ($V_{T,max}$) leichter zu überwinden ist- also einen kleinen Wert annimmt. Zur Koagulation von Teilchen kommt es auch dann, wenn der $V_{T,max}$ –Wert auf Null absinkt. Haben die Partikel jedoch ausreichend hohe kinetische Energie, dann ist ein Absinken der Energiebarriere auf Null nicht notwendig um zu koagulieren [8].

In diesem Zusammenhang wird bei einer Aggregation von Partikeln, die aufgrund ihrer hohen Diffusionsbewegung aufeinander prallen, von perikinetischer Flockung gesprochen [30]. Bei der thermischen Bewegung geht die Koagulationsgeschwindigkeit mit zunehmender Größe der gebildeten Teilchenaggregate zurück, so dass dieser Vorgang innerhalb weniger Sekunden abgeschlossen und zudem die erreichbare Flockengröße eingeschränkt ist. Die Stoßfrequenz der Teilchen und damit die Effektivität bei der Koagulation kann durch hydrodynamische Kräfte (z.B. mechanisches Rühren) erhöht werden (orthokinetische Koagulation/ Flockung). Die Mindestkonzentration an Elektrolyten, die für eine Koagulation des Dispersionskolloids erforderlich ist, wird als kritische Koagulationskonzentration bezeichnet [28].

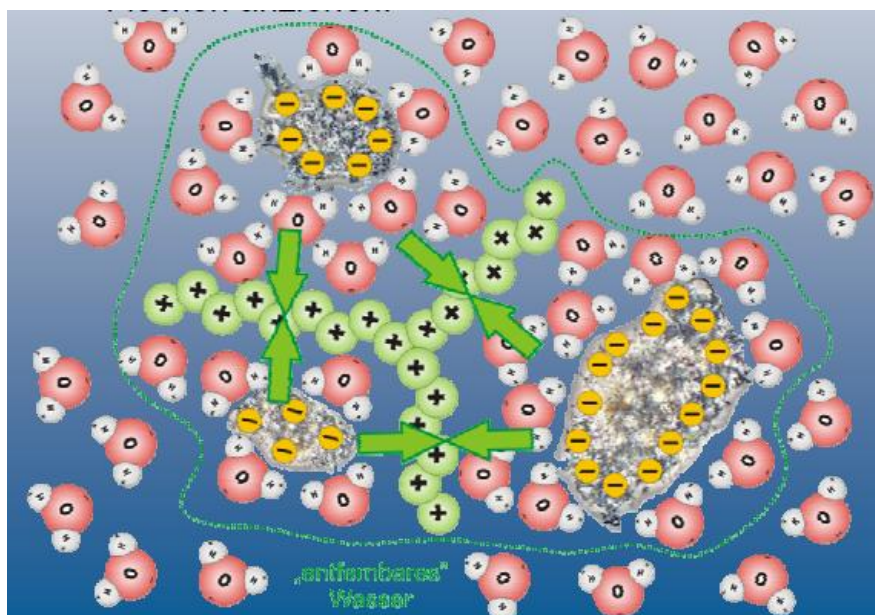


Abbildung 10: Schematische Darstellung Koagulation [36]

In der Abbildung 10 ist zu sehen, dass sich durch die Zugabe von kationischen Flockungshilfsmitteln die gleichen Oberflächenladungen kompensieren und es zur Flockenbildung kommt. Durch die Vernetzung der Flocken kommt es dadurch indem sich die positiven Ladungen von Polymerketten nicht nur an die Flocke anlagern sondern auch andere Flocken anziehen.

Durch die dissoziierenden Gruppen an den Polymerketten entstehen negativ geladene anionische oder positiv kationische Flockungshilfsmittel, deren Ladungsstärke sich nach den funktionellen Gruppen in der Molekülkette richten. Das Dissoziationsverhalten ist wie schon erwähnt von den Eigenschaften wie pH-Wert oder Ionenkonzentration abhängig [11].

Nach der Regel von SCHULZE und HARDY steigt die Effektivität der Koagulation mit der Wertigkeit der Gegenionen stark an [31]. Durch die Destabilisierung von Suspensionen mit Hilfe von Polyelektrolyten werden zwei Mechanismen als Modellvorstellungen herangezogen. Diese vereinen den Ladungs- und Adsorptionseffekt gleichermaßen. Deshalb ist es für diese Arbeit wichtig beide Mechanismen, den Brücken- und Mosaikmechanismus, zu diskutieren. Die vorherrschenden Effekte von Ladungs- oder Adsorptionseffekten hängen von der Suspension und von dem eingesetzten Polyelektrolyt ab.

Für die Monoflockung, Anwendung von nur einem Flockungsmittel, beschreibt Dupont zwei Modelle- das Brückenbildungsmodell und das Mosaikmodell (Patch-Mechanismus) wie in Abbildung 11 zu sehen ist [38].

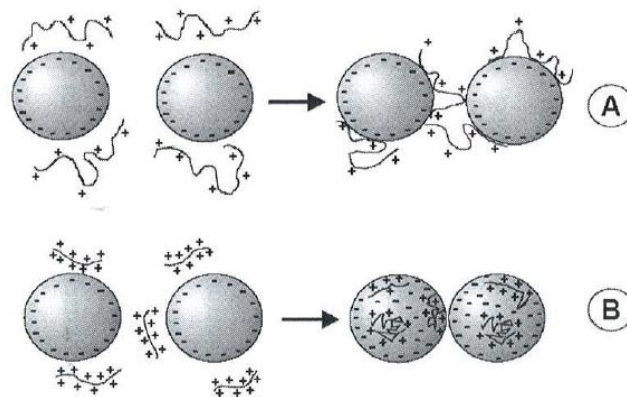


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Haftungsmodelle [28]

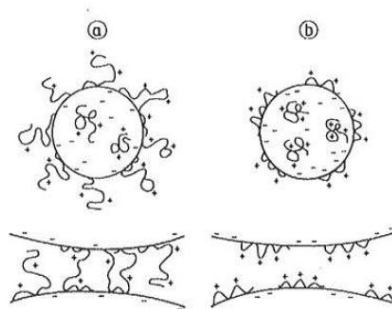


Abbildung 12: Modellvorstellung "Entstabilisierung und Aggregation mit Makromolekülen [49]

Bei der Adsorption von funktionellen Gruppen ändert sich die Konformation, wobei Segmente des Polymers gleich direkt adsorbiert werden. Die Konformation einer adsorbierten Polymerkette kann als Verteilung von trails, loops und trains bezeichnet werden. Beim Brückenbildungsmodell in der Literatur auch Flockulation genannt, werden trails und loops des adsorbierten Polymers, die in die Flüssigkeit hineinragen, begünstigt.

Diese frei in die Flüssigkeit ragenden Teile werden dann von anderen, an den freien Oberflächen der Partikel adsorbiert, wodurch es zu einer makroskopischen Flockenbildung kommt [74].

Diese vier Adsorptionsmöglichkeiten des Polymers ist in der Abbildung 13 zu sehen [76].

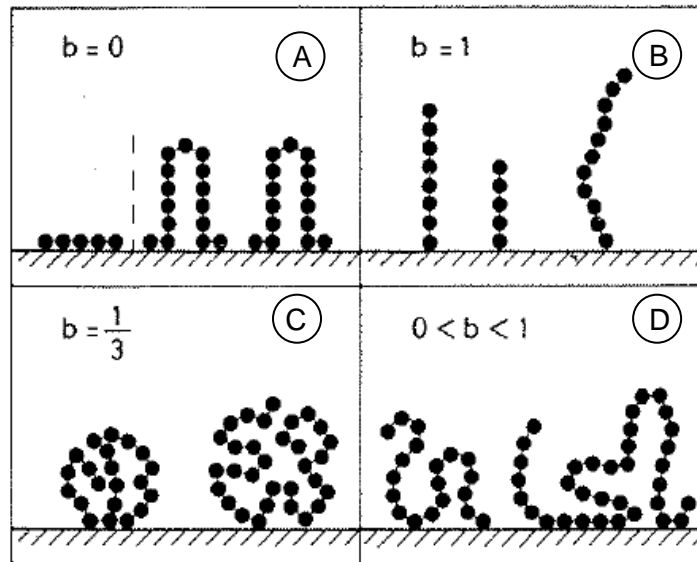


Abbildung 13: Schematische Darstellung adsorbierter langkettiger Makromoleküle [76]

Wenn Polymersegmente direkt die Oberfläche berühren dann werden sie trains (Züge) genannt. Jene Segmente die in die Lösung ragen und zwischendurch trains Charakter besitzen werden loops (Schlaufen) genannt. Stehen Polymersegmente von der Oberfläche ab werden diese tails (Schwänze) genannt. Die loops und tails bestimmen hauptsächlich die Dicke der vom Polymer gebildeten Adsorptionsschicht [28].

Bei geringer Polymer und Partikelkonzentration siehe Abbildung 13 A haben sie ausreichend Zeit, um nach der Anlagerung in eine flachere Gleichgewichtskonformation auf der Partikeloberfläche überzugehen, bevor es zur Kollisionen mit benachbarten Teilen, die zu einer Flockung führen, kommt. Bei steigender Polymer- und Partikelkonzentration verringert sich die Kontaktzeit der Partikel zueinander mit nur einem Teilchen zunehmend, so dass der Anteil an loops und tails und damit der hydrodynamische Partikelradius wächst. In konzentrierten Polymerlösungen (Abbildung 13 C) steigt die Dicke der adsorbierten Schicht extrem an, wobei der Anteil an trains und loops deutlich abnimmt und der Anteil der beiden tails bis zu zwei Drittel der Gesamtlänge der Polymerkette betragen kann [28]. Jene

Eigenschaften die für die Bildung verschiedener Konformationen einen Einfluss haben sind nachstehend aufgezählt.

- Polymerkonzentration in der Lösung
- Länge der Polymerketten
- Solvation der Segmente
- Adsorptionsenergie pro Segmente
- Ladungsdichte sowie Ladungsvorzeichen von Polymerketten
- Konzentration an Salzen und anderen Wasserinhaltsstoffen

Nach dem Brückenbildungsmodell, das bei negativ geladenen Partikeln mit nicht-ionogenen oder kationischen Polymeren großer Kettenlänge (hohe Molmasse) anwendbar ist, geht man an den freien Segmenten von einer Adsorption eines zweiten Partikels aus, die die Bildung von makroskopischen Flocken ermöglichen indem sich das Polymer wie eine Brücke verhält und die beiden Partikel sich nicht mehr voneinander entfernen [49]. Tragen also die Partikel die gleichen Ladungen, so können z.B. anionische Polyelektrolyte mit Hilfe von Kationischen z.B. Ca^{2+} durch den Brückeneffekt der negativen Partikel adsorbiert werden. Dabei kommt es zwischen den Kationen und den funktionellen Gruppen der Polyelektrolyte zur Komplexbildung [74]. Polymere mit hoher Molmasse und geringer Ladungsdichte sind notwendig, da geringe elektrostatische Wechselwirkungen zwischen Polymer und Partikeloberfläche nicht adsorbierte Bereiche der Polymerkette begünstigen [28].

Nicht nur spezifische Eigenschaften vom Polymer können die Brückenbildung begünstigen sondern auch Eigenschaften der Suspension. Diese sind:

- Eine hohe Salzkonzentration komprimiert die Dicke der diffusen Schicht und verringert den Abstand zur Grenzfläche, der von den loops und tails des Polymers überzogen wird
- Mit einer höheren Partikelkonzentration steigen die Kollisionen zwischen den Partikeln untereinander und ein train, also eine flachere Gleichgewichtskonformation, ist an den Grenzflächen des Partikels nicht optimal [28].

Zur Berechnung der Wechselwirkungen in diesem Modell findet man zwei Ansätze in der Literatur die eine von MARZIO und RUBIN und die Zweite von FLEER. MARZIO und RUBIN lehnen sich an die Ansätze der Polymeradsorption an. Hierbei sehen sie die Oberflächen zweier Partikel als zwei Parallele Wände, mit geringem Abstand zueinander. Mit Hilfe der Zufallsberechnung haben sie festgestellt, dass die Anziehungskraft von einem Wandabstand ein abhängiges Maximum bei einer bestimmten Segmentadsorptionsenergie aufweist [30]. FLEER hingegen geht von einer Gleichgewichtsbeladung an einer Oberfläche aus und berechnet die freie Energie an der zweiten unbeladenen Oberfläche die sich annähert [30]. Smelie [39] hat für das Brückenbildungsmodell nach theoretischen Berechnungen für die optimale Flockung eine belegte Oberfläche bei ca. 50% festgestellt [39]. Zahlreiche praktische Versuche belegen jedoch, dass ein wesentlich geringerer Bedeckungsgrad für eine optimale Flockung ausreichend ist [40,41]. Bei einem niedrigen Bedeckungsgrad herrscht eine elektrostatische Abstoßung zwischen den Partikeln so dass sich nicht genügend Brücken bilden können. Hingegen führt ein hoher Bedeckungsgrad zu einer sterischen Stabilisierung, die zu einer Abstoßung zweier sich nahe stehenden Partikel führt, wie in der Abbildung 14 zu sehen ist [28].

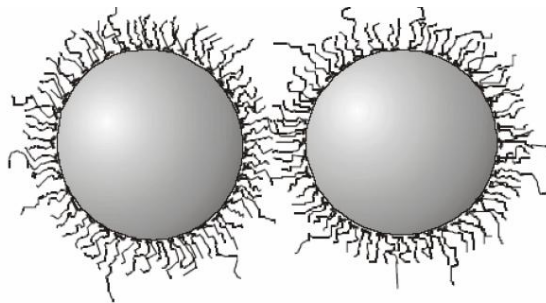


Abbildung 14: Schematische Darstellung der sterischen Stabilisierung

Eine Abstoßung der Partikel wird dadurch erklärt, dass durch die Verzahnung der abstehenden Ketten ein Verlust der Konformationsentropie besteht (Entropieabstoßung, Volumenrestriktion) [42]. Weiters kommt es zur erhöhten Segmentdichte im Überlappungsbereich und somit zu einer Verdrängung von Lösungsmittelmolekülen woraus eine Entmischung resultiert. Aus diesem Ansteigen der Polymerkonzentration im Überlappungsbereich wirkt ein osmotischer Druck der die Teilchen auseinanderdrängt [43,44]. Zusätzlich treten neben den sterischen Stabilisierungen elektrostatische Wechselwirkungen der Ketten auf. In jedem Fall liegt das natürliche Zeta- Potential der Partikel bei der optimalen Flockung noch im negativen Bereich [28].

Durch die Adsorption der Polyelektrolytmoleküle an der Partikeloberfläche tritt bei diesen eine Konformationsänderung auf. Diese Änderung ist sowohl von den Eigenschaften des Polymers, als auch von den Wechselwirkungen zwischen dem Polymer und dem Substrat bzw. Lösungsmittel abhängig [32,33].

Zusätzlich müssen neben der Berücksichtigung der Adsorption von Polymerketten auch lösungsspezifische (Ionenstärke und pH-Wert) und polymerspezifische (z.B. Molmasse und Ladungsdichte) Einflussfaktoren berücksichtigt werden [34,35].

Eine Adsorption an der Partikeloberfläche tritt allerdings erst bei Überkompensation des Verlustes an Konformationsentropie des ungeordneten Polymerknäuels durch den Gewinn an Adsorptionsenthalpie auf. Die adsorbierte Polymermenge hängt dabei stark von den Versuchsbedingungen (z.B. Rührzeit, Rührgeschwindigkeit) ab [36].

Die Adsorptionsenergie ist für jede einzelne Bindungsstelle sehr gering. Die Makromoleküle können aber nur schwer oder überhaupt nicht von der Oberfläche desorbiert werden, da eine gleichzeitige Auflösung aller Haftstellen als sehr unwahrscheinlich gilt [37]. Durch Änderung der Lösungsmittelzusammensetzung oder durch ein haftend bleibendes Verdrängungsmolekül kann teilweise die Desorption des Makromoleküls erreicht werden [28]. Da diese Lösungsmittelzusammensetzung bzw. Einsatz von Flockungshilfsmittelarten nicht genau definiert werden kann, wird diese Arbeit helfen ein Verständnis dafür zu gewinnen um daraus Rückschlüsse ziehen zu können.

Bei Systemen in denen die Partikel und die Polyelektrolyte entgegengesetzte Ladungen besitzen also Systeme mit starken elektrostatischen Wechselwirkungen wird von KASPAR und GREGARY das Mosaikhaftungsmodell vorgeschlagen. Beim Mosaikhaftungsmodell auch Ladungs mosaikmechanismus genannt, das in der Abbildung 13 B dargestellt wird, werden aufgrund der hohen elektrostatischen Anziehungskräfte fast keine loops und tails ausgebildet, sondern der Großteil des Polymers liegt in Form von trains flach an der Partikeloberfläche auf. Diese flache Konfiguration der Polymermoleküle kommt beispielsweise bei der Entstabilisierung von negativ geladenen Kolloiden mit kurzzeitigen kationischen Polymeren vor. Hierbei entstehen an der Partikeloberfläche Ladungsbereiche die einen Überschuss an negativen und positiven Ladungen haben, die nun aufgrund der elektrostatischen Anziehung unterschiedlich geladener Teile, Partikelflocken bilden. Dabei werden die Polyelektrolyte vollständig an der Partikeloberfläche adsorbiert. Dieser Mechanismus tritt vorwiegend bei Polymeren mit hoher Ladungsdichte und geringen bis mittleren Molmassen auf [45].

Bei dem Mosaikhaftungsmodell würde man bei einer optimalen Flockung ein natürliches Zeta- Potential von null erwarten [8]. Das Zeta- Potential wird am häufigsten für die Dosierung von FHM der mechanischen Entwässerung herangezogen. Wenn man nun diese beiden Modelle betrachtet, ist der Erwartungswert für das Zeta- Potential beim Mosaikhaftungsmodell „Null“ beim Brückenbildungsmodell liegt der Wert unmittelbar unter dem „Nullpunkt“ bzw. Isoelektrischen Punkt, ist jedoch nicht genau definiert. Um diese Modelle anwenden zu können bedarf es schon sehr großes Vorwissen der Eigenschaften von Klärschlamm um die Zeta- Potential Ergebnisse richtig interpretieren zu können.

Welchem Mechanismus dabei die dominierende Rolle zukommt, hängt von den im jeweiligen System vorliegenden Bedingungen ab. Da durch Turbulenzen die Verteilung der Dosierung erfolgt, ist der Schritt der Mischung für die einzelnen Mechanismen ein sehr wichtiger Schritt [49]. Dieser kann auch vor Ort direkt verändert werden im Gegensatz zu den vorher besprochenen Mechanismen.

Je größer das Verhältnis Rohwasser zur Dosierung desto schwerer ist es eine gleichmäßige schnelle Vermischung zu bekommen. Daher kann eine Verdünnung durch einen Teilstrom vorteilhaft sein. Die Dosierstelle sollte sich in einer hoch turbulenten Zone befinden [49].

Diese können bei mechanischer Beanspruchung insbesondere bei Scherung in einem inhomogenen Strömungsfeld, wie es in einem Einlauf von mechanischen Entwässerungsanlagen der Fall sein kann, zerstört werden. Wobei sich nur einzelne Flockenteile herauslösen können oder sogar der ganze Flockenverband zerstört wird [12].

Eine Untersuchung durch KLEINE zeigte, dass eine mechanische Beanspruchung der Suspension während der Flockung die Struktur und Festigkeit der Flocke entscheidend beeinflusst. Somit würden sich spätere Ergebnisse von verfahrenstechnischen Schritten nachteilig auswirken [13]. BOTTERO et al. geben ebenfalls einen Überblick darüber, dass aufgrund der mangelnden Stabilität der gebildeten Aggregate häufig die Mikrofloken bzw. Primärteilchen, z.B. beim Durchtritt von Ventilen oder bei Pumpen, zerstört werden. Hier bleiben jedoch Aussagen über das Entwässerungsverhalten unberücksichtigt [53].

Es gibt zwei Möglichkeiten die Dicke der elektrochemischen Doppelschicht herabzusetzen. Zum einen kann die Abschirmung der Oberflächenladung durch Elektrolytzugabe verstärkt und die Schicht dadurch komprimiert werden. Zum anderen kann das Oberflächenpotential durch spezifische Ionenadsorption vermindert werden. Aber nicht nur die Art der Dosierung ist für eine optimale Flockung wichtig sondern auch, welches Flockungshilfsmittel zum Einsatz kommt. Einen Überblick über die Polymermittelarten gibt das nächste Kapitel.

3.5 FHM in der Abwasserreinigung

Der tatsächliche Bedarf an FHM wird im Wesentlichen vom negativen Ladungspotential des Klärschlammes bestimmt. Die Zugabe von positiven, kationischen Polymeren bewirkt eine Ladungsneutralisation. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Polymermittelarten. Die wichtigsten für diese Arbeit werden dann genauer erklärt. Flockungshilfsmittel sind notwendig da kleine Partikelgrößen und elektrostatische Abstoßungskräfte die Sedimentation kolloidaler Trübstoffe verzögern. Um diese aus der wässrigen Phase abtrennen zu können, müssen die kolloidalen Partikel zu schnell sedimentierenden großen Flocken zusammengeführt werden. In der Technik werden hierfür Koagulations- bzw. Flockungsmittel eingesetzt. Ein Flockungsmittel besteht im Wesentlichen aus langen gut wasserlöslichen Makromolekülen, die über ihre chemische Gruppen mit den dispersen Teilchen des Klärschlammes in Wechselwirkung treten können. Dabei handelt es sich zumeist um Eisen- oder Aluminiumsalze, die die Suspension vorher destabilisieren und die abstoßenden Kräfte von kolloidalen Teilchen verringern. Das Ergebnis ist ein schwerlöslicher Hydroxidniederschlag der den Feststoff ausfällt. Die durch dieses Flockungsverfahren aufkonzentrierten Schlämme können erst nach Zugabe großer Mengen stabilisierender Zusatzstoffen wie z.B. Kalk oder Asche mechanisch entwässert werden, dabei erhöht sich das Schlammvolumen auf das 1.5-fache. Polymere wurden vorerst als Ersatz für Kalk und Asche verwendet. KULICKE konnte jedoch in seiner Arbeit zeigen, dass die Polymere ein besseres Filtrationsverhalten aufweisen und deutlich weniger davon benötigt wird als von den Metallsalzen [75]. Daher werden der Fest/Flüssig Trennung zunehmend wasserlösliche, synthetische Polyelektrolyte also Flockungshilfsmittel in Kombination mit Koagulationsmittel eingesetzt. Flockungshilfsmittel (FHM) bewirken bei sehr geringer Einsatzkonzentration, kleiner 1 % der abzutrennenden Feststoffmenge, eine sehr effiziente Ausflockung, eine hohe Stabilität der Flocken und somit eine gute Entwässerung der Schlämme.

Auf disperse Partikel wirkende, Kräfte die letztlich in der Abwassertechnologie im speziellen beim Entwässerungsprozess der Prozessbestimmende Schritt sind, gibt es verschiedene Arten von Flockungshilfsmittel die nachstehend beschrieben werden. Diese verschiedenen Arten bewirken unterschiedliche Wechselwirkungen an den Grenzflächen der Feststoffteilchen und können somit auf das Flockenbild Einfluss nehmen. Für diese Arbeit ist es wichtig einen Überblick zu bekommen welche Arten es von Flockungsmittel gibt, da bei den späteren Untersuchungen unterschiedliche Flockungshilfsmittel miteinander verglichen werden. Es stellt oft ein Problem dar, das effizienteste Flockungshilfsmittel verifizieren zu können. Diese Arbeit vergleicht im Kapitel 6.3 unterschiedliche Flockungshilfsmittel.

Dadurch kann ein möglicher Ansatz für die Praxis zur Bestimmung des Flockungshilfsmittels für einen bestimmten Klärschlamm genauer spezifiziert werden, um das Flockungshilfsmittel so effizient wie möglich einsetzen zu können.

3.5.1 Einteilung FHM

Die Flockungschemikalien lassen sich in drei Kategorien unterteilen: [49]

- Flockungsmittel
- Flockungshilfsmittel
- Sonstige Zusatzstoffe

Als Flockungsmittel werden jene Substanzen bezeichnet, die primär für die Entstabilisierung von dispergierten Stoffen verantwortlich sind. In der Abwasserreinigung versteht man unter Flockungsmitteln überwiegend hydrolysierende Eisen(III)- und Aluminiumsalze [49]. Ein Flockungsmittel besteht hauptsächlich aus wasserlöslichen langen Makromolekülen.

Flockungshilfsmittel kurz FHM genannt setzt man dem Wasser nach dem Flockungsmittel zu, um die Flockenausbildung zu verbessern. Es ist wichtig die gewünschten Flockeneigenschaften zu bekommen, um den Feststoff mechanisch optimal von der Flüssigphase trennen zu können. Die verwendeten Stoffe sind natürliche, oder synthetische, hochmolekulare Polymere mit aktiven Funktionen. Polymere sind im Wesentlichen Substanzen mit einer Molmasse von etwa 10^3 bis zu ca. $5 \cdot 10^6$ [g/mol] was einem hydrodynamischen Knäueldurchmesser von wenigen 100 [nm] entspricht. Die Polymerknäuel treten in Lösung als regellose Knäuel auf. Diese gelösten Moleküle sind mit Gelknäuel vergleichbar [74].

Dominiert der Flockungsmechanismus nach dem Prinzip der Polymerbrückung, nimmt die Flockungswirksamkeit mit der Molmasse zu. Die Verwendung von höchstmolekularen Substanzen ist durch die mit steigender Molmasse abnehmende Löslichkeit beschränkt.

Polymere werden in der Wasseraufbereitung bevorzugt als Flockungshilfsmittel verwendet. Sie unterstützen die Entstehung von scherbewährlichen Makroflocken. Die Bildung von Mikroflocken zu Makroflocken wird entscheidend von der Grenzflächencharakteristik geprägt und ist daher sehr stark von der Zusammensetzung des Abwassers abhängig. Entsprechend ihrer Ladung in wässrigen Lösungen werden Flockungshilfsmittel in nichtionogenen, anionaktiven und kationaktiven unterschieden. Weitere Unterscheidungsmerkmale sind neben den chemischen Zusammensetzungen vor allem die Ladungsdichte (Modifikationsgrad bei Copolymeren) und die Molmasse (mittel-, hoch-, höchstmolekular) [49]. Eine Tabelle über die genauere Zusammenstellung ist im Anhang ersichtlich.

Als sonstige Stoffe werden neben den Flockungsmitteln und Flockungshilfsmitteln Chemikalien zur Regulierung des pH-Wertes (Säuren, Basen), sowie Flockungsbeschwerungsmittel (Feinsand, Tonsuspensionen) eingesetzt. Sonstige Stoffe, haben ebenfalls beeinflussenden Charakter, wie Oxidationsmittel (Luft, Ozon, Kaliumpermanganat). Durch die Dosierung von Flockungshilfsmitteln lässt sich die Scherstabilität der Aggregate erhöhen. Bei frühzeitiger Polymerzugabe kann es zu einem wesentlich höheren Polymerbedarf kommen. Eine gute Mischung verbessert den Ausnutzungsgrad der Flockungshilfsmittel. Weiters ist ein schonender Transport der Flocken bis zur Abtrennung notwendig da eine Zerstörung der Flocken auch eine Verschlechterung des Entwässerungsergebnisses zu Folge hat [49].

3.5.2 Lösungsstruktur (Wirkungsweise)

Wie schon erwähnt wird die Koagulation der Partikel durch Zugabe von Polymeren infolge einer Doppelschichtkompression oder spezifischen Adsorption der Gegenionen ausgelöst. Dieser Abschnitt beschreibt die Wirkungsweise des Flockungshilfsmittels. In der Lösung liegen die Polymere meistens als regellose, diffus begrenzte Knäuel vor. Die Lösungsstruktur der Polymerknäuel wird mit einem Formfaktor der als Wert a oder in der Literatur auch als v genannt wird, charakterisiert. Der Wert für eine kompakte starre Kugel beträgt Null, wobei für stark ausgeweitete Knäuel der Wert bis Eins zunimmt. Die räumliche Ausdehnung der Makromoleküle wird unter anderem vom Klärschlamm, der Konzentration und der Temperatur beeinflusst. Weiters spielen die Eigenschaften von der Molmasse und deren Verteilung sowie die innere Kettenbeweglichkeit eine Rolle. Der

Trägheitsradius (R_G) ist eine übliche Größe zur Beschreibung der räumlichen Ausdehnung sprich der Moleküldimension. Er ist definiert durch die quadratisch gemittelten Abstände (r_i) der Knäuel zueinander sowie deren Massenpunkte (m_i)
 Nach FLORY hängt der Trägheitsradius von der Molmasse ab [62].

Der Formfaktor, der das Polymer in der Lösung beschreibt nimmt den Wert 0.33 an. Bei einem undurchspültem Polymerknäuel liegt der Formfaktor bei 0.5, da die Wechselwirkungen zwischen Klärschlamm und dem Polymer energetisch gleichwertig sind, wie die Wechselwirkungen zwischen den Polymersegmenten zueinander. Wenn das Knäuel gut durchspült ist ergibt sich für den Formfaktor ein Wert zwischen 0.5 und 1 wobei 1 der theoretische Maximalwert für ein Stäbchen darstellt [62].

Eine weitere Darstellung zur Beschreibung des Polymerknäuels ist der Staudinger-Index (η) der ein Maß zur Beschreibung einer bestimmten Raumerfüllung eines Polymerknäuels, das von seiner Umgebung nicht beeinflusst wird, darstellt. Durch die Arbeiten von KUHN und MARK konnte ein quantitativer Zusammenhang zwischen dem Staudinger- Index und dem Molekulargewicht des gelösten Polymers hergestellt werden wie in der Glg (9) zu sehen ist [62]:

$$\eta = K_\eta \cdot M^a \quad \text{Glg (9)}$$

M... Molmasse

K_η ... lösungsmittelspezifische Konstante

a... Formfaktor

η ... Staudinger Index

In konzentrierten Lösungen müssen also die Knäuel, die durch die Polymere gebildet wurden, frei durchdrungen werden, oder es muss eine Schrumpfung der einzelnen Gelknäuel stattfinden. Dazwischen können idealer Weise die vorher genannten Zustände beschrieben werden. Nach der Theorie von FLORY kann man die Beziehungen zwischen den beiden hergestellten Gleichungen untereinander umrechnen. Somit kann man den Trägheitsradius nicht nur mittels einer aufwendigen Lichtstreuung sondern auch über den Staudinger Index also auch mittels einer einfachen Viskositätsmessung bestimmen [62].

In technischen Anwendungen liegen die Polymere nicht ideal vor, so dass es zu Abweichungen der theoretischen Annahmen kommt. Oft sind die Polymere-Lösungsmittel Wechselwirkungen größer als die Segment-Segment Wechselwirkungen, das man als gutes Lösungsmittel bezeichnen kann. Hierbei kommt es zu einer Knäuelaufweitung und der Formfaktor ist größer als 0.5 bei schlechten Lösungsmitteln die die Polymere- Polymere Wechselwirkungen bevorzugen liegt der Wert unter 0.5 [62].

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen beschrieben, aus denen diverse Lösungsansätze und Möglichkeiten resultieren. Diese Möglichkeiten, an die Forschungsfrage heran zu gehen, werden im nachstehenden Kapitel ausführlich beschrieben und diskutiert.

4 Charakterisierung von Flocken

Jeder einzelne Schritt des gesamten Flockungsprozesses erfordert sehr unterschiedliche verfahrenstechnische Voraussetzungen. Ein Prozess ist qualitativ dann sehr gut, wenn die Bedingungen für den Flockungsprozess selber und alle nachfolgenden Verfahrensschritte optimiert werden können [49].

Die Charakterisierung von Flocken wird für verschieden Aufgabenbereiche eingesetzt [50]. Für die Fest/Flüssig Trennung gibt es mehrere Flockenabtrennverfahren die wichtigsten dabei sind: [49]

- Sedimentation
- Flotation
- Filtration [49]

Durch diese unterschiedlichen Verfahren werden auch unterschiedliche Ansprüche an die Flocke gerichtet. Viele Messmethoden wurden bereits entwickelt, die im Kapitel 4.2 genauer dargestellt sind. Für die vorliegende Arbeit zur Untersuchung des Trennvorgangs in der mechanischen Überschussschlammabwasserung von kommunalen Kläranlagen, wurde eine Literaturrecherche zu den Themen Charakterisierung und Messmethoden von Flockenhilfsmitteldosierung durchgeführt. Um einen Überblick zu bekommen, welche Messmethoden und Charakterisierungen es gibt und welche bevorzugt genutzt werden.

Zur Einstellung gewünschter Flockeneigenschaften stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, wie Flockungszeiten und Energieeinträge, Flockungsmittelmenge und Flockungsmitteltypen, Flockungsmittelanwendungen, Schlammrückführung, pH-Wert- Einstellungen u.s.w. [49]. Weiters hängt die Wirksamkeit des Flockungshilfsmittels unter anderem auch von der Konzentration der Dosierlösung, deren pH-Wert, den Inhaltsstoffen des Ansatzwassers und der Reifezeit der Dosierlösung von Flockungshilfsmitteln ab [50]. Diese unterschiedlichen Möglichkeiten, Flockeneigenschaften zu untersuchen lassen mehrere Lösungsansätze zu. Die hier aufgezeigten Möglichkeiten, an die Problemstellung zur Optimierung des FHM heranzugehen, sollen einen Überblick geben. Es soll ein Verständnis dafür geschaffen werden, wo die Stärken zur Charakterisierung von FHM mittels des Penetrationsprinzips liegen. Dabei ist aber vorerst eine Begriffsbestimmung zu geben. Unter der Flockenbildung in der Abwasserreinigung versteht man einerseits die natürliche Bildung von Flocken im Belebungsbecken bzw. Nachklärbecken, sowie auch jene Flockenbildung die künstlich hervorgerufen wird,

wie es in der mechanischen Überschussschlamm-entwässerung der Fall ist. In der Literaturrecherche wurden beide Themen behandelt und in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben, da angenommen werden kann, dass unterschiedliche Flocken in der Belebungs Auswirkungen auf die Flocken in der mechanischen Überschussschlamm -entwässerung haben.

4.1 Bisherige Forschungsergebnisse

Der Belebtschlamm in Kläranlagen ist ein künstlich hervorgerufenes Ökosystem, das dieselben chemischen Prozessabfolgen wie in unserem großen Ökosystem Erde beinhaltet. In diesem entwickeln sich unterschiedliche Lebewesen in Abhängigkeit vom Substrat (Nährstoffe). In der Kläranlage ist die Schmutzbelastung der Nährstoff für die Mikroorganismen. Diese Schmutzbelastung dient den Mikroorganismen einerseits zur Energiegewinnung und andererseits zur Zellteilung bzw. zur Biomassegewinnung. Daraus resultiert, dass nach der Belüftung im Belebungsbecken die Schmutzbelastung von den Mikroorganismen in Biomasse- und zur Energieerzeugung umgewandelt wird. Letztlich hat das eine geringe Schmutzbelastung und eine hohe Biomasse zur Folge.

Die Zusammensetzung der Flocken (Belebtschlammflocken) haben Eikelboom und Buijsen [1] wie folgt zusammengefasst:

- Lebende Mikroorganismen, hauptsächlich Bakterien, Bakterien sind negativ geladen und können mit positiv geladenen Ionen Verbindungen eingehen
- tote Zellen
- nicht abgebaute organische Bruchstücke, die in die Flocke eingelagert sind
- anorganische Anteile, z.B. Sand aus dem Abwasser. Dieser Teil kann zwischen 10 und 50% des Gewichtes der Flocken betragen [1].

Zusammengefasst sieht Eikelboom und Buijsen, dass der Reinigungsprozess bzw. die Entwässerung schwieriger werden wenn der Schlammindex ansteigt [1]. Laut Definition ist der Schlammindex jenes Volumen das 1 [g] Trockensubstanz nach einer Absetzzeit von 30 [min] einnimmt. Hat man nun einen hohen Schlammindex sind die Oberflächenbeschaffenheiten aufgrund von z.B. fadenförmigen Mikroorganismen nicht ideal. Die Veränderung der Oberflächenladung beeinflussen Form und Morphologie der Mikroorganismen. Dabei werden Einflussgrößen wie der pH-Wert oder die Flockungsmittel unterschieden die die Oberflächenladung direkt beeinflussen und solche, die durch den Metabolismus der Mikroorganismen eine

Veränderung deren Hülle und des umgebenden Bakterien Schleims bewirken. Somit entsteht eine Veränderung der Oberflächenladung. Die Oberflächenladung hat einen entscheidenden Einfluss auf den Schlammindex und damit auf die Schlammabtrennung. Weiters kann auch angenommen werden, dass die Struktur und Gestalt der Flocke auch ausschlaggebend für das Flockenverhalten in der mechanischen Überschussschlammabwasserung ist.

Eickelboom und Buijsen teilten die Belebtschlammflocken in Gestalt, Festigkeit und Größe ein [1]. Diese Klassifizierung soll im folgendem näher beschrieben werden.

Gestalt:

Die Gestalt der Flocken die Oberflächenbeschaffenheit, ist sicher ein ausschlaggebender Faktor für den Erfolg einer optimalen Flockung und daher auch für die Arbeit eine wichtige Größe. Bei der Gestalt gibt es zwei wesentliche Unterscheidungen. Einerseits abgerundete Oberflächen und andererseits unregelmäßige Oberflächen. Da es in der Natur keine exakten Geometrien gibt, werden all jene die eine kugelförmige Form haben als abgerundet bezeichnet. Andere die sehr stark von der Kugelform abweichen als unregelmäßig. Sind fadenförmige Bakterien anwesend, kommt es zu häufig unregelmäßigen Flocken. Weiters führt eine Zunahme der Belastung ebenfalls zu unregelmäßigen Flocken [1].

Festigkeit:

Bei schwachen Flocken gibt es kein festes Zentrum und die Kohäsion zwischen den Bakterienzellen ist gering. Die Grenzlinien zwischen der Flocke und der Flüssigkeit sind nicht eindeutig erkennbar. Durch die Belastung der Kläranlage wird auch die Stärke der Flocke bestimmt. Bei Schlammbelastung ($B_{TS} < 0.025 \text{ g BSB}_{5/g} \text{ TS} \cdot \text{d}$) können sich die Partikel nicht zu Agglomeraten zusammenschließen und zerfallen in kleinere Partikel. Bei hoher Schlammbelastung ($B_{TS} > 0.4 \text{ bis } 0.6 \text{ g BSB}_{5/g} \text{ TS} \cdot \text{d}$) werden häufig Flockenteilchen abgetrennt, da die Bakterien eine geringere Veranlassung haben Flocken zu bilden. Feste kompakte Flocken werden im mittleren Belastungsbereich gebildet [1].

Die Gestalt sowie Festigkeit beeinflussen die Sinkgeschwindigkeit im Nachklärbecken. Eine runde kompakte Flocke ist aus der Sicht der Fest- Flüssig Trennung vorzuziehen [1]. Auch KULICKE stellt in seiner Arbeit fest, dass die optimale Flockengröße sowie die Festigkeit der gebildeten Flocke für den Entwässerungsprozess eine große Rolle spielt. Werden die Flocken vorzeitig zerstört, so verschlechtert sich das Filtrationsverhalten enorm [75].

Größe:

Die Größe der Schlammpartikel wird durch den Prozess bestimmt und hängt von der Belastung der Anlage ab. Diese Partikel können in drei Gruppen unterschieden werden und reichen von einigen Millimeter bis zu Bruchteilen von einigen Mikrometern.

- Große Flocken $\varnothing > 500\mu\text{m}$
- Mittelgroße Flocken \varnothing zwischen 100 bis 500 μm
- kleine Flocken $\varnothing < 100\mu\text{m}$ [1]

Zusammengefasst gewinnen wir die Erkenntnis, dass Eikelboom und Buijsen die Ausbildung der Schlammflocken auf die Belastung der Anlage zurückführen. Weiters ist die Gestalt, Größe und Festigkeit der Belebtschlammflocken für den nachstehenden Entwässerungsprozess entscheidend.

Bis dato konnten die Eigenschaften von Belebtschlammflocken nicht gemessen werden. Man weiß zwar, dass die Partikelgröße, -form, -konzentration, -oberfläche und Struktur auf den Trennvorgang von der fest/flüssigen Phase einen Einfluss haben. An der Universität in Gent hat man versucht gemeinsam mit Unternehmen ein Verfahren zu entwickeln um diese Eigenschaften besser verstehen zu können. Die eingesetzten Messtechniken sind die Laserabschwächung (TOT) und Videoanalyse [7].

Die Größe der Flocken und die Verteilung ist das Ergebnis eines mikrobiologischen Gleichgewichtszustandes. Einflussparameter sind Fracht, Substratkonzentration, Scherkraft, Schlammalter und Sauerstoffmenge [14]. Daher auch wichtige Parameter für den Entwässerungsprozess.

Die Laseranalyse besteht aus einem He-Ne-Laser dessen Strahl durch eine rotierende Linse eine Kreisbewegung durchführt, wie in der Abbildung 15 zusehen ist. Dabei ist die Rotationsgeschwindigkeit größer als die Bewegungsgeschwindigkeit des zu untersuchenden Partikels [7].

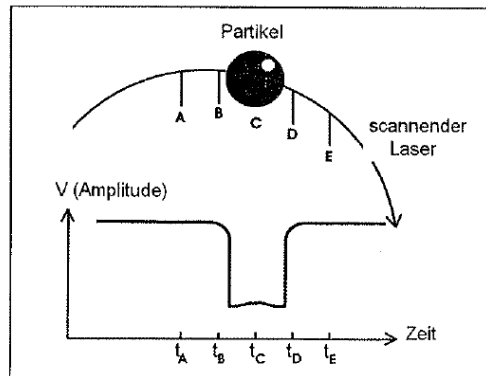


Abbildung 15; Partikelgrößenmessung mittels Laseranalyse [7]

Über eine softwareunterstützte Videobildanalyse ist eine Größe- und Formanalyse der Partikel möglich. Weiters können mit dieser Analyse Parameter wie Kompaktheit und Balligkeit erfasst werden. Durch die Auswertung der Videobildanalyse sind eine Vielzahl von Parametern wie Durchmesser, Fläche, Formfaktor, Längenverhältnisse etc. möglich. In der Abbildung 16 ist eine Belebtschlammflocke dargestellt [7].

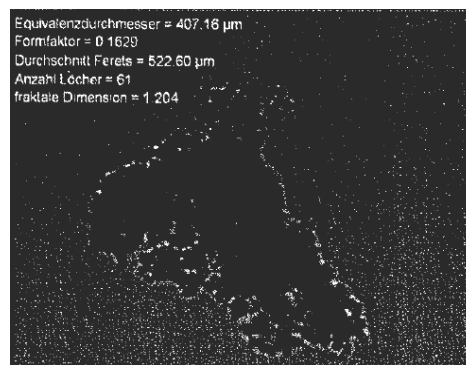


Abbildung 16: Bildanalyse einer Belebtschlammflocke [7]

Die Beobachtung über die oben erwähnten Eigenschaften und deren Entwicklung ist für die Flockung von Partikeln im Belebtschlamm von großer Bedeutung. Die Universität Gent konnte mit ihrem Versuch zeigen, dass große Belebtschlammflocken eine höhere Scherempfindlichkeit zeigen, als kleine. Bei einer höheren Rührgeschwindigkeit sinkt die Anzahl der großen Partikel signifikant. Die Steigerung der Rührgeschwindigkeit bewirkt also eine Verkleinerung der Belebtschlammflocke und es stellt sich ein höheres Gleichgewicht zwischen der Flockenbildung/-aufbrechung sowie der Größenverteilung ein. Bei kleinen oder mittleren Rührgeschwindigkeiten ist ein stetiges Flockenwachstum zu beobachten [7].

Liu untersucht die Abhängigkeit der Größe und Dichte der Flocken von der Art und Dosierung (einmalig bzw. mehrfach) sowie Rührintensität. Dabei flockt er den Schlamm mit einer niedrigen Polymermittelmenge. Nach einer kurzen Zeitspanne wird die Drehzahl erhöht. Die Flocken werden mechanisch zerstört. Dadurch wird eine Oberfläche frei, die nicht von Polymermittel bedeckt ist. Liu erhöht periodisch die Polymermittelmenge und zerstört die gebildeten Flocken immer wieder mechanisch. Mit dieser Methode verringerte er den Wassergehalt von 97.4% auf 88.3%. Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass die Flocken zerteilt werden und sich bei der Nachdosierung sich festere kompaktere Aggregate bilden. Dieses Verfahren der zufälligen Flockung unterscheidet sich von der Pelletierflockung, was nachstehend erwähnt wird. Das Primärteilchen kann durch eine Abrollbewegung mit gleichzeitiger Kraftübertragung Schichten aufbauen. Im Gegensatz zur Pelletierflockung führt die Erzeugung von Flocken hoher Dichten zu einem schlechteren Entwässerungsergebnis [28].

HEMME et al. beschreiben eine spezielle Art von Flockengeometrie. Dabei wird mit Hilfe eines Reaktors die Prozessführung so abgestimmt, dass ein Aufbau schichtenartiger Pelletflocken gelingt. Dabei gibt die Flocke in der Bildungsphase der Aggregate vor der maschinellen Entwässerung, Wasser aus dem Inneren der Flockenstruktur ab. Daher besitzen Pelletierflocken hervorragende Entwässerungseigenschaften und eine Einsparung an Flockungshilfsmitteln. Als Strukturparameter kommen Trockensubstanzgehalt und die Restfeuchte des Schlammes zur Anwendung. Daher sind detaillierte Aussagen über den Einfluss einzelner Parameter (z.B. Flockungsmittelmenge) auf die Strukturbildung, die die entscheidende Fähigkeit für die Wasserabgabe bildet, nicht möglich [54].

Um Schlammvolumina zu reduzieren setzt man maschinelle Entwässerungsaggregate ein. Nicht nur der erreichbare Feststoffgehalt ist von Bedeutung, sondern auch die Konditionierung der erforderlichen Menge an Flockungshilfsmittel und daraus resultierend der benötigte Energieeinsatz [4].

Der Feststoffgehalt, der bei der maschinellen Entwässerung erreicht wird, ist von den unterschiedlichen Wasserarten abhängig. KOPP [4] unterscheidet zwischen:

- freiem Wasser
- Zwischenraumwasser
- Oberflächenwasser und
- Zellinnenwasser [4].

Die verschiedenen Wasserarten unterscheiden sich dadurch, dass unterschiedliche Bindungskräfte zwischen den Wasserteilchen und dem Feststoff vorherrschen. Die Bindungskraft kann auch als Zugkraft zwischen den Feststoffteilchen und den angelagerten Wassermolekülen gesehen werden. Bei der maschinellen Entwässerung kann nur das freie Wasser abgeschieden werden. Durch Zugabe meistens kationischer Polymere wird der Schlamm der negativ geladen ist geflockt und bildet sich zu Schlammagglomeraten aus. Somit wird die Wasserabgabegeschwindigkeit erhöht. Um den optimalen Polymerbedarf eines Schlammes bestimmen zu können, werden immer Laboruntersuchungen durchgeführt um Veränderungen zu prognostizieren und zu dokumentieren. Eine Vielzahl von Messparametern legt KOPP fest, die sich in ihrer Aussagekraft sowie im Messaufwand stark unterscheiden. Manche Ergebnisse lassen nur eine qualitative Aussage zu. Eine Zusammenstellung von Entwässerungskennwerten nach KOPP ist im Anhang Tabelle 2 zu sehen [4].

Um die erforderliche Polymermenge zu eruieren wird eine Versuchsreihe ermittelt. Die optimale Polymermittelmenge wird erreicht, wenn keine elektrostatischen Abstoßungskräfte mehr wirken und somit das elektropheretische Zetapotential, laut KOPP, im Zentrat nahe bei ± 0 [mV] liegt. Der Zusammenhang zwischen dem Zetapotential und dem dazugehörigen Feststoffgehalt wird in der Abbildung 17 dargestellt. Hier ist zu sehen, dass der größte Feststoffrückstand bei einem Polymermitteleinsatz von 12 [g/kg] liegt. Dieser Punkt liegt auch kurz unter dem Isoelektrischen Punkt also noch knapp im negativen Bereich. KOPP legt somit die optimale Polymerdosis bei ca. 12 [g/kg] fest. Dabei unterteilt KOPP die Kurvenverläufe in Unterflockung, Übergang und Überflockung [4].

Würde man die Kurve aus der wirtschaftlichen Sicht sehen, ist es fraglich, ob man wirklich das Doppelte an Polymermittelmenge also sprich 6 [g/kg] mehr einsetzt, um 0,3% mehr Trockenrückstand zu erhalten. Laut dieser Kurve, die unter Laborbedingungen durchgeführt wurde, und somit keine Aussage über das wirkliche Entwässerungsverhalten an einem realen Aggregat treffen kann, würde die optimale Dosierung aus wirtschaftlicher Sicht bei ca. 6 [g/kg] liegen. In der Abbildung 17 ist dies mit der grünen Linie dargestellt. Weiters wäre aber auch eine optimale Dosierung von 2 [g/kg] denkbar da der Trockenrückstand hier bei ca. 10% liegt und für das Aggregat ausreichend sein kann. Andere nachgeschaltete Verfahrenstechnische Schritte, wie die des Faulturms, sind hier nicht miteinbezogen worden. Natürlich sind hier die Schritte von einer Einsparung von 50% an Flockungshilfsmittel der dem Mehrenergieaufwand z.B. im Faulturm gegenüber zu stellen. Letztlich stellt sich doch die Frage, ob der optimale Dosierpunkt mit Hilfe des Zetapotentials ermittelt werden kann.

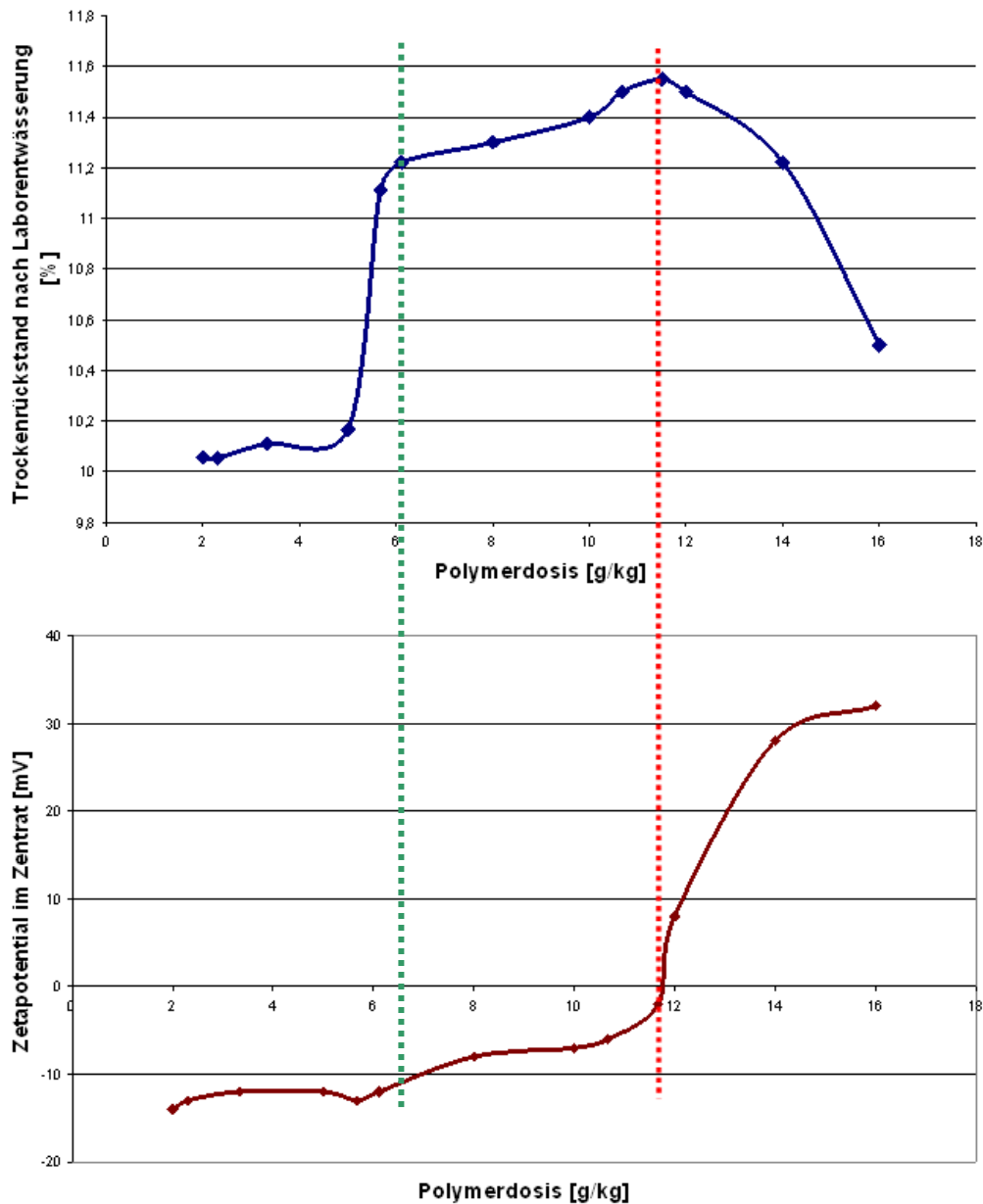


Abbildung 17: Polymerermittlung nach Kopp [4]

Ist die gesamte Feststoffoberfläche mit dem Flockungsmittel benetzt, tritt ab diesem Zeitpunkt Überflockung ein. Durch die unterschiedlichen Wechselwirkungen von Flockungsmitteln untereinander und zwischen Flockungsmittel und Feststoffoberfläche kann es zu einer Stabilisierung der Suspension kommen. LaMer und Healy definierten einen Bedeckungsgrad für die sinnvolle Flockenmitteldosierung für einen optimalen Bereich von $\Phi=0.5$. Der Bedeckungsgrad ist das Verhältnis zwischen bedeckter und unbedeckter Feststoffoberfläche der zwischen $0 < \Phi < 1$ definiert ist [12].

Jedoch ergaben neuere Ergebnisse, dass auch der Anlagemechanismus und die Partikelform einen wesentlichen Einfluss auf die optimale Dosierung haben [12].

Umfangreiche Untersuchungen ergaben, dass der Polymerbedarf direkt von der negativen Oberflächenladung der Schlammpartikel bestimmt wird [5]. Die EPS enthält in hohen Massen negative Oberflächenladungen, die sehr voluminös sind, und aufgrund ihrer starken Polarität viel Wasser binden. Sie umgeben die Mikroorganismen mit einem gelartigen Schleim [6]. Eine Übersicht über die Oberflächenladung verschiedener Mikroorganismen ist im Kapitel 3.2 aufgezeigt.

Zusammenfassend schreibt KOPP, dass die Laboruntersuchungen auf die Praxis übertragbar sind. Jedoch bei der Auswahl des Polymerproduktes und der Scherstabilität ist die Aussagekraft nicht mit Laboruntersuchungen alleine abzudecken. Somit sind Versuche vor Ort nicht vollständig zu ersetzen [4].

Weiters hält PUSCH in seinen Untersuchungen fest, dass es zur sichtbaren und nicht sichtbaren Flockenbildung kommt. Für die Praxis ist es sehr schwierig ohne technische Hilfsmittel diese zu verifizieren [76].

Da der Klärschlamm in Kläranlagen sich ständig verändert, sind aufwendige Laboruntersuchungen nicht mehr aktuell, wenn die Ergebnisse vorliegen. Daher sind diese für eine Optimierung von Flockungshilfsmitteln nicht optimal. Man versucht immer mehr online- Messungen einzusetzen. Das nächste Kapitel gibt einen allgemeinen Überblick über die eingesetzten Messmethoden. Nach einer Beschreibung von Messmethoden nach Stand der Wissenschaft werden online Messmethoden beschrieben, damit diese verglichen werden können. Dies ist notwendig um auf etwaige Vorteile schließen zu können. Weiters kristallisiert sich damit heraus, inwieweit die neue Charakterisierung mit dem Penetrationsprinzip von Bedeutung ist.

4.2 Messmethoden zur Ermittlung der Dosierung von FHM

Die messtechnische Erfassung von Flockungs- Abtrennprozessen erfordert den Einsatz von unterschiedlichen Methoden zur Charakterisierung von dispergierten Stoffen. In diesem Kapitel werden nachstehend Messmethoden vorgestellt um einen Überblick zu bekommen welche Messmethoden verwendet werden um letztlich die optimale Dosierung des Flockungshilfsmittels eruieren zu können.

Eine Zusammenfassung stellt die DVGW Regelwerk W117 dar, ihre Grundzüge und Kombinationen untereinander werden in unterschiedlichsten Varianten verwendet:

- Partikelgrößenanalyse
- Gravimetrische Schwebstoffbestimmung
- Elektrophoretische Beweglichkeit (Zetapotential)
- Trübungsmessung [49].

Partikelgrößen können mittels Laserbeugungsspektrometer durchgeführt werden. Das Messprinzip basiert auf der unterschiedlich starken Beugung kohärenten Lichts eines He-Ne-Lasers aufgrund verschiedener Partikelgrößen. Diese Intensitätsverteilung wird mit Hilfe einer Fourieranalyse in eine Partikelgrößenverteilung transformiert. Nach bisherigen Erfahrungen ist die Partikelgrößenanalyse des Wassers nach Flockung und Flockenabtrennung empfindlicher als die Streulichtmessung. Die Streulichtmessung bringt weiter Aussagen über die Feststoffabtrennung z.B. über den Durchbruch von bestimmten Partikelfractionen durch den Filter. Die Teilchengrößenanalyse mit durchströmten Kapillarküvetten ist für solche Aussagen ungeeignet, da die Flocken bei der Messung zerstört werden [50].

Drei Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenladung werden hauptsächlich eingesetzt: die Elektrophorese, die Akustophorese und die Strömungspotentialtitration. Bei jedem Verfahren wird eine ladungscharakteristische Größe gemessen, wie z.B. bei der am wissenschaftlich weitverbreiteten elektrophoretischen Methode die elektrophoretische Wanderungsgeschwindigkeit aus der man das Zetapotential ableiten kann. Das Zetapotential hat sich einen Ruf als Standardgröße für die elektrostatische Stabilität einer Dispersion erarbeitet. Jedoch müssen die Proben für die Messungen stark verdünnt werden. Der Absolutwert der Potentiale ist jedoch nur bei Stoffsystemen aussagekräftig die in ihrem Verhalten bekannt sind. Wechselt die Stabilität eines Stoffes häufig, dann gibt nur eine Ladungstitration sichere Auskunft über die stabilen und instabilen Bereiche eines Systems [26]. Diese drei Messmethoden vor allem das Zeta- Potential sind die am meisten verwendeten Messungen zur Optimierung von Flockenhilfsmittel.

Für diese Arbeit bedeutet dies, dass wir nicht nur eine neue Charakterisierung mittels des Penetrationsprinzips durchführen. Ein Vergleich mit der Standardgröße dem Zeta- Potential und der mit der neuen Größe wird im Kapitel 6 betrachtet.

Nachstehend werden die am häufigsten verwendeten Messmethoden kurz dargestellt. Wobei die Elektroakustik eine untergeordnete Rolle einnimmt und keine so häufige Verwendung findet.

Elektrophorese und Zetapotential Hierbei sorgt ein elektrisches Feld dafür, dass geladene Teilchen zur gegensinnig gepolten Elektrode wandern. Die elektrophoretische Geschwindigkeit [μe] ist dabei ein Maß für die elektrostatische Ladung. Aus der Geschwindigkeit wird das Zetapotential mit Hilfe der Theorie von Smoluchowski abgeleitet. Dies gilt jedoch nur für den „Idealfall“, da es Abweichungen von Ionenwertigkeit, Elektrolytkonzentration und Partikelgröße gibt [26].

Elektroakustik Dabei wird die Wechselwirkung der Partikel und deren Ladungshülle mit Ultraschallwellen angeregt und auf das Zetapotential umgerechnet. Dieses Verfahren ist für Originalkonzentrationen für Suspensionen von Feststoffpartikeln geeignet [26].

Strömungspotential Im Englischen auch Stremaing Current Method genannt. Dabei wird die Polarität und die Stärke der an den Partikeln vorhandenen Oberflächenladungen gemessen. Bei diesem Messverfahren befindet sich die Probe in einem Kunststoffzylinder in dem Stößel oder Kolben auf und ab bewegt werden. Dabei findet eine Verdrängung der Ionenwolke um die Partikel, die an den porösen Wänden des Probenbehälters und an den Kolben haften bleiben, statt. Die Gegenionenschicht die das Partikel umgibt wird gemessen und die vielen Dipole summieren sich zum sogenannten Strömungspotential auf. Diese Messgröße repräsentiert damit die Größe um den Chemikalien Einsatz zu steuern, denn man geht davon aus dass alle anderen Effekte auf diese Ladungsveränderung rückzuführen sind [26].

Für die Beurteilung der Entwässerbarkeit von Klärschlamm und daraus resultierend die Optimierung von Flockungshilfsmittel steht eine Vielzahl von Labormessgeräten wie vorher bereits beschrieben zur Verfügung. Mit der Momentaussage im Zeitpunkt der Probenahme kann man allgemeine Aussagen über die Entwässerbarkeit treffen. Diese erfordern jedoch eine gute Ausbildung und eine bestimmte Zeit von ca. 1-2 Tagen und natürlich einen enormen Kostenaufwand. Für einen kontinuierlichen Betrieb mit ständig wechselnder Schlammqualität und wechselnden Belegschaft auf der Kläranlage können diese Messergebnisse aber nur grobe Richtwerte und Anhaltspunkte für die Dosierung von FHM dienen. Auch eine visuelle Beurteilung der Gesamtsituation und die daraus folgende Dosierung des Flockungshilfsmittel ist aufgrund des erhöhten Aufwandes nicht zu realisieren und einfach zu ungenau. In der Praxis wird die Dosiermenge auf einen Wert eingestellt und nicht mehr so oft

verändert wie es eigentlich die Qualität des Schlammes erfordert. Daher gehen immer mehr die Bemühung in Richtung online- Messung um eine bedarfsgerechte Dosierung zu realisieren. Nachstehend sind Lösungsansätze sowie Realisierungen beschrieben. Dieser Überblick ist für diese Arbeit sehr wichtig da man ebenfalls mit der neuen Charakterisierung von FHM Ansätze und Lösungswege für eine online- Messung aufzeigen möchte.

Ein Verfahren das bereits erwähnt wurde und zur Charakterisierung der Oberflächenladung dient wird sehr häufig für die online- Messung verwendet die Strömungspotentialmessung. Wird in einer Rohrleitung eine Elektrode in der Mitte und eine in der Nähe der Rohrwand befestigt, so lässt sich ein Strom messen. Die Stärke des zu messenden Stromes ist von der Fließgeschwindigkeit und der Art der Suspension abhängig. Dies lässt sich dadurch erklären, in dem sich die positiv geladenen Feststoffpartikel durch Adsorption und Van- der Waals- Kräfte sich tendenziell an der Rohrwand sammeln. Die leichter beweglichen Gegenionen werden der Strömung mitgerissen, und konzentrieren sich in der Mitte der Rohrleitung. Da Partikel und Gegenionen unterschiedliche Ladungen besitzen bildet sich hier eine Potentialdifferenz zwischen Rohrmitte und Wand aus, wie es in der Abbildung 18 zu sehen ist.

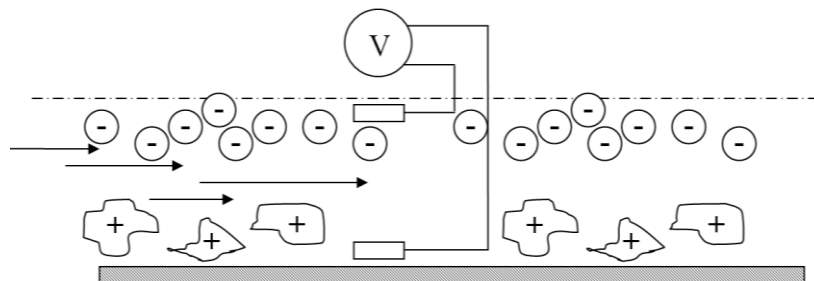


Abbildung 18: Flockungshilfsmitteldosierung nach KRUMWIEDE [61]

Die Strömungspotentialmessung hat Krumwiede das erste Mal in einem Regelkreis eingebaut um den Flockungsmittelbedarf zu optimieren. Dabei wirkt der Sollwert für die FHM- Dosierung auf die Dosierpumpe entsprechend ein, nachdem der Sollwert einmal gefunden wurde. Ausgehend von einer konstanten Schlammqualität im Zulauf zum Entwässerungsaggregat steigt der Abscheidegrad bei zunehmender FHM- Dosierung zunächst an und bleibt nach Erreichen des Maximums auf diesem konstanten Wert. Der Abscheidegrad erreicht bei ca. 420 [mg FHM/Liter Schlamm] einen Wert von ca. 95% wie es in Abbildung 19 dargestellt ist. Eine weitere Erhöhung würde keinen Mehrwert für die Entwässerungsqualität liefern sondern nur unnötige

Kosten verursachen. Das Einsparungspotential liegt in etwa bei 20% bis 40% FHM [60].

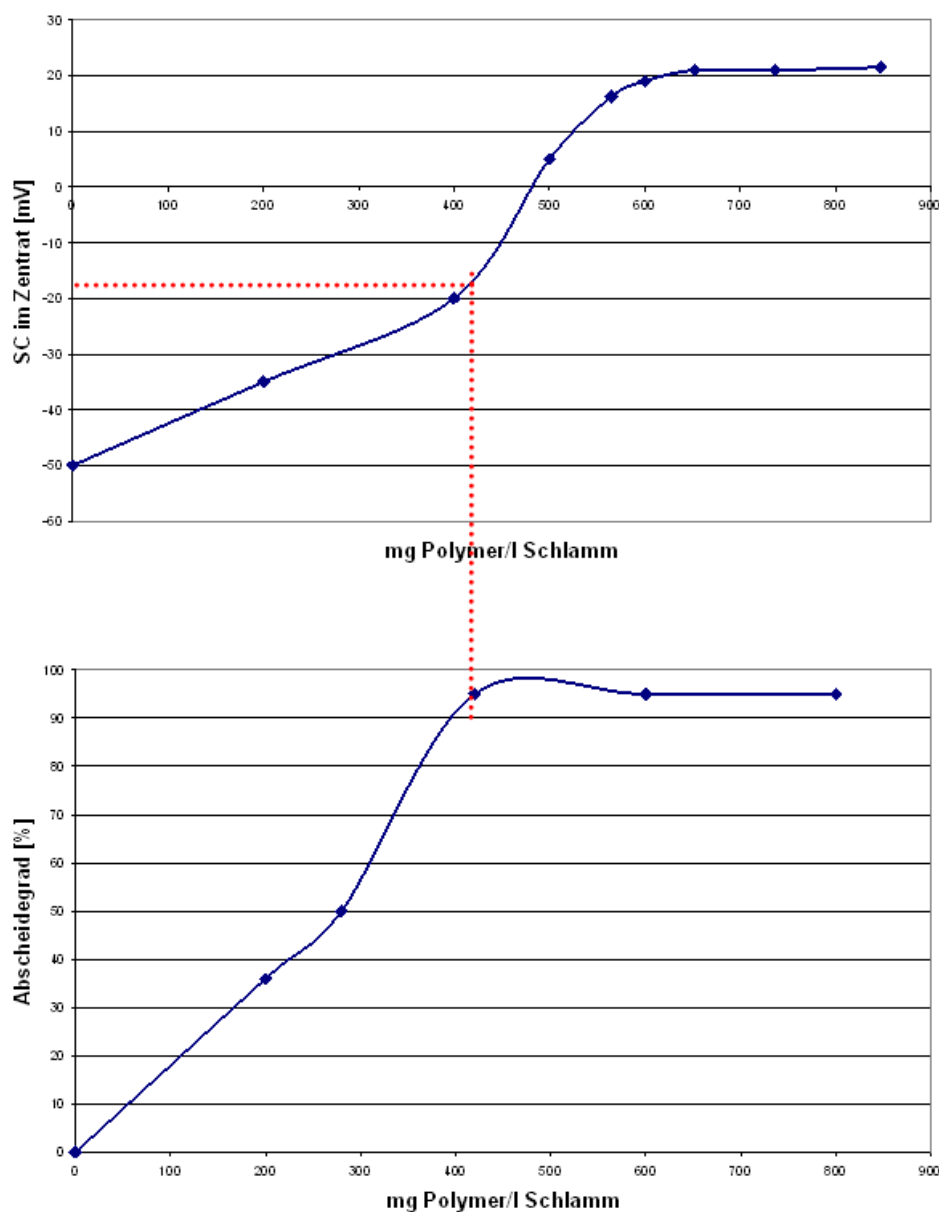


Abbildung 19: Auswertung Flockungshilfsmitteldosierung nach Krummende [60]

Die Messung der elektrophoretischen Beweglichkeit ist sehr aufwendig und nicht für kontinuierliche Bestimmungen einsetzbar. Stattdessen kann der Bedarf an Flockungshilfsmittel auch über die photometrische Detektion erfolgen. Dieses Messverfahren ist kontinuierlich einsetzbar da sich die Rohwasserbedingungen ständig ändern. Der Flockungsprozess kann somit ständig optimiert werden, um die Entwässerungsqualität konstant halten zu können. Routinemäßige Untersuchungen sind oft kostspielig und sehr zeitaufwendig.

Bei Anlagen mit denen man große Erfahrungen hat, kann eine Steuerung der Flockendosierung durch Hilfsparameter wie z.B. Trübung, UV-Absorption, DOC- und Chlorophyll-Konzentration erfolgen.

Zur Messung von Teilchengrößen und Partikelkonzentrationen werden verschiedene Messprinzipien eingesetzt z.B. Abschattung eines feinen Lichtstrahles (Extinktionsprinzip), Lichtstreuung durch Teilchen oder abbildende Methoden wie z.B. Bildanalyse oder Photographie [50].

Die gravimetrische Bestimmung des Feststoffgehaltes und die Trübungsmessung sind die am häufigsten verwendeten Methoden zur Kontrolle des Wassers nach einer Flockenabtrennung. Diese Methoden ergänzen sich, weil die Feststoffbestimmung die massenmäßig wichtigeren Teile erfasst, während durch die Trübungsmessung die feineren Partikel bestimmt werden. Die Trübungsmessung kann auch für die Bestimmung der Flockenphase von der Feststoffabtrennung schnelle Informationen über den Aggregationszustand liefern. Bei Verwendung einer Lichtquelle wird die optische Durchlässigkeit des Wassers zwischen den Flocken zur Trübungsmessung herangezogen. Die wesentlich schneller erhaltenen Messwerte korrelieren mit der Resttrübung nach der Flockenabtrennung [50].

Eine Einflussgröße in der mechanischen Entwässerung ist die Verteilung der Flockengröße des konditionierten Schlammes. Daher analysiert ein Industriesensor die Struktur des konditionierten Schlammes. Durch eine Zeilenkamera aufgenommene Bilddaten, werden die relativen Flockengrößenverteilungen mittels Bildverarbeitung ermittelt. Zwischen den verschiedenen Summenwerten der Sehnenlängenverteilung und dem Entwässerungsergebnis wurde ein Zusammenhang erkannt [51].

Schröder [14] hat einen Zusammenhang zwischen dem Aufkonzentrierungsfaktor und der Sehnenlänge der Flocken eruiert. Dadurch ist es möglich durch aufgenommene zweidimensionale Grauwertverläufe eines Klärschlammstromes den Aufkonzentrierungsfaktor zu bestimmen. Dabei werden drei Größenbereiche definiert, jeweils zwei davon werden in ein Verhältnis gesetzt und mit dem daraus resultierenden Verhältnisparameter der Aufkonzentrierungsfaktor ermittelt. Weitere Größen zur Bestimmung des Aufkonzentrierungsfaktors können durch das Integral über die Häufigkeitsverteilung für Summenhäufigkeiten mit der nachstehenden Gleichung(10) bestimmt werden [14].

$$I(\) = \int_{n=10}^{90} n_i \cdot G_i(\) \quad \text{Glg.(10)}$$

$$n= 10$$

G_i ...Partikelgröße

n_i ...Gesamtanzahl

..Summenhäufigkeit von 0.1 bis 0.9

Als weiterer Parameter, wird ein so genannter Volumenparameter, aus der Summe der Produkte und der Anzahl der Partikel in einem Größenbereich berechnet, und weiter für die Bestimmung des Aufkonzentrierungsfaktors bestimmt. Im Anhang Abbildung1 ist schematisch eine solche Regelung dargestellt. Zum Unterschied des absoluten Trockensubstanzgehalts des konditionierten Klärschlammes gibt der Aufkonzentrierungsfaktor das Verhältnis der Trockensubstanzkonzentration des entwässerten Klärschlammes zu den Trockensubstanzkonzentrationen des zu konditionierten Klärschlammes zu Beginn des Konditionierungsprozessen wieder. Somit ist der Aufkonzentrierungsfaktor ein Maß für die Qualität des Entwässerungsprozesses- bzw. Konditionierungsprozesses. Der Aufkonzentrierungsfaktor ist jedoch von der abhängigen Größe sprich Dosiermittelmenge des Polymers zu 84 Prozent abhängig [14].

NAGEL und Prof. AY am Lehrstuhl für Aufbereitungstechnik der BTU Cottbus verfolgen einen anderen Ansatz, den der Clusteranalyse. Da sie der Meinung sind, dass herkömmliche mathematische Methoden zur Charakterisierung der Flocken als Basis für eine Prozessoptimierung nur unzureichend bzw. fehlerbehaftet sind [52]. Dieser Ansatz wertet Schnittbilder von Flockenstrukturen aus. Mathematische Methoden zur Beschreibung von Flocken basieren im Wesentlichen auf der Auswertung von zwei- und dreidimensionalen Bildinformationen zur Bestimmung der Aggregatdichten [55]. Die Clusteranalyse ist ein theoretischer Ansatz der die Basis für eine Modellierung bei Flockungsprozessen simuliert. Dazu werden die Flockenstrukturen mittels einer CCD- Kamera in einem Bildanalyseverfahren verarbeitet [56]. Die Koordinaten der Pixel einer Flocke dienen dann als Eingangswert einer Clusteranalyse. Dabei werden nach Gruppierungen von Datenpunkten gesucht die zwischen den Clustern zu einer maximalen und minimalen Streuungsquadratsumme führen. Das Verhältnis davon, dient zur Berechnung der Kenngröße (F-Wert), die dann mit einem Statistikprogramm ausgewertet wird [57]. Dieses Verfahren ist jedoch noch nicht endgültig ausgereift, da die Komplexität der dreidimensionalen Schlammflocken nicht gerechnet wird und die Analyse von den zweidimensionalen Modellen nicht ausreichend repräsentativ ist. Die bisherigen Arbeiten zeigten aber bereits, dass die Clusteranalyse als Verfahren zur Untersuchung der inneren Flockenstruktur im Zusammenhang mit der Entstehung

der Aggregate und daraus folgend die geeignete Wahl der Flockungsbedingungen maßgeblich beeinflusst.

Weitere Messmethoden werden in den folgenden Patenten der Vollständigkeit halber kurz erwähnt haben, aber vom physikalischen Prinzip keine wesentlichen Erneuerungen. In dem US Patent 5 037 559 A ist ein Konditionierungsverfahren beschrieben, das die Dosierung von Flockungshilfsmitteln mit einer optischen Einrichtung löst, indem die Schlammteilchen das Licht einer Lichtquelle reflektieren. Die damit gemessenen Informationen stellen einen Zusammenhang zwischen Flockenzahl, Flockengröße und der Flockenstruktur dar. Es sind allerdings keine Informationen darüber enthalten, inwiefern die erhaltenen Daten mit der Konditionierung des Flockungshilfsmittels korrelieren [58]. Auch im Patent DE 37 43 428 A versucht man die Flockungsmittelzugabe in Abhängigkeit von der Flockengröße und Flockenstruktur zu steuern. Aus der Verteilung von Grautönen über einer Bildpunktmatrix wird eine Information über die Menge, Größe und/oder Struktur der von einer Lichtquelle angeleuchteten Schlammflocken gewonnen [59]. Bei dem Patent DE 196 17 528 A1 wird ständig durch eine Messkammer Schlamm geströmt. Der Hauptbestandteil der Messapparatur dient der Optimierung der Flockungsmittelzugabe.

Ein ganz neuer Ansatz zur Optimierung und Analyse von Flockungsprozessen ist der Versuch über Neuronale Netze. Durch die rasante Entwicklung der Rechnerleistung ist es möglich abhängige Parameter die für den Flockungsprozess verantwortlich sind in den Computer einzuspeisen und daraus Prognosen zu ziehen. Bei diesem Lösungsansatz besteht jedoch das Problem, dass die Ergebnisse eines Flockungsprozesses nicht allein von den Betriebseinstellungen abhängen. Die mathematischen Modellierungen weichen oft von der Realität ab da unvorhergesehene Störgrößen nicht berücksichtigt werden. Auch die Annahmen und Vereinfachungen beschränken diese Art der Optimierungsstrategie wie STRUGHOLTZ in ihrer Arbeit ausführlich diskutiert [77].

In diesem Kapitel wurden Methoden beschrieben die derzeit Stand der Wissenschaft sind um Wirkungsweisen und Dosierungen von Schlämmen zu beschreiben. Wobei es eine sehr starke Ausrichtung zu online- Messmethoden gibt. Hierbei lässt sich jedoch die Charakterisierung von Schlammflocken auf zwei physikalische Prinzipien zurückführen. Diese wäre einerseits das Prinzip der Ladungsneutralisation und andererseits die Partikelgrößenbestimmung in unterschiedlichster Art und Weise. Im nächsten Kapitel wird ein neues Messverfahren dargestellt und deren Vorteile und Nachteile zu den herkömmlichen Methoden diskutiert.

5 Das Penetrationsprinzip zur Charakterisierung von Flocken

5.1 Einleitung

Die Einstellung der Polymerdosierung erfolgt auf den Kläranlagen in der Regel manuell und in sehr großen Zeitabständen von mindestens einem Tag. Oft sind objektive Messparameter wie z.B. visuelle Beurteilung oder eigene langjährige Erfahrungen und Wissen notwendig. Wechselnde Schlammeigenschaften im Laufe des Tages, lassen keine optimale Dosierung zu und man begibt sich somit auf die Sichere Seite und neigt dazu zuviel FHM in den Flockungsprozess einzubringen. Dagegen versucht man mit online- Messverfahren Abhilfe zu schaffen. Damit man Schwankungen die im Laufe des Tages die Kläranlage passieren und somit die Entwässerungsqualität des Klärschlammes beeinflussen, ausgleichen kann.

In der Literatur findet man unterschiedliche online- Messmethoden zur Charakterisierung von Schlammflocken jedoch kann man diese immer auf zwei physikalische Prinzipien zurückführen. Einerseits das Prinzip der Ladungsneutralisation und andererseits die Partikelgrößenbestimmung in unterschiedlichster Art und Weise. Betrachtet man diese Prinzipien wie in Abbildung 20 schematisch dargestellt, dann stellt man fest, dass immer eine indirekte Messgröße bzw. Messwert, der einen Einfluss auf die Dosierung hat, gemessen wird. Man betrachtet nicht immer das gesamte System, sondern den Koagulationsprozess getrennt von Entwässerungsaggregaten, dies ist in der Abbildung 20 dargestellt.

Für ein erfolgreiches Entwässern ist es jedoch auch wichtig, die Art des Aggregates mit einzubeziehen. Diese Systemgrenze ist in der Abbildung 20 rot dargestellt. Eine Neutralisation der Ladung im blauen System, muss zwangsläufig nicht unbedingt eine optimale Entwässerung bedeuten. Ein gleicher Zeta Potential Wert hat auf einem Seihband andere Auswirkungen als auf einer Entwässerungsscheibe. Dieser Wert gibt keine Auskunft über die Größe oder Festigkeit bzw. die mechanische Beanspruchung wieder. Bei der Partikelgrößenbestimmung ist es sehr schwierig mit Bildanalysen auf einen guten Korrelationsfaktor zu kommen, da man die Grenzen der Flocken untereinander sehr schwierig erkennen kann. Weiters muss es nicht heißen, dass eine bestimmte Größe von Flocken wieder den mechanischen Ansprüchen genügt. Eine optimale Flocke für das Entwässerungsaggregat Seihband ist eine Flocke die sehr viel Feststoff bindet und instabile interpartikuläre Kräfte aufweist. Die Abtrennung der fest/flüssig Phase erfolgt durch Vibrationsbewegungen, die dazu führen, dass das Wasser in der Flocke nach außen dringt und das frei werdende Wasser somit abgeführt werden kann.

Bei anderen Aggregaten z.B. Entwässerungs- trommel und -scheibe sind kompaktere Flockenstrukturen gefragt, damit der Feststoff vom drehenden Aggregat mitgenommen werden kann und somit entwässert wird. Unterschiedliche Eigenschaften von Entwässerungsaggregaten und Klärschlamm stellen die Auswahl und Dosierung von FHM zur optimalen mechanischen Entwässerung oft vor technische Probleme, da die derzeitigen Methoden sehr langwierig und kostspielig sind.

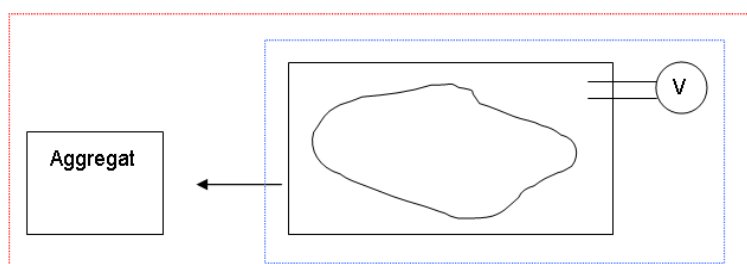


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Systemgrenzen

Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein neues Verfahren bzw. eine Methode vorgestellt um die Schlammflocke direkt zu charakterisieren. Diese Methode basiert auf einem physikalischen Prinzip dem derzeit noch nicht sehr viel Beachtung geschenkt wurde. Die Methode des Penetrationsprinzips ist schnell, aussagekräftig und für den Schlambetreiber bedarf es wenig an Aufwand. Im folgenden Kapitel wird das Messprinzip ausführlich erklärt.

5.2 Erläuterung des Messprinzips

Aus der Mechanik kennt man das Prinzip von „actio et reactio“ der lateinische Ausdruck für Aktion und Reaktion oder auch Wechselwirkungsprinzip genannt. Das dritte newtonsche Axiom, beschreibt, dass jede Aktion also eine Kraftauswirkung gleichzeitig eine gleich große Reaktion also eine Gegenkraft erzeugt, die auf den Verursacher der Aktion der die Kraft ausübt zurückwirkt. Mit anderen Worten stellt man ein Glas auf einen Tisch dann wirkt eine Kraft Glas (F_G) auf den Tisch. Damit das Glas aber nicht herunterfallen kann, muss der Tisch die gleiche Kraft Richtung Glas entgegenbringen wie es in der Abbildung 21 zu sehen ist. Weiters wird in der Mechanik zur Berechnung der Kräfte eine Methode angewandt, die man als Freischneiden bezeichnet. Will man die Kraft die auf den Tisch wirkt berechnen, wird erstmals die Systemgrenze festgelegt und der Gegenstand in unserem Fall der Tisch durch eine Kraft (F_T) ersetzt.

Es wirken noch vier andere Kräfte auf den Tisch die aber für die Berechnung der Kraft (F_G) nicht von Bedeutung sind darum ist die Festlegung einer Systemgrenze wichtig.

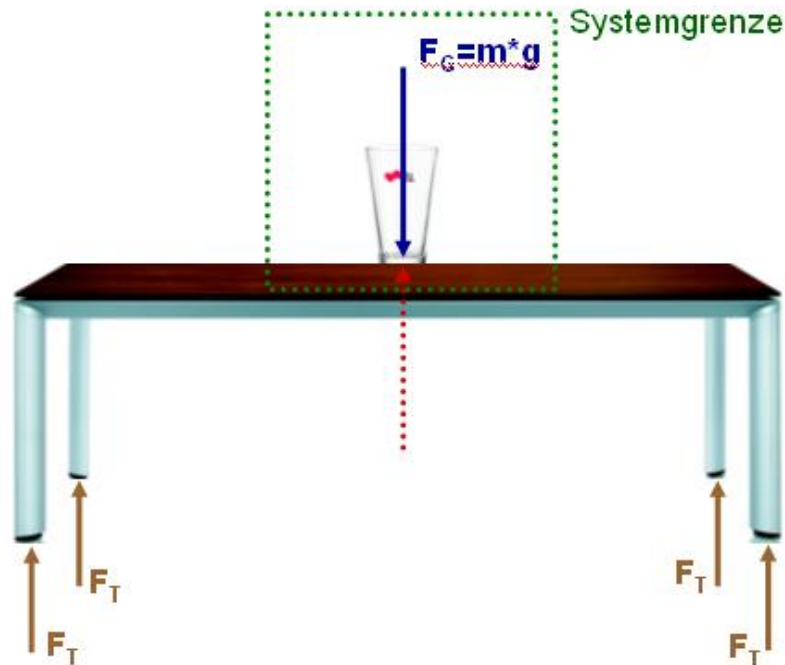


Abbildung 21: Kräftegleichgewicht Tisch

Dieses Prinzip aus der Mechanik wird nun bei Klärschlammflocken angewandt. Die interpartikuläre Kraft die für die Flockenbildung verantwortlich, ist kann derzeit nicht gemessen werden, jedoch kann das Resultat der Flockenbildung Aufschluss geben. Schneidet man eine Schlammflocke frei, dann benötigt man eine Kraft die in dieser Arbeit als Flockenkraft (F_F) bezeichnet wird. Dies ist in der folgenden Abbildung 22 zu sehen.

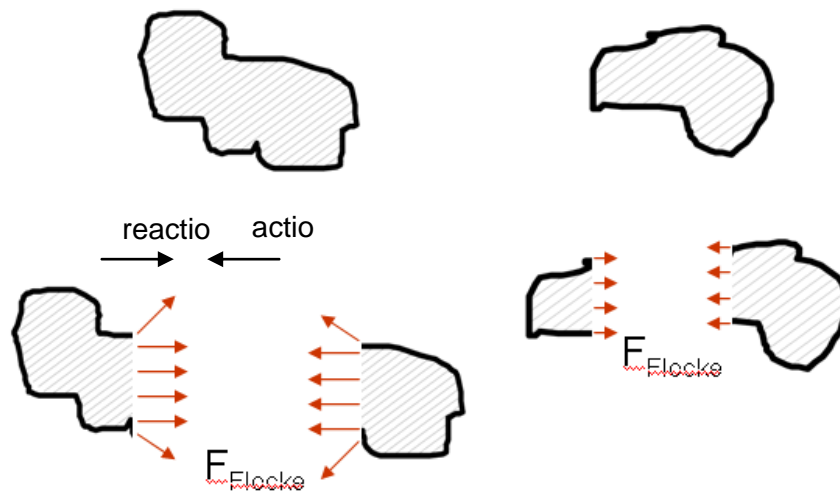


Abbildung 22: Kräftegleichgewicht Flocke

Die Flockenkraft hängt sehr stark vom Erfolg der Entwässerung ab und kann sehr unterschiedlich sein. Dominieren die Wechselwirkungskräfte der anziehenden Kräfte wird das Resultat der Flockenkraft größer sein als wenn die Wechselwirkungen der abstoßenden Kräfte größer sind. Hierbei ist immer die Grundvoraussetzung, dass die Energiebarriere für eine erfolgreiche Koagulation bereits überwunden wurde. Man geht davon aus, dass die restlichen Kräfte stabile Flockengeflechte verursachen oder zu einem lockeren Verband führen.

Dies hängt davon ab, in welchem Verhältnis die anziehenden und abstoßenden Kräfte zu einander stehen. Die nächste Abbildung 23 soll das ein wenig verdeutlichen. Im Beispiel A ist die Summe der abstoßenden Kräfte mit F_x zusammengefasst und die Summe der anziehenden Kräfte mit F_y , daraus resultierend ergibt sich das Ergebnis F_{z_A} . Im Beispiel B ist ein anderes Resultat F_{z_B} dargestellt. Vergleicht man die beiden Ergebnisse untereinander sieht man in Abbildung 23 unter dem Punkt „Resultat Beispiel A u. B“ die Differenz zwischen den beiden Kräften von Beispiel A und B. Mit anderen Worten ist mehr Flockungshilfsmittel im System, sind die anziehenden Kräfte stärker und eine festere kompaktere Flocke ist möglich (Beispiel A). Ist weniger Flockungshilfsmittel im System, kommt es zu einer schwächeren Flockenbildung (Beispiel B). Daraus resultiert, dass durch diesen Unterschied auf den Polymermitteleintrag geschlossen werden kann. Dadurch kann die Entwässerungsleistung hinsichtlich ihrer technischen Möglichkeiten und Wirtschaftlichkeit optimiert werden.

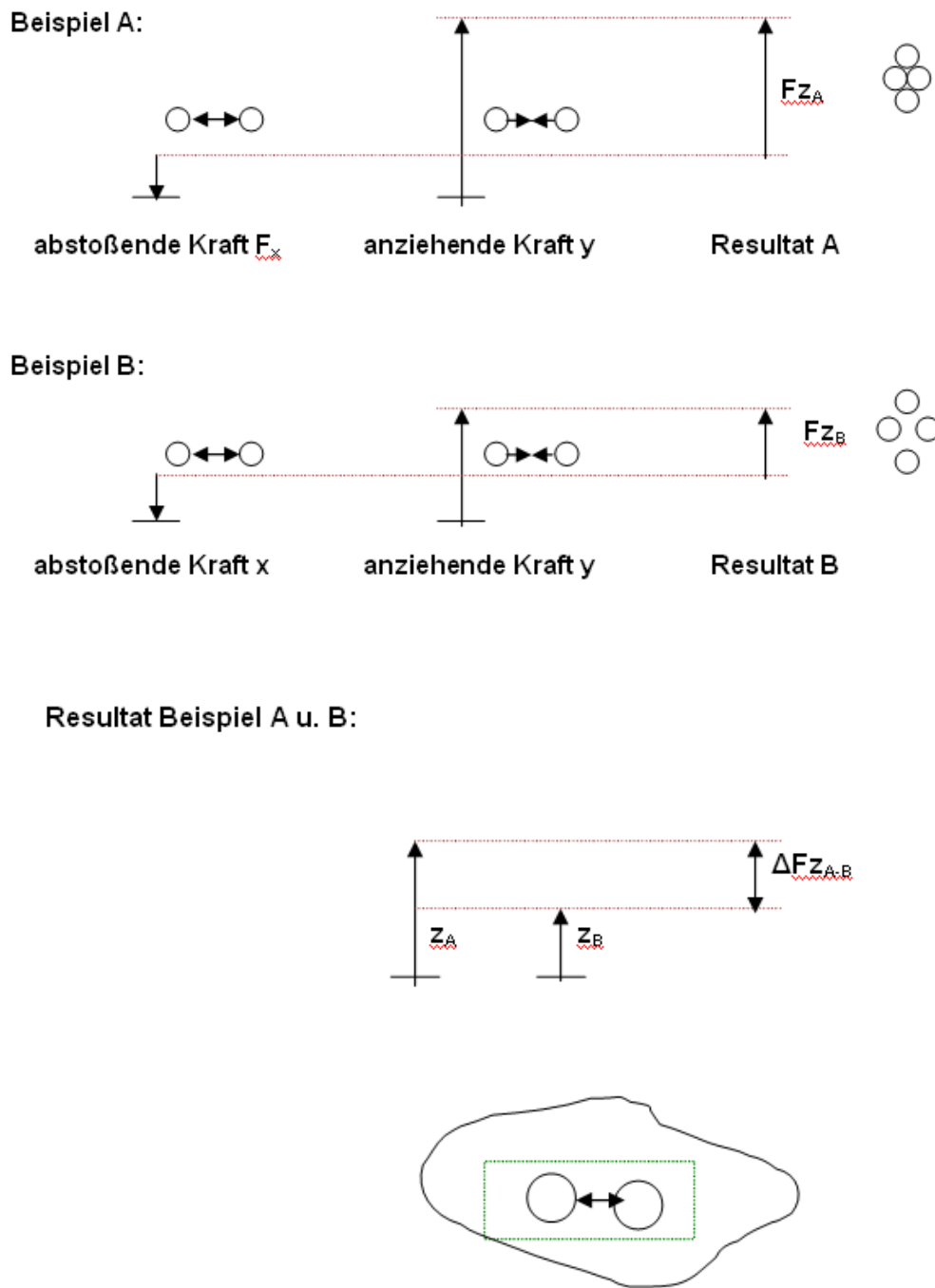


Abbildung 23: Flockenkraft Vektorendarstellung

Weiters gibt die Kompressibilität der Schlammflocken auch eine Auskunft darüber in wie weit die Schlammflocke in ihrem Inneren verzweigt und stabil sind. Auch darüber wie viel Wasser sich in der Flocke befindet. Mit Hilfe eines Beispiels soll dies näher erklärt werden. In der nächsten Abbildung 24 (Bild A) zeigen sich Flocken, die aus viel Wasser und wenig Verzweigungen im Inneren der Flocke bestehen. Diese

Flocken lassen sich besser komprimieren als jene Flocken, die ein gutes, stabiles Innenleben haben. In (Bild A) wirkt eine andere Flockenkraft als im (Bild B).

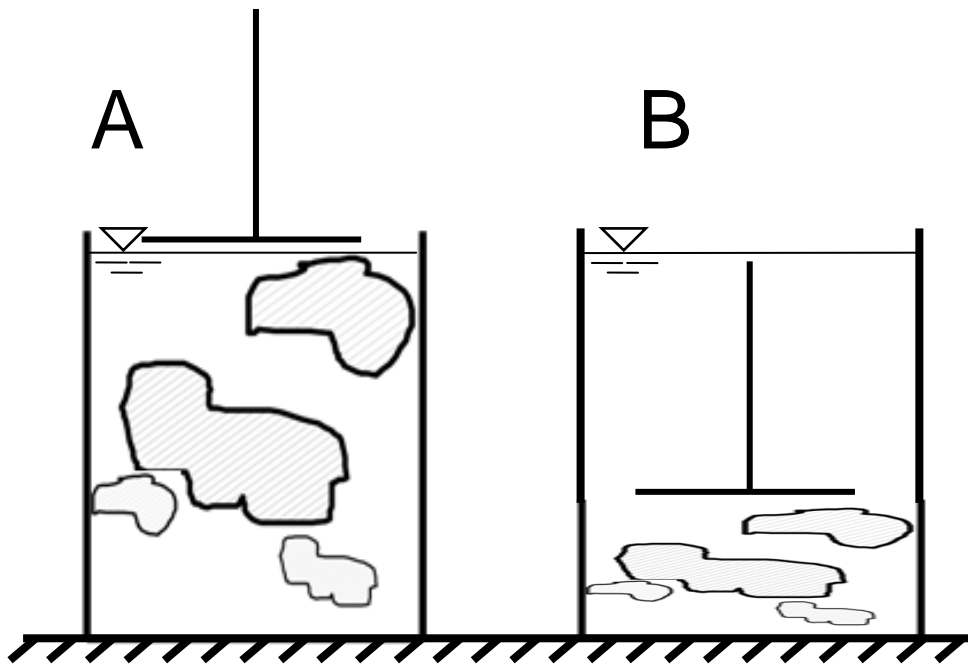


Abbildung 24: Flockenkompression

Mit der Flockenkraft ist es möglich, die Flockenstruktur der Flocke zu beschreiben. Die Flockenkraft ist von der Kompaktheit der Flocke abhängig und wird als neue grundlegende Größe für die Beschreibung der Entwässerungsqualität eingeführt.

Bei der Messung mit dem Penetrationsprinzip kommen zwei Phänomene vor. Einerseits wird die Flocke zerstört und andererseits kann der Penetrationskörper nicht mehr in die Flocke eindringen, so dass sie komprimiert wird. Voruntersuchungen im Sommer 2009 haben gezeigt, dass es einen Zusammenhang zwischen der Dosiermenge und der Flockenkraft gibt wie es in der Abbildung 25 zu sehen ist.

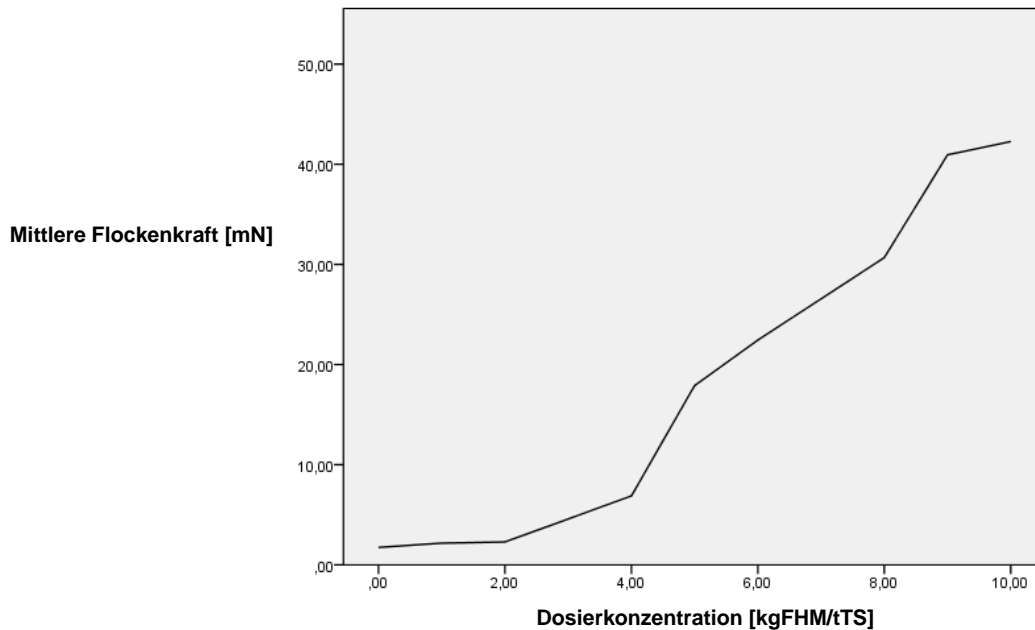


Abbildung 25: Vorstudie Flockenkraft-Dosierkonzentration

Dabei lässt sich folgende Hypothese ableiten:

„Je mehr Flockungsmittel dem Schlamm beigefügt wird, umso größer ist die Flockenkraft“

Zur Untersuchung dieser Hypothese wurde ein bereits bestehendes Versuchsgerät am Institut für Prozess- und Partikeltechnik an der TU-Graz adaptiert und für diese Messungen verwendet. Dieses Messgerät wird Strength Tester genannt und findet in den vorliegenden Untersuchungen seinen Einsatz.

5.3 Beschreibung des Messaufbaus

Am Institut für Partikel- und Prozesstechnik der TU- Graz wurde im Jahr 2004 ein Analysegerät (Strength- Tester) entwickelt, um nachzuweisen, dass die Verbandbildung als natürlicher Filter wirkt [72]. Dieses Gerät, wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit dahingehend adaptiert um den Durchdringungswiderstand bzw. die Flockenkompression einer geflockten Flocke in der mechanischen Überschussschlammmentwässerung zu bestimmen. Dieses Gerät wurde zu diesen Zwecken mit einer neuen Datenaufnahme versehen sowie dahingehend umgebaut, dass der Messweg verkürzt wurde. Durch die Anwendung des neuen Datenaufnahmesystems ist man nicht mehr auf ein exotisches Betriebssystem angewiesen und kann mit allen Rechnern die Steuerung des Messegerätes durchführen. Die Datenverwertung wurde wesentlich erleichtert und verbessert.

Der für diese Arbeit relevante Messaufbau sowie die Funktionsweise werden im Folgenden näher beschrieben.

Der Penetrationskörper taucht in den Messzylinder ein, wie es in nachfolgendem Verfahrensschema in der Abbildung 26 zu sehen ist. Die Waage misst die unterschiedlichen Auftriebskräfte des Penetrationskörpers.

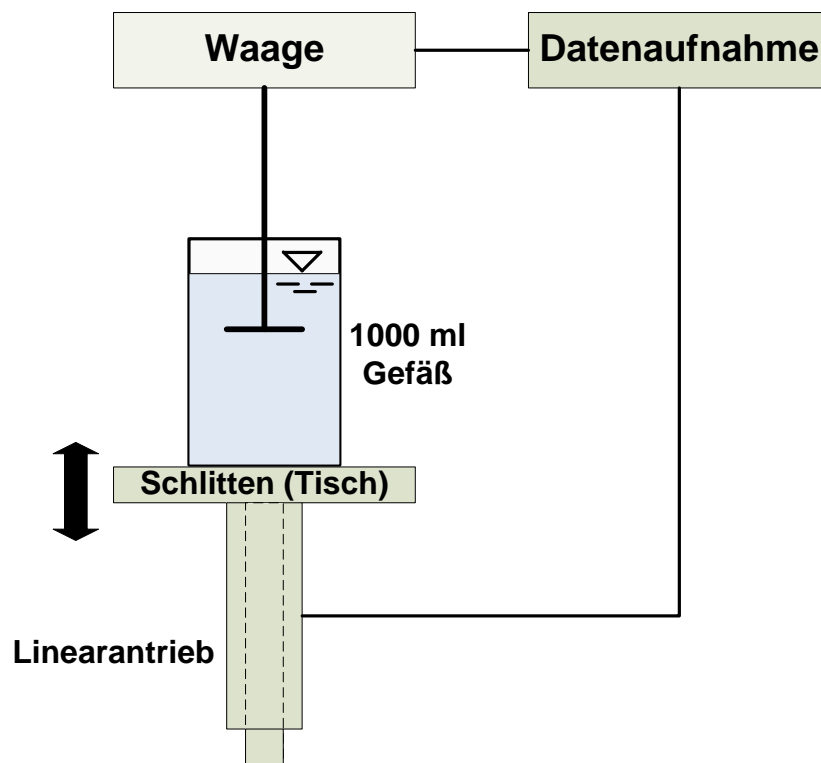


Abbildung 26: Schematische Darstellung Funktion Strength- Tester



Abbildung 27: Darstellung des Strength- Tester

Der Strength- Tester besteht aus einem Schlitten, auf dem ein Laborglas mit einem Füllvolumen von 1000 [ml] steht. Das Laborglas, das mit 600 [ml] Klärschlamm befüllt wird, wird mit Hilfe eines Linearantriebes nach oben bewegt. So dass ein Penetrationskörper der an einer unterschalgigen Hochpräzisionswaage befestigt ist, in die geflockte Schlammprobe eintauchen kann. Der Gewichtsverlust des Rings aufgrund des Flockenwiderstandes und Auftrieb wird als Funktion der Schlittenposition von einem Datenaufnahmegerät aufgezeichnet. Dies ergibt ein charakteristisches Diagramm für die Flockenfestigkeit über die Höhe des Messzylinders, das durchaus als spezifischer Flockenabdruck gesehen werden kann.

Das Eindringen lässt auf unterschiedliche Kräfte schließen, da der Penetrationskörper auf unterschiedliche Flockenstrukturen stößt. Um das Prinzip genauer darstellen zu können werden nachstehend einige Versuche dargestellt.

5.3.1 Eindringen in Wasser

Wenn ein Körper (Ring) in das Wasser eintaucht wird am Anfang die Oberflächenspannung überwunden. Danach wirkt lediglich die Auftriebskraft und Widerstandskraft, wie in Abbildung 29 dargestellt ist. Diese Kräfte verändern sich während des Messvorganges nicht. Beim Eindringen in Wasser werden zwei Zonen durchlaufen. Die erste Phase die des Eindringens in das Klarwasser, hier wird die Oberflächenspannung überwunden. Dies ist in Abbildung 29 als Punkt 1 dargestellt. Danach befindet sich der Penetrationskörper in der kontinuierlichen Phase des Klarwassers als Punkt 2 dargestellt. Setzen wir ein Kräftegleichgewicht an und definieren unsere Systemgrenzen dann, lässt sich folgendes Kräftegleichgewicht Gleichung (11) aufstellen. Der Kräfteverlauf ist in der Abbildung 29 Klarwasser dargestellt.

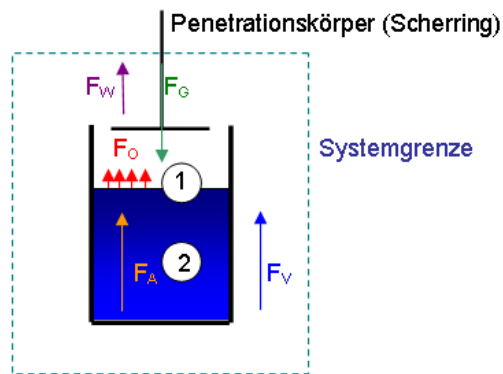


Abbildung 28: Penetration in Wasser

F_A ... Auftriebskraft

F_G ... Gewichtskraft des Penetrationskörpers

F_W ... Widerstandskraft

F_O ... Oberflächenspannung des Fluides

F_V ... Vorschubkraft des Linearantriebes

$$F_G = F_V + F_O + F_A + F_W$$

Gleichung (11)

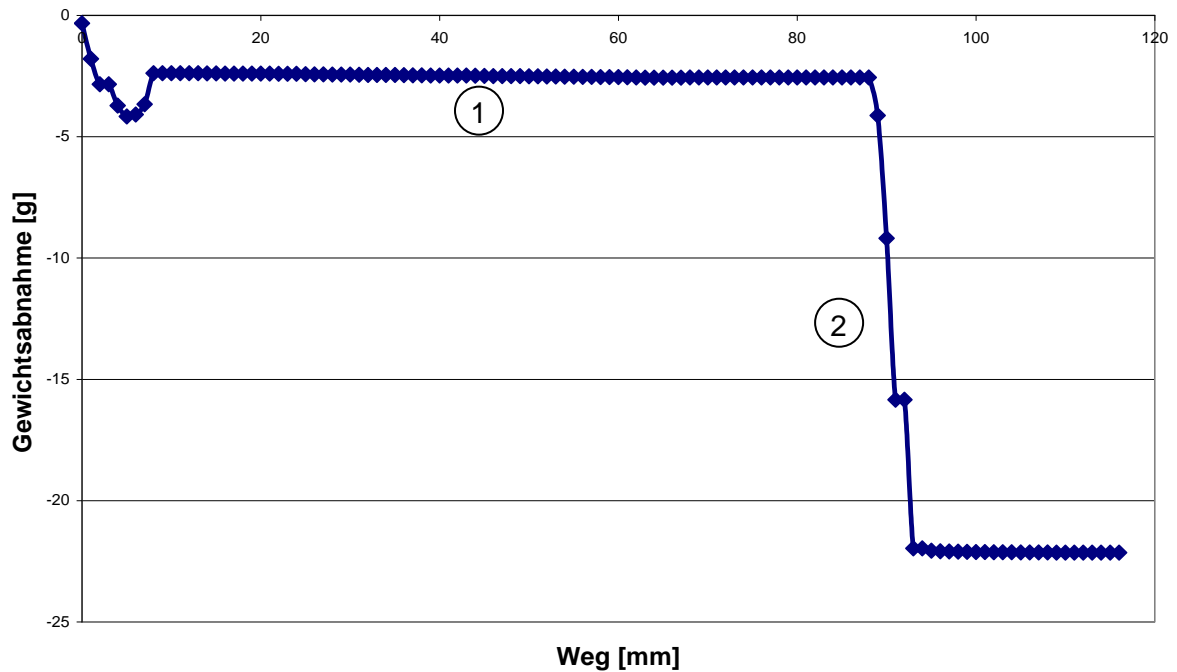


Abbildung 29: Kräfteverlauf Klarwasser

5.3.2 Eindringen in geflockten Klärschlamm

In der nachstehenden Abbildung 30 ist das Eindringen des Penetrationskörpers in den Klärschlamm schematisch dargestellt. Die Versuche wurden so durchgeführt, dass der Penetrationskörper in ein Behälterglas mit 600ml geflocktem Schlamm eindringt. Eine nähere Beschreibung gibt das Kapitel 5.2. Die ersten Messbereiche sind mit den vorher dargestellten Grafiken ident und werden in der Abbildung 30 nicht mehr dargestellt, Penetrationskörper, da es sich immer wieder um kommunalen Klärschlamm handelt und deswegen vorerst konstant zu setzen sind.

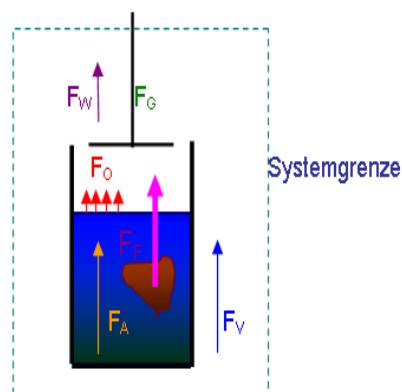


Abbildung 30: Penetration in geflocktem Klärschlamm

Bei der Klarphase bleibt die entgegenwirkende Kraft konstant. Trifft der Penetrationskörper auf die Schlammflocke wird er leichter. Je stabiler die Flocke ist, umso mehr wird der Penetrationskörper angehoben und es resultieren unterschiedliche Kurven wie in der Abbildung 31 dargestellt.

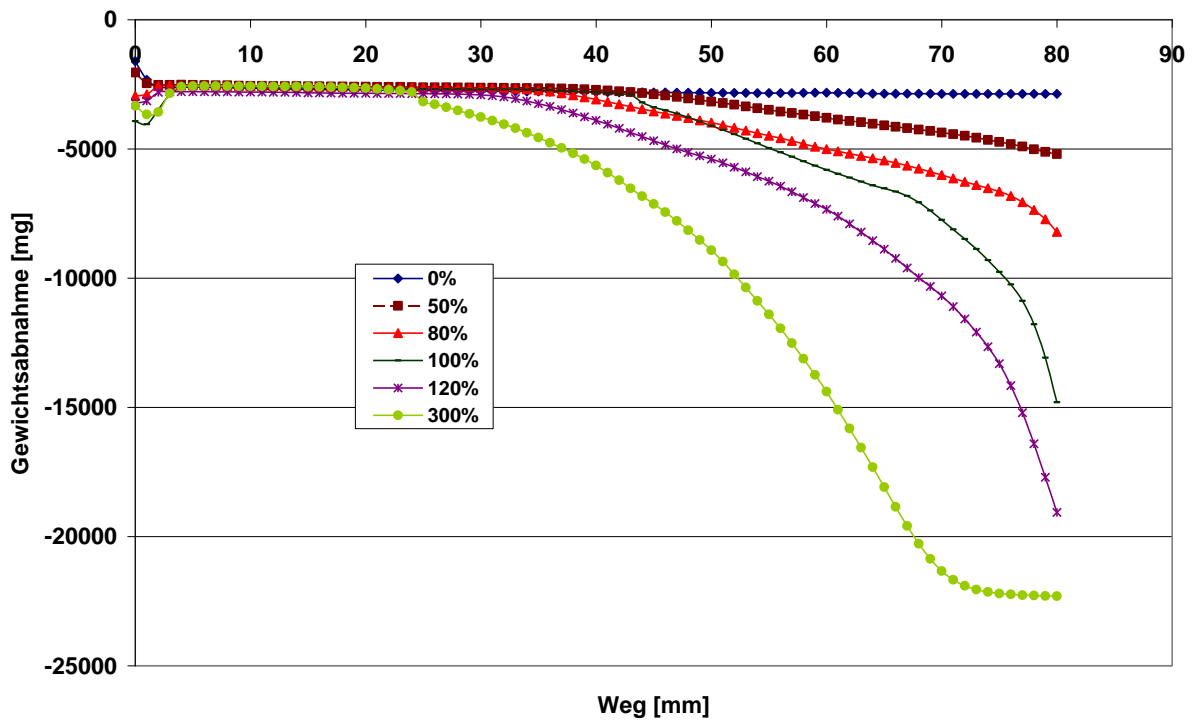


Abbildung 31: Gewichtsabnahmekurve Strength- Tester

In diesem Diagramm ist auf der x-Achse der Weg bzw. die Position des hinauffahrenden Schlittens aufgezeichnet. Auf der y-Achse wird mittels einer Waage die Gewichtsabnahme gemessen. Dabei ist zu sehen, dass die Gewichtsabnahme beim Rohschlamm, jene Kurven ganz oben konstant bleibt (blaue Kurve). Hier wirken nur die Auftriebskraft und Widerstandskräfte. Bei den Kurven darunter hingegen ist eine deutliche Abhängigkeit der Dosierungskonzentration festzustellen. Je höher die Konzentration des Polymers umso steiler fällt die Gewichtsabnahme aus. Multipliziert man die einzelnen Werte mit -9.81 [N] erhält man die Kurve die in der Abbildung 33 dargestellt.

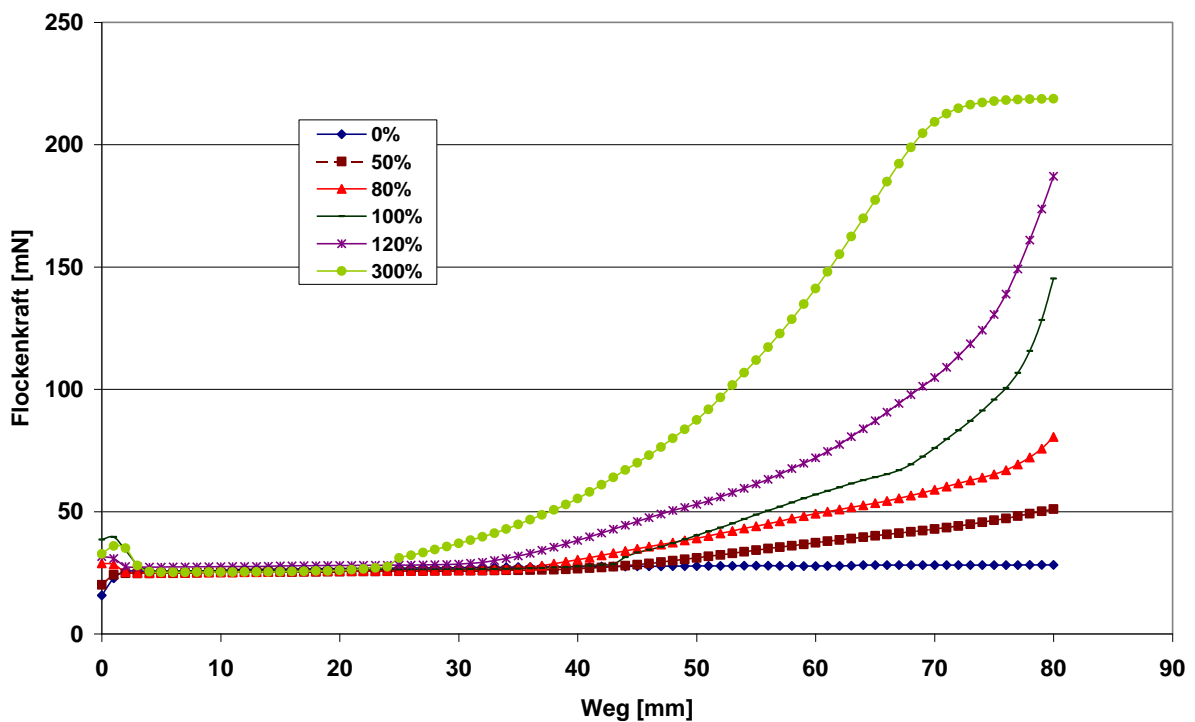


Abbildung 32: Gewichtsabnahmekurve Strength- Tester

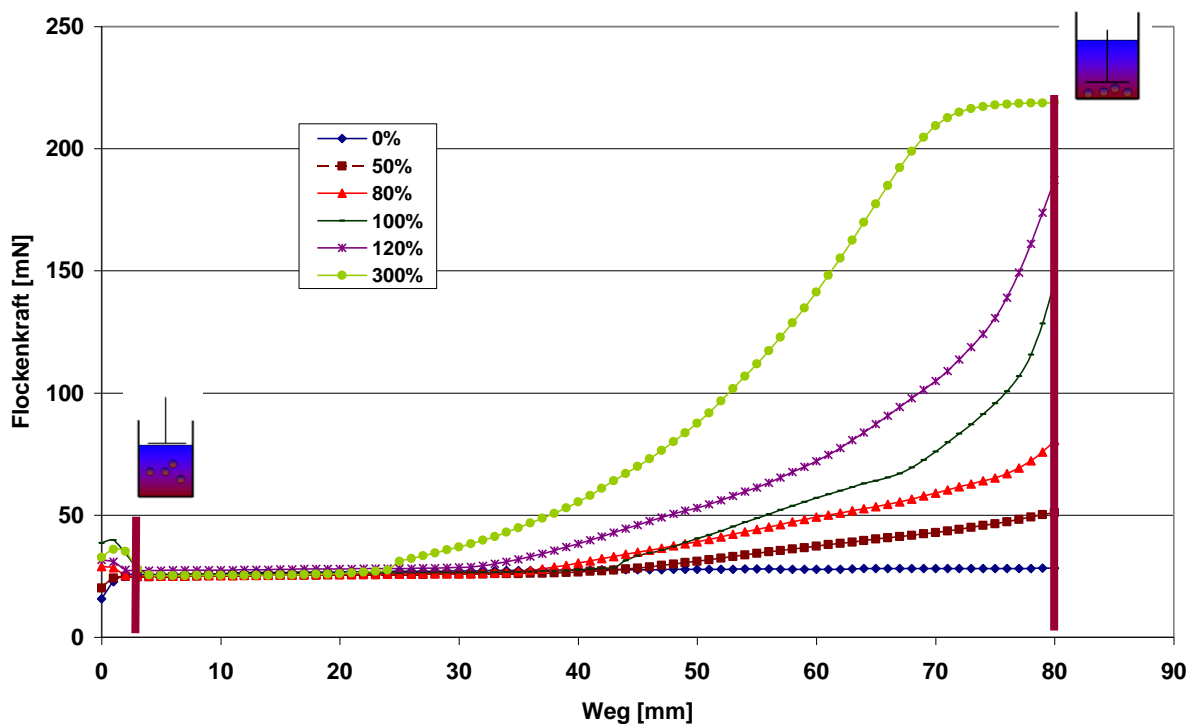


Abbildung 33: Normierung der Kräfte

Die Kurve wird nun normiert indem man den Bereich zwischen dem Eindringen in die Flüssigkeit und dem Erreichen des Bodens betrachtet. Am Beginn der Messung sieht man, dass es durch die Oberflächenspannungen Unterschiede gibt. Diese Abweichungen sind dadurch zu erklären, dass anhaftendes Wasser oder Fetttropfchen am Penetrationskörper geringe Unterschiede verursachen. Zum Schluss kann man eine merkliche Entlastung des Penetrationskörpers erkennen, hier trifft er auf dem Boden auf. Diese Bereiche sind jene Grenzwerte um normierte Kurven für die Berechnung zu erhalten. Für die weitere Betrachtungsweise liegen nun die in der Abbildung 34 normierte Kurven vor.

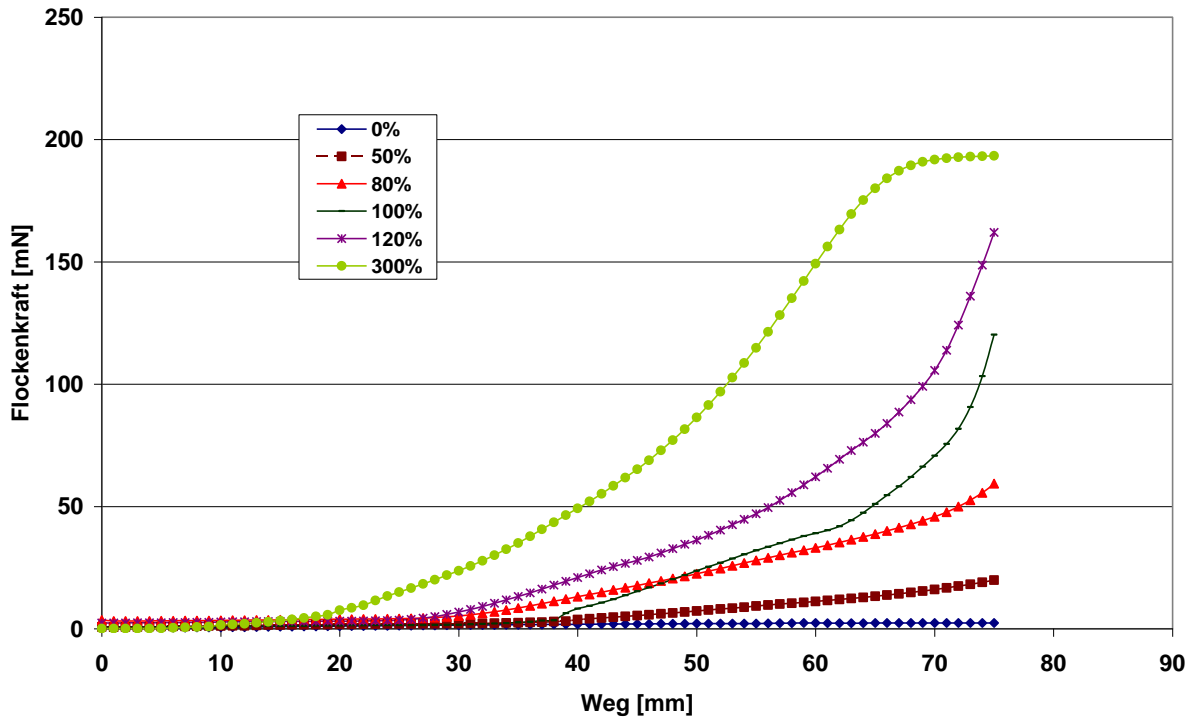


Abbildung 34: Grundkräftekurven

Der Penetrationskörper durchfährt immer wieder in gleicher Art und Weise die Flockenstruktur. Dabei ist zu sehen, dass immer wieder nachfolgend dargestellte Phasen durchlaufen werden. Für die Erklärung wurde eine Kurve separat dargestellt, die in der nachstehenden Abbildung 35 zu sehen ist.

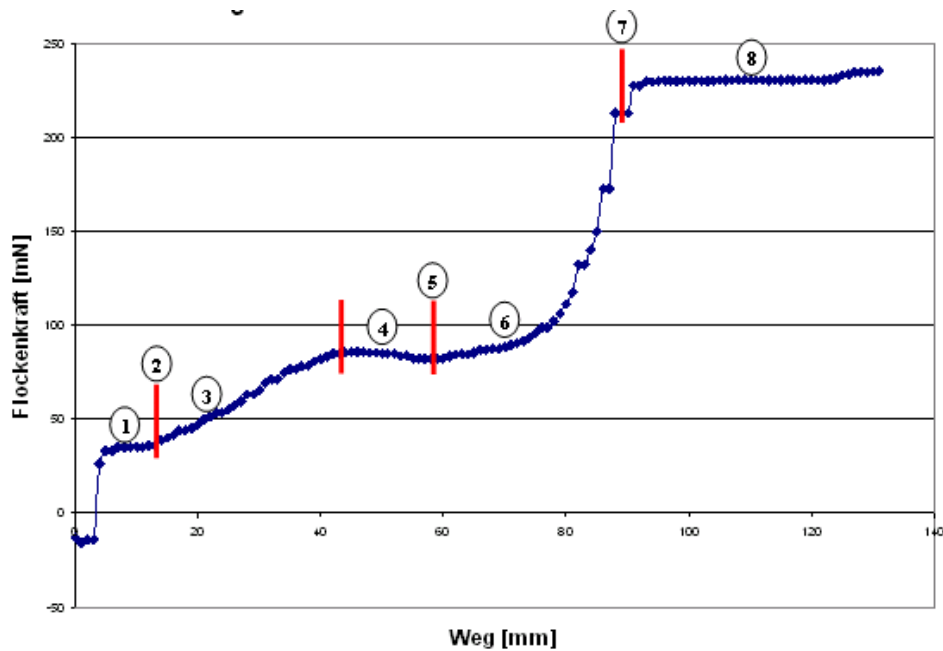


Abbildung 35: Flockenabdruck

Über der Penetrationskurve liegt jene Fläche, die das freie also abzuscheidende Wasser festlegt. Darunter sieht man jenen Wasseranteil als Fläche, der sich nicht oder nur anteilig abscheiden lässt. Nachstehend sind die einzelnen Zonen bzw. Phasen erklärt wobei jede einzelne Informationen enthält. Nach der Erklärung der einzelnen Phasen wird eine neu eingeführte Größe beschrieben die die einzelnen Informationen als Summe in einen Parameter zusammenfasst.

1 Klarzone

In dieser Zone befindet sich der Penetrationskörper in der Klarwasserphase. Diese Zone gibt Auskunft über die Flockengröße und welches Volumen der Feststoff eingenommen hat. Trifft der Penetrationskörper früh auf die Schlammflocke, so ist eine große Flocke bzw. ein großer Verband vorhanden. Der Anteil an freiem Wasser ist bei frühem Auftreffen des Penetrationskörpers sehr gering. Allerdings gibt diese Phase noch keine Auskunft darüber wie viel Wasser in der Flocke ist bzw. sich zwischen den Flocken befindet.

2 Eindringphase I

An diesem Punkt trifft der Penetrationskörper auf die Schlammflocke auf. Diese erste Eindringphase dient zur Abgrenzung von der Klarzone zur ersten Kompressionszone.

3 Kompressionszone I

In dieser Phase komprimiert der Penetrationskörper die Flocke. Man beginnt man Informationen über die Flockenstruktur, Größe und ihrer Stabilität zu erhalten. Ist die Kurve steil so wirkt von der Flocke mehr Widerstand gegen den Penetrationskörper. Ist die Kurve flach so haben sich wenig stabile Flockenstrukturen ausgebildet. In der Phase kann man noch nicht sagen, wie der weitere Flockenverlauf sein wird daher sind noch die anderen Phasen abzuwarten.

4 Flockenzerstörungsphase

Diese Phase tritt nicht in allen Messungen auf, daher kann sie auch entfallen. Hier sieht man deutlich, dass die Flockenkraft konstant bleibt. In dieser wird die Flocke vom Penetrationskörper zerstört. Es kommt zu keiner Zunahme der Flockenkraft. Diese Phase lässt auf einen instabilen Flockenverband schließen der leicht mit Hilfe des Penetrationskörpers zerstört werden kann. Die Bindungen zwischen den Flockungshilfsmittel und dem Klärschlamm ist relativ gering.

5 Eindringphase II

An diesem Punkt trifft der Penetrationskörper auf die Kompressionsphase auf. Dieser Punkt trennt die Phase 6 von der Phase 4 oder von der Zone 3 ab.

6 Kompressionsphase

Die Schlammflocke wird vom Penetrationskörper zusammengeschoben. Diese Phase entsteht dadurch, dass die Flocken sich räumlich nicht mehr ausweiten können. Wiederum gibt die Steilheit der Kurve Auskunft über die Flockenstruktur wie in der Kompressionszone I (Punkt 3) bereits erklärt.

7 Eindringphase III

An diesem Punkt trifft der Penetrationskörper auf die Kompressionszone II auf.

8 Kompressionszone II

Schlammflocken sind in ihrer Kompaktheit und Kraft so dicht aneinander gepackt, dass sie den gleichen Widerstand wie der Boden haben. Die Flocken verhaken in sich und es kommt zur Entstehung von Brücken. Der Penetrationskörper wird vom Schlitten mit der Bodenkraft, bis die Messung zu Ende ist, nach oben bewegt.

Diese Kurven sind jedoch für den Betrachter sehr unhandlich da es sehr schwierig ist, daraus Schlüsse zu ziehen. Es wurden bereits Unterschiede der Flockenstruktur in Abhängigkeit von der Dosierung festgestellt. Aber diese Kurven sind in ihrer Aussagekraft bezüglich der Dosiermenge nicht befriedigend. Daher ist eine mathematische Beschreibung notwendig die die Dosiermenge bestimmt. In der Literatur wird eine Größe beschrieben um die Entwässerungsqualität von Entwässerungsaggregaten zu quantifizieren. Diese Größe wird Entwässerungsindex genannt. Dieser Entwässerungsindex wird aus einer Filtrationskurve berechnet. Dabei wird der Schlamm abfiltriert und im Lauf der Zeit erhält man eine Filtrationskurve wie es in Abbildung 36 zu sehen ist. Die Ermittlung der Entwässerungskurve ist für online Untersuchungen nicht geeignet da sie sehr zeitaufwändig sind.

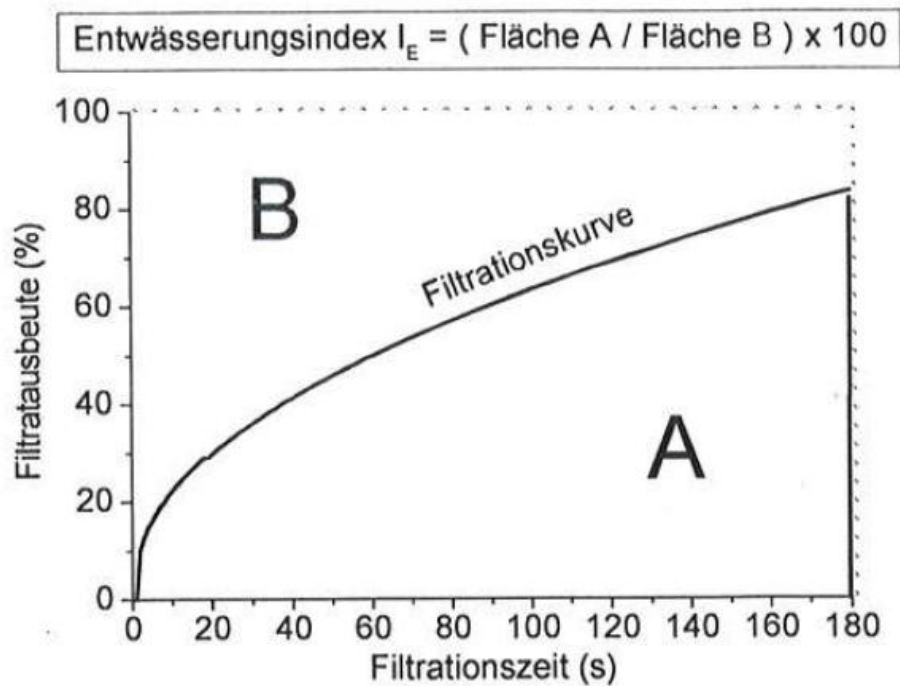


Abbildung 36: Entwässerungsindex [28]

Dabei werden die Flächen A und B zueinander ins Verhältnis gesetzt und daraus Resultierend wird der Entwässerungsindex kurz (E) nach der Gleichung (12) berechnet.

$$E = \frac{A}{B} \quad \text{Glg...}(12)$$

Für diese Arbeit wurde ein neuer Index (Entwässerungsindex Strength- Tester kurz E_{ST} genannt) eingeführt, der sich am Entwässerungsindex orientiert. Dabei werden die Flächen oberhalb der Penetrationskurve ins Verhältnis zur Gesamtfläche gesetzt. In der Abbildung 37 sind die beiden Flächen oberhalb und unterhalb der Penetrationskurve dargestellt.

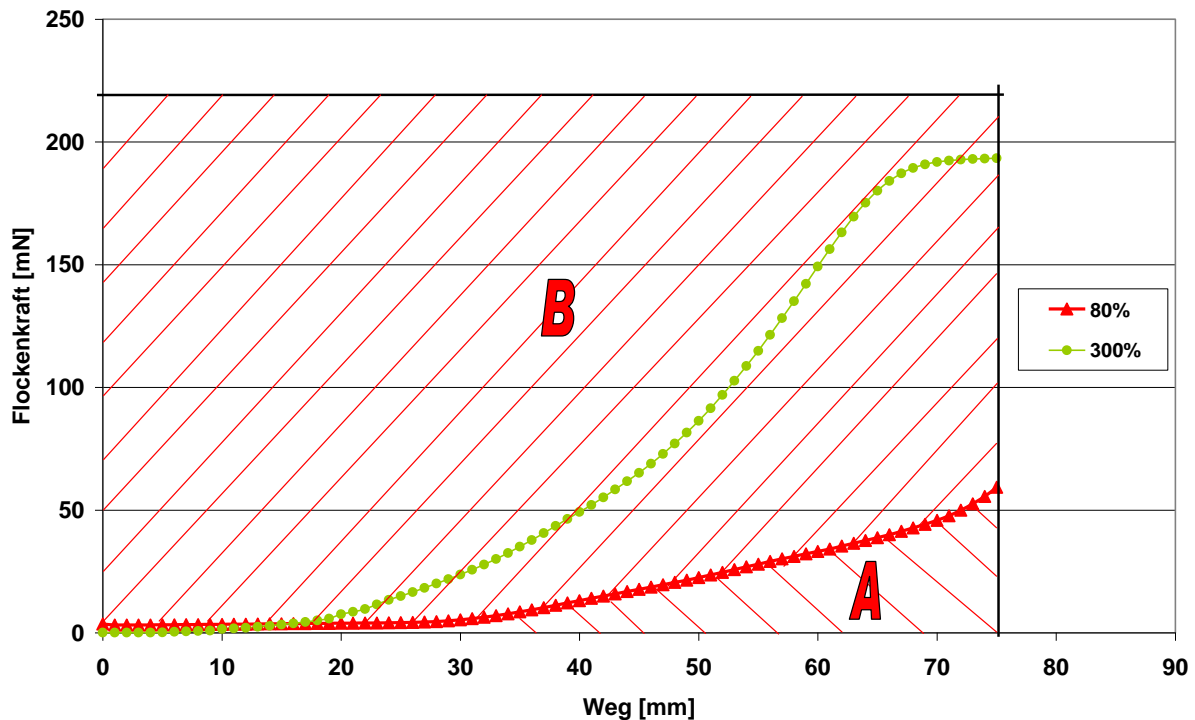


Abbildung 37: Entwässerungsindex ST

Die Flächen werden horizontal durch die Bodenkraft und vertikal durch das Auftreffen auf die Klarzone und Kompressionszone II begrenzt. Die so erhaltenen Flächen können nun in eine neue Größe übergeführt werden. Diese neue Größe wird Entwässerungsindex Strength-Tester kurz (E_{ST}) genannt und wird nach der Gleichung (13) berechnet.

$$E_{ST} = \frac{A}{A+B} \dots \text{Glg(13)}$$

Diese Größe beschreibt die Summe von Informationen der vorher beschriebenen Phasen und Zonen im Gesamten. Sie kann als Maß für die Beschreibung der Entwässerungsqualität herangezogen werden und nimmt einen Wert zwischen 0 und 1 ein. Wobei ein hoher Entwässerungsindex meistens eine gute Entwässerung bedeutet und ein niedriger eine schlechtere. Jedoch ist diese Aussage nicht zu verallgemeinern da wir in der Einleitung dieses Kapitels gesehen haben, dass eine erfolgreiche Entwässerung nicht nur von der Flockenstruktur abhängt sondern auch vom Entwässerungsaggregat. Daher ist es sinnvoll ein jedes Aggregat mit einem Index zu versehen der dann im Betrieb oder z.B. bei der Anlagenabnahme erreicht werden muss. Es ist nicht nur ein Qualitätsmerkmal sondern gibt auch Rechtssicherheit. Dieser Index beschreibt die optimale Entwässerung auf einem Entwässerungsaggregat. Ein solcher Index kann direkt vom Hersteller mittels eines

zertifizierten Qualitätsprozess und einer unabhängigen Stelle für die dementsprechenden Aggregate vergeben werden. Die nächste Abbildung 38 soll zeigen wie eine solche Einteilung aussehen könnte. Diese Darstellung wurde nicht mit praktischen Versuchen überprüft und stellt nur einen Visionsgedanken dar.

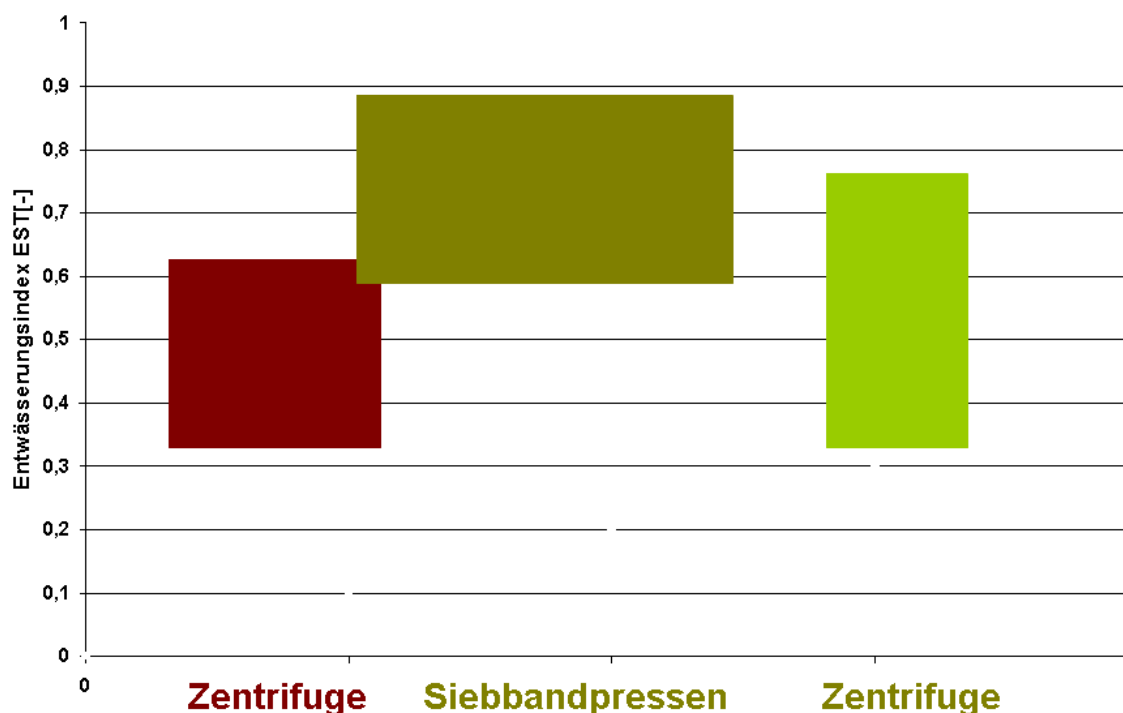


Abbildung 38:EST- Aggregateneinteilung

Dabei wird für ein Seihband ein hoher Entwässerungsindex und für Entwässerungsscheiben, -trommeln eher ein niedriger Index für eine optimale Entwässerung zu erwarten sein. Mit der Festlegung des Indexes ist es nun möglich die Schwankungen im Laufe des Tages festzustellen und Gegenmaßnahmen durchzuführen. Diese Maßnahmen wären sonst bei einer visuellen Überprüfung nicht möglich. Andere online- Messverfahren würden dieses Kriterium erreichen jedoch ist das Bestimmtheitsmass, das die von der Veränderung der unabhängigen Größe Rückschlüsse auf die abhängige Größe ziehen lässt, nicht so hoch wie beim E_{ST} -Index Näheres jedoch wird im Kapitel 6 genauer beschrieben. Dort wird auch ausführlicher die Reproduzierbarkeit erklärt. Denn ein neues Messverfahren bei den die Daten nicht reproduzierbar sind hat wenig Sinn. Vorweg jedoch liegt die Reproduzierbarkeit ca.99% bzw. der mittlere Fehler bei ca. 1%.

6 Messdaten und Auswertung

In diesem Kapitel werden die Messungen des Strength Testers dargestellt. Weiters wird erklärt, wie die Messung durchgeführt wurde. Die Reproduzierbarkeit sowie der Bestimmungsfaktor der Messung wurden überprüft. Die Ergebnisse des Strength Testers wurden mit anderen Messungen verglichen. Dabei wird ein Messgerät verwendet das bereits renommiert in der Praxis großflächige Anwendung findet- das Zetapotential. Die Strength- Tester Messungen wurden nicht nur mit dem Zetapotential verglichen sondern auch mit einem Rotationsviskosimeter und einem am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau (SWW) selbst gebauten Modell. Mit diesem SWW- Modell versucht man unter Laborbedingungen das Seihband, jenes Entwässerungsaggregat das auf der Kläranlage Graz eingesetzt wird, nachzustellen.

6.1 Messungen mit Strength Tester

Für die Durchführung der Messungen mittels Strength- Testers wurde eine Dosierreihe von 0ml bis 10ml auf 600ml Suspension durchgeführt. Dabei wurde die Zeit in der der Klärschlamm von der Kläranlage entnommen wurde, bis zur Aufarbeitung im Labor so kurz wie möglich gehalten. Wir sprechen hier von einem Zeitraum von 3-4 Stunden in der die Probe vollständig vermessen wurde. Die Probeentnahme wurde an jenem, Ort gewählt an dem das Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU- Graz schon jahrelange Erfahrung sammeln konnte und ihre Probenentnahme an derselben Stelle durchführt. Darum ist davon auszugehen, dass der Klärschlamm vollständig durchmischt ist. Um ein Absetzen des Feststoffes von der Flüssigphase zu verhindern, wurde der Klärschlamm in einem Behälter mit einem Rührer langsamer Geschwindigkeit ständig in Bewegung gehalten. Dies diente jenem Zweck, dass man eine konstante homogene Suspension über die Messzeit gewährleisten konnte.

Das im Kapitel fünf bereits erklärte Messprinzip mit Hilfe der Penetration wird hier praktisch dargestellt. Dabei werden Messreihen mit immer der gleichen Dosierreihe untersucht. Dosierreihen, von denen man die Dosierung des Herstellers für das entsprechende Entwässerungsaggregat kennt. Von 100% also jener Dosierung, die für den Hersteller optimal erscheint, wurden 2 Messpunkte darunter, (50% u. 80%) und zwei Messpunkte darüber, (120% u. 300%) bestimmt. Weiters wurde der Rohschlamm also die Dosierung mit 0% vermessen. Daraus ergeben sich für die Messreihen 6 unterschiedliche Dosierungskonzentrationen. Die Suspension wird in einem Flockulator wie in der Abbildung 39 zu sehen ist geflockt.



Abbildung 39: Flockulator

Dabei wird das Flockungshilfsmittel in dem Behälter mit Hilfe einer Pipette durch die Öffnung im Deckel, in der Abbildung 39 mit einem roten Pfeil markiert, eingebracht. Mit dem Steuerungskästchen lassen sich Rührgeschwindigkeit und Rührdauer einstellen. Vorher wurde die Suspension für 10 Sekunden durchmischt um Homogenität zu gewährleisten. Das Flockungshilfsmittel wurde schnell in den Behälter eingebracht. Damit eine mechanische Flockenzerstörung ausgeschlossen werden kann, wurde nach der Koagulation des Klärschlammes der Rührer automatisch gestoppt. An dieser Stelle sei jedoch anzumerken, dass für diese Versuche eine Schlammprobe entnommen wurde, die mit genannten Dosierungen vermessen wurde. Dadurch muss der Einfluss der Zeit als Faktor erwähnt werden. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde in Folge Versuchen ausführlich behandelt.

Stellvertretend wird eine Messreihe für die Messversuche grafisch dargestellt. Die Abbildung 40 zeigt, von der Messung im Juli 2009, und das Waagensignal mit dem später der Entwässerungsindex- Strength- Tester ermittelt wird. Auf jene Daten, die die Reproduzierbarkeit beschreiben, wird vorerst aus Platzgründen im Diagramm verzichtet und diese werden separat ausgewiesen.

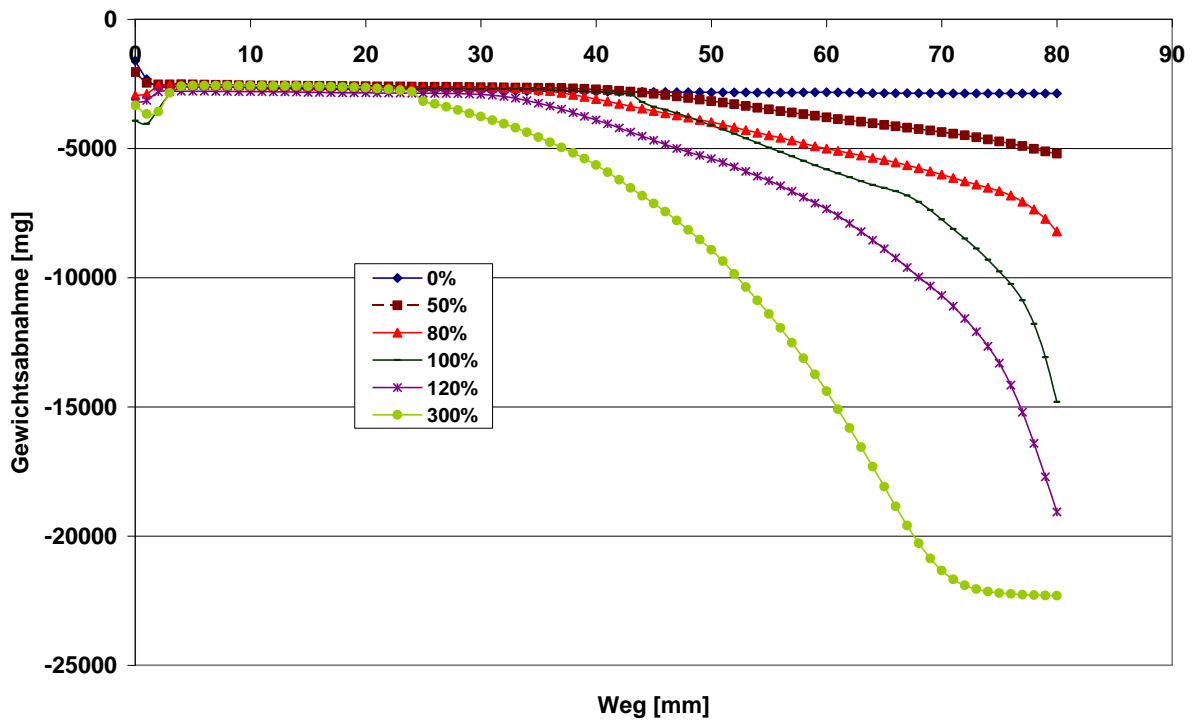


Abbildung 40: Gewichtsabnahme Waage

Es werden die Werte, der in der Abbildung 41 gezeigten Gewichtsabnahmekurven die die Waage über den Messweg aufzeichnet, mit dem Wert -9.81 [N] multipliziert. Dadurch bekommt man die Flockenkraft in [mN], die der Flockenstruktur während des Messvorganges entgegenwirkt.

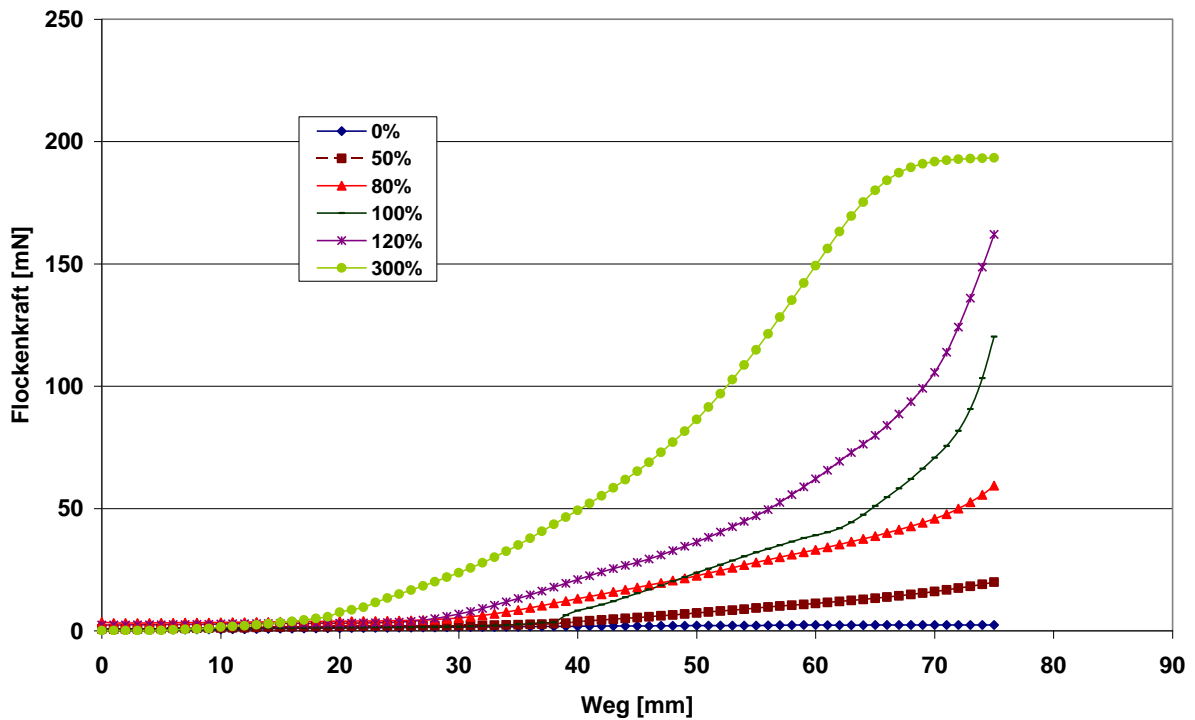


Abbildung 41: Normierung Flockenkraft

Die so erhaltenen Flockenkraftkurven bilden die Grundlage zur Berechnung des Entwässerungsindex E_{ST} . Es wird beispielhaft der E_{ST} für zwei Flockungshilfsmittelkonzentrationen, 80% und 300%, berechnet. Die Dosierkonzentration mit 0% wird aus praktischen Gründen in der Abbildung 42 weiter dargestellt, da sie die Fläche nach unten hin, die für die Berechnung des E_{ST} notwendig ist, abgrenzt.

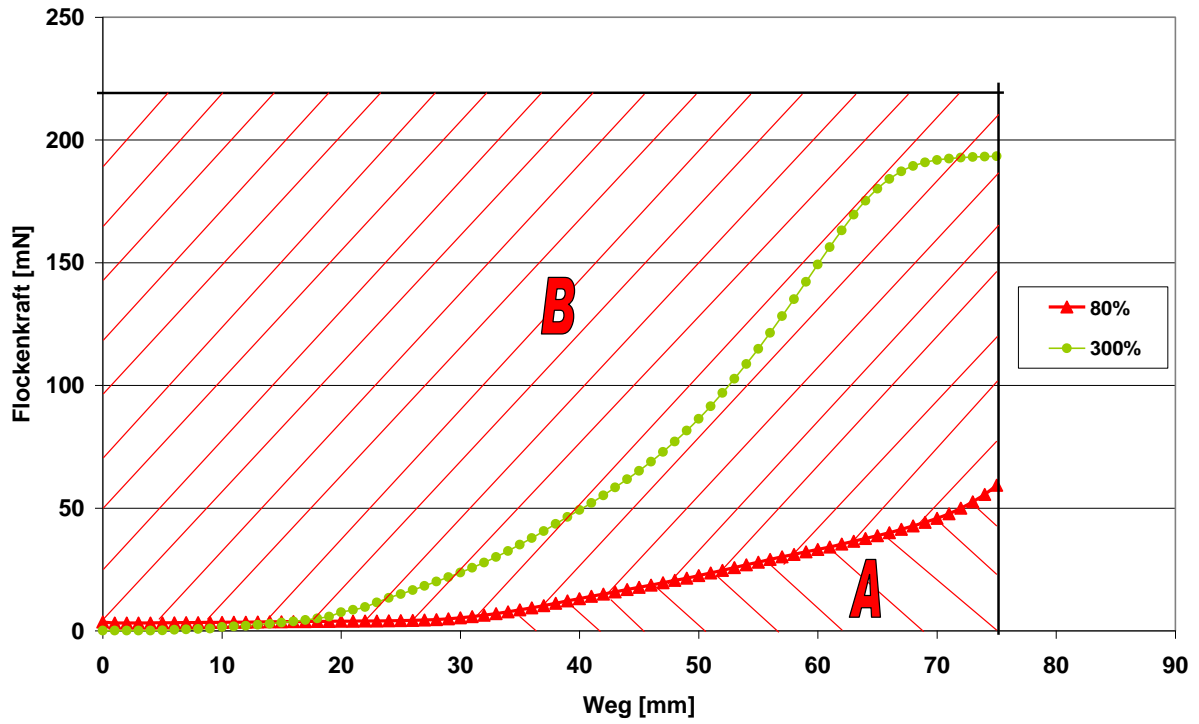


Abbildung 42: Entwässerungsindex EST

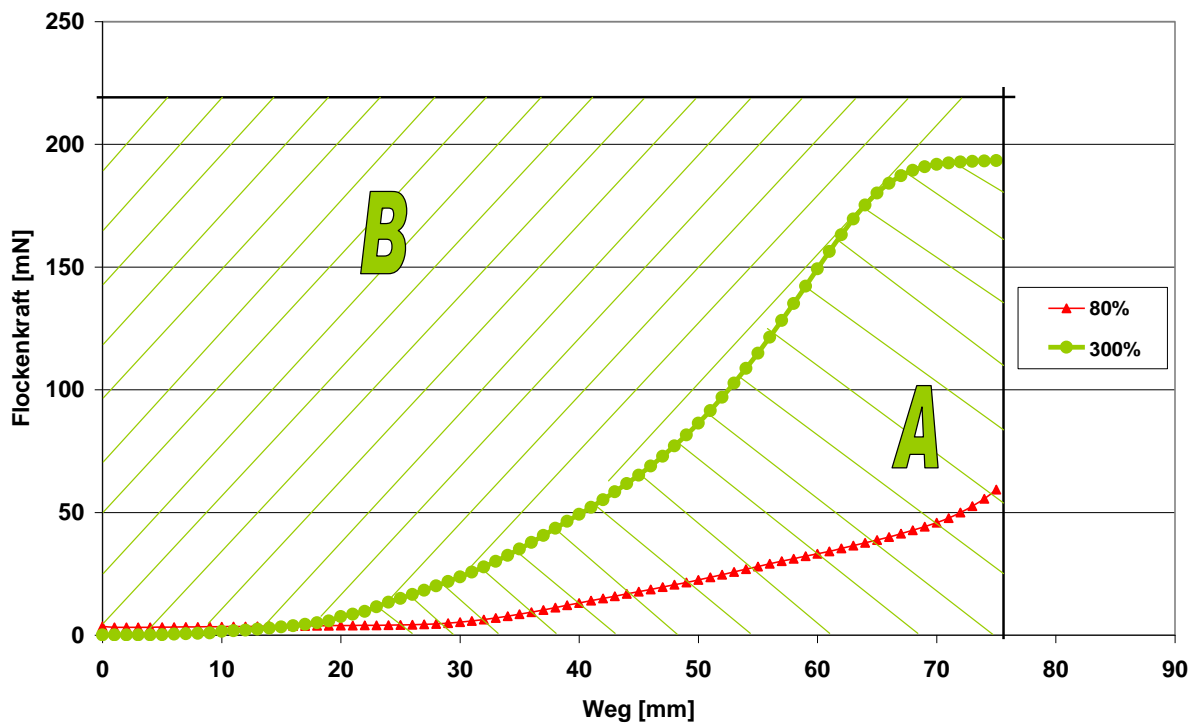


Abbildung 43: Entwässerungsindex EST 300%

Führt man die Dosierkonzentrationen mit dem E_{ST} zusammen so erhält man einen hohen signifikanten Zusammenhang. In folgender Abbildung 43 ist nun für die Kläranlage Tennengau der Zusammenhang dargestellt.

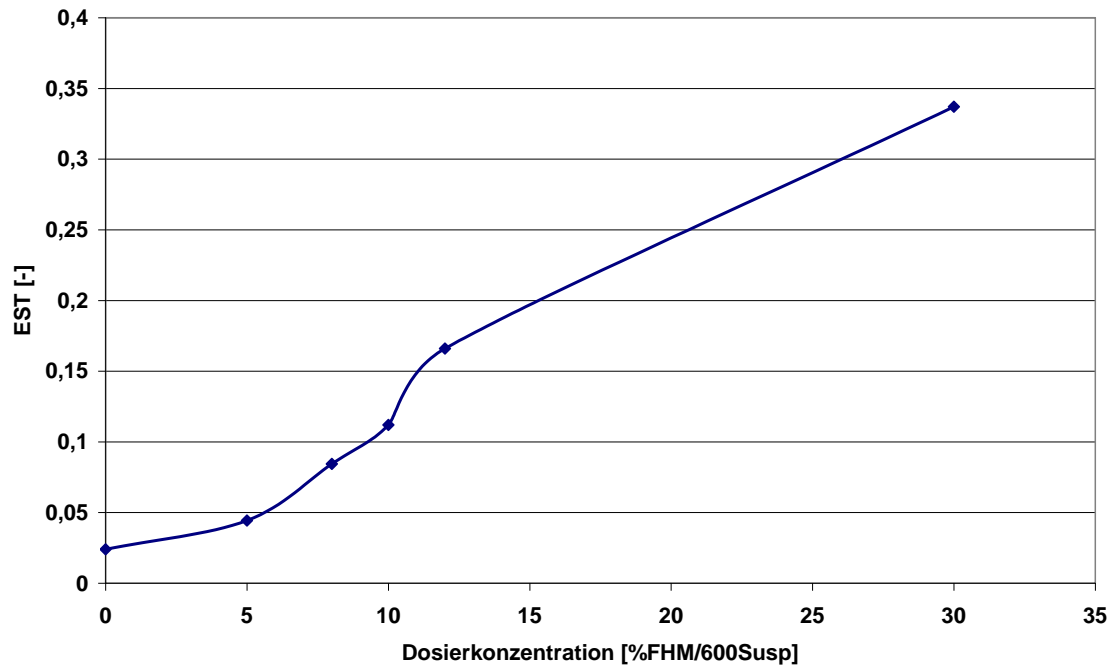


Abbildung 44: Korrelation EST-Dosierkonzentration

Für die anderen Kläranlagen wurden die Ergebnisse in den nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt. Die Bestimmung des E_{ST} lässt nun Rückschlüsse auf die Dosierungskonzentration schließen.

Tabelle 1: E_{ST} Tabelle Kläranlage Graz

Dosierreihe [ml]	22.02.2011	02.12.2010		02.12.2010		28.05.2009
	E_{ST} [-]	E_{ST} [-] 20°C	T-	E_{ST} [-] 10°C	T-	E_{ST} [-]
2	0,644	0,093		0,041		0,025
4	0,738	0,099		0,082		0,116
6	0,74	0,119		0,107		0,154
8	0,77	0,144		0,132		0,193
10	0,797	0,15		0,141		0,196
Korrelation	0,925	0,978		0,976		0,965

Tabelle 2: E_{ST} - Index Kläranlagen

Dosierreihe [%]	Hallstatt EST[-]	Spitz EST[-]	Tennengau EST[-]	Vordach EST[-]	Mühlbach EST[-]	Aschachtal EST[-]
50	0,021	0,226	0,043	0,079	0,002	0,072
80	0,062	0,256	0,074	0,094	0,011	0,08
100	0,093	0,336	0,104	0,13	0,022	0,09
120	0,147	0,362	0,157	0,198	0,035	0,111
300	0,295	0,931	0,271	0,603	0,048	1
Korrelation	0,983	0,996	0,972	0,994	0,889	0,973

Da auch die Ladungen der funktionellen Gruppen des eingesetzten Flockungshilfsmittels einen großen Einfluss auf das Ergebnis des Koagulationsprozesses haben. Wird die neue Messmethode, die den E_{ST} -Index bestimmt, auch dahin überprüft, ob Unterschiede von verschiedenen Dosiermittelkonzentrationen feststellbar sind. Nicht nur dem Betreiber soll der Index dienliche Informationen bezüglich des Polymermittelbedarfs liefern, sondern auch dem Polymermittelhersteller. Die Überlegung geht dahin, dass verschiedene Dosiermittelkonzentrationen von unterschiedlichen oder dem gleichen Hersteller für die vorliegende Suspension quantifiziert werden können. Der Strength-Tester soll unmittelbar den Experten auf der Kläranlage unterstützend helfen, eine große Anzahl von Polymermittelsorten auf einige wenige, sprich drei vier, in einer relativ kurzen Zeit zu reduzieren. Die nächsten Versuche sollen zeigen, ob Unterschiede mit der gleichen Suspension aber anderen Polymersorten zu erkennen sind. Dahingehend werden drei ähnliche Polymere vom Hersteller ausgewählt und mit derselben Suspension versetzt. In der Abbildung 45 sind vorerst keine unmittelbaren Unterschiede zu erkennen. Der E_{ST} -Index für die drei Polymersorten ist nach dem vorher erklärten Schema bestimmt worden und zeigt folgende Ergebnisse, die in der Tabelle 3 zu sehen sind.

Tabelle 3: Polymere- Kläranlage

	Polymer α_1	Polymer β_1	Polymer γ_1
Kläranlage 1	$E_{ST}=0.657$	$E_{ST}=0.614$	$E_{ST}=0.649$
	Polymer α_2	Polymer β_2	Polymer γ_2
Kläranlage 2	$E_{ST}=0.243$	$E_{ST}=0.304$	$E_{ST}=0.339$

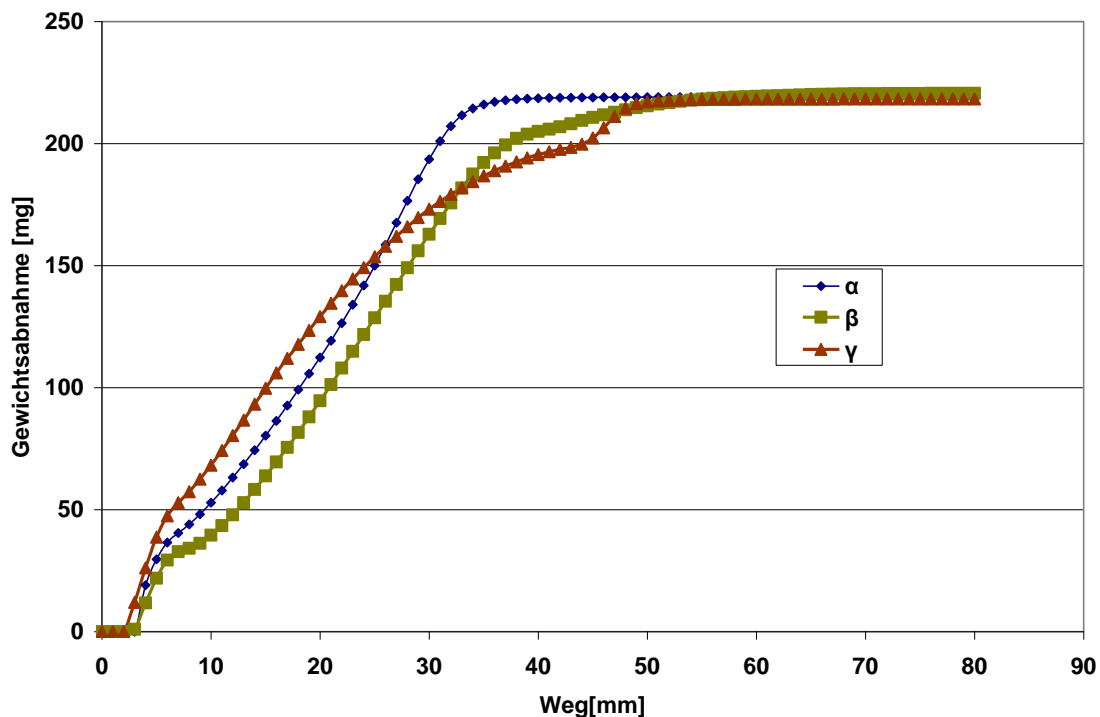


Abbildung 45: Kläranlage 1

Dem E_{ST} - Index zu Folge, hat das Produkt β in der Kläranlage 1 einen wesentlich geringeren Index als die anderen beiden. Der Unterschied zwischen den Produkten α und γ sind nicht gerade groß. Die beiden Kurven beginnen am Anfang auch parallel. Wobei es scheint, dass das Polymer γ eine wesentlich stärkere Flockenstruktur ausbildet lässt, als das Polymer α . Doch im Laufe des Messvorganges ist ein deutliches Einbrechen der Flockenstruktur vom Polymer γ zu erkennen. Das Produkt α jedoch bleibt stabil, was auf eine festere Flockenstruktur schließen lässt. Welches Produkt nun für die Entwässerung entscheidend ist, hängt vom Aggregat selber ab. Benötigt man in der äußeren Struktur eine feste Flocke, die sehr leicht bricht, wäre das Polymere γ von Vorteil. Werden festere Strukturen für das Aggregat benötigt, wird man sich eher für das Polymer α entscheiden. Produkt β liegt stets unter den anderen Polymersorten, bzgl. Der Flockenstruktur und der Stabilität. In dieser Kläranlage wird eine Kammerfilterpresse verwendet. Daraus kann man ableiten, dass die obigen Messverläufe für das Polymer α und den dafür entsprechenden Index spricht, obwohl der Messverlauf untypisch ist. Tatsächlich wird in dieser Kläranlage ein Festpolymer eingesetzt. Keines dieser oben genannten Polymere wird in dieser Kläranlage verwendet. Wenn man diese Kurven mit anderen Kurven vergleicht sieht man, dass unübliche Kurvenverläufe ersichtlich sind. Die Klarzone z.B. ist sehr kurz gehalten, was eher ungewöhnlich ist.

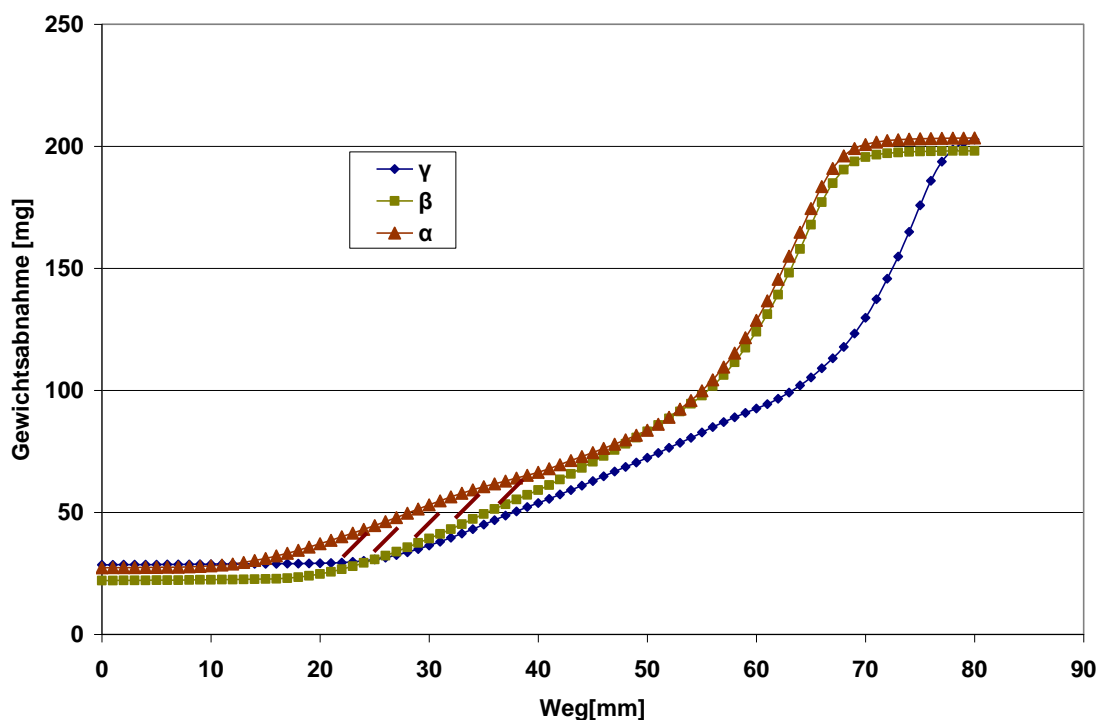


Abbildung 46: Kläranlage 2

In der zweiten Kläranlage hat das Produkt α einen wesentlich geringeren Index als die anderen beiden. Ein Unterschied zwischen den Produkten β und γ ist laut dem E_{ST} -Index zu erkennen. Die schraffierte Fläche deutet darauf hin, dass in der oberen Struktur mehr Wasser gebunden wird als beim Polymer γ . Dadurch lässt sich diese schraffierte Fläche erklären. Weiters gibt es deutliche Unterschiede in der Klarwasserzone. Der Penetrationskörper trifft bei dem Polymer γ schneller auf die Flockenstruktur, als es bei dem Polymer β der Fall ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Flockenstruktur im Polymer γ sich volumenmäßig größer ausgedehnt hat, als es bei dem anderen Polymer der Fall ist. Diese Ausdehnung lässt wiederum darauf schließen, dass die Flocke mehr Wasser gebunden hat als das Polymer β . Welches Produkt nun für die Entwässerung entscheidend ist hängt wiederum vom Aggregat selber ab. Benötigt man eine Flockenstruktur die sich schnell absetzt und eine nicht so große Festigkeit besitzt, ist das Polymer α zu wählen. Benötigt das Aggregat jedoch eine stabilere Flockenstruktur, die mehr Wasser aufnimmt, soll dem Polymer γ den Vorzug gegeben werden. Ist eine stabile Flockenstruktur nötig, die mehr Wasser aufnimmt, dann ist das Polymer β zu wählen. Wiederum wird in dieser Kläranlage eine Kammerfilterpresse eingesetzt. Das Polymer α hat eine geringe Stabilität für dieses Aggregat. Dies ist schnell durch den geringen Index ersichtlich. Wenn man die Kurve

näher betrachtet bilden sich die Flocken mit einer schwachen Struktur aus. Diese Ausbildung kann man in der Grafik an der Länge der Kompressionszone II erkennen, wo fast keine Ausprägung ersichtlich ist. Dabei ist bei den anderen eine deutliche Kompressionszone II ersichtlich, was auf eine wesentlich festere Flockenstruktur hinweist. Zwischen den Polymeren von γ und β ist ein sehr geringer Unterschied. Dabei ist auch die Kompressionszone II stark ausgebildet. Der wesentliche Unterschied jedoch liegt in der Klarzone die bei γ kürzer ist als bei β . Daher sind die Flocken, die mit dem Polymer γ koagulieren, größer als die mit dem Polymer β . Wie bereits beschrieben sind dies Flocken von Polymer γ mit mehr Wasser befüllt. Die Schlussfolgerung ist, dass größere Flocken die mit mehr Wasser befüllt sind für dieses Aggregat besser geeignet sind als andere. Wobei es zwischen den Polymeren γ und β wenig Unterschiede gibt und die bis dato noch nicht betrachtet werden konnten. Mit herkömmlichen Methoden wäre, das eine Polymer genauso gut einsetzbar wie das andere. Wenn man mehr Aufwand betreibt, dann würde man eine Zeta- Potentialmessung durchführen. Die jedoch einer Messschwankung von 10% aufweisen kann. Tatsächlich wird das Polymer γ verwendet.

Nicht nur der Einfluss von Polymersorten wurde überprüft, auch die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Koagulation. Bei der Zeta- Potential Messung fließt die Temperatur im Debye-Hückel-Parameter ein. Die Temperatur muss also einen entscheidenden Einfluss auf die Flockenstruktur haben. Deswegen wird folgende Hypothese aufgestellt.

„Je niedriger die Temperatur, umso größer die Dosierkonzentration des FHM's um die gleiche Flockenkraft zu erhalten“.

Der nächste Versuch soll den Einfluss der Temperatur auf die Koagulation zeigen. Dabei wird der Klärschlamm mit 20°C geflockt und der E_{ST} -Index bestimmt. Dann wird die Suspension auf 10°C gekühlt abermals geflockt und der E_{ST} -Index bestimmt. Dabei ist in der Abbildung 47 deutlich ein Unterschied zu erkennen. Bei der niedrigen Temperatur ist der E_{ST} -Index wesentlich geringer als bei der hohen Temperatur bei gleicher Dosierung. Legt man nun den E_{ST} -Index für die Entwässerungsqualität zu Grunde wird z.B. im Winter bei tieferen Temperaturen wesentlich mehr Flockungshilfsmittel benötigt um die gleiche Flockenkraft bzw. E_{ST} -Index zu erhalten. Das folgende Beispiel soll dies näher erläutern.

Nimmt man an, dass für das Aggregat ein E_{ST} -Index von 0.1 bestimmt wurde, ist dieser bei der Temperatur von 20°C bereits mit einer Dosierkonzentration von 4 [kgFHM/tTS] erreicht. Bei der Temperatur von 10°C wird dieser Index erst bei ca. 5.75 [kgFHM/tTS] erreicht. Die Differenz beträgt dabei 1.75 [kgFHM/tTS]. Hier zeigt

sich deutlich welchen Einfluss der Temperatur auf die Flockenstruktur hat. In diesem Zusammenhang das bei niedrigeren Temperaturen eine höhere Polymermittelzugabe notwendig ist.

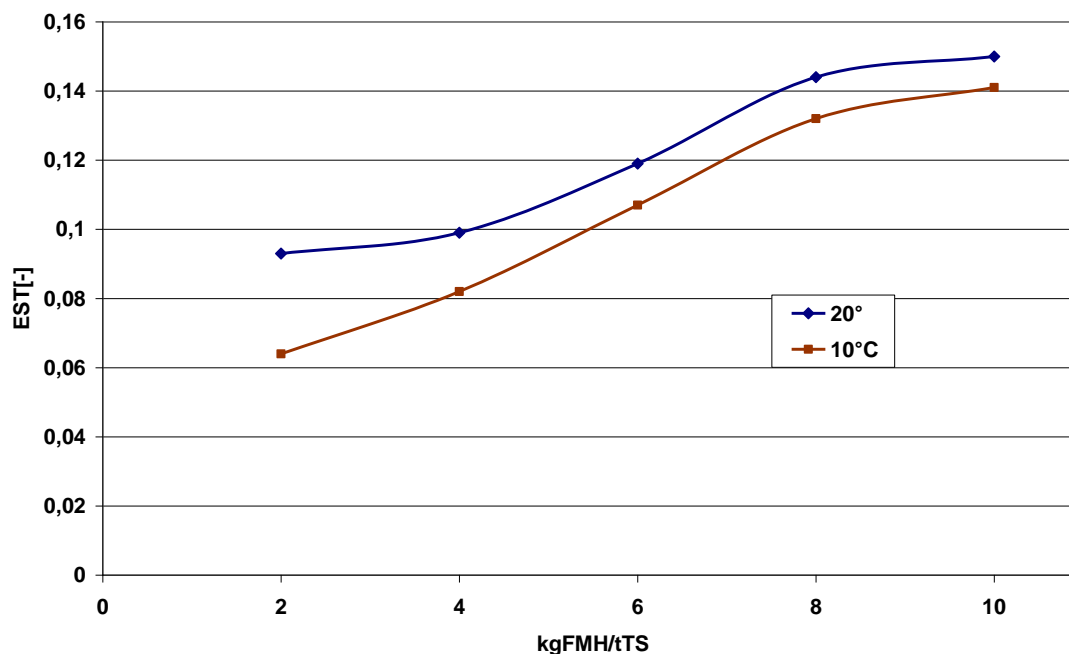


Abbildung 47: EST- Temperatur

In den verschiedenen Voruntersuchungen wurde nicht immer literaturgemäß die Dosierkonzentration beibehalten. Durch die Entwicklung des Messgerätes sowie aufgrund von unterschiedlichen Überlegungen und Versuchen wurde dies eher vernachlässigt. Um zu zeigen, dass die Vorversuche sowie die daraus resultierenden Aussagen in keinsten Weise geschmälert werden können, wurde abschließend noch eine Untersuchung durchgeführt. Das Versuchsschema ist dasselbe wie bei den vorangegangenen Versuchen jedoch wurde auf die richtige Einheit der Dosierkonzentration laut Literatur geachtet. Wie in der Abbildung 48 zu sehen ist, ergibt dies eine Korrelation von 0,98, was zu erwarten war. Jedoch wurde besonders bei diesem Versuch darauf geachtet, ob mit dieser Messmethode eine Aussage über die Dosierkonzentration möglich ist. Da die Kurve ca. in 45° Winkel liegt, kann eine sehr gute Aussage über die Konzentration vom E_{ST} -Index getroffen werden.

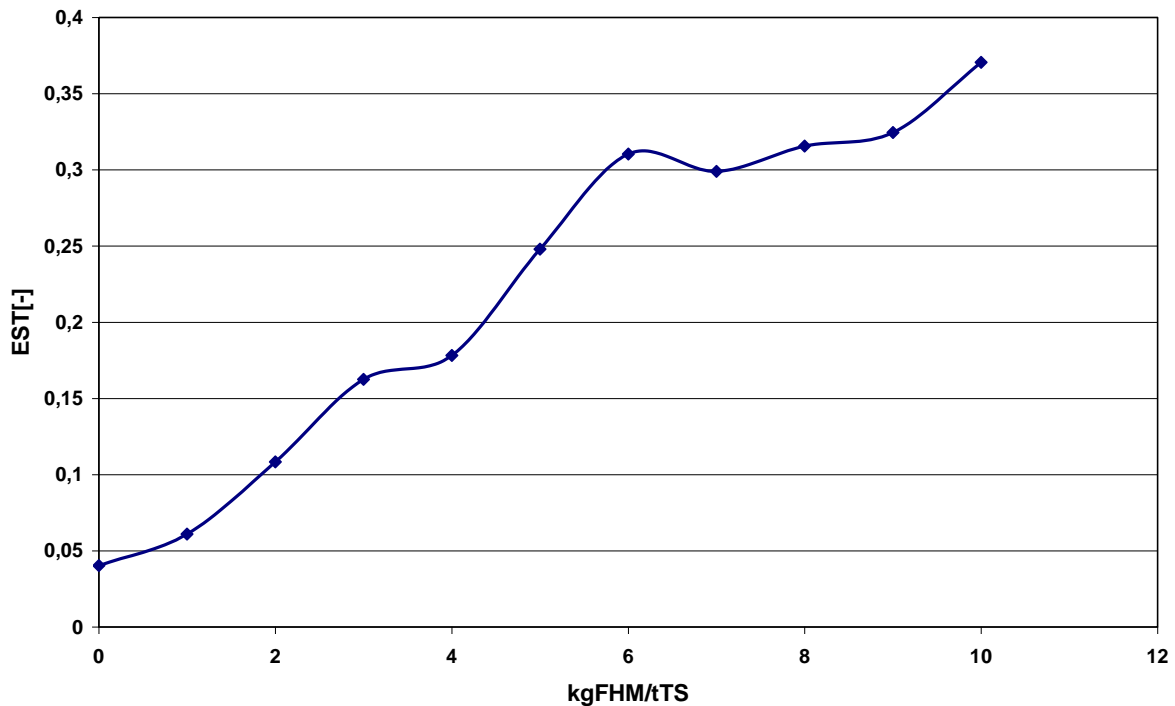


Abbildung 48: EST- Dosierkonzentration

Weiters stellt sich die Frage, inwieweit sich die Korrelation ändert, wenn man die Schärfe bzw. die Dosierkonzentration in kleineren Abständen, ändert. In der nächsten Abbildung 49 ist der gleiche Versuch wie oben dargestellt. Nur mit dem Unterschied, dass die Dosierkonzentration in kleineren Abständen erfolgt. Es wurde eine Korrelation von 0.94 festgestellt. Also auch wenn die Dosierkonzentration in noch kleineren Abständen erfolgt ist eine sehr hohe Abhängigkeit gegeben. Weiters kann eine Hypothese über den Unterschied, ab dem sich die Kurve verändert, aufgestellt werden. An dieser Stelle werden hier ein stabiler und ein instabiler Bereich definiert. An der Kläranlage Graz ist hier der Punkt ab dem sich dies verändert bei 4,5 [kgFHM/tTS]. Diese Unterscheidung basiert auf der Überlegung, dass im stabilen Bereich ein linearer Zusammenhang besteht. Der Kurvenverlauf nimmt stetig zu. Im instabilen Bereich, kann durch den Kurvenverlauf angenommen werden, dass es hier durch den Überschuss an positiven Ladungen immer wieder zu unkontrollierten Koagulationsprozessen kommt. Diese kann durchaus mit Algorithmen an eine Idealkurve, die sich aus den untenstehenden Werten ergibt berechnet werden, um den E_{ST} -Index zu bestimmen. Bei einer online- Messung ist hier eine ständige Berechnung notwendig. Diese Überlegung muss auf jeden Fall mit einer Zeta-Potentialmessung genauer untersucht werden. Jedoch wird ein stetiger Gesamtanstieg des E_{ST} - Index mit dem Anstieg der Dosierkonzentration wiederum beobachtet.

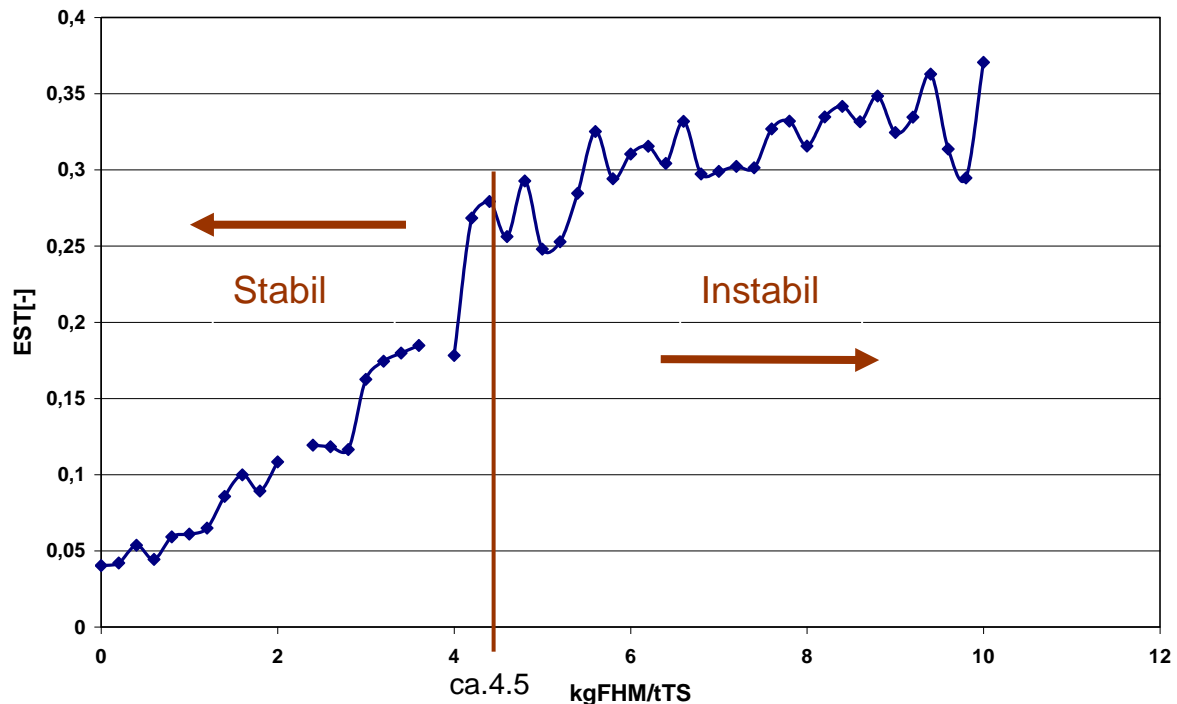


Abbildung 49: EST-Dosierkonzentration hoher Auflösung

6.2 Messungen mit anderen Verfahren

In diesem Kapitel werden Messversuche mit denselben Messreihen aber unterschiedlichen Messmethoden, die oben mit dem Strength Tester untersucht wurden, dargestellt. Diese Untersuchungen dienen dazu, um die Erkenntnisse vom Strength- Tester zu untermauern. Dafür werden drei Modelle verwendet. Das TUG-Modell, das das Entwässerungsaggregat Seihband als Modell für Laboruntersuchungen darstellt, das Rotationsviskosimeter, um den Flockenwiderstand festzustellen, und das bereits etablierte Verfahren zur Optimierung von FHM- die Zeta- Potentialmessung.

6.2.1 SWW- Modell

Die Strength- Tester Messungen die auf die Dosiermenge des FHM in der mechanischen Überschussschlamm-entwässerung schließen lassen wurden mit einem am Institut für SWW entwickelten Modell verglichen. Dies soll das Entwässerungsaggregat eines Seihbandes im Labormaßstab nachstellen. Ein Stück von einem Seihband wurde in einem Keramikfilter eingepasst. Dieser Keramikfilter wurde auf eine Rüttelplatte von einem Siebturm aufgebaut wie in der Abbildung 50 zu sehen ist.

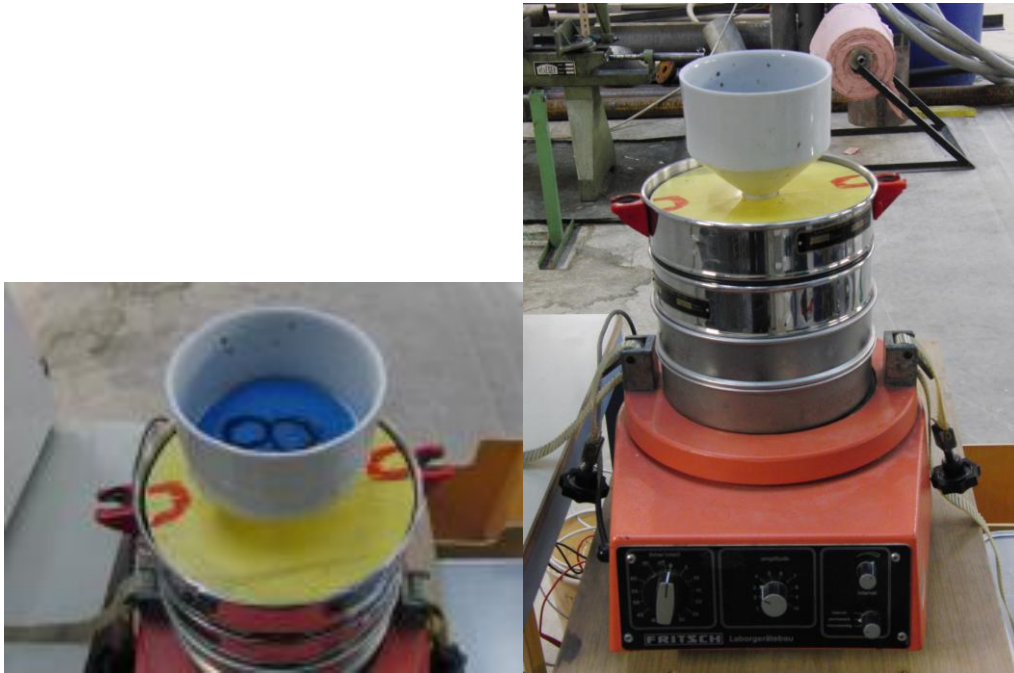


Abbildung 50: SWW- Modell

Der Zweck ist den Keramikfilter in eine Vibration zu versetzen um Bewegungen auf einem Seihband nachzustellen. Der Siebturmuntersatz wurde gewählt da die Amplitude und Zeit einstellbar sind. Vorversuche ergaben eine Amplitudeneinstellung von fünf und eine Abfiltrierzeit von fünf Minuten. Natürlich können wie bei jedem Labormodell nicht die realen Rahmenbedingungen nachgestellt werden. Dies ist nicht überraschend, da dies schon durch die Literatur gezeigt und hier nochmals verifiziert werden konnte. Dies ist nicht das Ziel, sondern es geht vielmehr darum zu zeigen, dass bei einer höheren Dosierung mehr Feststoff im Siebkörper verbleibt. Mit diesem Modell ist also keine exakte Aussage über die Entwässerungsqualität möglich, sondern eine quantitative Auskunft über das Entwässerungsverhalten. Dabei wurde der Versuch wie folgt durchgeführt. Die 600ml Suspension wird in einem Behälter mit den unterschiedlichen Dosierkonzentrationen geflockt und abgewogen. Danach wurde diese Menge in das bereits eingestellte TUG- Modell aufgegeben. Nach der Abfiltrierzeit wurden der nasse Filterkuchen und die Siebschale gewogen. Daraus lässt sich der Feststoff in Prozent ermitteln, der auf dem Siebkörper verbleibt. Nach der Hypothese

„Je mehr Flockungsmittel dem Schlamm beigefügt wird, umso größer ist die Flockenkraft“

muss mehr Feststoff auf dem Siebkörper verbleiben. Da die Flocke stabiler ist und der Flockenverband eine bestimmte Struktur aufweist, damit wenig Feststoff durch

das Seihband gelangt. Die Flockengröße ist durchaus von der Dosierkonzentration abhängig. Wie es die folgende Abbildung 51 zeigt.

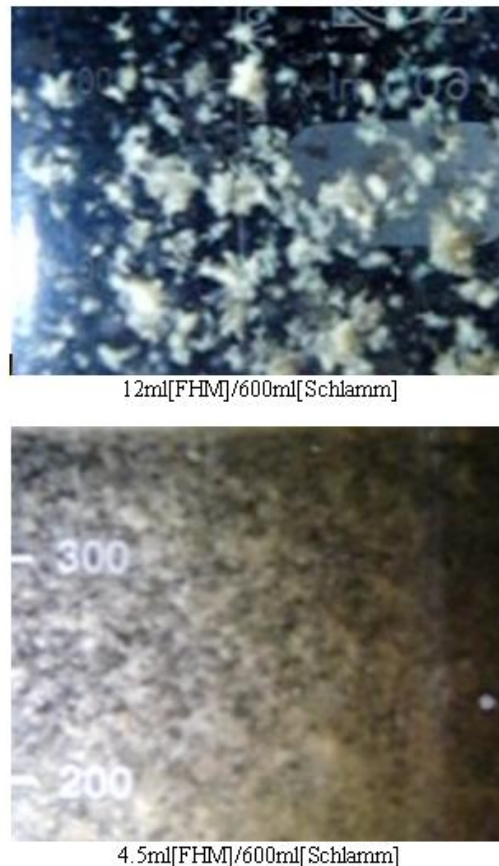


Abbildung 51: Flockengröße

Dabei lässt sich folgende Hypothese ableiten.

„Je mehr Flockungsmittel dem Schlamm beigefügt wird, umso größer ist die einzelne Flocke und umso stabiler ist der Flockenverband“

Dabei ist deutlich zu sehen, dass durch das Modell eine optimale Dosierung bei 10ml FHM auf 600ml Suspension liegen würde. Jene Schlammflocke, die man dem Aggregat entnommen hat, würde laut dem Modell 7.5ml Dosierung aufweisen. Der realistische Wert liegt aber um die 3ml was vom Strength- Tester nachgewiesen werden konnte. Beide Ergebnisse geben keine Auskunft über die tatsächliche Dosierung des FHM auf dem dementsprechenden Aggregat.

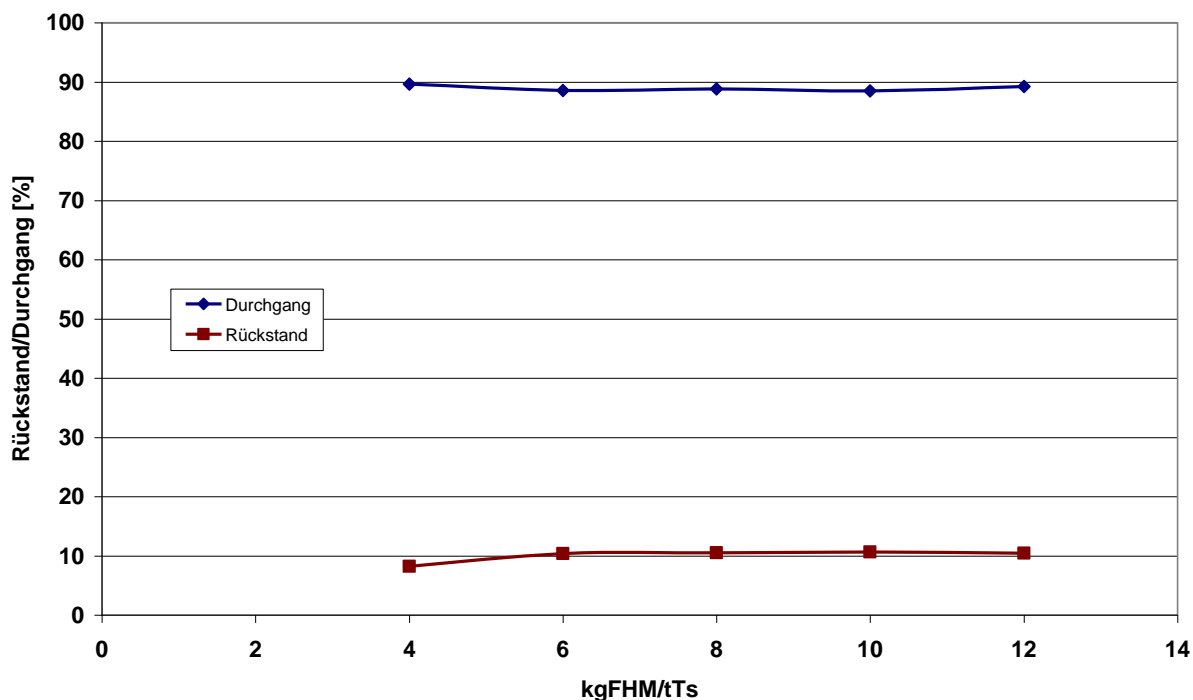


Abbildung 52: Durchgang- Rückstand Diagramm

6.2.2 Rotationsviskosimeter

Mit der Flockenkraft ist es möglich, die Flockenstruktur der Flocke zu beschreiben. Um Aufschluss darüber zu geben, ob das Penetrationsprinzip diese Flockenkraft bzw. Kompaktheit der Flockenstruktur misst, soll diese Versuchreihe dienen. Die Überlegung geht dahin, dass eine kompaktere Flocke in der Struktur auch einen größeren Widerstand aufbringt. Bei einem größeren Widerstand steigt die Scherspannung an. Daher muss bei einer höheren Dosierung die Viskosität aufgrund der stabileren Flocken höher sein. Dieser Nachweis ist sehr aufwendig da die Partikel während der Messung sedimentieren und es schwierig ist einen konstanten Wert zu erhalten. Diese Versuche sollen tendenziell, mit einem erprobten Messegerät aufzeigen, dass der Strength- Tester und die daraus resultierenden Aussagen vergleichbar sind. Die Feststellung wurde mit einem Rotationsviskosimeter Platte-Platte der Fa. ANTON PAAR vom Typ MCR 300 durchgeführt. Dabei wurde das Platte-Platte Prinzip verwendet. Die verschiedenen geflockten Schlammproben wurden nacheinander mittels einer Pipette auf die Platte aufgebracht. Nach dem Positionieren des Rotationskörpers wurde die Probe eine Minute lang geschert. Die so erhaltene Kurve die in der Abbildung 52 zu sehen ist stellt auf der y-Achse die Viskosität und auf der x- Achse die Dosiermenge dar.

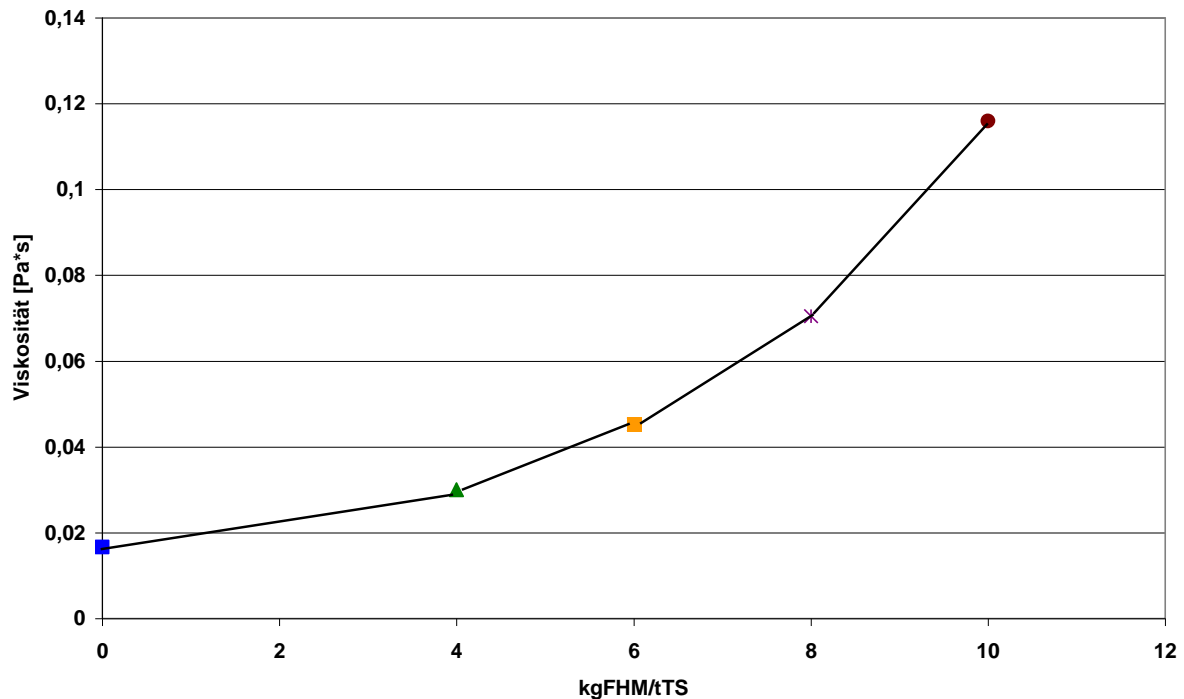


Abbildung 53: Viskositätskurve

6.2.3 Zeta- Potentialmessung

Zur Charakterisierung ist das Zetapotential die Standardgröße zur Bestimmung der Dosiermenge von FHM in der mechanischen Entwässerung. Aus der Literatur ist zu entnehmen, dass die Flockenbildung der Teilchen ihr Optimum erreicht siehe KOPP Seite 52-53 Kapitel 4, wenn das Zeta- Potential sich kurz unter dem Bereich des Isoelektrischen Punktes befindet. In diesem Kapitel wurden zwei Zeta- Potentialmessungen von Klärschlammproben durchgeführt um sie im nächsten Unterkapitel mit den E_{ST} - Messungen zu vergleichen.

Die Messungen wurden am Institut für Physikalische Chemie der Karl-Franzens-Universität Graz mit dem Messgerät der Marke „Brookhaven Typ Zeta Plus“ durchgeführt. Die erhaltenen Daten wurden in der Abbildung 54 dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass der optimale Flockungspunkt bei der Zetapotentialmessung 1 bei ca. 2.5 [kgFHM/tTS] und bei der Zetapotentialmessung bei ca. 0.8 [kgFHM/tTS] liegt.

Die Versuchsdurchführung, Flocken und Dosiermengenabstände erfolgten analog zu den anderen Versuchen. Bei der Vermessung des Zeta- Potentials wurde das Überlaufwasser vermessen. Somit kann auf die Ladungsneutralisation zwischen dem Schlamm und Polymer geschlossen lässt.

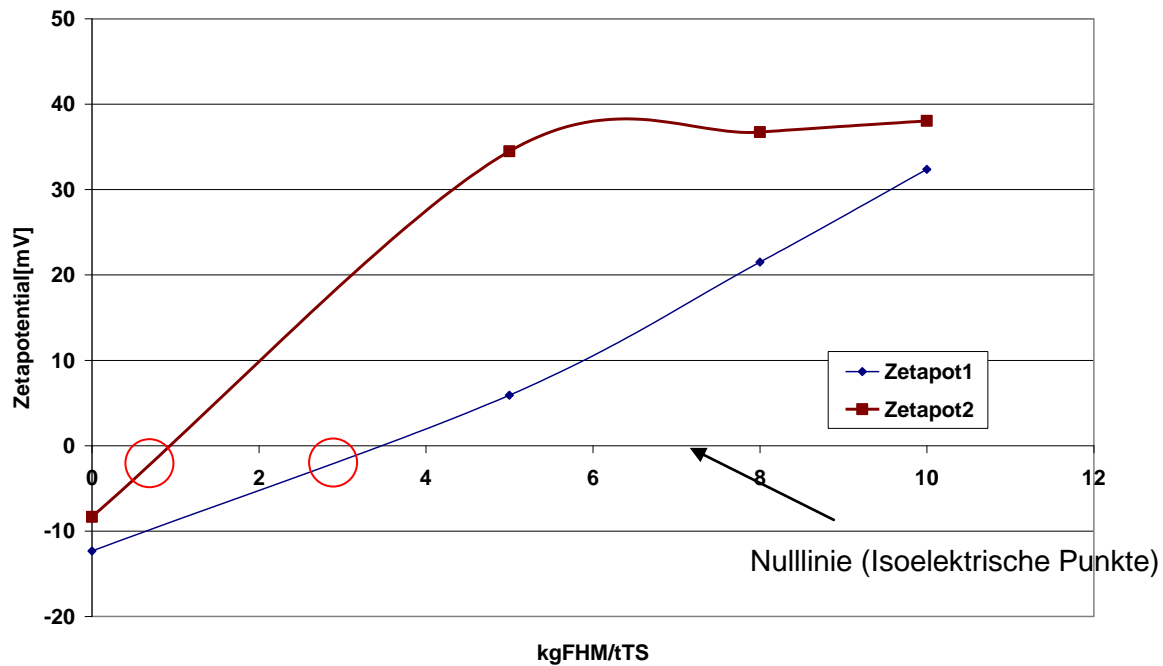


Abbildung 54: Zeta- Potentialmessung

6.3 Vergleich zwischen Strength Tester und anderen Verfahren

In diesem Kapitel wurden die Strength- Tester Messungen mit anderen Messverfahren verglichen. Dabei steht der Vergleich mit dem Zeta- Potential an erster Stelle, da es die Standardgröße zur Bestimmung der Dosierkonzentration ist. Der Vergleich zwischen Strength- Tester in der Abbildung 55 mit den Messungen mit dem Zeta- Potential in der Abbildung 56 sind sehr gut zu erkennen. Man konnte sich am Anfang der Arbeit nicht erklären, wie es bei einer Erhöhung der Dosierkonzentration zu einem Abfall des EST kommt. Jedoch geschieht nach der Dosierung von 10 [kgFHM/tTS] folgendes: Die positiven Ionen im FHM verursachen eine Zerstörung der Flockenstruktur. Damit wird auf der einen Seite die Flockenstruktur schwächer. Das Zeta- Potential bestätigt dies indem die Zeta- Potentialspannung rapide fällt. Durch das Aufreißen bzw. die Zerstörung der Flocke wird neue Oberfläche der Flocke frei und FHM bindet sich an den neu gewonnen Oberflächen. Damit fällt die Ionenkonzentration im Überlauf und es verschiebt sich das Ladungspotential in Richtung des negativen Bereichs.

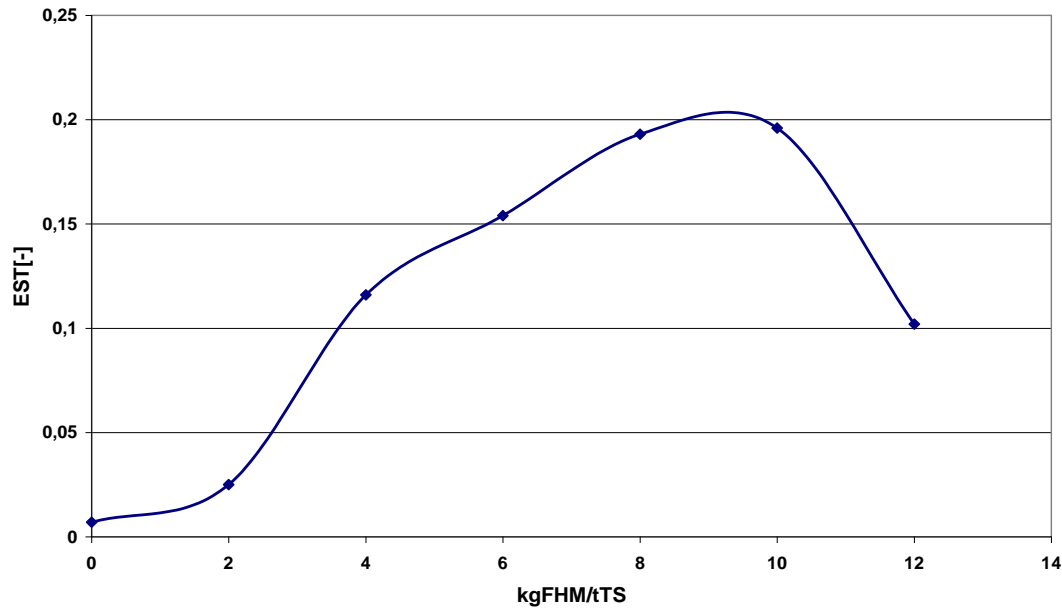


Abbildung 55: EST- Dosierkonzentration

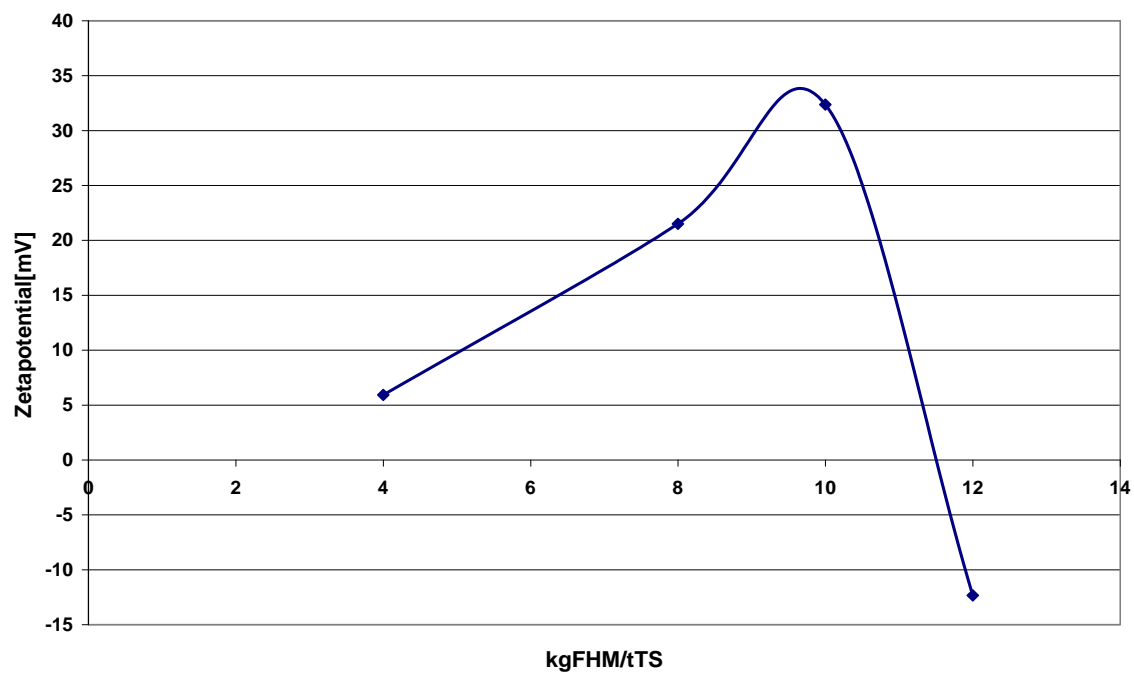


Abbildung 56: Zeta- Potentialmessung -Dosierkonzentration

Die Bestimmung der Viskosität bestätigt, dass die Flockenstruktur bei einer Erhöhung eine niedrigere Kompaktheit bzw. Stabilität aufweist.

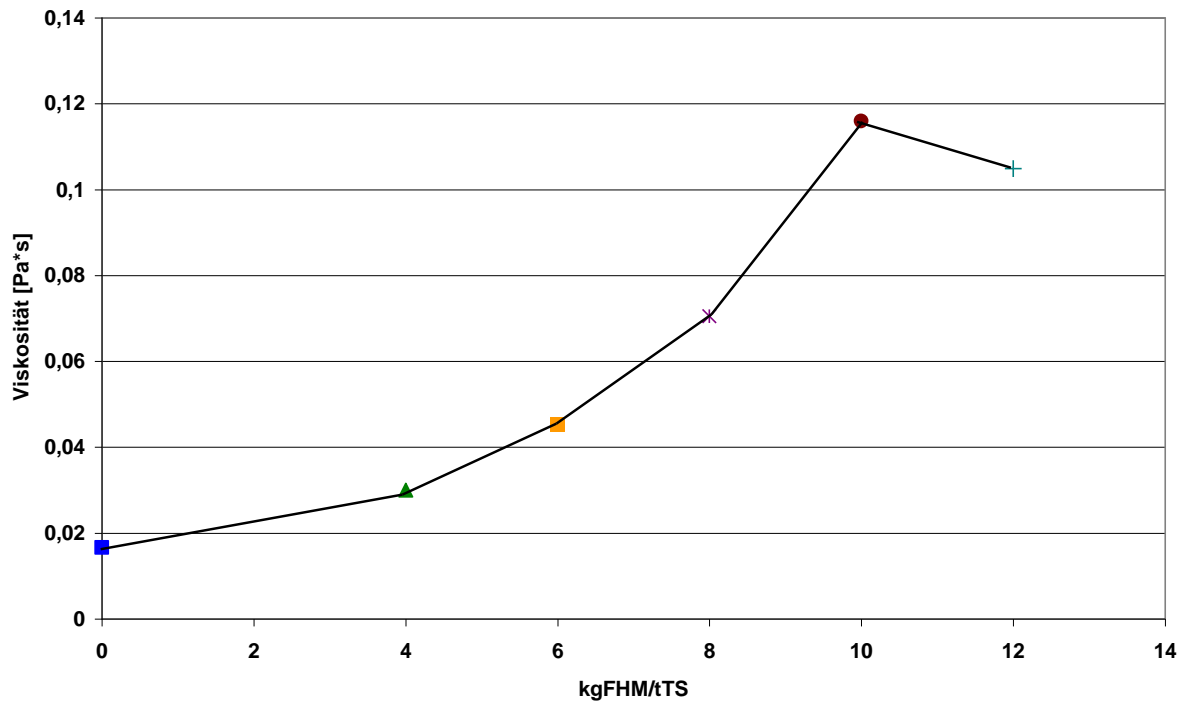


Abbildung 57: Viskositätsdiagramm

Bei weniger stabilen Flocken geht mehr Feststoff durch das SWW- Modell. Ein leichter Rückgang des Rückstandes auf dem Filterbett bestätigt nochmals die vorigen Messungen.

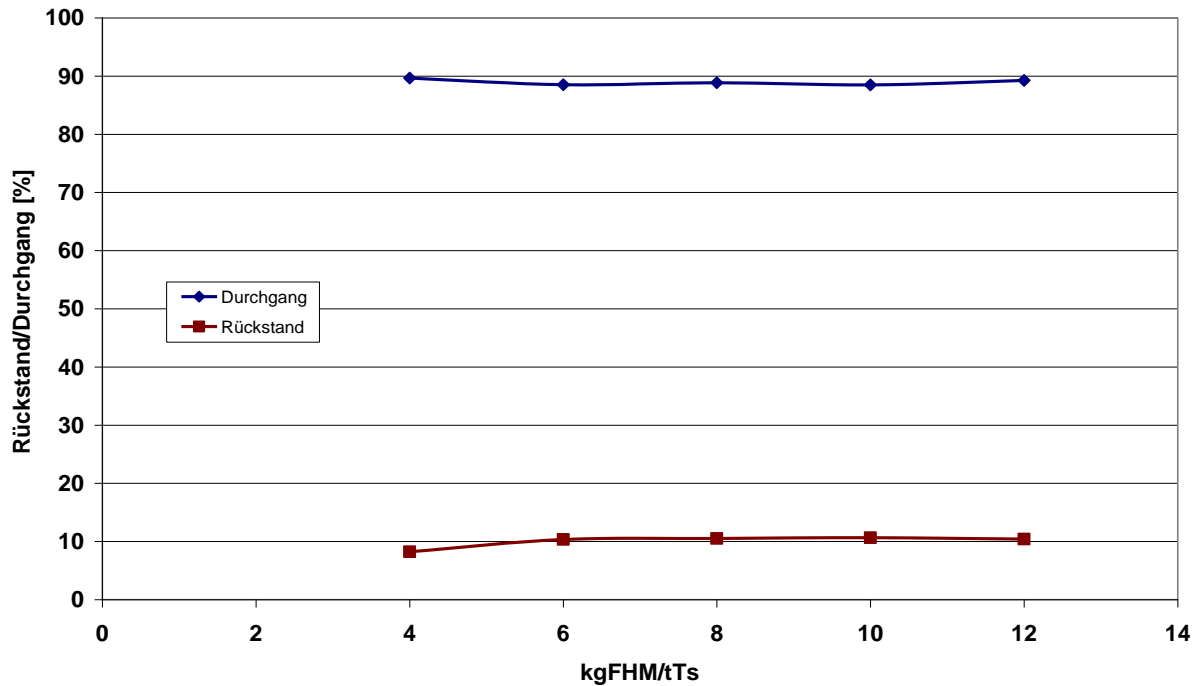


Abbildung 58: Rückstand- Durchgang

6.4 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Messungen statistisch betrachtet. Das heißt das Bestimmtheitsmaß sowie der Residualplot werden bestimmt und interpretiert. Am Anfang jedoch steht der Zusammenhang des E_{ST} - Index mit der Trockensubstanz, die bei dem SWW- Modell ermittelt wurde. Damit stellt man eine Aussage über die Trockensubstanz, die beim Entwässerungsprozess der entscheidende Faktor ist, fest. Zu diesem Zweck werden die beiden zu bestimmenden Faktoren der E_{ST} - Index und die Trockensubstanz in einem Diagramm in Abhängigkeit der Dosierkonzentration aufgetragen. Die Dosierkonzentration von 100%-300% wurden betrachtet. Wie schon erwähnt werden alle anderen Konzentrationen durch das SWW- Modell, nicht filtrierbar und lieferten keine brauchbaren Ergebnisse. In der Abbildung 59 sind fünf Kläranlagen dargestellt wobei die Werte des E_{ST} - Index und der Trockensubstanz zueinander alle über 0.9 korrelieren.

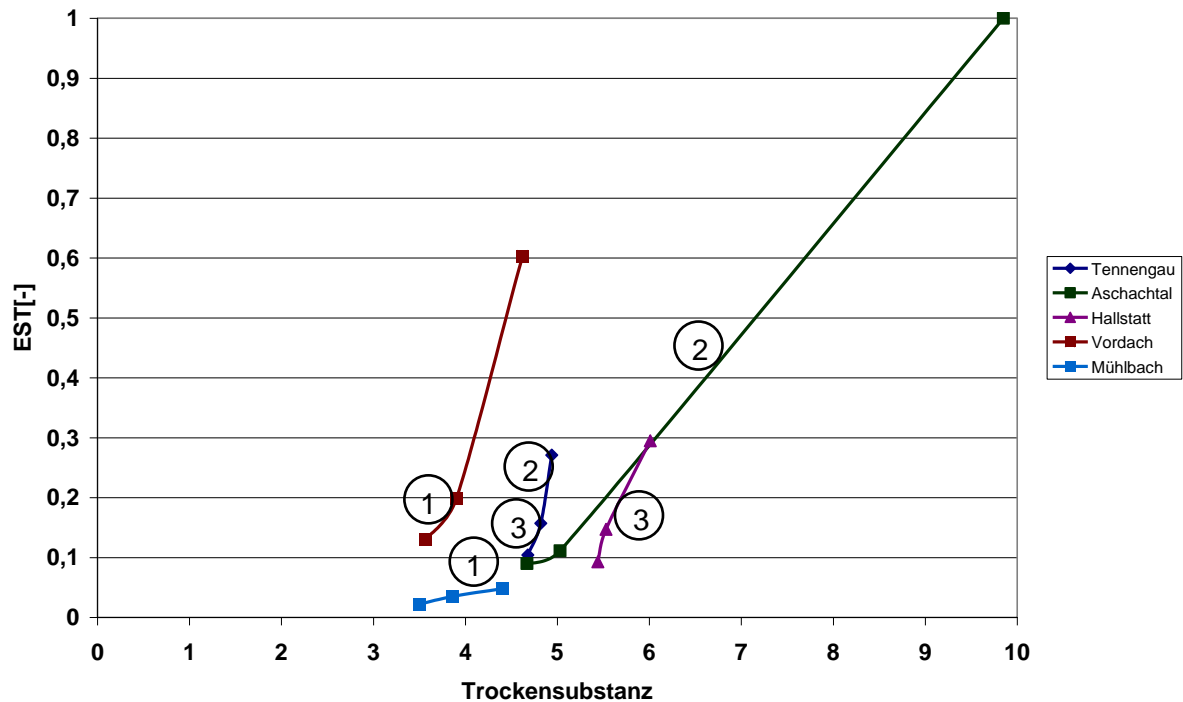


Abbildung 59: Kläranlagen Korrelation

Um aus der Abbildung 59 Aussagen treffen zu können werden zu diesem Zweck drei Betrachtungsgruppen festgelegt. Eine Gruppe fasst jeweils zwei Kläranlagen zusammen. Ein Paar ist mit einem Kreis der eine Nummerierung enthält versehen. Bei der Betrachtungsweise die nachstehend beschrieben wird, wird ein Bezug auf die Gruppennummer hergestellt.

Gruppe1:

In diesen beiden Kläranlagen weist die Trockensubstanz bei den verschiedenen Dosierungskonzentrationen einen gleichen Wert auf der Abszisse auf. Jedoch unterscheiden sich die E_{ST} -Indices erheblich. Es scheint, als ob der E_{ST} -Index keine Auskunft über die Entwässerungsqualität liefern kann. Bis dato wurden die Vergleiche immer auf die gleiche Suspension bezogen. Von dort aus sind sehr wohl merkliche Unterschiede zu erkennen. Doch wie ist es nun mit diesen beiden Kläranlagen?

Die Trockensubstanz ist fast die gleiche aber der Index ist eindeutig nicht im gleichen Bereich. Betrachtet man die Ausgangssituationen der beiden Kläranlagen so ist der E_{ST} -Index ohne Dosierung bei der Kläranlage Mühlbach wesentlich kleiner als bei der Kläranlage Vordach. Bei der Kläranlage Mühlbach hat der Index einen Wert von 0.001. In der Kläranlage Vordach weist der Index einen Wert von 0.011 auf.

Da die Zusammensetzung der Suspension einen wesentlichen Einfluss auf den Index hat, kann man die E_{ST} - Indices nicht miteinander vergleichen. Es ist immer die Ausgangssituation der Suspension mit einzubeziehen.

Gruppe2:

Die beiden Kläranlagen bleiben mit dem E_{ST} - Index und der Trockensubstanz in der gleichen Größenordnung. Jedoch gibt es bei der Dosierkonzentration von 300% bei der Kläranlage Aschachtal einen starken Anstieg. Dieser starke Anstieg kann ein Messfehler vom Strength- Tester sein. Aber wie ist dann auch der starke Anstieg der Trockensubstanz zu erklären? Wurde derselbe Fehler bei der Trockensubstanzbestimmung bei dem SWW- Modell auch begangen? Zwei unabhängige Messgeräte, zwei unabhängige Laboranten und derselbe Ausreißer? Es ist nicht ausgeschlossen, dass es sich um einen Messfehler handelt, wobei die Wahrscheinlichkeit sehr gering ist, da die Kontrollmessung diesen Punkt mit einer hohen Trockensubstanz bestätigt. Eine Erklärung ist, dass sich die Partikel für diese hohe Konzentration sehr gut eignen und daher sehr dicht und kompakt koagulieren.

Gruppe3:

Bei den Kläranlagen Hallstatt und Tennengau sind die E_{ST} - Indices in etwa gleich. Jedoch ist bei Hallstatt eine wesentlich bessere Trockensubstanz vorzuweisen. Wenn man nun wieder die Anfangsindices betrachtet dann ist bei der Kläranlage Tennengau der Anfangswert 0.024 und bei Hallstatt 0.008. Hallstatt beginnt bei einem wesentlich niedrigeren Ausgangswert als es bei Tennengau der Fall ist. Erreicht aber dieselben E_{ST} - Indices. Der Flockungsprozess ist bei der Kläranlage Hallstatt effizienter als bei der Kläranlage Tennengau. Der Ausgangspunkt ist niedriger und die E_{ST} - Indices sind fast gleich.

Das Resümee daraus ist, dass man die E_{ST} - Indices alleine zwischen den Kläranlagen nicht miteinander vergleichen kann. Abgesehen davon, dass verschiedene Entwässerungsaggregate auch unterschiedliche E_{ST} - Indices benötigen, ist eine Betrachtungsweise des Anfangswertes der Suspensionsbeschaffenheit unerlässlich. Der Strength- Tester hat keinen Nullpunkt bzw. misst von keinem Kraftniveau aus. Der Vergleich des Anfangswertes gibt dem Messgerät den nötigen Parameter, um auch Vergleiche untereinander von E_{ST} - Indices von den verschiedenen Kläranlagen anstellen zu können. Ein weiterer Versuch untermauert diese Aussage, denn nicht nur eine Aussage zwischen den Kläranlagen ist wichtig. Es ist auch innerhalb eines Tages einer Kläranlage wichtig zu wissen wie die E_{ST} - Indices untereinander zu interpretieren sind. Wie schon festgehalten wurde, ist die Menge des Feststoffgehaltes maßgeblich für die Höhe des

Indexwertes verantwortlich. In der nachstehenden Abbildung 60 ist der E_{ST} - Index sowie weiter die Trockensubstanzen die bestimmt wurden aufgetragen. Dabei wird die Trockensubstanz des Klärschlammes als TS bezeichnet, TS Dünnschlamm ist der geflockte Klärschlamm und TS Dickschlamm meint den entwässerten Klärschlamm. Dabei ist deutlich zu sehen, wenn der Feststoffgehalt des Dünnschlammes steigt, dass die auch merkliche Auswirkung auf den E_{ST} - Index hat. Die in der Abbildung 60 markierten roten Kreise stellen markante Punkte dar wo so ein Fall eintritt. Im ersten Fall kam es zu einer wesentlichen Erhöhung des TS Dünnschlammes, da im Laufe der Nacht eine Förderpumpe ausgefallen ist. Beim zweiten Punkt ist die Ursache nicht bekannt aber es kam ebenfalls zu einer Synergie, die auch natürlich begründet sein kann.

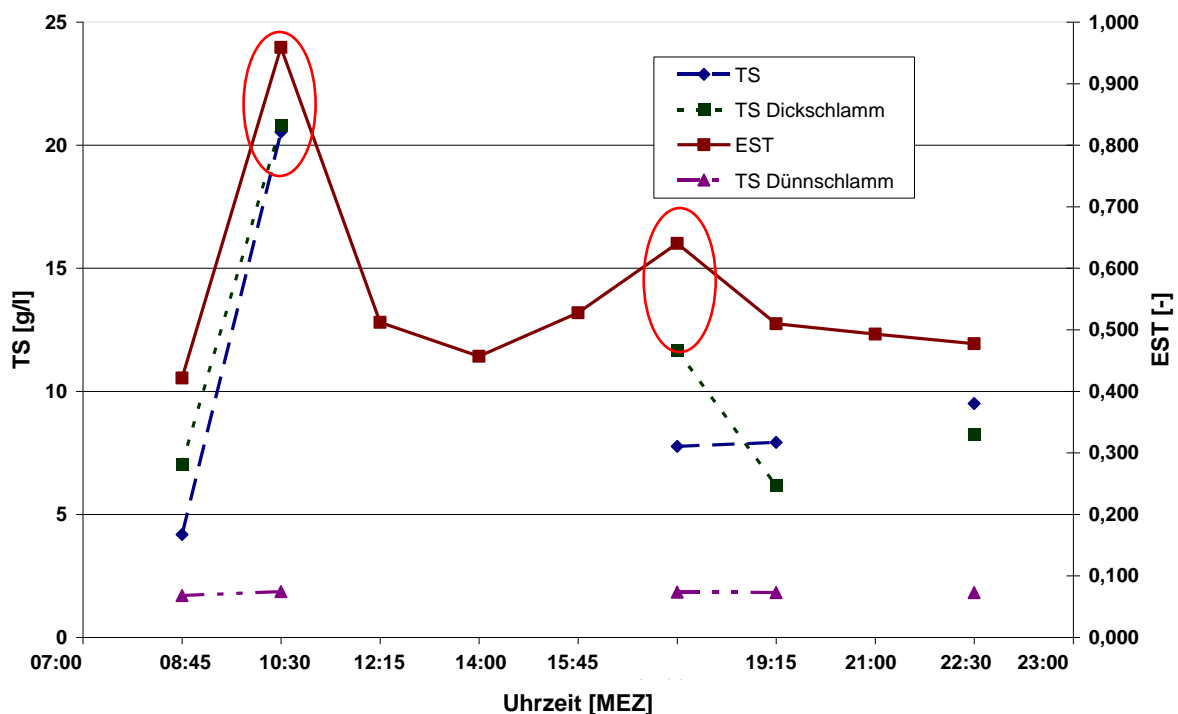


Abbildung 60: Tagesgang

Der zweite markante Punkt kann vielleicht durch einen Vergleich von Tagesgängen mehr Aufschluss geben, ob dieses Phänomen natürlicher Ursache ist. In der nächsten Abbildung 61 sind Tagesgänge von drei Tagen miteinander verglichen. Dabei sticht der erste Punkt auch deutlich heraus. Der zweite Punkt lässt eher auf eine natürliche Zunahme des TS Gehaltes im Dünnschlamm schließen. In diesem Bereich nahm auch an anderen Tagen der E_{ST} - Index zu. Aufgrund der Tageszeit könnte man Annehmen, dass die durch den Tagesrhythmus der arbeitenden Bevölkerung begründet ist.

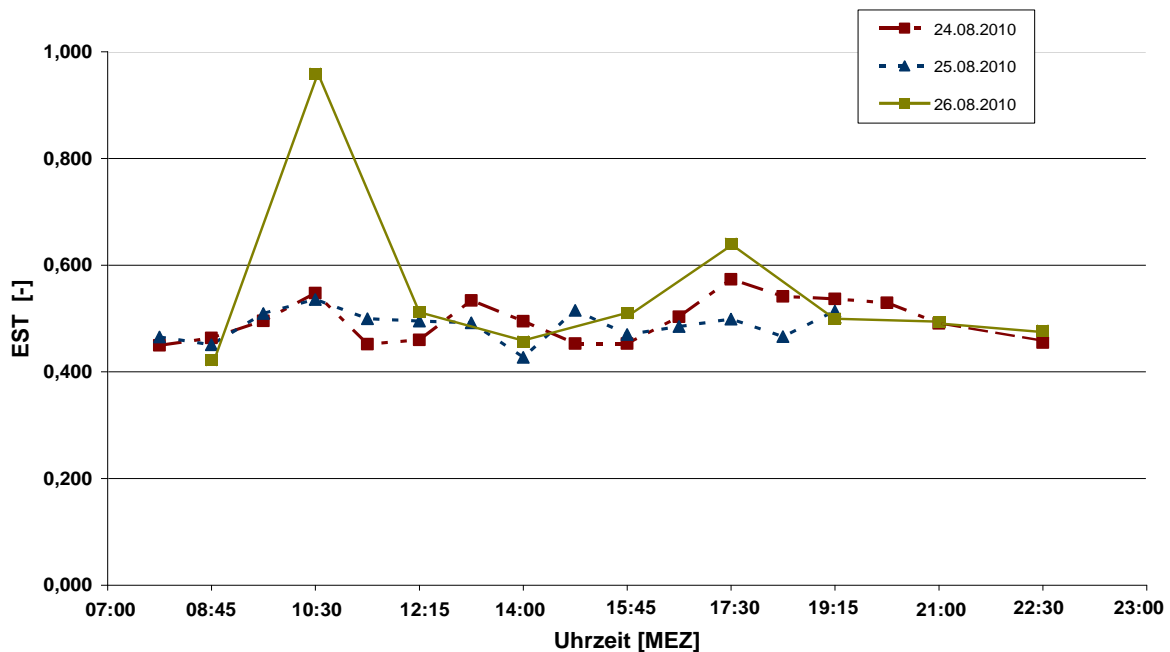


Abbildung 61: Tagesgänge

Bis jetzt konnte man die Einsatzmöglichkeiten des E_{ST} - Index zeigen. Aber man weiß nicht, ob es Zusammenhänge zwischen den Flockungshilfsmittel gibt oder inwieweit die Messdaten reproduzierbar sind.

Im Wissenschaftlichen Arbeiten aber auch im alltäglichen Leben des Technikers ist es wichtig zu wissen ob Messwerte reproduzierbar sind. Es ist die Aufgabe der Fehlerrechnung, aus einer Reihe von Messdaten den zuverlässigen Wert zu bestimmen. Jede Auswertung von physikalischen Messversuchen, die nicht zugleich mit dem Ergebnis auch eine Angabe seiner Genauigkeit enthält, ist wertlos. Grundsätzlich wird unter systematischen und zufälligen Fehlern unterschieden. Systematische Fehler haben ihre Ursache im System. Sie lassen sich reproduzieren und treten bei Wiederholung in gleicher Größe und Betrag auf, wie zum Beispiel verschobene Skalen oder Nullstellen. Dieser Fehler lässt sich doch mit einer Qualitätssicherung verkleinern oder beheben. Zufällige Fehler lassen sich grundsätzlich nicht vermeiden. Innerhalb einer Messreihe können sie in verschiedenen Größen und Beträgen auftreten. Sie können bei Wiederholung auf ein vernünftiges Maß gebracht werden und mathematisch beschrieben oder abgeschätzt werden. Eine solche mathematische Auswertung des mittleren Fehlers des Einzelwertes wird nachstehend in der Berechnung der Reproduzierbarkeit der Messwerte dargestellt. Es sollen nicht nur Aussagen über eine zufällige Messung

getroffen werden sondern über eine größere Stichprobe. Dazu wurde der Erwartungswert bzw. wahre Fehler der Einzelmessungen, sowie die Standardabweichung, die ein Maß für die Abweichung des Einzelwertes vom Mittelpunkt ist, berechnet.

Die Abbildung 62 zeigt stellvertretend eine Messung zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit wobei die Dosierkonzentration Zwei [kgFHM/tTS] dargestellt wurde. Dabei wurde wieder der Bereich aus dem man den EST- Index errechnet betrachtet.

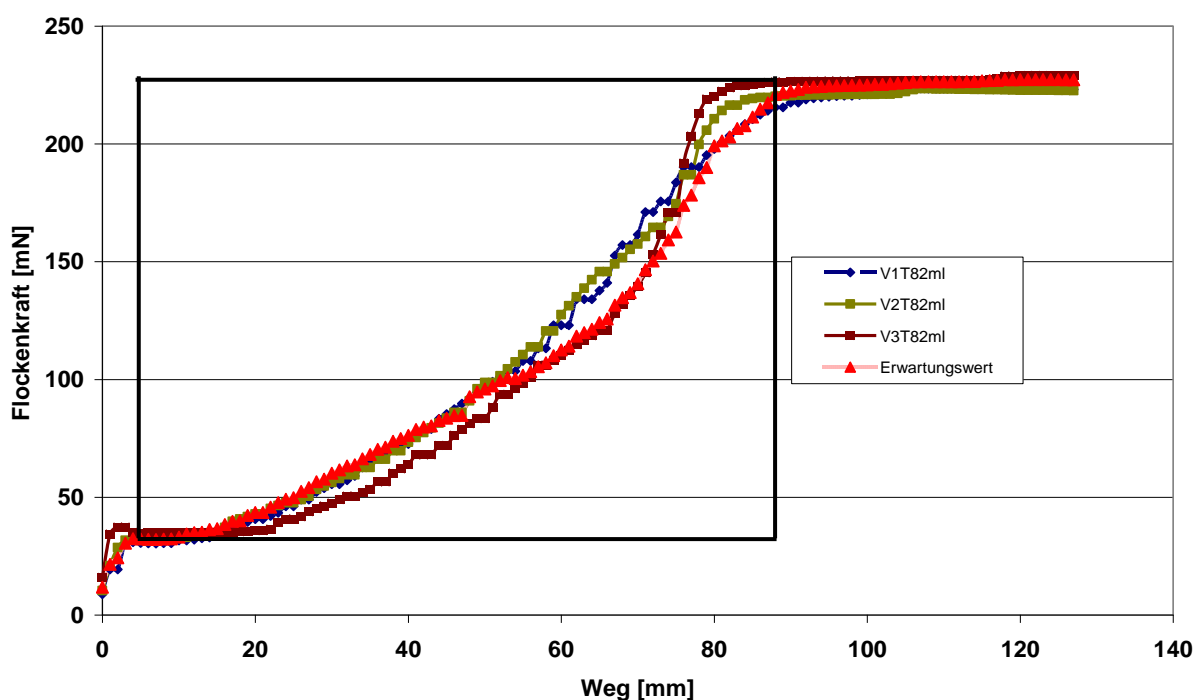


Abbildung 62: Abweichung

Dabei wurde von drei Messungen der Mittelwert eruiert. Diese Ermittlung erfolgt durch die Mittelung der Spalten über den ganzen Messbereich. Diese Berechnung stellt den wahren Wert bzw. den Erwartungswert dar. Daraus resultiert nach der Formel $\Delta x = (x_w - x_m)^{0.5}$ und der Formel $Abweichung = (\sum(x_{wi} - x_{mi}) / (n-2))^{0.5}$ die Ableitung der unterschiedlichen Abweichungen der einzelnen Messparameter.

x_w ... Erwartungswert

Δx ... Differenzwert

x_m ... Messwert

n ... Anzahl der Messwerte

Der wahre Fehler bzw. die Abweichung der E_{ST} - Indices von den Messwerten in Abhängigkeit der Dosiermenge des Flockungshilfsmittels wurde tabellarisch in den nächsten Tabellen 3 und 4 aufgezeigt.

Tabelle 4: mittlere Abweichung

Dosiermenge [%]	Vordach m.Fehler [%]	Aschachtal m.Fehler [%]	Mühlbach m.Fehler [%]	Spitz m.Fehler [%]	Tennengau m.Fehler [%]	Hallstatt m.Fehler [%]
0	0,13	0,27	0,78	0,29	0,46	0,77
50	0,40	0,82	Fehlt	0,44	0,72	0,77
80	0,37	0,85	1,52	0,69	1,61	1,09
100	0,9	1,01	0,66	0,65	Fehlt	Fehlt
120	0,93	1,02	1,83	1,09	Fehlt	Fehlt
300	1,77	2,54	Fehlt	0,53	0,74	0,74

Tabelle 5: mittlerer Fehler aus den Messwerten ARA Graz

Dosiermenge [ml/600ml Suspension]	Graz m.Fehler [%]
0	0,54
2	Fehlt
4	0,37
6	0,69
8	0,76
10	1,12

Aus den Messdaten in der Tabelle wurde ein Diagramm erstellt wobei die Häufigkeit der Fehler, und die Fehler in Prozent aufgetragen sind. Dabei kommt es zur Grafik, die in der nächsten Abbildung 63 zu sehen ist.

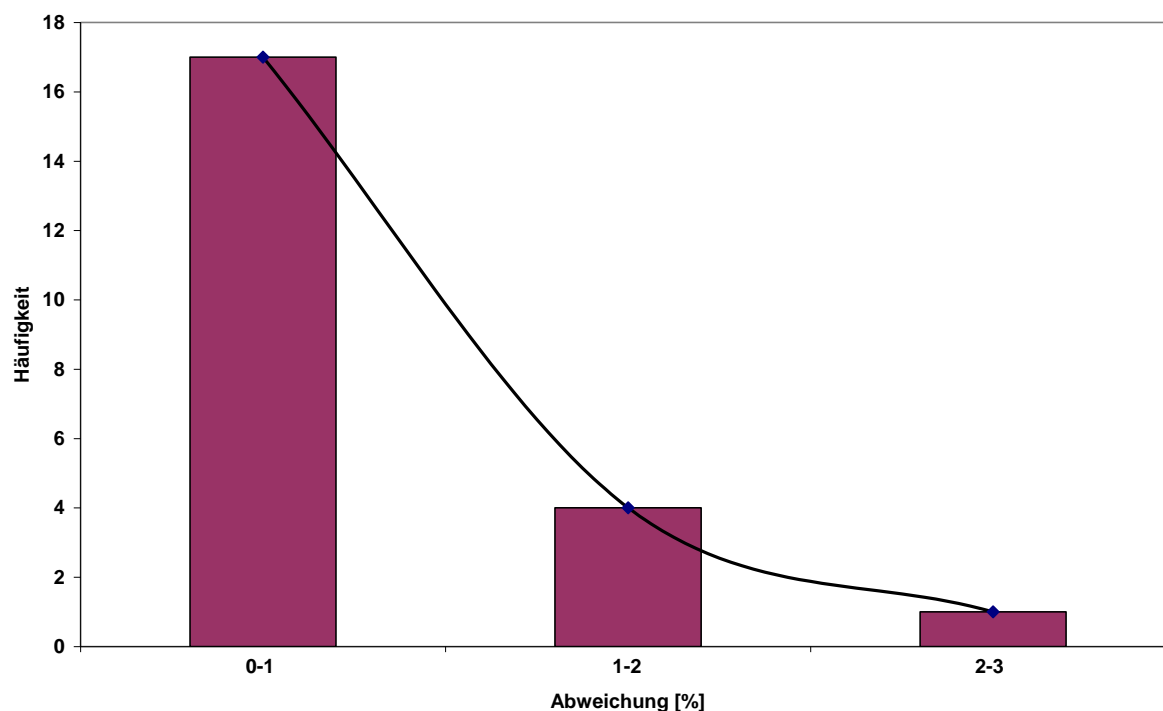


Abbildung 63: Mittlerer Fehler vom Strength- Tester

Die Bildung des Mittelwertes wie schon erwähnt wäre hier nicht richtig, da die Kurve nicht gleichmäßig verteilt ist. Bei einer Gaußverteilung ist der Mittelwert im Zentrum und links und rechts davon ist die gleiche Fläche vorhanden. Die Ermittlung von 0.6-1 [%] wurde auf die gleiche Art und Weise ermittelt. Daher ergibt der Messfehler für den Strength- Tester 0.75 [%].

Ein Zusammenhang der Messwerte vom Strength- Tester ist mit den Messwerten der Trockensubstanz in der nächsten Abbildung 64 als Scatterplot dargestellt. Diese beiden Messwerte korrelieren miteinander sehr hoch und ergeben eine Korrelation von 0.896. Die Trockensubstanzen liegen in einem bestimmten Bereich. Dennoch konnte ein Messpunkt mit einer höheren Trockensubstanz und daraus folgend einem höheren E_{ST} - Index gemessen werden. Obwohl hier nur ein Messpunkt vorliegt, ist ein logischer Schluss, dass der E_{ST} - Index mit steigender Trockensubstanz zunimmt. Daher kann obwohl nur ein Messpunkt vorliegt, wie es in der Abbildung 64 gezeigt ist, eine Trendlinie hineingelegt werden. An dieser Stelle sei zu erwähnen, dass die Messung unter den veränderten Bedingungen eine einmalige Gelegenheit war. Dieser Punkt muss unbedingt miteinbezogen werden, da hier reale Bedingungen gemessen werden konnten die sonst nur unter aufwendigen Laborbedingungen durchführbar gewesen wären. Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese Werte von unterschiedlichen Suspensionen mit unterschiedlichen Eigenschaften stammen. Da hier die Trockensubstanz einbezogen wird aber auch andere Merkmale wie

Sauerstoffverbrauch oder Schlammvolumenindex ebenfalls sehr sinnvoll sind, ist diese Darstellung mit Vorsicht zu genießen. Diese genannten Parameter wurden nicht berücksichtigt.

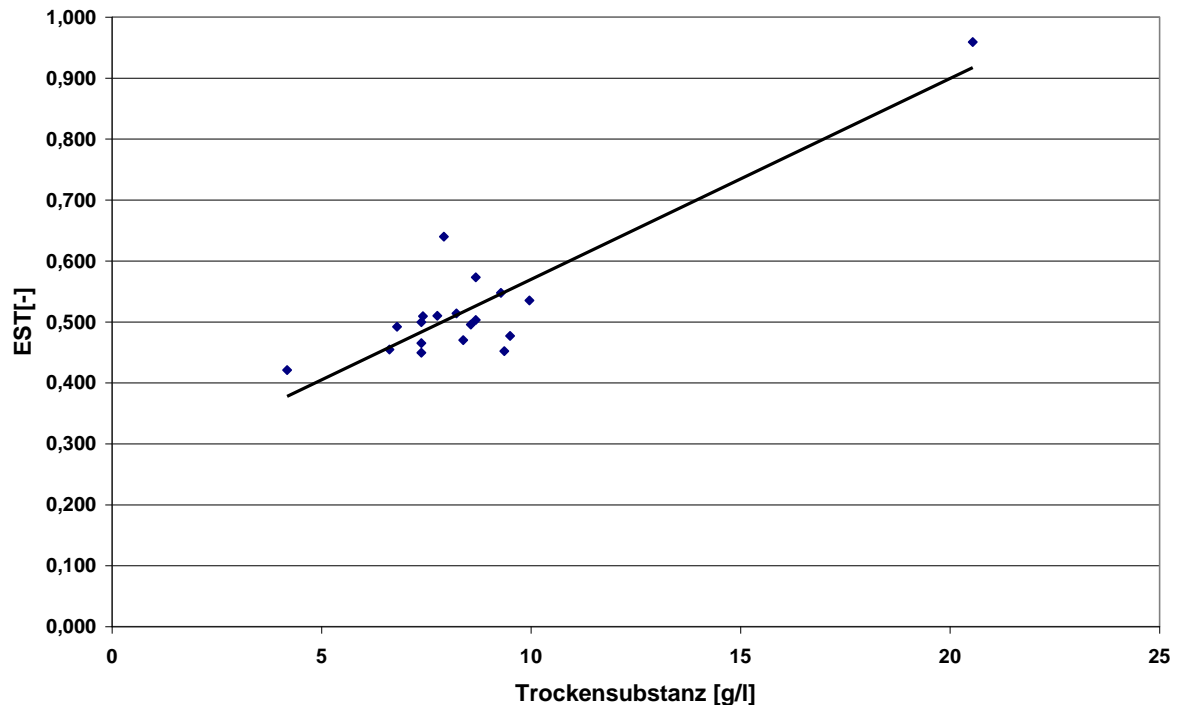


Abbildung 64: Scatterplot

Letztlich ist es wichtig zu wissen, ob eine abhängige Größe in unserem Fall der E_{ST} -Index von einer unabhängigen Größe (Dosierkonzentration) abhängt. Dafür ist ein Residuenplot dargestellt. Dieser Plot zeigt in einfacher Art und Weise die Abhängigkeit einer Größe von einer unabhängigen. Für statistische Auswertungen sind numerische Analysen vorzuziehen. Diese sind jedoch für kleine Stichprobenumfänge unbefriedigend. Residuenanalysen führen meistens zu besseren Ergebnissen, da der Mensch es gewöhnt ist, Muster zu erkennen. In dem in der Abbildung 65 dargestellten Plot ist folgendes zu erkennen.

Eine Variablen sind von einander abhängig, wenn sich die Residuen zwischen dem Plus Bereich und Minus Bereich abwechseln. Dies ist hier der Fall ist.

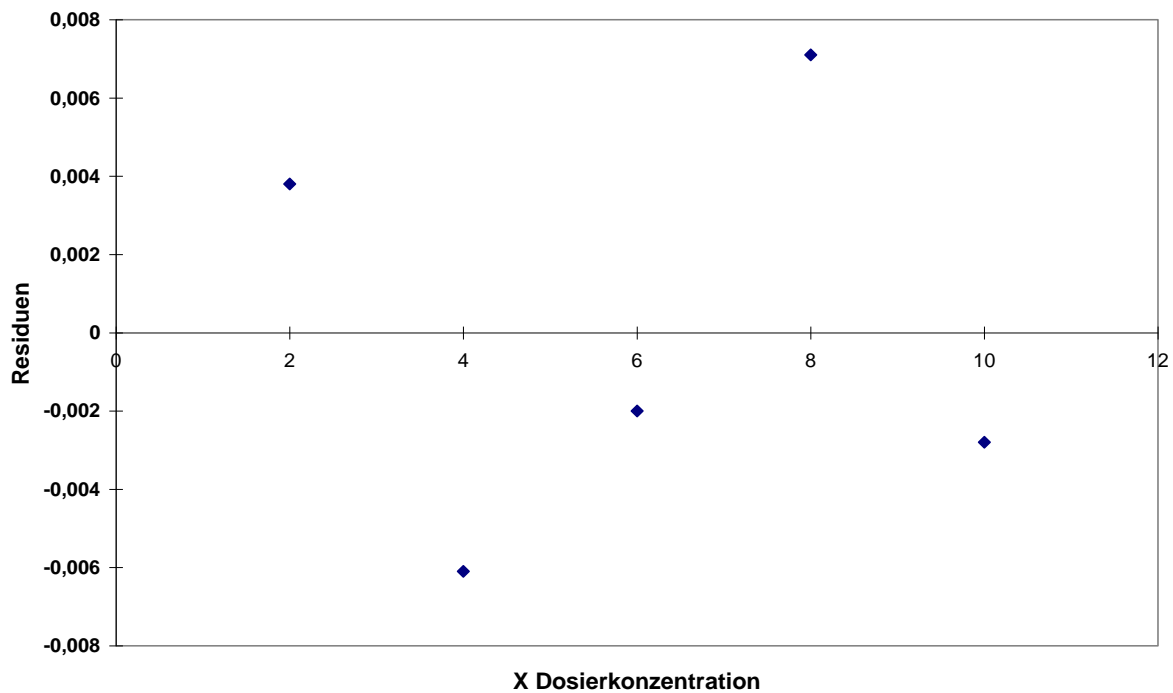


Abbildung 65: Residuenplot

Die Residuen zeigen eine Abhängigkeit zwischen der abhängigen und unabhängigen Größe. Jedoch ist es ein Vorteil zu wissen, wie viel Prozent diese Abhängigkeit beträgt und ob eine Beeinflussung eine zufällige, oder eine wesentliche ist, die durch die statistische Prüfgröße t definiert ist. Ist der berechnete Wert größer als die Prüfgröße dann handelt sich um keine zufällige Abhängigkeit. Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob der E_{ST} -Index von der Trockensubstanz abhängig ist, wird das Bestimmtheitsmaß bestimmt. Dieses Maß legt die Güte der Beziehungen in unserem Fall des E_{ST} -Index und dem Wert der Trockensubstanz fest. Um eine quantitative Aussage über die Güte dieser Beziehung treffen zu können, bedient man sich der Varianzanalyse. Die daraus resultierenden Werte der Streuung werden in ein Verhältnis gesetzt das auf die Güte der Beziehung schließen lässt. Diese Gütezahl bzw. das Bestimmtheitsmaß ist umso größer, umso besser die Beziehung zwischen den abhängigen Größen sind und kann einen maximalen Wert von 100% erreichen. Die erhaltenen Gütezahlen der einzelnen Kläranlagen sind in der nächsten Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Bestimmtheitsmaß EST

Kläranlage	Bestimmtheitsmaß [%] von E_{ST}	$>t$ 5.841
Spitz	96.98	16.023
Aschachtal	86.13	7.044
Graz	93.10	13.167
Hallstatt	84.22	6.530
Spitz	96.98	16.023
Tennengau	95.71	13.348
Vordach	94.13	12.345
Mühlbach	84.22	6.53

Die angegebenen Gütezahlen bedeuten, dass die Veränderlichkeit der abhängigen Größe der E_{ST} -Index von dem in der Tabelle 6 angegebenen Werte abhängt. D.h. in der Kläranlage Spitz, ist die Veränderlichkeit der abhängigen Größe, der E_{ST} -Index, zu 96.98 [%] auf die Veränderung der unabhängigen Größe, der Dosierkonzentration, zurückzuführen. Hier ist bemerkenswert, dass überall dort wo Flüssigpolymere eingesetzt werden das Bestimmtheitsmaß über 90% liegt. Bei Einsatz von Feststoffpolymeren liegt das Bestimmtheitsmaß deutlich unter 90%. Dies lässt darauf schließen, dass Feststoffpolymere sich nicht so gut in Lösung bringen lassen wie Flüssigpolymere. Daraus folgt eine schlechtere Homogenität, die einen geringeren Zusammenhang zwischen der abhängigen und unabhängigen Größe zur Folge hat. Die anderen 3.02 [%] auf Veränderungen anderer, nicht berücksichtigter Einflussgrößen. In der nachstehenden Tabelle 7 wurden die Gütezahlen der abhängigen Größe, der Trockensubstanz, von der unabhängigen Größe, der Dosierkonzentration, bestimmt.

Tabelle 7: Bestimmtheitsmaß TS

Kläranlage	Bestimmtheitsmaß [%] von TS	$t > 5.841$
Aschachtal	99.92	116.538
Hallstatt	99.68	59.044
Tennengau	78.92	6.458
Vordach	95.18	14.827
Mühlbach	90.24	10.15

6.5 Rückschlüsse auf Zusammenhänge der eruierten Parameter

Es konnte festgestellt werden, dass der E_{ST} –Index eine abhängige Größe von verschiedenen Dosiermittelkonzentrationen ist. Diese neu eingeführte Größe lässt Zusammenhänge in der mechanischen Entwässerung beschreiben und erklären. Es wurden Überlegungen dahin angestellt, ob man mit diesem Index Aussagen über die Qualität der Entwässerung treffen kann. Dafür sind Referenzmessungen durchgeführt worden, die die Messungen des Strength- Testers bestätigen. Die Messungen wurden dabei mit den Messgrößen, die bereits in der Literatur gemessen wurden, verglichen und deren Zusammenhang aufgezeigt. Letztlich wurde statistisch bewiesen, dass die neu eingeführte Größe signifikant im Bezug auf die Dosiermittelkonzentration ist. Dies konnte nicht nur an einer Kläranlagen festgestellt werden sondern an sieben Kläranlage mit unterschiedlichen Entwässerungsanforderungen. Hier ist allerdings anzumerken, dass es sich hier, statistisch gesehen, um eine kleine Anzahl von Messwerten handelt. Hierbei ist noch eine genauere Untersuchung der bereits gefundenen Korrelationen mit einem umfangreicheren Forschungsvorhaben notwendig. Weiters wurde ein Einflussparameter die Temperatur, die mitentscheidend für die Entwässerungsqualität ist, untersucht. Dabei konnte auch mit den Strength- Tester gezeigt werden, dass sich die theoretischen Überlegungen bewahrheitet haben. Es wurde ein Bestimmtheitsmaß ermittelt, das bis dato alle Messsysteme, die es ermöglichen online- zu messen, übertrifft. Es ist nun möglich den E_{ST} –Index flächendeckend neu einzuführen um Aussagen, in den verschiedenen praktischen Anwendungen, zu treffen. Dieser Index hat nicht nur einen Mehrwert für den Kläranlagenbetreiber sondern auch für Aggregatenhersteller sowie auch für den Polymermittelerzeuger. Diese Mehrwerte und Möglichkeiten sind im nächsten Kapitel beschrieben.

6.6 Praktische Verwertung der Daten

Mit dem neu eingeführten und untersuchten Index ist nicht nur eine Vorauswahl des Aggregates möglich. Qualitätsschwankungen die auf Kläranlagen im Laufe des Tages auftreten, können damit ausgeglichen werden, indem man vor Inbetriebnahme des Aggregates den E_{ST} –Index ermittelt. Somit kann der Betreiber Schwankungen ausgleichen, indem er den empfohlenen E_{ST} -Index, als Regelgröße, einhält. Weiters kann er auch Betriebsstörungen leicht aufgreifen, wie es im vorher erwähnten Beispiel der Tagesgänge im Kapitel 6.4 erwähnt wurde. Nicht nur für den Betreiber ist eine objektive, leicht zu bestimmende Größe wie der E_{ST} –Index von großer Bedeutung. Auch für den Aggregatenhersteller ist eine solche Größe von unschätzbarem Wert. Bei der Betriebsabnahme kann dieser als Abnahmeparameter

dienen und somit Rechtssicherheit für beide Parteien schaffen. Für den Flockungsmittelhersteller ist eine objektive Bewertung über das dementsprechende Flockungsmittel für den Betreiber möglich und kann bei Ausschreibungen von großem Nutzen sein.

Durchaus kann eine weitere Anwendung durch den E_{ST} -Index von Nutzen sein. Indem man die Flocken mechanisch zerstört und somit die Entwässerungsleistung optimieren kann. Dabei sollte man das Polymer nicht punktuell auf einmal in das System einbringen sondern an mehreren Stellen. Eine solche Darstellung ist in der Abbildung 66 dargestellt. Man versucht mit einer Kaskadenschaltung den Polymermitteleintrag gering zu halten und die Flockenstruktur für das dementsprechende Aggregat zu optimieren. Durch Messen des E_{ST} - Index kann somit auf die optimalen einzelnen Prozessabfolgen geschlossen werden.

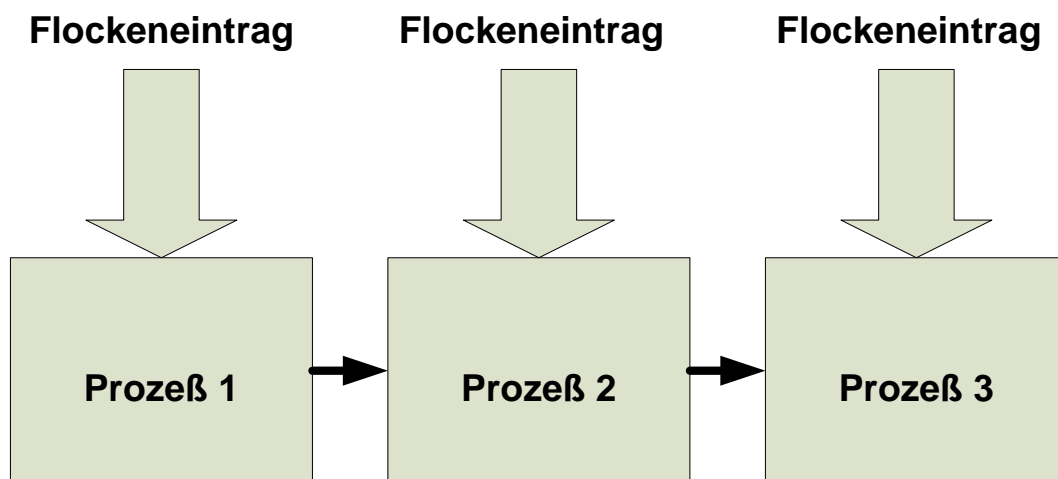


Abbildung 66: Kaskadenschaltung

Im nächsten Kapitel so eine mögliche praktische Anwendung des Strength- Tester gezeigt werden. Es soll in der Praxis möglich sein, einen geschlossenen Regelkreis in Entwässerungsprozessen einzuführen und diesen optimal zu betreiben.

6.7 Regelung statt Steuerung

Die Steuerung des Flockungsprozesses ist die jüngsten Ambitionen zu optimieren die immer mehr präsent wird. Bis dato hatte man solche Möglichkeiten nicht, da es schwierig ist innerhalb einer kurzen Zeit eine Aussage über die optimale Flockenbildung zu treffen. Daher werden immer mehr Bemühungen daran gesetzt, den Flockungsprozess automatisch zu überwachen. Dabei haben sich zwei grundlegende physikalische Prinzipien, des der Elektronenneutralisation und des der Eruierung der Partikelgrößen durchgesetzt. Dabei ist aber anzumerken, dass bei der Elektronenneutralisation durch Salze im Abwasser die Messung verfälscht werden kann und somit eine optimale Flockenstruktur nicht immer gewährleistet wird. Bei der Partikelgrößenbestimmung liegt die Schwierigkeit darin, dass die Schlammflocken nicht hundertprozentig voneinander abgetrennt werden können. Daraus resultiert ein etwas schlechterer Bestimmungsfaktor von 84%. Derzeit wird aber immer nur eine Größe für die optimale Dosierung des Flockungsprozesses herangezogen. KRUMWIEDE [61] hat erstmals einen Regelkreis mit dem Flockungsprozess verbunden.

Dabei hat er eine Größe, das Strömungspotential, die er vorher mit Versuchen bestimmt hat, herangezogen und mit der Dosierpumpe kombiniert. In solch einem Regelkreis wird die Dosierpumpe in Abhängigkeit vom vorher bestimmten idealen Wert geregelt. Wenn man jedoch die Literatur ausführlich studiert kommt man auf eine unzählige Zahl an biologischen aber auch physikalischen Vorgängen, die den Flockungsprozess beeinflussen. Daher ist es sehr unwahrscheinlich, den Flockungsprozess nur mit einer Größe zu regeln oder zu steuern. In diesem Kapitel wird eine Möglichkeit beschrieben den Flockungsprozess nicht nur zu steuern, sondern in einem Regelkreis zu führen. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Schlammeigenschaften im Nachklärbecken Einfluss auf den Flockungsprozess haben. Dabei sind Größe, Festigkeit sowie Gestalt der Schlammflocke entscheidend. Hier ziehen EIKELBOOM und BUIJSEN [7] als Summenparameter den Schlammindeks heran. Ein guter Ansatz im Vorhinein schon eine Auskunft über die Entwässerungsqualität zu geben. Jedoch hat man diese Möglichkeit nicht mehr weiter verfolgt. Weiters haben umfangreiche Untersuchungen von KOPP und DICHTL [5] ergeben, dass der Polymerbedarf direkt von der negativen Oberflächenladung der Schlammartikel bestimmt wird. Die EPS enthält in hohen Massen negative Oberflächenladungen, die sehr voluminös sind. Diese binden aufgrund ihrer starken Polarität viel Wasser und umgeben die Mikroorganismen mit einem gelartigen Schleim wie MIKKELSON [6] in seiner Arbeit veröffentlicht.

STAUDINGER hat mit FUCHS [73] durch umfangreiche Versuche herausgefunden, dass der Schlamm eine bestimmte Eigenschaft aufweist, wenn er viel oder wenig EPS enthält. Zusammenfassend kann gesagt werden wenn viel EPS vorhanden ist sedimentieren die Schlammflocken dispers. Wenn wenig EPS vorhanden ist, sedimentieren sie im Verband. Dieses Absetzverhalten haben sie in mehreren Kläranlagen beobachtet und untersucht. Dabei lag ihr Augenmerk darauf, wenn der Schlamm im Verband sedimentiert, dass die Überlaufwasserqualität im Nachklärbecken von 60-70[%] auf 95[%] verbessert wird [73].

Für den nachstehenden Flockungsprozess bedeutet das, dass durch das Sedimentationsverhalten im Nachklärbecken der Flockungsprozess entscheidend beeinflusst werden kann. Indem man vorzugsweise den Kläranlagenbetrieb so wählt, dass disperse Sedimentation auftritt. Obwohl es für die Ablaufqualität im Überlauf einen Nachteil bedeuten kann. Dies stellt einen Kompromiss zwischen Qualität im Überlauf und der Flockungsprozessoptimierung dar.

Zwei weitere Größen, die auch im Regelkreissystem Einfluss nehmen, werden unmittelbar nach der Flockung bestimmt. Dies sind einerseits der E_{ST} -Index und die Ausbeute wobei beide Größen bereits erklärt wurden. Dabei ist zu sagen, dass der Vorschlag jedes Aggregat mit einem E_{ST} -Index zu versehen ist, hier wirksam wird. Wie im Kapitel 5.1 schon erklärt, wirkt sich das Entwässerungsaggregat auf die Entwässerungsqualität aus. Dabei wird der im Vorhinein definierte Index für das etwaige Aggregat festgehalten und in dem Regelkreis integriert. Weiters ist die Ausbeute des FHM wichtig um überschüssiges oder nicht wirksames FHM so gering wie möglich zu halten, da es mit unnötigen Kosten verbunden ist.

Die letzte Messung wiederum, nach dem Flockungsprozess, kontrolliert das Filtrat. Es wird eine Trübungsmessung des Filtrats durchgeführt, damit man sicher gehen kann dass der Flockungsprozess optimal läuft und sich keine Feststoffpartikel im Filtrat befinden.

Die Regelkreisparameter disperse Sedimentation, E_{ST} , Ausbeute und Trübungsmessung tragen gemeinsam zur Dosierung der Dosierpumpe bei. Wie stark die einzelnen Größen, Einfluss auf den Flockungsprozess haben kann derzeit nicht gesagt werden und müsste mit einer Versuchsserie genauer untersucht werden. Dabei kann man aber jetzt schon sagen, dass disperse Sedimentation und E_{ST} -Index die wichtigeren Einflussparameter sind. Der E_{ST} -Index spielt eine vorrangige Rolle. Die Ausbeute kommt etwas untergeordnet nach den zwei Parametern. Die Trübungsmessung wird am wenigsten Einfluss haben und wird letztlich eher als Qualitätskontrolle angesehen.

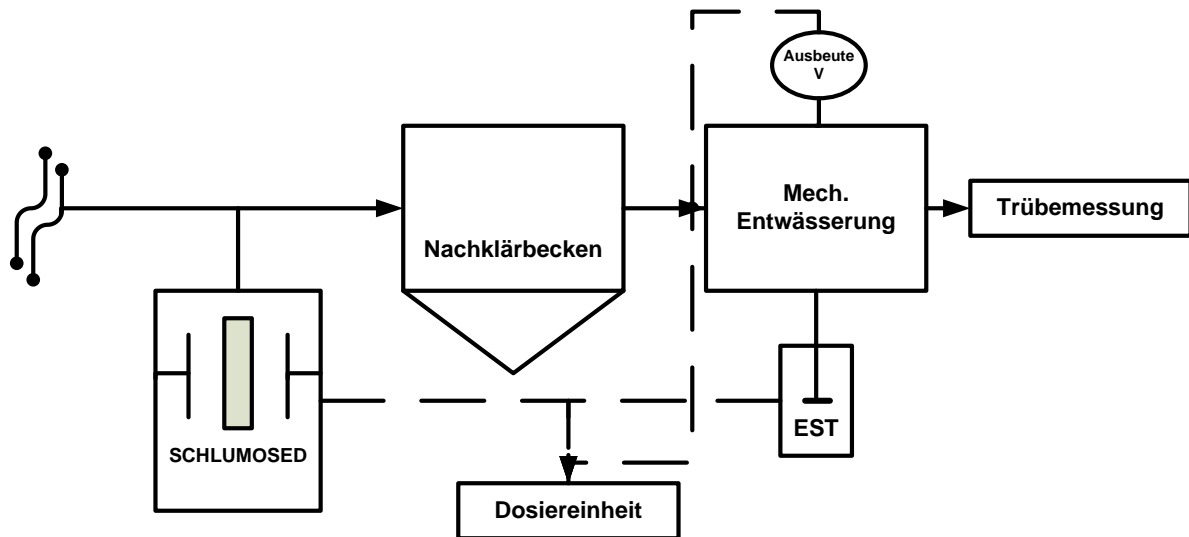


Abbildung 67: Regelkreis Flockungsprozess

6.8 Mathematische Formulierungen des Penetrationsprinzips

Dieses Unterkapitel soll den vorher bereits beschriebenen praktischen Messvorgang in mathematische Formeln kleiden. Dabei hat DIVIJAK [72] in seiner Diplomarbeit schon einige allgemeine Formulierungen für die Beschreibung der Verbandbildung gefunden. Dieses Kapitel soll jedoch konkret die Vorgänge, für die neu entwickelte Messmethode beschreiben.

DIVIJAK [72] hat bereits in seiner Diplomarbeit einfache Untersuchungen durchgeführt und eine Übereinstimmung der praktischen Werte mit den berechneten Werten in seiner Arbeit festgestellt. Daher wird hier nicht mehr explizit näher darauf eingegangen.

Der Messvorgang wurde schon im Kapitel 5.3 ausführlich beschrieben. In der Abbildung 26 ist am Beginn der Penetrationskurve ein waagrechtes positives Signal zu sehen. In diesem Zustand befindet sich der Penetrationskörper noch in der Luft und kann mit der Gleichung(14) beschrieben werden.

$$F_p = m \cdot g \quad \dots \text{Glg}(14)$$

Beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche folgt ein positiver Peak d.h. die Waage registriert eine nach unten ziehende Kraft aufgrund der Benetzung des Penetrationskörpers. Es ist dabei zu beachten, dass die Waage nach unten positiv wiegt, wie bereits im Kapitel Versuchsaufbau erklärt wurde. In diesem Stadium ist der Ring jedoch noch nicht zur Gänze in Flüssigkeit eingetaucht. Die nach unten

ziehende Kraft wird durch die Benetzungsspannung der Flüssigkeit im Idealfall nach der Gleichung(15) beschrieben.

$$F_P = \sigma_{FI} * \cos\Theta * l = \sigma_{FI} * (l_a + l_i) = \sigma_G * (d_a + d_i) * \pi \quad \dots \text{Glg(15)} \quad [72]$$

Hierbei sind marginale Abweichungen dadurch möglich, dass die Kontaktstellen vom Flüssigkeitsfilm zum Penetrationskörper nicht hundertprozentig übereinstimmen.

Die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten nimmt mit steigender Temperatur ab. Der Kontaktwinkel für reines Wasser sowie die Oberflächenspannung ist aus der Literatur zu entnehmen.

Divijak hat für seine Berechnungen einen Kontaktwinkel von $\Theta=60^\circ$ und eine Oberflächenspannung von $\sigma_{FI} = 1$ [N/m] angenommen [72].

Hierbei ist zu beachten, dass nicht immer die Vereinfachung der Oberflächenspannung durch reines Wasser getroffen werden kann. Es gibt auch Kläranlagen in denen die, Oberflächenspannung durch die Vereinfachung durch Werte die dem Wasser entsprechen, nicht zulässig ist (z.B. die Kläranlage Spitz). Der Dünnschlamm der in dieser Kläranlage mechanisch entwässert wird, weist keine hohe Fluidität auf also eine niedrige Viskosität. Daher sind andere Werte für den Kontaktwinkel und die Oberflächenspannung anzunehmen.

Danach wird ein starker Abfall des Waagensignals, aufgrund der Gewichtsabnahme, registriert. Der Penetrationskörper ist vollständig unter Wasser und erfährt gemäß dem Archimedischen Prinzip eine Auftriebskraft.

$$F_A = \rho_{H_2O} \frac{d_a^2 * d_i^2}{4} * h * g \quad \dots \text{Glg(16)} \quad [72]$$

Im folgenden Verlauf, nachdem das Waagensignal die Klarzone durchlaufen hat, und auf die erste Kompressionszone auftrifft werden die Flocken komprimiert. Die Kompression kann durch eine Druckbeanspruchung oder durch Druck- und Scherbeanspruchung verursacht werden. Die Kinetik wird einerseits durch die angelegte Höhe und Art bestimmt, andererseits während der Kompression durch den sich ständig ändernden partiellen E_{ST} -Index. In unserem Fall sind Einflussgrößen die Höhe und die Art, sowie die Höhe der Geschwindigkeit, mit der Schlitten nach oben fährt und die Fläche des Penetrationskörpers. Für die Versuche wurden allerdings keine Veränderungen vorgenommen. Daher sind diese Größen und als konstant anzusehen. Durch den E_{ST} -Index wird die Dosiermittelmenge in Abhängigkeit des Entwässerungsaggregates festgelegt.

Mit zunehmender Dosiermittelmenge steigt der Entwässerungsindex E_{ST} , weil auf den, in der Flüssigkeit befindlichen Penetrationskörper, immer mehr Kraft wirkt. Aufgrund dessen kommt es zu Verfestigung der von den Partikeln des Klärschlammes gebildeten Flockenstruktur. Die Kompressibilität der Flocke, also der KE_{ST} lässt sich wie folgt beschreiben.

$$KE_{ST} = \frac{1}{(1-\chi)^2} \frac{d\chi}{dp} \quad \dots \text{Glg(16)}$$

X... Flockungshilsmittelkonzentration (Dosierung)

p... Druck auf dem Penetrationskörper

KE_{ST} ... Kompressibilitätsfaktor

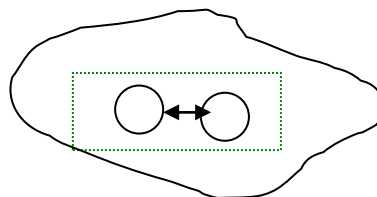
$$F_P = p * A \quad \dots \text{Glg(17)}$$

Aus der Kompressibilität lässt sich die Flockenverdichtung mathematisch beschreiben. Diese ist abhängig von der Viskosität der Flüssigkeit, dem Kompressibilitätsfaktor und dem Druck. Die Flockenverdichtung kann somit durch den Flockenverdichtungskoeffizient definiert werden und lautet somit:

$$KF = \frac{1}{\mu * p * KE_{ST}} \quad \dots \text{Glg(18)}$$

μ ... Viskosität der Flüssigkeit

p... Druck auf dem Penetrationskörper



Schneidet man ein differentielles Stück aus einer Flocke heraus, so kann man das in der nachstehenden Abbildung 68 mittels eines Balkens, wie es in der Mechanik üblich ist, darstellen. Festkörper und Flüssigkeit werden sich anteilmäßig nicht gleich auf den Balken verteilen.



Abbildung 68: Differentielles Flockenstück

Fasst man die Feststoffe und den viskosen Anteil zusammen und ersetzt diese durch eine Ersatzkraft, erhält man die nächste Abbildung 69 und es wirken folgende Kräfte.

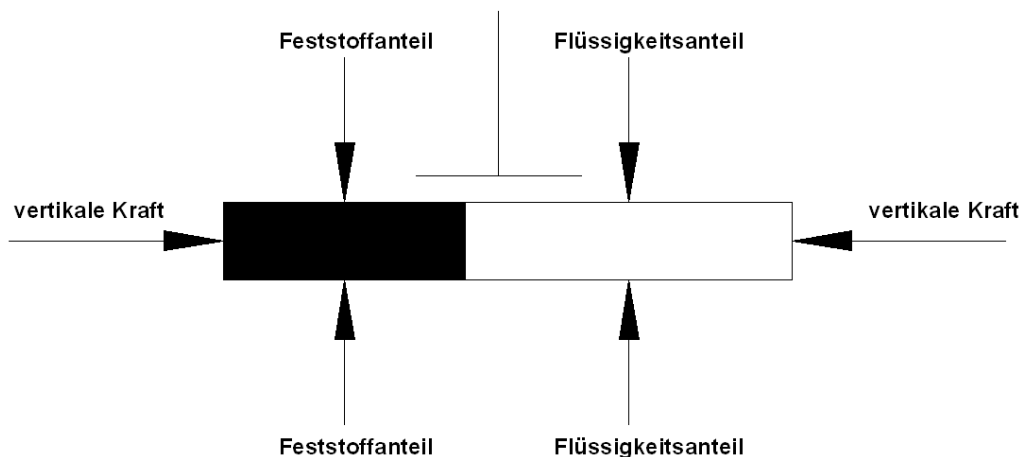


Abbildung 69: Balken zur Darstellung der Ersatzkraft

Dabei stellt die untere Grenze den reinen viskosen Anteil da und die obere Grenze den reinen Feststoffanteil.

Diese Abbildung gibt jedoch keine Auskunft über die Flockenstruktur oder Festigkeit. Durch die Vereinfachung indem wir die zwei Kräftegrößen in Gesamtflächen aufsummieren und jeweils eine Ersatzkraft einführen, geht die Festigkeit verloren. Eine Flocke mit kleineren Abständen mit vielen dazwischen liegenden Feststoffverstreungen ist bekanntlich stabiler als eine Flocke die wenige Verstreungen hat. Aber die Summenfläche könnte die gleiche sein. Daher wird die Summenfläche der Kraft, also die Fläche unter der Penetrationslinie zwischen den Grenzen der Zone 2 und 6 siehe Abbildung 35 mit dem Flockenverdichtungsgrad multipliziert um diese Unterschiede korrigieren zu können.

Damit man den Grad der Verdichtung errechnen kann der letztlich entscheidend dafür ist, eine Aussage über die Dosiermittelmenge zu geben, wird der Flockenverdichtungskoeffizient mit der Fläche der Penetrationskurve multipliziert.

$$GV = KF * \int_2^6 F \dots \text{Glg}(18)$$

GV... Grad der Verdichtung

Die letzte Größe die für die Beschreibung des Messversuches noch ausständig ist, ist die Kraft wenn der Penetrationskörper auf den Boden auftrifft. Diese wird mit folgender Gleichung (19) beschrieben.

$$F_P = \int_6^8 F_B \dots \text{Glg}(19)$$

Die Integral-Grenzen in den mathematischen Gleichungen werden aufgrund der in Abbildung 35: Flockenabdruck eingeteilten Areale festgesetzt.

7 Ergebnisse / Diskussion

Der Koagulationsprozess in mechanischen Entwässerungsprozessen wurde untersucht. Dabei standen Untersuchungen von Kläranlagen mit unterschiedlichen Entwässerungsaggregaten im Vordergrund. Im Rahmen einer erweiterten Messkampagne von sieben Kläranlagen konnte man unter Beweis stellen, dass die neu eingeführte Größe der E_{ST} -Index, eine sinnvolle Größe zur Beschreibung von Entwässerungsqualitäten ist. Ein Messgerät, das ursprünglich für andere Zwecke entwickelt wurde, konnte erfolgreich in diesem Bereich eingesetzt werden. Wie es durch die statistische Auswertung gezeigt werden konnte liegt die Reproduzierbarkeit bei ca. 99 %. Damit kann man sagen, dass einerseits das Messverfahren sprich der Strength- Tester funktioniert. Andererseits wurde die Auswahl der neuen Hardware mit der richtigen Auflösung der Analysenwaage, sowie auch die des Schlittens vom Linearantrieb, richtig gewählt.

Der Einfluss der neu eingeführten Größe des Entwässerungsindex in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wurde erforscht. Dabei konnte man statistisch zeigen, dass dieser Index auf die Dosierkonzentration zurückzuführen ist. Hierbei ist wichtig, dass die Messwerte eine gute Homogenität wie es der BOX- Plot zeigt aufweist. Dies stellt eine gute Basis für die statistischen Auswertungen dar. Es ist anzumerken, dass Unterschiede von Kläranlagen und Aggregaten auch unterschiedliche Indices liefern, die untereinander nicht zu vergleichen sind. Dabei ist eine Normierung durch die Messung der Suspension ohne Additive notwendig, um solche Vergleiche und daraus resultierende Schlüsse ziehen zu können. Der theoretische Ansatz zur Berechnung des E_{ST} –Index über das Kräftegleichgewicht konnte in mehreren Fällen bestätigt werden. Dafür wurden Referenzmessungen mittels alternativer Messsysteme durchgeführt. Diese Betrachtungsweisen bestätigten die Messungen des Strength- Testers. In allen vier alternativen Messungen bekam man das gleiche Resultat des Optimums. Dabei wurde auf Absolutwerte nicht näher eingegangen. Es wurde mehr Augenmerk darauf gerichtet, eine Tendenz feststellen zu können, die bestätigt wurde. Um hier eine konkrete Aussage treffen zu können, ist eine Untersuchung mit größerem Umfang notwendig. Zusammenfassend ist die Hypothese:

„Je mehr Flockungsmittel dem Schlamm beigefügt wird, umso größer ist die Flockenkraft“

bestätigt worden.

Untersuchungen von Koagulationsprozessen in Abhängigkeit der Temperatur konnten die theoretischen Überlegungen weiters bestätigen. Dabei geht die Temperatur in herkömmlichen Messungen, speziell bei der Bestimmung des „Natürlichen Zeta- Potentials“, in den Debye- Hückel- Parameter ein, sowie in die gesamte Reaktionskinetik. Daher muss die Temperatur einen Einfluss auf die Partikelhaftung zwischen Polymer und Feststoff haben. Die Untersuchungen von Suspensionen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Dosierkonzentrationen wurden bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Es war deutlich zu erkennen, dass eine geringere Temperatur einen wesentlich höheren Polymerbedarf zur Erreichen desselben E_{ST} -Index verursacht. Eine Temperaturdifferenz von 10°C bedeutet einen Polymermittelmehrbedarf von ca.30%. Dieser Bedarf ist natürlich von Kläranlage zu Kläranlage unterschiedlich. Weiters geht die Schlammbeschaffenheit nicht mit ein, da sie bei diesen Untersuchungen nicht berücksichtigt wurde. Daher ist eine ausführliche Sensitivitätsanalyse bzw. Studie mit den Parametern Schlammindex und Trockensubstanz des Schlammes in Abhängigkeit der Temperatur zu untersuchen, um hier einen exakteren Polymermittelmehrbedarf eruiieren zu können. Mit den Erkenntnissen von LIU [28] und dieser Arbeit wurde eine gute Alternative zwischen hohen Betriebsmittelkosten im Bereich der Koagulation und den Investitionskosten für die Nachrüstungen im Bereich der Koagulation gefunden. Dabei kann man mit Hilfe von seriellem Einbringen des Polymers in den Flockungsprozess sprich Kaskadenschaltungen die Betriebsmittelkosten in diesen genannten Bereich senken. Ob die Ersparnis nun einen realistischen Wert von 30% annimmt gilt es mit praktischen Versuchen zu untermauern.

In dieser Arbeit wurde nicht nur die unterschiedliche Klärschlammqualität in Hinblick auf die Überschussschlammmentwässerung mit einer neu eingeführten Größe untersucht, sondern auch unterschiedliche Polymere um eine Hilfestellung zur optimalen Polymermitteldosierung zu geben. Wiederum stellt der E_{ST} - Index eine brauchbare Größe dar. Der E_{ST} - Index ist die Summe an Informationen einer Messung. Interpretationen des E_{ST} - Index können alleine oft nicht genügen, daher gab die „Weg- Kraft“ Kurve der einzelnen Messungen genügend Auskunft über die notwendigen Eigenschaften der Flocken die für den Koagulationsprozess nötig sind. Damit konnte eine Auswahl auf ein Polymer, durch die vorher genannten Eigenschaften die die Struktur aufweisen soll, getroffen werden. Im Nachhinein hat sich gezeigt, dass die Auswahl des Polymers mit der Realität übereinstimmte. Zusammenfassend kommt man auf die Schlussfolgerung, dass eine weitere Verfolgung dieses neu eingeführten Parameters durchaus Sinn ergibt. Eine Bewertung von verschiedenen Aggregaten mit dem Index durch eine unabhängige

Stelle ist für den Flockungsmittelhersteller, den Aggregatenhersteller sowie Kläranlagenbetreiber ein großer Mehrwert.

Prinzip bedingt haben die Messungen mit dem Strength- Tester ihre Grenzen. Bei Klärschlamm mit einer hohen Viskosität ist das Penetrationsprinzip eingeschränkt. Mit einem Messprinzip wie z.B. der „JENIKE- Scherzelle“ würde man hier Abhilfe schaffen. Dieses Messprinzip hat den Vorteil, dass man es ohne Probleme in den Anlagenprozess integrieren kann und eine Automatisierung keine großen Herausforderung darstellt. Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass stichfeste Schlämme untersucht werden können, was mit dem Penetrationsprinzip nicht möglich ist.

Aus dieser Arbeit hat sich ein visionäres Konzept entwickelt den Flockungsprozess online zu überwachen. Der entscheidende Unterschied zu den anderen bis dato bestehenden Lösungsansätzen besteht darin, dass nicht nur eine Größe diesen komplexen Vorgang der Flockung als Richtwert bestimmt. Es handelt sich hier um einen multiplen Lösungsansatz der mehreren Regelgrößen mit einbezieht. Aus der Literatur und aus den Erkenntnissen dieser Arbeit können vorerst zwei Regelgrößen die für die Optimierung des Flockungsprozesses hilfreich sein können abgeleitet werden. Dabei stellt der E_{ST} - Index die zentrale übergeordnete Größe dar. Eine weitere Größe ist die Verbandbildung. Durch die Verbandbildung ist eine Charakterisierung des zu entwässernden Klärschlammes möglich. Dabei werden auf Erkenntnisse der Arbeit durch FUCHS, STAUDINGER [73] und weiters die Arbeiten von KOPP, DICHTL [5] zurückgegriffen. Wobei einerseits ausgiebige Untersuchungen zur Ermittlung der Verbandbildung die Sedimentation des Klärschlammes beschreiben und dadurch die Erkenntnis gewonnen werden kann, dass die Sedimentation im Verband Schlamm mit wenig EPS hat. Auf der anderen Seite wird aus der Literatur die Erkenntnis gewonnen, dass die EPS eine hohe negative Ladung besitzt. Dadurch resultiert die Erkenntnis, dass bei der dispersen Sedimentation der Flockungsprozess besser wirkt als bei einer Sedimentation des Klärschlammes im Verband. Die Regelgröße der Ausbeute stellt einen theoretischen Ansatz dar der durch Untersuchungen nicht bewiesen werden konnte. Dabei ist nicht die Theorie als mangelhaft anzusehen sondern mehr die praktische Umsetzung. Die Einsetzung einer Trübungsmessung muss nicht genauer untersucht werden da sie ohnehin etabliert ist und hier als untergeordnete Größe für die Qualitätskontrolle gilt. Dabei ist es durch aus denkbar diese Größe durch andere Messverfahren ersetzt werden kann.

In Zukunft wird das Augenmerk der Forschung vor allem auf der Gewinnung weiterer Datensätze liegen. Endgültige Aussagen über die hier beschriebenen

Lösungsansätze sind nur dann sinnvoll, wenn umfangreiche Daten vorliegen. Dies bedeutet einerseits dieses Messverfahren zu automatisieren und andererseits über einen längeren Zeitraum von mindestens vier bis sechs Monaten an einer Kläranlage im Betrieb zu halten. Da man mit dem neuen Messverfahren noch sehr wenig Erfahrung hat, sind wöchentliche Paralleluntersuchungen mit den bereits angesprochenen Referenzmessungen wünschenswert. Weiters wäre denkbar, die online- Messdaten nicht von der Kläranlage zu beziehen sondern selbstständig gezielte Messtechnik einzusetzen. Bei eigenen Messgeräten ist die Qualität zur Beurteilung von Messergebnissen wesentlich einfacher durchzuführen. Ein weiterer Vorteil liegt darin das selbständige Daten, geliefert werden, da in jeder Anlage dieselbe Größe gemessen wird. Wenn man auf die installierte Messtechnik der bestehenden Kläranlagen zurückgreift sind meistens unterschiedliche Arten und Positionen der installierten Messgeräte vorherrschend. Insbesondere sind dabei Kläranlagen mit parallelen Straßen, mit den dementsprechenden Entwässerungsaggregaten von Interesse. Hier könnte man zwei parallele Aggregate abwechselnd mit dem Strength- Tester untersuchen und Regeleingriffe an einer Straße durchführen, um so Unterschiede und neue Erkenntnisse zu gewinnen. Generell muss ein Ziel weiterer Untersuchungen sein, Kläranlagen zu finden, deren Betriebszustand in einem großen Bereich schwankt. Er sollen unterschiedliche Dosierungen innerhalb einer kürzeren Zeit erprobt werden können. Daraus ableitend soll eine Sinnhaftigkeit der Festlegung eines E_{ST} -Index an einem Entwässerungsaggregat erfolgen. Allerdings scheint es problematisch, derartige Kläranlagen mit dementsprechender Kooperation zu finden.

Schließlich wäre es in einem letzten Schritt möglich, einen wesentlichen wirtschaftlichen Beitrag für die Kommunen zu liefern. Dazu ist allerdings eine fachübergreifende Zusammenarbeit verschiedener Wissensgebiete notwendig sowie die der Politik und Wirtschaft.

8 Zusammenfassung

Es gibt mehrere Arten von Reinigungssystemen. Kläranlagen, die nach dem Prinzip des aeroben Belebungsverfahrens arbeiten, sind die am häufigsten verwendeten Anlagen. Mit dem Messgerät Strength Tester ist es möglich, den Überschussschlamm- Entwässerungsprozess so zu führen, dass Optimierungsmaßnahmen die Betriebsmittelkosten von Kläranlagen erheblich senken. Die im Abwasser enthaltene Biomasse wird am Ende des Verfahrensablaufes einer Kläranlage einer mechanischen Entwässerung unterzogen. Dabei entstehen bei der mechanischen Überschussschlamm-entwässerung und Entwässerung von Klärschlämmen Kosten. Der Großteil dieser Kosten ist auf den notwendigen Chemikalieneinsatz zurückzuführen. Es ist daher verständlich, dass einerseits der Kläranlagebetreiber diesen kostenintensiven Verfahrensschritt optimieren möchte. Andererseits sind Kenntnisse über diesen Prozess auch für Aggregatenhersteller sowie Polymertitelerzeuger von großer Bedeutung. Da sie ihre Angebote kundenspezifischer und individueller gestalten und somit wirtschaftliche Kosten optimieren können. Dabei soll jedoch die Entwässerungsqualität nicht beeinträchtigt werden. Nun steht für die Beurteilung der Entwässerungsqualität eines Klärschlammes und die Optimierung der Dosierkonzentration des Flockungshilfsmittels eine Vielzahl von Labormessgeräten zur Verfügung. Mit diesen ist eine gute Aussage über die Momentsituation der Probenahme zu treffen. Solche Analysen benötigen gut geschultes Fachpersonal und sind sehr zeit- und kostenintensiv. Für den kontinuierlichen Einsatz im Kläranlagenbetrieb mit ständig wechselnder Klärschlammqualität können solche Untersuchungen nur grobe Richtwerte und Anhaltspunkte liefern. In der Praxis wird meistens auf eine visuelle Beurteilung sowie auf jahrelange Erfahrung zurückgegriffen. Selbst diese grobe Überprüfung der Gesamtsituation ist meistens aus personellen oder zeitlichen Gründen nicht möglich. Daher hat es im letzten Jahrzehnt immer mehr Anstrengungen gegeben eine online- Überwachung bzw. eine Steuerung für die Dosierung von Polymermittel zu entwickeln. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten um hier mögliche Lösungsansätze in diesem Bereich aufzuzeigen.

Am Anfang dieser Arbeit wurde die Partikelhaftung beschrieben, um ein einheitliches Verständnis zu gewährleisten. Die wesentliche Erkenntnis die daraus gewonnen wurde ist, dass die wichtigsten Kräfte die in Kolloiden Systemen wirken die Van-der-Waals- Kraft und die elektrostatische Abstoßungskraft sind. Darauf aufbauend wurden die Modelle sowie Theorien der Partikelhaftung vorgestellt. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Grundlagen des Zeta- Potentials, die Basis für das wichtigste Messprinzip in diesem Bereich darstellt und für diese Arbeit

unerlässlich ist. Man konnte aus der Literatur einen wichtigen Punkt für diese Arbeit herausfiltern. Jene Standardgröße zur Definierung von Flockungshilfsmittel in der mechanischen Entwässerung ist keine eindeutig rein definierte physikalische Größe. Weiters sind Aussagen über die Ladungsneutralisation von den zwei Partikelhaftungsmodellen abhängig. Diese beiden Kernerkenntnisse der Theorie weisen eine nicht gerade optimale Voraussetzung für die Aussagen der Dosierung des Flockungshilfsmittels in der mechanischen Entwässerung auf. Zum Schluss des ersten Literaturteils wurde ein Überblick der eingesetzten Chemikalien in der mechanischen Entwässerung gegeben.

Im zweiten Bereich des Literaturteiles wird ein Überblick über die Quantifizierung von FHM nach Stand der Wissenschaft gegeben. Dabei haben sich verschiedene Labormessgeräte im Laufe der Zeit entwickelt. Diese unterschiedlichen Modelle liefern nur bedingt Aussagen über die Entwässerungsqualität von Aggregaten und können oft nicht mit realen Bedingungen verglichen werden. Weiters ist es wichtig zu wissen welche Anwendung sowie Referenzmessungen für die jeweiligen Gegebenheiten angewendet werden sollen. Darüber gibt KOPP [4] einen guten Überblick.

Am Ende des Literaturteils wird zusammenfassend ein Überblick über den Bereich von online- Messungen gegeben. Hier haben sich unterschiedliche Messgeräte entwickelt, die sich jedoch immer auf zwei physikalische Messprinzipien zurückführen lassen. Diese zwei physikalischen Prinzipien sind einerseits die Ladungsneutralisation und andererseits die Partikelgrößenanalyse. Diese beiden Lösungsansätze werden mehr oder weniger in der Praxis eingesetzt. Die Vorteile und Nachteile dieser Lösungsansätze zur Dosierung von Flockungshilfsmittel wurden diskutiert. Dabei wird dem Prinzip der Ladungsneutralisation mehr Bedeutung geschenkt. Zusammenfassend kann man sagen, dass dieses Messverfahren wartungsfreier und nicht aufwendiger ist wie das der Bilderkennung. Ein Nachteil der anzumerken ist, ist dass Verfälschungen bezüglich des Ladungspotentials der Suspension durch Einwirken von Salzen oder der gleichen, auftreten können. Die Bildanalyse ist sehr aufwendig und dadurch auch sehr kostspielig. Die Robustheit dieses Verfahrens ist nicht so gegeben da es sehr viel anfällige Technik wie z.B. Kamera oder Spiegel, in einer doch rauen Umgebung, gibt. Ständige Ausfälle und gut geschultes Personal sind dabei notwendig um diese zu überprüfen. Weiters ist die Korrelation zwischen der abhängigen Größe und unabhängigen Größe nicht gerade sehr befriedigend und unterliegt einer sehr großen Schwankungsbreite. Als Resultat stellen die derzeitigen Ansätze nur indirekte Messgrößen zur Bestimmung der FHM-Dosierung dar.

Die wesentlichen Erkenntnisse die aus dem Literaturteil gewonnen werden konnten und für diese Arbeit unerlässlich waren sind, dass die Eigenschaften des Klärschlammes einen wesentlichen Einfluss auf die Entwässerungsqualität haben. Dabei sind die Einflussgrößen wie die Größe, die Kompaktheit, die Festigkeit und die Beschaffenheit zu nennen. Im Speziellen die Erkenntnis, dass die EPS ein sehr wichtiger Einflussparameter für die Entwässerung darstellt, da sich daraus ein umfangreicher Lösungsansatz zur Regelung der Dosierkonzentration in der mechanischen Entwässerung entwickelte.

Das absolute Kernthema dieser Arbeit war die Einführung einer neuen Größe zur Beschreibung des Flockungsprozesses. Dazu wurde ein Messgerät, das ursprünglich zur Untersuchung der Filterwirkung von Verbandbildungen entwickelt wurde, eingesetzt. Dieses wurde in Hinblick auf die Datenaufnahme und Messzeit erfolgreich adaptiert. Insbesondere wurde das System stabiler und die Messzeit wesentlich verkürzt. Durch die Anwendung des neuen Datenaufnahmesystems ist man nicht mehr auf ein exotisches Betriebssystem angewiesen und kann mit herkömmlichen Rechnern die Steuerung des Messgerätes durchführen. Somit wurde die Benutzerfreundlichkeit eindeutig erhöht und die Datenverwertung erleichtert und verbessert.

Der Einsatz dieses Messgerätes in diesem Bereich gewährleistet, ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Flockenfestigkeit in der mechanischen Entwässerung. Bisher konnte die Stabilität der Flocken nur im Labor mit individuellen Methoden bestimmt werden. Das neu entwickelte Verfahren bringt hier eine Möglichkeit die Flockenfestigkeit weniger aufwändig und schneller zu bestimmen. Somit besteht die Möglichkeit einer Implementierung als online-Messung.

In der mechanischen Überschussschlamm-Entwässerung ist der Koagulationsprozess der durch die Zugabe von Flockungshilfsmittel erreicht wird sehr zentral. Genau an dieser Stelle kommt der neue theoretische Ansatz zu tragen. Durch die neu eingeführte Größe, den E_{ST} -Index, kann der Flockungsprozess im Hinblick auf die Entwässerungsqualität des Klärschlammes beschrieben werden. Dadurch können Aussagen für das nachfolgende Entwässerungsaggregat getroffen werden. Zusammenfassend bringt eine solche Einführung einen Mehrwert für den Kläranlagenbetreiber, Flockungsmittelhersteller und Aggregatenhersteller. Dabei stellte sich heraus, dass sich die Annahmen die in der Theorie getroffen wurden bewahrheitet haben. Diese Annahmen wurden mit praktischen Versuchen sowie statistischen Auswertungen untermauert. Die theoretischen Ansätze wurden mit sieben verschiedenen Klärschlämmen untersucht. Parameter wie Temperatur, TS-

Gehalt wurden in den Untersuchungen mit einbezogen. Weiters wurden bei zwei Untersuchungen, Parameter mit Messgeräten nach Stand der Technik gemessen, um den E_{ST} - Index zu verifizieren. Ein guter Zusammenhang zwischen der abhängigen und der unabhängigen Größe wurde gefunden. Dabei zeigte sich das die Reproduzierbarkeit des E_{ST} - Index bei ca. 99% liegt Endgültige Aussagen sind jedoch erst bei langjährigen und groß angelegten Untersuchungen möglich.

Ein Versuchmodell, das das Entwässerungsaggregat Seihband im Labormaßstab nachstellen sollte führte nicht zum gewünschten Erfolg, da die Trockensubstanz nicht in Abhängigkeit der Dosiermenge gesehen werden konnte.

Aus dieser Arbeit resultiert ein Visionsgedanke der Anregungen für weitere Ambitionen auf diesem Gebiet liefern soll. Dabei wurde ein Regelkreis dargestellt um die Optimierung des Flockungshilfsmittels vornehmen zu können. Der Vorteil dabei ist, dass vier definierte Prozessgrößen den sehr komplexen Wirkungsablauf des Flockungsprozesses optimieren. Derzeit wirkt höchstens eine Steuerungsgröße in diesen Prozess ein.

Diese Arbeit zeigt schwächen und stärken der einzelnen Lösungsansätze und Methoden auf. Die wirtschaftliche Motivation ist es die eine Weiterverfolgung der Erkenntnisse in dieser Arbeit zulässt. Aber letztlich soll hier ein Beitrag zum aktiven Umweltschutz gegeben werden, damit auch unsere Kinder und Kindeskinde in einigen Jahren noch vom blauen Planeten Erde sprechen können.

9 Verzeichnisse

9.1 Literatur

- [1] D.H. Eikelboom; H.J.J. van Buijsen: Handbuch für die Mikroskopische Schlammuntersuchung. 4. Auflage (1999) Verlag F.Hirthammer S.8-25
- [2] F. Hinze; S. Ripperger ; M. Stintz: Praxisrelevante Zetapotentialmessung mit unterschiedlichen Messtechniken. In: Chemie Ingenieur Technik (04 1999) S.338-347
- [3] H. Bennoit, C. Schuster: Einfluss der Schlammeigenschaften auf die Trennverfahren bei der biologischen Abwasserreinigung. Fachhochschule Südwestfalen Hochschule für Technik und Wirtschaft
http://www.fhmeschede.de/public/schuster/pdf/einfluss_der_schlammeigenschaften_auf_die_trennverfahren.pdf Abfrage:05.06.2011
- [4] J.Kopp: Wasserbildung im Schlamm und Konditionierung. MuA Lfg. 9/02
- [5] J.Kopp; N.Dichtl: *Influence of Surface Charge and Exopolysaccharides on the Conditioning Characteristics of Sewage Sludge*. In: H.Hahn; E.Hoffmann; H. Ødeggard (Hrsg.): *Chemical Water and Wastewater Treatment*. Springer (1998) S.285-296
- [6] L.H. Mikkelsen et al.: *Effects of Colloidal Stability of Clarification and dewatering of Activated Sludge*. In: *Water Science Technology*, Vol 34, Nr. 3-4 (1996) S.449-457
- [7] R. Govoreanu; P. Vanrolleghem; F. de Vreese: Partikelmessung in Abwasser. In.: CIT Plus 11 (2007) S.43-45.
- [8] G. Lagaly; O. Schulz; R. Zimehl: *Dispersionen und Emulsionen. -Eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonminerale*. Darmstadt Verlag Steinkopff (1997) S.17- 86.
- [9] H. Schubert: Grundlagen der Partikelhaftung. Ringvorlesung im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 366 der Universität Karlsruhe, SS 2006.
- [10] J.N. Israelachvili: *Intermolecular and surface forces*. Academic Press, London, San Diego (1985), S 1 - 418.
- [11] H.Hahn: *Der Koagulationsprozeß*. In: Fachgruppe Wasserchemie (Hrsg.) *Vom Wasser- Ein Jahrbuch für Wasserchemie und Wasserreinigungstechnik*. Weinheim: Verlag Chemie (1967) S.172-192
- [12] W. Stahl: Abschlußbericht zum AIF Forschungsvorhaben 11501 N. Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität Karlsruhe. Karlsruhe 2000
- [13] U.Kleine: Der Einfluss der Flockenbildungsbeanspruchung auf die Festigkeit und das Sedimentationsverhalten von Flocken bei der Zentrifugalbeschleunigung. Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität Karlsruhe. Karlsruhe 1992 S.10-11
- [14] EP 1 373 145 B1
http://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=main&content=einsteige_r&action=treffer Abfrage:04.07.2011

- [15] <http://de.wikipedia.org/wiki/Kolloid> Abfrage: 05.07.2011
- [16] <http://www.lenntech.de/wasser-lexikon.htm> Abfrage:07.01.2011
- [17] H. Schubert: Grundlagen der Agglomerierens. In: Chemie Ingenieur Technik (51 1979) Nr.4 S.266-277.
<http://ftubhan.tugraz.at/han/9287/onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.330510404/pdf>
Abfrage:05.07.2011
- [18] H. Rumpf.: Die Wissenschaft des Agglomerierens. In: Chemie Ingenieur Technik (46 1974) Nr.1 S.1-46.
<http://ftubhan.tugraz.at/han/9287/onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.330460102/pdf>
- [19] H. Rumpf.: Grundlagen und Methoden des Granulierens. In Chemie Ingenieur Technik (30 1958) Nr.3 S.144-158.
<http://ftubhan.tugraz.at/han/9287/onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.330300307/pdf>
Abfrage:05.07.2011
- [20] G.Karp: Molekulare Zellbiologie. 1. deutsche Auflage Springer Verlag (2005) S 237-247.
- [21] N.A. Campbell, J.B. Reece: Biologie. 8.Auflage Heidelberg (2009) S.37-303.
- [22] <http://www.jbc.org/content/196/2/853.full.pdf> Abfrage:13.01.2011
- [23] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1198933/pdf/bj3900529.pdf>
Abfrage:13.01.2011
- [24] Nach Vorlesung Meisl (2004).
- [25] G.Fuchs: Allgemeine Mikrobiologie. Stuttgart, New York: Thieme. (2007) S.202-203.
- [26] ParticleMetrix
http://www.particlemetrix.de/fileadmin/pdf_technologien/Signifikanz_Ladungspotential_07.pdf
Abfrage:05.07.2011
- [27] Präsentation Kreuzinger Institut für Wassergüte Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:DNedElx_4l4J:kan.at/Kontext/Web+Service/SecureFileAccess.aspx%3Ffileguid%3D%257Bb5b0d479-40e9-4140-9a52-c40afe9a045a%257D+flockungshilfsmittelKreuzinger&cd=1&hl=de&ct=clnk&gl=at&client=firefox-a&source=www.google.at
Abfrage:05.07.2011
- [28] D.O.Krentz: Untersuchung des Flockungsverhaltens von Polyelektrolyten an technischen Trüben und Modellsuspensionen. Dissertation Hamburg 2001
- [29] H. Helmholtz.: *Studien über elektrischen Grenzschichten*. In: Annalen der Physik (1879) 7, Weinheim. Wiley-VCH Verlag,2006 S. 337-382.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.v243:7/issuetoc> Abfrage:04.05.2011
- [30] R.H. Müller.: Zetapotential und Partikelladung in der Laborpraxis: Einführung in die Theorie, praktische Meßdurchführung, Dateninterpretation. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1996, S 17-80.

- [31] H.I. Heitner.: Flocculating Agents, In Kirk-Othmar, Encyclopedia of Chemical Technology, 4th Ed., Vol 11, Wiley, New York 1994, 61
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471238961.0612150308050920.a01.pub2/abstract> Abfrage: 02.05.2011
- [32] R.Heusch, K.Reizlein.: *Disperse systems and Dispersants*. In.: W. Foerst (Hrsg.) Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol A8, VCH, Weinheim (1988), S 577-601
http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a08_577/pdf Abfrage:04.05.2011
- [33] G.Lagaly.: *Colloids*. In.: W. Foerst (Hrsg.) Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. A7, VCH, Weinheim (1986), S 341-367
http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a07_341.pub2/full Abfrage:04.05.2011
- [34] M.A.Cohen-Stuart.: *Wetting Hydrodynamics*. In: Journal of Physics. France (1988) 49, 1001-1008.
- [35] G.J. Fleer.: Polyelectrolyte Brushes and Polyelectrolyte Adsorption Layers. In: Berichte der Bunsengesellschaft Phys. Chem. (1996) 100, 936-942.
- [36] V. Chaplain, M.L. Janex, F. Lafuna, C. Graillat, R. Audebert: *Coupling between polymer adsorption and colloidal particle aggregation*. In: Colloid Polym. Sci. 273 (1995) Darmstadt: Steinkopff Verlag, S 984-993.
- [37] A. Silberberg.: *The Adsorption of Flexible Macromolecules. Part I the isolated macromolecule at a plane Interface*. In: Journal of Physical Chemistry. (1962) 66, S1872-1833.
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/j100816a023> Abfrage:04.05.2011
- [38] L. Dupont, A.Foissy, R.Mercier, B.Mottet.: Effect of Calcium Ions on the Adsorption of Polyacrylic Acid onto Alumina. In: Journal of Colloid and Interface Science (1993) 161, S 455-464.
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WHR-45K192N-3W&_user=464374&_coverDate=11%2F01%2F1999&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1740291361&_rerunOrigin=google&_acct=C000022118&_version=1&_urlVersion=0&_userid=464374&_md5=710ebf54992285fa8035e3f796a69322&searchtype=a Abfrage:04.05.2011
- [39] R.H. Smelie, V.K. La Mer.: *Flocculation, Subsidence and Filtration of Phosphate slimes VI. A Quantitative theory of filtration of flocculated suspensions*. In: Journal of Colloid Science (1958) 23, S 589-599.
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B759F-4CXCW5M-13J&_user=464374&_coverDate=04%2F30%2F1964&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_acct=C000022118&_version=1&_urlVersion=0&_userid=464374&_md5=bce52c714bdc2b3bd8ec7ee85f7ce360&searchtype=a Abfrage:04.05.2011
- [40] C.Schuster, J. Kötzt, W.Jaeger, W.M.Kulicke.: *Wechselwirkung zwischen Klärschlammteilchen und Polyelektrolyten*. In: Chemie Ingenieur Technik (1996) 68 (8), S 980-984.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.330680819/abstract> Abfrage:04.05.2011
- [41] C.Schuster, J. Kötzt, S.Parker, N.Böhm, W.M.Kulicke, W.Jaeger.: *Das Entwässerungsverhalten von Klärschlamm in Gegenwart von Polyelektrolyten*. In: Acta hydrochimica et hydrobiologica. (1997) 25 (1), S 27-33.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ahch.19970250105/pdf> Abfrage:04.05.2011

- [42] D.H.Napper.: *Polymeric Stabilization of Colloidal Dispersions*. In: Colloid science Academic Press, London (1983) S 414-424.
http://openlibrary.org/books/OL3192359M/Polymeric_stabilization_of_colloidal_dispersions
Abfrage:04.05.2011
- [43] H.Van Olphen.: *Clay Colloid Chemistry*. Wiley Publication (1963) S 2-259.
- [44] A.Fuchs, E. Killermann.: Adsorption of polyelectrolytes on colloidal latex particles, electrostatic interactions and stability behaviour, *Colloid Polymer Science*. (2001) 279, S 53-60.
- [45] S.Akari, W. Schrepp, D.Horn: *Imaging of Single Polyethylenimine Polymers Adsorbed on Negatively Charged Latex Spheres by Chemical Force Microscopy*. In: *Langmuir-The ACS Journal of Surfaces and Colloids* 12 (1996) 4, S 857-860.
<http://pubs.acs.org/doi/pdfplus/10.1021/la9507545>
Abfrage:07.07.2011
- [46] O.Stern.: *Zur Theorie der elektrolytischen Doppelschicht*. In: *Zeitschrift für Elektrochemie*, (1997) 30, S 508-516.
- [47] E.J.W. Verwey.: *Theory of Stability of Lyophobic Colloids*. In: *Journal of Physical Chemistry*, Amsterdam (1947), 51 (3) S 631-636.
<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/j150453a001> Abfrage:04.05.2011
- [48] R.H. Müller, R. Schuhmann.: *Teilchengrößenmessung in der Laborpraxis*, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart (1996), S 31- 42.
- [49] DVGW Regelwerk W217 Flockung in der Wasseraufbereitung Teil1: Grundlagen. (1987). S 1-24.
- [50] DVGW Regelwerk W218. Flockung in der Wasseraufbereitung Teil2: Flockungstestverfahren. (1998). S 1-30.
- [51] Ch. Schröder, H. Klotzbücher, O. Schläfer, M. Sievers.: *Entwicklung eines photooptischen Sensors zur Optimierung der mechanischen Entwässerung von Klärschlamm*. In: *Chemie Ingenieur Technik* (1998) 10 (9) S.1157-1158.
- [52] M. Nagel, P. Ay.: *Verbesserung der Entwässerungseigenschaften von Schlämmen durch den gezielten Aufbau von Flockenstruktur auf der Basis detaillierter morphologischer Analysen*. In: *GVC Abwasser-Kongress* (1999), Kongresszentrum Bremen, VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Band 2, S887-891.
- [53] DE 43 21 822 A1
http://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=main&content=einsteige_r&action=treffer Abfrage:04.05.2011
- [54] A. Hemme, R. Polte, P. Ay.: *Pelletierungsflockung – Die Alternative zur herkömmlichen Schlammkonditionierung*. In: *Aufbereitungs- Technik* (1995) 35 (5) S 226-235.
- [55] F. Zartarian, C. Mustin, G. Villemin, T. Ait-Ettager, A. Thill, J.Y. Bottereo, J.L. Mallet D. Snidaro.: *Three- Dimensional Modeling of an Activated Sludge Floc*. In: *Langmuir* (1997) 13 (1), S 35-40.
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/la960566u> Abfrage:04.05.2011

- [56] M. Nagel, P. Ay.: *Characterization of Floc Structure Using Cluster Analysis*. In: Particle and Particle System Characterization (1999) 16, S229-237.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/%28SICI%291521-4117%28199910%2916:5%3C229::AID-PPSC229%3E3.0.CO;2-E/pdf> Abfrage:04.05.2011
- [57] J. Bacher, A. Pöge, K. Wenzig: Clusteranalyse- Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren. Oldenbourg Verlag München (2010), S 1-499.
- [58] US 5 037 559 A
http://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=main&content=einsteige_r&action=treffer Abfrage: 04.05.2011
- [59] DE 37 43 428 A1
http://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=main&content=einsteige_r&action=treffer Abfrage: 04.05.2011
- [60] R. Krumwiede.: *Sparen beim Konditionieren- Regelkreis senkt den Betriebsmittelbedarf bei der Schlammwässerung*. In: Chemie Technik, 25. Jahrgang (1996) 3
http://www.mpt-rodgau.de/pdf/veroeffentlichungen/sparen_beim_konditionieren.pdf
Abfrage:04.05.2011
- [61] AUTOR UNBEKANNT.: *Flockungshilfsmitteldosierung- Steuerung an kontinuierlich arbeitenden Entwässerungsmaschinen*. In: CAV Sonderdruck 5/93 S 31-38
<http://www.mpt-rodgau.de/pdf/veroeffentlichungen/flockungshilfsmitteldosierung.pdf>
Abfrage:04.05.2011
- [62] W.-M Kulicke: Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen . Basl, Heidelberg, New York: Hüthing & Wepf Verlag (1986), S 192-195
- [63] D.J Shaw: (1980) Introduction to colloid and surface chemistry. Fourth Edition. Butterworth – Heinemann (1992), S 1-286.
- [64] H.C. Hamaker.: *The London- Van der Waals attraction between spherical particles*. In: Physica IV, (1937) S 1058-1072.
http://perc.ufl.edu/courses/intephen02/ files/hand_01_hamaker.pdf Abfrage:04.05.2011
- [65] J. Mahanty, B.W Ninham.: *Dispersion force*. In: Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie. (1976) 81 (8) Academic Press, London, S775.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbpc.19770810816/abstract>
Abfrage:04.05.2011
- [66] D.B. Hough D.B., L.R. White.: *The calculation of Hamaker constants from Lifshitz theory with applications to wetting phenomena*. In: Advances in Colloid and Interface Science, (1980) 14, S 3-41.
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V5F-43N1M6R-1X&_user=464374&_coverDate=12%2F31%2F1980&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1740369485&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000022118&_version=1&_urlVersion=0&_userid=464374&_md5=5ba32dad44c2279094e49742c7165b5a&_searchtype=a Abfrage:04.05.2011
- [67] Gregory J.: *Approximate expressions for retarded van der Waals interaction*. In: Journal of Colloid Interface Science. 83 (1981), S 138-145.
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WHR-4CV7W5S-8X&_user=464374&_coverDate=09%2F30%2F1981&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1740369485&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000022118&_version=1&_urlVersion=0&_userid=464374&_md5=5ba32dad44c2279094e49742c7165b5a&_searchtype=a

origin=gateway&sort=d&docanchor=&view=c&searchStrId=1740370812&rerunOrigin=scholar.google&acct=C000022118&version=1&urlVersion=0&userid=464374&md5=3b18eeb359372cbf1c71b684c10f76f0&searchtype=a

[68] J.N. Israelachvili, G.E. Adams.: *Measurement of forces between two mica surfaces in aqueous electrolyte solutions in the range 0-100 nm*. In: J.Chem. Soc. Faraday Trans. I, 74 (1978), S 975-1001.

<http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/1978/f1/f19787400975> Abfrage:04.05.2011

[69] Pashley R.M.: *Hydration forces between mica surfaces in aqueous electrolyte solutions*. In: Journal of Colloid and Interface Science. 80 (1981), S 153-162.

<http://www.sciencedirect.com/science?ob=ArticleURL&udi=B6WHR-4CV93V0-N&user=464374&coverDate=03%2F31%2F1981&rdoc=1&fmt=high&orig=gateway&origin=gateway&sort=d&docanchor=&view=c&searchStrId=1740384130&rerunOrigin=google&acct=C000022118&version=1&urlVersion=0&userid=464374&md5=164086170a9ee2978969f85b03286a3f&searchtype=a> Abfrage:04.05.2011

[70] Pashley R.M.: *DLVO and hydration forces between mica surfaces in Li+, Na+, K+, and Cs+ electrolyte solutions: A correlation of double-layer and hydration forces with surface cation exchange properties*. In: Journal of Colloid and Interface Science. 83 (1981), S 531-546.

<http://www.sciencedirect.com/science?ob=ArticleURL&udi=B6WHR-4CX706D-T4&user=464374&coverDate=10%2F31%2F1981&rdoc=1&fmt=high&orig=gateway&origin=gateway&sort=d&docanchor=&view=c&searchStrId=1740390510&rerunOrigin=scholar.google&acct=C000022118&version=1&urlVersion=0&userid=464374&md5=0ec1eea9d44b614bd762c67ff1640ba3&searchtype=a> Abfrage:04.05.2011

[71] G. Peschel, P. Belouschek, M.M. Müller, M.R. Müller, R. König: *The interaction of solid surfaces in aqueous systems*. Colloid Polymer Science. 260 (1982), S 444-451.

[72] M.E.Planner: *Analytische Betrachtung der Separationseigenschaften von Belebtschlamm in mehreren biologischen Kläranlagen*. Diplomarbeit TU- Graz (2006).

[73] A. Fuchs: *Untersuchungen der zeitlichen Veränderung der Feststoffkonzentration im Überstand sich absetzender, biologischer Schlämme*. Dissertation TU-Graz (1999).

[74] W.M. Kulicke, S. Lenk, H.D. Detzner, Th. Weiß: *Anwendung von Polyelektrolyten bei der mechanischen Fest/Flüssig-Trennung*. In: Chemie Ingenieure Technik (1993) 65 (5), S541-552.

[75] W.M. Kulicke, R. Budirahardjo, M. Prescher: *Optimierung der mechanischen Fest/Flüssig-Trennung durch gezielten Einsatz makromolekularer Flockungsmittel*. In: Chemie Ingenieure Technik (1989) 61 (10), S828-829.

[76] W. Pusch: *Agglomeration mit polymeren Flockungsmitteln- Untersuchungen zur Größe und Porosität von Agglomeraten in wässrigen Suspensionen*. VDI- Verlag GmbH Düsseldorf (1982), S4-20.

[77] S. Strugholtz: *Neuronale Netze als Grundlage für die Analyse und Optimierung von Flockungsprozessen in der Praxis der Trinkwasseraufbereitung*. Eigenverlag Mühlheim an der Ruhr (2009), S166-167.

Weiterführende Literatur

- E. Soom: Einführung in die mathematische Statistik und die Wahrscheinlichkeitsrechnung. Verlag Hallwag, Bern und Stuttgart (1970).
- E. Soom: Varianzanalyse, Regressionsanalyse und Korrelationsrechnung. Verlag Hallwag, Bern und Stuttgart (1970).
- J.Groß: Grundlegende Statistik mit R. Vieweg+Teubner Verlag (2010).
- D. Rasch, L.R. Verdooren, J.I.Gowers: Planung und Auswertung von Versuchen und Erhebungen. R.Oldenbourg Verlag München Wien (2007).
- S.Schach, Th. Schäfer: Regressions- und Varianzanalyse- Eine Einführung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1978).
- D. Jenkins, M.G.Richard, G.T.Daigger: Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming and other solids separation problems. IWA CRC Press LLC Florida (2003).
- H.Kainz, P.Kauch: Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft. MANZ Verlag Wien (2007).
- (Hrg) Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen. JVA Mannheim (1998).
- W. Höpcke: Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung. Walter de Gryter Berlin New York (1980).
- W. Geiger: Qualitätslehre. Vieweg Braunschweig/Wiesbaden (1998).
- J.F. Faraway: Linear Models with R. CRC Press Florida (2005).
- W. Mendenhall, T. Sincich: Statistics for the engineering and computer sciences. Collier macmillan publishers London (1988).

5.39.2 Tabellen

Tabelle 1: E_{ST} Tabelle Kläranlage Graz	89
Tabelle 2: E_{ST} - Index Kläranlagen.....	90
Tabelle 3: Polymere- Kläranlage	90
Tabelle 4: mittlere Abweichung.....	110
Tabelle 5: mittlerer Fehler aus den Messwerten ARA Graz	110
Tabelle 6: Bestimmtheitsmaß EST	114
Tabelle 7: Bestimmtheitsmaß TS.....	114

9.3 Abbildungen

Abbildung 1: Abstoßungskräfte.....	13
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Energie/Abstandskurve [30].....	16
Abbildung 3: Elektrochemisches Doppelschichtmodell [30]	19
Abbildung 4: Zetapotential als Funktion der Partikelgeschwindigkeit [28]	23
Abbildung 5: Oberflächenladungen [28].....	26
Abbildung 6: Biologischer Ablauf [24]	28
Abbildung 7: Konformationsänderung [20].....	30
Abbildung 8: Konformationsänderung eines Polymerknäuels [30]	32
Abbildung 9: Schematische Darstellung Flockung [27]	35
Abbildung 10: Schematische Darstellung Koagulation [36].....	36
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Haftungsmodelle [28].....	37
Abbildung 12: Modellvorstellung "Entstabilisierung und Aggregation mit Makromolekülen [49]	37
Abbildung 13: Schematische Darstellung adsorbierter langkettige Makromoleküle [76].....	38
Abbildung 14: Schematische Darstellung der sterischen Stabilisierung	40
Abbildung 15; Partikelgrößenmessung mittels Laseranalyse [7]	52
Abbildung 16: Bildanalyse einer Belebtschlammflocke [7]	52
Abbildung 17: Polymerermittlung nach Kopp [4]	55
Abbildung 18: Flockungshilfsmitteldosierung nach KRUMWIEDE [61].....	59
Abbildung 19: Auswertung Flockungshilfsmitteldosierung nach Krumiende [60]	60
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Systemgrenzen.....	65
Abbildung 21: Kräftegleichgewicht Tisch	66
Abbildung 22: Kräftegleichgewicht Flocke	67
Abbildung 23: Flockenkraft Vektorendarstellung.....	68
Abbildung 24: Flockenkompression	69
Abbildung 25: Vorstudie Flockenkraft-Dosierkonzentration.....	70
Abbildung 26: Schematische Darstellung Funktion Strength- Tester	71
Abbildung 27: Darstellung des Strength- Tester	72
Abbildung 28: Penetration in Wasser.....	73

Abbildung 29: Kräfteverlauf Klarwasser	74
Abbildung 30: Penetration in geflocktem Klärschlamm	74
Abbildung 31: Gewichtsabnahmekurve Strength- Tester	75
Abbildung 32: Gewichtsabnahmekurve Strength- Tester	76
Abbildung 33: Normierung der Kräfte	77
Abbildung 34: Grundkräftekurven	78
Abbildung 35: Flockenabdruck	78
Abbildung 36: Entwässerungsindex [28]	81
Abbildung 37: Entwässerungsindex ST	82
Abbildung 38: EST- Aggregateneinteilung	83
Abbildung 39: Flockulator	85
Abbildung 40: Gewichtsabnahme Waage	86
Abbildung 41: Normierung Flockenkraft	87
Abbildung 42: Entwässerungsindex EST	88
Abbildung 43: Entwässerungsindex EST 300%	88
Abbildung 44: Korrelation EST-Dosierkonzentration	89
Abbildung 45: Kläranlage 1	91
Abbildung 46: Kläranlage 2	92
Abbildung 47: EST- Temperatur	94
Abbildung 48: EST- Dosierkonzentration	95
Abbildung 49: EST-Dosierkonzentration hoher Auflösung	96
Abbildung 50: SWW- Modell	97
Abbildung 51: Flockengröße	98
Abbildung 52: Durchgang- Rückstand Diagramm	99
Abbildung 53: Viskositätskurve	100
Abbildung 54: Zeta- Potentialmessung	101
Abbildung 55: EST- Dosierkonzentration	102
Abbildung 56: Zeta- Potentialmessung -Dosierkonzentration	102
Abbildung 57: Viskositätsdiagramm	103
Abbildung 58: Rückstand- Durchgang	104
Abbildung 59: Kläranlagen Korrelation	105

Abbildung 60: Tagesgang.....	107
Abbildung 61: Tagesgänge.....	108
Abbildung 62: Abweichung.....	109
Abbildung 63: Mittlerer Fehler vom Strength- Tester	111
Abbildung 64: Scatterplot	112
Abbildung 65: Residuenplot.....	113
Abbildung 66: Kaskadenschaltung	116
Abbildung 67: Regelkreis Flockungsprozess	119
Abbildung 68: Differentielles Flockenstück	122
Abbildung 69: Balken zur Darstellung der Ersatzkraft.....	122

Anhang

Gerät	Firma	Messprinzip	Spezifizierung	Vol.-Konzentration
Zeta-Meter 3.0	Zeta-Meter Inc.	Mikroelektrophorese	Runder Kanal mit Mikroskop, Kamera (optional)	< 0.1
PenKem 501	PenKem	Mikroelektrophorese	Rechteckiger Quarzkanal mit Mikroskop, automatische Bilderfassung (optional)	< 0.1
MKII	Rank Brothers	Mikroelektrophorese	Zwei Zellen – runder Kanal und flache Küvette- mit wahlweise horizontal/vertikaler Mikroskoppositionierung	< 0.1
ZetaSizer	Malvern	Mikroelektrophorese	Runder Quarzkanal (Küvette optional) mit Laserdoppeltechnik	< 0.5
BI ZetaPlus	Brookhaven	Mikroelektrophorese	Küvette mit Laserdoppeltechnik, Partikelgröße kann ebenfalls ermittelt werden	< 0.5
Zetaphoremeter	Sephy	Mikroelektrophorese	Rechteckiger Quarzkanal mit Mikroskop, automatischer Bilderfassung (optional)	< 0.1
Delsa 440	Coulter Electronics	Mikroelektrophorese	Halbzylindrischer Elektroden, Kapillare mit Laserdopplertechnik (Mehrwinkeltechnik)	< 0.5
EKA	Anton Paar	Strömungspotential	Messung an durchströmten Pulver- Propfen die Partikelgröße darf 30 µm nicht unterschreiten, Einsatz: Oberflächencharakterisierung	Packung
DT 200	Dispersion Technology	CVP	CVP- Messung bei 2 MHz, Gerät DT 1200 ist mit einem Schallspektrometer gekoppelt, mit dem die Partikelgröße erfasst wird.	ca. 0.5-50
Acousto Sizer	Colloidal Dynamics	ESA	ESA-Messung über ein Spektrum 0.5-16 MHz, gleichzeitige Ermittlung der Partikelgröße (Nachfolger des ESA 8000)	ca. 0.5-50
PCD-03	Mütek	PCD- Signal	undefiniertes Signal zur Relativmessung	< ca. 5

Tabelle 1 Anhang: Messgeräte für die Schlammkonditionierung

Kennwerte	Einheit	Bestimmung	Erläuterung/Bewertung
A. Basisgrößen			
Trockenrückstand (TR)	%	DEV-S2	Quantitative Bezugs- und Basisgröße
Glühverlust (GV)	%	DEV-S2	Charakteristischer Kennwert, beeinflusst sowohl die Dichte als auch die Wasserbindung des Schlammes
Überschussschlammanteil (φ)	-	Aus Betriebsdaten	Quantitativer Kennwert, der die Schlammszusammensetzung beschreibt
Partikelgrößenverteilung (PGV)	-	z.B. Laserscanner	Dokumentiert partikuläre Klärschlammeigenschaften, Ergebnisse sehr stark abhängig vom verwendeten Messgerät, daher nur qualitative Aussagen möglich
Partikelfeinanteil	%	s.o.	Charakteristischer, aber qualitativer Kennwert, aus der PGV abgeleitet
Freier Wasseranteil TR(A)	%	Thermogravimetrie	Quantitativer Kennwert, da nur der freie Wasseranteil bei einer maschinellen Entwässerung abgetrennt werden kann, TR(A) kennzeichnet den TR nach Entfernen des freien Wassers, messtechnisch und zeitlich sehr aufwendig
Gebundenes Wasser	%	Dilatometer	Quantitativer Kennwert, der das Zellinen- und Oberflächenwasser summarisch erfasst, messtechnisch einfach aber fehlerbehaftet
B. Klärschlammkonditionierung			
Zetapotential (Zp)	mV	Elektrophorese	Maß für die elektrostatische Abstoßungskräfte der Partikeloberflächen, wird für die Bestimmung des Polymerbedarfs eingesetzt, messtechnisch aufwendig
Strömungspotential	mV	Strömungsinduziertes Potential	Maß für die elektrostatischen Abstoßungskräfte der Partikeloberflächen, wird für die Bestimmung des Polymerbedarfs eingesetzt, auch On- line einsetzbar
Relative Oberflächenladung	%	Ladungstitration	Charakteristischer, aber qualitativer Kennwert, der den Polymerbedarf bestimmt, messtechnisch Aufwendig

Polymerbedarf	g/kg	Versuchsreihen	Quantitativer Kennwert, Ermittlung in Versuchsreihen
EPS-Gehalt	mg/kg	Extraktion mit Ionenaustauscher, Detektion nach Antron	Charakteristischer, quantitativer Kennwert, der die Oberflächenladung, Wasserbindung und rheologischen Eigenschaften bestimmt, messtechnisch sehr aufwendig
Viskosität	mPA s	Rotationsviskosimeter	Charakteristischer Kennwert, der Pumpfähigkeit und Entwässerungsverhalten beeinflusst, kann auch zur Ermittlung des Polymerbedarfs eingesetzt werden
C. Kennwerte für die Zentrifugation			
Laborentwässerung Laborschleuderaustrag	TR _{Sed} [%]	Becherglaszentrifuge	Qualitativer Kennwert zur groben Abschätzung der Entwässerbarkeit
Dichte (ρ)	g/m ³	z.B. Pyknometer	Quantitativer Kennwert, der die Sedimentationsgeschwindigkeit beschreibt, Partikeldichte messtechnisch schwer zu erfassen, wird vereinfachend durch den Glühverlust ersetzt
Abscheidegrad (AG)	%	Quantifizierung der Feststoffe	Quantitativer Kennwert zur Beurteilung der Qualität der Fest- Flüssig-Trennung
D. Kennwerte für die Filtration			
Spez. Filtrationswiderstand ($r \cdot 10^{-12}$)	m/kg	nach ATV [1]	Quantitatives Maß für die Entwässerbarkeit in Filterpressen, messtechnisch und zeitlich aufwendig
Kompressibilität (s)	-	nach ATV [1]	Qualitativer Kennwert, der die Kompressibilität des Filterkuchens beschreibt
Kapillare Fließzeit (CST)	s	nach ATV [1]	Einfacher Test, der die Wasserabgabegeschwindigkeit misst, geeignet um Veränderungen der Schlammeigenschaft zu dokumentieren

Tabelle 2 Anhang: Kenngrößen für die Polymermittelbestimmung nach KOPP

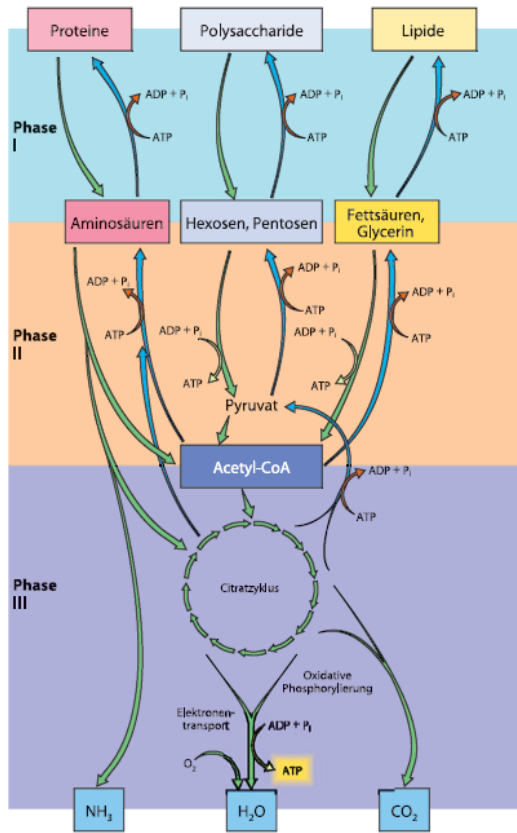


Abbildung 1 Anhang: Biologischer Ablauf

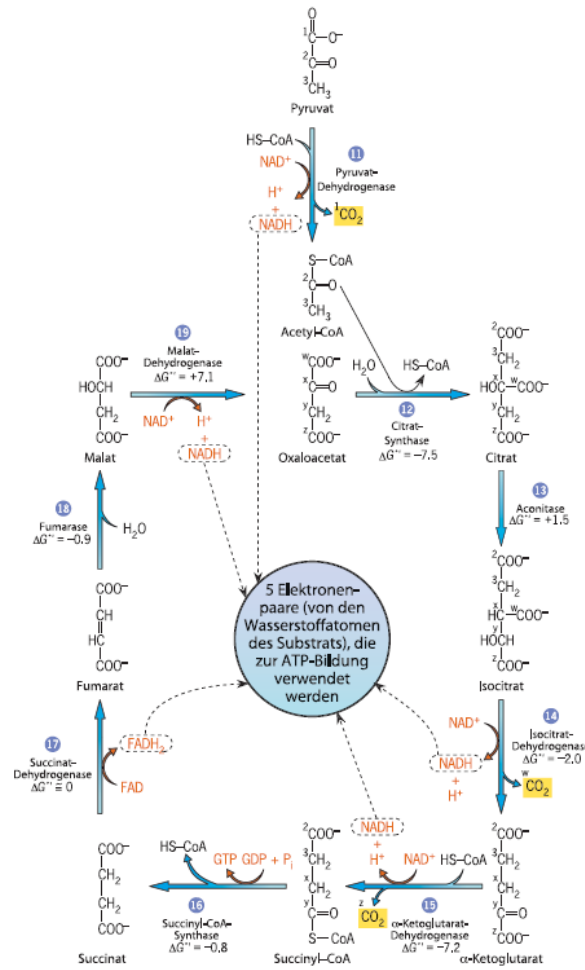


Abbildung 2 Anhang: Krebs- Zyklus

■ **Tabelle 5.1.** Standardredoxpotenziale ausgewählter Teilreaktionen

Reaktion an der Elektrode	E_0 (V)
$\text{Succinat} + \text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \alpha\text{-Ketoglutarat} + \text{H}_2\text{O}$	-0,670
$\text{Acetat} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Acetaldehyd}$	-0,580
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	-0,421
$\alpha\text{-Ketoglutarat} + \text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Isocitrat}$	-0,380
$\text{Cystin} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2 \text{Cystein}$	-0,340
$\text{NAD}^+ + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{NADH} + \text{H}^+$	-0,320
$\text{NADP}^+ + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{NADPH} + \text{H}^+$	-0,324
$\text{Acetaldehyd} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ethanol}$	-0,197
$\text{Pyruvat} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Lactat}$	-0,185
$\text{Oxalacetat} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Malat}$	-0,166
$\text{FAD} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{FADH}_2$ (in Flavoproteinen)	+0,031
$\text{Fumarat} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Succinat}$	+0,031
$\text{Ubichinon} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ubichinol}$	+0,045
$2 \text{Cytochrom } b_{(\text{ox})} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2 \text{Cytochrom } b_{(\text{red})}$	+0,070
$2 \text{Cytochrom } c_{(\text{ox})} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2 \text{Cytochrom } c_{(\text{red})}$	+0,254
$2 \text{Cytochrom } a_{(\text{ox})} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2 \text{Cytochrom } a_{(\text{red})}$	+0,385
$1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$	+0,816

Tabelle 3 Anhang: Redoxpotenziale