



Masterstudiengang
Chemie- und Umweltingenieurwesen

Masterarbeit

Optimierung der maschinellen Schlammwässerung auf dem Klärwerk Leipzig-Rosental

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Titels
Master of Engineering (M. Eng.)

eingereicht von: Annika Fichtner

Praxisbetrieb:
Kommunale Wasserwerke Leipzig GmbH

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Heinz

Betrieblicher Betreuer:
Dipl.-Ing. Peter Wirth

Leipzig, 24. September 2019

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Begriffsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
2 Klärwerk Leipzig-Rosental	2
3 Theoretische Grundlagen zur Schlamm entwässerung	7
3.1 Klärschlamm	7
3.1.1 Flüssigkeitsbindungsarten	7
3.1.2 Klärschlammzusammensetzung KW Leipzig-Rosental.....	8
3.1.3 Schlamm entwässerungseigenschaften	8
3.2 Verfahren zur Schlammwasserabtrennung.....	9
3.2.1 Allgemeine Grundlagen	9
3.2.2 Eindickverfahren	11
3.2.3 Natürliche Entwässerung.....	13
3.2.4 Maschinelle Entwässerung.....	13
4 Vollmantelschnecken zentrifuge	18
4.1 Grundlagen zur Vollmantelschnecken zentrifuge	18
4.2 Maschinenspezifische Steuerung und deren Abhängigkeit auf die Entwässerung	19
4.3 Zentrifugen im Klärwerk Rosental.....	22
5 Klärschlamm konditionierung	26
5.1 Allgemeine Grundlagen	26
5.2 Organische Konditionierungsmittel	26
5.3 Beeinflussungsfaktoren des organischen FHM s und deren Einsatz.....	28

5.4	Aufbereitungsanlage KW Leipzig-Rosental	30
6	Untersuchungen	33
6.1	Untersuchungen des Schlammes durch externen Berater	33
6.1.1	Allgemeine Grundlagen	33
6.1.2	Analyse der Schlammeigenschaften.....	34
6.1.3	Fazit.....	41
6.2	Untersuchungen zur maschinenspezifischen Zentrifugeneinstellung	41
6.2.1	Allgemeine Grundlagen	41
6.2.2	Versuchsdurchführung	41
6.2.3	Fazit.....	60
6.3	Untersuchungen zu Flockungshilfsmitteln.....	62
6.3.1	Laborversuch zur Ermittlung der Reifezeit.....	62
6.3.2	Laborversuche zur Ermittlung von verbesserten Flockungshilfsmitteln.....	64
6.3.3	Erprobung verschiedener Flockungshilfsmittel an der Vollmantelschneckenzentrifuge	68
6.4	Untersuchungen zu Reglereinstellungen	72
6.4.1	Ist-Zustand der Regelung	72
6.4.2	Anpassung der Hysterese und des PID-Reglers	74
6.4.3	Fazit.....	76
7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	78
8	Zusammenfassung und Ausblick	80
	Anlagen	82
	Eidesstattliche Erklärung	103
	Literaturverzeichnis	104

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1: Übersicht KW Leipzig-Rosental [nach punctum Fotografie Bertram Kober 2015]	2
Abbildung 2: Prozesse der Abwasserbehandlung KW Leipzig-Rosental [nach Anger 2015].....	3
Abbildung 3: Prozess der Schlammbehandlung [nach Wirth 2018]	5
Abbildung 4: Übersicht Schlammabtrennung [nach DWA-M 366 2018].....	10
Abbildung 5: Konzentrations- und Druckverlauf der statischen Eindickung [nach Leschber 1996]	12
Abbildung 6: Funktionsprinzip Kammerfilterpresse(oben) Membranfilterpresse (unten) [nach DWA-M 366 2013].....	15
Abbildung 7: Batchbetrieb Schlauchfilterpresse [nach Herbert 2016].....	16
Abbildung 8: Funktionsprinzip einer Schneckenpresse [nach DWA-M 366 2013].....	17
Abbildung 9: Aufbau und Funktionsweise eines Dekanters [nach DWA M 366 2013]	18
Abbildung 10: Flüssigkeitsniveauradius R mit Flüssigkeitsauslauföffnung (1) & Wehrscheibe (2) [nach Kolb 2017]	22
Abbildung 11: Alfa Laval Zentrifuge [nach Alfa Laval 2013]	23
Abbildung 12: Flachkonusausführung (oben), Steilkonusausführung (unten) [nach Alfa Laval 2013].....	23
Abbildung 13: Stauscheibe [nach Kolb 2017] (links), Stauscheibe und Aufgabekammer/Einlaufzone (rechts)	24
Abbildung 14: Power Plates [nach Technische Beschreibung Zentrifuge, Alfa Laval].....	24
Abbildung 15: Prinzip der „Power Plates“ [nach Alfa Laval, 2013] (links), Power Plates an der Zentrifuge (rechts)	25
Abbildung 16: Prinzip Slim Line Design [nach Technische Beschreibung, Alfa Laval].....	25
Abbildung 17: Vorgang der Reife eines FHM's [nach DWA M 350 2014]	28
Abbildung 18: Theoretischer Verlauf Viskosität und elektrische Leitfähigkeit [nach DWA-M 350 2014]	29
Abbildung 19: FHM-Anlage 2 (links) & FHM-Anlage 1 (rechts) mit jeweils zwei Kammern	30
Abbildung 20: Aufbereitungsschema Pendelbetrieb mit einer Pumpe an einer FHM-Anlage	31

Abbildung 21:Aufbereitungsschema der Verbundfahrweise der beiden FHM-Anlagen	32
Abbildung 22:Einfluss von ausgewählten Schlammkennwerten KW Rosental.....	33
Abbildung 23:Jahreszeitlich abhängiger Glühverlust KW Rosental.....	34
Abbildung 24:Mikroskopisches Bild EPS [nach Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert, 2019].....	36
Abbildung 25:Chloridkonzentration KW Rosental	37
Abbildung 26:CST-Messgerät [nach HeGo-BIOTEC 2019]	38
Abbildung 27:CST- Messvorrichtung	39
Abbildung 28:Aufgenommene CST-Werte 2019.....	39
Abbildung 29:ÜSS-Anteil KW Rosental.....	40
Abbildung 30:Versuchsreihe Trommeldrehzahl	43
Abbildung 31:Versuchsreihe Drehmoment	45
Abbildung 32:Zwei „Power Plates“ der Zentrifuge (links) Wehrdurchmesserskala an einem „Power Plates“ (rechts).....	47
Abbildung 33:Versuchsreihe Wehrdurchmesser	48
Abbildung 34:Verlauf der Betriebsparameter 17.04.2019; Wehrdurchmesser -13 mm (grüner Umriss:) & -4 mm (blauer Umriss); Drehmoment 12 kNm (grauer Umriss).....	49
Abbildung 35:Wehrdurchmesseranalyse über einen größeren Zeitraum ohne Berücksichtigung der eingestellten Zentrifugeneinstellungen	50
Abbildung 36:Versuchsreihe Dosiermenge FHM	52
Abbildung 37:Zentrifugalbelastung bei 7 kgWS/t TR (links) und 8 kgWS/t TR (rechts).....	53
Abbildung 38:Versuchsreihe Faulschlamm-Volumenstrom	55
Abbildung 39:Zusammenhang FS-Volumenstrom und Drehmoment.....	56
Abbildung 40:Versuchsreihe FHM-Konzentration	57
Abbildung 41:Flockenbildungstest links: keine Flockenbildung rechts: Flockenbildung durch zusätzliche Dosierung von FHM.....	59
Abbildung 42:Versuchsaufbau [nach Keßler 2011]	62
Abbildung 43:Ergebnis der elektrischen Leitfähigkeitsmessung	63
Abbildung 44:Versuchsaufbau Abtropftest [nach DWA M 383, 2018].....	66
Abbildung 45:Ergebnisse des Abtropfversuchs [nach Laboringenieur Kuntze 2019]	66
Abbildung 46: FHM-Versuch an der Zentrifuge	70
Abbildung 47:Reglereinstellung.....	73

Abbildung 48: Trend der Zentrifuge am 23.05.2019; Drehmoment (rot), Differenzdrehzahl (blau)	74
Abbildung 49: Verlauf der Ist-Zustände an der Zentrifuge 2	75
Abbildung 50: Zentrifugenverlauf nach der PID-Einstellung an der Zentrifuge 2	76
Abbildung 51: Drehmomentversuch August	77
Abbildung 52: Überblick der Gesamtkosten in Abhängigkeit vom Drehmoment	79

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Schlammkennwerte	9
Tabelle 2: Gesamtergebnis des Versuchs Zentrifugenparameter	60
Tabelle 3: Erprobte FHM	68
Tabelle 4: Durchschnittliche Parametereinstellungen Zentrifuge 1 und 2	69
Tabelle 5: Grundlagen der Kostenberechnung	78

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
BHKW	Blockheizkraftwerk
CST	kapillare Fließgeschwindigkeit
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EPS	extrazelluläre polymere Substanzen
FHM	Flockungshilfsmittel
FS	Faulschlamm
GR	Glührückstand
GV	Glühverlust
KW	Klärwerk
MSE	maschinelle Schlammentwässerung
oTS	organische Trockensubstanz
PS	Primärschlamm
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
ÜSS	Überschussschlamm
WS	Wirksubstanz

Begriffsverzeichnis

aerob:	Prozesse, die elementaren molekularen Sauerstoff benötigen
anaerob:	Prozesse, die keinen elementaren molekularen Sauerstoff benötigen
Repetiereinheit (KRE):	kleinste sich wiederholende Einheit innerhalb eines Polymers
Rohschlamm:	Schlamm der bestehend aus ÜSS und PS für den Faulungsprozess zur Verfügung steht
Trockenrückstands- gehalt TR in %:	Verhältnis der Trockenmasse zur Gesamtmasse durch Abdampfen aus der nicht filtrierten Probe
Trockensubstanzgehalt TS in %:	Nach Filtration und Abdampfung verbleibendes Verhältnis der der Trockenmasse zur Gesamtmasse
Zentrat:	flüssige Phase, die bei Suspensionstrennung entsteht

1 Einleitung

Zentrifugen befinden sich nicht nur in Laboren oder großtechnischen Anlagen, sondern finden ihre Anwendung auch im alltäglichen Leben. Die bekanntesten Geräte, welche nach dem Prinzip der Zentrifuge arbeiten, sind der Wäschetrockner und die Salat- oder Honigschleuder. All diese Geräte nutzen die sogenannte Zentrifugalkraft, um flüssige von festen Stoffen zu trennen. In der Industrie sind Zentrifugen ebenfalls weit verbreitet. Sie helfen dabei, Stoffgemische mit einer festen und einer flüssigen Phase voneinander zu trennen, damit diese anschließend besser weiterverarbeitet werden können.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Zentrifugen des Klärwerks Rosental, welche dazu verwendet werden, den festen Klärschlamm zu entwässern. Die maschinelle Schlammentwässerung (MSE) nimmt im Klärwerk Leipzig-Rosental neben der Abwasserreinigung einen festen Platz bei den technologischen Verfahren ein. Der durch die Abwasserreinigungsstufen anfallende Schlamm wird in den Faulbehältern behandelt und nachfolgend durch Zentrifugen entwässert. Um die Klärschlamm Entsorgungskosten zu senken, wird eine Optimierung der Entwässerungsleistung angestrebt. Durch maschinenspezifische Einstellungen besteht Verbesserungspotential in Hinblick auf die Entwässerbarkeit. Auch der Einfluss von schlamm-spezifischen Eigenschaften und die Flockungshilfsmittelart und -aufbereitung stellen einen wichtigen Optimierungsaspekt dar. Die Einflussfaktoren zur Entwässerung des Schlammes werden in dieser Arbeit anhand verschiedener Versuchsreihen untersucht. Die Ergebnisse dienen der Optimierung des täglichen Anlagenbetriebs und werden unter wirtschaftlichen und technischen Merkmalen ausgewertet.

2 Klärwerk Leipzig-Rosental

Das Klärwerk (KW) Leipzig-Rosental befindet sich an einem geografisch günstigen Tiefpunkt im Nordwesten Leipzigs und wurde 1894 in Betrieb genommen. Durch das in Leipzig vorhandene Mischkanalisationssystem mit 2.900 km Kanalnetzlänge fließt das Abwasser im freien Gefälle zum Klärwerk. Das KW Rosental ist mit 550.000 EW das größte Klärwerk in Leipzig. Es werden täglich ca. 110.000 m³ Abwasser gereinigt. Wird die Kapazität des KWs z. B. durch Starkregenereignisse überschritten, sorgt die Kanalnetzsteuerung durch das Zwischenspeichern des Abwassers in zwei Steuerbauwerke für Betriebsentlastung. Erst zum späteren Zeitpunkt wird dann das Abwasser ins KW eingeleitet. Nach der Abwasserbehandlung verlässt das Abwasser das KW durch das Gewässer „Neue Luppe“.



Abbildung 1: Übersicht KW Leipzig-Rosental [nach punctum Fotografie Bertram Kober 2015]

Um einen genauen Überblick der Reinigungsverfahren im KW Rosental zu erlangen, dient die nachfolgende Darstellung.

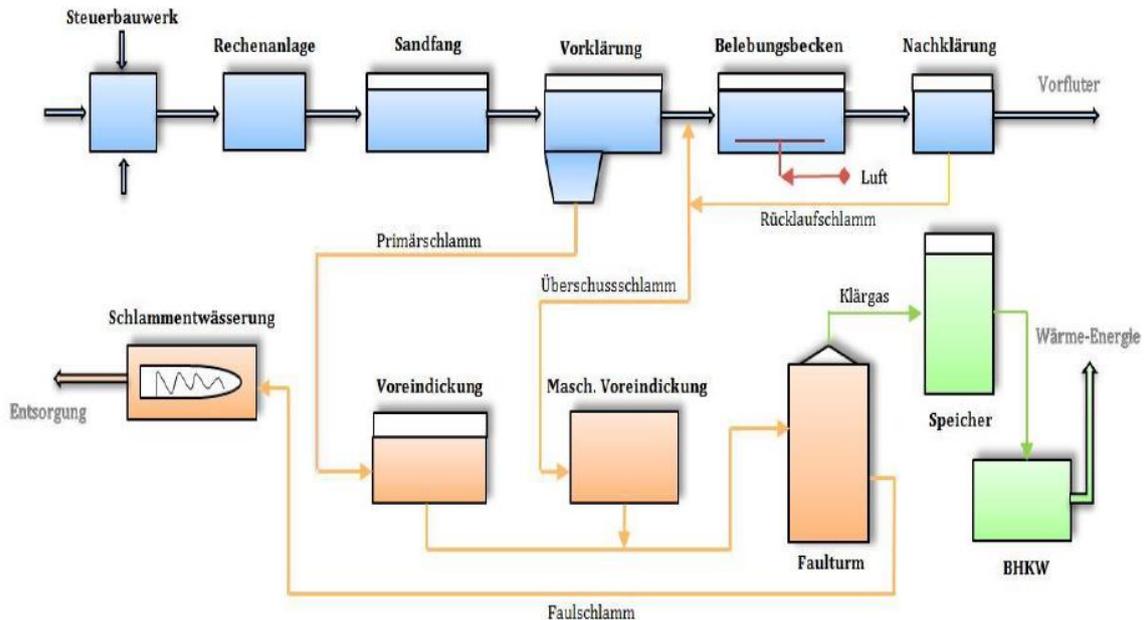


Abbildung 2: Prozesse der Abwasserbehandlung KW Leipzig-Rosental [nach Anger 2015]

Mechanische Vorreinigung

Durch verschiedene Abscheide- und Sedimentationsprozesse werden bei der mechanischen Abwasserreinigung Feststoffe im Abwasser entfernt. Dazu gehören absetzbare Stoffe wie Fäkalien, Hygieneartikel oder Papierreste.

Zuerst gelangt das Abwasser in die Rechenanlage. In dieser werden Feststoffe durch einen Filterbandrechen mit 8 mm Lochgröße zurückgehalten. Das Rechengut wird durch eine Rechengutwaschpresse gewaschen und gepresst. Daraufhin wird das Rechengut in einen Container befördert und für die Kompostierung abgeholt. Nachdem das Abwasser die Rechenanlage passiert hat, werden durch einen unbelüfteten Langsandfang absetzbare mineralische Feststoffe abgetrennt. Die Strömungsgeschwindigkeit von maximal 0,3 m/s führt zu einer optimalen Absetzbarkeit dieser Feststoffe. Der Sand wird durch Sandsaugwagen entfernt, durch einen Pilgerschritt- und Schneckenklassierer abgetrennt und abtransportiert. Der Sandfang vermeidet Verschleiß und Verstopfung der Betriebsanlagen. Das Abwasser wird anschließend durch Schneckenhebewerke ca. 3,5 Meter gehoben. Dadurch fließt das Abwasser im freien Gefälle durch die sechs Vorklärbecken. Diese verfügen jeweils über eine Länge von 70 Meter und eine Breite von 10 Meter. Es handelt sich hierbei um Absetzbecken für ungelöste Feststoffe. Der dadurch

entstehende Primärschlamm (PS) wird mit Hilfe der Pumpstation in die stationären Eindicker gepumpt und mit einem TR-Gehalt von 3,5 % bis 4,0 % in den Vorlagebehälter der Faulung transportiert. Das Abwasser fließt zum Zwischenhebewerk. Die Wassermengen werden dabei auf das Niveau der Belebungsbecken gebracht.

Biologische und chemische Abwasserreinigung

Durch die mechanische Vorreinigung sind im Abwasser nur noch gelöste Stoffe vorhanden. Bei der biologischen Abwasserreinigung wird das Abwasser durch Mikroorganismen gereinigt. In den vier Belebungsbecken, bestehend aus belüfteten (aeroben) und unbelüfteten (anaeroben) Kaskaden, erfolgen durch Mikroorganismen der Kohlenstoffabbau, die Nitrifikation und Denitrifikation. Bei der Nitrifikation werden durch autotrophe Mikroorganismen Ammonium über Nitrit zu Nitrat oxidiert. Durch die Denitrifikation wird das Nitrat mit Hilfe von heterotrophen Mikroorganismen zu elementarem Stickstoff umgewandelt. Durch den jeweiligen Wechsel von aerobem und anaerobem Milieu können die Mikroorganismen gezielt Phosphat eliminieren. Ist die biologische Phosphateliminierung unzureichend, kommt die chemische Abwasserreinigung zum Einsatz. Durch Zugabe von Eisen-(III)-chloridlösung wird das Phosphat ausgefällt. Das Belebtschlammabwassergemisch wird in die Nachklärbecken gefördert.

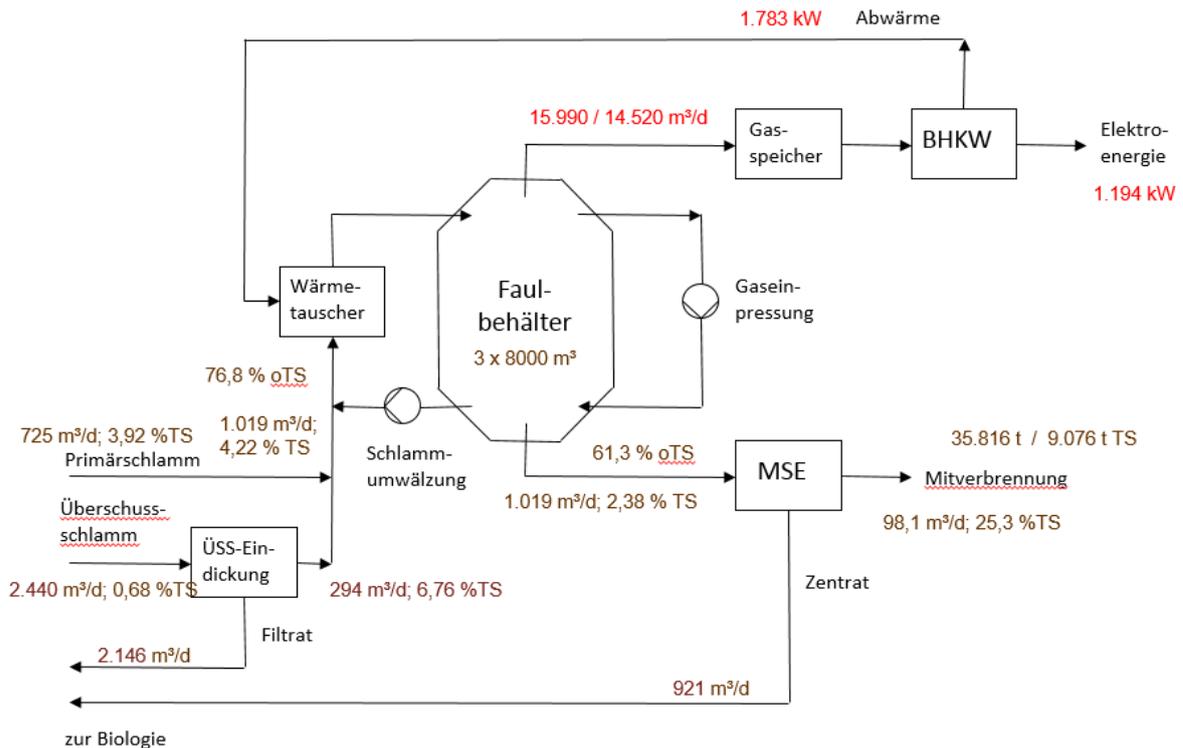
Nachklärung

Im Nachklärbecken wird das gereinigte Abwasser vom Belebtschlamm getrennt. In den acht Nachklärbecken setzen sich die Belebtschlammflocken ab. Der abgesetzte Schlamm wird in die ersten Kaskaden der Belebungsbecken zurückgefördert. Der andere Teil des Rücklaufschlammes wird als Überschussschlamm (ÜSS) zur Schlammbehandlung gefördert. Das gereinigte Wasser verlässt durch das Gewässer „Neue Luppe“ das KW Leipzig-Rosental.

Schlammbehandlung

Die Entwässerung des anfallenden PSs und ÜSSs findet in der Schlammbehandlung statt. Diese besteht auf dem KW Rosental aus Schlammeindickungs- und Entwässerungsmaschinen, drei Faulbehältern, zwei Gasbehältern und vier Blockheizkraftwerke (BHKW).

Nachfolgend werden die Schlammbehandlungsverfahren grafisch dargestellt.



zur Biologie
Abbildung 3: Prozess der Schlammbehandlung [nach Wirth 2018]

Der TR-Gehalt des anfallenden ÜSSs wird durch Siebbandeindicker von 0,68 % TR auf ca. 6,67 % TR entwässert. Das Filtrat wird daraufhin in die Belebungsbecken rückgeführt. Der ÜSS und PS werden in einem Vorlagebehälter gefördert, durch einen Wärmeübertrager auf 37 °C erwärmt und dann in die drei parallel geschalteten Faulbehälter mit je einem Fassungsvermögen von 8.000 m³ transportiert. 2018 wurden durchschnittlich 1.019 m³/d Schlamm in die jeweiligen Faulbehälter beschickt. Eine ausreichende Durchmischung wird durch die Gaseinpressung und das Umwälzleitungssystem des Faulschlammes erzielt. Die Gaseinpressung wird durch zwölf Gaslanzen realisiert. Die Verweilzeit im Faulbehälter beträgt etwa 25 Tage. Dabei werden rund 61,3 % oTS abgebaut.

In den Faulbehältern wurden 2018 14.520 m³/d Faulgas mit ca. 62 % Methan und ca. 38 % Kohlendioxid im Tagesdurchschnitt produziert. Zur Reinigung des Faulgases wird das Methangas über einen Kiesfilter, Gastrockner und Aktivkohlefilter gefördert und in zwei Gasbehältern gespeichert. Das Faulgas wird in den vier BHKW verwertet, um thermische und elektrische Energie für den Klärwerkbetrieb zu verwenden. Die BHKW verfügen über eine elektrische Leistung von 345 kW und können bis zu 60 % des Energiebedarfs vom KW decken. Die Wärmeenergie wird für die Wärmeübertrager am Faulbehälter, zur Beheizung der Büroräume und zur Warmwasserversorgung genutzt.

Der Faulschlamm im Faulbehälter mit einem durchschnittlichen TR-Gehalt von 2,38 % wird durch Verdrängung in einen Vorlagebehälter und von dort aus zur MSE gefördert. In der MSE wird über ein Mazerator (Zerkleinerer) und Exenterschneckenpumpen der Faulschlamm in die drei Zentrifugen gefördert. Je nach Schlammaufkommen werden bis zu drei Zentrifugen in Betrieb genommen. Dort wird der Schlamm auf 25 % TR bis 26 % TR unter Zugabe von Flockungshilfsmitteln (FHM) entwässert. Dafür stehen zwei FHM-Anlagen mit jeweils vier Ansetzkammern zur Verfügung. Ist die Reifezeit des FHMs in der jeweiligen Kammer erreicht, wird dieses FHM in die Zentrifuge gepumpt. Nach der Zentrifuge wird der entwässerte Schlamm in das Dickschlammsilo gelagert, bis er für die Schlammverbrennung abtransportiert wird. Die flüssige Phase (Zentrat) wird über eine Vorlage zur Prozesswasserbehandlung/Deammonifikationsanlage gefördert. Die Deammonifikation senkt mit Hilfe von Planctomyceten die im Zentrat vorhandene große Ammoniumfracht, bevor es in die biologische Behandlung gefördert wird. Bei der Deammonifikation wird die Hälfte des Ammoniums zu Nitrit oxidiert und die andere Hälfte des Ammoniums zu elementarem Stickstoff umgewandelt [EssDe GmbH, 2019]. Dadurch wird die Leistungsfähigkeit der biologischen Behandlung gesichert. Für die separate Behandlung in der Deammonifikationsanlage wird im Vergleich zum klassischen Verfahren nur noch 60 % der Energie benötigt, da Sauerstoff gespart wird. Außerdem wird auf eine zusätzliche Kohlenstoffquelle verzichtet.

3 Theoretische Grundlagen zur Schlammentwässerung

3.1 Klärschlamm

3.1.1 Flüssigkeitsbindungsarten

Um den Vorgang der Entwässerung besser betrachten zu können, ist es notwendig, die Bedeutung der Klärschlammeigenschaften näher zu analysieren, von denen sie abhängt. Klärschlamm ist eine Suspension bestehend aus Wasser sowie einem anorganischen und organischen Feststoffen. Das in der Suspension vorliegende Wasser unterscheidet sich durch die verschiedenen Bindungskräfte an dem Schlammpartikel und kommt im Schlamm entweder als freies Wasser oder gebundenes Wasser vor. Das freie Wasser kann durch Eindickung und MSE von den Schlammpartikeln entfernt werden und besitzt den größeren Mengenanteil gegenüber gebundenem Wasser. Mit Hilfe von Konditionierungsmitteln (Flockungshilfsmitteln) wird die Wasserabgabegeschwindigkeit beschleunigt. Durch Versäuerung, Alkalisierung, Hydrolyse oder Desintegration ist es möglich, den Anteil des freien Wassers zu steigern. Das gebundene Wasser unterteilt sich in:

- „Zwischenraumwasser, das durch Kapillarkräfte zwischen Klärschlammpartikeln oder in Flocken gebunden ist,
- Oberflächenwasser, das durch Adhäsionskräfte gebunden ist,
- in Hydrogelsystemen gebundenes Wasser,
- Zellinnenwasser, das in Zellen enthalten ist bzw. Zellflüssigkeit oder inneres Kapillarwasser ist,
- chemisch gebundenes Wasser, das auch als Kristallwasser (Hydratwasser) bezeichnet wird.“ [DWA-M 383 2018, S. 6]

Das gebundene Wasser wird nur durch thermische Verfahren abgetrennt. Der Anteil des in Hydrogelsystemen gebundenen Wassers wird durch die Abwasserzusammensetzung, Hydrolyse, Schlammstabilisierung und die Art der Phosphatelimination beeinflusst. Zur Gruppe der Hydrogele gehören auch die extrazellulären polymeren Substanzen (EPS). EPS bestehen aus Protein- und Kohlenhydratverbindungen, werden durch Bakterien produziert und dienen als Nährstoffspeicher, Schutzhülle und Biofilmbildungsfläche. Dabei bilden EPS eine hochmolekulare Struktur aus, die bis zu 90 % Wasser binden kann. Dadurch ist eine mechanische Abtrennung des Wassers nicht möglich [DWA-M 383, 2018].

3.1.2 Klärschlammzusammensetzung KW Leipzig-Rosental

Die Klärschlammzusammensetzung wird durch saisonale Schwankungen, Eigenschaften des zu reinigenden Abwassers, Kanalkonstruktionseigenschaften sowie durch die verfahrenstechnischen Einstellungen auf dem KW beeinflusst. Die saisonalen Schwankungen kennzeichnen sich durch die jahreszeitlichen Temperaturunterschiede sowie die Niederschlagsmengen. Es wird aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen Sommer- und Winterschlamm unterschieden. Außerdem wird im Sommer im KW die Viskosität des Schlammes verringert, was zur Verbesserung der Entwässerung führt. Auf dem KW Leipzig-Rosental besteht der Faulschlamm aus ÜSS und PS. Der PS enthält deutlich mehr strukturierte Stoffe und besitzt dadurch eine gute Entwässerbarkeit mit wenig Verbrauch von FHM. Im Gegensatz dazu ist der ÜSS homogen und besitzt wenige Strukturmaterialien. Er zeichnet sich durch seine hohe Bakterienmasse, hohe Kompressibilität, Viskosität und hohen EPS-Gehalt aus. Dadurch ist die Entwässerbarkeit geringer. Demzufolge ist das Verhältnis ÜSS/PS ein wichtiger Aspekt bei der Optimierung der Klärschlamm-Entwässerung. Deshalb sollte der ÜSS verfahrenstechnisch so gering wie möglich gehalten werden. Beispielsweise ist eine ausreichende Aufenthaltszeit in der Vorklärung wichtig. Außerdem ist das Schlammalter des ÜSS auf bis zu 30 Tage zu begrenzen, um die erforderliche Größe der Schlammflocken zu erhalten. Auf dem KW Leipzig-Rosental befindet sich das Schlammalter immer unter 30 Tage.

Der ÜSS-Anteil gehört zu den Schlammkennwerten, die die Entwässerbarkeit beeinflussen und regelmäßig überwacht werden müssen. Weitere Kennwerte werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

3.1.3 Schlamm-Entwässerungseigenschaften

Die Entwässerungsfähigkeit des Klärschlammes wird durch die Abwasserzusammensetzung, die Verfahrenstechnik der Abwasserreinigung und die Klärschlammbehandlung beeinflusst. Die daraus entstehenden Entwässerungseigenschaften werden durch verschiedene Schlammkennwerte charakterisiert, die regelmäßig im Zu- und Ablauf der Entwässerungsmaschine untersucht werden sollten. Die Schlammkennwerte werden durch die Basiskennwerte und die weitergehenden Kennwerte gekennzeichnet. Basiskennwerte sind durch regelmäßige Kontrollen zu bewerten, während weitergehende Kennwerte durch einen höheren

labortechnischen Aufwand zu untersuchen sind. Nachfolgend werden beide Kennwerte tabellarisch dargestellt.

Tabelle 1: Schlammkennwerte

Basiskennwerte	weitergehende Kennwerte
Trockenrückstand	Sandanteil
Glühverlust	Proteine, Polysaccharide, EPS-Gehalt
Glührückstand	Kationenverhältnis
pH-Wert	Ammonium-Stickstoff
elektrische Leitfähigkeit	lipophile Stoffe, Fettgehalt
Temperatur	organische Säuren
ortho-Phosphat im Faulschlamm	Redoxpotential
ÜSS-Anteil des Rohschlamm	Säurekapazität
Co-Substratanteil	Basenkapazität
mikroskopisches Bild (Fädigkeit)	Partikelgrößenverteilung
Schlammindex des belebten Schlamm	kapillare Fließzeit CST
Konditionierungsmittel der Entwässerungsmaschine	spez. Filtrationswiderstand
Abscheidegrad	Kompressibilität

Die verschiedenen Kennwerte und deren Bedeutung werden in der **Anlage 1** erläutert. Zusätzlich werden im **Kapitel 6.1** die Untersuchungen des Faulschlamm im KW Leipzig-Rosental ausgewertet, um Rückschlüsse auf die Entwässerbarkeit zu ziehen.

3.2 Verfahren zur Schlammwasserabtrennung

3.2.1 Allgemeine Grundlagen

Das Ziel der Schlammmentwässerung ist die Kostensenkung durch maximale Schlammabwassertrennung. Allgemein besitzen Klärschlamme hohe Wassergehalte aufgrund des hohen Wasserbindevermögens. Durch verschiedene Schlammfaktoren entstehen maschinenspezifische Herausforderungen bei der Schlammwasserabtrennung. Es wird beim mechanischen Verfahren zwischen Eindickung, Entwässerung und Trocknung unterschieden. Die Volumenveränderungen der Schlammwasserabtrennungsarten werden in der folgenden Abbildung dargestellt.

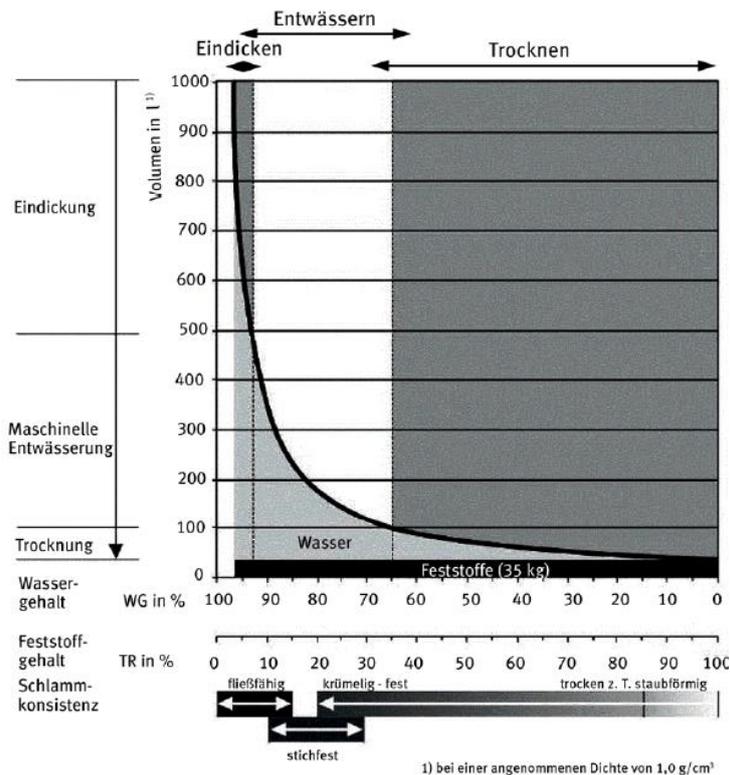


Abbildung 4: Übersicht Schlammbabtrennung [nach DWA-M 366 2018]

Durch die Eindickung sind TR-Gehalte von 3 % bis 6 % TR möglich. Bei der MSE können TR-Gehalte von bis zu 35 % erreicht werden. Durch Schlamm-trocknung sind höhere TR-Gehalte erreichbar. Aus kostentechnischen Gründen werden Schlämme meist maschinell behandelt, selten getrocknet, sondern eher verbrannt, da die brennbaren Bestandteile in Form von Energie direkt genutzt werden können [Leschber, 1996]. Die MSE unterscheidet sich durch filtrierende Entwässerungsmaschinen (Bandfilterpressen, Kammerfilterpressen) mit einem Abscheidegrad von etwa 100 % und Zentrifugen mit einem Abscheidegrad von ca. 98 %. Der Abscheidegrad ist ein Kennwert der Schlammwasserabtrennung. Er wird nach folgender Formel definiert:

$$\eta_{TS} = \frac{(TR_{zu} - TR_{rück}) \cdot TR_{aus}}{(TR_{aus} - TR_{rück}) \cdot TR_{zu}} \cdot 100(\%) \quad [1]$$

η_{TS} [%] Feststoff – Abscheidegrad

TR_{zu} [%] Trockenrückstand im zugeführten Schlamm

TR_{aus} [%] Trockenrückstand im ausgetragenen entwässerten Schlamm

$TR_{rück}$ [%] Trockenrückstand im rückgeführten Zentrat

Der Abscheidegrad beschreibt das Verhältnis der Austragsfeststofffracht zur Eintragsfeststofffracht. Dieser wird durch die Menge des gebundenen Wassers, die Bindungsintensität, die Partikelgrößenverteilung, den organischen TR und die gelartigen Stoffe beeinflusst. Diese sind jeweils von der Abwasserzusammensetzung und den Reinigungsstufen des KWs abhängig [ATV-VKS-Fachausschuss 3.2, 1987, 1987]. Durch eine im Jahr 2003 durchgeführte Studie der DWA zur Klärschlammssituation in Deutschland wurden 3.100 Kläranlagenbetreiber nach deren Klärschlammmentwässerungsverfahren befragt. Demnach werden Zentrifugen und Kammerfilterpressen auf größeren Anlagen eingesetzt. Bei kleineren Kläranlagen wird die Schlammmentwässerung hauptsächlich durch Bandfilterpressen oder externe Unternehmen realisiert [DWA-M 366, 2013].

3.2.2 Eindickverfahren

Statische Eindickung

Die Abtrennung des Schlammwassers, die Reduzierung des Schlammvolumens und die Konzentrierung der Feststoffe werden vor allem durch statische Eindickung realisiert. Werden Schlämme in einen Eindicker gefördert, entstehen unterschiedliche Zonen. Im oberen Bereich findet das freie Absetzen von Schlammflocken in der Wasserzone statt. Durch die Schwerkraft der Schlammflocke nimmt deren Konzentrierung und der TR-Gehalt zu. Das Absetzverhalten wird dadurch behindert. Später wird es durch die zunehmende Konzentrierung, Steigerung des Kompressionsdrucks und Bildung einer Schlammsschicht ersetzt. Der Kompressionsdruck der Schlammpartikel steigt solange, bis sich ein Gleichgewicht zum Porenwasserdruck des Zwischenwassers einstellt. Dabei findet keine Verdichtung der Schlammflocken statt. Grund dafür ist, dass der Porenwasserdruck nicht ausreicht, um den Strömungswiderstand der darüberliegenden Schichten zu überwinden. Dadurch kann das Zwischenraumwasser nicht nach oben abfließen [Leschber, 1996]. Der höchste TR-Gehalt liegt deshalb in der untersten Schlammsschicht.

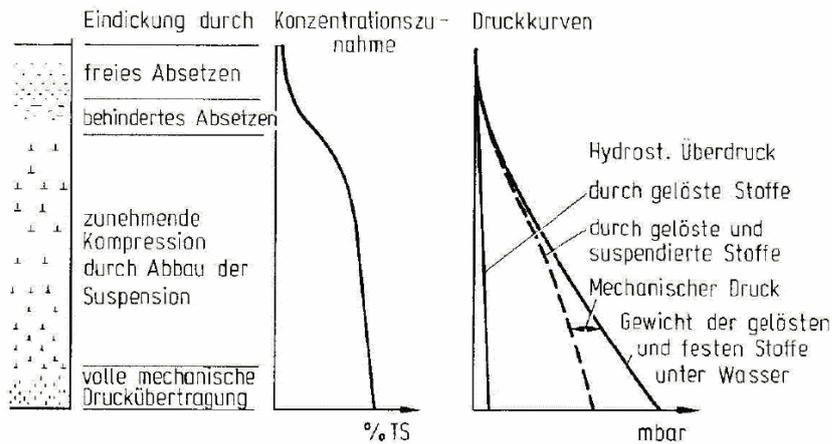


Abbildung 5: Konzentrations- und Druckverlauf der statischen Eindickung [nach Leschber 1996]

Der Schlamm wird in dem Eindicker im oberen Bereich zugeführt. In der unteren Zone wird der Schlamm mittels Räumler abgezogen. Der Schlammzulauf erfolgt seitlich oder in der Mitte eines Rundbeckens. Um den Sedimentationsvorgang nicht zu beeinflussen, wird durch Prallteller und andere Einlaufsysteme die Einstromgeschwindigkeit verringert. Das Schlammwasser wird durch Überlaufwehre oder Schieber am Beckenrand abgezogen [DWA- M 381, 2007].

Eindickung durch Flotation

Bei der Flotation werden Schlammpartikel durch Verbindung mit feinen Luftbläschen zum Aufschwimmen bewegt. An der Wasseroberfläche sammeln sich die Schlammpartikel an und das Zwischenraumwasser kann dadurch nach unten abfließen. Die Flotation verläuft, im Gegensatz zum statischen Eindicker mit Schwerkraftprinzip, schneller. Gerade für die Eindickung von Schwimmschlamm kann die Flotation eingesetzt werden. Sie findet Anwendung bei leichten biologischen ÜSS, Industrieschlämmen der Papierverarbeitung sowie bei der Lebensmittel- und Gemüseindustrie [DWA- M 381, 2007].

Maschinelle Eindickung

Bei der maschinellen Eindickung werden unter Ausnutzung des natürlichen Schwerfelds durch FHM die Wasserbindungskräfte gesenkt. Zu den Maschinen zählen Trommel-, Schnecken-, Band- und Scheibeneindicker sowie Eindickungs-Pumpen (in der **Anlage 2** grafisch dargestellt). Je nach Bindungskraft und Maschinenbetrieb sind zum Teil große FHM-Mengen nötig, um das gewünschte Entwässerungsziel zu erreichen [DWA- M 381, 2007].

3.2.3 Natürliche Entwässerung

Das älteste Verfahren der Klärschlammbehandlung ist die natürliche Entwässerung auf Trockenbeeten oder Schlammbeeten und Schlammplätzen. Von 1910 bis 1980 fand bei KWN jeder Kapazitätsstufe die natürliche Entwässerung Anwendung [Imhoff K., 1910]. Das Verfahren zeichnete sich durch seinen geringen technischen und wirtschaftlichen Aufwand aus und galt als zeitlicher Speicher bei Entsorgungs- oder Verwertungsengpässen. Dabei wurde durch Schwerkraft auf Schlammbeeten und Schlammplätzen der Schlamm entwässert. Bei der natürlichen Schlammmentwässerung werden in der ersten Phase durch das im Schlamm enthaltene Gas die Feststoffe des Schlammes floriert. In der zweiten Phase kommt es zur Nachtrocknung und Verdunstung des Restschlammes innerhalb von ein bis zwei Wochen. Aufgrund der verstärkten Abwasserreinigungsfracht sind die Klärschlammengen gestiegen. Daraufhin wurden die Schlammbeete höher beschickt, sodass Schlammplätze entstanden [Imhoff, K., Imhoff, K.R., 1976]. Ab 1980 ging die Bedeutsamkeit natürlicher Entwässerung zurück und die der MSE stieg. Grund dafür war die Veröffentlichung des Deponie-Merkblatts mit Qualitätsanforderungen der Klärschlämme 1979. Durch diese Anforderungen sollten die Standsicherheit und die betriebliche Sicherheit auf der Deponie gewährleistet werden. Eine Nachbehandlung der Klärschlämme wurde dadurch erforderlich, um Klärschlämme mit geringem TR abzulagern [ATV-VKS-Fachausschuss 3.2, 1987]. Des Weiteren wurde 1993 durch die TA Siedlungsabfall die endgültige Entsorgung von Klärschlämmen nach der damaligen Praxis durch Schlammteiche oder Ähnlichem ausgeschlossen [Möller, 1978].

3.2.4 Maschinelle Entwässerung

Bandfilterpressen

Mit Bandfilterpressen wird der Schlamm durch wechselnde Scherbeanspruchung und Druckerhöhung zwischen zwei Filterbändern entwässert. Die Entwässerung geschieht durch unterschiedliche Zonen. Die Vorentwässerungszone dient zur Entwässerung des freien Wassers unter Ausnutzung der Schwerkraft auf Filterbändern. Durch FHM wird der Schlamm in der Vorentwässerungszone eingedickt, damit die Scher- und Pressstabilität des Schlammes für die nachfolgenden Zonen gewährleistet wird. In dieser Zone sollte deshalb ein TR von 6 bis 8 % erreicht werden. Bei der Vorpresszone wird der Druck auf den Schlamm durch kontinuierliche Abstandsverringern von zwei Filterbändern, größer. Mit Filterbändern, die über kleiner werdende Druckwalzen/Druckrollen geführt werden,

entsteht die Press- und Scherzone. Zur Entwässerung von kommunalen Klärschlämmen werden mindestens 12 Druckwalzen empfohlen.

Die Steuerung der Bandfilterpresse wird durch den Schlammumsatz und die Bandgeschwindigkeit geregelt. Dadurch wird die Presszeit und die Schlammschichtdicke in Abhängigkeit der Schlammeigenschaften eingestellt. Aufgrund einer dünneren Schlammschichtdicke wird durch den kürzeren Drainageweg die Entwässerungseigenschaft erhöht. Entsprechend wird jedoch der Umsatz oder die Presszeit verkürzt. Bandfilterpressen eignen sich für Schlämme, die nach Zugabe von FHM pressstabil sind und einen kompressiblen Filterkuchen bilden können. Erst durch gleichbleibende Beschaffenheit können optimale Entwässerungsergebnisse gewährleistet werden. Diese Anforderung kann durch einen Vorlagebehälter und die Steuerung des Schlammumsatzes und der FHM-Menge realisiert werden [DWA-M 366, 2013].

In der **Anlage 3** sind tabellarisch die Leistungsdaten von Bandfilterpressen neben den nachfolgenden Entwässerungsmaschinen erläutert.

Filterpressen

Bei **Kammer- und Membranfilterpressen** durchströmt der Schlamm im Batchbetrieb mit einem hydrostatischen Druckgefälle Filtertücher und bildet daraufhin einen Filterkuchen. Nachdem sich ein solcher gebildet hat, wird er entfernt und die Kammern wieder mit Schlamm befüllt. Zu Beginn ist der Abscheidegrad abhängig von der Durchlässigkeit des Filtertuches. Bildet sich der Filterkuchen, ist der Abscheidegrad fast 100 %. Die Filterpressen sind mit Filtertüchern bespannten Platten ausgestattet. Die jeweiligen Platten haben beidseitig Vertiefungen und bilden mit den Nachbarplatten eine Kammer. Das Filtrat fließt zu den Plattenflächen. Die Beschickung des Schlammes verläuft bei geringem Druck zuerst konstant. Mit zunehmendem Filterkuchen wird der Druck größer und die Schlammbeschickung sinkt. Die Schlammzufuhr wird bei einer bestimmten Wertunterschreitung des Filtratabflusses oder Schlammzuflusses gestoppt. Membranfilterpressen besitzen zudem zwischen Filtertuch und -platte eine Membran. Das Kammerfiltervolumen wird bis zu 20 % gesenkt. Durch kürzere Batchzeiten wird diese Verringerung wiederum ausgeglichen. Die Membran wird durch Luft oder Wasser befüllt. Der Druck hinter der Membran steigt bis auf 15 bar, sodass dadurch eine zusätzliche Nachpressung entsteht. Daraufhin kann der TR-Gehalt bis 3 % steigen. Membranfilterpressen benötigen größere zusätzliche Ausrüstungen wie Druckleitungen,

Nachpressumpfen oder Vorratsbehälter. Die Investitionskosten sind dementsprechend hoch. Nachfolgend werden die Funktionsprinzipien der Filterpressen dargestellt.

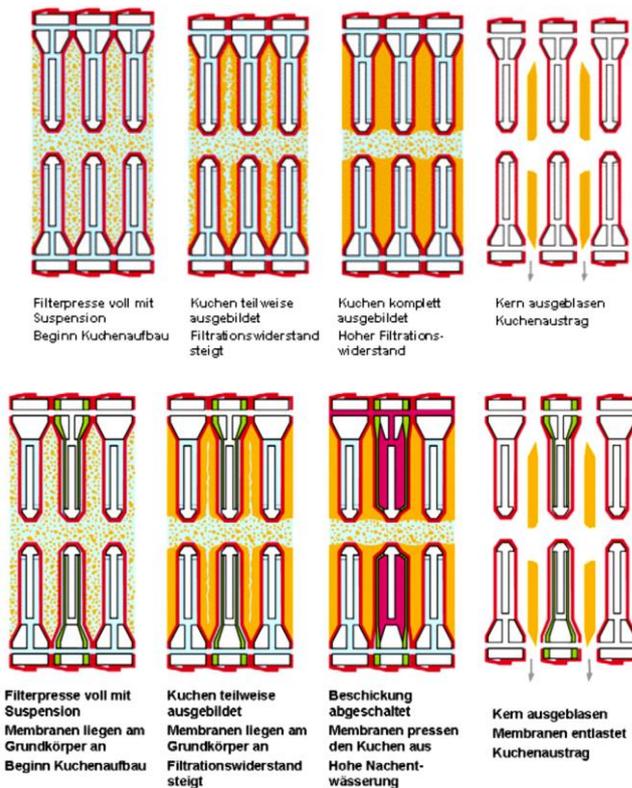


Abbildung 6: Funktionsprinzip Kammerfilterpresse (oben) Membranfilterpresse (unten) [nach DWA-M 366 2013]

Bei Kammer- und Membranfilterpressen wird ein polymeres FHM als Konditionierungsmittel in Abhängigkeit vom TR-Gehalt des Klärschlammes dosiert.

Die Entwässerung mit Filterpressen wird sowohl bei anorganischen als auch organischen Schlämmen eingesetzt. Es wird jedoch empfohlen, dass dünnere Schlämme zuvor voreingedickt werden.

Die **Schlauchfilterpresse** besteht aus einem horizontal liegenden Zylinder mit einem beweglichen Kolben. Der Kolben ist mit einer festen vertikalen Platte durch flexible Drainageschläuche verbunden. Nachfolgend wird der Batchbetrieb dargestellt.

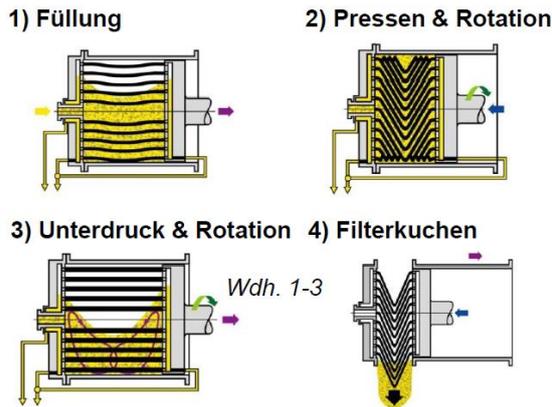


Abbildung 7: Batchbetrieb Schlauchfilterpresse [nach Herbert 2016]

Zuerst wird durch eine Öffnung in der festen Platte der Schlamm bis zum Erreichen eines bestimmten Druckes gefüllt. In der Pressphase wird durch das rotierende Vorfahren des Kolbens der Schlamm gepresst. Das Filtrat wird dabei durch die Schläuche abgegeben. Außerdem baut sich ein Filterkuchen an den Schläuchen auf. Durch das rotierende Zurückfahren des Kolbens werden die Schläuche gestreckt und der Schlamm durch die Rotation durchmischt. Zum Schluss wird der Filterkuchen entfernt, indem der Zylinder von der Platte getrennt wird. Der Entwässerungsvorgang von Befüllung bis zur Entleerung der Schlauchfilterpresse dauert zwischen 70 bis 180 Minuten.

Schlauchfilterpressen werden bei Klärschlämmen mit hohem Anteil an Faserstoffen eingesetzt. Durch die hohe Scherbeanspruchung beim Pressen des Schlammes kommen polymere FHM zum Einsatz. Ein weiterer Punkt, der berücksichtigt werden muss, sind die Verschleißteile. Ein hoher Verschleiß entsteht beim Drainagekern mit den umgebenen Schläuchen. Zum einen müssen diese nach etwa 1.000 Betriebsstunden gereinigt werden und zum anderen oft ausgetauscht werden. Derzeit werden Schlauchfilterpressen selten in Kläranlagen eingesetzt. Eine umfassendere Beurteilung dieses Verfahrens ist durch einen umfangreicheren Betriebseinsatz möglich [DWA-M 366, 2013].

Schneckenpressen

Schneckenpressen arbeiten als kontinuierliche Entwässerungsmaschinen. Sie besitzen einen Siebkorb, in dem ein Schneckenwendel dreht. Der Siebkorb besteht entweder aus Lochblech, Spaltsieb oder beweglichen Stahlringen. Die Schneckenpresse unterteilt sich in drei Zonen. Die Eindickzone dient zur Entwässerung des freien Wassers. Durch die Filtrationszone wird der Filterkuchen an der Innenfläche des Siebkorbes gebildet. Durch den Schneckenwendel wird dieser in die Presszone geschoben. Von dort aus übt der

Schneckenwendel durch den Konus am Austrag Druck auf den Schlamm aus. Das Filtrat verlässt die Schneckenpresse durch den Siebkorb.

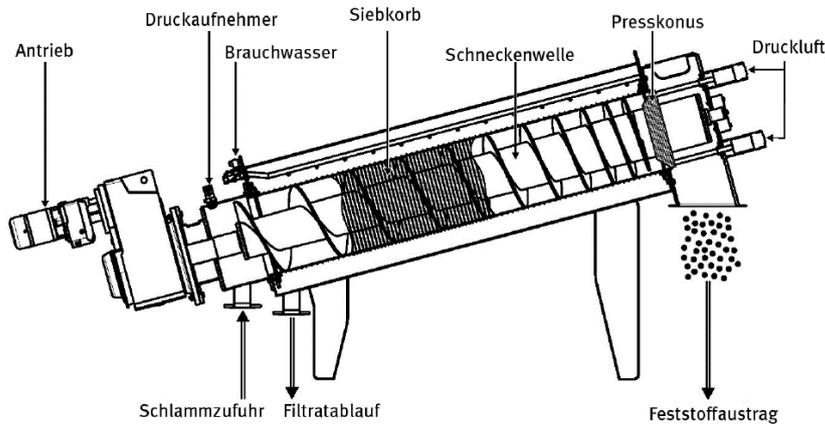


Abbildung 8: Funktionsprinzip einer Schneckenpresse [nach DWA-M 366 2013]

Um die Entwässerung zu steigern, wird vor der Schneckenpresse der Schlamm mit FHM in Kontakt gebracht. Das gewünschte Entwässerungsergebnis ist stark abhängig von der optimalen FHM-Mengendosierung. Dadurch ist erst eine optimale Schlammflockung möglich.

Das Entwässerungsergebnis ist außerdem abhängig von

- der Schneckenengeometrie,
- dem Durchmesser und der Länge ihres Siebkorbs,
- der Schneckendrehzahl, dem Schlammumsatz und
- dem vom Presskonus erzeugten Gegendruck [DWA-M 366, 2013].

Zentrifugen

Bei einer Zentrifuge/Dekanter wird ein künstlich erzeugtes Schwerfeld benutzt, um durch Sedimentation die flüssige Phase vom Klärschlamm zu trennen. Die Trennung ist aufgrund der Dichteunterschiede der Fest- und Flüssigphase möglich [DWA-M 366, 2013].

Die Vollmantelschneckenzenrifuge ist die bekannteste Zentrifugenart bei der Entwässerung des Klärschlammes. Das Funktionsprinzip beruht auf dem Sedimentationsverfahren. Nachfolgend wird das Entwässerungsverfahren mit einer Vollmantelschneckenzenrifuge ausführlich erläutert.

4 Vollmantelschneckenzenrifuge

4.1 Grundlagen zur Vollmantelschneckenzenrifuge

Der Dekanter wurde 1904 durch die amerikanische Patentanmeldung erstmalig erwähnt. Dabei bestand die vertikal stehende Zentrifuge aus einer Schnecke umgeben von einer zylindrisch-konischen Trommel [Stahl, 2004].

Derzeitige Hersteller für Dekanter im kommunalen Bereich sind:

- Alfa Laval Mid Europe GmbH
- Flottweg SE
- Hiller GmbH
- GEA Westfalia Separator Group GmbH
- ANDRITZ Separation GmbH

Es wird zwischen Gleichstrom- und Gegenstromdekantern unterschieden. Bei dem Gleichstromdekanter findet der Schlammeintrag am Ende des zylindrischen Teils statt. Die Rückführung des Zentrats beginnt kurz vor dem Übergang zum konischen Teil. Das Zentrat fließt dadurch zum Trommelboden zurück [Leschber, 1996]. Der Gegenstromdekanter ist die am häufigsten vorkommende Bauart. Es wird der Schlamm in der Mitte der Trommel aufgegeben und sowohl der Schlamm als auch das Zentrat an den jeweiligen Enden getrennt ausgetragen.

Nachfolgend wird der Aufbau durch die Abbildung ersichtlich.

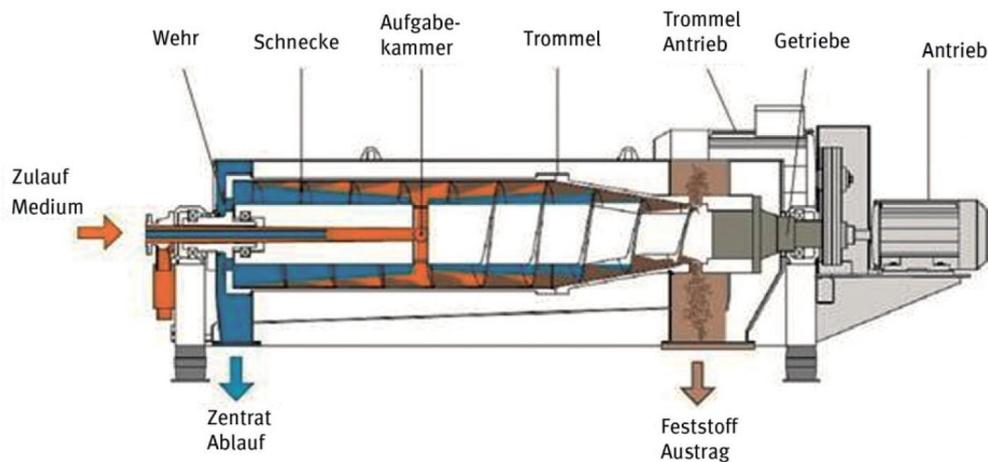


Abbildung 9: Aufbau und Funktionsweise eines Dekanters [nach DWA M 366 2013]

Der Rotor wird durch eine Vollmanteltrommel mit zylindrischem und konischem Teil und die darin befindliche Schnecke charakterisiert. Beide Zentrifugensegmente bewegen sich

mit einer hohen Drehzahl. Ist die Schneckendrehzahl höher als die der Trommel, so wird die Schnecke als voreilende Schnecke bezeichnet. Bewegt sich die Schnecke langsamer als die Trommel, so wird von einer nacheilenden Schnecke gesprochen [Stahl, 2004]. Der FS und das FHM werden durch ein Einlaufrohr in die Zentrifuge gefördert und durch die Aufgabekammer der Zentrifuge in die Trommel transportiert. Durch die Rotation bildet sich ein Zentrifugalfeld. Der Feststoff sedimentiert dabei durch die Zentrifugalkräfte auf der Innenwand der Trommel, während sich die flüssige Phase (Zentrat) als innenliegender Ring über dem Feststoff bildet. Durch die Schneckenbewegung wird der Feststoff über den konischen Teil der Trommel zum Austrag (Feststoffschurre) gefördert [DWA-M 366, 2013]. Das Zentrat wird aufgrund der gebildeten Kanäle durch die Schneckenblätter in Richtung Überlaufwehr zum Zentratablauf bewegt [Stahl, 2004].

4.2 Maschinenspezifische Steuerung und deren Abhängigkeit auf die Entwässerung

Eine Vollmantelschnecken-zentrifuge wird durch verschiedene Parameter beeinflusst. Diese Parameter sind Trommeldrehzahl, Drehmoment und damit verbunden die Differenzdrehzahl zwischen Schnecke und Trommel. Außerdem wird das Entwässerungsergebnis durch die Teichtiefe, die FHM-Dosierung und den Schlammumsatz pro Zeiteinheit beeinflusst.

Trommeldrehzahl

Durch Erhöhung der Trommeldrehzahl erhöht sich der TR-Gehalt und der damit verbundene Abscheidegrad. Bei einer zu hohen Trommeldrehzahl entsteht eine auf den Konus wirkende, zu große Rückstellkraft, sodass der entwässerte Schlamm nicht mehr in Richtung des Konus transportiert werden kann. Daraufhin lädt sich die Zentrifuge mit Schlamm auf. Die Zentratbelastung wird durch Erhöhung der Trommeldrehzahl tendenziell geringer. Durch das Aufladen der Zentrifuge kann das Zentrat jedoch umkippen.

Durch Erhöhung der Trommeldrehzahl wird die Zentrifugalkraft F_z und somit die Schleuderziffer z erhöht. Die Zentrifugalkraft F_z wirkt auf eine Partikelmasse m an der inneren Trommelwand und wird wie folgt ermittelt:

$$F_z[N] = m * w^2 * r = m * \left(\frac{n}{30}\right)^2 * r = m * b_z = m * g * z \quad [2]$$

mit:

$m[g]$ Partikelmasse

$b_z\left[\frac{m}{s^2}\right]$ Zentrifugalbeschleunigung

$g\left[\frac{m}{s^2}\right]$ Erdbeschleunigung

$w\left[\frac{1}{s}\right]$ Winkelgeschwindigkeit

$r [m]$ Radius der Trommel

$n\left[\frac{U}{min}\right]$ Trommeldrehzahl

Die Schleuderziffer z ist das Verhältnis der Zentrifugalbeschleunigung b_z zur Erdbeschleunigung g und wird nach folgender Formel bestimmt:

$$z = \frac{b_z}{g} = \frac{w^2 * r}{g} = \frac{\pi^2 * r * n^2}{900 * g} \quad [3]$$

Beispielrechnung:

Trommeldrehzahl von 3100 U/min und Trommelradius von 0,275 m

$$z = \frac{b_z}{g} = \frac{w^2 * r}{g} = \frac{\pi^2 * r * n^2}{900 * g} = \frac{\pi^2 * 0,275 \text{ m} * (3100 \text{ U/min})^2}{900 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 2954,23$$

Das hier gewählte Beispiel verdeutlicht die Schleuderziffer bei 3100 U/min an den Alfa Laval-Zentrifugen auf dem KW Leipzig-Rosental. Nach dem Merkblatt DWA-M 366 sollte die Schleuderziffer größer als 2900 als Vielfaches von g sein, um ein akzeptables Trennergebnis zu erreichen. Durch eine zu hoch gewählte Schleuderziffer und Trommeldrehzahl entstehen höhere Reibungskräfte an den Schneckenwendeln und damit verbunden ein höherer Verschleiß am Getriebe. Der Strombedarf steigt dadurch an. Durch die Erhöhung der Trommeldrehzahl ist ein höherer FHM-Bedarf notwendig, da die Scherbeanspruchung für die Schlammflocken größer wird. Der Abscheidegrad ist demzufolge von den Schlammeigenschaften und dem eingesetzten FHM abhängig. [DWA-M 366, 2013]

Differenzdrehzahl

Die Differenzdrehzahl zwischen Trommel und Schnecke ist ein entscheidender Faktor, um den TR-Gehalt zu verbessern. Wird die Differenzdrehzahl gesenkt, erhöht sich die Verweilzeit in der Trommel, der Strombedarf und der TR-Gehalt. Aufgrund des steigenden Produktpiegels wird die Zentratbelastung größer. Durch die vergrößerte Scherbeanspruchung kann eine Erhöhung des FHM-Verbrauchs sinnvoll sein, um ein optimales Entwässerungsergebnis zu erzielen. Weitere Einflussfaktoren der Differenzdrehzahl sind die Durchsatzmenge, der Feststoffgehalt des Schlammes, die Trommeldrehzahl und Schleuderziffer sowie die Schlammeigenschaften und das FHM. Die Differenzdrehzahl wird mit Hilfe des Drehmoments gesteuert. Das Drehmoment gibt an, wie viel Kraft auf einen rotierenden Körper wirkt. Durch Erhöhung des Schneckendrehmoments wird die Differenzdrehzahl gesenkt. Parallel dazu steuert die Differenzdrehzahl das Drehmoment [DWA-M 366, 2013].

Flockungshilfsmittel

Das FHM dient zur Verbesserung des Abscheidegrads. Das eingesetzte FHM ist abhängig von den Schlammeigenschaften und der Scherbeanspruchung des FSs in der Zentrifuge. Wird der FHM-Volumenstrom erhöht, so wird der TR-Gehalt verbessert und das Zentrat wird klarer. Wird das FHM überdosiert oder unterdosiert, sinkt der TR-Gehalt. Des Weiteren werden bei einer Überdosierung die Gesamtkosten an FHM steigen. Bei einer Über- oder Unterdosierung wird die Zentratbelastung erhöht. Wird das Zentrat in die Klärwerksbehandlungsanlagen zurückgeführt, führt eine zu hohe Zentratbelastung zur Schädigung der Abwasserbehandlung. Ist eine Erhöhung des Schlammvolumens nötig, wird durch Erhöhung des FHM der TR-Gehalt und die Zentratqualität verbessert [DWA-M 350, 2014].

Teichtiefe

Durch Wehrscheiben werden die Wehrdurchmesser eingestellt. Dadurch wird die Teichtiefe (Flüssigkeitsniveau) der Zentrifuge verändert. Ein größer eingestellter Wehrdurchmesser bewirkt eine geringere Teichtiefe. Nachfolgend wird dies durch die Abbildung ersichtlich.

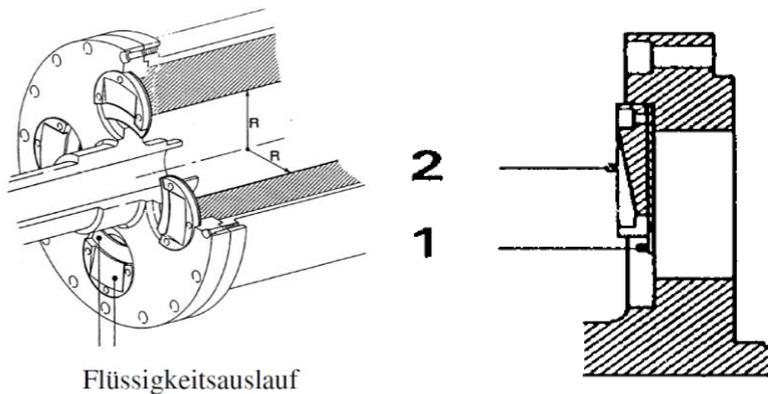


Abbildung 10: Flüssigkeitsniveauradius R mit Flüssigkeitsauslauföffnung (1) & Wehrscheibe (2) [nach Kolb 2017]

Dadurch wird das Klärvolumen in der Trommel niedriger und die Trockenstrecke länger. Der TR-Gehalt steigt an. Aufgrund des sinkenden Klärvolumens mit steigendem Wehrdurchmesser wird die Zentratbelastung größer. Der Abscheidegrad sinkt.

Des Weiteren ist es möglich, die Teichtiefe durch die Aufgabemenge und die Trommeldrehzahl dynamisch zu verändern. Durch eine geringe Aufgabemenge und größerer Trommeldrehzahl wird der Wehrdurchmesser erhöht, der TR-Gehalt im Austrag verbessert und die Zentratqualität verschlechtert [Baker & Hughes, 2002][Kolb, 2017].

Schlamm durchsatz

Wird der Schlammvolumenstrom erhöht, so wird die Feststoffbelastung in der Zentrifuge vergrößert. Der Produktspiegel steigt dadurch an. Die Zentratqualität wird schlechter. Der TR-Gehalt und der Abscheidegrad sinken aufgrund der kürzeren Verweilzeit in der Zentrifuge. Der FHM-Verbrauch steigt aufgrund der vergrößerten Fracht. Jedoch sinkt der spezifische Stromverbrauch pro Kubikmeter Schlamm [DWA-M 366, 2013][Kolb, 2017].

4.3 Zentrifugen im Klärwerk Rosental

Der anfallende FS wird mit Hilfe von drei Zentrifugen entwässert. Die Zentrifuge der Firma Andritz wird in dieser Arbeit jedoch nicht genauer betrachtet, da diese in naher Zukunft durch eine neue ersetzt werden soll. Bei den beiden übrigen Zentrifugen handelt es sich um Vollmantelschnecken zentrifugen der Firma Alfa Laval vom Typ ALDEC G3-105 (dargestellt in **Anlage 4**), die im Gegenstromprinzip arbeiten. Bei der Schnecke handelt es sich um eine voreilende Schnecke.

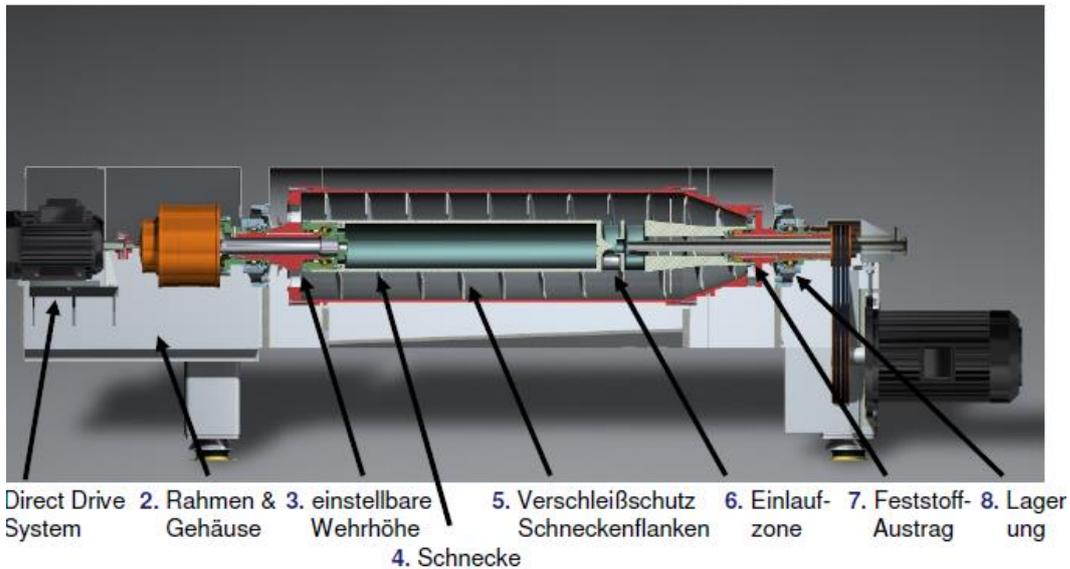


Abbildung 11: Alfa Laval Zentrifuge [nach Alfa Laval 2013]

Trommelausführung

Die Zentrifugen am KW Rosental besitzen eine Steilkonusausführung. Die Flachkonusausführung wird bei Medien mit hoher Dichte oder bei Medien mit schlechten Fördereigenschaften angewendet. Die Steilkonusvariante wird vor allem bei Klärschlamm entwässerung und -eindickung eingesetzt. Nachfolgend wird der Unterschied zwischen den beiden Ausführungen deutlich.

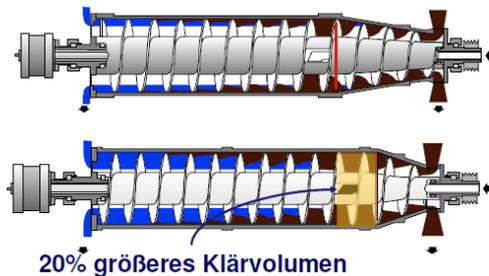


Abbildung 12: Flachkonusausführung (oben), Steilkonusausführung (unten) [nach Alfa Laval 2013]

Durch die Steilkonusvariante wird das Klärvolumen vergrößert. Da jeder trenntechnische Vorgang im zylindrischen Teil der Zentrifuge stattfindet, wird die Entwässerbarkeit und der Abscheidegrad bei der Steilkonusvariante erhöht. Durch eine eingebaute Stauscheibe wird der Schlamm stärker an diese gepresst, sodass die dadurch entstehende hydrodynamische Kraft den Feststofftransport und die Entwässerung unterstützt.

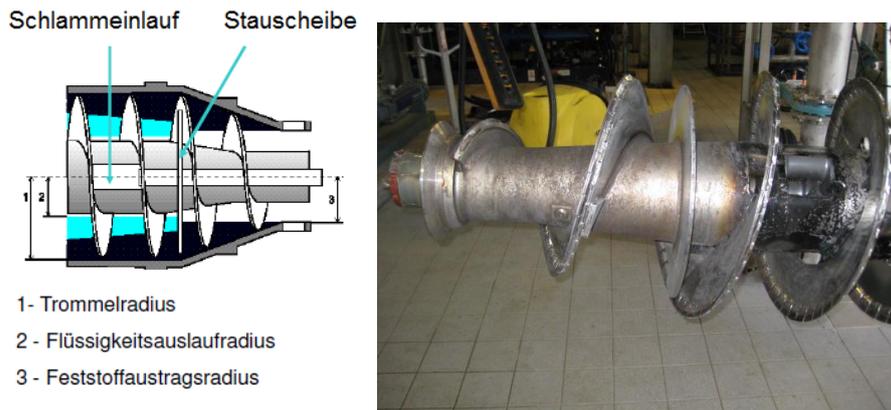


Abbildung 13: Stauscheibe [nach Kolb 2017] (links), Stauscheibe und Aufgabekammer/Einlaufzone (rechts)

Energieeinsparung

- **Power Plates**

Durch Power Plates wird der Energieverbrauch gesenkt. Die Power Plates befinden sich am Zentratablauf.



Abbildung 14: Power Plates [nach Technische Beschreibung Zentrifuge, Alfa Laval]

Das Zentrat wird beim Ablauf auf die Umfangsgeschwindigkeit beschleunigt. Durch die Power Plates wird die Austrittsgeschwindigkeit reduziert, indem die Geschwindigkeit in Form von Energie in entgegengesetzter Trommeldrehrichtung übertragen und die Trommeldrehung unterstützt wird. Das Arbeitsprinzip ähnelt dem einer Turbine. Die Zentrataustragsgeschwindigkeit wird reduziert und der Energieverbrauch entsprechend gesenkt. In der nächsten Abbildung sind die „Power Plates“ dargestellt.

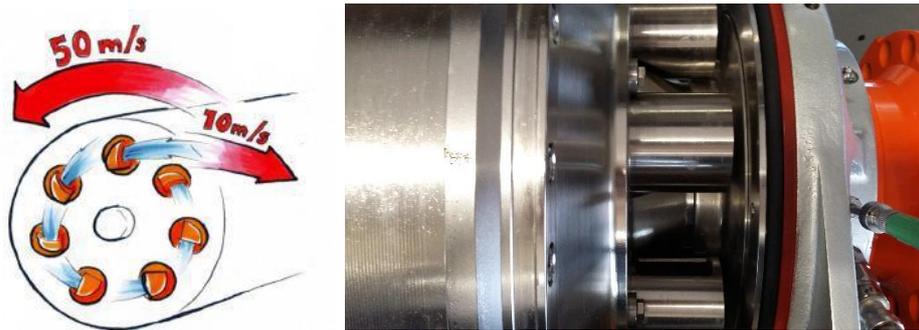


Abbildung 15: Prinzip der „Power Plates“ [nach Alfa Laval, 2013] (links), Power Plates an der Zentrifuge (rechts)

An den jeweiligen Power Plates wird durch eine angebrachte Skala der Wehrdurchmesser eingestellt. Der Wehrdurchmesser bezieht sich auf den Standardradius von 132 mm. Durch eine Skala von -16 bis +16 wird der Radius verkleinert oder vergrößert.

- **Slim Line Design**

Bei den Zentrifugen handelt es sich um schlanke Dekanterschnecken, die aufgrund ihrer Bauart eine höhere Teichtiefe ermöglichen. Dadurch wird Energie sowohl am Zentrat als auch am Schlammaustritt eingespart. Zudem wird das Trommelvolumen in der Zentrifuge und der Anpressdruck an der Trommelwand erhöht und die Entwässerung folglich verbessert.

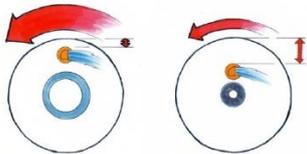


Abbildung 16: Prinzip Slim Line Design [nach Technische Beschreibung, Alfa Laval]

Antriebsmotor-Trommel

Die Trommel wird durch einen Elektromotor bewegt, welcher sich am Konusteil der Trommel befindet und durch Keilriemen mit ihr verbunden ist.

Direct Drive System

Als Direct Drive System wird das System des Schneckenantriebes bezeichnet. Das Getriebe kann 20 kNm aufbringen und erzeugt mit einer hohen Schleuderziffer einen hohen Entwässerungsgrad. Durch das System wird die Differenzzahl mit Hilfe eines Frequenzumrichters geregelt. Mit Hilfe des Planetengetriebes wird ein konstant hohes Drehmoment gewährleistet, das unabhängig von den Einstellungen der Trommel- und der Schneckendrehzahl arbeitet.

5 Klärschlammkonditionierung

5.1 Allgemeine Grundlagen

Durch die Klärschlammkonditionierung mit FHM wird die Eindickung und Entwässerung optimiert. Um eine verbesserte Fest-Flüssig-Trennung zu erzielen, sind folgende Voraussetzungen zu gewährleisten:

- Auswahl eines geeigneten Konditionierungsmittels
- Dosiermengenbestimmung für die Entwässerungsmaschine
- Aufbereitungsanlage/-verfahren des Konditionierungsmittels

Durch die jeweilige Auswahl und Dosierung des Konditionierungsmittels wird bei zurückgeführtem Zentrat die Belastung der Abwasserreinigung beeinflusst.

Beim Einsatz des Konditionierungsmittels wird zwischen organischen und anorganischen FHMn unterschieden. Anorganische FHM bestehen aus Aluminium- und Eisensalzen und/oder Kalk und werden vorzugsweise an Filterpressen eingesetzt. In Kläranlagen mit biologischer Phosphatelimination kann eine Konditionierung mit Kalk vor der Zentrifuge zur Verbesserung der Entwässerung führen. Jedoch erhöht sich dadurch die Feststoffmasse im Austrag der Zentrifuge [DWA-M 366, 2013]. Organische FHM werden tendenziell öfter als Konditionierungsmittel an Zentrifugen eingesetzt.

5.2 Organische Konditionierungsmittel

Seit etwa 50 Jahren werden zur Eindickung und Entwässerung polymere FHM zur Klärschlammkonditionierung eingesetzt. Als Hauptbestandteil wird Polyacrylamid verwendet. Die jeweiligen Schlammflocken von kommunalen Klärschlämmen sind häufig negativ geladen. Folglich stoßen sich die suspendierten Teilchen ab. Durch kationische, synthetische Polyelektrolyte kommt es zum Ladungsausgleich und zur Destabilisierung. Die durch die Koagulation entstehenden Mikrofloken können entsprechend besser sedimentieren. Es bilden sich aufgrund von Vernetzung der Mikrofloken Makrofloken, die eine noch größere Sedimentationsfähigkeit besitzen. Organische FHM haben den Vorteil, dass die Feststoffmasse im Austrag der Zentrifuge nicht erhöht wird, da geringere FHM-Mengen eingesetzt werden. Außerdem besitzen organische FHM eine hohe Scherstabilität, welche beim Einsatz von Zentrifugen von großem Vorteil ist.

Die FHM werden in die FHM-Konsistenz, elektrische Ladung, Ladungsdichte, Struktur der funktionellen Gruppen und dem Molekulargewicht untergliedert.

FHM-Konsistenz

FHM unterscheiden sich hinsichtlich der Konsistenz und unterteilen sich dabei in:

- Lösungspolymerisation (Lösung, Pulver oder Granulat),
- Fällungspolymerisation (Granulat),
- Suspensionspolymerisation (Pellets oder Perlen) und
- Emulsionspolymerisation (Emulsion oder Dispersion)

Bei der MSE werden besonders Emulsionsprodukte verwendet [DWA-M 366, 2013].

Elektrische Ladung

Bei der elektrischen Ladungsart wird zwischen nichtionisch (z. B. Polyacrylamid ohne ionogenem Co-Monomer) und ionisch (z. B. kationisch oder anionisch modifizierte Polyacrylamide) unterschieden. Die FS-Oberfläche ist überwiegend negativ geladen. Bei organischem FS werden bevorzugt kationische modifizierte Polyacrylamide in der Klärschlammwässerung verwendet [DWA-M 366, 2013].

Ladungsdichte

Als Ladungsdichte wird das Verhältnis der konstitutionellen Repetiereinheit zur Kettengliederanzahl verstanden. Dabei werden vermehrt Ladungsdichten zwischen 20 und 80 % eingesetzt [DWA-M 366, 2013].

Molekulargewicht

Das Molekulargewicht von FHMn liegt überwiegend im Bereich von 10 kg/mol bis 100.000 kg/mol. Die Viskosität des FHMs wird mit höherem Molekulargewicht größer. Das Molekulargewicht wird durch „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ charakterisiert [DWA-M 366, 2013].

Molekülstruktur

Die FHM unterscheiden sich außerdem durch die Molekülstruktur. Molekülstrukturen, die vernetzt und verzweigt sind, haben eine hohe Scherstabilität gegenüber linearem FHM [DWA-M 366, 2013].

5.3 Beeinflussungsfaktoren des organischen FHMs und deren Einsatz

Neben der Art des organischen FHMs ist der Betrieb und die Art der Aufbereitungsanlage und deren Rührwerksleistung von entscheidender Bedeutung.

Dabei wird zwischen Aufbereitungsanlagen im Pendelbetrieb und Durchlaufanlagen unterschieden. Bei Ersterem findet in einem Behälter die Befüllung, Reifung und Dosierung des FHMs in die Entwässerungsmaschine statt, während in Letzterem die Verfahren in getrennten Behältern stattfinden. Um Kurzschlussströmungen und die daraus folgende Unterschreitung der Reifezeit zu vermeiden, werden Aufbereitungsanlagen im Pendelbetrieb bevorzugt. Neben dem Anlagentyp hat die Rührwerksleistung einen entscheidenden Einfluss auf die Ladungsbildung des FHMs. Die Behältergröße und -form sowie die Konzentration beeinflussen die Rührwerksleistung. Zu große und eckige Behälter, sowie zu hoch konzentrierte FHM, benötigen eine höhere erforderliche Leistung. Wird zu wenig Rührwerksleistung eingebracht, verklumpt das FHM und dessen Qualität sinkt.

Die Qualität des Ansetzwassers ist zusätzlich auch zu berücksichtigen. Das Ansetzwasser sollte feststofffreies Trink- oder Brunnenwasser sein. Ein hoher Eisen-, Mangan- oder Feststoffanteil führt zur Bildung von kleinen Flocken und zum starken Verbrauch des FHMs. Außerdem behindern Chlorid-, Sulfat-, Nitrat-, Calcium- oder Magnesiumionen die Ladungsbildung des FHMs. Das organische FHM auf dem KW Rosental wird mit Trinkwasser angesetzt. Bei dem Trinkwasser vor Ort handelt es sich um hartes Wasser mit einem großen Anteil an Calcium und Magnesiumionen. Demnach wird die Aufbereitung des FHMs gestört.

Das Löseverhalten ist ein wichtiger Aspekt bei der Aufbereitung des FHMs. Dieses ist abhängig von der Reifezeit. Die Reifezeit ist die Zeit, die für die Ausbildung der Ladung und die Streckung der Makromoleküle notwendig ist.

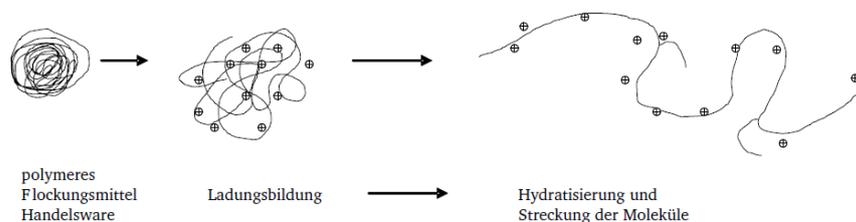


Abbildung 17: Vorgang der Reife eines FHMs [nach DWA M 350 2014]

Wird die Reifezeit erreicht, so wird dahingehend eine Überdosierung und Verschlechterung des Entwässerungsergebnisses verhindert. Bei pulverartigem FHM entspricht die Lösezeit der Reifezeit des FHMs. In der Praxis sollte die Reifezeit der FHM von mindestens 45 Minuten eingehalten werden. Durch zeitliche Viskositätsmessung oder elektrische Leitfähigkeit wird diese Zeit ermittelt. Dabei sind die Viskosität und Leitfähigkeit abhängig vom FHM-Produkt und von der Konzentration.

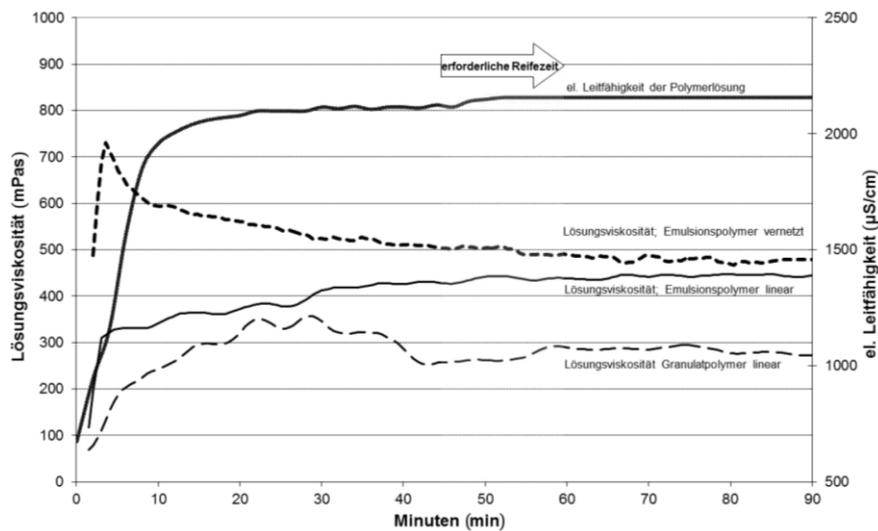


Abbildung 18: Theoretischer Verlauf Viskosität und elektrische Leitfähigkeit [nach DWA-M 350 2014]

Die Reifezeit ist demnach die Zeit, bei der sich ein konstanter Wert der elektrischen Leitfähigkeit bzw. der dynamischen Viskosität einstellt. Im **Kapitel 6.3.1** wurde die Reifezeit vom derzeit eingesetzten FHM (PK 65 LP) ermittelt.

Durch die beginnende Hydrolyse nach etwa sechs Stunden sinkt die Leitfähigkeit wieder und die Wirksamkeit des FHMs nimmt ab. Aus diesem Grund ist eine längere Lagerung des FHMs zu vermeiden.

Die Wirksamkeit des FHMs wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst.

Konzentration

Durch hohe FHM-Konzentrationen bleibt die Wirksamkeit länger erhalten.

pH-Wert

Ein niedrigerer pH-Wert führt zur Verbesserung der Stabilität des FHMs. Die Ansäuerung kann durch Milchsäure erfolgen. Milchsäure ist gegen Materialien weniger aggressiv und kann Verkeimung verzögern.

Verkeimung und Pilzbildung

Tritt Amingeruch, eine Schleimschicht oder Verfärbung des FHM auf, können diese auf eine Verkeimung und Pilzbildung zurückgeführt werden. Verkeimung und Pilzbildung entsteht nach einer gewissen Zeitdauer und sind abhängig von den Aufbereitungsbedingungen und der Wasserqualität. Durch regelmäßige Reinigung der FHM-Aufbereitungsbehälter wird eine Verkeimung verhindert.

Licht und Temperatur

UV-Licht führt zur Sauerstoff-Radikalbildung, die Polymerketten spalten kann. Hohe Temperaturen über 35°C führen zu schnell verlaufender Hydrolyse. Zu niedrige Temperaturen führen jedoch zu geringen Lösevorgängen. Daher erhöht sich anschließend die Reifezeit [DWA-M 350, 2014].

5.4 Aufbereitungsanlage KW Leipzig-Rosental

Um mit den Zentrifugen einen hohen TR-Gehalt zu erhalten, werden FHM durch die FHM-Aufbereitungsanlagen zur Verfügung gestellt.

Im KW Leipzig-Rosental wird in Big Bags das pulverförmige FHM angeliefert. Es befinden sich zwei FHM-Anlagen mit jeweils zwei quaderförmigen Kammern auf dem KW. Nachdem das FHM gereift ist, erfolgt die Förderung des FHM durch Pumpen. Das FHM wird unmittelbar direkt vor der Zentrifuge dosiert.



Abbildung 19: FHM-Anlage 2 (links) & FHM-Anlage 1 (rechts) mit jeweils zwei Kammern

In der Abbildung werden die Aufbereitungsanlagen dargestellt. In einer Kammer finden das Befüllen, Reifen und Entleeren statt. Das pulverförmige FHM wird nach gewünschter Konzentration mit Trinkwasser in die jeweilige Kammer einer FHM-Anlage befüllt. Die Befüllung dauert zwischen 15 und 18 Minuten. Nachdem das FHM mit Wasser in Verbindung gebracht wurde, reift es. Um eine optimale Reife und Durchmischung zu erreichen, wird der Prozess mit einem Rührwerk unterstützt. Je nach erforderlichem FHM-Volumenstrom beginnt die Entleerung der Kammer. Dadurch wird nach beginnendem Entleeren einer Kammer die zweite Kammer befüllt. Nachdem die zweite Kammer wieder entleert wurde, wird wiederum die erste Kammer befüllt. Derzeit werden die zwei FHM-Anlagen getrennt im Pendelbetrieb gefahren. Je nachdem wie viele Zentrifugen arbeiten, werden die FHM-Pumpen zur Dosierung des FHMs eingeschaltet. Nachfolgend wird die Aufbereitung des FHMs an einer FHM-Anlage schematisch dargestellt.

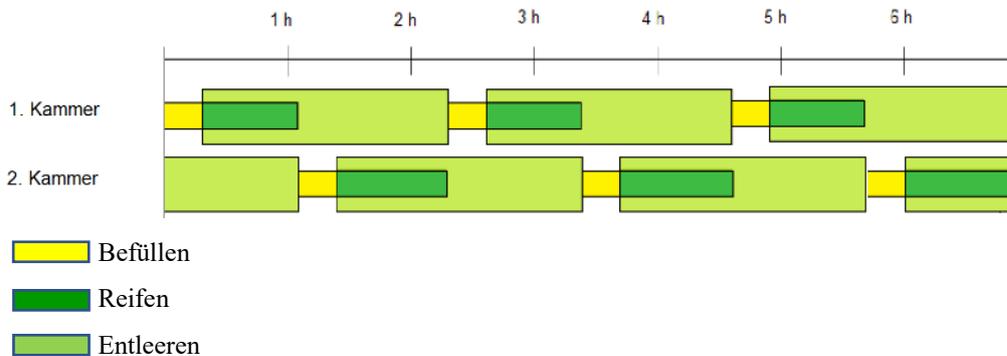


Abbildung 20: Aufbereitungsschema Pendelbetrieb mit einer Pumpe an einer FHM-Anlage

In der **Abbildung 20** wird der Prozess der Aufbereitung dargestellt. Wichtig dabei ist die Einhaltung der Reifezeit von mindestens 45 Minuten. Die Reife- und Entleerungszeit wird durch den eingestellten FHM-Volumenstrom beeinflusst. Die minimal eingestellte Entleerungszeit entspricht der Summe aus Befüllungs- und Reifezeit. Da eine FHM-Pumpe maximal $2 \text{ m}^3/\text{h}$ fördern kann, wird die Reifezeit eingehalten. Wird das FHM an einer FHM-Anlage durch zwei FHM-Pumpen entleert, dürften diese in Summe nur $2,7 \text{ m}^3/\text{h}$ fördern, um die Reifezeit einzuhalten.

Eine andere Variante des FHM-Prozesses ist die Verbundfahrweise. Dabei werden in Reihe alle vier vorhandenen FHM-Kammern betrieben. Werden beide FHM-Anlagen in Verbundfahrweise betrieben, sind dadurch deutlich längere Reifezeiten nötig. Grund dafür ist der Aspekt, dass nach dem Entleeren die FHM-Kammer nachfolgend sofort wieder befüllt wird. Dadurch wird beispielsweise Kammer 1 der FHM-Anlage 1 solange gereift,

bis die Kammer 2 der FHM-Anlage 2 wieder entleert wird. Nachfolgend wird der Prozess dargestellt.

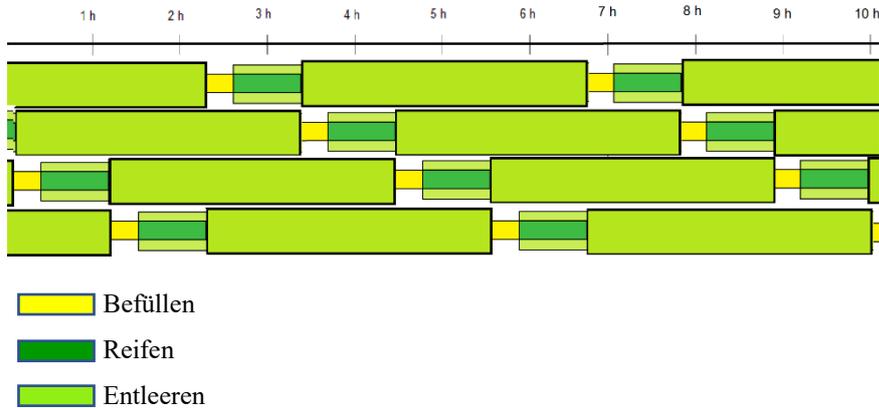


Abbildung 21: Aufbereitungsschema der Verbundfahrweise der beiden FHM-Anlagen

Bei dieser Fahrweise wird die Reifezeit durch das maximale Fördervolumen immer eingehalten. Da FHM durch beginnende Hydrolyse ab vier Stunden ihre Wirksamkeit verlieren, ist hierbei dieser Aspekt zu untersuchen. Um die Reife- und Entleerungszeit unter vier Stunden zu erreichen, ist ein Volumenstrom von $2,85 \text{ m}^3/\text{h}$ nötig. Da die FHM-Pumpen einen maximalen Volumenstrom von $2 \text{ m}^3/\text{h}$ fördern können, sind zwei Pumpen nötig. Aus diesem Grund wäre die Verbundfahrweise nur im Betrieb von zwei oder drei Zentrifugen zu empfehlen.

6 Untersuchungen

6.1 Untersuchungen des Schlammes durch externen Berater

6.1.1 Allgemeine Grundlagen

Die Schlammigenschaften nehmen eine bedeutende Rolle bei der Entwässerbarkeit des FSs ein. Die Kennwerte des Schlammes, die im **Kapitel 3.1.3** erläutert wurden, dienen als Hilfsmittel bei der Beurteilung der Entwässerbarkeit. Durch ein extern beauftragtes Ingenieurbüro wurden verschiedene Kennwerte ermittelt, um die Klärschlammmentwässerung auf dem KW Rosental einschätzen zu können. Die Schlammuntersuchungen werden seit über 10 Jahren alle zwei bis drei Jahre durchgeführt. Dadurch ist eine Vergleichbarkeit der untersuchten Schlammkennwerte möglich. In den letzten fünf Jahren wurden folgende Veränderungen der Schlammigenschaften festgestellt, die einen negativen Einfluss auf die Entwässerbarkeit haben:

- Erhöhung des organischen Anteils als Glühverlust (GV)
- Erhöhung der oTS bezogenen lipophilen Stoffe
- Erhöhung des Chloridgehaltes

Nachfolgend werden die Kennwerte im Diagramm dargestellt.

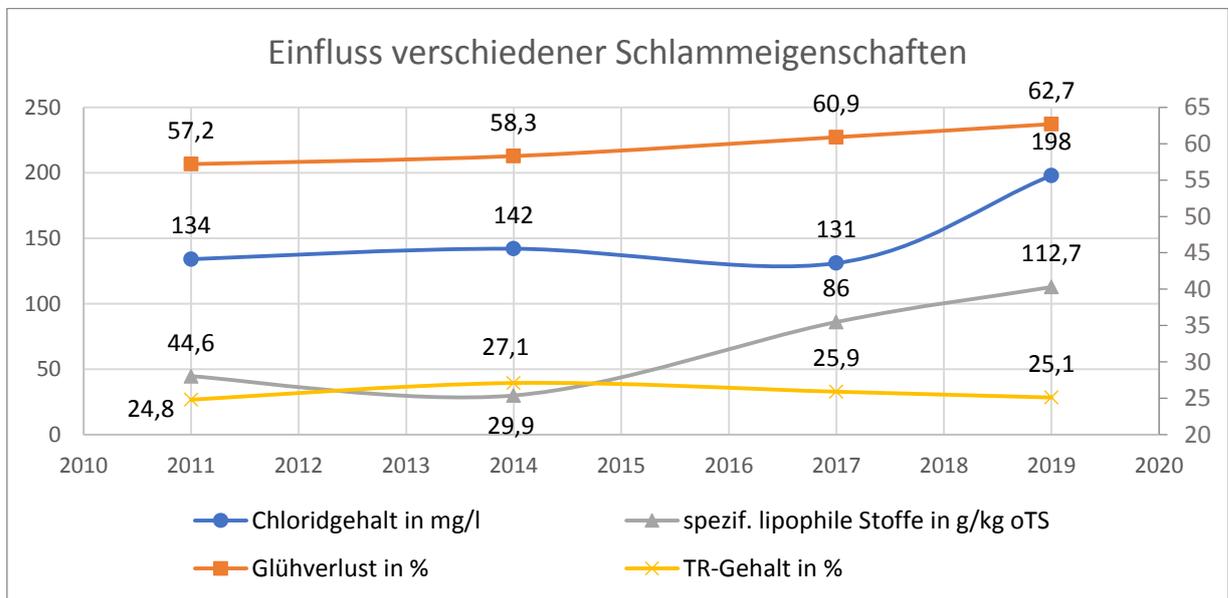


Abbildung 22: Einfluss von ausgewählten Schlammkennwerten KW Rosental

Laut den Ergebnissen der Schlammuntersuchung, die vom Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert im April 2019 erfasst wurden, führt der hohe organische Anteil, der hohe

Feinstanteil, der hohe Chloridgehalt und der hohe Anteil an lipophilen Stoffen und EPS zur negativen Beeinflussung der Schlammentwässerung.

6.1.2 Analyse der Schlammeigenschaften

Organischer Anteil als Glühverlust

Mit Hilfe des GV's wird der organische Anteil des Feststoffes im Schlamm eingeschätzt. Werden die GVe des FSs auf dem KW Rosental grafisch mit dem Austrags-TR von 2017 bis 2019 dargestellt, ergeben sich folgende Trendlinien:

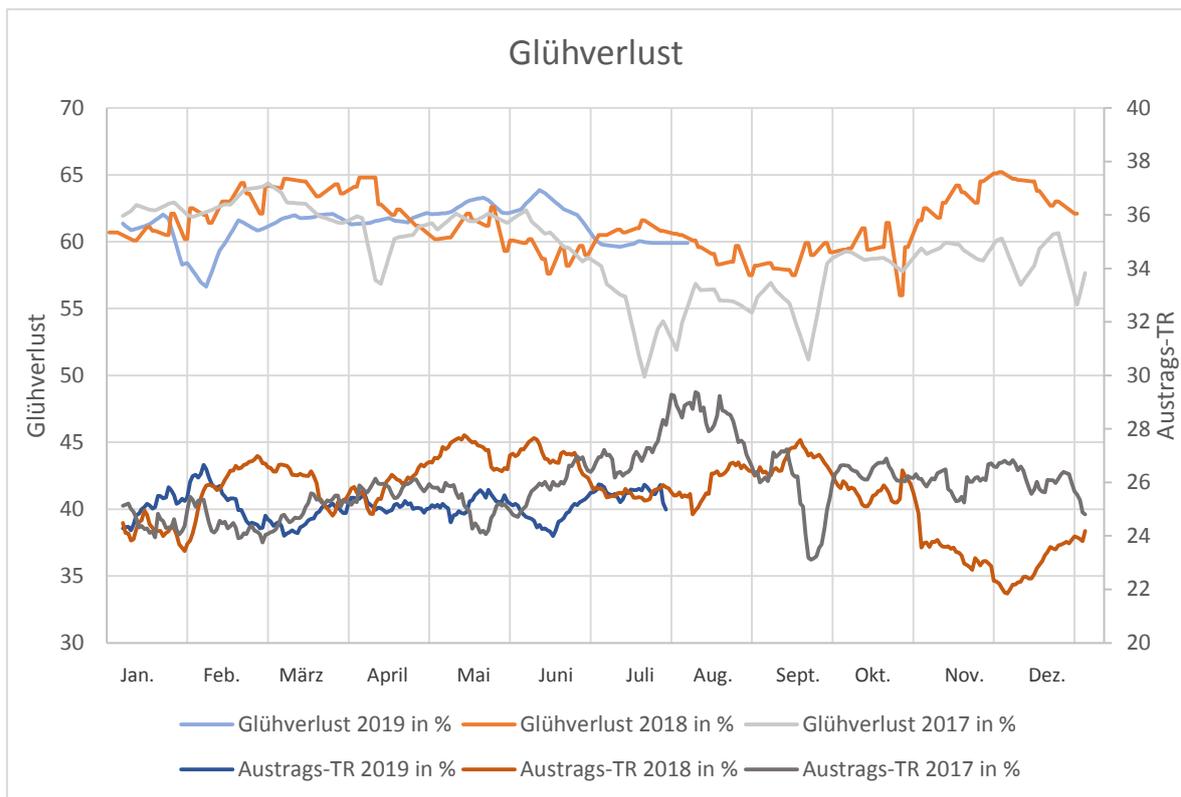


Abbildung 23: Jahreszeitlich abhängiger Glühverlust KW Rosental

Laut dem Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert führt ein hoher organischer Anteil größer 55 % zur schlechteren Entwässerbarkeit des Schlammes. Durch Betrachtung des Diagramms wird der Zusammenhang zwischen GV und Entwässerungsvermögen deutlich. Ein hoher GV, und damit verbunden ein hoher organischer Anteil, führt zu einer schlechteren Entwässerbarkeit. Tendenziell werden höhere GVe im Winterschlamm (November- April) dokumentiert. Durch höhere Außentemperaturen im Sommer beginnt der Abbau der organischen Substanz (Hydrolyse) schon im Kanalnetz, bevor das Abwasser ins KW gelangt. Im Sommer findet aufgrund des Schlammalters ein besserer Abbau der

organischen Substanzen statt. Im Winter hingegen fällt dadurch ein größerer Teil an ÜSS an.

Organische Stoffe haben eine höhere Dichte und ein höheres Wasserbindungsvermögen als anorganische Stoffe. Dabei ist jedoch entscheidend, aus welchen Bestandteilen der organische Anteil (z. B. Anteil von EPS und Fetten) besteht. Der GV ($GV = 100\% - GR$) wird außerdem durch den Glührückstand (GR) (Anteil des Sand- und Salzgehaltes) beeinflusst [DWA-M 383, 2018]. Der Sandanteil befindet sich in den letzten Jahren im unauffälligen Bereich. Die Beeinflussung des Chloridgehalts auf die Entwässerbarkeit wird auch hier näher untersucht.

Der GV des FSs ist weiterhin abhängig vom GV des Rohschlammes, vom Abbaugrad im Faulungsprozess, ÜSS-Anteil und Art der Phosphorelimination [DWA-M 383, 2018]. In der **Anlage 5** wird der GV des Rohschlammes und des FSs auf dem KW Rosental mit Hilfe eines Diagramms verglichen. Der GV des FSs ist demnach abhängig vom GV des Rohschlammes. Die Phosphorelimination durch Bio-P hat theoretisch einen negativen Einfluss auf die Entwässerbarkeit. Nach dem Untersuchungsbericht 2019 wurden keine negativen Einflüsse aufgrund dieser Phosphorelimination festgestellt.

Lipophile Stoffe/Fettgehalt

Der Fettgehalt wird auf den organischen Feststoffgehalt bezogen und beschreibt den gelösten Fettanteil einer Probe. Fette sind biologisch überwiegend leicht abbaubar. Wird dadurch ein hoher Fettgehalt im FS festgestellt, kann eine unvollständige Abbaubarkeit im Faulturm Grund dafür sein. Der hohe Fettanteil kann gerade bei Zentrifugen zu einem hohen FHM-Verbrauch einer geringeren Belastbarkeit der Schlammflocken führen. Dabei gilt es, stets die Art des Fettes zu beachten [DWA-M 383, 2018]. Werden, wie im KW Leipzig- Rosental, Co-Substrate (Fettabscheideinhalte) in einem der drei Faulbehälter beschickt, wird die Entwässerbarkeit nach DWA- M 383 ebenso negativ beeinflusst. Die Fetteinspeisung und die TR-Gehalte von 2017 und 2018 werden in der **Anlage 6** dargestellt. Anhand einer Analyse des Diagramms werden keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Entwässerbarkeit und Fetteinspeisung erkannt. Nach den Untersuchungsergebnissen des Ingenieurbüros Dr.-Ing. Ralf Denkert ist der Fettanteil der letzten Jahre sehr ungleichförmig. Durch Untersuchungen der letzten Jahre wurden nach Vergleich von zwei Faulbehältern ebenso ähnlich ungleichförmige Fettanteile beobachtet. Außerdem schwankte der EPS-Anteil unabhängig vom Fettanteil. In der

Schlammuntersuchung 2019 wurden hohe Fett-, Protein- und EPS-Anteile festgestellt und somit ein unvollständiger Abbau der organischen Substanzen nachgewiesen. Nachfolgend wird der EPS-Anteil analysiert.

EPS

EPS werden entweder durch den Abwasserzulauf oder durch Biomassewachstum der anaeroben und aeroben Mikroorganismen ins KW eingebracht. Anaerobe und aerobe Mikroorganismen beginnen in Stresssituationen (bzw. durch Sauerstoffmangel, Nährstoffmangel) EPS zu bilden. Sie bestehen aus langkettigen Eiweiß- und Kohlenhydratverbindungen und binden Wasser stark an [DWA-M 383, 2018]. Der EPS-Anteil wird durch Farb-Mikroskopaufnahmen quantifiziert.

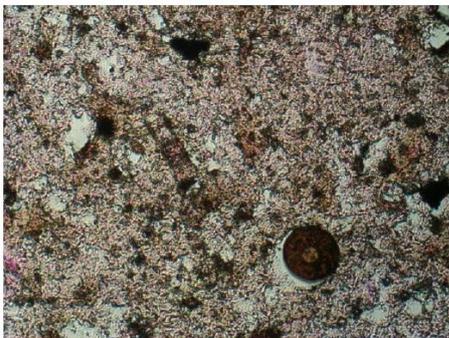


Abb.14: FS , 16.04.19, Nachweis EPS,
Ruthenium-Rot, Hellfeld, ca. 200x

Abbildung 24: Mikroskopisches Bild EPS [nach Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert, 2019]

Durch die Rosa-Färbung werden EPS im FS nachgewiesen. Seit 2014 wurden vermehrt EPS festgestellt. EPS wird auf diesem mikroskopischen Bild in Kategorie mittelmäßig viel /viel eingestuft. Derzeit wird durch den hohen EPS-Anteil und seine wasserspeichernde Fähigkeit die Entwässerbarkeit des Schlammes verschlechtert [Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert, 2019].

Chloridanteil

Chloride binden Wasser und verändern die dynamische Viskosität des Wassers, sodass Zentrifugen durch erhöhte Chloridfracht 2 bis 3 % TR im Austrag verlieren können. Mit Hilfe von der elektrischen Leitfähigkeitsmessung kann die Chloridkonzentration eingeschätzt werden [DWA-M 383, 2018]. Nachfolgend wird über drei Jahre der Zusammenhang zwischen der Chloridkonzentration und deren Einfluss auf die Entwässerbarkeit dargestellt.

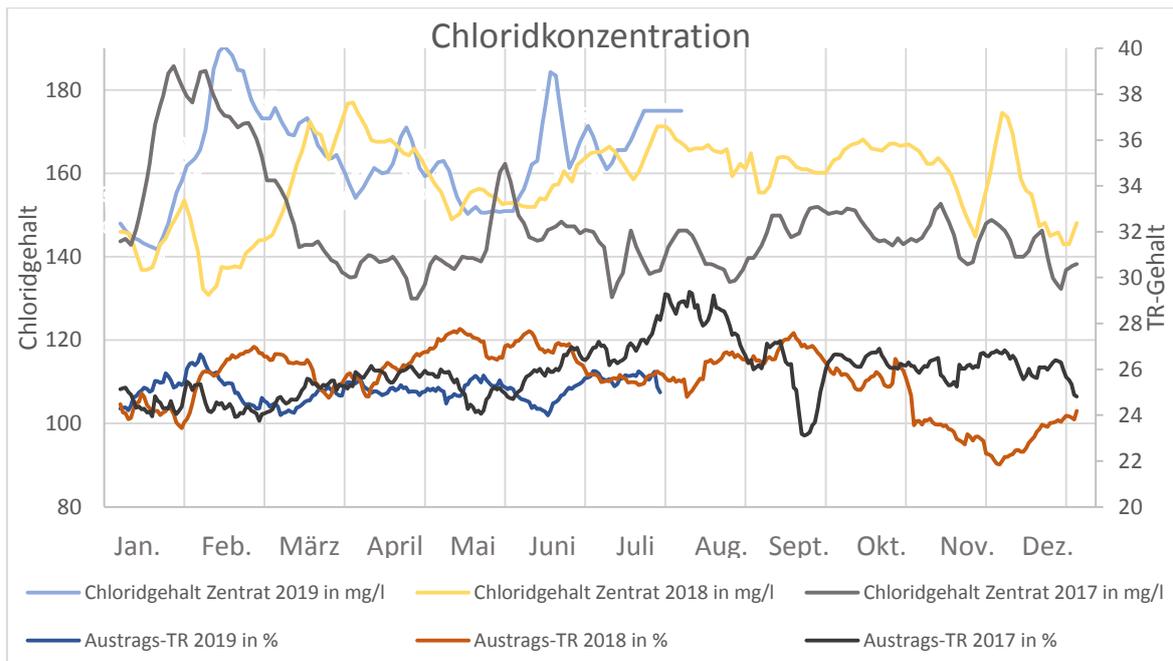


Abbildung 25: Chloridkonzentration KW Rosental

Dabei zu erkennen ist der eindeutige Einfluss zwischen den Ergebnissen der Entwässerbarkeit und dem Chloridgehalt. Steigt der Chloridanteil im Zentrat, verschlechtert sich das Entwässerungsergebnis. Dieser Verlauf ist gerade von Januar bis Juni erkennbar. Nach Auskunft des Ingenieurbüros Dr.-Ing. Ralf Denkert führt ein Chloridgehalt von größer 160 mg/l zu einer starken Verschlechterung der Entwässerung. Eine Erhöhung der Chloridkonzentration im Zentrat wird durch Streusalzeinsatz auf Straßen im Winter, durch Fällmitteleinsatz oder Industrieeinleitung verursacht [Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert, 2019]. Im Januar 2017 und Februar 2018 sind deshalb die hohen Chloridgehalte auf den Einsatz von Streusalz zurückzuführen. In der **Anlage 7** wird der Zusammenhang zwischen Abwasserzulauf und Fällmittel grafisch dargestellt. Demnach wird die größere Chloridkonzentrationen über den Zulauf ins KW eingebracht. In dieser Fracht befinden sich dabei ein Viertel bis ein Drittel der im Trinkwasser vorhandenen Chloridkonzentrationen. Demnach lässt sich die Begrenzung der Chloridfracht schwierig gestalten.

Feinstanteil

Bei der Klärschlammwässerung hat der Feinstanteil einen entscheidenden Einfluss auf die Durchsatzmenge der Zentrifuge, den Austrags-TR-Gehalt und auf den FHM-Verbrauch [DWA-M 383, 2018]. Mit Hilfe des CST-Messgerätes ist es möglich, den Feinstanteil im Schlamm zu untersuchen. Dabei wird die Wasserabgabegeschwindigkeit des Schlammes

bestimmt. Durch die Messung wird die Zeit, die der Schlamm für eine definierte Strecke auf einem bestimmten Filterpapier zurücklegt, bestimmt [HeGo-BIOTEC, 2019]. Ist der Feinstanteil erhöht, steigt der CST-Wert aufgrund des Zusetzens des Filterpapiers an. Der CST-Wert ist demnach eine Kenngröße des FSs zur Beurteilung des Feinstanteils und der Filtrierbarkeit des Schlammes [Bericht zur Schlammuntersuchung, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert, 2019]. Durch die Bestimmung des Feinstanteils kann der Schlamm in Winter- und Sommerschlamm eingeteilt werden. Die jeweiligen jahreszeitlichen Schwankungen der Entwässerbarkeit werden durch die Änderung des Schlammalters und des Abbaus organischer Substanzen, sowie durch die Rohabwasser- und Rohschlammzusammensetzung verursacht. Der Feinstanteil wurde im April 2019 als vergleichsweise unauffälliger hoher Wert dokumentiert und in die Kategorie Winterschlamm eingeordnet. Demnach ist der CST-Wert im Vergleich zu den Werten des Sommerschlammes hoch einzustufen. Ein hoher Feinstanteil beeinflusst die Entwässerbarkeit negativ [Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert, 2019]. Um die jahreszeitlichen Schwankungen des Feinstanteils besser zu beurteilen, wurden über einen definierten Zeitraum von drei Monaten CST-Messungen des FSs durchgeführt. Die Beschreibung des Messgeräts wird nachfolgend dargestellt.

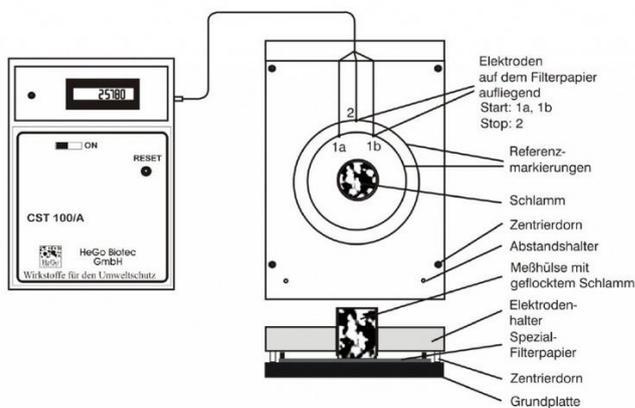


Abbildung 26: CST-Messgerät [nach HeGo-BIOTEC 2019]

Zunächst wurde der FS entnommen. Das CST-Papier wurde in die Messvorrichtung gelegt und die Messhülse mit der dünneren Wandstärke auf das CST-Papier gestellt. Der FS wurde bis zur oberen Kante der Messhülse zugegeben. Nachdem sich der Flüssigkeitsring von Richtung Messhülse ausgebreitet hat, durchquert er den ersten Messpunkt. Ab diesem Punkt wird die Zeit aufgenommen. Durchquert die Flüssigkeit den zweiten Messpunkt, so wird die Messzeit gestoppt. Nachfolgend wird der ausgebreitende Flüssigkeitsring dargestellt.

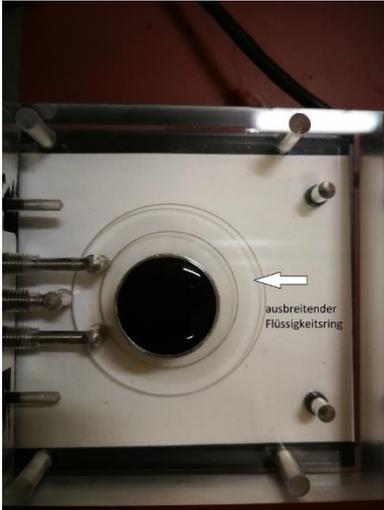


Abbildung 27: CST-Messvorrichtung

Der CST-Wert ist abhängig vom TR-Gehalt der FS-Probe [DWA-M 383, 2018]. Bezogen auf den TR-Gehalt wird die jeweilige Messzeit nachfolgend grafisch dargestellt.

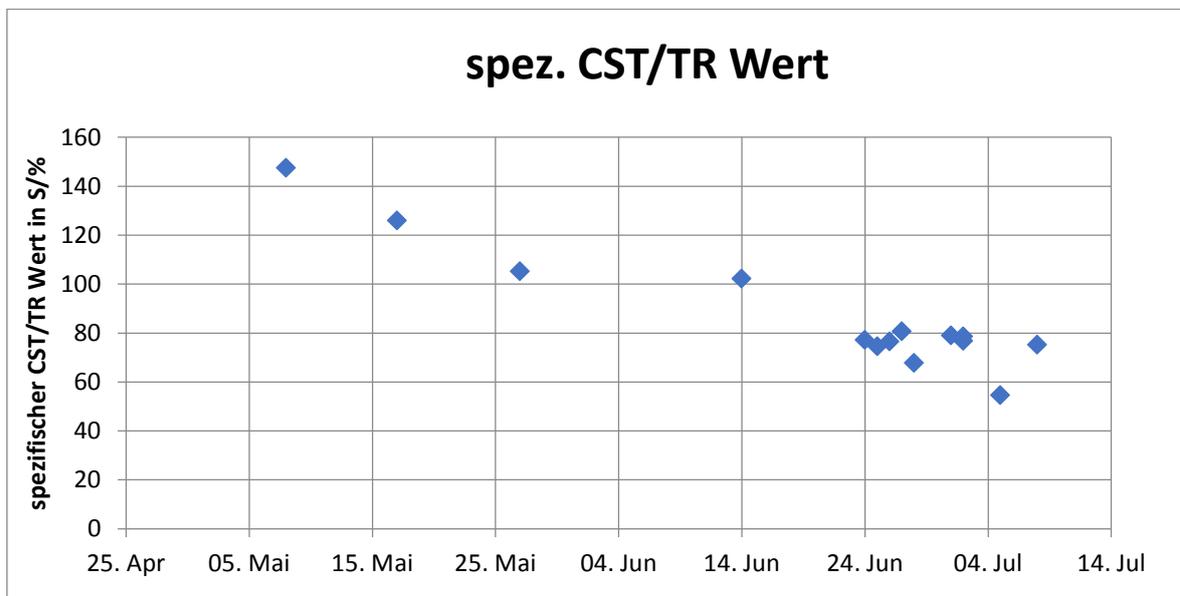


Abbildung 28: Aufgenommene CST-Werte 2019

Durch die Abbildung wird gezeigt, dass der CST-Wert über den Betrachtungszeitraum von Mai 2019 bis Juli 2019 abnimmt. Daraus wird ersichtlich, dass der Feinstanteil im FS sinkt. Durch dieses Ergebnis wird belegt, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Feinstanteil und den jahreszeitlichen Schwankungen gibt. Während der Messungen wurde ein elliptischer Ausbreitungsring auf dem CST-Papier wahrgenommen. Nach einem Telefonat mit dem Hersteller des Messgeräts (HeGo Biotec), wurde auf sein nicht genormtes CST-Filterpapier hingewiesen. Dadurch lassen sich die Messungenauigkeiten der CST-Werte auf das CST-Filterpapier rückschließen.

ÜSS-Anteil

Im Gegensatz zum PS ist der ÜSS schlechter entwässerbar. ÜSS besteht aus Bakterienmasse und EPS. Dadurch wird die Entwässerbarkeit stark beeinflusst. Steigt der ÜSS-Anteil an, wird die Entwässerbarkeit verschlechtert. Durch verkürzte Aufenthaltszeiten im Vorklärbecken und ein hohes Schlammalter des ÜSSs erhöht sich der ÜSS-Anteil. Durch die Faulung wird die Entwässerbarkeit des ÜSSs nicht verbessert [DWA-M 383, 2018]. Nachfolgend wird der jahresdurchschnittliche Verlauf des ÜSS-Anteils dargestellt.

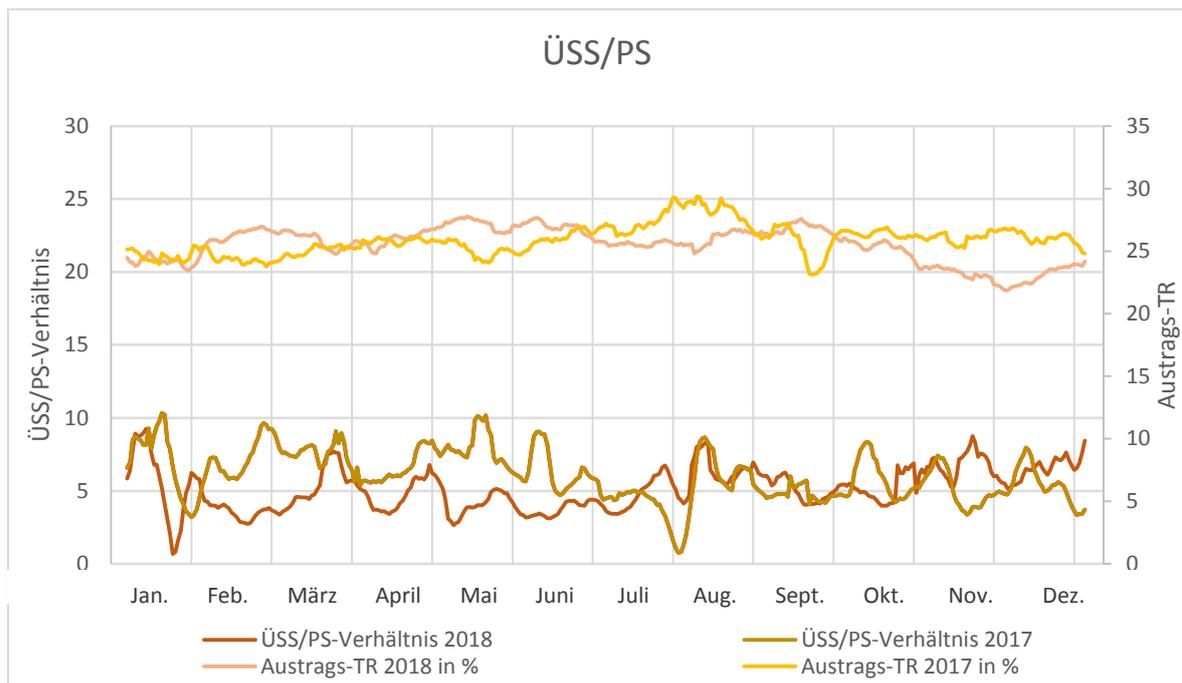


Abbildung 29: ÜSS-Anteil KW Rosental

Wird der Austrags-TR mit dem ÜSS/PS-Verhältnis dargestellt, sind bei erhöhtem ÜSS-Anteil geringere TR-Werte erkennbar. Gerade von Februar bis Juni ist der Zusammenhang zwischen ÜSS-Anteil und Entwässerungsergebnis erkennbar. [Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert, 2019]

6.1.3 Fazit

Die schlechtere Entwässerungseigenschaft auf dem KW Rosental ist demnach abhängig vom

- organischen Anteil
- EPS-Anteil
- Feinstanteil
- Chloridanteil
- ÜSS/PS-Verhältnis.

Das KW mit seiner Auslegung ist einwohner- und frachtbezogen überlastet. Die Belebungsstufe mit einer dadurch erfahrungsgemäß erhöhten Feststoffkonzentration und zeitweise Sauerstoffunterversorgung führt zur Verschlechterung der Belebtschlammigenschaften. Dadurch wird die Schlammbelastung größer und der ÜSS-Anteil erhöht. Der hohe ÜSS-Anteil führt daraufhin zur schlechteren Schlammentwässerung. Gleiches gilt für geringere Außentemperaturen.

Da der Fett-, Protein- und EPS-Anteil durch die Untersuchungen im April als hoch eingestuft wurden, empfiehlt es sich laut dem Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert die Faulbehälter in Reihe zu schalten. In der Vergangenheit wurde diese Empfehlung an einer Technikumsanlage untersucht. Jedoch wurde dabei kein sichtlicher Erfolg verzeichnet.

6.2 Untersuchungen zur maschinenspezifischen Zentrifugeneinstellung

6.2.1 Allgemeine Grundlagen

Um die steigenden Entsorgungskosten zu minimieren, ist es notwendig, die Fahrweise und damit den Austrag der Zentrifugen zu verbessern. Zudem ist eine Optimierung der FHM-Menge zu empfehlen. Außerdem müssen der Energieverbrauch und die Zentratqualität bei den Versuchen zur Zentrifugenoptimierung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde die MSE und deren Parameter durch verschiedene Versuchsreihen untersucht. Die daraus entstandenen Ergebnisse tragen dazu bei, einen Empfehlungsvorschlag zum Betreiben der Zentrifuge 1 vom Typ Alfa Laval ALDEC zu unterbreiten.

6.2.2 Versuchsdurchführung

Bevor bestimmte Betriebsparameter der Zentrifuge 1 für eine Versuchsreihe eingestellt werden, muss gewährleistet werden, dass die eingestellte FHM-Konzentration in der FHM-Anlagenkammer angesetzt wird. Die Schneckenpumpe fördert das FHM-Pulver (FHM-

Spezifikation: eurofloc-PK 65 LP) mit einem festgelegten Fördervolumenstrom in die FHM-Anlagenkammer. Durch Auslitern der FHM-Pumpe wird die genaue FHM-Konzentration sichergestellt. Hierbei wird die Verbindung zwischen FHM-Anlagenkammer und Schneckenpumpe demontiert und ein Messbecher am Austrag der Pumpe befestigt. Um den genauen Förderstrom zu erfassen, wird mit Hilfe des Steuerungsprogramms der Pumpe das Auslitern unterstützt. Nach 60 s schaltet die Pumpe durch Eingabe der Förderdauer im Steuerungsprogramm ab. Die Masse des im Messbecher befindlichen FHMs wird abgewogen. Um ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen, wird das Auslitern mindestens dreimal wiederholt. Der Mittelwert wird gebildet und ins Steuerungsprogramm eingegeben. Des Weiteren wird die gewünschte Konzentration der FHM-Suspension der Anlagenkammer ins Steuerungsprogramm eingespeichert.

Durch das Steuerungsprogramm in der Messwarte der Schlammbehandlung werden die verschiedenen Betriebsparameter eingestellt. Dazu gehören Trommeldrehzahl, Drehmoment und der Volumenstrom des FSs und des FHMs. Dabei werden die Parameter wie Drehmoment und Differenzdrehzahl in kleinen Schritten auf die einzustellende Größe angepasst, um größere Betriebsschwankungen bei der Änderung der Betriebsparameter zu verhindern.

Nachdem die jeweiligen Parameter einer Versuchsreihe eingestellt wurden, wird nach etwa einer halben Stunde Einstellzeit das Produkt der Zentrifuge untersucht. Es wird der entwässerte Schlamm und das Zentrat analysiert. Ersteres wird durch Bestimmung des TR-Gehalts mit Hilfe einer Trocknungswaage untersucht. Damit die Ergebnisse repräsentativ sind, wurde nach fünf Minuten der ersten Probe eine zweite Probe des Schlammes entnommen. Das Zentrat wurde im Zuge der ersten Probenentnahme analysiert. Nach zwei Stunden Sedimentationszeit in einem 1000-ml-Imhoff-Trichter wurde die Menge der abgesetzten Stoffe am Trichter abgelesen. Die Menge der absetzbaren Stoffe wird in der Maßeinheit ml/l angegeben und spiegelt die Zentratbelastung wider. Die Untersuchungen wurden nach einem eigenentwickelten Versuchsplan durchgeführt. Die in der Messwarte einzustellenden Soll-Betriebsparameter und die daraus resultierenden gegenwärtigen Ist-Parameter wie Drehmoment und Differenzdrehzahl werden im Zuge der ersten Probe dokumentiert. Die jeweiligen Parameter, ihre dazugehörigen Werte und die Ergebnistabellen sind der **Anlage 8** zu entnehmen. Die theoretischen Grundlagen dieses Kapitels befinden sich im **Kapitel 4.2**.

6.2.2.1 Versuch Trommeldrehzahl

Betriebsparametereinstellung

Am ersten Tag, dem 15. April 2019, wurde die Versuchsreihe mit unterschiedlich eingestellten Trommeldrehzahlen durchgeführt. Dabei wurden Trommeldrehzahlen von 3000 U/min bis 3300 U/min unter ähnlichen Bedingungen eingestellt. Die festgelegte Grunddifferenzdrehzahl und die daraus entstandenen Ist-Differenzdrehzahlen werden neben den Ist-Drehmomenten bei einem eingestellten Soll-Drehmoment von 11 kNm im nachfolgenden Diagramm dargestellt. Des Weiteren werden Zentratbelastung und Stromverbrauch abgebildet. Die FHM-Konzentration, die Volumenströme des FSs und des FHMs wurden über die Versuchsdauer konstant gehalten, um die verschiedenen Trommeldrehzahlen untereinander vergleichen zu können.

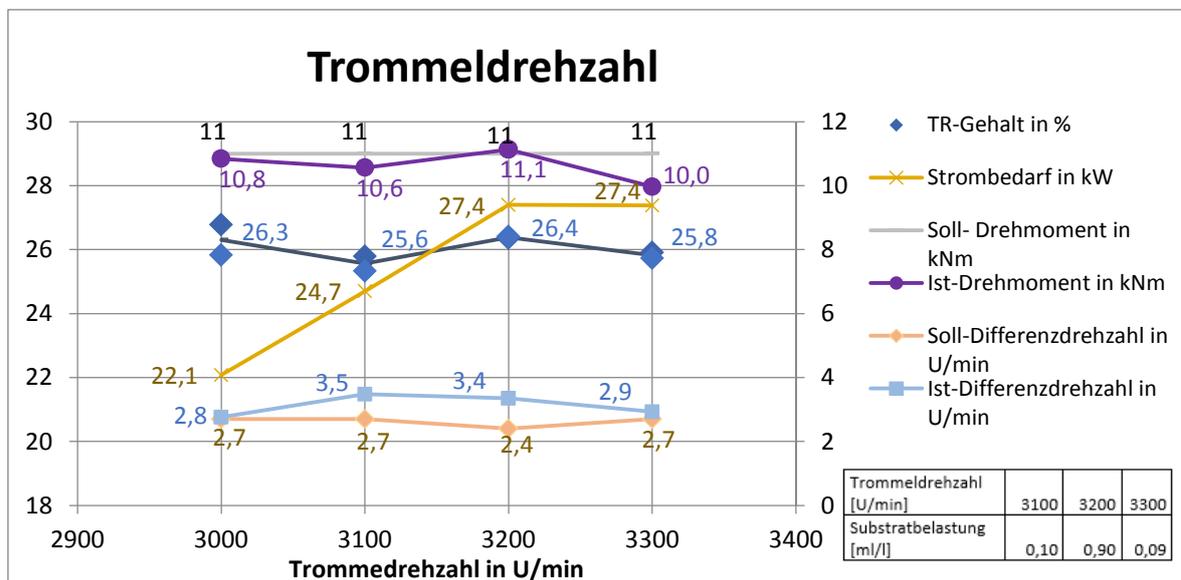


Abbildung 30: Versuchsreihe Trommeldrehzahl

Auswertung der Ergebnisse

Die dargestellte Abbildung zeigt die Abhängigkeit des Trockenrückstandes und dessen maschinenspezifische Einstellungen bei unterschiedlich festgelegten Trommeldrehzahlen. Die Theorie der Zentrifugenparameter, die schon im **Kapitel 4.2** erwähnt wurden, besagt, dass die Erhöhung der Trommeldrehzahl eine Verbesserung des TR-Gehalts und eine Verringerung der Zentratbelastung bewirkt. Jedoch steigt durch zu hohe Trommeldrehzahl der Energieverbrauch und die Schlammflocken werden zerstört. Dadurch steigt die Zentratbelastung wieder an. Diese Verläufe sind sowohl bei den TR-Gehalten als auch bei den Zentratbelastungen nicht erkennbar. Der TR-Gehalt schwankte zwischen 25,3 % TR

und 26,8 % TR und verhält sich unabhängig von der Trommeldrehzahl. Beim Zentratbelastungsverlauf ist ein höherer Wert bei 3200 U/min zu erkennen. Die Ursache für die Erhöhung der Zentratbelastung lässt sich vorerst nicht klären. Vielmehr können nur Möglichkeiten, die zu einer Erhöhung geführt haben, analysiert werden. Zum einen lag beim ersten Versuch, anders als bei den restlichen Versuchen, bei eingestellten 3200 U/min die Grunddifferenzdrehzahl bei 2,4 U/min. Die Ist-Differenzdrehzahl (3,35 U/min) pendelte sich dabei deutlich über der Grunddifferenzdrehzahl ein. Die Ursache für den niedriger eingestellten Wert beim ersten Versuch lag an einem Problem beim Anfahren der Zentrifuge. Es kam dabei zur Verstopfung („Brückenbildung“) in der Feststoffschurre des entwässerten Schlammes. Somit könnte die erhöhte Zentratbelastung auch noch eine Folge des Anfahrtsproblems sein. Die im **Kapitel 4.2** erläuterte Theorie besagt, dass bei steigendem Ist-Drehmoment die Zentratbelastung und der TR-Gehalt steigen. Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass die erhöhte Zentratbelastung sich auf die Abhängigkeit vom Ist-Zustand des Drehmoments zurückführen lässt. Auch der TR-Gehalt ist bei den zwei höchsten Ist-Drehmomenten tendenziell höher. Der Grund für die schwankenden Drehmomente und Differenzdrehzahlen während der Versuchsreihen liegt an der Steuerungseinstellung bzw. an dem eingestellten Regler.

Es wurde erwartet, dass durch Erhöhung der Trommeldrehzahl höhere Reibungskräfte und ein damit höherer Kraftbedarf aufgrund der größeren Getriebebelastung entstehen. Der höhere Kraftbedarf spiegelt sich durch den Energiebedarf wider. Bei diesem Versuch wird dieser Trend sichtbar. Bei einer Trommeldrehzahl von 3300 U/min beträgt der Strombedarf 27,38 kW. Bei einer Trommeldrehzahl von 3000 U/min liegt der Strombedarf bei 22,08 kW. Um die optimale Trommeldrehzahl der Zentrifuge 1 bei geringer Zentratbelastung und hohem TR-Gehalt zu erzielen, müssen verschiedene Zusammenhänge betrachtet werden. Zum einen steigt theoretisch der TR-Gehalt und die Zentratbelastung sinkt mit zunehmender Trommeldrehzahl. Ein steigender TR-Gehalt wurde bei den Trommeldrehzahlen von 3000 U/min zu 3300 U/min nicht sichtbar. Des Weiteren konnte aufgrund von Schwankungen des Drehmoments und der Differenzdrehzahl auch kein sichtbarer Verlauf der Zentratbelastung erkannt werden.

Empfehlungsvorschlag

Falls die Priorität der Zentrifugenoptimierung bei einem geringen Strombedarf liegt, sollte die Trommeldrehzahl so niedrig wie möglich gewählt werden. Aus diesem Grund wird eine Trommeldrehzahl zwischen 3000 U/min und 3100 U/min empfohlen. In diesem Bereich wurden auch keine Verschlechterungen der TR-Gehalte und der Zentratlbelastungen erzielt. Außerdem wäre im Versuch bei einer Grunddifferenzdrehzahl von 2,5 bis 2,6 U/min ein höheres Ist-Drehmoment möglich gewesen. Dadurch hätte der TR-Gehalt verbessert werden können.

6.2.2.2 Versuch Drehmoment

Betriebsparametereinstellung

Am 16. April 2019 wurden unterschiedliche Drehmomente eingestellt. Der TR-Gehalt und die Zentratlbelastung, sowie deren maschinenspezifische Parameter, wurden bei festgelegten 9 kNm, 10 kNm, 11 kNm und 12 kNm dokumentiert. In der nächsten Abbildung werden die Ergebnisse von diesem Versuch dargestellt.

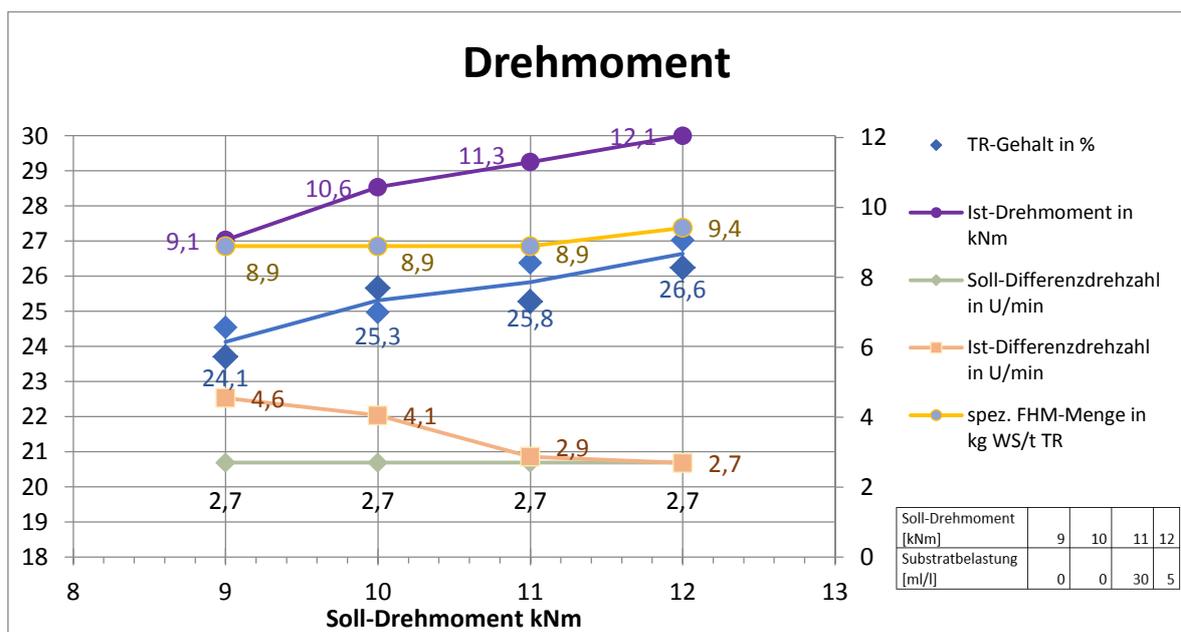


Abbildung 31: Versuchsreihe Drehmoment

Auswertung der Ergebnisse

Die Abbildung zeigt den TR-Gehalt und die maschinenspezifischen Parameter, sowie die Zentratlbelastung im Zusammenhang mit dem Drehmoment. Dabei wurden die Ist-Drehmomente bei eingestellten 9 kNm, 10 kNm, 11 kNm und 12 kNm dargestellt. Mit steigendem Drehmoment nimmt der TR-Gehalt zu. Bei einem festgelegten Drehmoment

von 11 kNm wurde die höchste Zentratbelastung festgestellt. Ein erstes Indiz für eine hohe Zentratbelastung wurde beim Zentratablauf gesichtet. Durch ein Glasrohrstück am Zentratablauf wurde optisch die Zentratqualität beobachtet. Die Veränderung von klarem zu schwarzem Zentrat wurde dadurch wahrgenommen. Da bei eingestellten 12 kNm die Zentratbelastung steigen würde, wurde der Volumenstrom des FHMs erhöht. Daraufhin sank die Zentratbelastung bei 12 kNm auf 5 ml/l. Da die Differenzdrehzahl in Abhängigkeit des Drehmoments gesteuert wird, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen diesen Einstellgrößen. Nach dem Merkblatt DWA-M 366 wird durch das Senken der Differenzdrehzahl und Erhöhung des Drehmoments eine längere Verweilzeit des Schlammes in der Trommel verursacht. Der TR-Gehalt und die Zentratbelastung erhöhen sich entsprechend. In der dargestellten Abbildung wird ersichtlich, dass bei der eingestellten Grunddifferenzdrehzahl von 2,7 U/min die Ist-Differenzdrehzahl mit Erhöhung des Drehmoments sinkt. Der Zusammenhang zwischen Theorie und Praxis stimmt mit diesem Versuch überein. Dieser Trend wird durch den Verlauf des TR-Gehalts sichtbar. Außerdem steigt die Zentratbelastung mit Erhöhung des Drehmoments bei gleichbleibendem FHM-Volumenstrom.

Empfehlungsvorschlag

Es wird empfohlen das Drehmoment auf 11 kNm oder 11,5 kNm einzustellen, um die Zentratbelastung im Gegensatz zu 12 kNm gering zu halten. Dabei sollte der Volumenstrom des FHMs auf 1800 l/h, bei einer konstanten FHM-Konzentration von 0,54 %, erhöht werden. Bei einem Drehmoment von 12 kNm wurde ein erhöhter TR-Gehalt festgestellt. Jedoch wurden sowohl bei einem eingestellten Drehmoment von 12 kNm, als auch nach Erhöhung des FHM-Volumenstroms, kein optimales Zentratergebnis erreicht. Das Sinken der Grunddifferenzdrehzahl auf bspw. 2,5 U/min bei 11 kNm und 12 kNm hätte eine Erhöhung des Ist-Drehmoments zur Folge. Dadurch hätte das Soll-Drehmoment erreicht und der TR-Gehalt noch einmal verbessert werden können.

6.2.2.3 Versuch Wehrdurchmesser

Betriebsparametereinstellung

Am 17. April 2019 wurden verschiedene Wehrdurchmesser eingestellt. Die Zentrifugen Alfa Laval besitzt „Power Plates“, an denen die Wehrdurchmesser eingestellt werden. Diese befinden sich an der Austragsseite des Zentrats. In der nächsten Abbildung sind die „Power Plates“ dargestellt.



Abbildung 32: Zwei „Power Plates“ der Zentrifuge (links) Wehrdurchmesserskala an einem „Power Plates“ (rechts)

Die sechs Power Plates sind im Kreis angeordnet und besitzen ein Schlitz in Richtung des Mittelpunktes der Trommel. Die eingestellten Wehrradien beziehen sich auf den Standardwehrradius. Dieser beträgt 132 mm. An den Power Plates ist eine Skala von -16 bis +16 angebracht, um den Wehrradius einzustellen. Werden die Power Plates beispielsweise in die negative Richtung auf -13 gedreht, so sinkt der Wehrradius auf 125,5 mm.

Am Versuchstag wurden die Wehrdurchmesser -13 mm und -4 mm bei einer Trommeldrehzahl von 3200 U/min eingestellt. Bei einem Wehrdurchmesser von -13 mm lag die eingestellte Grunddifferenzdrehzahl bei 2,2 U/min, bei -4 mm bei 2,6 U/min. Die Ist-Differenzdrehzahl lag zwischen 2,7 U/min und 5 U/min. Das Drehmoment wurde an beiden Wehrdurchmessereinstellungen auf 11 kNm und später auf 12 kNm eingestellt. Am vorherigen Tag wurden Messwerte mit ähnlichen Parametereinstellungen bei einem Wehrdurchmesser von -8 mm und den Drehmomenten von 11 kNm und 12 kNm eingestellt. Diese wurden in die Auswertung mitberücksichtigt. Außerdem wurde am 25. April 2019 und 26. April 2019 der Wehrdurchmesser von -6 mm und -10 mm eingestellt, um weitere Schlussfolgerungen zur Zentrifugenoptimierung zu ziehen. Die jeweiligen Parameter sind aufgrund der großen Datenmenge in **Anlage 8** wiederzufinden. In der **Abbildung 33** werden die Ergebnisse grafisch dargestellt.

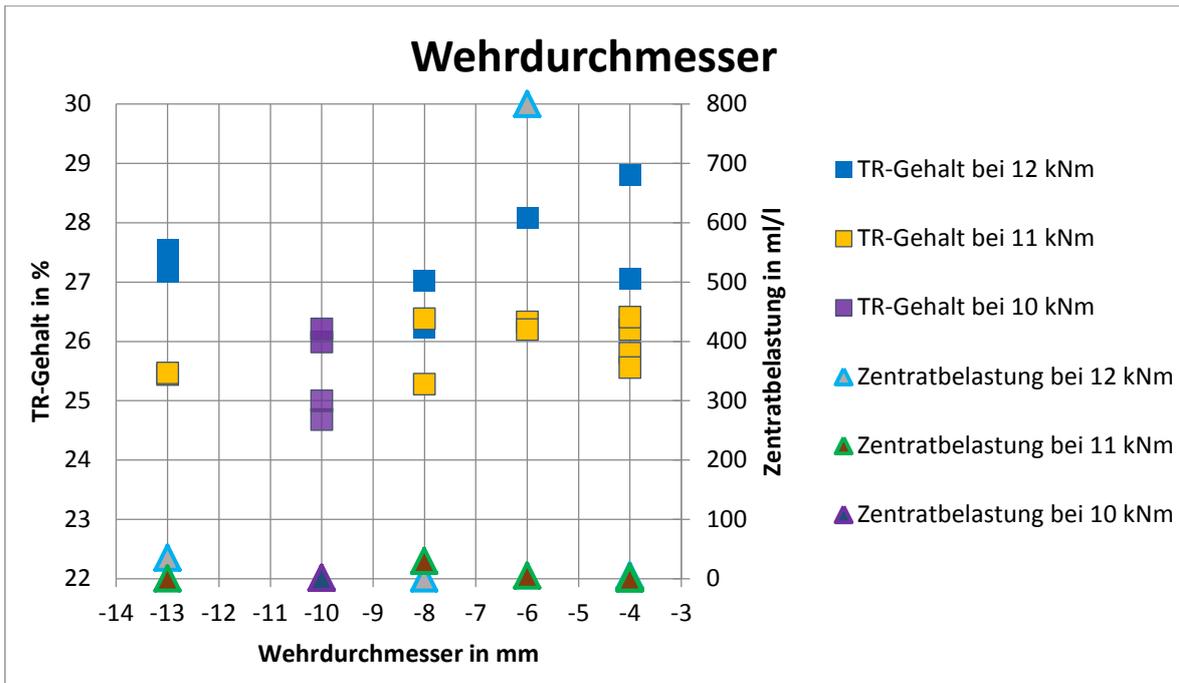


Abbildung 33: Versuchsreihe Wehrdurchmesser

Auswertung der Ergebnisse

Im dargestellten Diagramm werden verschiedene TR-Gehalte und Zentratbelastungen in Abhängigkeit der Wehrdurchmesser von -4 mm bis -13 mm dargestellt. Bei einem Drehmoment von 12 kNm und einem steigenden Wehrdurchmesser von -13 mm auf -8 mm sinkt der TR-Gehalt. Mit darüber hinaus größer werdendem Wehrdurchmesser steigt der TR-Gehalt wieder an. Bei einem Drehmoment von 11 kNm ist kein deutlicher Trend des TR-Gehalts zu erkennen. Der geringste TR-Gehalt lag bei einem Wehrdurchmesser von -8 mm. Beim Wehrdurchmesser von -10 mm und einem Drehmoment von 10 kNm wurde auch kein verbesserter TR-Gehalt erzielt.

Nach der Theorie steigen der TR-Gehalt und die Zentratbelastung mit größer werdendem Wehrdurchmesser. Dieser Verlauf ist bei diesem Versuch nicht durchgängig erkennbar. Die maximale Zentratbelastung entstand trotz erhöhter FHM-Menge bei einem Drehmoment von 12 kNm und einem Wehrdurchmesser von -6 mm.

Des Weiteren wurden auch bei 11 kNm und einem Wehrdurchmesser von -6 mm Probleme mit dem Verlauf der Differenzdrehzahl festgestellt. Die Differenzdrehzahl stieg und das Zentrat wurde schwarz, später wurde es wieder klar. Weitere erhöhte Zentratbelastungen entstanden bei einem Wehrdurchmesser von -13 mm und einem Drehmoment von 12 kNm sowie bei einem Wehrdurchmesser von -8 mm und einem Drehmoment von 11 kNm. Des

Weiteren wurden bei einem Wehrdurchmesser von -4 mm auch schwankende Farbverläufe von schwarz auf klar beobachtet.

Tendenziell wurden steigende TR-Gehalte bei kleineren Wehrdurchmessern von -6 mm und -4 mm verzeichnet. Die Ursache für diese un stetigen Verläufe der TR-Gehalte lässt sich vorerst nicht klären.

Beim Drehmoment von 12 kNm und einer nahezu konstanten Grunddifferenzdrehzahl wurde zwischen den Wehrdurchmessern eine Tendenz bei der Regelung der Zentrifuge erkennbar. Das Ist-Drehmoment erreichte nicht dauerhaft das Soll-Drehmoment. Bei hoher Ist-Differenzdrehzahl und sinkendem Ist-Drehmoment wurden deutlich höhere TR-Gehalte erzielt. Die Ursache für diesen Verlauf lässt sich tendenziell nur auf die Betriebsschwankungen zurückführen, da sich nach den theoretischen Grundlagen der Zentrifugenfahrweise kein anderer Zusammenhang erkennen lässt. Verdeutlicht werden diese Schwankungen durch die **Abbildung 34**.

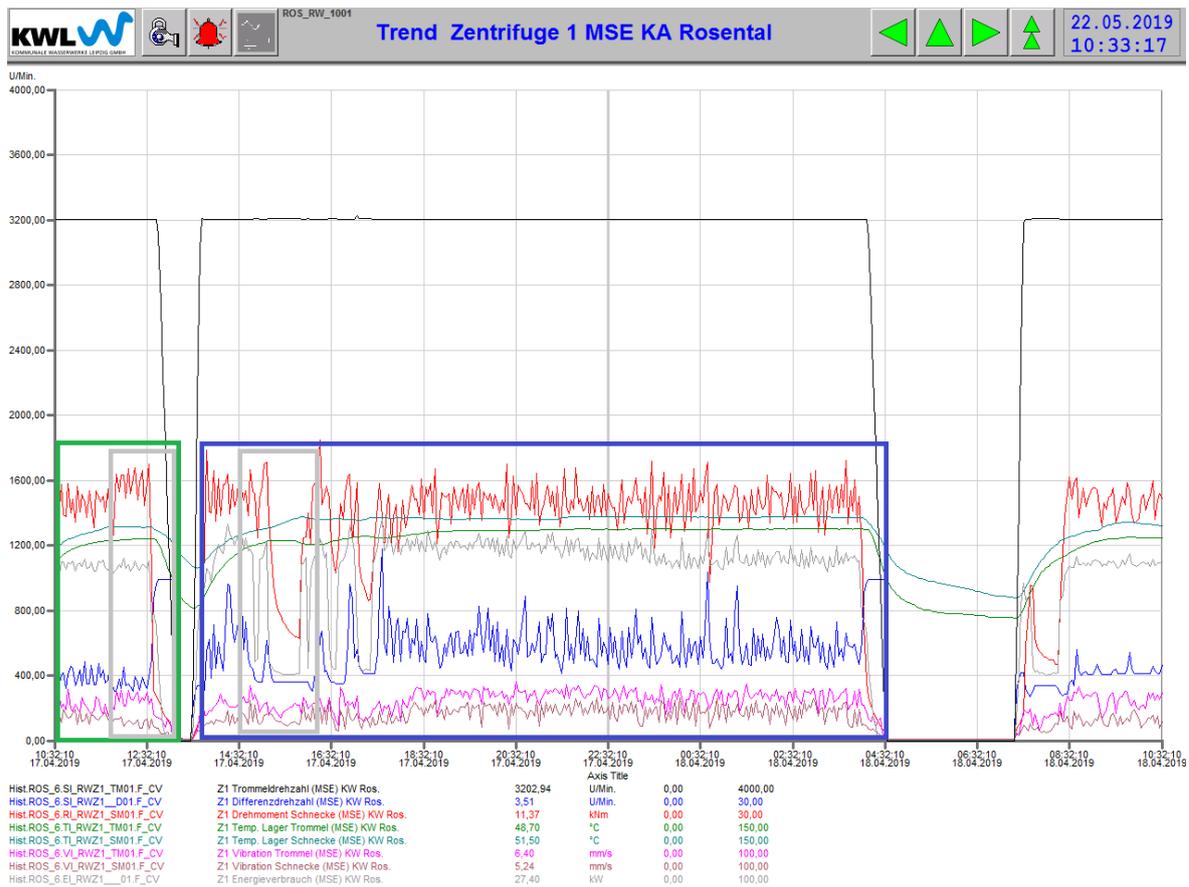


Abbildung 34: Verlauf der Betriebsparameter 17.04.2019; Wehrdurchmesser -13 mm (grüner Umriss;) & -4 mm (blauer Umriss); Drehmoment 12 kNm (grauer Umriss)

Dargestellt werden in der Abbildung die für diesen Versuch relevanten, minutlichen Messwerte der Trommeldrehzahl, der Differenzdrehzahl, des Drehmoments und des dazugehörigen Energieverbrauchs. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Zentrifuge starken Schwankungen unterliegt. Besonders bei der Einstellung von 12 kNm (12:30 Uhr und 15 Uhr) sind starke Schwankungen erkennbar. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bei einem Drehmoment von 12 kNm die Zentrifuge keine optimale Betriebsstabilität aufweist.

Um eine größere Vergleichbarkeit zu erzielen, wurde der Wehrdurchmesser von -4 mm und -13 mm vom Schichtpersonal einen Monat später noch einmal eingestellt. Das Ziel dabei war die Analyse eines stündlich gemessenen TR-Gehaltes über einen längeren Zeitraum. Bei einem Wehrdurchmesser von -4 mm, einem Drehmoment von 11 kNm und einer Trommeldrehzahl von 3200 U/min wurde ein Mittelwert der TR-Gehalte von 26,63 % erzielt. Bei einem Wehrdurchmesser von -13 mm und ähnlichen Betriebseinstellungen wurde hingegen ein Mittelwert der TR-Gehalte von 24,8 % dokumentiert. Des Weiteren wird im Folgenden die Mittelwerte von allen aufgenommenen TR-Gehalten in den Monaten April und Mai 2019 ohne Berücksichtigung der Betriebsparametereinstellungen dargestellt.

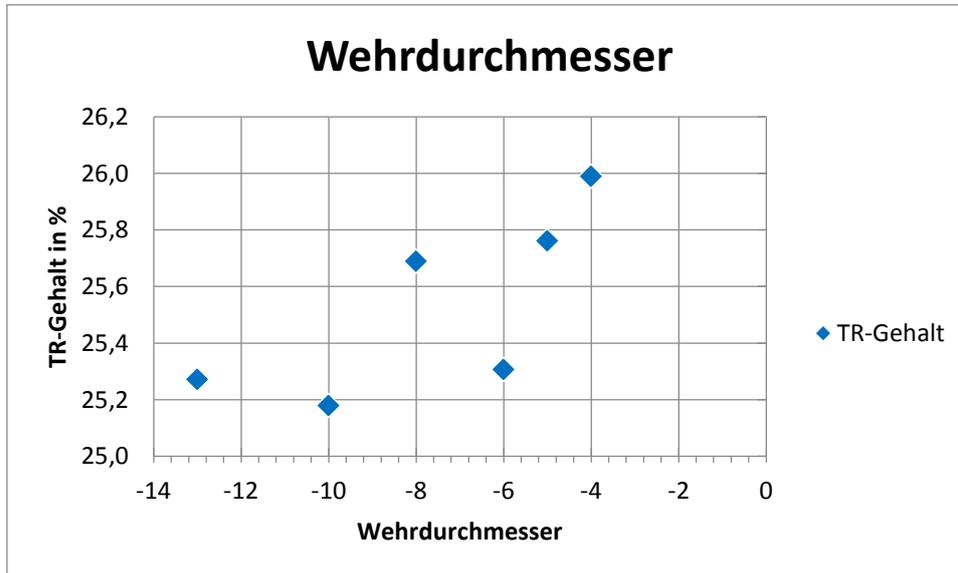


Abbildung 35: Wehrdurchmesseranalyse über einen größeren Zeitraum ohne Berücksichtigung der eingestellten Zentrifugeneinstellungen

Durch diese Abbildung wird ersichtlich, dass bei größerem Wehrdurchmesser ein größerer TR-Gehalt im Austrag erzielt wird. Jedoch wurde bei den größeren Wehrdurchmessern die Zentrifugbelastung schlechter. Aus diesem Grund wurde bei einem Wehrdurchmesser von -8 mm das optimalste Ergebnis in Bezug auf TR-Gehalt und Zentrifugbelastung bestimmt.

Empfehlungsvorschlag

Durch Betrachtung der TR-Gehalte und der Zentraltbelastung wird ein Wehrdurchmesser von -8 mm bei einem Drehmoment von 11 kNm, einer Differenzdrehzahl von 2,6 U/min und einer FHM-Menge von 1700 m³/h empfohlen. Zwar wurde bei einem Wehrdurchmesser von -8 mm auch ein geringer TR-Gehalt festgestellt, jedoch bewegt sich der Mittelwert des TR-Gehaltes, im Gegensatz zu anderen Wehrdurchmessern, im oberen Bereich.

Es wurden große TR-Gehalte bei einem Drehmoment von 12 kNm dokumentiert. Jedoch ist im Vergleich zu 11 kNm die Betriebsstabilität und Zentraltbelastung deutlich schlechter. Aus diesem Grund wird das Drehmoment von 11 kNm empfohlen.

Durch nochmaliges Wiederholen von diesem Versuch wurden bessere TR-Gehalte bei einem Wehrdurchmesser von -4 mm erzielt. Bei einem Wehrdurchmesser von -13 mm ist der TR-Gehalt geringerer im Vergleich zu den Vorversuchen. Da jedoch eine schwankende Zentraltbelastung sowohl bei einem Wehrdurchmesser von -4 mm als auch bei -13 mm beobachtet wurde und die Zentraltbelastung eine größere Priorität besitzt, wird ein Wehrdurchmesser von -8 mm empfohlen.

6.2.2.4 Versuch Flockungshilfsmittelmenge

Betriebsparametereinstellung

Am 18. April 2019 wurden verschiedene FHM-Mengen eingestellt, um deren Abhängigkeit zum TR-Gehalt zu analysieren. Der Wehrdurchmesser wurde auf -13 mm eingestellt, da dieser bei vorherigen Versuchen einen der höchsten TR-Gehalte erzeugte. Der FHM-Volumenstrom wurde von 1270 l/h auf 2200 l/h verändert. Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt.

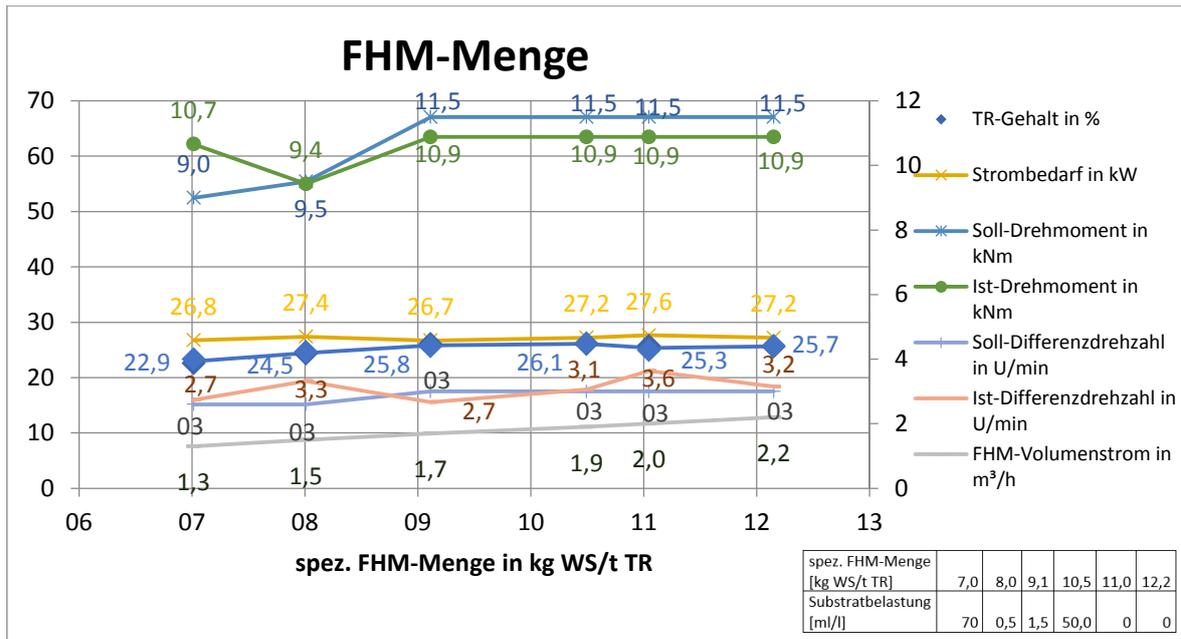


Abbildung 36: Versuchsreihe Dosiermenge FHM

Auswertung der Ergebnisse

In dieser Abbildung sind der Verlauf des TR-Gehaltes, die maschinenspezifischen Parameter und die Zentratbelastung in Abhängigkeit der spezifischen FHM-Menge zu erkennen. Die spez. FHM-Menge wird wie folgt definiert:

$$\text{spez. FHM - Menge [kgWS/t TR]} = \frac{\dot{V}_{FHM} \left[\frac{l}{h} \right] * c_{FHM} [\%]}{\dot{V}_{FS} \left[\frac{m^3}{h} \right] * c_{FS-TR} [\%]} \quad [4]$$

Beispiel:

$$\text{spez. FHM - Menge} \left[\frac{kgWS}{t TR} \right] = \frac{1500 \frac{l}{h} * 0,54\%}{30 \frac{m^3}{h} * 2,8\%} = 9,64 \text{ kg} \frac{kg WS}{t TR}$$

\dot{V}_{FHM} Volumenstrom des FHM's

c_{FHM} Konzentration der FHM

\dot{V}_{FS} Volumenstrom des Faulschlammes

c_{FS-TR} TR-Gehalt des Faulschlammes

Durch Änderung des FHM-Volumenstromes ergibt sich eine Erhöhung des TR-Gehaltes bis zu einer spezifischen FHM-Menge von etwa 9,8 kgWS/t TR bis 10,5 kgWS/t TR. Durch einen höher eingestellten FHM-Volumenstrom kann eine Überdosierung des FHM's und damit eine schlechte Zentratqualität sowie ein konstanter bis sinkender TR-Gehalt

entstehen. Bei einer Überdosierung gelangt das FHM in das Zentrat, welches für die Prozesswasserbehandlung (Deammonifikation) negative Auswirkungen hat. Aus diesem Grund ist die Zentratqualität und damit auch die optimale FHM-Menge ein entscheidender Faktor der Schlammmentwässerung für das KW Rosental. Die maximal entstandene Zentratbelastung liegt bei einer spez. FHM-Menge von 7 kgWS/t TR und entstand aufgrund des zu geringen FHM-Volumenstroms. Bei der Unterdosierung des FHMs verschlechtert sich neben der Zentratqualität auch der TR-Gehalt und der Feststoff-Abscheidegrad. Theoretisch müsste eine Verringerung der Zentratbelastung bis zum Überflockungspunkt erkennbar sein. Dieser Trend ist jedoch nicht eindeutig erkennbar. In der **Abbildung 37** ist die Zentratbelastung von zwei unterschiedlich eingestellten FHM-Mengen dargestellt.

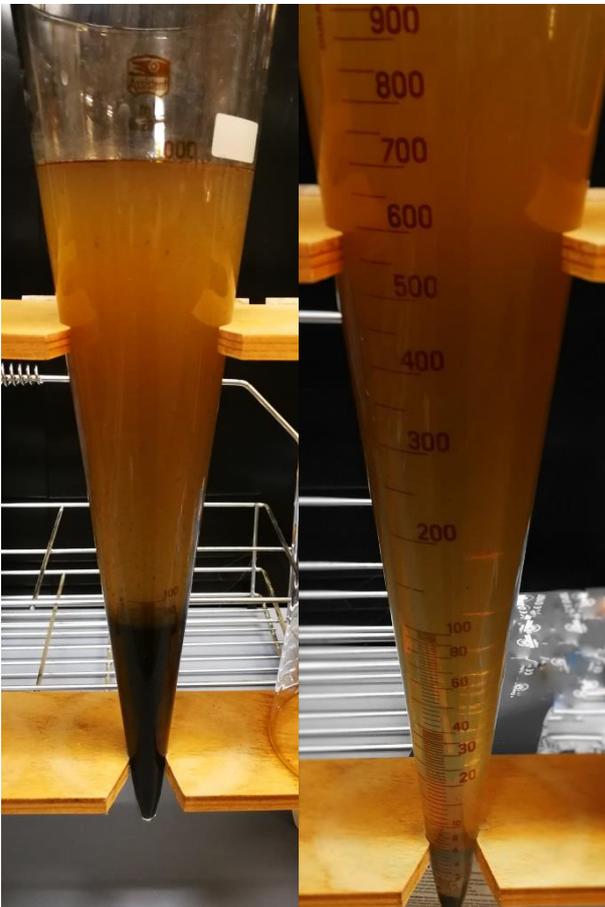


Abbildung 37: Zentratbelastung bei 7 kgWS/t TR (links) und 8 kgWS/t TR (rechts)

In der dargestellten Abbildung ist der Unterschied zwischen der Zentratbelastung bei einer spez. FHM-Menge von 7 kgWS/t TR und 8 kgWS/t TR zu erkennen. Jedoch wurde bei einer spez. FHM-Menge von 10,5 kgWS/t TR eine höhere Zentratbelastung beobachtet. Der Grund für diese hohe Zentratbelastung könnte an den Betriebsschwankungen liegen,

da es sich bei der spez. FHM-Menge von 10,5 kgWS/t TR um die erste Versuchsreihe des Messtages handelte - denn in der Nacht vom 18. April 2019 wurden ähnliche Schwankungen des Zentrats von klar auf trüb verzeichnet.

Empfehlungsvorschlag

Die optimale spez. FHM-Menge wurde bei einem Wert zwischen 9,1 kgWS/t TR und 10,5 kgWS/t TR verzeichnet. Die hohe Zentratsbelastung bei einer spez. FHM-Menge von 10,5 kgWS/t TR ließ sich auf den schwankenden Betriebszustand im Messzeitraum zurückführen. Nach dem Untersuchungsbericht vom Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert wurde eine optimale FHM-Menge von 10-12,5 kgWS/t TR ermittelt. Dieses Ergebnis stimmt mit den Versuchsergebnissen an der Zentrifuge teilweise überein, denn bei einer höheren spez. FHM-Menge von 10,5 kgWS/t TR wurden geringfügig verringerte TR-Gehalte beobachtet. Bei höheren spez. FHM-Mengen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das FHM überdosiert wird und zur Verschlechterung der Betriebsfahrweise der Prozesswasserbehandlung führt.

6.2.2.5 Versuch Faulschlamm-Volumenstrom

Betriebsparametereinstellung

Am 22. April 2019 wurde der FS-Volumenstrom variiert. Bei einem Wehrdurchmesser von 13 mm und einem Soll-Drehmoment von 11 kNm wurde dieser Versuch durchgeführt. Die entstandenen Ergebnisse sind im folgenden Diagramm erkennbar sind.

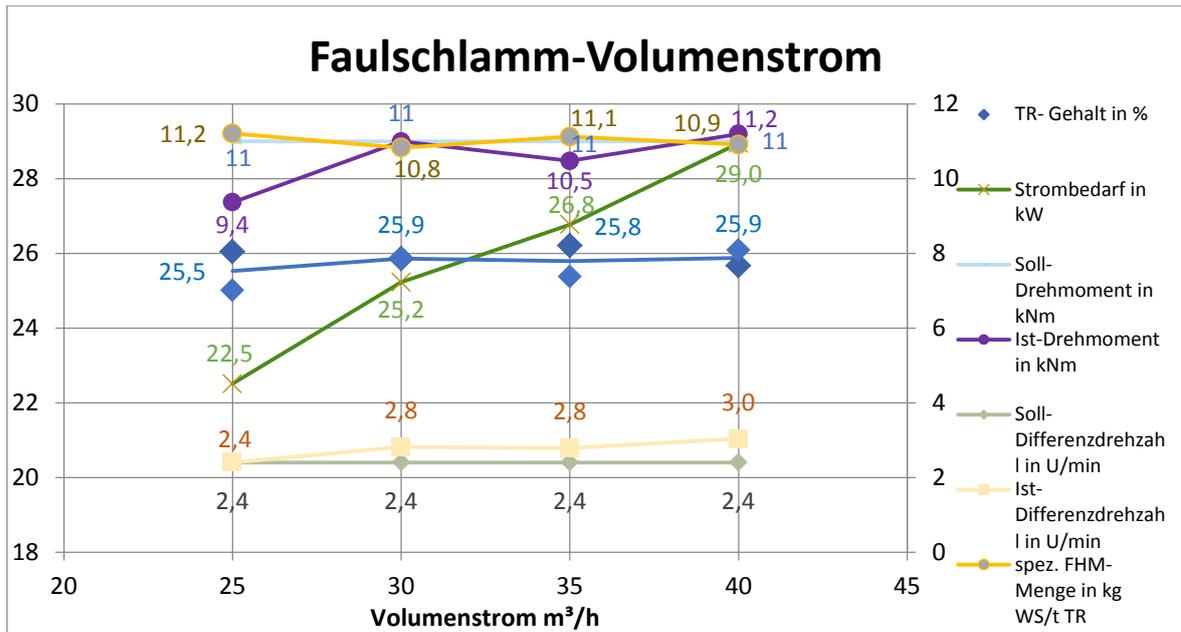


Abbildung 38: Versuchsreihe Faulschlamm-Volumenstrom

Auswertung der Ergebnisse

In der **Abbildung 38** werden der TR-Gehalt, die maschinenspezifischen Parameter und die Zentratlbelastung in Abhängigkeit des FS-Volumenstroms dargestellt. Der TR-Gehalt und die Zentratlbelastung blieben zwischen 25 bis 40 m^3/h nahezu konstant. Ein spezifischer Trend konnte hierbei also nicht erkannt werden.

Theoretisch müsste durch die FS-Volumenerhöhung die Verweilzeit des Schlammes und der Produktspiegel sinken und das Zentrat sich verschlechtern. Durch den daraus resultierenden, sinkenden hydraulischen Druck in der Zentrifuge müsste ein niedrigerer TR-Gehalt mit steigendem FS-Volumenstrom entstehen.

Die bei diesem Versuch verwendete Zentrifuge wurde für einen üblichen Schlammumsatz von 30 m^3/h bis 60 m^3/h ausgelegt [Technische Beschreibung Zentrifuge, Alfa Laval]. Bei 25 m^3/h erhöht sich dazu gegenläufig die Wahrscheinlichkeit, dass der TR-Gehalt aufgrund des sinkenden Feststoffmassedruckes sinkt. Im Gegensatz dazu würde bei geringerer Schlammmenge die Differenzdrehzahl sinken, was zu einer Erhöhung des TR-Gehalts führt. Aus diesem Grund ist eine Interpretation der Ergebnisse hierbei schwierig, da verschiedene Prozessparameter bedingt oder stark den TR-Gehalt beeinflussen. Ein nach der Theorie verlaufender Trend wäre durch die Anpassung der Grunddifferenzdrehzahl möglich. Durch diese Einstellung bei dem Volumenstrom von 25 m^3/h , hätte das Soll-Drehmoment von 11 kNm erreicht werden müssen. Der TR-Gehalt bei 25 m^3/h wäre dadurch gestiegen. Durch Erhöhung des FS-Volumenstroms ist eine

Erhöhung des FHM-Volumenstroms notwendig, damit die erforderliche Zentratqualität gewährleistet wird. Bei dieser Versuchsreihe entstand keine Zentratbelastung, da der FHM-Volumenstrom mit der Erhöhung des FS-Volumenstroms von 1450 l/h auf 2250 l/h kontinuierlich erhöht wurde. Neben den Versuchen ist ein weiterer Zusammenhang zu berücksichtigen. Mit sinkendem FS-Volumenstrom ist es möglich, das Soll-Drehmoment zu erhöhen, da die Verweilzeit steigt. Durch Auswertung der TR-Gehalte über den Zeitraum Januar 2019 bis Juni 2019, wurde folgender Trend erkannt:

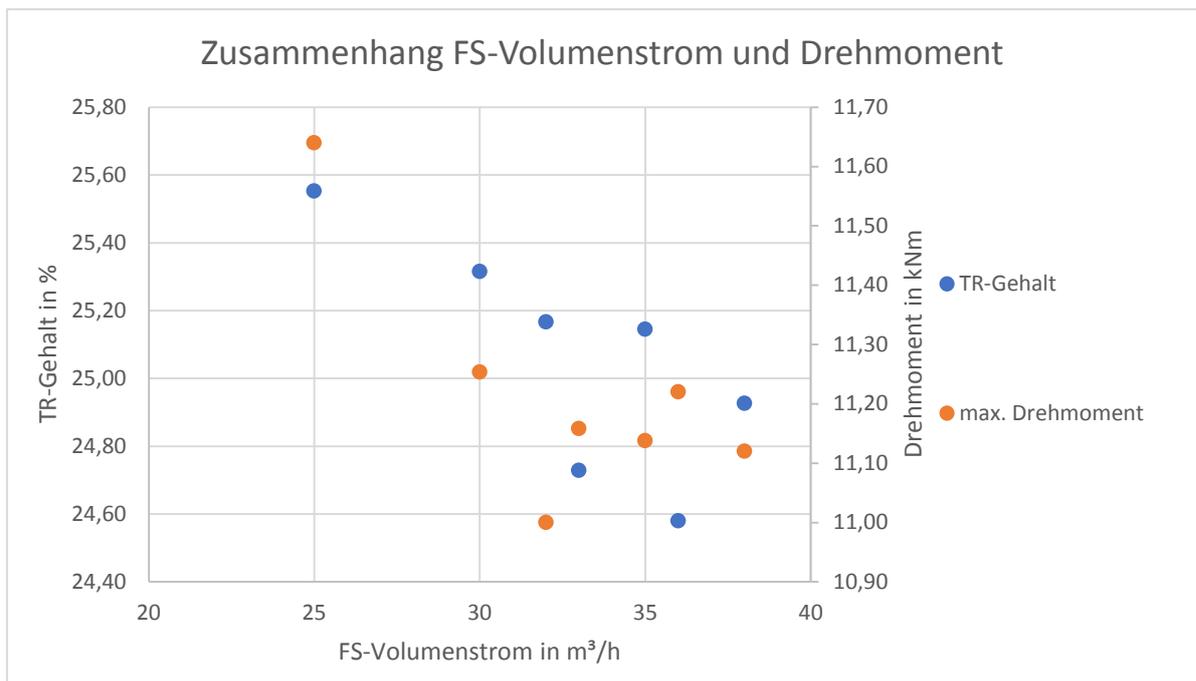


Abbildung 39: Zusammenhang FS-Volumenstrom und Drehmoment

Dargestellt wird der TR-Gehalt und Drehmoment in Abhängigkeit des FS-Volumenstroms. In der Datensammlung wurden die höchstmöglichen Drehmomenteinstellungen berücksichtigt. Dadurch wird ersichtlich, dass mit geringerem FS-Volumenstrom höhere Drehmomente einstellbar sind und somit höhere TR-Gehalte erzielt werden konnten.

Empfehlungsvorschlag

Durch den Versuch wurde erkannt, dass der FS-Volumenstrom keinen direkten Einfluss auf den TR-Gehalt hat. Durch Erhöhung des FHM-Volumenstroms mit steigendem FS-Volumenstrom wurde keine Zentratbelastung erzielt. Aus diesem Grund ist eine Volumenstromeinstellung zwischen 25 m³/h bis 40 m³/h mit steigendem FHM-Volumenstrom realisierbar. Jedoch wird aufgrund der Datensammlung die Einstellung im

niedrigeren FS-Volumenstrom empfohlen, da das Drehmoment und damit verbunden höhere TR-Gehalte erreicht werden können.

6.2.2.6 Versuch FHM-Konzentration

Betriebsparametereinstellung

Am 23. April 2019 und 24. April 2019 wurde in der Zentrifuge 1 FHM mit unterschiedlichen FHM-Konzentrationen gefördert. Es wurden an der FHM-Anlage nach dem jeweiligen Auslitern die FHM-Konzentrationen von 0,4 % bis 0,7 % eingestellt. Das Steuerungsprogramm der FHM-Anlage dosierte daraufhin das pulverartige FHM in die mit Wasser gefüllten Kammern der FHM-Anlage. Der Wehrdurchmesser blieb konstant auf 13 mm. Der FS-Volumenstrom blieb über die Versuchszeit konstant auf eingestellten 35 m³/h. Der FHM-Volumenstrom wurde nach den jeweiligen FHM-Konzentrationen eingestellt. In der **Abbildung 40** werden die Ergebnisse dargestellt.

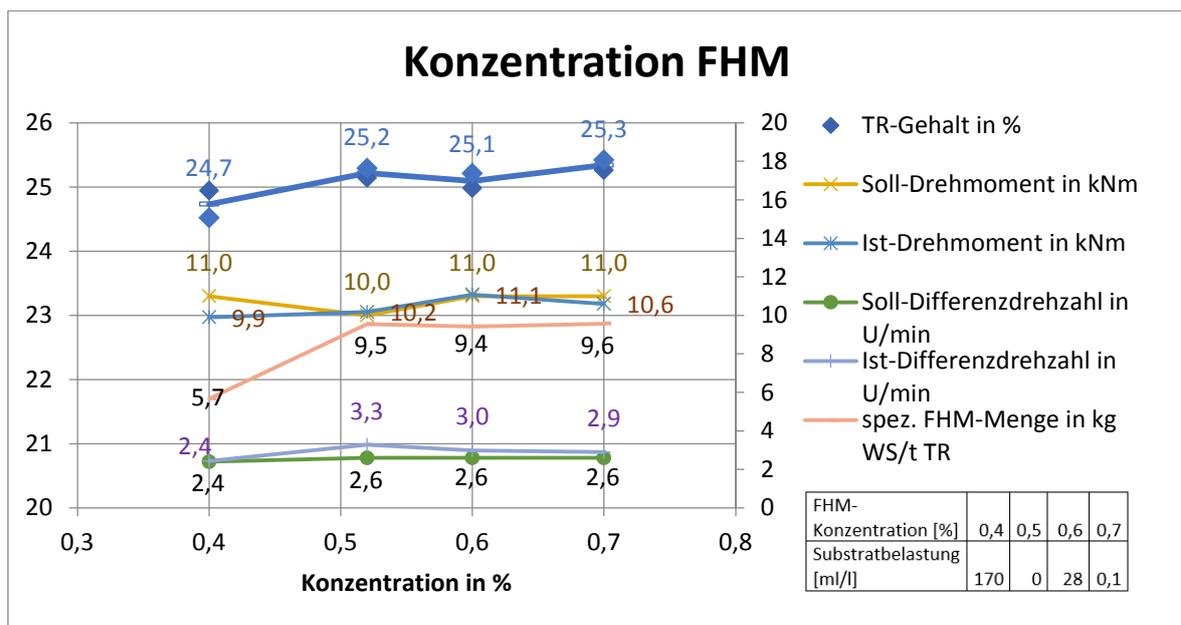


Abbildung 40: Versuchsreihe FHM-Konzentration

Auswertung der Ergebnisse

In der Abbildung werden der TR-Gehalt und die maschinenspezifischen Parameter in Abhängigkeit vom TR-Gehalt dargestellt. In der Darstellung ist ein leichter Anstieg des TR-Gehaltes mit zunehmender FHM-Konzentration erkennbar. Dieses Ergebnis spiegelt die Erfahrungswerte von früheren Versuchen wider. Je höher die FHM-Konzentration ist,

umso größer wird der TR-Gehalt. Dieser Trend wird vor allem durch das eingesetzte FHM und durch den FS beeinflusst.

Eine Erhöhung der FHM-Konzentration erhöht jedoch auch die Wahrscheinlichkeit des Festfahrens der Zentrifuge. Aus diesem Grund wird die Erhöhung der FHM-Konzentration begrenzt.

Bei einer FHM-Konzentration von 0,4 % wurde neben einem etwas geringeren TR-Gehalt eine höhere Zentratbelastung beobachtet. Dabei lag der Ist- unter dem Soll-Drehmoment, sodass die erhöhte Zentratbelastung daraus resultieren könnte. Des Weiteren wurde bei der FHM-Konzentration von 0,4 % eine andere Grunddifferenzdrehzahl eingestellt, wodurch sich die Vergleichbarkeit mit den anderen Versuchsergebnissen als schwierig gestalten lässt. Bei der FHM-Konzentration von 0,6 % wurde eine Zentratbelastung von 28 ml/l festgestellt. Da die erste Einstellung des Versuchstages die FHM-Konzentration von 0,6 % gewesen ist, könnte die höhere Zentratbelastung die Folge der Betriebsschwankungen beim Anfahren der Zentrifuge sein.

Überdosierungstest

Um zu erkennen, ob das FHM bei diesem Versuch überdosiert wird, wurde ein weiterer Test durchgeführt. Bei einer Überdosierung gelangt ein Teil des FHMs ins Zentrat. Bei dem Test wird im labortechnischen Maßstab eine Zentratprobe entnommen. Durch Zudosierung einer geringen Menge an FS müssten sich im Zentrat große Schlammflocken aufgrund des vorhandenen FHMs bilden. Bei einer FHM-Konzentration von 0,52 % und einer spez. FHM-Menge von 9,54 kgWS/t TR wurden 20 ml FS in den 1000 ml Imhofftrichter gegeben. Da sich dort keine großen Flocken bildeten, wurden zusätzlich 100 ml FHM zugegeben, um einen Effekt zu erkennen. In der nächsten Abbildung werden die Ergebnisse dargestellt.



Abbildung 41: Flockenbildungstest links: keine Flockenbildung rechts: Flockenbildung durch zusätzliche Dosierung von FHM

In der Abbildung ist zu erkennen, dass sich nur durch zusätzliche Dosierung von FHM große Flocken im Zentrat bilden. Dadurch wird ersichtlich, dass bei einer FHM-Konzentration von 0,52 % und einer spez. FHM-Menge von 9,54 kgWS/t TR das FHM nicht überdosiert wurde. Auch bei den weiteren Konzentrationen kam es zu keiner Überdosierung.

Empfehlungsvorschlag

Es wird eine FHM-Konzentration zwischen 0,52 % und 0,7 % empfohlen. Nach dem Merkblatt DWA-M 350 werden im Allgemeinen in KWn FHM-Konzentrationen von 0,1 % bis 0,5 % eingesetzt. Demnach werden größere FHM-Konzentrationen aufgrund des Festfahrens der Zentrifuge nicht empfohlen. Durch eine bessere Drehmomenteinstellung bei der FHM-Konzentration von 0,52 % wäre ein höherer TR-Gehalt möglich. Aus diesem Grund wird diese FHM-Konzentration bevorzugt. Im Vergleich zum FHM-Volumenstrom hat die FHM-Konzentration einen geringeren Einfluss auf den TR-Gehalt. Der Grund dafür liegt im größeren Einfluss des FHM-Volumenstroms bei der Berechnung der spez. FHM-Menge. Durch das Zusammenspiel des FHM-Volumenstroms und der FHM-Konzentration, kann die optimale FHM-Dosierung realisiert werden.

6.2.3 Fazit

In der **Tabelle 2** wird das Gesamtergebnis der Versuche dargestellt. Dabei wurden die Praxisergebnisse bewertet, auf Verbesserungsvorschläge hingewiesen und Empfehlungseinstellungen vorgeschlagen.

Tabelle 2: Gesamtergebnis des Versuchs Zentrifugenparameter

	Theorie		Bewertung der Versuchsergebnisse im Vergleich mit der Theorie	Empfehlung	nachträgliche Verbesserungsvorschläge
Trommel-drehzahl	Erhöhung der Trommeldrehzahl			3000 U/min - 3100 U/min	-Einstellung höherer Grunddifferenzdrehzahl -Durchführung von Versuchen im unteren Trommeldrehzahlbereich
	TR Gehalt	steigt	-		
	Zentratbelastung	sinkt	O		
Dreh-moment	Erhöhung des Drehmoments			11 kNm - 11,5 kNm	-Teilweise Erhöhung des FHM-Volumenstroms -Senkung der Grunddifferenzdrehzahl -verbesserte Reglereinstellung
	TR Gehalt	steigt	+		
	Zentratbelastung	steigt	+		
Wehrdurch-messer	Vergrößerung des Wehrdurchmessers			-4 & -8 bei 11 kNm und 2,6 U/min	Anpassung der Grunddifferenzdrehzahl bei den jeweiligen Wehrdurchmessern
	TR Gehalt	steigt	O		
	Zentratbelastung	steigt	-		
spez. FHM-Menge	Erhöhung der spez. FHM-Menge			9,1 kgWS/t TR - 10,5 kg WS/t TR	Durchführung der ersten Probenahme nach einem längeren Zeitraum beim Anfahren der Zentrifuge
	TR Gehalt	steigt bis zum Überdosierungspunkt und sinkt leicht wieder	+		
	Zentratbelastung	sinkt (Zentratqualität für spätere Prozesswasserbehandlung wird ab dem Überdosierungspunkt schlechter)	O		
FS-Volumen-strom	Erhöhung FS-Volumenstrom			25-35 m³/h Bedingung: Einstellung der FHM-Menge nach FS-Volumenstrom	Durchführung des Versuchs bei 45 m³/h, um mögliche Änderungen im TR-Gehalt zu erkennen
	TR Gehalt	sinkt	O		
	Zentratbelastung	steigt	+		
FHM-Konzentra-tion	Erhöhung FHM-Konzentration			0,52%	
	TR Gehalt	steigt bis zur opt. Konzentration (FHM abhängig)	+		
	Zentratbelastung	sinkt, jedoch FHM-abhängig	O		

Legende: + trifft zu

o trifft bedingt zu

- trifft nicht zu

Durch die Auswertung der Versuchsergebnisse wurden bei einigen Versuchen Ähnlichkeiten zur Theorie gefunden. Die Ergebnisse der Untersuchungen im April 2019

vom Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert prognostizierten einen maximalen TR von 25 % bis 27 % bei optimalen maschinenspezifischen Einstellungen. Durch die Untersuchungen der maschinenspezifischen Zentrifugeneinstellungen vor Ort wurde maximal 26,6 % TR durch die Drehmomenterhöhung erreicht. Das Drehmoment ist demnach ein entscheidender Parameter, der zu einem höheren TR-Gehalt führt. Des Weiteren wurde eine spez. FHM-Menge des derzeit eingesetzten FHM von 10-12 kgWS/t TR empfohlen. Durch die Untersuchung der maschinenspezifischen Einstellungen wurde eine optimale spez. FHM-Menge von 10,5 kg WS/t TR ermittelt. Höhere FHM führten zu keinem besseren Austrag. Durch Scale-Up-Berechnungen des Ingenieurbüros wurde eine geringere Durchsatzmenge von 23 m³/h empfohlen. Dieses Ergebnis stimmt mit den Untersuchungen überein.

Bei den maschinenspezifischen Untersuchungen vor Ort kam es zu Messfehlern und Schwankungen der Ist-Drehmomente, Ist-Differenzdrehzahlen, TR-Gehalte sowie Zentratlbelastung, sodass eine Fehlerdiskussion erforderlich ist.

Fehlerbetrachtung

Zum einen benötigt die Zentrifuge eine längere Anfahrtszeit bis sich die erforderlichen Betriebsparameter eingestellt haben und sich konstant verhalten. Dadurch unterlagen die ersten Proben eines Messtages hohen Schwankungen im TR-Gehalt und im Zentratl. Eine weitere Fehlerquelle entsteht bei den Probenahmen. Die Probenahme erfolgte mit einer Probenahmeschaufel. Mit dieser Schaufel wurde ein geringer Teil des entwässerten Schlammes stichprobenartig entnommen. Die Zuverlässigkeit einer homogenen Probe wird dadurch nicht garantiert. Eine weitere Fehlerquelle liegt den Betriebsschwankungen zu Grunde. Zum Zeitpunkt der Probenahme wäre es denkbar, dass die Ist-Differenzdrehzahl oder das Ist-Drehmoment im Maximum oder Minimum der Fluktuationen liegt. Dadurch könnte sich der TR-Gehalt oder die Zentratlbelastung zu diesem Zeitpunkt geändert haben, was zur Verfälschung der Ergebnisse führt. Bei den jeweiligen Parametereinstellungen wurden im Zeitabstand von fünf Minuten jeweils zwei Proben des entwässerten Schlammes entnommen, damit die TR-Gehalte als repräsentativ gewertet werden können. Die Abweichung der TR-Gehalte einer Zentrifugeneinstellung lassen sich somit auch auf die Fluktuationen der Ist-Zustände zurückführen. Eine weitere Fehlerquelle, die betrachtet werden muss, sind die Messungenauigkeiten der Waage. Die Messgenauigkeit beträgt dabei 0,05 g bei einer Probe zwischen 5 g bis 10 g.

6.3 Untersuchungen zu Flockungshilfsmitteln

6.3.1 Laborversuch zur Ermittlung der Reifezeit

6.3.1.1 Allgemeine Grundlagen

In diesem Versuch wird die Reifezeit bestimmt, indem der zeitliche Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit gemessen wird. Die elektrische Leitfähigkeit steigt bis zur Ladungsbildung und Streckung der Moleküle an, bleibt konstant und sinkt anschließend nach etwa sechs Stunden wieder durch den allmählichen Eintritt der Hydrolyse. Die Zeit, bei der sich die elektrische Leitfähigkeit nahezu konstant auf einem Wert bewegt, ist somit die optimale Reifezeit [DWA-M 350, 2014].

6.3.1.2 Durchführung und Auswertung

Die Leitfähigkeitsmessung wurde zuerst im Labor durchgeführt. Durch den dort verwendeten Rührmagnet wurde jedoch keine optimale Durchmischung erzielt. Die zähflüssige Eigenschaft des FHM's führte dazu, dass sich die Flüssigkeit nicht optimal durchmischte. Gerade im oberen Teil der Flüssigkeit bildeten sich dadurch unaufgelöste FHM-Bereiche. Aus diesem Grund wurde der Versuch mit Hilfe eines Rührers wiederholt. Dabei wurde, um eine 0,5 %-ige FHM-Konzentration zu erhalten, 2,5 g des FHM-Pulvers vom Typ PK 65 LP gewogen. Als Rührgerät wurde wie in **Abbildung 42** dargestellt, eine Großbohrmaschine verwendet.



Abbildung 42: Versuchsaufbau [nach Keßler 2011]

Anstatt des Bohrstabes wurde eine Schneebesenkonstruktion eingespannt. Mit Hilfe des Schneebesens ist eine bessere Durchmischung des FHMs möglich. In ein Bechergefäß wurden 500 ml Leitungswasser gefüllt. Die Messsonde des Multimeter-Messgeräts (HQ30D) von der Hach Lange GmbH wurde durch eine Drahtkonstruktion am Bechergefäß befestigt. Dabei wurde der Messkörper des Messgeräts befestigt, sodass dieser vom Leitungswasser umschlossen ist. Ab dem Start der Leitfähigkeitsmessung zeichnete das Messgerät minütlich Messwerte auf. Nach einer Minute wurde das FHM hinzugegeben, um den Kurvenverlauf der elektrischen Leitfähigkeit nachzuvollziehen. Die Großbohrmaschine durchmischte FHM und Wasser mit 1000 U/min. Das Messergebnis wird grafisch in der **Abbildung 43**. dargestellt.

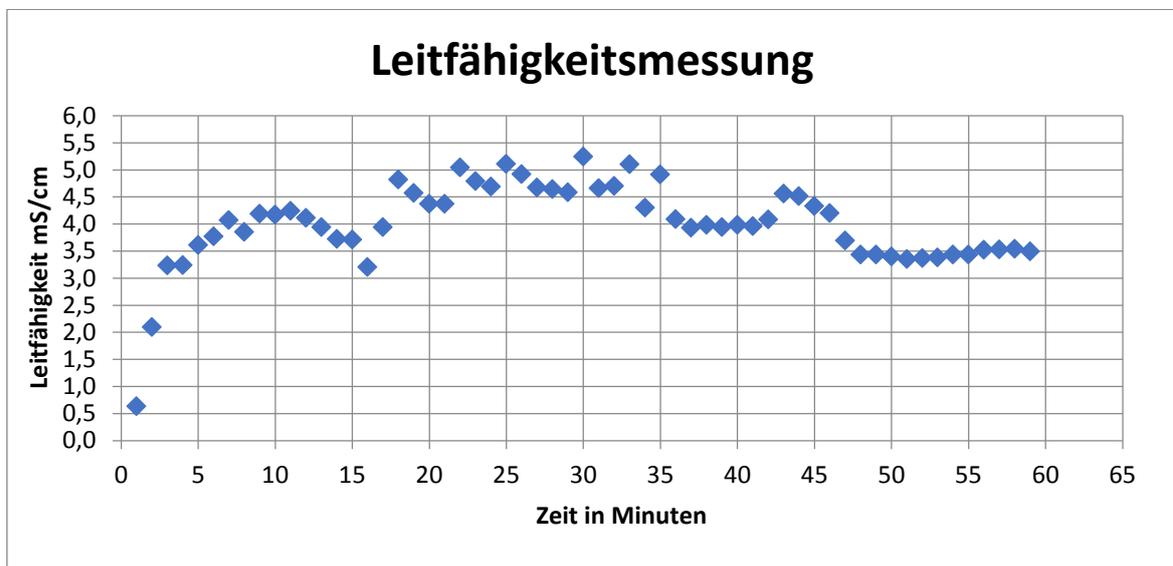


Abbildung 43: Ergebnis der elektrischen Leitfähigkeitsmessung

Die aufgenommenen Messwerte unterlagen permanenten Schwankungen während des Versuchszeitraums. Die elektrische Leitfähigkeit stieg nach 10 Minuten bis auf einen Wert von 4,2 mS/cm an, sank und stieg wieder bis zum Maximalwert von 5,3 mS/cm. Daraufhin sank die elektrische Leitfähigkeit auf 3,5 mS/cm. Die permanenten Schwankungen (bis etwa 45 Minuten) sind der Durchmischungsproblematik und der viskosen Eigenschaft des FHMs geschuldet. Dadurch bildeten sich trotz der besseren Durchmischung Pfropfen von unaufgelösten FHM an der Sonde des Messgeräts. Außerdem sind die Messwertschwankungen bis etwa 45 Minuten, nach Dr. Ralf Denkers Erfahrungen, auch der Qualität und Eigenschaften des Ansetzwassers und der Leistung des Röhreintrags geschuldet.

Die Rührkonstruktion entspricht nicht der an der FHM-Anlage herrschenden Technik, sodass die hier gewonnenen Ergebnisse nicht pauschal auf die Reifezeit des FHMs an der FHM-Anlage übertragbar sind. Da sich jedoch erst nach 47 Minuten Lösezeit die FHM-Menge weitgehend aufgelöst hat, wäre dies die Reifezeit des eingesetzten FHMs. Die Ladungsbildung des FHMs war nach 47 Minuten abgeschlossen.

6.3.1.3 Fazit

Wird der theoretische Verlauf der **Abbildung 18** mit den Messwerten verglichen, so sind Unterschiede in den Kurvenverläufen erkennbar. Die elektrische Leitfähigkeit müsste bis zum Abschluss der Ladungsbildung und Streckung der Moleküle steigen und daraufhin konstant auf einem Niveau bleiben. Die Reifezeit nach der DWA M 350 ist somit die Zeit, nachdem die maximal erreichte elektrische Leitfähigkeit sich konstant auf einem Niveau bewegt. Beim Kurvenverlauf sind permanente Messwertschwankungen zu erkennen. Diese sind nicht auf die Messungenauigkeiten der dafür verwendeten Messgeräte zurückzuführen. Beispielsweise besitzt das Multimeter-Messgerät eine Messgenauigkeit von 0,5 % der gemessenen Leitfähigkeit. Diese Messwertschwankungen bis 45 Minuten entstehen durch die Qualität und Zusammensetzung des Ansetzwassers, der ungleichförmigen Bildung von polymeren Flocken und durch die ausbaufähige Rührtechnik [Bericht zur Schlammuntersuchung, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert, 2019]. Die maximale elektrische Leitfähigkeit blieb nicht konstant auf einem Niveau, erst später wurden konstante Messwerte erreicht. Ab 47 Minuten pendelte sich die elektrische Leitfähigkeit auf einen Messwert ein. Aus diesem Grund beträgt die minimale Reifezeit 47 Minuten. Nach der Literatur wird eine minimale Reifezeit von 45 Minuten empfohlen. Demnach besitzt das FHM eine typische Reifezeit.

6.3.2 Laborversuche zur Ermittlung von verbesserten Flockungshilfsmitteln

6.3.2.1 Allgemeine Grundlagen

Das Ziel der Laborversuche ist die Ermittlung eines besseren FHMs gegenüber dem derzeit eingesetzten im KW Rosental. Diese Versuche sind notwendig, da sich die Schlammeigenschaften zeitlich verändern und dadurch die Schlammentwässerung verbessert oder verschlechtert werden kann. Durch Wechsel des FHMs ist ein besseres Entwässerungsergebnis möglich. Mit Hilfe von Laborversuchen unterschiedlicher FHM-

Hersteller wurden organische FHM-Produkte vorgeschlagen, die zu einer verbesserten Entwässerbarkeit führen können.

Die derzeitigen FHM-Hersteller sind SNF Floerger, Fusion BASF mit Solenis und Kemira. Das FHM der Zentrifugen wird vom SNF Floerger hergestellt und von der Handelsgesellschaft Aquaplan GmbH vertrieben.

Am KW Rosental wird derzeit ein FHM mit hohem Molekulargewicht, einer linearen Molekülstruktur und tendenziell mehr kationischen Ladungsträgern verwendet. Die theoretischen Grundlagen des Aufbaus der FHM wurden im **Kapitel 5.2** beschrieben.

6.3.2.2 Durchführung der Laborversuche

Abtropftest

Der Abtropftest wurde von einem Mitarbeiter der Kemira AG durchgeführt. Es wurden acht Bechergläser mit 200 ml Wasser befüllt, mit Magnetrührern ausgestattet und auf Magnetrührerplatten gestellt. In die mit Wasser gefüllten Bechergläser wurden 0,4 g unterschiedlicher FHM gegeben und anschließend 30 bis 45 Minuten gerührt. Die acht FHM wurden nach Erfahrungswerten von früheren Laborversuchen ausgewählt. Alle ausgewählten FHM waren lineare, kationische, modifizierte Polyacrylamide. Dabei unterschieden sie sich durch deren Molekulargewicht und Ladungsdichte. Zu 200 ml Schlamm wurde mit ansteigender Dosiermenge das jeweilige FHM konditioniert. Das Gemisch wurde in einem Standmixer verrührt, um die Scherkräfte wie in einer Zentrifuge zu simulieren. Die Mischdauer betrug drei Sekunden. Daraufhin wurde das Gemisch in einen Trichter mit Sieb gegeben und das Abtropfvolumen nach 30 Sekunden gemessen. Die Dosiermenge eines FHM wurde erhöht. Dadurch wurde die Wasserabgabegeschwindigkeit verändert. Die Filtratwassermenge bzw. das Abtropfvolumen pro Zeiteinheit spiegeln diese Geschwindigkeit wider. Des Weiteren wurde die Abtropfzeit bei maximal erreichbaren Filtratvolumen und 100 ml Filtratvolumen notiert. Dieses Filtrationsvolumen hilft bei der Vergleichbarkeit der FHM mit ähnlichem Abtropfverhalten. Des Weiteren entstand durch Erhöhung der Konditionierung ein klareres Filtrat. Falls das FHM überdosiert wird, wird dies durch die Konsistenz des Gemischs nach dem Mixen sichtbar. Das Gemisch sieht dann schleimig aus. Nachfolgend wird der Versuchsaufbau dargestellt.

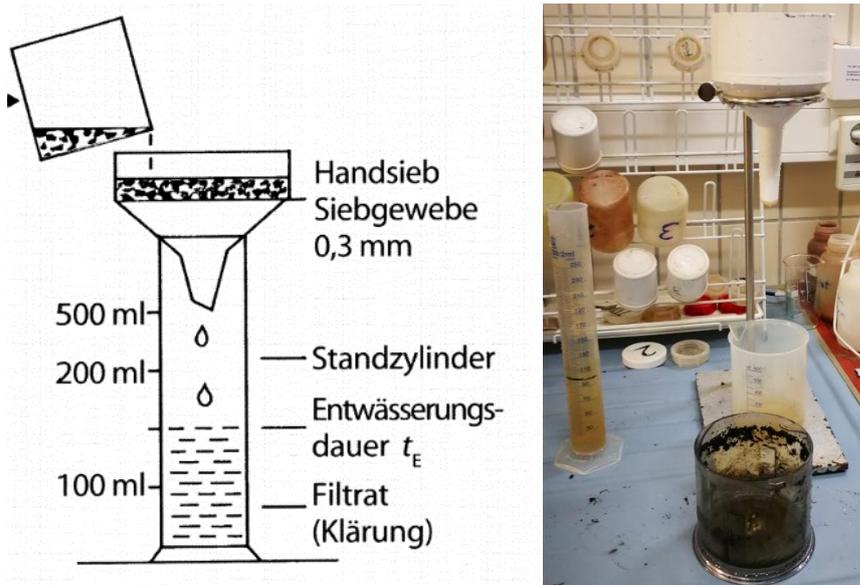


Abbildung 44: Versuchsaufbau Abtropfversuch [nach DWA M 383, 2018]

Nachdem die jeweiligen Abtropfzeiten und Volumina notiert wurden, konnten die jeweiligen FHM grafisch miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse werden in der **Abbildung 45** dargestellt.

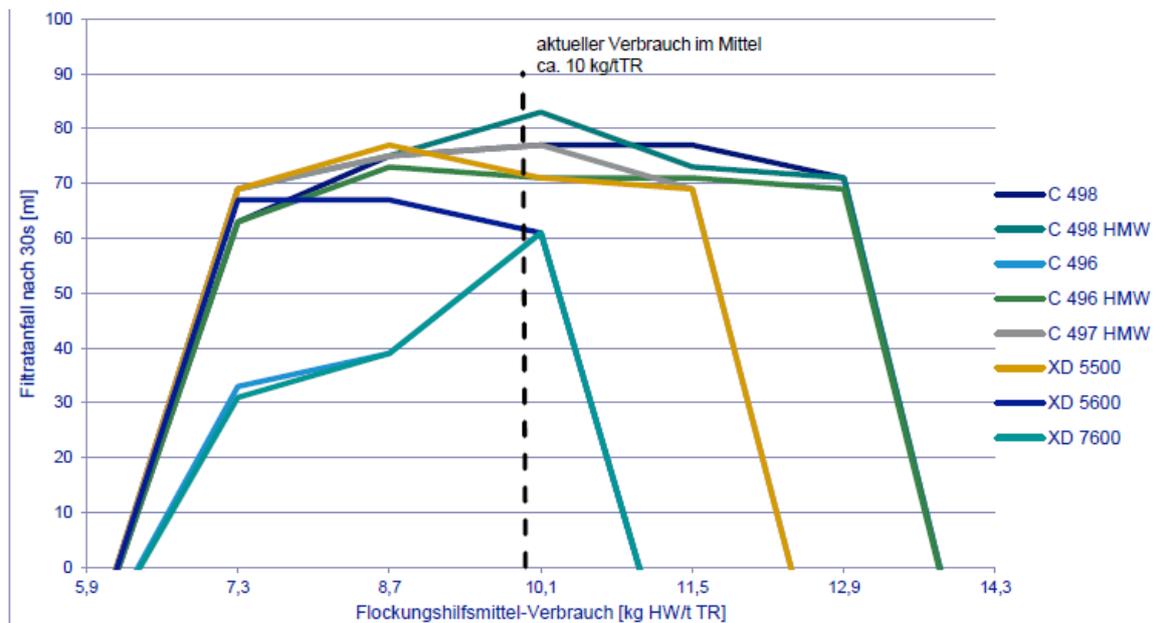


Abbildung 45: Ergebnisse des Abtropfversuchs [nach Laboringenieur Kuntze 2019]

In dieser Abbildung wird das Filtratvolumen nach 30 Sekunden in Abhängigkeit von der spez. FHM-Menge dargestellt. Es wird ersichtlich, dass das FHM C 498 HMW das beste Ergebnis erzielt hat. Dieses FHM hat eine lineare Struktur, eine Ladungsdichte von 80 % und besitzt ein hohes Molekulargewicht. Das FHM ist aufgrund des hohen Molekulargewichts weniger scherempfindlich. Ob sich dieses FHM im laufenden Zentrifugenbetrieb bewährt, wird im **Kapitel 6.3.3** erläutert.

Becherglas-/Flockungstest

Bei diesem Test wird der Schlamm mit einer steigenden Dosierung des FHMn verrührt und die Flockenbildung optisch bewertet. Dieser Test wird für den Vergleich von unterschiedlichen FHMn verwendet und dient der Vorauswahl von passenden FHMn [DWA-M 383, 2018]. Im KW Rosental wurden mit Hilfe einer Magnetrührplatte jeweils 0,2 %-ige FHM-Lösungen angesetzt. Die Lösungen mussten dabei etwa 45 Minuten gerührt werden, um die Reifezeit zu erreichen. Mit Hilfe eines Rührgeräts wurde zum FS eine geringe Menge des jeweiligen FHMn zugegeben und bei 500 U/min vermixt. Durch optische Betrachtung wird analysiert, nach welcher Scherzeit und bei welcher FHM-Menge sich Schlammflocken bilden. Daraufhin wurden Scherzeit und FHM-Menge der Proben bei Schlammflockenbildung notiert. Es wurden die FHM mit der geringsten Scherzeit ausgewählt und für den großtechnischen Versuch an der Zentrifuge zur Verfügung gestellt. Die bei diesem Versuch empfohlenen Produkte sind:

- PK 29 H
- PK 42 AC
- PK 24 H

Dieser Labortest wurde zum ersten Mal bei der Ermittlung eines geeigneten FHMn im KW Rosental angewendet. Parallel zu diesem Test wurde der herkömmliche CST-Test durchgeführt. Dabei wurde eine bestimmte FHM-Menge dem Schlamm zudosiert und bei unterschiedlichen Scherzeiten der CST-Wert notiert. Es wurde jedoch entschieden, nur die ausgewählten FHM des Flockungstests für den großtechnischen Versuch zu verwenden, um diesen Laborversuch auf dessen Einsatzfähigkeit zu testen.

6.3.2.3 Fazit

Bei den jeweiligen Laborversuchen ist darauf zu achten, dass die Versuchsbedingungen die realen Betriebszustände möglichst gut widerspiegeln. Gerade die Drehzahl der Rührgeräte ist dabei relevant. Es werden nach Auskunft der Firma Aquaplan GmbH bei den Zentrifugen verbreitet FHM mit hohen Molekulargewichten verwendet, da diese weniger scherempfindlich sind. Nach Erfahrung der Laboringenieure dieser Firma benötigt der Schlamm im KW Rosental hohe Ladungsdichten. Es wird empfohlen, mindestens zweimal im Jahr Laborversuche durchzuführen, um das zum FS optimale FHM anwenden zu können. Dabei dienen die Laborversuche schlussendlich nur als Empfehlungsvorschlag für

einen möglichen großtechnischen Einsatz der FHM. Die zuverlässigste Beurteilung der jeweiligen FHM ist jedoch nur durch den großtechnischen Einsatz selbst möglich.

6.3.3 Erprobung verschiedener Flockungshilfsmittel an der Vollmantelschneckenzentrifuge

6.3.3.1 Allgemeine Grundlagen

Die Wirksamkeit der ausgesuchten FHM wird in diesem Kapitel durch großtechnische Versuche an der Zentrifuge beurteilt. Die im Laborversuch ermittelten optimalen FHM, sowie unterschiedlich vorhandenes FHM am KW Rosental, wurden auf deren Wirksamkeit miteinander verglichen.

Folgende FHM wurden an der FHM-Anlage angesetzt und in die Zentrifuge gefördert:

Tabelle 3: Erprobte FHM

Produkt	Ladungsdichteart	Ladungsdichte/-typ	Molekulargewicht
PK 65 LP (derzeitiges FHM)	linear	60 % kationisch	Sehr hoch
PK 65 F	vernetzt	60 % kationisch	Sehr hoch
PK 24 H	linear	24 % kationisch	Sehr hoch
PK 29 H	linear	29 % kationisch	Sehr hoch
PK 42 AC	Stern Vernetzung	20 % kationisch	Sehr hoch
C 498 HMW	linear	80 % kationisch	hoch
Solenis	linear	35 % kationisch	mittel

Die dargestellten FHM unterscheiden sich durch die Ladungsdichteart, den Ladungstypen und das Molekulargewicht. Die Strukturunterschiede wurden bereits im **Kapitel 5.2** erläutert.

6.3.3.2 Durchführung und Auswertung

Die Betriebsparameter der Zentrifuge wurden konstant gehalten, um die TR-Gehalte zu vergleichen. Des Weiteren wurden die in der **Tabelle 3** dargestellten FHM der Zentrifuge 1 nacheinander zur Verfügung gestellt. Um das derzeitig verwendete FHM (PK 65 LP) mit den Austrägen der Zentrifuge 1 zu vergleichen, wurde die Zentrifuge 2 mit diesem FHM parallel gefahren. Dabei wurden die gleichen maschinenspezifischen Parameter zwischen Zentrifuge 1 und 2 eingestellt.

In **Tabelle 4** werden die durchschnittlichen Parametereinstellungen der Zentrifuge 1 und 2 dargestellt. Jedoch mussten die Parametereinstellungen korrigiert werden - aufgrund der Verschlechterung der Zentrifugalbelastung, des Nichterreichens des Drehmoments oder der Differenzdrehzahl.

Tabelle 4: Durchschnittliche Parametereinstellungen Zentrifuge 1 und 2

Maschineneinstellung		
Trommeldrehzahl	U/min	3.200
Grunddifferenzdrehzahl	U/min	2,3
Wehrdurchmesser	mm	-8
Soll-Drehmoment	kNm	10
Flockungshilfsmittel		
Konzentration	%	0,52
Lösemenge	l/h	1500
Produktdaten		
Einlauf-Menge	m³/h	25,00

Es wurden die Parametereinstellungen der **Tabelle 4** in das Steuerungsprogramm eingegeben. Die Einstellungsparameter der Zentrifuge 1 und 2 werden in der **Anlage 9** dargestellt. Beim Einsatz des FHM PK 24 H wurde ein größerer FHM-Volumenstrom gewählt. Um eine verbesserte Vergleichbarkeit zu erreichen, wurde dieser Versuch wiederholt.

Durch den Einsatz der verschiedenen FHM an der Zentrifuge 1 wurden folgende Ergebnisse erzielt:

FHM-Versuche

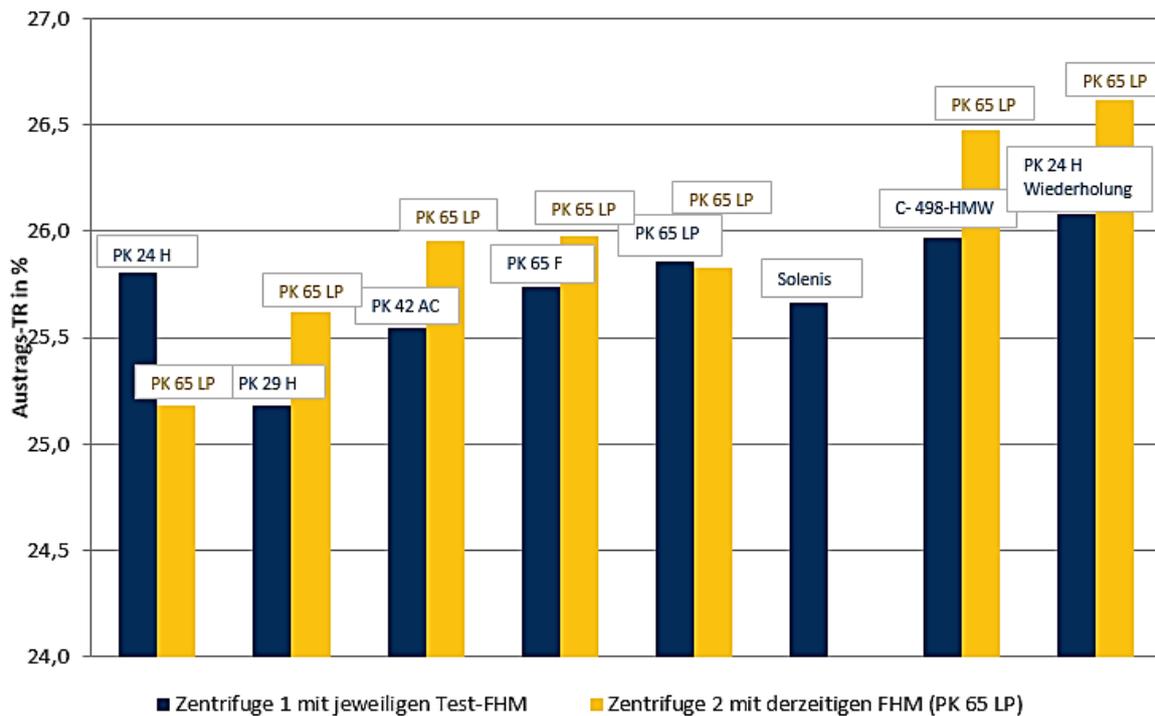


Abbildung 46: FHM-Versuch an der Zentrifuge

Das Diagramm zeigt den direkten Vergleich zwischen den jeweils getesteten FHM (blau) und dem derzeitig eingesetzten FHM (PK 65 LP). Dabei wurde bei jedem Versuch aus mindestens vier TR-Gehalten eines FHM der Mittelwert gebildet. Es entstanden daraufhin unterschiedliche Austrags-TR. Da der Versuch mit dem FHM PK 24 H noch einmal durchgeführt werden musste, entfällt der erste Versuch des FHM PK 24 H. Bei dem Solenis-FHM konnte aufgrund der geringen Schlammmenge am Versuchstag die Zentrifuge 2 nicht angefahren werden. Dadurch ist bei diesem Versuch die Vergleichbarkeit nicht möglich gewesen. Durch den Kurvenverlauf des Austrages der Zentrifuge 2 lässt sich vermuten, dass sich über die Versuchstage (ab 24.07.2019) der Schlamm tendenziell immer besser entwässern ließ. Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass die Zentrifuge 2 einen besseren Austrag als die Zentrifuge 1 mit dem Solenis-FHM erzielt hätte. Durch Vergleich der Austräge der Zentrifuge 1 und 2 mit dem gleichen FHM wird deutlich, dass die Zentrifugen nahezu gleiche Ergebnisse erzielen. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurden, durch direkten Vergleich, höhere Austräge bei dem derzeitigen FHM PK 65 LP erzielt.

6.3.3.3 Fazit

Das Ziel des Versuchs bestand darin, ein besseres als das derzeitig eingesetzte FHM zu ermitteln. Durch den Vergleich der jeweiligen FHM wird deutlich, dass das derzeitig eingesetzte FHM höhere Austrags-TR erzeugt. Das FHM wird aus diesem Grund weiterhin auf dem KW Rosental eingesetzt.

In der **Tabelle 3** wurden die jeweiligen FHM-Eigenschaften dargestellt. Durch Vergleich dieser Eigenschaften mit den daraus erzielten Austrags-TR wird eine Tendenz deutlich. Der zu entwässernde Schlamm benötigt ein FHM, welches ein sehr hohes Molekulargewicht und eine möglichst hohe Ladungsdichte besitzt.

6.4 Untersuchungen zu Reglereinstellungen

6.4.1 Ist-Zustand der Regelung

Durch die eingebaute Regelungstechnik der Zentrifugen bei der Inbetriebnahme war die Einflussnahme in das Steuerungsprogramm durch die ausgebildeten Automatisierer der Kommunalen Wasserwerke Leipzig GmbH kaum möglich gewesen. Aus diesem Grund wurde die Steuerung der Zentrifuge auf Siemens umgestellt. Zu Beginn wurden jedoch schlechte Zentrifugenergebnisse dokumentiert, sodass empirisch die Reglerparameter durch einen Servicetechniker des Zentrifugenherstellers eingestellt wurden. Da jedoch im Betrieb starke Fluktuationen beim Ist-Drehmoment- und Ist-Differenzdrehzahlverlauf zu erkennen sind, ist eine Regleroptimierung notwendig.

Beschreibung der Regelung

Die Zentrifuge wird mit Hilfe der Differenzdrehzahl- und Drehmomentregelung gesteuert. Beim Anfahren ist die Differenzdrehzahlregelung aktiv bis die Soll-Trommeldrehzahl erreicht ist. Das Drehmoment baut sich erst nach der Beschickung mit Schlamm auf. Dann wird auf Drehmomentregelung umgeschaltet. Bei der Regelung werden folgende Größen berücksichtigt:

- Sollwert des Drehmoments
- Istwert des Drehmoments
- Hysterese des Drehmoments
- Sollwert der Differenzdrehzahl
- Istwert der Differenzdrehzahl

Der Sollwert des Drehmoments wird durch die Anlagenbetreiber festgelegt. Der Istwert ist der tatsächlich mit Messsensor aufgenommene Wert. Die Hysterese ist die Schaltdifferenz um einen definierten Sollwert [Jumo, 2019]. Der Istwert des Drehmoments darf in diesem Bereich um den Sollwert schwanken. Wird der minimale Hysteresewert überschritten, so wird der Drehmomentregler zur Differenzdrehzahlregelung umgeschaltet. Parallel dazu wird beim Überschreiten des maximalen Hysteresewerts vom Differenzdrehzahlregler zum Drehmomentregler umgestellt. Daher wird beim Steigen des Drehmoments bis zur maximalen Hysterese die Differenzdrehzahlregelung betrieben. Bewegt sich das Ist-Drehmoment über die maximale Hysterese, so wird der Drehmomentregler betrieben bis

der minimale Hysteresewert überschritten wird [Technische Beschreibung Zentrifuge, Alfa Laval].

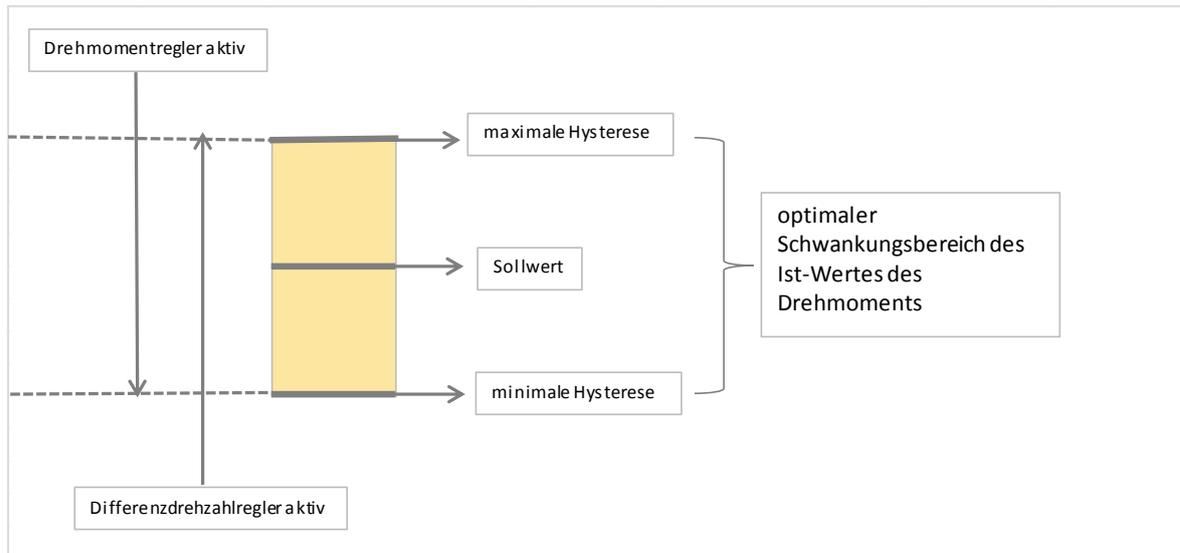


Abbildung 47: Reglereinstellung

Mit Hilfe der Differenzdrehzahlregelung wird das Drehmoment angepasst. Dabei sinkt der Ist-Wert der Differenzdrehzahl bis das Ist-Drehmoment das Soll-Drehmoment erreicht. Dadurch sinkt die Ist-Differenzdrehzahl so stark, dass der Ist-Wert des Drehmoments die maximale Hysterese überschreitet. Der Drehmomentregler muss dann die Differenzdrehzahl anpassen, sodass das Drehmoment den Sollwert erreichen kann. Da der Differenzdrehzahlregler langsamer als der Drehmomentregler ist, ergeben sich Fluktuationen des Ist-Drehmoments und der Ist-Differenzdrehzahl. Ein anderer Grund für die Fluktuationen ist dem geringen Hysteresebereich geschuldet. Dadurch kam es zum ständigen Umschalten der Regler.

Nachfolgend wird der Drehmoment- und Differenzdrehzahlverlauf grafisch dargestellt und die Problematik farblich markiert.

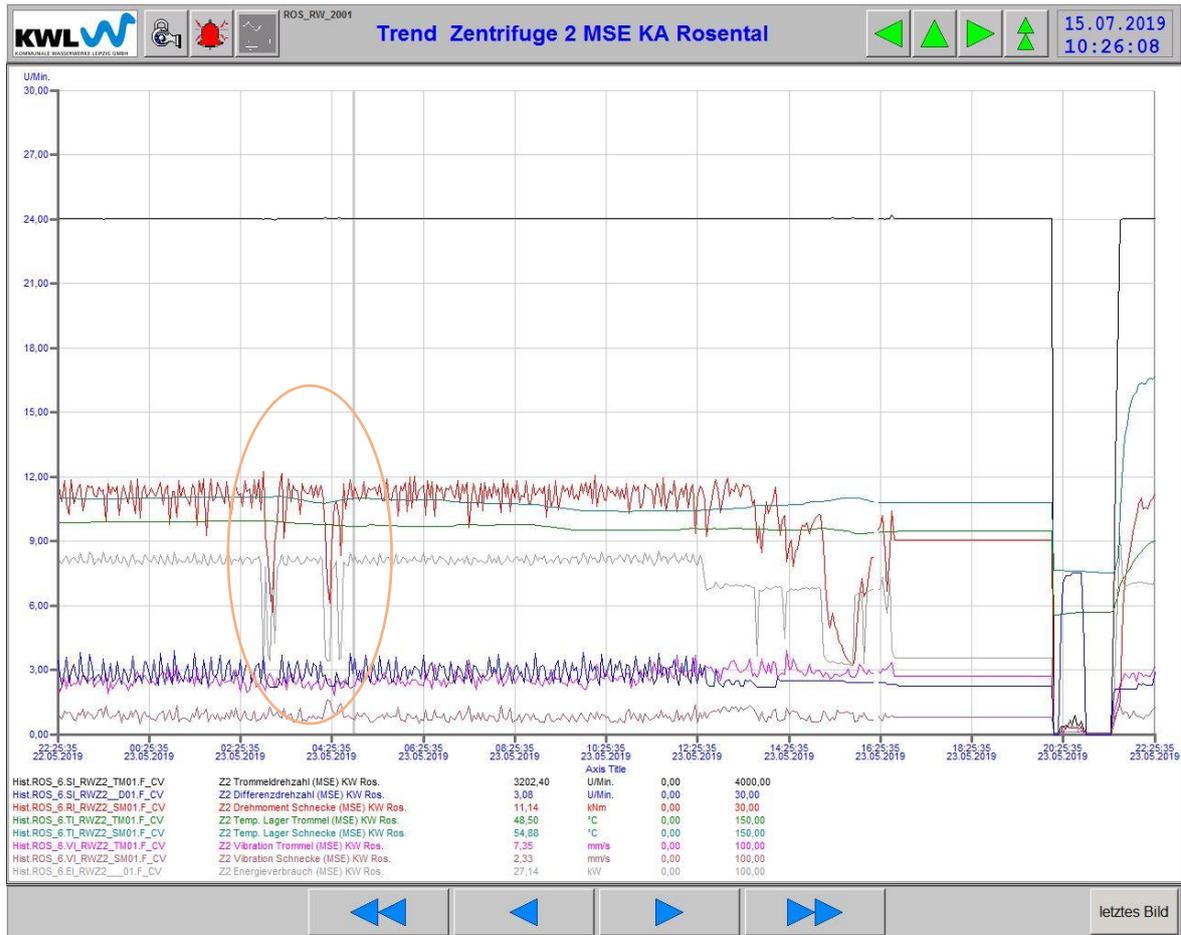


Abbildung 48: Trend der Zentrifuge am 23.05.2019; Drehmoment (rot), Differenzdrehzahl (blau)

Durch Sinken der Differenzdrehzahl müsste sich daraufhin das Drehmoment steigen. In der **Abbildung 48** sinkt das Ist-Drehmoment während die Ist-Differenzdrehzahl auch sinkt. Erst später steigt das IST-Drehmoment. Um diese Fluktuationen zu minimieren und um eine verbesserte Betriebsstabilität zu gewährleisten, wurde von Professor Dr.-Ing. Ortwein, einem externen Berater, die Reglereinstellung der Zentrifuge optimiert.

6.4.2 Anpassung der Hysterese und des PID-Reglers

Es wurde durch den externen Berater in der ersten Optimierungsstufe die Hysterese und der PID-Regler (Proportional-Integral-Differential-Regler) durch Beobachtung der Differenzdrehzahl und der Drehmomentverläufe eingestellt. Der PID-Regler besteht aus drei Regelkreisen. Der P-Anteil gibt die Verstärkung K_p an, der I-Anteil wird als Nachstellzeit T_n und der D-Anteil als Vorhaltezeit T_v bezeichnet. Gerade durch die Erhöhung der Hysterese wurden stabilere Differenzdrehzahl- und Drehmomentverläufe erzeugt.

In der nachfolgenden Grafik wird dies am Beispiel der Zentrifuge 2 sichtbar.

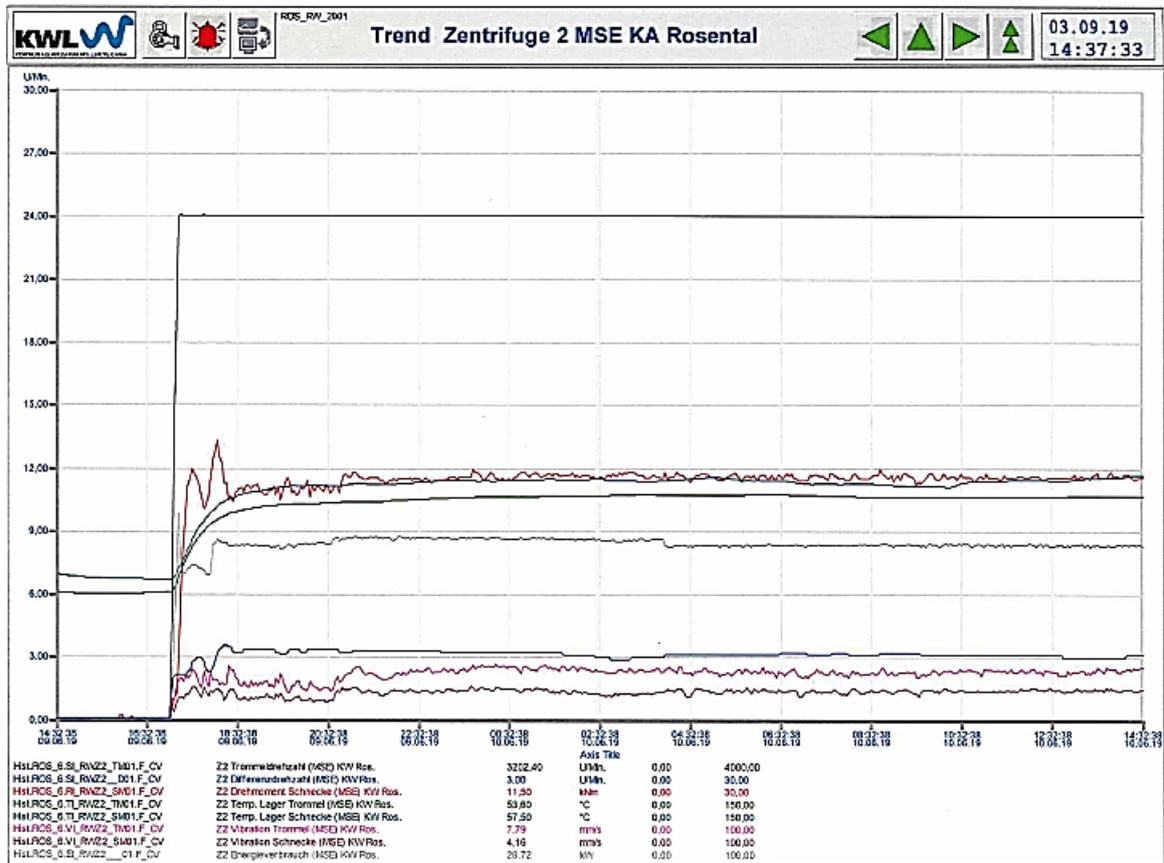


Abbildung 49: Verlauf der Ist-Zustände an der Zentrifuge 2

Durch einen Vergleich der **Abbildungen 48** und **49** sind die Veränderungen deutlich erkennbar. In der zweiten Optimierungsstufe wurden durch Stabilitätsrandversuche und Sprungversuche (Wendetangentenverfahren) die PID-Anteile mit mathematischen Formeln bestimmt. Dabei wurde erkannt, dass der D-Anteil eine Instabilität begünstigt, sodass dieser bei der Optimierung auf „null“ gestellt wird. Beide Zentrifugen regeln außerdem unterschiedlich schnell, sodass jeder Regler einzeln eingestellt werden musste. Nach den jeweiligen Versuchen wurden trotzdem leichte Fluktuationen dokumentiert. Gerade bei der Zentrifuge 1 kam es zu untypischen Verläufen. Begründen lässt sich dies nur durch den minimalen baulichen Unterschied zwischen den beiden Zentrifugen. Die jeweiligen Regleränderungen und die Betriebsverläufe der Zentrifuge 1 werden in der **Anlage 10** dargestellt. Nach Abschluss der Regloptimierung ergaben sich folgende Verläufe:



Abbildung 50: Zentrifugenverlauf nach der PID-Einstellung an der Zentrifuge 2

6.4.3 Fazit

Durch die Regloptimierung wurde eine verbesserte Betriebsstabilität erreicht und die Fluktuationen wurden verringert. Bevor die Reglereinstellungen optimiert wurden, war es nicht möglich das Drehmoment mit geringer Zentrifugalbelastung von mindestens 12 kNm einzustellen. Das Drehmoment ist ein sehr einflussreicher Parameter bei der Erhöhung des TRs. Durch das Drehmoment wird der Austrags-TR erhöht und somit werden Entsorgungskosten gespart. Aus diesem Grund wurde an den Zentrifugen 1 und 2 das Drehmoment noch einmal stark erhöht, um mögliche Veränderungen zu erkennen.

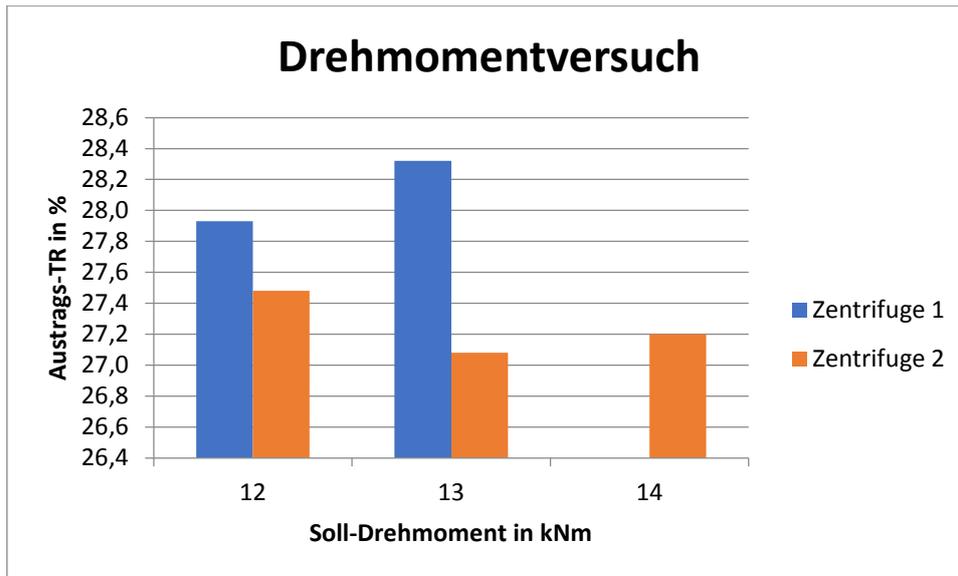


Abbildung 51: Drehmomentversuch August

Dargestellt werden bei gleich eingestellten Parametern (**Anlage 11**) die Austräge der Zentrifuge mit den jeweiligen Drehmomenten. Bei der Zentrifuge 1 konnten maximal 13 kNm mit geringerer Zentrifugebelastung eingestellt werden, bei der Zentrifuge 2 sogar 14 kNm. Nach der Theorie müsste mit steigendem Drehmoment der Austrag auch steigen. Dieser Verlauf wurde jedoch nur bei der Zentrifuge 1 erreicht. Bei der Zentrifuge 2 sind größere Schwankungen zu erkennen. Die Ursache lässt sich dabei nicht klären. Durch Betrachtung der Austragswerte der vorherigen Tage im August 2019 wurden höhere TR-Austräge erzielt. Am Vortag des dargestellten Versuchs wurden mit durchschnittlich 10,5 kNm 25,8 % TR erreicht. Durch einen Vergleich der Drehmomente mit den Zentrifugenergebnissen im April 2019 sind auch hier deutlich höhere Austrags-TR zu erkennen. Bei 12 kNm wurden im April unter hoher Zentrifugebelastung 26,6 % TR erzielt. Dabei sollte hinsichtlich des Austrags-TRs der Unterschied zwischen Sommer- und Winterschlamm berücksichtigt werden. Trotzdem sind bei diesem Versuch deutlich höhere TR mit geringerer Zentrifugebelastung dokumentiert wurden. Dadurch wurden mit Hilfe der Regleroptimierung verbesserte Austräge nachgewiesen.

7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist neben den Untersuchungen ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung von möglichen Optimierungen. Dabei stellen drei verschiedene Kostenstellen den größten Einfluss auf die Gesamtkosten dar. Das Ziel dabei ist, die Gesamtkosten weitgehend zu senken. Da nach den Untersuchungen die Drehmomenterhöhung ein entscheidender positiver Einfluss auf den TR-Austrag und folglich auf die Kosten hat, wird die Abhängigkeit hierbei kostenspezifisch betrachtet. Die Gesamtkosten beinhalten:

- Entsorgungskosten des Schlammes
- Energiekosten der Zentrifuge
- FHM-Kosten

Die jeweilige Kostenübersicht ist in **Anlage 12** wiederzufinden und wird im **Abbildung 52** dargestellt. Die hierbei verwendeten maschinenspezifischen Daten und Austrags-TR wurden vom Monat August 2019 entnommen und gemittelt. Als Berechnungsgrundlage dienen folgende Werte:

Tabelle 5: Grundlagen der Kostenberechnung

	IST-Zustand
gesamte zu entsorgende Schlammmenge	36.000 t mit 25 % TR
Trockenmenge des Schlammes	9.000 t
spezifische Entsorgungskosten	50 €/t
Stromkosten	0,17 €/ kWh
spezifische FHM-Kosten	2,56 €/ kg

Mit durchschnittlichen 1,5 betriebenen Zentrifugen und 11.500 Betriebsstunden pro Jahr (Stand 2018), ergeben sich in Abhängigkeit der Drehmomente und dem dadurch erhöhten TR-Gehalt im Austrag folgende Kosten:

Kosten der Schlammentwässerung

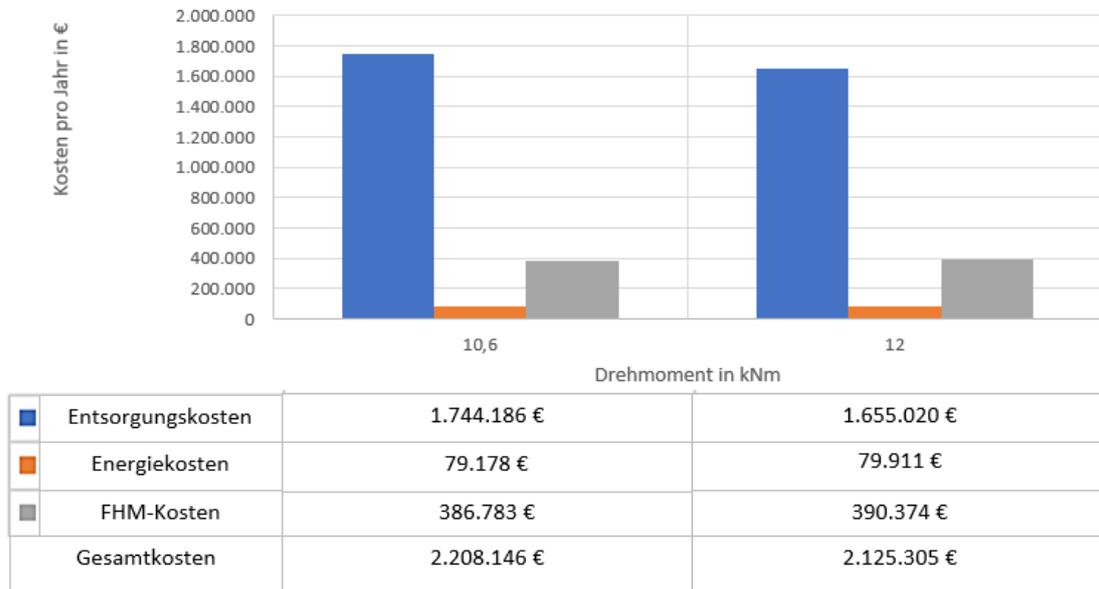


Abbildung 52: Überblick der Gesamtkosten in Abhängigkeit vom Drehmoment

In der Darstellung wird die Abhängigkeit des Drehmoments zu den Kosten dargestellt. Die jeweiligen Drehmomente, FHM-Verbräuche und TR-Austräge beziehen sich auf die durchschnittliche Messwerte im Monat August 2019. Durch einen Vergleich der jeweiligen Kostenstellen wird deutlich, dass die Entsorgungskosten den größten Anteil der Gesamtkosten einnehmen. Gefolgt wird dieser von den FHM- und Energiekosten. Die Steigung des Drehmoments von 10,6 kNm auf 12 kNm bewirkt einen größeren TR-Austrag und somit eine geringere Entsorgungsmenge. Die Entsorgungskosten werden dadurch um 5,1 % auf 1.655.020 € gesenkt. Durch das größer werdende Drehmoment erhöht sich der Energiebedarf von 27 kW auf 27,25 kW. Dadurch steigen die Energiekosten von 79.178 € um 1 % an. Die Erhöhung des Drehmoments hat zur Folge, dass die Zentraltbelastung steigt. Aus diesem Grund muss die FHM-Menge erhöht werden und die FHM-Kosten steigen um bis zu 1,5 %. Gesamtbetrachtet können durch die Drehmomenterhöhung von 10,6 kNm auf 12 kNm insgesamt mindestens 82.841 € jährlich eingespart werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Masterarbeit wird die Optimierung der MSE mit Zentrifugen im KW Leipzig-Rosental untersucht. Die maschinenspezifischen Parameter, der Einfluss des FHM und die Eigenschaften des FSs werden dabei analysiert. Durch die experimentellen Untersuchungen werden die jeweiligen Optimierungsvorschläge technisch und wirtschaftlich betrachtet.

Verschiedene Versuche mit dem FS, FHM und an der Zentrifuge wurden im experimentellen Teil durchgeführt. Folgende Resultate ergaben sich durch die verschiedenen Untersuchungen:

1. Ein externes Ingenieurbüro untersuchte den Schlamm auf dessen Eigenschaften. Die Ergebnisse halfen dabei, die Entwässerungsfähigkeit des Schlammes auf dem KW Leipzig-Rosental einzuschätzen. Durch die Auswertung der historischen Daten der FS-Eigenschaften wurden daraufhin folgende negative Einflüsse der Schlammentwässerung erkannt:

- hoher organischer Anteil als GV
- hoher EPS-Anteil
- hoher Feinstanteil
- hoher Chloridanteil
- hohes ÜSS/PS-Verhältnis und geringe Außentemperatur

Das KW Leipzig-Rosental hat einwohner- und frachtbezogen die Kapazitätsgrenze erreicht. Dadurch steigt die Belastung des anfallenden Schlammes im Belebungsbecken und der damit verbundene ÜSS-Anteil. Durch den Ausbau der Belebungsstufe in den nächsten Jahren ist demnach auch eine Verbesserung der Schlammentwässerung prognostizierbar.

2. Um die Entwässerbarkeit durch maschinenspezifische Parameter zu erhöhen, wurden an der Zentrifuge Versuche durchgeführt.

Die maschinenspezifischen Parameter, die optimiert eingestellt werden sollen, sind:

- Trommeldrehzahl
- Drehmoment
- Wehrdurchmesser
- FHM-Menge und -konzentration
- FS-Volumenstrom

Der größte Einfluss auf eine bessere Entwässerbarkeit wurde durch Erhöhung des Drehmoments erreicht. Der TR konnte auf bis zu 2 % mit Steigung der Zentratbelastung erhöht werden. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde deshalb in Abhängigkeit des Drehmoments durchgeführt.

3. Das derzeitig verwendete FHM PK 65 LP wurde im Labormaßstab und später großtechnisch mit verschiedenen FHMn auf sein Entwässerungsverhalten untersucht. Dabei wurde mit dem derzeitig verwendeten FHM die besten Austrags-TR erzielt. Durch die großtechnischen FHM-Versuche werden tendenziell FHM mit einer großen Ladungsdichte und einem hohen molekularen Gewicht empfohlen. Nach der Erfahrung des Laboringenieurs von der Firma Aquaplan GmbH benötigt der Sommerschlamm weniger Ladungsdichte als der Winterschlamm. Aus diesem Grund wird empfohlen, im Winter weitere Labor- und großtechnische Versuche durchzuführen, um ein geeigneteres FHM für den Winterschlamm einzusetzen.
4. Hinsichtlich der Betriebsweise der FHM-Anlagen wird der Pendelbetrieb zwischen zwei FHM-Kammern für den Betrieb einer Zentrifuge empfohlen, um die erforderliche Reifezeit zu gewährleisten. Die Verbundfahrweise zwischen zwei FHM-Anlagen wird aufgrund der einsetzenden Hydrolyse nur mit mindestens zwei Zentrifugen angeraten. Die Reifezeit des derzeitig eingesetzten FHMn wurde mittels zeitlicher Leitfähigkeitsmessung auf 47 Minuten bestimmt.
5. Die Betriebsfahrweise der Zentrifugen ist durch starke Fluktuationen des Drehmoments und der Differenzdrehzahl gekennzeichnet. Um eine stabile Betriebsfahrweise zu erreichen, wurde der eingebaute Siemens Regler von einem externen Berater eingestellt. Durch Änderung der PID-Anteile und der Hysterese konnte neben der stabilen Betriebsfahrweise auch das Drehmoment höher eingestellt werden. Durch die maschinenspezifische Untersuchung der Zentrifuge wurde bei 12 kNm eine hohe Zentratbelastung dokumentiert. Durch die Regleroptimierung war eine Einstellung des Drehmoments von 13 kNm an der Zentrifuge 1 und 14 kNm an der Zentrifuge 2 ohne große Zentratbelastung möglich. Der TR konnte dadurch auf bis zu 28 % erhöht werden. Durch Erhöhung des Drehmoments von 11 kNm auf 13 kNm können jährlich 30.000- 60.000 € gespart werden.

Anlagen

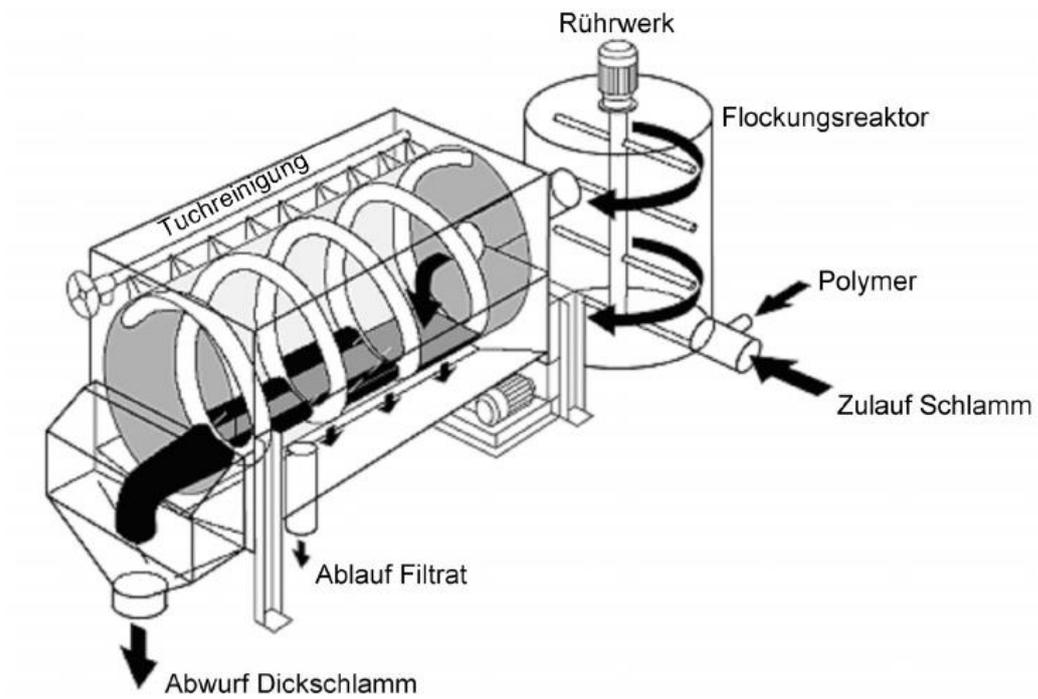
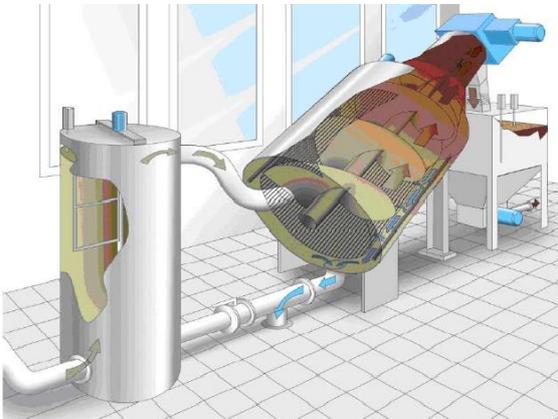
Anlage 1: Schlammkennwerte nach DWA-M 383

Tabelle 1: Basiskennwerte

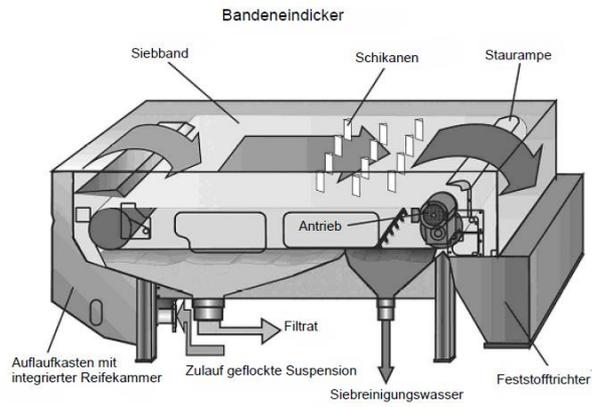
Kennwert	Einheit	Bestimmung	Erläuterung
Trockenrückstand (<i>TR</i>)	%	DIN EN 12880	Maß für den Feststoffgehalt der nicht abfiltrierten Schlammprobe
Trockensubstanz (<i>TS</i>)	g/l	DIN EN 38414-1	Maß für die Feststoffkonzentration der abfiltrierten Schlammprobe
Glühverlust (<i>GV</i>)	%	DIN EN 12879	Maß für den organischen Schlammanteil
Glührückstand (<i>GR</i>)	%	DIN EN 12879	Maß für den anorganischen Schlammanteil
pH-Wert	-	DIN 38414	Logarithmisches Maß für die H ⁺ -Ionenkonzentration
Elektrische Leitfähigkeit	mS/cm	Messsonde DIN EN 27888	Maß für die Konzentration und Beweglichkeit von Ionen, näherungsweise für den Salzgehalt
Temperatur	°C	Thermometer	Maß für die Schlammtemperatur
Ortho-Phosphat im Faulschlamm	mg/l	DIN 38414	gelöste PO ₄ -P Konzentration im Schlammwasser
Überschussschlammanteil	%	Betriebsdaten	ÜS-Fracht bezogen auf die Rohschlammfracht
Massen- oder Volumenanteil und Art von externen Schlämmen oder Co-Substraten	%	Betriebsdaten	von außerhalb der Kläranlage eingebrachte Stoffe: z. B. Fette aus Lebensmittelbetrieben, Fettabscheiderinhalte, Fäkalschlämme
Mikroskopisches Bild Fädigkeit	-	Mikroskop ggf. Färbungen	Mikroskopisches Bild der Flockenstruktur (siehe KUNST et al. 2000)
Schlammindex (<i>ISV</i>)	m ³ /g	DIN EN 14702-1	Maß für das Absetzverhalten von belebtem Schlamm
Konditionierungsmittelmenge	g/kg <i>TM</i> kg/Mg <i>TM</i>	Betriebsdaten	Dosiermenge, die für die Konditionierung eingesetzt wird (polymere Flockungsmittel, Koagulationsmittel, Kalkprodukte)
Abscheidegrad	%	Betriebsdaten	Verhältnis der abgetrennten zur zugeführten Feststoff-Fracht

Tabelle 2: Weitergehende Kennwerte

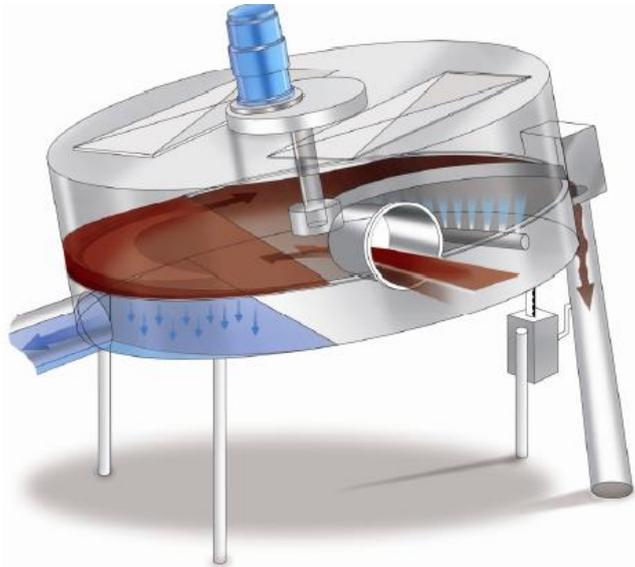
Kennwert	Einheit	Bestimmung	Erläuterung
Sandanteil	% von GR	Feldmethode	Maß für die in Salzsäure unlöslichen Feststoffe
Proteine, Polysaccharide EPS-Gehalt	g/kg TM g/kg oTM	Extraktion mit Ionen- austauscher	Maß für die Menge gelbildender/kolloidaler Substanzen; Labormethode Extraktion nach FROLUND et. al. (1996); Analyse nach BRADFORD (1976) oder LOWRY (1951)
Kationenverhältnis M/D	-	AAS Küvettest	Verhältnis mono- zu divalenten Kationen im Schlammwasser
Ammonium- Stickstoff	mg/l	DIN 38414	gelöste NH ₄ - N Konzentration im Schlammwasser
lipophile Stoffe Fettgehalt	g/kg TM g/kg oTM	Petrol-extra- hierbare Stoffe DIN 38409 H 56/6.09	Maß für den Fettanteil im Schlamm
organische Säuren	mg/l (als HA _c)	DIN 38414 Titration	Essigsäureäquivalent der kurzkettigen Carbonsäuren (C ₁ -C ₆)
Redoxpotenzial	mV	Messsonde	Maß für die reduzierenden, bzw. oxidierenden Milieubedingungen im Schlamm
Säurekapazität	mmol/l	DIN 38409-7	Verbrauch von Salzsäure bei Titration auf einen pH-Wert von 4,3
Basenkapazität	mmol/l	DIN 38409-7	Verbrauch von Natronlauge bei Titration auf einen pH-Wert von 8,2
Partikelgrößen- verteilung	-	Optische Messverfahren	Verteilung der Partikelgröße (Anzahl, Fläche, Volu- men)
kapillare Fließzeit CST	s	DIN EN 14701	Maß der Wasserabgabegeschwindigkeit auf einem Filterpapier
spez. Filtrations- widerstand	m/kg	DIN EN 14701	Maß der Wasserabgabegeschwindigkeit abgeleitet aus einem Filtrationstest
Kompressibili- tät	-	ATV (1992)	abgeleiteter Kennwert aus der Messung des spezifischen Filtrationswiderstands bei verschie- denen Drücken

Anlage 2: Eindicker nach DWA M 381**Trommeleindicker****Schneckeneindicker**

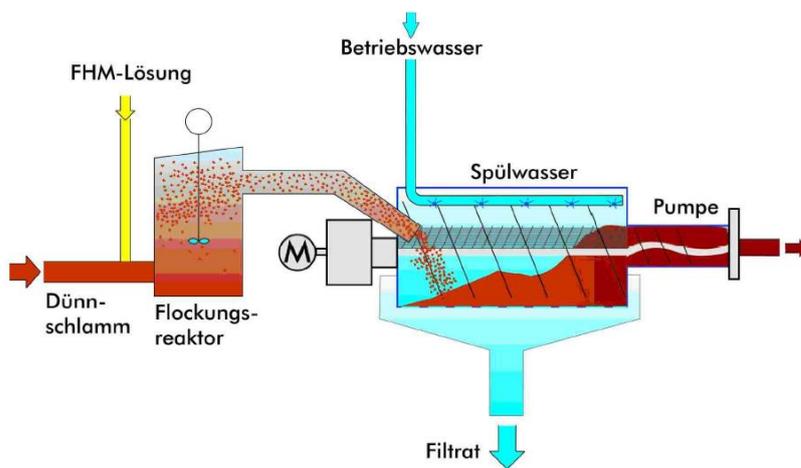
Bandendicker



Tellereindicker

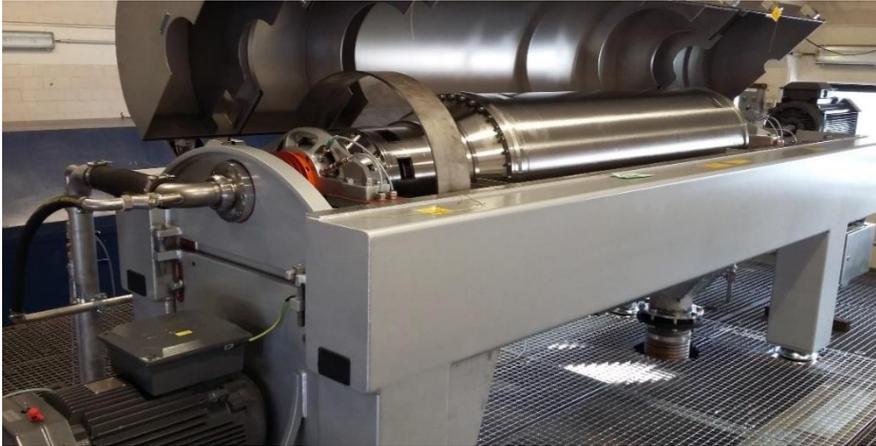


Pumpeneindicker



Anlage 3: Leistungsdaten von Entwässerungsmaschinen nach DWA M 366

	Einheit	Zentrifugen	Bandfilterpressen ¹⁾	Filterpressen: Kammerfilterpressen ³⁾ Schlauchfilterpressen		Schneckenpressen
				pFM	Kalk-/Eisen-Konditionierung ²⁾	
Austrags-Feststoffkonzentration TR (%)						
Primärschlamm	%	32 – 40	30 – 35	32 – 40	35 – 45	30 – 40
Mischschlamm aus PS + ÜS (Fracht-Verhältnis ca. 1:1)	%	26 – 32	24 – 30	26 – 32	33 – 45	24 – 30
Aerob stabilisierter Überschussschlamm (ohne Vorklärung)	%	18 – 24	15 – 22	18 – 24	28 – 35	18 – 24
Faulschlamm	%	22 – 30	20 – 28	22 – 30	30 – 40	20 – 28
Verbrauch polymerer Flockungsmittel (bezogen auf die polymere Wirksubstanz WS)						
Spezifischer pFM-Verbrauch	kg/Mg TM	8 – 14	6 – 12	6 – 12 8 – 15 ⁶⁾	–	6 – 12
Stromverbrauch						
Spez. Stromverbrauch ⁴⁾	kWh/m ³	1,0 – 1,6	0,5 – 0,8	0,7 – 0,9 1,0 – 1,2 ⁷⁾	1,0 – 1,2	0,2 – 0,5
Spez. Stromverbrauch ⁵⁾	kWh/m ³	1,6 – 2,2	1,1 – 1,4	1,5 – 1,8	1,8 – 2,0	0,6 – 1,0
Spez. Stromverbrauch ⁴⁾	kWh/Mg TM	40 – 60	20 – 30	30 – 40 40 – 50 ⁷⁾	30 – 40	8 – 16
Spez. Stromverbrauch ⁵⁾	kWh/Mg TM	60 – 90	40 – 50	60 – 70	70 – 80	20 – 40
1) TR im Zulauf zwischen 2 % und 7 %. 2) Abhängig von Zugabemengen von Kalk und Eisen. 3) Membranfilterpressen erreichen im Vergleich zu Kammerfilterpresse bei optimaler Betriebsweise und Konditionierung einen um 2 % bis 4 % höheren TR im Austrag; der Stromverbrauch von Membranfilterpressen ist etwas höher als der von Kammerfilterpressen. 4) Stromverbrauch der Maschine bezogen auf den Schlammumsatz bzw. die Feststofffracht ohne Konditionierungsmittelmenge. 5) Stromverbrauch wie 4), aber einschließlich des Stromverbrauchs der Beschickungspumpe und Konditionierungsanlage. 6) Flockungsmittelverbrauch von Schlauchfilterpressen. 7) Stromverbrauch von Membranfilterpressen.						

Anlage 4: Zentrifuge Alfa Laval

Zentrifuge 2 mit offenem Gehäusedeckel

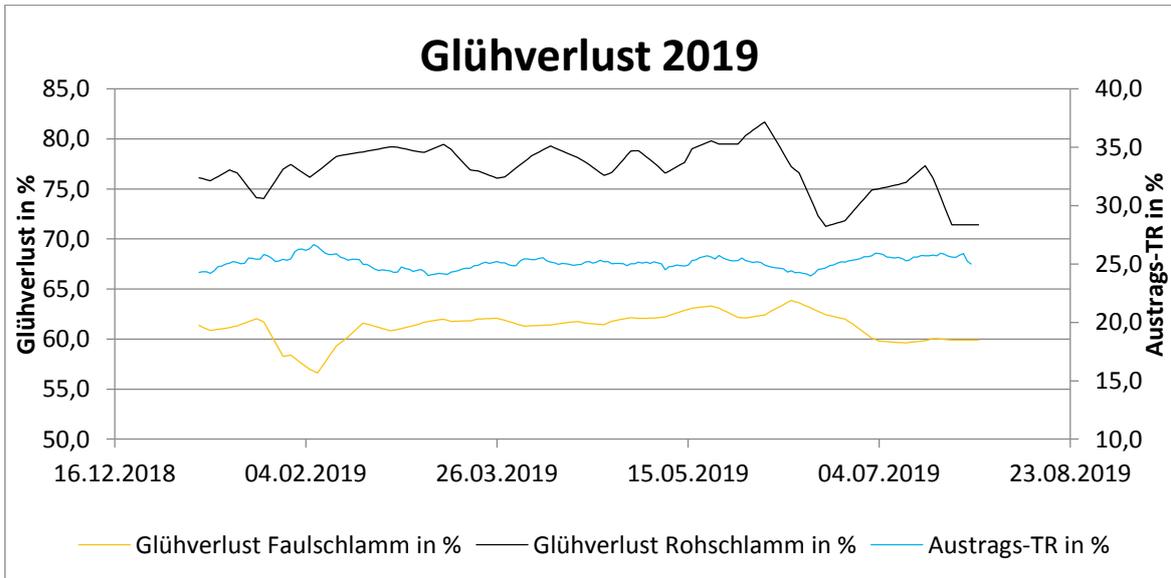
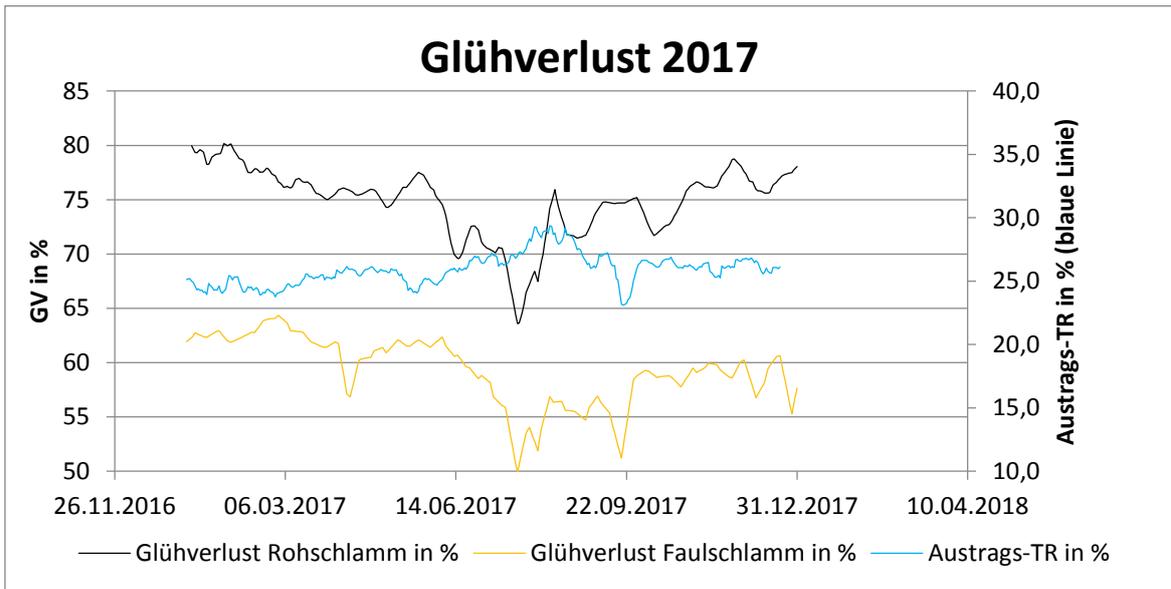


Schnecke der Zentrifuge

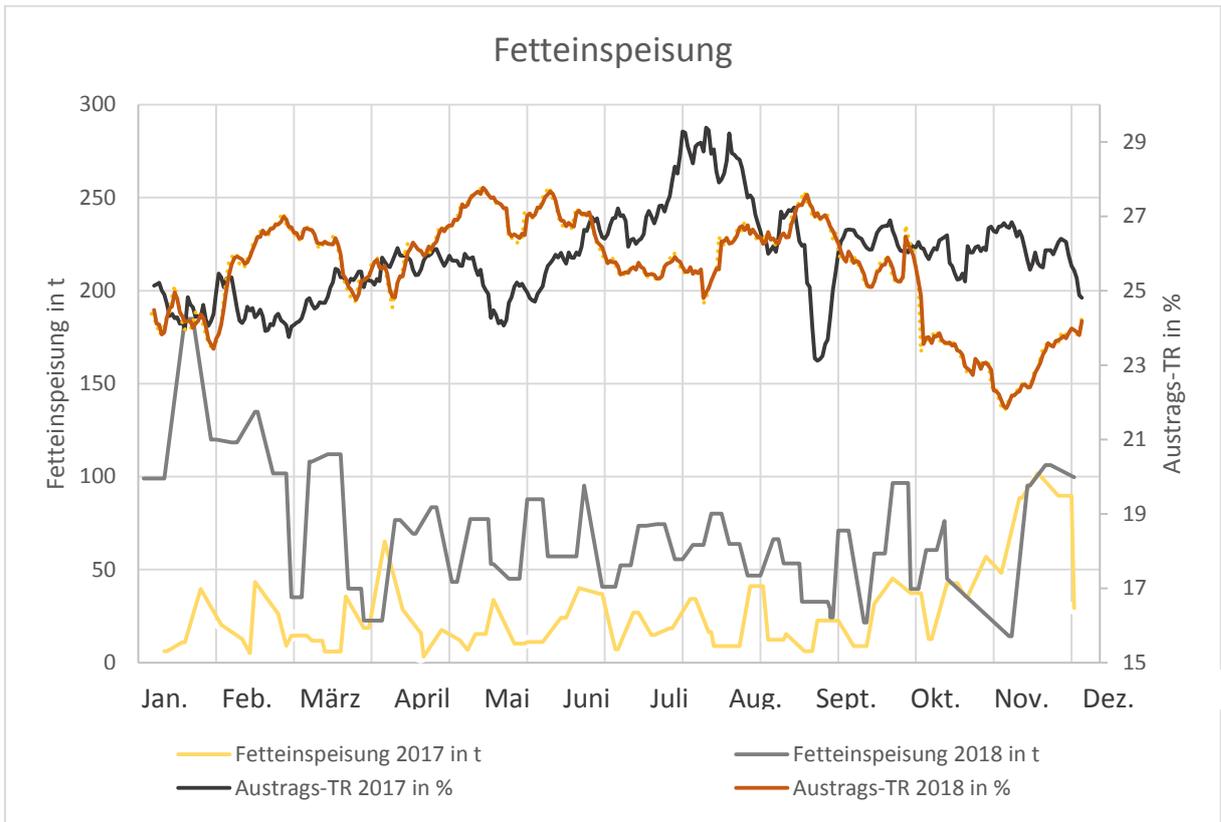


Aufgabekammer mit Stauscheibe

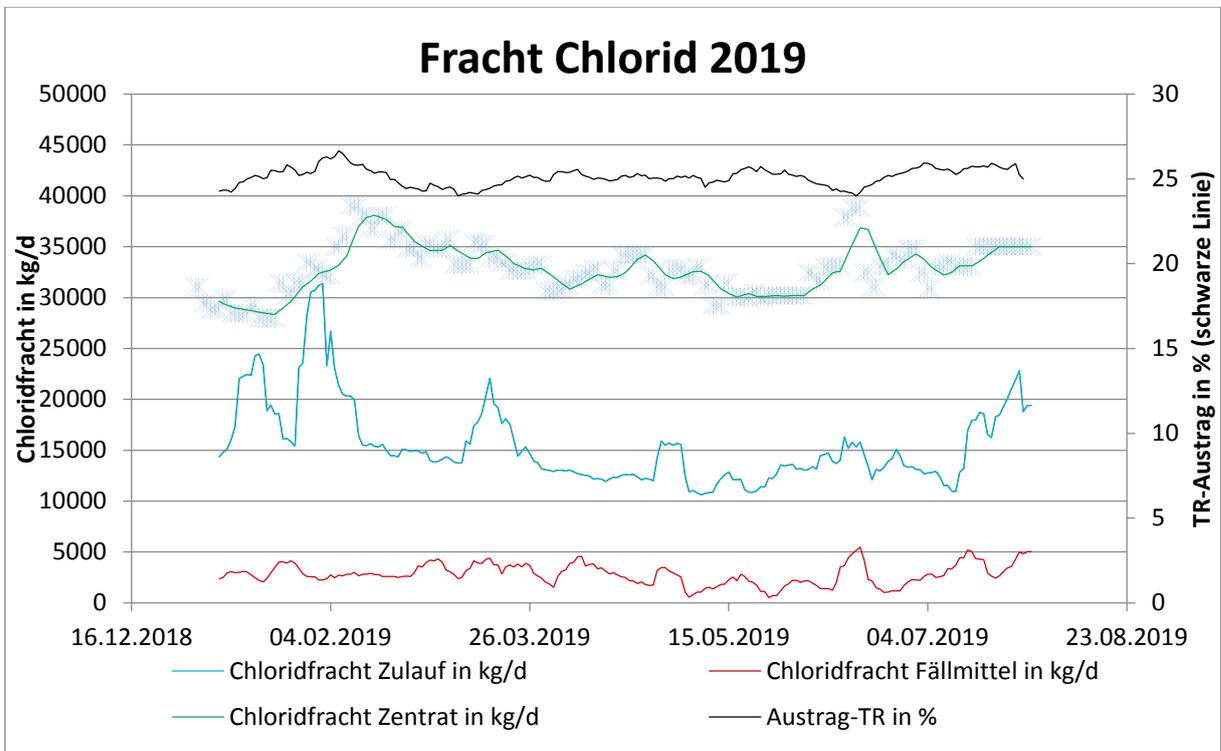
Anlage 5: Glühverlust



Anlage 6: Fetteinspeisung



Anlage 7: Chloridgehalt



Produktdaten

FS-Volumenstrom (ist)	m³/h	30	30	30	30	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	30
Einlauf-Konzentration	%	2,68	2,68	2,68	2,68	2,84	2,84	2,84	2,84	2,66	2,66	2,66	2,66	2,65	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,76
max.Durchsatz (max. 1200 kg TS/h)	m³/h	44,78	44,78	44,78	44,78	42,25	42,25	42,25	42,25	45,11	45,11	45,11	45,11	45,28	44,61	44,61	44,61	44,61	44,61	44,61	43,48

Ergebnisse

Austrags-Konzentration	%	26,4	25,8	25,6	26,3	24,1	25,3	25,8	26,6	25,5	27,4	26,1	27,9	26,2	26,1	25,3	25,7	25,8	24,5	22,9	25,6
Zentrat- Aussehen		klar	klar	klar	klar	klar	klar	grau	grau	klar	grau	grau	schwarz	grau	grau	klar	klar	klar	grau	grau	milchig
Imhoffrichter	ml/l	0,9	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	30	5	0	35	3	5	0	50	0	0	1,5	0,5	70	2
Außentemperatur	°C	8	8	8	8	11	11	11	11	13	13	13	13	10	5	14	14	15	17	19	6

Versuche	FS-Volumenstrom				FHM-Konzentration				Wehrdurchmesser								
Zentrifugen Nr.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Datum	22.04.	22.04.	22.04.	22.04.	23.04.	23.04.	23.04.	24.04.	25.04.	25.04.	25.04.	26.04.	26.04.	26.04.	26.04.	26.04.	26.04.
Zeit	8:00	9:00	10:10	11:15	10:25	13:20	19:00-3:00	9:37	9:55	11:15	19:00	03:00	11:00	19:00	3:00		

Maschinen-einstellung

Trommel-drehzahl	U/min	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200
Grund-differenzdrehzahl (min.Diff.)	U/min	2,4	2,4	2,4	2,4	2,6	2,6	2,6	2,4	2,8	2,6	2,6	2,8	2,8	2,80	2,8
Differenzdrehzahl real	U/min	2,40	2,82	2,78	3,04	2,98	2,90	3,28	2,43	5,49	3,03	4,47	2,98	4,10	3,83	3,66
Wehr-durchmesser	mm	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-6	-6	-10	-10	-10	-10	-10
Drehmoment	kNm	11	11	11	11	11	11	10	11	11	12	10	10	10	10	10,30

Drehmoment real	kNm	9,37	11,00	10,48	11,20	11,08	10,60	10,18	9,90	11,67	11,68	11,54	10,03	10,51	10,68	9,88
Strom gesamt	kW	22,51	25,23	26,77	28,95	27,19	26,45	28,42	26,55	30,61	27,95	30,53	27,35	29,35	28,59	29,47

Flockungshilfsmittel

Aquaplan PK 65	Typ	eurof.														
Konz.bei 100% WS	%	0,52	0,52	0,52	0,52	0,60	0,70	0,52	0,40	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
FHM-Volumenstrom	l/h	1450	1700	2000	2250	1550	1350	1850	1500	1900	1900	1800	1800	1900	1800	1900
spez. FHM-Menge	kgWS/tTR	11,21	10,83	11,13	10,91	9,42	9,57	9,82	5,68	10,49	10,49	9,62	9,87	9,19	9,03	9,00
Dosierpunkt 1/2/3/4 *		2														

Produktdaten

FS-Volumenstrom (ist)	m³/h	25	30	35	40	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	38
Einlauf-Konzentration	%	2,69	2,72	2,67	2,68	2,82	2,82	2,80	3,02	2,69	2,69	2,78	2,71	3,07	2,96	2,89
max.Durchsatz (max. 1200 kg TS/h)	m³/h	44,61	44,12	44,94	44,78	42,55	42,55	42,86	39,74	44,61	44,61	43,17	44,28	39,09	40,54	41,52

Ergebnisse

Austrags-Konzentration	%	25,5	25,9	25,8	25,9	25,1	25,3	25,2	24,7	25,6	27,2	26,2	26,0	25,0	24,7	25,9
Zentrat- Aussehen		klar	klar	klar	klar	grau	klar	klar	schwarz	grau	schwarz	klar	klar	klar	klar	klar
Imhofftrichter	ml/l	0	0	0	0	28,0	0,1	0	170,0	5,0	800,0	0	1,0	0	0	0
Außentemperatur	°C	11	11	12	13	15	19	19	10	20	21	22	12	18	19	20

Wiederholungsversuch

Zentrifugen Nr.	1	2	1	2	1	2	1	2
Datum	08. Jul							
Zeit	08:52	08:52	10:05	10:05	11:56	11:56	13:09	13:09

Maschineneinstellung

Laufzeit seit letzter Spülung	h								
Trommeldrehzahl	U/min	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200
Grunddifferenz (min.Diff.)	U/min	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Differenzdrehzahl	U/min	2,56	2,5	2,64	2,5	2,52	2,5	2,52	2,5
Wehrdurchmesser	mm	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
Soll-Drehmoment	kNm	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7
Ist-Drehmoment	kNm	10,9	10,7	10,53	10,75	10,47	10,87	10,17	10,93
Strom gesamt	kW	23,45	23,35	23,53	23,19	23,33	23,22	22,9	23,28

Flockungshilfsmittel

FHM	Typ	PK 24 H	PK 65 LP						
Konz.bei 100% WS	%	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Lösemenge	l/h	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Dosiermenge	kg/ttr	11,26	11,26	11,26	11,26	11,26	11,26	11,26	11,26

Produktdaten

Einlauf-Menge (ist)	m³/h	25	25	25	25	25	25	25	25
Einlauf-Konzentration	%	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77
max.Durchsatz (max. 1200 kg TS/h)	m³/h	43,32	43,32	43,32	43,32	43,32	43,32	43,32	43,32

Ergebnisse

Austrags-Konzentration	%	25,86	26,88	26,31	26,62	25,83	26,21	26,32	26,75
Zentrat-Aussehen		klar	weiß	klar	klar	klar	klar	klar	klar

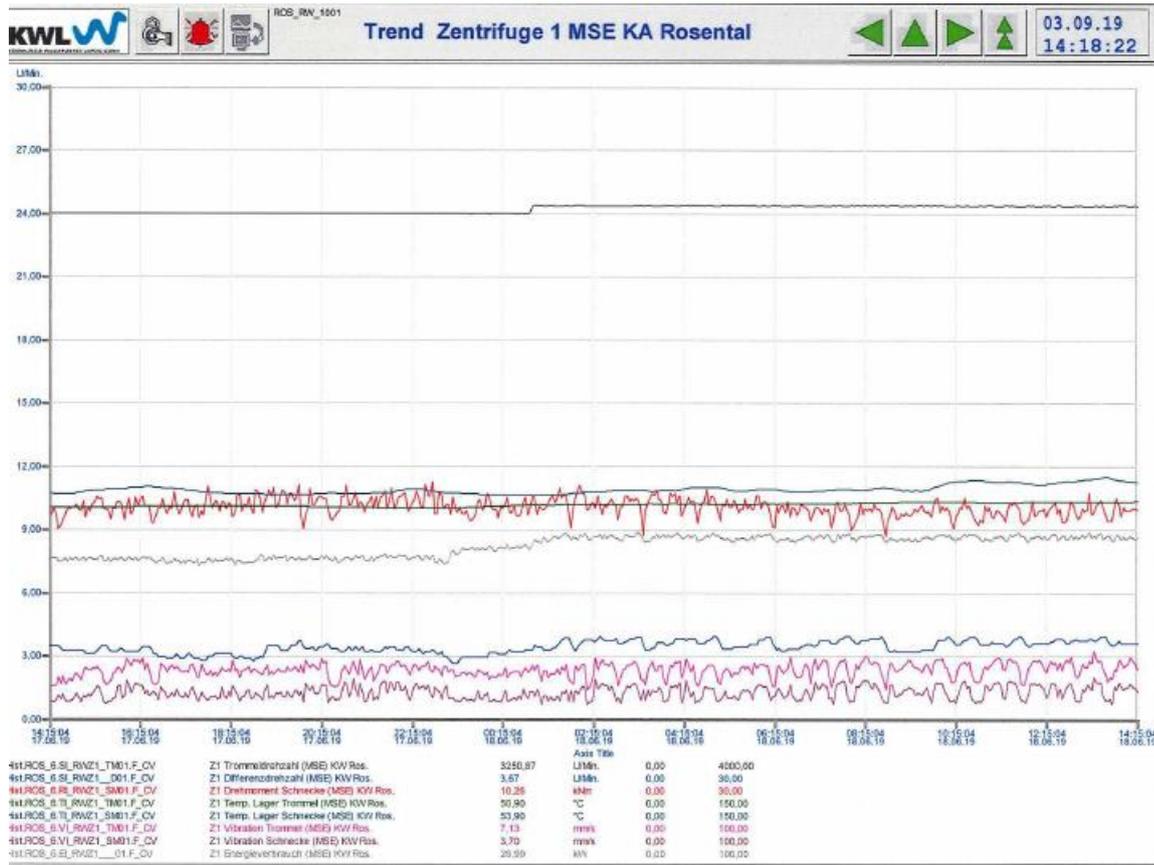
Anlage 10: Optimierung PID-Regler

Zentrifuge 1	Zustand vor Optimierung		erste Optimierungsstufe		Zweite Optimierungsstufe	
	Drehmoment	Differenzdrehzahl	Drehmoment	Differenzdrehzahl	Drehmoment	Differenzdrehzahl
minimale Hysterese in kNm	0,1	-	1	-	1	-
maximale Hysterese in kNm	0,05	-	0,1	-	0,1	-
P Verstärkung	2,2	2,1	1,2	2,1	4	4
I Nachstellzeit in s	25	25	120	25	240	8
D Vorhaltezeit s	0	0	0	0	0	0

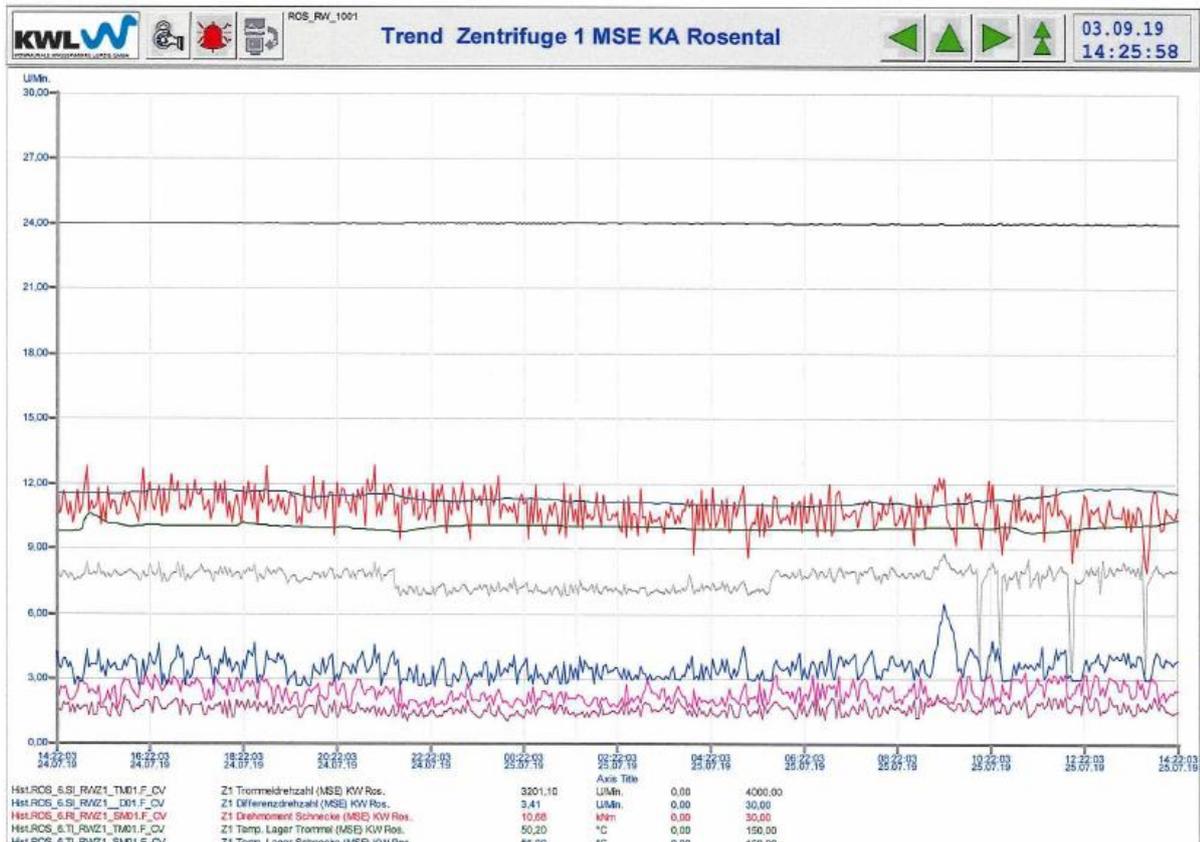
vor der Reglereinstellung:



nach der Hystereseeinstellung:



nach der PID-Einstellung:



Anlage 11: Drehmomentversuch

Zentrifugen Nr.		1	1	2	2	2
Datum		14.08.	14.08.	14.08.	14.08.	14.08.
Zeit		10:55	13:17	14:40	15:30	17:30
Maschineneinstellung						
Trommel-drehzahl	U/min	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200
Grunddifferenz (min.Diff.)	U/min	3,0	3,0	3,0	2,8	3,9
Differenz-drehzahl real	U/min	3,63	3,55	3,79	3,75	3,90
Wehr-durchmesser	mm	-8	-8	-8	-8	-8
Drehmoment	kNm	12,00	13,00	12,00	13,00	14,00
Drehmoment real	kNm	11,65	12,92	12,81	13,89	13,54
Strom gesamt	kW	25,93	26,35	26,61	26,35	27,39
Flockungshilfsmittel						
Aquaplan PK 65	Typ	eurolf.	eurolf.	eurolf.	eurolf.	eurolf.
Konz.bei 100% WS	%	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Lösemenge	l/h	1600	1900	1600	1700	1700
Dosiermenge	kg/ttr	10,12	12,02	10,12	10,75	9,12
Produktdaten						
Einlauf-Menge (ist)	m³/h	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Einlauf-Konzentration	%	2,74	2,74	2,74	2,74	3,23
max.Durchsatz (max. 1200 kg TS/h)	m³/h	43,80	43,80	43,80	43,80	37,15
Ergebnisse						
Austrags-Konzentration	%	27,9	28,3	27,5	27,1	27,2
Zentrat		klar	leicht trüb	klar	klar	klar

Anlage 12: Kostenberechnung

	Einheit	Drehmoment	
		10,6	12
	kNm		
Entsorgung			
Austrags-TR	%	25,80	27,19
Entsorgungsmenge	t/a	34.884	33.100
spezifische Kosten	€/t	50	50
Entsorgungskosten	€/a	1.744.186	1.655.020
Energie			
Leistung	kW	27	27,25
Laufzeit (Stand 2018)	h/a	11.500	11.500
Menge an Zentrifugen (Stand 2018)		1,50	1,50
Stromkosten	€/kWh	0,17	0,17
Energiekosten	€/a	79.178	79.911
FHM			
FHM-Volumenstrom	l/h	1.676	1.700
Konzentration	%	0,52	0,52
Verbrauch FHM-Menge	kg/h	13,07	13,26
FHM-Verbrauch	kg/a	150.306	152.490
spezifische FHM-Kosten	€/kg	2,56	2,56
FHM-Kosten	€/a	384.783	390.374
Gesamtkosten	€/a	2.208.146	2.125.305
Einsparung	€/a		82.841

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Zuhilfenahme unzulässiger Hilfsmittel angefertigt zu haben. Wörtliche oder dem Sinne nach übernommene Ausführungen sind gekennzeichnet, sodass Missverständnisse über die geistige Urheberschaft ausgeschlossen sind. Diese Arbeit war bisher noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung in gleicher oder ähnlicher Fassung.

Merseburg, den 24. September 2019

Literaturverzeichnis

Alfa Laval: Technische Beschreibung der Alfa Laval Zentrifugen.

Alfa Laval (2013): ALDEC und G3 Praesentation_2019_DE.

Anger, Andreas (2015): Bachelorarbeit. Untersuchungen zur Optimierung der maschinellen Schlammmentwässerung auf dem Klärwerk Leipzig Rosental.

ATV-VKS-Fachausschuss 3.2 (1987): Arbeitsbericht „maschinelle Schlammmentwässerung“. „Stabilisation, Entseuchung, Eindickung, Entwässerung und Konditionierung von Schlämmen, einschließlich Kompostierung von Schlämmen und festen Abfällen.

Baker & Hughes (2002): Betriebsanleitung. Baker Process.

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2007): Merkblatt DWA-M 381. Eindickung von Klärschlamm. DWA Regelwerk. Hennef.

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2013): Merkblatt DWA-M 366. Maschinelle Schlammmentwässerung. DWA Regelwerk. Hennef.

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2014): Merkblatt DWA-M 350. Aufbereitung von synthetischen polymeren Flockungsmitteln zur Klärschlammkonditionierung. DWA Regelwerk. Hennef.

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2018): Merkblatt DWA-M 383. Kennwerte der Klärschlammmentwässerung. DWA Regelwerk. Hennef.

EssDe GmbH: EssDe® - Deammonifikation / Verfahren von <https://www.essde.com/deammonifikation-verfahren>. Abgerufen am 15.08.2019.

HeGo-BIOTEC: CST-Messung von www.hego-biotec.de/cst-messung. Abgerufen am 15.07.2019.

Herbert, Florian: Klärschlammmentsorgung im Lichte neuer Anforderungen von https://bornermel.eu/files/bornermel/uploads/pdfs/Vortraege%20und%20Veranstaltungen/20160421_BE_Schlammmentsorgung.pdf. Abgerufen am 15.08.2019.

Imhoff, K. (1910): Die Schlammbehandlung im Emscherbrunnen. Technisches Gemeindeblatt Heft 13.

Imhoff, K., Imhoff, K.R. (1976): Taschenbuch der Stadtentwässerung. München/Wien: Verlage R. Oldenbourg.

Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ralf Denkert (2019): Bericht zur Klärschlammmentwässerungseigenschaften.

- Jumo: Was versteht man unter Schaltdifferenz/Hysterese? von https://www.jumo.de/de_DE/support/faq/regler/T2/Q6.html. Abgerufen am 16.07.2019.
- Keßler, Alexandra (2011): Diplomarbeit. Untersuchungen zur Optimierung der maschinellen Schlammwässerung auf dem Klärwerk Leipzig Rosental.
- Kober, Bertram: Klärwerk Rosental Leipzig. punctum von http://landschaften-in-deutschland.de/themen/78_B_157-wasser-fuer-die-stadt/. Abgerufen am 01.09.2019.
- Kolb, Jürgen (2017): Alfa Laval Umwelttechnik. Schulung Schlammwässerung mit einem Alfa Laval Dekanter.
- Kunze, Uwe (2019): Bericht Laboruntersuchung zu FHM.
- Leschber, R. (Hrsg.) (1996): ATV-Handbuch. Klärschlamm: Ernst & Sohn.
- Möller, U. (Hrsg.) (1978): Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik. Natürliche Entwässerung, Schlammteiche oder -lagunen. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Stahl, Werner Helmut (2004): Industrie-Zentrifugen. Maschinen- & Verfahrenstechnik. Männedorf: DrM Press.
- Wirth, Peter (2018): Vortragsmaterial. Faulung 2018.