



awama GmbH

**Digitalisierung und Optimierung
des Zentrifugendekanterbetriebs in Kombination
mit einer Automatisierten Mehrfachen Flockung**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 35500/32 u. 37844/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Jochen Gaßmann & Dipl.-Ing. (FH) Kevin Piel M.Eng.

Braunschweig
September 2022

awama GmbH

**Digitalisierung und Optimierung
des Zentrifugendekanterbetriebs in Kombination
mit einer Automatisierten Mehrfachen Flockung**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 35500/32 u. 37844/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Jochen Gaßmann & Dipl.-Ing. (FH) Kevin Piel M.Eng.

Juli 2022

1 Übersicht

1.1 Inhaltsverzeichnis

1	Übersicht	III
1.1	Inhaltsverzeichnis	III
1.2	Abbildungsverzeichnis	IV
1.3	Tabellenverzeichnis	V
1.4	Formelverzeichnis	V
1.6	Begriffe und Definitionen	VI
2	Zusammenfassung	1
3	Einleitung	2
4	Hauptteil	5
4.1	Aufbau der Messbefähigung	7
4.1.1	Abschnitt 1 – Sensorkonzeptionierung, Design und Konstruktion	7
4.1.2	Abschnitt 2 – Validierung der technischen Funktionsfähigkeit	8
4.1.3	Abschnitt 3 – Ausarbeitung des Versuchsprogramms	9
4.1.4	Abschnitt 4 – Planungsarbeiten zur technischen Umsetzung	9
4.1.5	Abschnitt 5 – Umbau / Erweiterung / Inbetriebnahme	10
4.1.6	Abschnitt 6 und 7 – Entwicklung und Erprobung der Steuerung	10
4.1.7	Änderungen im Projektablauf	12
4.2	Entwicklungsschritte zum Regelungskonzept	15
4.3	Randbedingungen und Versuchsplan zur Durchführung	18
4.3.1	Bestimmung der Zentrifugenkennfelder	19
4.3.2	Bestimmung der äußeren Einflüsse	25
4.3.3	Störeinflüsse für den Zentralsensor	28
4.3.4	Kalibrierung des Zentralsensors	30
4.3.5	Bewertung der Messwerte im Kontext	33
4.4	Abschnitt 8 - Bewertung der Versuchsergebnisse	37
4.4.1	Anwendung der Versuchsergebnisse auf die praktische Umsetzung ...	37
4.4.2	Regelkonzepte für eine Steuerungssoftware	38
4.4.3	Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung	40
5	Fazit	45
6	Literaturverzeichnis	V
7	Anhänge	VIII
7.1	A1 Fließschema Regelkonzept	VIII

1.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Konstruktionsentwurf Prototyp (links) und Versuchsstand (rechts)	7
Abbildung 2 Korrelation Sensorsignal mit TS-Gehalt.....	8
Abbildung 3 Korrelation Sensorsignal mit Abscheidegrad	9
Abbildung 4 Zentratsensor (links) und Zentratbehälter KA Wolfenbüttel (rechts)	10
Abbildung 5 Fließbild zum Regelungs- und Automatisierungskonzept.....	11
Abbildung 6 Regeln konstanter TR-Werte (links) und maximaler TR-Werte (rechts)	11
Abbildung 7 Korrelation Sensorsignal mit TS-Gehalt und Korrelation Sensorsignal mit Abscheidegrad	12
Abbildung 8 geplanter Zentratsensorabschnitt.....	13
Abbildung 9 Zentratkontrollleitungsabschnitt mit Bypass und Küvettenaufhängung	14
Abbildung 10 Inbetriebnahme Sensor mit Küvette	14
Abbildung 11 Probennahme und Abbildung 12 Zentratbild am Schauglas	15
Abbildung 13 Fließschema Regelkonzept (siehe auch Anhang 1)	16
Abbildung 14 CSB des Zentrats als Funktion des Sensorsignals	19
Abbildung 15 Erhöhung der max. Entwässerbarkeit in Abhängigkeit des Abscheidegrades	21
Abbildung 16 Verhalten TR und Abscheidegrad über Antriebslast	22
Abbildung 17: TR Entwässert über der Antriebslast gesamt 1 Monat	23
Abbildung 18: TR Entwässert über der Antriebslast je Zeitraum.....	23
Abbildung 19: qualitatives Zentrifugenkennfeld Hildesheim.....	25
Abbildung 20 Trubstanzgehockensalt (TS) Sonden- zu Ofenwert.....	27
Abbildung 21 Wirksubstanzgehalt Istwert bei 0,4% Sollwert	28
Abbildung 22 Schaumbildung Zentrat.....	29
Abbildung 23 Schauglasablagerungen	29
Abbildung 24 Verfälschung Zentratsensor-Signal während der Probennahme	31
Abbildung 25: Sensorsignal über Abscheidegrad.....	33
Abbildung 26: Sensorsignal über Abscheidegrad final	34
Abbildung 27: Zentrifugenkennfeld mit Linien konstanten Regelbeginns	35
Abbildung 28: Zentrifugenkennfeld mit mit Linien kontanten Regelbeginns (qualitativ)..	36
Abbildung 29: Regelkonzeptziel (qualitativ)	39
Abbildung 30: Regelkonzeptziel 3a-c (qualitativ)	40
Abbildung 31: zusätzlicher Faulschlamm durch Zentratbelastung.....	42
Abbildung 32: zusätzliche 24/7 Betriebsstunden pro Jahr	42

1.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Störgrößen für Zentratmessung.....	18
---	----

1.4 Formelverzeichnis

Formel 1: Schlammvolumenstromberechnung für konstanter Fracht	26
Formel 2: Sollwert Polymerlösungsvolumenstrom	27
Formel 3: Abscheidegrad	33

1.6 Begriffe und Definitionen

pFM	polymere Flockungsmittel
SEHi	Kläranlage Stadtentwässerung Hildesheim
Fracht	Feststoffmenge im Schlamm
Kippunkt	Betriebsparametersatz aus Flockungsmitteldosierung und Antriebslast, die gerade noch zu akzeptablen Entwässerungsergebnissen führt
Regelbeginn	Einstellparameter der Zentrifuge, ab dem der Austrag in Abhängigkeit von der Antriebslast erhöht wird. Antriebslasten unterhalb des Regelbeginns arbeiten auf Minimum der Austragsgeschwindigkeit des entwässerten Schlamms.
Antriebslast	prozentuale Ausdruck der maximalen Leistungsfähigkeit der Zentrifugenbelastung. Mit steigender Fracht und Entwässerungswert des Schlamms steigt auch die Antriebslast.
Wirksubstanz	entspricht dem reaktivem Polymer. Der Wirksubstanzanteil im Einkaufsgebilde unterscheidet sich primär nach der Form. Granulate enthalten bis zu 100% Wirksubstanz. In Flüssiger Form kann der Anteil teilweise auch nur bei 50% liegen. Nur die Wirksubstanz ist entscheidend für die Reaktion mit dem Schlamm
Polymerlösung	gebrauchsfertige Lösung der Wirksubstanz in Wasser. Übliche Mengen sind 4g Wirksubstanz pro Liter Wasser
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
ABA	Abwasserbehandlungsanlage
TR	Trockenrückstand (Angabe für trockenen Feststoffgehalt in Feststoffen) in %
AG	Abscheidegrad in %
TS	Trockensubstanz (Angabe für trockenen Feststoffgehalt in Flüssigkeiten) in %
FS	Faulschlamm

2 Zusammenfassung

In dem Projekt wurde eine innovative erweiterte Flockungstechnik untersucht, die auf Grundlage eines optischen Inline-Messverfahrens eine quantitative Bewertung des Schlammes und der Zentrante vornimmt und so ein entscheidendes Rückmeldekriterium zur Bewegung von Betriebspunkten im Zentrifugenkennfeld liefert. Die Kooperation der Kläranlagen Wolfenbüttel und Hildesheim wurde dafür ausgiebig genutzt, um über lange Zeiträume Messungen durchführen zu können. Mit Hilfe unseres Kooperationspartners CUTEC von der TU Clausthal wurden Modellversuche unternommen, Konzepte entwickelt und mit Laborversuchen unterstützt.

Die Anwendung der Regelstrategien auf die Messwerte zeigt nun ein enormes ökonomisches und ökologisches Potential der Technik. Es können Betriebskosten pro Kläranlage im 6-stelligen Bereich und über die Kläranlagen der Größe 3 gesehene Umweltauswirkungen einer Kleinstadt vermieden werden.

In dem Bericht wird gezeigt, wie sich ungenaue Betriebsbedingungen im üblichen Bereich sogar bei Kläranlagen neuesten Baustands massiv auswirken. Anhand eines aufgenommenen Zentrifugenkennfeldes wird gezeigt, wie die qualitativen und quantitativen Auswirkungen auf den Betrieb sind und wie wichtig es ist, Automatisierung auch bis zum Ende zu denken.

Es wurde ein umfangreiches Messprogramm zur Dokumentation des Istzustandes durchgeführt, welches mittels statistischer Mittel optimiert wurde. Nur so gelang es, im realen Betrieb mit täglichen Änderungen über einen sehr langen Zeitraum noch quantitative Aussagen in messtechnisch schwierigen Bereichen zu geben.

Zur Bestimmung der Zentrantebelastung wurde eine Inlinemesstechnik entwickelt, die es ermöglicht, Zentrantefrachten sehr fein aufzulösen. Die Herausforderungen von Ablagerungen und anderer Störgrößen konnten für den Zeitraum der Messungen kompensiert werden. Eine dauerhafte, stabile Betriebsweise ist Teil eines fortführenden Entwicklungsschrittes.

Ungeachtet dessen konnte die Anwendung der entwickelten Regelungskonzepte je Betriebswunsch angepasst und betrachtet werden. Nicht jede Kläranlage hat die gleichen Randbedingungen. Die Strategie muss somit flexibel auf vorangegangene und nachfolgende Prozesse angepasst werden. Diese Möglichkeiten sind mit den entwickelten Konzepten in weiten Teilen abgedeckt.

Dieses Projekt konnte aufgrund des wirtschaftlichen Risikos nur mit Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter Az: 35500/32 u. 37844/01 durchgeführt werden.

3 Einleitung

Bei der Abwasserreinigung in Kläranlagen fällt Klärschlamm an, welcher kostenaufwendig entsorgt werden muss. Da der Schlamm zu Beginn des Abwasserbehandlungsprozesses einen sehr hohen Wasseranteil von ca. 98 % aufweist, sind (mehrstufige) verfahrenstechnische Schritte für die Abtrennung der Feststoffe notwendig. Das Hauptverfahren der Entwässerung, welches über den Prozess der Mehrfachflockung unterstützt wird, ist die Entwässerung mittels eines Zentrifugendekanters.

Der homogene Schlamm wird dabei über den Einsatz von polymeren Flockungsmitteln in ein inhomogenes Flocken-Wasser-Gemisch überführt. Eine Trennung der Fest- und Flüssigphase kann vereinfacht ablaufen, da die Zentrifugalbeschleunigung die Feststoffe mit höherer Dichte von den Flüssigkeiten mit geringerer Dichte trennt.

Da sich die Schlämme durch eine veränderte Vorstufenführung und variierende Abwasserinhaltsstoffe in ihrer Beschaffenheit und somit in ihrem Reaktionsverhalten gegenüber Flockungsmitteln unterscheiden, ist eine ständige Anpassung der Flockungsmittelmenge nötig. Jedoch reicht eine möglichst optimale Flockenstruktur allein nicht aus, um den Flockungsmittelbedarf möglichst gering zu halten. Weitere Parameter, wie die Rückmeldung über das tatsächliche Entwässerungsergebnis sowie die Anpassung der Zentrifugenparameter anhand der Zentratqualität, beeinflussen das Ergebnis und sind mit einzubeziehen. In der Praxis wird dies über den menschlichen Einsatz und in Abhängigkeit von dem Stand der Technik und den in der Kläranlage verwendeten Messverfahren durchgeführt. Die derzeitige Praxis zeigt, dass aus Gründen der Betriebssicherheit (d.h. relativ stabiler Entwässerungsbetrieb bei schwankenden Schlammeigenschaften) grundsätzlich eine Überdosierung an Flockungsmitteln stattfindet.

Diese Überdosierung zu vermeiden, ist eines der wesentlichen Ziele einer Prozessautomatisierung der Schlammentwässerung. Die Sicherstellung des Ziels erfolgt bei einer Automatisierung durch einen zu entwickelnden Zentralsensor (ZS). Dem Umweltgefährdungspotential der polymeren Flockungsmittel wird auch über die neue Düngemittelverordnung (DüV) Rechnung getragen, in dem die Polymermenge, die mit dem Klärschlamm landwirtschaftlich ausgebracht werden soll, flächendeckend und zeitspezifisch begrenzt wird.

Polymere Flockungsmittel, die in der Abwasserreinigung und in der Schlammentwässerung eingesetzt werden, gelangen zum derzeitigen Zeitpunkt oftmals indirekt in die Umwelt. Dies kann z.B. durch das Ausbringen von Klärschlamm zur landwirtschaftlichen und landschaftlichen Verwertung oder über den Abwasserablauf der Kläranlagen erfolgen.

Für den Verbrauch an Flockungsmitteln gibt es (mit Ausnahme der landwirtschaftlichen Verwertung) keine gesetzlichen Grenzwerte. Da aufgrund

der novellierten Klärschlammverordnung (AbfKlärV) die landwirtschaftliche Verwertung zukünftig nur kleineren Kläranlagen vorbehalten bleibt, ist für den weitaus größeren Teil des Flockungsmittelmarktes keine Mengenbegrenzung vorgeschrieben. Für die Entwässerung des Klärschlammes gibt es ebenfalls keine Grenzwerte in Bezug auf das Entwässerungsergebnis. Die in der Abwassertechnik eingesetzten polymeren Flockungsmittel bestehen überwiegend aus Polyacrylamiden (langkettige, synthetische Polymere) mit einem variierend hohen Anteil an Acrylamiden, die bei der Produktion von Polyacrylamiden in nicht vermeidbaren Restmengen im Produkt enthalten sind, aber auch durch die Zersetzung der langkettigen Verbindungen neu entstehen.

Acrylamide gelten als potenziell kanzerogen, weshalb deren Emission nach dem Vorsorgeprinzip grundsätzlich minimiert werden sollte. Ferner trägt die hochkationische Ladung der Polymere in erheblichem Maße zur hohen Fischtoxizität der polymeren Flockungsmittel bei, sodass auch eine Emission von Rückständen über das gereinigte Abwasser minimiert werden sollte.

Der Anlass des Vorhabens basiert auf der Entwicklung einer innovativen Automatisierten Mehrfachen Flockung (AMF) von Schlämmen und Abwässern. Diese wird von uns erfolgreich vermarktet und stellt den neuesten Stand der Technik in der Optimierung der Klärschlammkonditionierung dar. Der Grund hierfür ist, dass eine Schlammkonditionierung auf Basis von Prognosewerten erstmals sicher und vollautomatisch betrieben werden kann und sich unabhängig von der Systemtechnik eine Einsparung an Flockungsmitteln um bis zu ca. 25 - 35 % ergibt. Gleichzeitig ergibt sich oft auch eine Verbesserung des Entwässerungsergebnisses um ca. 0,5 bis 1 %-Punkte.

Mit dieser Technik kann der Schlamm jederzeit so geflockt werden, dass nach der Flockung konstante oder gute Entwässerungseigenschaften des Schlammes vorliegen. Da es in der Forschung und Praxis bislang weder eine vorhandene Technik noch Konzepte für eine verlässliche inline-Prognose des zu erwartenden Entwässerungsergebnisses gibt, hat diese neuartige Innovation der Kombination einer automatisierten Anpassung der Zentrifugenparameter an die von der AMF prognostizierten Entwässerungsergebnisse großes Potential, den Entwässerungsprozess nachhaltig zu verbessern. Die Kombination der aktuellen Regelungsstrategie mit der Anpassung der Zentrifugenbetriebsparameter durch Rückmeldung eines Zentralsensors eröffnet eine weitergehende optimierte Automatisierung der Schlammentwässerung.

Als Kooperationspartner für dieses Projekt waren die Kläranlage Wolfenbüttel mit Begleitung von Masterarbeiten an der TU Clausthal bzw. der TU Braunschweig durch Prof. Sievers und weitere Kollegen vorgesehen.

Zielsetzung für dieses Projekt:

- Entwicklung und Erprobung verschiedener Regelungsstrategien für den Zentrifugenbetrieb
- Einfließen der Erfahrungen in ein Automatisierungskonzept
- Konzeptionierung eines Prognosetools zur Unterstützung des Bedienungspersonals, welches ggf. Vorschläge übergeordnet vergeben kann

Erwartungen an das Projekt:

1. Reduzierung des Rohstoffverbrauchs, d.h. der polymeren Flockungsmittel, um ca. 25 - 35 % (vornehmlich bei der Regelungsstrategie „konstantes Entwässerungsergebnis“),
2. Minimierung der Umweltemission überschüssiger polymerer Flockungsmittel über den Abwasserpfad, d.h. Ablauf von Kläranlagen (jederzeitige Vermeidung einer Überdosierung, die in der Regel aus Gründen der Betriebssicherheit bei ca. 10 bis 20 % liegt), gilt bei allen Regelungsstrategien,
3. Minimierung der CO₂-Emissionen aufgrund eines 0,5 bis 1 %-Punkte höheren Trockenrückstandes (TR) im entwässerten Schlamm durch die Summe aus einem reduzierten Transportaufwand für entwässerten Klärschlamm (Treibstoffverbrauch, Abnutzung von Straßen und Kraftfahrzeugen), einem verbesserten energetischen Wirkungsgrad bei der thermischen Entsorgung des Schlammes, Herstellung und Produktion der polymeren Flockungsmittel, die nahezu ausschließlich auf Rohölbasis basieren sowie eine Reduzierung des Energiebedarfes der Zentrifugendekanter um ca. 5 % durch einen reduzierten Verdünnungswasserbedarf für Polymerlösungen.

Eine genaue Bilanzierung der Stoff- und Energieströme sowie eine Quantifizierung der Umweltentlastung für die o.g. Punkte soll im Rahmen des Projektes experimentell untersucht und in Form von CO₂-Äquivalenten ermittelt werden.

Zur Erreichung dieser Ziele wird beabsichtigt, auf Basis des eigenen Prognosesensors einen „Zentralsensor“ zu entwickeln und als Prototyp auf der Kläranlage in Wolfenbüttel in Kombination mit der vorhandenen AMF zu erproben.

Es sind verschiedene Regelungsstrategien für den Zentrifugen-Betrieb zu entwickeln und erproben. Die Erfahrungen sollen in ein Automatisierungskonzept, aber auch in ein Prognosetool zur Unterstützung des Bedienungspersonals einfließen, welches ggf. die Vorschläge übergeordnet bewerten und entsprechend entscheiden kann.

4 Hauptteil

Aktuell gibt es mehr als fünf Marktbegleiter, wie z.B. die Firmen Valmet, Aquen, Veolia, Hach-Lange, Aquachem, Hiller und PCE-Instruments, welche unterschiedliche Messverfahren einsetzen, um die Klärschlammflockung zu automatisieren und Flockungsmittel einzusparen. Alle Verfahren bringen einen Kostenvorteil bei der Erstinvestition mit sich. Zudem bestehen auch zahlreiche Verfahren, welche das Entwässerungsergebnis verbessern. Letzteres wird hier nicht weiter betrachtet, weil die AMF auch ergänzend zu diesen Verfahren angewendet werden kann und die Vorteile der AMF dabei bestehen bleiben.

Die bestehenden Messverfahren der oben genannten Marktbegleiter konzentrieren sich auf jeweils eine oder zwei Einflussgrößen wie z.B. auf:

- den Feststoffgehalt im Klärschlamm (Faulschlamm),
- den Feststoffgehalt im entwässerten Schlamm,
- das Ladungspotenzial (Streaming Current Detector),
- den Feststoffgehalt im Zentrat,
- den Flockungsgrad oder
- die mittlere Flockengröße etc.

Zudem unterliegen diese Systeme durch ihren Kontakt zum Messmedium immer einem hohen Wartungs- und Kalibrierungsaufwand. Sie eignen sich somit, um die menschliche Aktivität zu unterstützen, erfüllen jedoch nicht die Funktion einer dauerhaften Automatisierung. Denn sobald sich die Entwässerungseigenschaft des Schlammes oder die Wirksamkeit des Flockungsmittels ändern, versagen die auf diesen Geräten basierenden Regelstrategien, da die genannten Einflussgrößen aus messtechnischen Gründen nicht erfasst werden können.

Beim AMF-Verfahren hingegen werden alle Einflussgrößen erfasst, weil die Summe aller Einflussgrößen genau das vom Sensor prognostizierte Entwässerungsergebnis liefert.

Die Umsetzung des Vorhabens gliedert sich in zehn Abschnitte, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Im **Abschnitt 1** wird die Ausarbeitung des Sensorkonzeptes, des Designs und der Konstruktion durch ein Engineeringprozess von elektrischen und rohrleitungstechnischen Schnittstellen unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten ermöglicht. U.a. wird ein 3D CAD-Modell erstellt, mit dessen Informationen ein Prototyp gefertigt wird.

Anschließend wird im **Abschnitt 2** die Validierung der technischen Funktionsfähigkeit des Zentratsensors mit Hilfe eines Referenzproduktes vorgenommen. Bestenfalls sind bereits hier Optimierungspotentiale in der Software, der Konstruktion oder den Einstellungen erkennbar bzw. notwendig

zur späteren Umsetzung. Die Einsatzfähigkeit des Zentralsensors mit der AMF wird softwareseitig vorbereitet.

Die Ausarbeitung des Versuchsprogramms entspricht **Abschnitt 3** und bereitet so den effizienten Messaufbau für jede der einzelnen Versuchsphasen, aber auch für die erste Grunduntersuchung vor. Für die Lernphase ist ein angepasstes Versuchsprogramm zu erarbeiten, um die Vorteile der entsprechenden Automatisierungsstrategie zu verdeutlichen. Ausschließlich angepasste Anforderungen an die Datenaufnahme und deren Auswertung ermöglichen einen messbaren und belastbaren Nachweis der Einflüsse auf die Entwässerung.

Mit Hilfe des Engineerings und der geplanten Versuchsanordnung können in **Abschnitt 4** die Planungsarbeiten zur technischen Umsetzung beginnen. Die Abstimmung der Schnittstellen zum Anwendungspartner sowie die Abstimmung der Baumaßnahmen und Versuchsdurchführungen sind Kernbestandteil des Abschnitts.

Ist dies erfolgt, beginnt mit **Abschnitt 5** der Umbau und die Inbetriebnahme des Zentralsensors ergänzend zur AMF. Eine ordnungsgemäße Einbindung verhindert Betriebsstörungen und stellt die geplanten Probenahmen sicher.

Vor dem automatischen Betrieb ist in **Abschnitt 6** die Entwicklung der Steuerungssoftware geplant. So soll der Sensor in der Lage sein, die genannten verschiedenen Regelungsstrategien umzusetzen. Für die Automatisierung sind entsprechende Soll- und Istwerte für den Zentrifugenbetrieb zu ermitteln, bereitzustellen und zu berücksichtigen. Eine erste grundsätzliche Konzeptionierung kann noch im manuellen Betrieb erprobt werden. Hierdurch werden Funktionszusammenhänge zwischen Sensorsignalen und Zentrifugenparametern dokumentiert und ausgewertet und können in die Regelungskonzepte einwirken.

Insgesamt sind drei verschiedene Zentrifugensteuerungskonzepte bzw. Automatisierungsziele denkbar:

1. für konstante TR-Werte
2. für maximale TR-Werte
3. für optimale Zentratwerte

Nach Abschluss des Abschnitts 6 können in **Abschnitt 7** die Pilotversuche mit Steuerungssoftware erfolgen. Die mehrmonatige Versuchsphase soll jeweils die Wirkung des Regelkonzepts auf die Entwässerungsergebnisse quantitativ verifizieren. Auf Basis erster Ergebnisse ist eine iterative Anpassung bzw. Erweiterung der Versuchsprogramme möglich.

Die Bewertung der Versuchsergebnisse ist für den **Abschnitt 8** angedacht, wobei sich hier der Abschnitt 7 und 8 zeitlich überschneiden. Eine Auswertung soll in technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht erfolgen.

Begleitend werden in **Abschnitt 9** Zwischenberichte und der Abschlussbericht erstellt. Ergebnisse werden den Fachleuten und Anlagenbetreibern vorgestellt und diskutiert.

Für einen auf alle Situationen erfolgreich einwirkenden Einfluss ist in **Abschnitt 10** das zwingend nötige Projektmanagement vorgesehen. Ohne Projektmanagement können keine adäquaten Reaktionen bei sich verändernden Projekttrandbedingungen eingeleitet werden.

4.1 Aufbau der Messbefähigung

4.1.1 Abschnitt 1 – Sensorkonzeptionierung, Design und Konstruktion

Unter Berücksichtigung der örtlichen Begebenheiten der Kläranlage (KA) Wolfenbüttel wurden zur Realisierung des Konzeptes zunächst die konstruktiven Details des Sensors sowie die elektrischen und rohrleitungstechnischen Schnittstellen festgelegt. Entwurf und Konstruktion des Konzeptes erfolgten mittels CAD. Zur Erprobung des Sensorkonzeptes wurde ein Prototyp mit geeigneten Versuchsstand geplant und gefertigt (Abbildung 1).

Um bei der konstruktiven Gestaltung andere Einbausituationen für eine möglichst breite Anwendung des neuen Sensors zu ermöglichen, wurde das Konzept auf weiteren Kläranlagen verifiziert und anschließend in Details angepasst. Die daraufhin mobil gestaltete Konstruktion der Messküvette und die bedarfsgerechte Montage der Sensorkomponenten lässt nun eine Reihe von Anpassungen an die Örtlichkeit und weitere Optimierungen direkt auf der Anlage zu.

Der neu entwickelte Sensorgehäuse-Prototyp wurde in IP55 (wassergeschützt) gefertigt, um die Elektronik dauerhaft vor den Einsatzbedingungen des Kläranlagenbetriebs unter den Anforderungen entsprechend zu schützen.

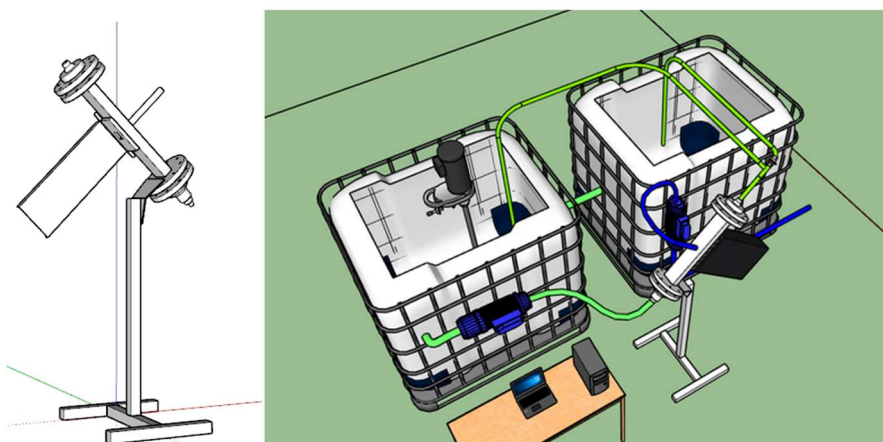


Abbildung 1 : Konstruktionsentwurf Prototyp (links) und Versuchsstand (rechts)

Die bei einigen Kläranlagen zu beobachtende erhöhte Schaum- u. Blasenbildung im Zentratwasser kann die Messgenauigkeit des Sensors

beeinflussen. Die Elimination der Blasen erfolgt softwareseitig während der Bildauswertung, ist jedoch sehr rechenintensiv. Eine zusätzliche chemische oder mechanische Entschäumung kann diese Fehlerquelle minimieren und somit die Belastbarkeit der Daten erhöhen. Da vom Einsatz weiterer Chemikalien abzusehen ist, wird eine mechanische Lösung bevorzugt.

4.1.2 Abschnitt 2 – Validierung der technischen Funktionsfähigkeit

Zunächst wurde eine geeignete Zeilenkamera, deren Funktionsumfang dem aktuellen Stand der Technik entspricht, ausgewählt, konfiguriert und getestet. Damit wurde sichergestellt, dass der neu entwickelte Zentratsensor mit einem Kameratyp ausgestattet wird, welcher auch in den nächsten ca. 10 Jahren geliefert werden kann und für welchen regelmäßige Updates sowie Support möglich sind.

Anschließend wurde unter Einsatz von repräsentativen Referenzlösungen (u.a. Zentratwasser der Kläranlagen) ein Auswertalgorithmus entwickelt und geprüft. Dabei konnte eine sehr gute Korrelation zwischen Sensorsignal und Zentratwasserqualität (TS-Gehalt in g TM/L Zentrat) gesichert festgestellt werden (Abbildung 2).

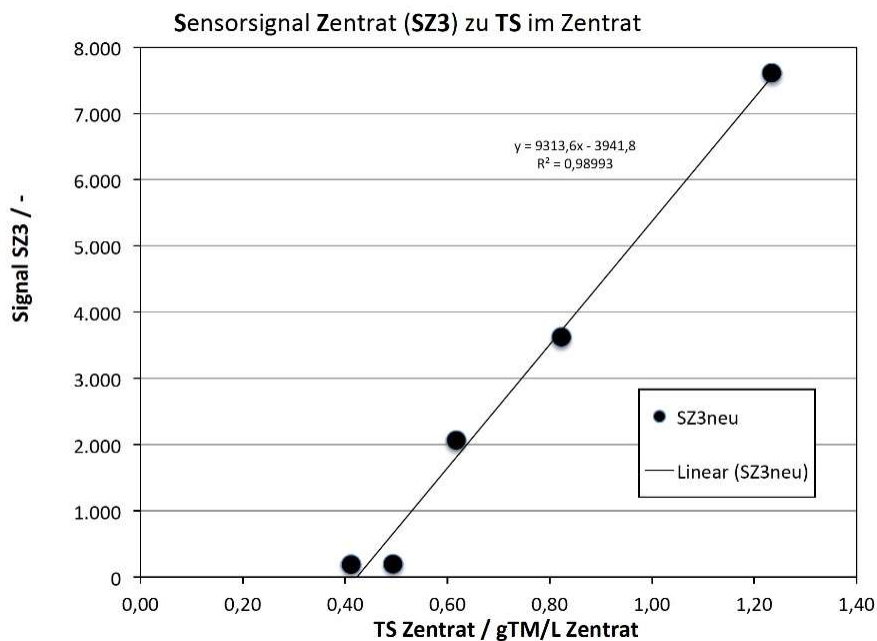


Abbildung 2 Korrelation Sensorsignal mit TS-Gehalt

Ein weiterer, für die Kläranlage wichtiger und gebräuchlicher Bemessungsgrad zur Einschätzung der Zentratqualität, ist der sogenannte Abscheidegrad. Der Abscheidegrad gibt Auskunft über den Wirkungsgrad (in Prozent) des eingesetzten Fest-Flüssig-Trennverfahrens.

Das Diagramm (Abbildung 3) zeigt die ebenfalls sehr gute Korrelation zwischen Sensorsignal und Abscheidegrad. Es konnten Abscheidegrade bis zu einer Höhe von ca. 99 % nachgewiesen werden. Damit liegt die

Messgenauigkeit in dem für Kläranlagen relevanten Arbeitsbereich. Somit konnte das Kriterium des Meilensteins erfolgreich erfüllt werden.

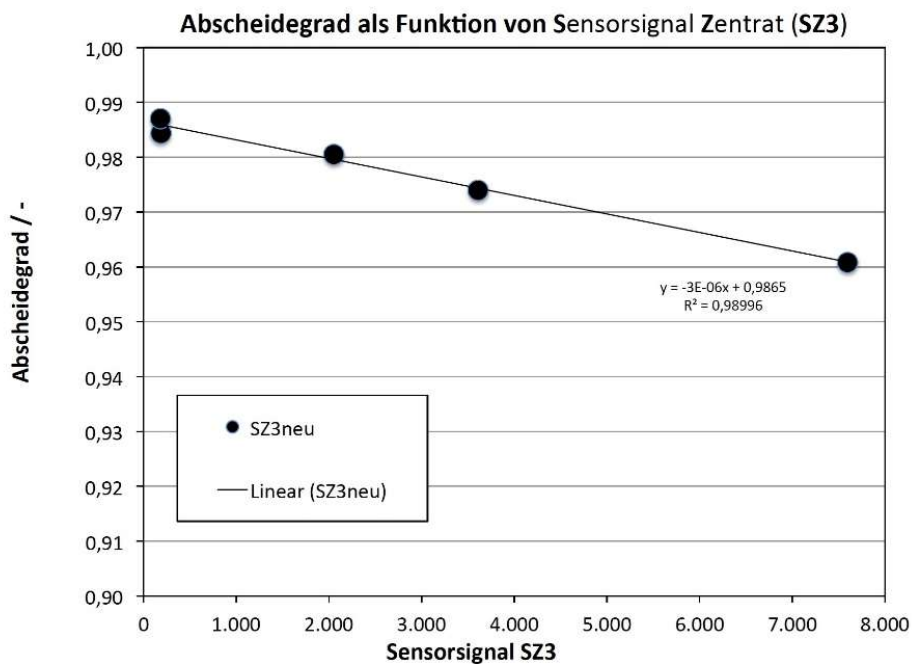


Abbildung 3 Korrelation Sensorsignal mit Abscheidegrad

4.1.3 Abschnitt 3 – Ausarbeitung des Versuchsprogramms

Für die notwendigen Versuchsabschnitte, aber auch für die erste Untersuchungs- und Optimierungs- bzw. Anlernphase, wurde ein angepasstes Versuchsprogramm erarbeitet, um die Vorteile der entsprechenden Automatisierungs-/Regelungsstrategie zu verdeutlichen. Hierbei wurden neben Art und Häufigkeit der Probennahmen auch das Zusammenspiel der Schlamm- daten aus Sensor 1 (Flockungsstufe 1) und Sensor 2 (Flockungsstufe 2) mit den Zentrifugen-Parametern Trommeldrehmoment, Trommeldrehzahl, Schneckendrehmoment, Differenzdrehzahl sowie Volumenstrom des Schlamms und der Verdünnungswassermenge berücksichtigt.

4.1.4 Abschnitt 4 – Planungsarbeiten zur technischen Umsetzung

Basierend auf dem Konzept in Abschnitt 1, der notwendigen Validierung in Abschnitt 2 und den Anforderungen aus den Versuchsprogrammen (Abschnitt 3) wurden Planungsarbeiten für die technische Umsetzung durchgeführt. Hierzu gehörten die Einplanung des Sensors in die Anlage des Umsetzungspartners in Wolfenbüttel, die Rohrleitungsplanung, Planung der Automatisierungstechnik, Abstimmung der Schnittstellen zum Anwendungspartner sowie die Abstimmung der Baumaßnahmen.

Abbildung 4 zeigt den entwickelten Zentratsensor vor der Integration in den Zentratwasserablauf des Zentratvorratsbehälters der Kläranlage Wolfenbüttel.



Abbildung 4 Zentratsensor (links) und Zentratbehälter KA Wolfenbüttel (rechts)

4.1.5 Abschnitt 5 – Umbau / Erweiterung / Inbetriebnahme

Der Aufstellungsort und die Integration des Zentratsensors, die notwendigen Baumaßnahmen/Schnittstellen sowie die Zeitschiene für die durchzuführenden Feldversuche wurden mit der Kläranlage abgestimmt.

Die Verrohrung/Verschlauchung sowie Probenahmestellen und Kupplungsanschlüsse wurden auf Funktion und Dichtigkeit überprüft. Des Weiteren wurden hydraulische Tests mit dem originalen Zentratwasserstrom der Kläranlage durchgeführt und die Spülung während des Betriebes getestet. Es wurden erste Untersuchungen mit dem Zielmedium vor Ort durchgeführt und die Auswertung der gewonnenen Daten vorgenommen.

4.1.6 Abschnitt 6 und 7 – Entwicklung und Erprobung der Steuerung

Abbildung 5^[Sie18] zeigt das Fließbild zum Regelungs- und Automatisierungskonzept der zweimaligen Dosierung von polymerem Flockungsmittel (pFM) zur Klärschlammkonditionierung (Linie 2) und klassische Konditionierung (Linie 1) in Kombination mit einem Industriezentratsensor. Das entwickelte Konzept ist in der Lage, die benötigten Regelungsstrategien umzusetzen. Dazu werden die Sollwertsignale der beiden Flockungssensoren und des Zentratsensors genutzt. Es konnte nachgewiesen werden, wie nachfolgend beschrieben, dass die Sensorsignale mit den Betriebsparameter der Zentrifuge korrelieren.

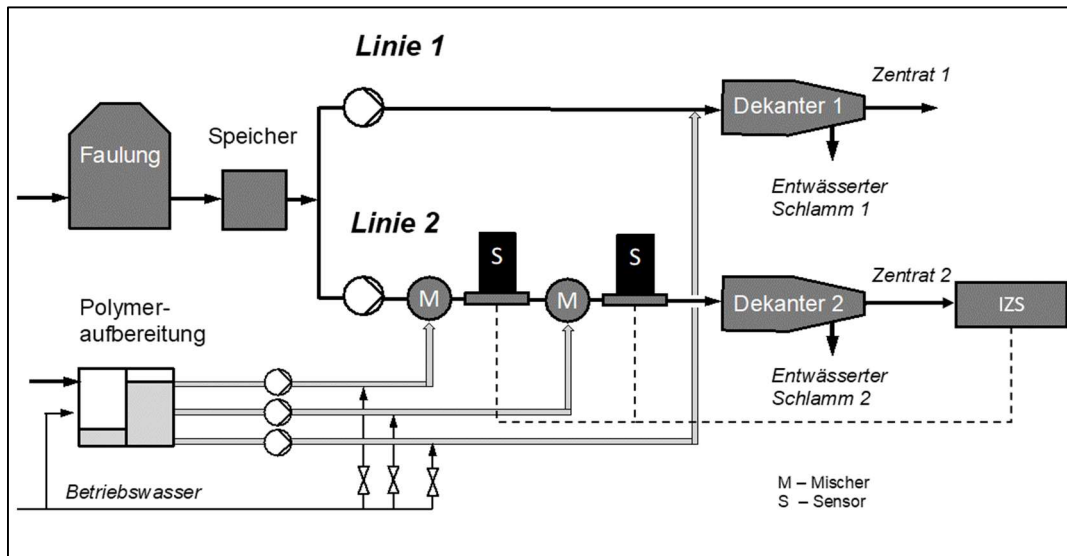


Abbildung 5 Fließbild zum Regelungs- und Automatisierungskonzept [Sie19-2]

Insgesamt sind drei Steuerungskonzepte (SK) entwickelt worden. Abbildung 6^[Sie19-1] zeigt die Korrelationen zwischen Sollwertsignalen (Flokkungssensor) und TR-Entwässert der Zentrifuge. Ein konstanter TR-Wert lässt sich durch Regelung hin zu einem konstanten Sensorsignal einstellen (SK 1, Abbildung 6 links). Um einen maximalen TR-Entwässert zu erreichen, wird die dazu benötigte Polymerdosis mithilfe des Sensorsignals fortlaufend nachgeregelt (SK 2, Abbildung 6 rechts). Werden die Sensorsollwerte nicht erreicht, so wirkt sich dies unmittelbar auf die Zentrifugen-Betriebsparameter aus. Die Werte für Drehmoment und Differenzdrehzahl sinken, was zu einer Herabsetzung der Entwässerungsleistung (TR-Entwässert nimmt ab) und des Abscheidegrads (Feststoffgehalt im Zentrat steigt an) führt. Für den Fall, dass die Zentrifugenparameter nicht optimal eingestellt sind (z.B. durch manuellen Eingriff), kann dies trotz gut entwässerbarer Schlammflocken zu einem erhöhten Abscheidegrad führen. Mithilfe des Zentratsensors wird der Abscheidegrad überwacht und als Regelwert der Steuerung zur Verfügung gestellt, so dass entsprechend nachjustiert werden kann.

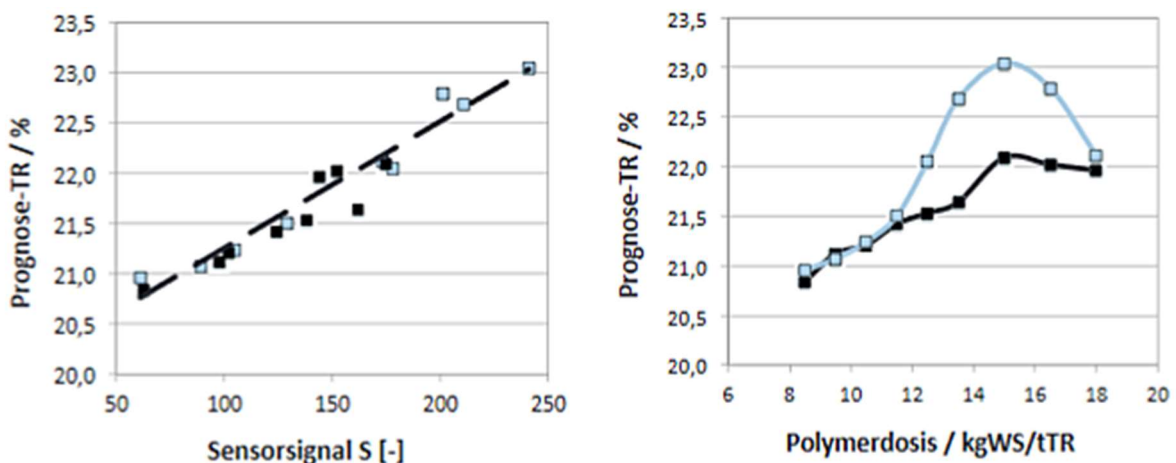


Abbildung 6 Regeln konstanter TR-Werte (links) und maximaler TR-Werte (rechts)

Die Korrelation zwischen Zentralsensor-Signal und TS-Gehalt sowie Abscheidegrad ist in Abbildung 7 dargestellt (SK 3). Die Funktionszusammenhänge zwischen Sensorsignalen und den Zentrifugenparametern konnten somit erfolgreich ermittelt werden, wodurch Meilenstein 2 erfüllt ist.

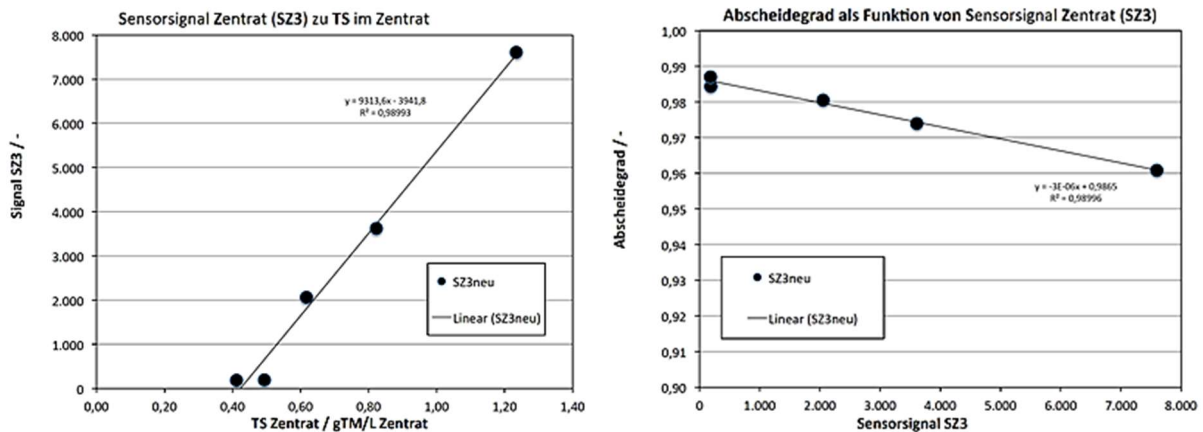


Abbildung 7 Korrelation Sensorsignal mit TS-Gehalt und Korrelation Sensorsignal mit Abscheidegrad

Aufgrund der Corona bedingten Lookdowns wurden Teile vom Abschnitt 6 mit dem Versuchsstand im Technikum durchgeführt. Die dazu benötigten Betriebsmedien wurden auf der Kläranlage beprobt.

Die in Abschnitt 6 entwickelten Steuerungskonzepte (1 bis 3) werden im Rahmen dreimonatiger Pilotversuche getestet und optimiert. Dabei wird die Automatisierungsstrategie in Abhängigkeit der fortlaufenden Erkenntnisse iterativ angepasst.

Um das entwickelte Regelkonzept optimal testen zu können, ist ein direkter Eingriff in die Zentrifugensteuerung und -regelung notwendig. Dazu wird das Einverständnis sowie eine umfassende Unterstützung des Zentrifugenherstellers benötigt. Diese benötigten Rahmenbedingungen und Eingriffsmöglichkeiten wurden uns von der Stadtentwässerung Hildesheim kurzfristig angeboten.

Da auch dort eine automatische Mehrfachflockung (AMF) verbaut ist, sind die benötigten Versuchs- und Testbedingungen im vollen Umfang gegeben. Zudem ist auch hier ein direkter Vergleich mit einer zweiten Entwässerungslinie möglich, wodurch das Regelungskonzept optimal geprüft werden kann. Der notwendige Kläranlagenwechsel und die damit verbundene Umgestaltung der Planungsarbeiten hat zu einem Zeitverzug geführt. Die Erläuterungen dazu finden sich im Antrag zum bewilligten Aufstockungsantrag 37844/01-21.

4.1.7 Änderungen im Projektablauf

Durch den Wechsel der Kläranlage mussten einige Anpassungen in vorangegangenen Arbeitsabschnitten vorgenommen werden. Zudem hat sich

während des Projektes eine Änderung in der Projektverantwortlichkeit ergeben. (neuer Projektleiter: Kevin Piel)

4.1.7.1 Ergänzung zu Abschnitt 3 – Ausarbeitung des Versuchsprogramms

Ergänzte Rahmenbedingungen wurden implementiert, um die Zugriffsmöglichkeiten auf die benötigten Zentrifugenparameter auch am neuen Standort vollumfänglich vorliegen zu haben.

4.1.7.2 Erg. zu Abschnitt 4 – Planungsarbeiten zur technischen Umsetzung

Ergänzt wurde eine Risikobeurteilung nach Maschinenrichtlinie, damit die CE-Zertifizierung der nun neu verketteten Anlage nicht erlischt.

Die Baumaßnahmen waren nicht nur mit der Kläranlage, sondern auch mit dem Hersteller der Anlage abzustimmen. Es wurde mit dem Umsetzungspartner vereinbart, dass der gesamte Zentratvolumenstrom zur Messung zur Verfügung stehen soll und somit die vollständige Einbindung in das Leitungsnetz erfolgen konnte. Dazu waren Änderungen in der technischen Dokumentation (PID) nötig, da auch alle Handarmaturen nach dem vorgegebenen Anlagenkennzeichnungssystem durchzunummerieren waren.

Abbildung 8 zeigt den geplanten Einbaustrang mit Aufhängung und Bypass für die Küvette in Hildesheim:

Abbildung 8 geplanter Zentralsensorabschnitt

4.1.7.3 Ergänzung zu Abschnitt 5 – Umbau / Erweiterung / Inbetriebnahme

Neben der Abstimmung zum Eingriff in den laufenden Betrieb wurden Materialbestellungen ausgelöst (Rohre, Fittings, Befestigungs- u. Konstruktionsmaterial) und Subunternehmer beauftragt (nach Angebotsvergleich) für Arbeiten an PE-Leitungen, für die das KnowHow bei awama fehlte.

Die Koordinierung und Programmierung der Regelungsschnittstellen für den Zugriff auf die Zentrifugenparameter erfolgt in Abstimmung mit dem Zentrifugenhersteller. Die Zugriffe sind noch nicht abschließend umgesetzt. Die Kommunikation wird zentral über die Kopf-SPS der Kläranlage erfolgen. Diverse Programmergänzungen an den Übergabeschnittstellen sind dafür nötig. Die Arbeiten dazu sind noch nicht abgeschlossen.

Die Koordinierung der Einbaumaßnahmen erfolgte in enger Abstimmung mit dem Anlagenbetreiber. Der Einbau (s. Bild 9 u. 10) in die Bestandsanlage wurden abgeschlossen (Bypass mit Abgängen erstellt, Aufhängungssystem für variable Küvettenpositionierung errichtet, Spülanschlüsse für automatische und manuelle Spülungen implementiert usw.).



Abbildung 9 Zentralkontrollleitungsabschnitt mit Bypass und Küvettenaufhängung

Die Netzwerk- und Niederspannungsanschlüsse sind in Eigenleistung erfolgt.

Die Inbetriebnahme des Sensors, zusammen mit dem Anschluss im Schalt-schrank der AMF (IndustriePC) konnten bereits durchgeführt und getestet werden.



Abbildung 10 Inbetriebnahme Sensor mit Küvette

Die Funktionsprüfung des Industriezentralsensors (Kamera-Messsystem) in Bezug auf die Bildgebung war erfolgreich. Dazu gehörte unter anderem die Ausrichtung der Küvettenposition und -neigung (s. Abbildung 8) für eine gleichmäßige Schauglasbedeckung mit dem zu messenden Zentratwasser sowie die Aufnahme erster Messwerte mit begleitenden Probenahmen zur Auswertung (s. Bild 11 u. 12).



Abbildung 11 Probennahme und Abbildung 12 Zentratbild am Schauglas

4.1.7.4 Ergänzung zu Abschnitt 6 – Entwicklung der Steuerungssoftware

Eine Konzeptionierung der Automatisierung erfolgte wie geplant unter Berücksichtigung der Anpassungen des Abschnitts 4.

Die vorhandene Steuerungssoftware in Hildesheim wird an das entwickelte Regelungskonzept angepasst. Dazu wurden Ergänzungen in der SPS und der IPC Programmierung vorgenommen, um die Ist- und Sollwertsignale der Flockungssensoren 1 u. 2, des Zentratsensors sowie die Betriebsparameter der Zentrifuge zu ermitteln und bereitzustellen.

Für die Automatisierung wurden entsprechende Sollwerte für den Zentrifugenbetrieb ermittelt. Das Lesen und Bereitstellen der Werte ist abhängig von der Umsetzung durch den Zentrifugenhersteller.

Die für die Regelstrategie notwendigen Parameter und deren Einfluss auf die Prozessgrößen sind noch zu prüfen bzw. zu bestimmen. Dazu stehen in den folgenden Monaten entsprechende Versuchsreihen an.

Vor der Durchführung der Versuchsreihen ist anhand umfassender Sensor-signalauswertungen über einen mehrwöchigen Zeitraum zu prüfen und sicherzustellen, dass keine Betriebszustände auftreten können, welche eine unetwässerte Überströmung des Schauglases zur Folge haben könnten, wodurch sich die Sensor-Messqualität verschlechtern würde.

4.2 Entwicklungsschritte zum Regelungskonzept

Die bei der Entwicklung zu durchlaufenden Schritte von der Grundidee bis hin zum aktuellen Konzept war Hauptaufgabe in diesem Projekt.

Ausgehend von der Idee der harten Verknüpfung von Sensorwert zur prognostizierten Entwässerbarkeit, welche dann in verschiedenen Regelkonzepten angefahren werden kann, ist man zu einem fließenden Konzept übergegangen, welches sich sehr viel stärker an den Zentrifugenparametern orientiert.

Das Ursprungskonzept lies viele Parameter und Einflüsse des Entwässerungsaggregates unberücksichtigt, die sich im Laufe des Projektes als

herausfordernd herausstellten. So musste das Konzept aufgrund zahlreicher Faktoren und Einflüsse mehrfach angepasst werden:

- Der Schlamm ändert seine quantitativen Eigenschaften auf das Sensorsignal.
- Sensorsignale im Zentratbereich „gut“ können kaum als Regelwert dienen, da keine Änderungen am Signal erfolgen.
- Die Einschwingzeiten der Zentrifuge mussten implementiert werden, sonst hätten klassische Suchalgorithmen einerseits zu langsam, andererseits zu schnell nachgeregelt.
- Die Sensitivität der Zentrifuge auf das Nachregeln von Flockungsmittel und Antriebslast ist sehr unterschiedlich.
- Die Betriebsgeheimnisse der Zentrifugenhersteller verhinderten eine zielgerichtete Anpassung und erforderten viele Parametervariationen.

Final ergab sich das folgende Regelungskonzept (Abb. 13^[Hil22]), welches die beiden Regelkreise *Antriebslast* (gelb) und *Flockungsmittelmenge* (blau) wiedergibt.

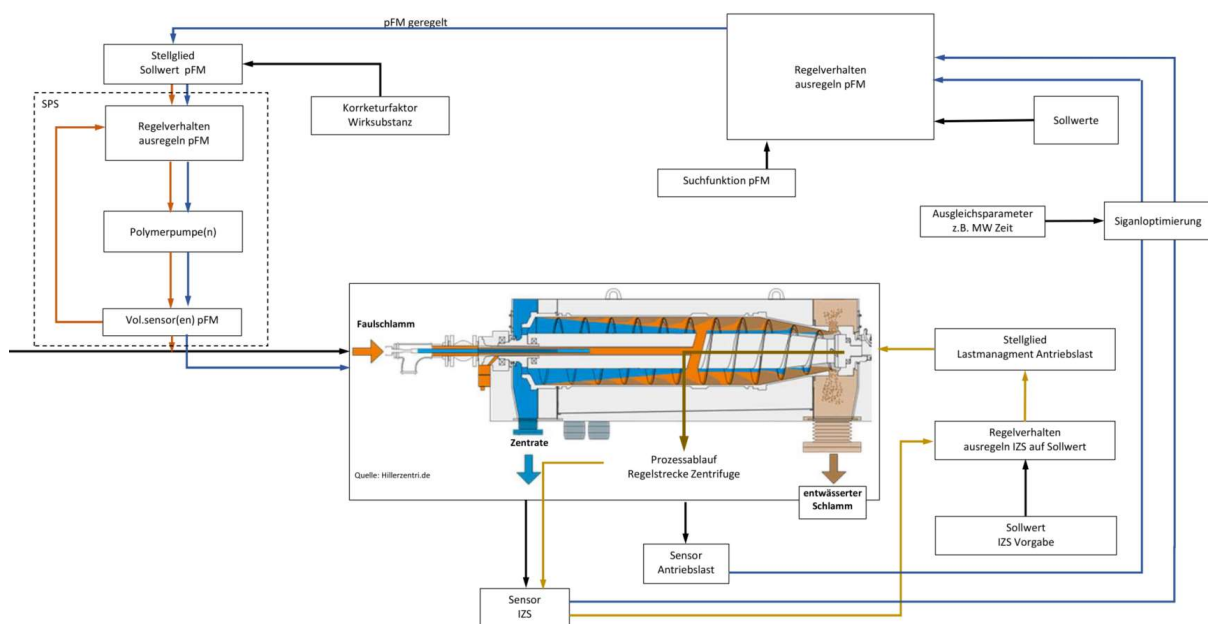


Abbildung 13 Fließschema Regelkonzept (siehe auch Anhang 1)

Um die Einflüsse, die auf das Regelungskonzept in der Praxis wirken, bewerten zu können, mussten umfangreiche Messungen erfolgen. Nur so konnte die Streuung der Messwerte so weit abgesenkt werden, dass daraus ein repräsentatives qualitatives Verhalten abgeleitet werden konnte. Die dafür nötige Anzahl der Messungen überstieg aber die wirtschaftlichen Laborkapazitäten, wodurch gesonderte Messverfahren entwickelt werden mussten.

Darauf angepasst, wurde das Konzept inkl. Berücksichtigung der gemessenen Randbedingungen entworfen.

In das Konzept mussten einfließen:

- die Reaktionen und der Arbeitsbereiche der Zentrifuge als Arbeitsorgan in dem Regelkreis,
- die Arbeitsweise der Ansetzstationen, die keine stets gleiche Wirksubstanzlösung liefern,
- die Leistungsbereiche der Polymerpumpen, bezogen auf die förderbare Polymerlösungsmenge (Arbeitsbereiche der Polymerpumpen)

Zudem sind folgende Störgrößen zu berücksichtigen, die im Konzept eingebunden werden müssen. Folgende Tabelle 1 listet die einflussreichsten Störgrößen auf.

Störgröße	Konzept
<i>Schwankende TS-Sonden und unstete Lösungskonzentrationen</i>	Umgehung der Sonde durch Messung des Sensors 1 von Flockenreaktion im signifikanten Anflockungsbereich. Auslösen von Warngrenzen bei dauerhafter Fehldosierung. Klassischer Umgang durch laufende Kalibrierung der Sonde durch Labormessungen (mehrfach am Tag) nötig. Wurde aufgrund es nicht zu vertretenden Aufwands auf ein Minimum reduziert. Wartungsintervalle
<i>Schaumbildung</i>	Rechnerische Elimination von Mikrobblasen im begrenzten Spielraum, Rückgabe von Meldung zur Schaumbildung, um Revision an Entschäumerpumpen zu veranlassen. Klassisch keine Rückmeldung.
<i>Verschmutzte Schaugläser</i>	Differenzierung zwischen verschmutzten Schauglas und zu hoher Zentratbelastung, um Spülintervalle zu initiieren. Bei dauerhafter Verschmutzung wird Warngrenze ausgelöst.
<i>Verschmutzte Zentratleitungen</i>	Verschmutzte Leitungen führen zu einem verminderten Zentratkontrollflussvolumenstrom bis hin zum vollständigen Erliegen des

	<p>Zentratflusses wegen verstopfter Leitungen. Spülungsalgorithmus mit Rückspülung zur Zentrifuge bis hin zur Meldung bei dauerhaft geringem Durchfluss. Klassisch keine Überwachung gegeben. Bei Kontrollgängen werden ggf. übergelaufene Kontrollzugänge als Revisionsanlass genommen.</p>
<p><i>Verändernde Schlammzusammensetzungen</i></p>	<p>Durch Fremdschlämme, veränderte Faulung, Störungen in der MAP Fällung, Schäden an sonstigen Anlagenteilen verändern sich die Kennlinien zueinander. Veränderte Polymermengen werden nötig. Klassisch nur über aufwändige Labormessungen möglich.</p>
<p><i>Veränderliche Entwässerbarkeit</i></p>	<p>Trotz gleicher Parameter wie pFM Bedarf, Regelbeginn, Zentratbelastung usw. werden die Messungen nicht die gleichen TR-Werte erreichen. Überwachung durch maximal erreichbare Antriebslast. Klassisch wird idealer Weise eine pFM-Probe genommen und im Labor ausgewertet. Ein Polymerlösungsansatz wird aber aufgebraucht, bevor ein Laborergebnis vorliegt, wodurch ein Eingriff nicht mehr möglich ist.</p>

Tabelle 1: Störgrößen für Zentratmessung

4.3 Randbedingungen und Versuchsplan zur Durchführung

In den Vorarbeiten wurde die Signal-Auswertung in Bezug auf die prognostizierbare Zentratqualität erweitert. Die nachfolgende **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verdeutlicht, dass aufgrund eines linearen Zusammenhangs zwischen Sensorsignal und der mit der Laborzentrifuge erzielten Zentratqualität eine grundsätzliche Eignung des Sensors für eine Bewertung der Zentratqualität besteht. Die Zentratqualität wurde hier als CSB-Wert der homogenisierten Zentratprobe gemessen. Dieser beschreibt den chemischen Sauerstoffbedarf für die Oxidation organischer Verbindungen und liefert Rückschlüsse über den organischen

Feststoffanteil der Probe. Dies liefert die Voraussetzungen für eine aussichtsreiche Weiterentwicklung des Sensors für den partikulären Anteil im Zentrat.

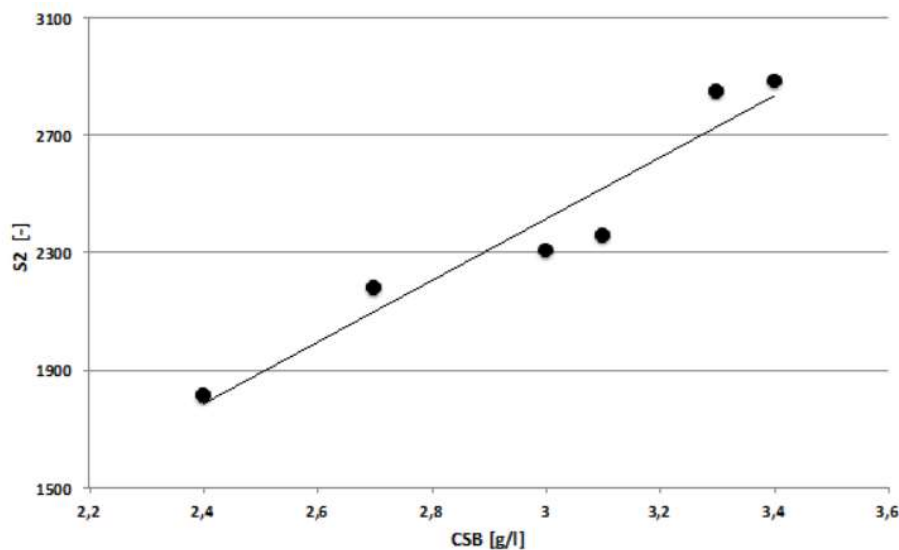


Abbildung 14 CSB des Zentrats als Funktion des Sensorsignals

Im weiteren Verlauf der ersten Projektphase wurde der Zentratsensor konstruktiv und messtechnisch derart weiterentwickelt, dass er in eine bestehende AMF-Anlage eingebaut werden konnte.

Für einen repräsentativen Vergleich und zur Bewertung der Messergebnisse sind grundlegende Messungen zu den Randbedingungen und dem Verhalten der Entwässerungsstrecke auf äußere und innere Einflüsse essenziell. Nur durch diese Untersuchungen ist es möglich, eine Prognose zu erstellen. Dabei soll ermittelt werden, welche Änderungen zu positiven oder negativen Effekten führen. Aus den Erkenntnissen kann die Prognosesoftware gespeist und validiert werden.

Zu den nötigen Bestimmungen der Randbedingungen gehört die Zentrifugenkennlinie, welche den qualitativen Einfluss von Polymermenge und Antriebslast auf Zentratbelastung und den Entwässerungswert %TR wiedergibt. Zudem ist die Zentrifugenkennlinie anlagenindividuell qualitativ zu ermitteln. Eine Bestimmung im Labor ist nicht möglich.

4.3.1 Bestimmung der Zentrifugenkennfelder

4.3.1.1 Aufbau des Diagramms

Eine Zentrifuge bildet je nach Bautyp und Baujahr eine spezifische Kennlinie für das Zentrat und den entwässerten Schlamm ab. Die qualitative Kennlinie hängt von allen Randbedingungen in der Zufuhr, Konditionierung und Beschaffenheit des Schlamms ab. Ebenso ist sie abhängig vom

Wartungszustand der Entwässerungsaggregate. Sie ist somit kein statischer Wert, sondern bildet einen Zustand ab.

Die Zentrifugenkennlinie für das Zentrat ist die Linie konstanten Abscheidegrades in Abhängigkeit von Antriebslast und Polymerdosierung. Grundsätzlich ist zu sagen, dass trotz unzureichender Polymerdosierung und Flockenbildung ein Zentrat immer sauber gehalten werden kann. Dafür muss die Zentrifuge die abzentrifugierten Flocken nur schnell genug ausleiten, um Platz für den angeflockten, neu zuströmenden Schlamm zu machen. Durch dieses Verfahren bildet sich in der Zentrifuge kein stabiler Filterkuchen aus, wodurch die Antriebslast nicht in gewünschter Höhe aufgebaut werden kann. Die Antriebslast korreliert prinzipiell mit dem möglichen Entwässerungsergebnisse %TR. Das bedeutet, dass der Austrag zu viel Wasser enthält, wenn die Flocke nicht optimal aufgebaut ist. Die Zentratqualität liegt zwar im zulässigen Bereich, die Entwässerungswerte jedoch fern ab des technisch Möglichen. Wird die Flocke durch eine zunehmende Flockungsmitteldosierung stabilisiert, baut sich der Filterkuchen kompakter auf. Die Beladung der Zentrifuge steigt, und die maximal möglichen Antriebslasten bei zulässigem Zentrat erhöhen sich. Erhöht man jedoch die optimale Polymermenge, werden die Flocken wieder instabil und schwimmen mitunter auf. Diese Flocken werden dann mit dem Zentrat ausgetragen, womit der Abscheidegrad wegen Überdosierung von Flockungsmitteln wieder abfallen würde, insofern man die mögliche Antriebslast nicht absenkt. Durch das Aufschwimmen der Flocken im Zentrat ist aber eine Senkung der Antriebslast nur noch bedingt hilfreich. Die Zentrifugenkennlinie fällt somit bei steigender Polymerdosierung wieder. Ab einem bestimmten Level ist wieder kein unbelastetes Zentrat mehr möglich. Somit beschreibt die Kennlinie eine Glockenform mit der maximal möglichen Antriebslast über der dosierten Flockungsmittelmenge mit ungleichem Grundwert für Über- und Unterdosierung.

Die hier beschriebene Linie zulässigen Zentrats, z.B. konstant 98% Abscheidegrad, lässt sich für alle Abscheidegrade beschreiben, abgesehen vom „100%“ Plateau. Die Kennlinien gleichen Abscheidegrads verlaufen parallel zur Ausgangskennlinie in Richtung höherer Antriebslast.

Wie auch von der Kläranlagenberatung Kopp^[Kop22] in Abbildung 15 beschrieben, ist es möglich, bei geringeren Abscheidegraden und somit höheren Antriebslasten auch den Entwässerungswert %TR um mehrere Prozentpunkte zu erhöhen.

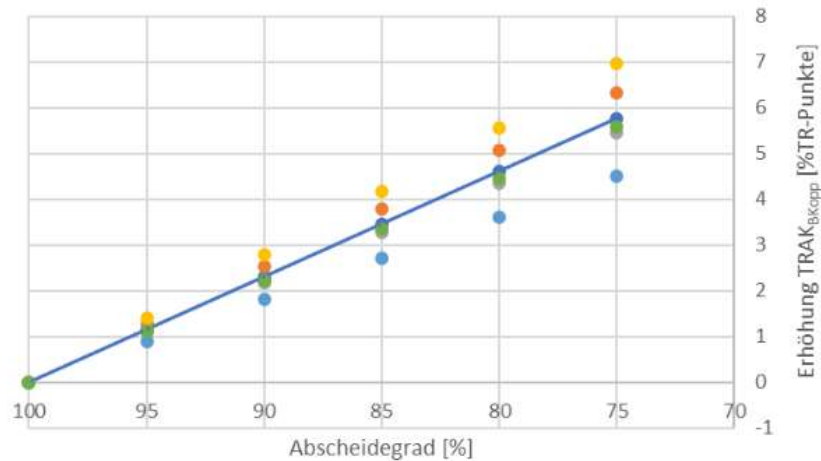


Abbildung 15 Erhöhung der max. Entwässerbarkeit in Abhängigkeit des Abscheidegrades

Der Zentratsensor kann die Grenze der Kennlinie bzw. das Kennfeld zum Umschlagspunkt zu unzulässigen Zentratswerten bestimmen. Zudem soll es möglich sein, die Zentratsbelastung zu messen und so auch gewünschte schlechtere Abscheidegrade zuzulassen, z.B. 100% - 95% einstellbar.

Da sich die Zentratsbelastung dabei noch im zulässigen Bereich befindet, der Entwässerungswert aber erhöht ist, ist eine Reduktion des unnötig transportierten und kostspielig entsorgten Wassers im entwässerten Klärschlamm möglich.

Verlängert man die Kennlinie des Diagramms (Abbildung 15) weiter, so ist zu erkennen, dass weder am Abscheidegrad und somit auch nicht vom Sensor abzulesen ist, ob das Entwässerungsergebnis noch verbessert werden kann (Abbildung 16). Ein Anfahren des Umschlagspunkts des messbaren Bereichs ist somit in gewissen Abständen nötig, um die besten Entwässerungswerte durch maximal mögliche Antriebslasten auszunutzen. Letztlich deckt sich die Regelungsstrategie hier mit dem intuitiven Vorgehen erfahrener Anlagenbediener.

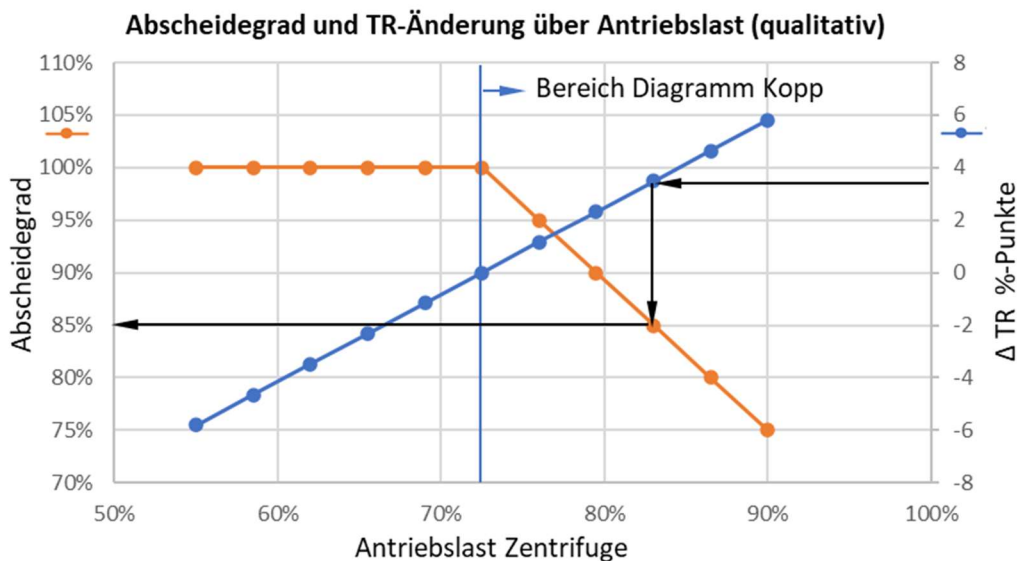


Abbildung 16 Verhalten TR und Abscheidegrad über Antriebslast

4.3.1.2 Messmethode

Die Methodik der Bestimmung von Zentrifugalbelastungen (AG) und Entwässerungswerten (%TR) ist für die Sensorbewertung entscheidend. Die Messungen können ausschließlich im realen Betrieb und nicht im Labor für die vorort installierte Zentrifuge bestimmt werden. So sind auch die Messungen den täglichen betriebsbedingten und saisonalen Schwankungen über den Messzeitraum ausgeliefert. Eine signifikante Veränderung auf eine konkrete Einstellung zurückzuführen, ist nur indirekt möglich.

Obwohl sich die Randbedingungen wie Entwässerbarkeit, Polymerbedarf, Wartungszustand der Zentrifuge nicht beeinflussen lassen und auch nicht mit vertretbarem Aufwand bestimmbar sind, konnte die Methodik so angepasst werden, dass sich Einflüsse eingestellter Parameter von anderen Einflüssen abheben (Abb. 17 u. 18).

Um dies zu erreichen, wurde die Methode der Relativmessung genutzt. Hierbei hält man für einen Messtag alle Randbedingungen fix bis auf eine Variable. Diese wird ohne Bestimmung der anderen Randbedingungen in ihrer relativen Veränderung beobachtet.

Um dem Einfluss der nicht regelbaren, aber ggf. sich verändernden Randbedingungen, zuvorzukommen, müssen über die Häufigkeit eine statistisch relevante, auswertbare Anzahl „n“ an Messungen aufgebracht werden, wodurch sich die Messgenauigkeit trotz instabiler Randbedingungen erhöhen lässt. Diese Messfrequenz über einen Tag wäre aber mit den DIN-Messmethoden nicht dauerhaft leistbar.

Abhilfe konnte hier geschaffen werden, indem vereinfachte, aber im Rahmen der Messungen vereinheitlichte Messbedingungen geschaffen wurden. So wurden die filtrierbaren Stoffe mit größeren Filtern und mehr Unterdruck filtriert. Dies beschleunigte die Probennahme in mehrfacher Hinsicht, sodass die Auswertbarkeit trotz Streuung in einer sehr feinen Auflösung mündete. So konnte bestimmt werden, dass z.B. 1% Antriebslast ca. 0,07%Punkte höhere Entwässerung zur Folge hat.

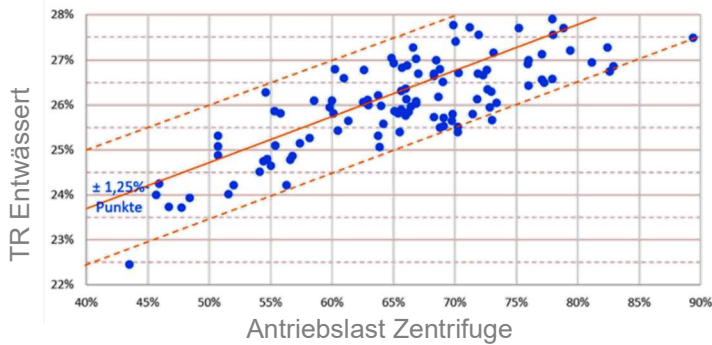


Abbildung 17: TR Entwässert über der Antriebslast gesamt 1 Monat

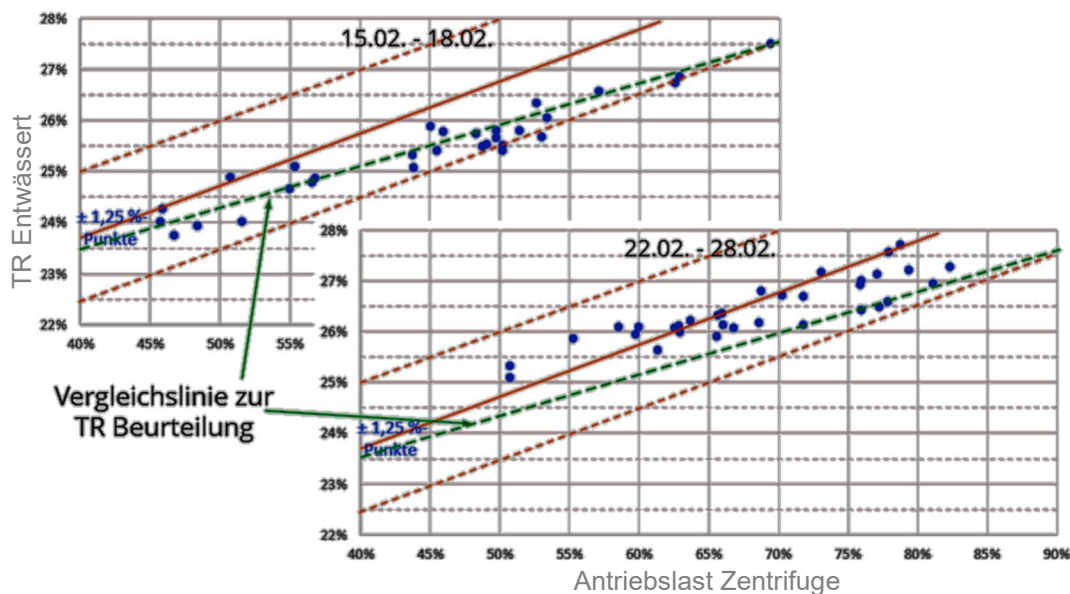


Abbildung 18: TR Entwässert über der Antriebslast je Zeitraum

4.3.1.3 Nutzung des Kennfelds

Nach Auswertung der Messdaten und Erstellung des Kennfeldes ist festzustellen, dass ausschließlich mit der Kenntnis des Kennfeldes eine Programmierung für den Zentratsensor zum Ziel führen kann. Das Kennfeld zeigt klar die Zusammenhänge von Antriebslast und Polymermenge auf die Produkte *Zentrat* und *Entwässerungsergebnis*. Die AMF konnte bisher nur das Entwässerungsergebnis prognostizieren. Mit dem Zentratsensor lässt sich nun das ganze Kennfeld überwachen. Da die Glockenfunktion der zulässigen Entwässerungswerte nur einen Wendepunkt am Optimum besitzt und ansonsten stetig aber im Betrag unterschiedlich steigt, ist das Suchen nach verschiedenen Betriebspunkt (nicht Optimum 1 oder 2) ohne weitere Restriktionen nicht möglich. Diese Restriktionen benötigen aber auch einen Bezug. Da zudem der genaue Kurvenverlauf abhängig von den sich immer ändernden Randbedingungen und somit nur qualitativ bekannt ist, ist das Einstellen von Betriebspunkten per Suchalgorithmus langwierig.

Da die qualitativen Aussagen aber für jeden Schlamm gelten, konnten anhand des Diagramms verschiedenen Restriktionen aufgestellt werden, mit deren Hilfe die Programmierung weiterentwickelt wurde.

So lässt sich nun mit Hilfe des Zentralsensors beurteilen, ob die Prognose, die auf konventionellen externen Randbedingungen beruht, auch eintritt. Es ist jedoch möglich, dass eine ungünstige Schlammkonditionierung vor der Polymerdosierung oder eine kurz vor der Wartung stehende Zentrifuge dazu führt, dass eine verfälschte Prognoseaussage ermittelt wird. Die wahren Werte können über oder unter den Prognosewerten liegen.

Weichen die Prognosewerte negativ ab, so ist es möglich, dass durch ungünstige externe Einflüsse das Zentrat dunkel wird. Der Sensor kann in solchen Fällen außerhalb der Regelbereiche ein Signal für die Zentratqualität z.B. nach einem Ampelsystem ausgeben. Die Zentrifugenparameter sollten nach dieser Empfehlung durch das Bedienpersonal nachgeregelt werden.

Darüber ist es möglich, z.B. bei günstigen Schlämmen den TR über den Prognosewerten zu erhöhen, indem die Antriebslast vom Anlagenfahrer erhöht wird.

Wird statt der Antriebslast die Polymerdosierung auf Vorschlag geändert, werden zwar nicht die Prognosewerte TR erreicht, es kann aber dennoch bei der Polymermenge eingespart werden. Dauerhaft ungünstige Umstände im Ampelsystem können auch vom Betriebspersonal analysiert werden. So fällt auf, dass ggf. Fehlfunktionen vorliegen, worauf ein frühzeitiges Eingreifen ermöglicht wird.

Revisionen oder andere Eingriffe, z.B. wegen blockierter Sensoren, werden somit reduziert, Ausfälle vermieden, und die Kläranlage erreicht stabilere Betriebsbedingungen, die auch der Nachhaltigkeit zuzurechnen sind.

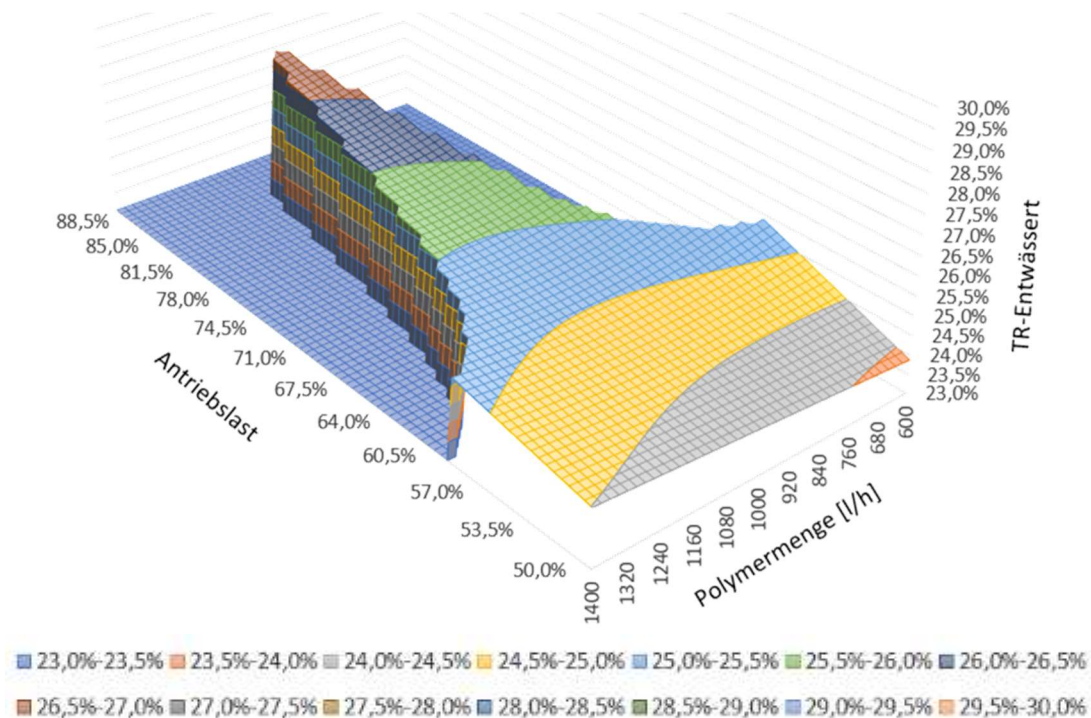


Abbildung 19: qualitatives Zentrifugenkennfeld Hildesheim

4.3.2 Bestimmung der äußeren Einflüsse

Als Grundlage einer Bewertung wurde, wie schon beschrieben, das Kennfeld der Zentrifuge aufgenommen. So ließ sich erkennen, wie sich qualitativ bei gleichbleibendem Schlamm und Polymer ein Kennfeld darstellt. Unklar bei der Betrachtung war jedoch, wie gut die Regelgrößen überhaupt einstellbar sind, um einen Schlamm nachregeln zu können.

Da sich der Schlamm täglich, wöchentlich und saisonal ändert, lässt das qualitative Kennfeld keinen Rückschluss auf den einen, an einem bestimmten Tag möglichen Schlamm zu.

Ebenso ist es auch nicht möglich, Aussagen zur Dosierung von polymerer Wirksubstanz zu tätigen, da keine Live Messung der Lösungskonzentration vorhanden ist.

Somit ändert sich das Kennfeld in seiner Ausprägung je nach Schlamm und dosierter Polymerlösung. Es kann gestaucht, gestreckt, gedreht und/oder gekippt sein.

Die Vorteile des Messkonzeptes durch AMF und Zentralsensor sollen zudem für die Bewertung der Umweltauswirkungen betrachtet werden.

Dafür ist es nötig, die schon beschriebenen externen Einflüsse auf die konventionelle Dosierung zu analysieren.

Als Referenz gilt hierbei der Stand der Technik. Ohne eine AMF und einen Zentralsensor erfolgt eine Polymerdosierung anhand der Fracht, gemessen über eine Hach-Lange-TS-Sonde, über den Schlammvolumenstrom und die

angesetzte Polymerlösung mit eingestellter Verdünnung von z.B. 0,4%. Die Zentratqualität hat keinen regelnden Einfluss. Im Folgenden werden die Einflüsse auf die tatsächlich dosierte Wirksubstanz im konventionellen Fall angeführt.

4.3.2.1 Einflüsse auf die Schlammmenge mit konstanter Fracht

In die Berechnungsgleichung der Polymerdosierung gehen folgende Sensor- und Einstellwerte ein:

- Volumenstromsensor Schlamm
- Volumenstromsensor Polymerlösung
- Ansetzkonzentration der Wirksubstanz in Wasser
- Schlammfracht über Hach-Lange-Sonde

Berechnung Schlammmenge erfolgt nach Formel 1:

$$\text{Sollwert} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = \frac{\text{Sollwert Fracht} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]}{\text{TS - Gehalt} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right]}$$

Formel 1: Schlammvolumenstromberechnung für konstanter Fracht

Die Formel 1 wird gespeist von einem Sensorwert und einem Solleingabewert. Der Eingabewert ist eindeutig und unmissverständlich, so dass dieser keinen Einfluss auf die Genauigkeit hat.

Der TS-Gehalt als Sensorwert der Hach-Lange-Sonde hat hingegen einen Einfluss, wenn er nicht die wahre Frachtmenge wiedergibt.

Wird mit einem ungenauen Sensorwert der Schlammvolumenstrom ermittelt, ist es möglich, dass die tatsächliche Fracht höher oder tiefer ist als die Wunschfracht. Somit würde die dosierte Polymerlösung nicht frachtproportional korrekt dosiert. Es können im Grenzbereich deutliche Über- und Underdosierungen auftreten. Um diese zu bewerten, wurde über eine längere Zeit der „wahre“ Wert zum Messwert gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 dargestellt.

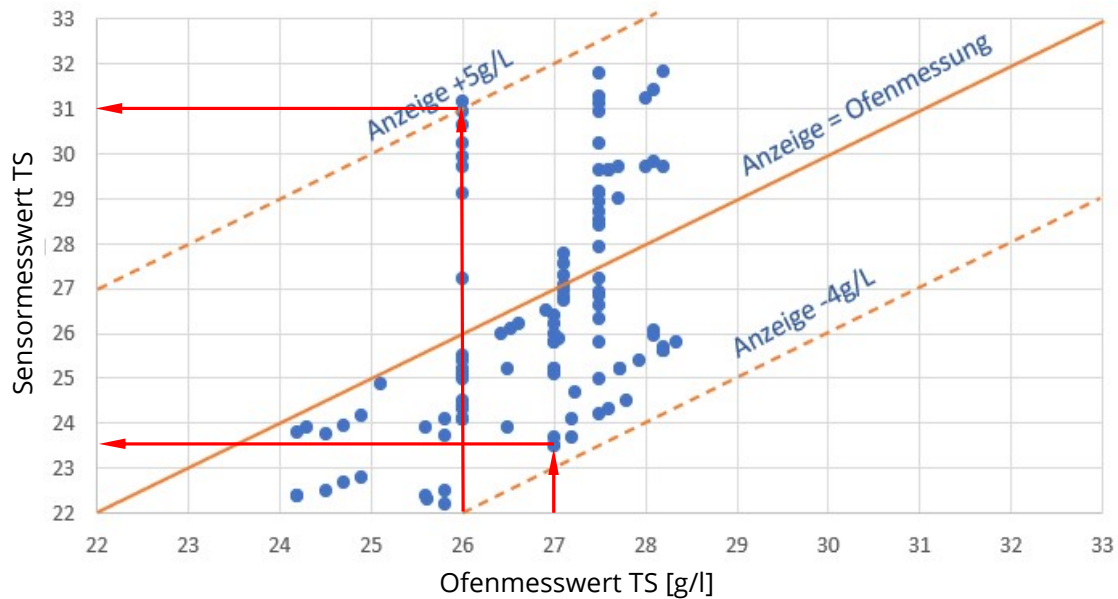


Abbildung 20 Trubstanzgehoekensalt (TS) Sonden- zu Ofenwert

Abweichungen von -4g/L bis +5g/L waren üblich. Dazu ist festzustellen, dass die Abweichung nicht konstant ist. Die TS-Sonde verschleift über den Tag von höheren zu geringeren Werten, obwohl der wahre Wert konstant bleibt. Somit ist eine Parallelverschiebung selbst mit Hilfe einer Sensorkorrektur nicht zielführend. Die Messunsicherheit liegt bei der Sonde somit um $\pm 15\text{-}20\%$. Innerhalb eines Messtags verschleift die Sonde von $11\text{m}^3/\text{h}$ auf $13,5\text{m}^3/\text{h}$ bei konstanter Polymerlösungsdosierung.

4.3.2.2 Einflüsse auf die Polymerdosierung

Die benötigte Polymerlösung errechnet sich wie folgt:

$$\text{Fracht} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] = \text{Fördermenge Schlamm} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \times \text{TS-Gehalt} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right]$$

$$\text{Sollwert} \left[\frac{\text{l}}{\text{h}} \right] = \text{Fracht} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \times \frac{\text{FHM-Menge} \left[\frac{\text{kg FHM}}{\text{t TS}} \right]}{\text{FHM-Ansatzkonzentration} [\%] \times 10}$$

Formel 2: Sollwert Polymerlösungsvolumenstrom

Hierbei gehen einerseits die Frachtmenge nach TS-Sonde und andererseits zwei Vorgabewerte für die Ansatzkonzentration und Dosierung Wirksubstanz pro Tonne Feststoff ein.

Die in der Polymerlösung enthaltene Wirksubstanz wurde ebenfalls über einen längeren Zeitraum mehrfach beprobt. Die Wirksubstanzkonzentrationen wichen in Summe erheblich von dem Vorgabe- bzw. Annahmewert ab. Da die Konzentration aber nicht durch Sensorik überprüft wird, ist auch hier eine Fehldosierung die Folge.

Die Abweichungen setzen sich einerseits aus der Qualität der Rohware ab und andererseits aus der Dosiereinheit, die in der Ansetzstation die Rohware

in die Lösung fördert. Die gemessenen Abweichungen über einen mehrmonatigen Zeitraum wurden in Abbildung 21 zusammengefasst:

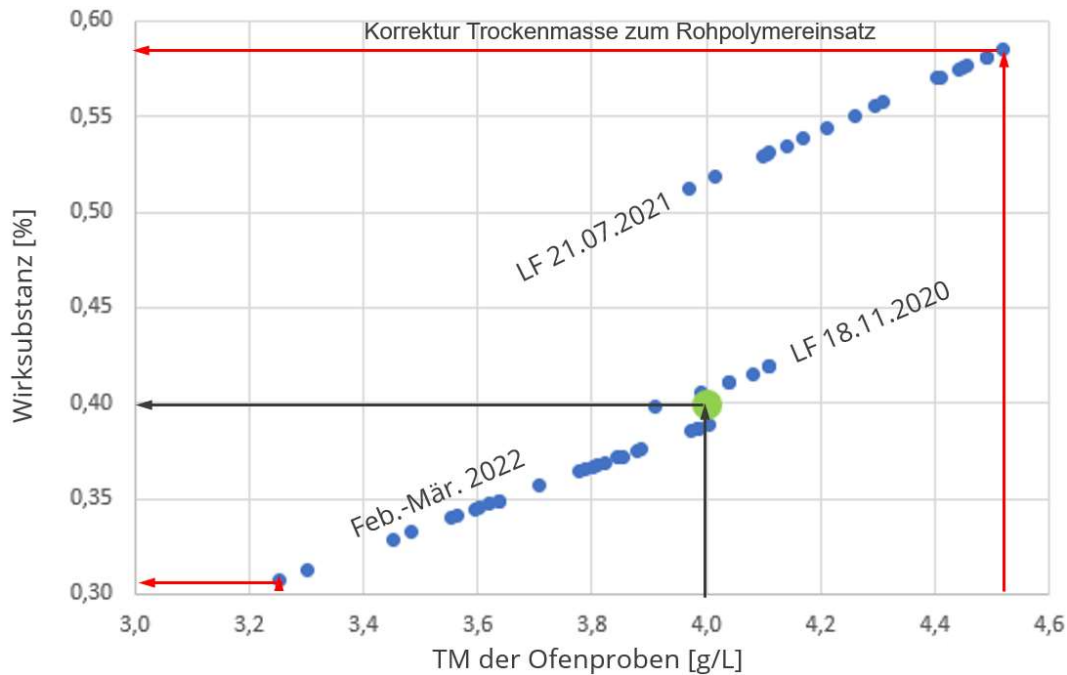


Abbildung 21 Wirksubstanzgehalt Istwert bei 0,4% Sollwert

Es zeigt sich eine Streuung von 0,31% bis 0,57% zum eingestellten konstanten Sollwert von 0,4% Wirksubstanz in der Polymerlösung.

Diese Schwankungen können manuell nicht ausgeglichen werden, da sie konventionell nicht wahrgenommen werden. Die Folge ist eine sich ständig ändernde Zentratsqualität in Folge erheblicher Über- oder Unterdosierung. Die Zentrifuge wird zudem nicht nachgeregelt.

Die Summe aus den Fehlern der TS-Sonde und der Polymeransatzkonzentration liegt somit bei bis zu 75% Fehldosierung.

Um die Schwankungen im Zentrats gering zu halten, wird der Regelbeginn der Zentrifuge manuell und bewusst geringer gehalten als nötig. Somit erreicht die konventionelle Entwässerungslinie nicht die möglichen Entwässerungsergebnisse TR_{max} . Zudem kommt es zusätzlich noch vor, dass die Zentrats unzulässig viel Fracht in den Zulauf der Kläranlage bringen. Dort treten infolgedessen immer wieder Probleme mit zugesetzter Sensorik auf. Die Filter setzen sich mit den feinen Rückbelastungen der Zentrifugen zu. Ein hoher Wartungsaufwand ist die Folge.

4.3.3 Störeinflüsse für den Zentratsensor

Bei der Signalauflösung des Zentratsensors spielen verschiedene Helligkeitsverhältnisse durch helle und dunkle Zentrats eine große Rolle. Hierfür mussten Anpassungen an der LED-Helligkeit (Ausleuchtung), der Kameraposition, den Blendeneinstellungen und den Softwareparametern

vorgenommen werden. Eine einfache Übertragung der Werte von Faulschlamm war nicht möglich.

Eine weitere Hürde war die Berücksichtigung von Schaum im Zentrat (Abb. 22), da das Entschäumerpolymer nicht zuverlässig hinzu dosiert werden konnte (Schimmelbildung). So bildeten sich häufig Mikro- bis Makroblasen im Zentrat, die das Messergebnis beeinflussten. Dem wurde neben der Problembeseitigung bei der Entschäumerdosierung mit einer Küvettenstellung entgegen gewirkt, die möglichst wenig Blasen am Schauglas vorbei fördern. Zudem musste die Auswertesoftware so weit sensibilisiert werden, dass diese Fehlsignale in Grenzen kompensiert werden können. Es bleibt aber weiterhin eine Herausforderung, wenn das Zentrat zu viele Blasen mitführt. Hierfür sind weitere Lösungsansätze erforderlich.



Abbildung 22 Schaumbildung Zentrat

Ein weiteres langwieriges Thema ist das Trockenfallen der Zentratleitung bei Nichtbetrieb. Es trocknen Rückstände ein, die sich durch die eingebaute Düse nicht lösen lassen (Abbildung 23). Hierfür musste die Düse im Sprühwinkel angepasst werden.

Ein weiterer bisher nicht verfolgter Ansatz wäre die Zentratkontrollleitung beim Abfahren zu schließen und so das Schauglas nass zu halten, dass Anhaftungen verhindert werden.

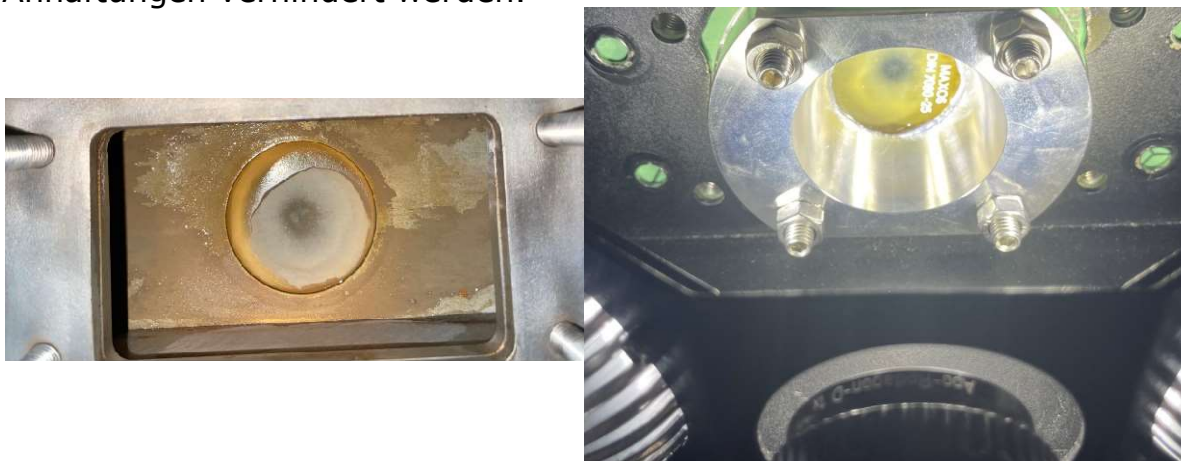


Abbildung 23 Schauglasablagerungen

4.3.4 Kalibrierung des Zentralsensors

4.3.4.1 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm musste bei diesem Projekt für mehrere Ebenen erstellt werden. Die Komplexität der Einflüsse in der Praxis zwang dazu, das Versuchsprogramm auf ein vereinfachtes Niveau zu senken. Die Versuche zur Validierung der Messvoraussetzungen und Vergleichbarkeit, die nötig sind, um die Auswirkungen zu bewerten, hat mehr Zeit in Anspruch genommen als geplant. Die durchgeführten Versuche konnten so nur zur Bestimmung der Messgenauigkeit des Zentralsensors dienen. Eine angewandte Messung zur Validierung von verschiedenen Regelalgorithmen konnte in diesem Entwicklungsschritt nicht durchgeführt werden. Die Wirkung eines Regelkonzeptes unter Einbindung des Zentralsensors kann nur rechnerisch abgeschätzt werden. Eine praktische Erprobung der Konzepte bedarf eines weiteren enormen Aufwands, um im Realbetrieb verwertbare Mess- und Vergleichsbedingungen permanent aufrecht zu halten. Betriebsstörungen müssten kurzfristig behoben und ggf. auflaufende Verschmutzungen zeitnah beseitigt werden. Dazu bedarf es eines permanenten Eingriffs in die Zentrifugenregelung, um auch das Bewertungsergebnis des Sensors darin umzusetzen. Die Trägheit des Systems ist bisher nicht bei Feinjustierung bekannt und bedarf ebenfalls einer Lernkurve.

Das Versuchsprogramm für die Bewertung des Zentralsensors wurde in mehreren Durchläufen mit verschiedenen Rand- und Problembedingungen durchgeführt.

Hintergrund Messablauf:

Für eine Validierung der Messwerte werden über einen längeren Zeitraum verschiedene Abscheidegrade durch provozierte Polymerfehldosierungen oder zu hohe Antriebslasten erzeugt. Die belasteten Zentratproben werden filtriert, gewogen, im Trockenschrank getrocknet und auf ihre filtrierbaren Rückstände untersucht. Parallel dazu wurden teilweise auch Proben an die TU Clausthal gegeben, mit deren Hilfe ebenfalls tatsächliche Abscheidegrade bestimmt wurden. Diese Referenzen wiesen zu Beginn eine hohe Streuung auf. Die Zentrifuge brachte teilweise stark schwankende Zentratqualitäten in sehr kurzen Zeitabständen hervor. Somit ließen sich die Proben teilweise nicht zweifelsfrei dem Sensorsignal zuordnen. Daraufhin wurde die Probenhäufigkeit erhöht, um die Streuung zu minimieren und einen guten Mittelwert zu bestimmen.

Im Weiteren wurde festgestellt, dass durch das Anheben des Schlauches zur Probennahme ein Rückstau erzeugt wurde, welcher wiederum die Sensorwerte zum Zeitpunkt der Probennahme verfälscht hat. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist in grün das Sensorsignal

zu erkennen, welches während der Probennahme stark erhöht ist. Über eine Annäherung des eigentlichen Messwerts über relativ stabile Messwerte vor bzw. nach der Probennahme konnte auf den eigentlichen Zentralsensorwert geschlossen werden, der dann wiederum gut den Messsignalen folgte.

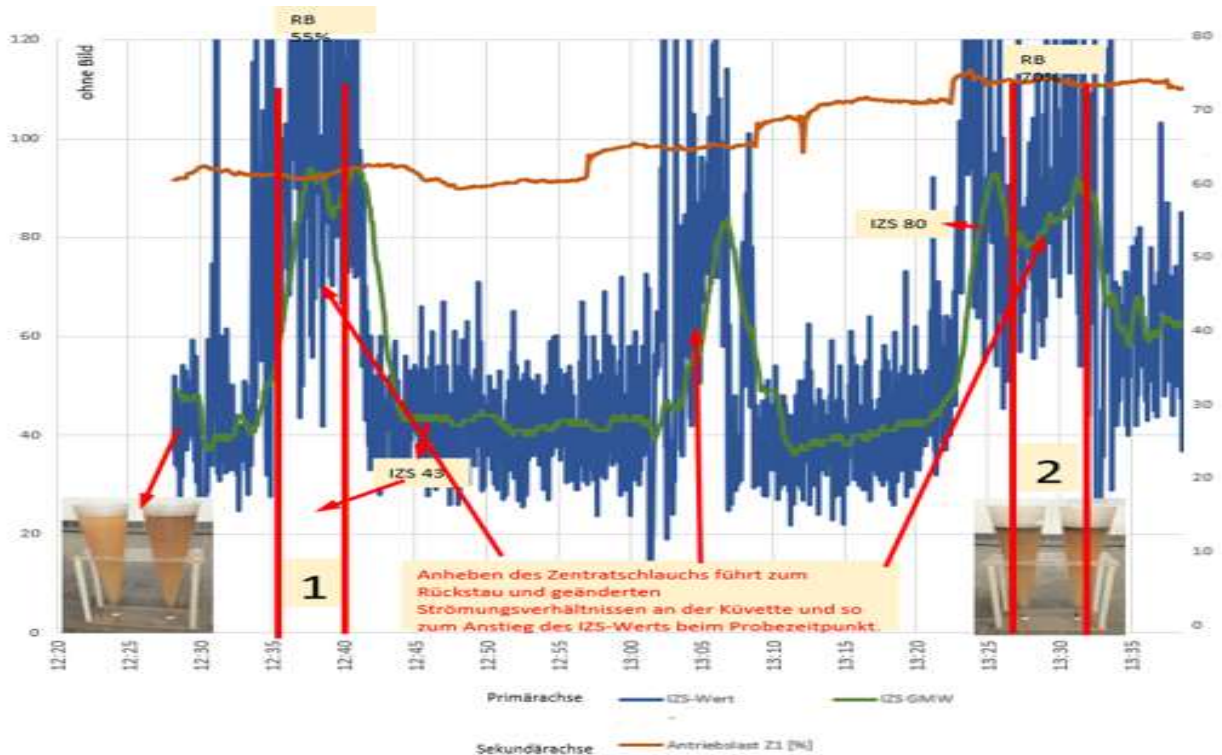


Abbildung 24 Verfälschung Zentralsensor-Signal während der Probennahme

Final lässt sich der Probenahmedurchlauf wie folgt beschreiben.

Es wird folgende Vorbereitung abgearbeitet:

1. Die Entwässerungslinie wird auf die AMF-Flockung eingestellt und hochgefahren.
2. Die Referenzparameter lauten 12m³/h Schlammvolumenstrom und 60% Regelbeginn.
3. Die Polymerdosierung wird auf einen rechnerischen Wert von ca. 10 kgWS/t Fracht ausgerechnet (ca. 900l/h pFM-Lösung mit 0,4%WS).
4. Die Dosierung erfolgt mit 15% auf Dosierstelle 1 und 85% auf Dosierstelle 2.
5. Die Zentralkamera wird auf ein sauberes Schauglas hin überprüft und ggf. gereinigt (durch Spülzyklen oder mit händischer Reinigung).
6. Der Zentratablauf wird auf Durchsatz überprüft bei ca. 10l/h, um sicher zu stellen, dass keine Verstopfungen vorliegen.
7. Die Probenahmestelle wird mit einem Schlauch bestückt, der einen kontinuierlichen Ablauf (z.B. durch ein Profil gestützt) aufweist.
8. Ein ca. 60 Liter großes, sauberes Gefäß für ca. 5min Probennahme wird bereitgestellt.

9. Die Zentratqualität wird visuell bewertet. Es sollte ein helles, „unbelastetes“ Zentrat an der Grenze zum Umschlagpunkt vorhanden sein.
 - a. Ist dies nicht der Fall, wird die Polymermenge etwas erhöht und die Antriebslast abgesenkt, bis das Zentrat hell wird.
 - b. Ist dies der Fall, wird der Regelbeginn bis zu einem Punkt stufenweise erhöht, bis sich ein Umschlagpunkt zu dunklerem Zentrat abzeichnet. Dann wird wieder etwas in Richtung helles Zentrat zurück geregelt.
10. Während jeder Probenahme muss eine Verdünnung des Ergebnisses vermieden werden. Die Spülung wird dafür mittels geschlossenem Spülwasseranschluss unterdrückt. Der bei der Spülung schließende Ablauf zur Rückspülung in die Zentrifuge wird elektrisch getrennt, um ein Schließen zu vermeiden. Nach der Probenahme erfolgt eine Freigabe der beiden Kugelhähne. Die Zugänglichkeit zu beiden ist zu gewährleisten und zu erproben.
11. Kleine Beprobungsgefäße mit einem Fassungsvermögen von ca. 400ml und ein Stab zum Rühren der Mischprobe sind bereit zu stellen.
12. Das Equipment für die Filtrierung und Wägung der filtrierbaren Rückstände ist aufzubauen und anzuschließen.
13. Eine Dokumentation in Schrift und Bild von den Ausgangsbedingungen (HMI, Kamera, Zentratqualität, angestandene Betriebsstörungen, Uhrenabgleich usw.) ist vorzunehmen und das Messprotokoll bereit zu stellen.

Für jede durchgeführte Beprobung sind nun folgende Punkte zu wiederholen.

14. Stabiles Zentrat liegt an (visuelle Kontrolle)
15. Kugelhähne blockieren
16. Schlauch über Tonne führen
17. Start der Beprobung notieren (hh:min:sec)
18. Foto der Kamera und des HMI
19. Nach 5 Minuten oder vor Überlauf des Fasses Schlauch umlenken in den Bodenablauf
20. Zeit notieren und Kugelhähne wieder frei geben
21. Nachregeln zu einem schlechteren Zentrat (z.B. 2-5% Regelbeginn)
22. Umrühren der Mischprobe
23. Drei kleine Beprobungsgefäße füllen, verschließen und wiegen
24. Je nach Zentratqualität 1-3 Proben inkl. mit Wasser ausgespülter Rückstände am Probenahmegefäß filtrieren.
25. Filter und Gefäß wiegen
26. In den Ofen stellen und trocknen lassen
27. Am Folgetag trocken wiegen

Bei der Beprobung sind durch eine Unterweisung grobe Fehler durch Achtsamkeit zu minimieren, z.B. Zahlendreher im Gewicht, in der Gefäßnummer usw.

4.3.5 Bewertung der Messwerte im Kontext

4.3.5.1 Auswertung der Zentratsmesswerte

Die Messergebnisse werden im Anschluss mit den Zentratsensor-Messwerten übereinandergelegt. Aus den Messwerten werden Ausreißer, die über die Standardabweichung liegen, entfernt und dann ein Mittelwert über den Probenahmezeitraum gebildet.

Aus den Ofenproben wird mittels der Formel 3 der Abscheidegrad ermittelt:

$$\eta_{TS} = \frac{(TR_{zu} - TR_{rück}) * TR_{aus}}{(TR_{aus} - TR_{rück}) * TR_{zu}} * 100(\%)$$

Formel 3: Abscheidegrad

- 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 und der Zentratsensor-Wert werden in Abbildung 25 aufgetragen. Dabei wurden alle Werte im Anfangszeitraum verzeichnet. Dabei ist gut zu erkennen, dass durch die beschriebenen Störgrößen, Messfehler und Versuchsablaufunzulänglichkeiten eine so große Streuung aufgetreten ist, dass der Ablauf und die Randbedingungen nochmal genauer analysiert werden mussten.

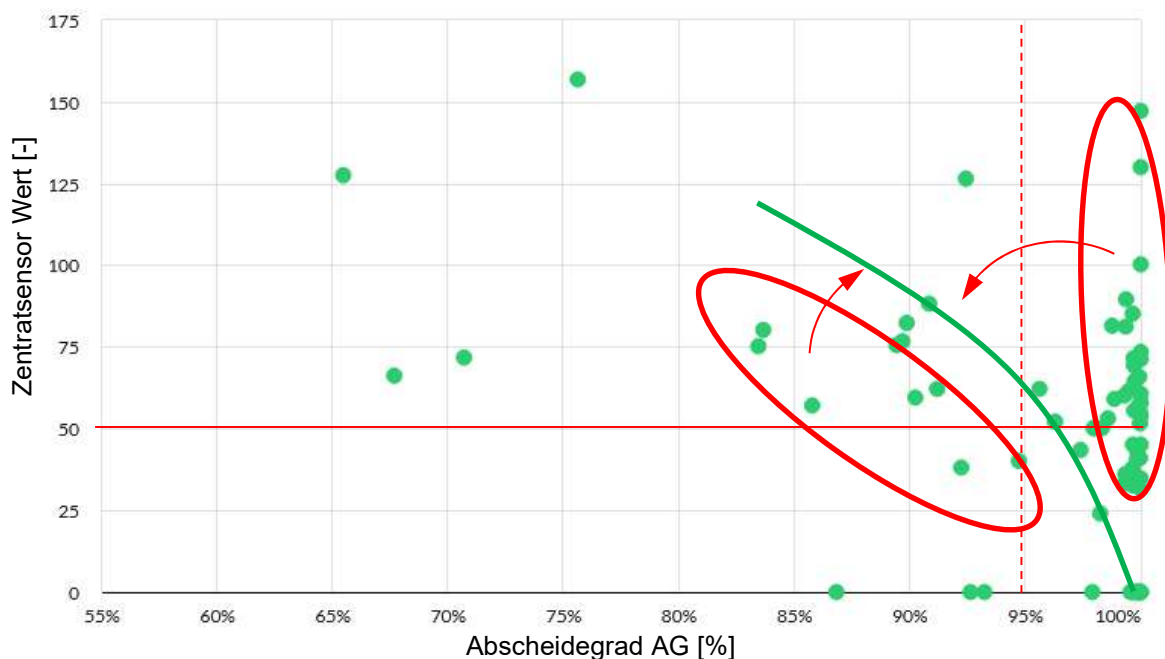


Abbildung 25: Sensorsignal über Abscheidegrad

Die Streuung musste auf die Laborwerte eingegrenzt werden, um auf die grüne Ausgleichskurve laut Laborvorgabe zu kommen.

Durch eine intensive Betreuung, Vorbereitung und Sorgfalt konnten unter Ausschuss der genannten Störfaktoren (Phosphor, Entschäumer, Verstopfungen, Auftrocknen, Reinigungsleistung, Regelungsseitiger Umgang z.B. Mittelwertbildung, konstante Polymerdosierung, Strömung über das Schauglas, Schwankende Antriebslasten der Zentrifugen usw.) die in Abbildung 26 aufgeführten Werte ermittelt werden. Diese korrelierten mit den Laborergebnissen aus den Voruntersuchungen.

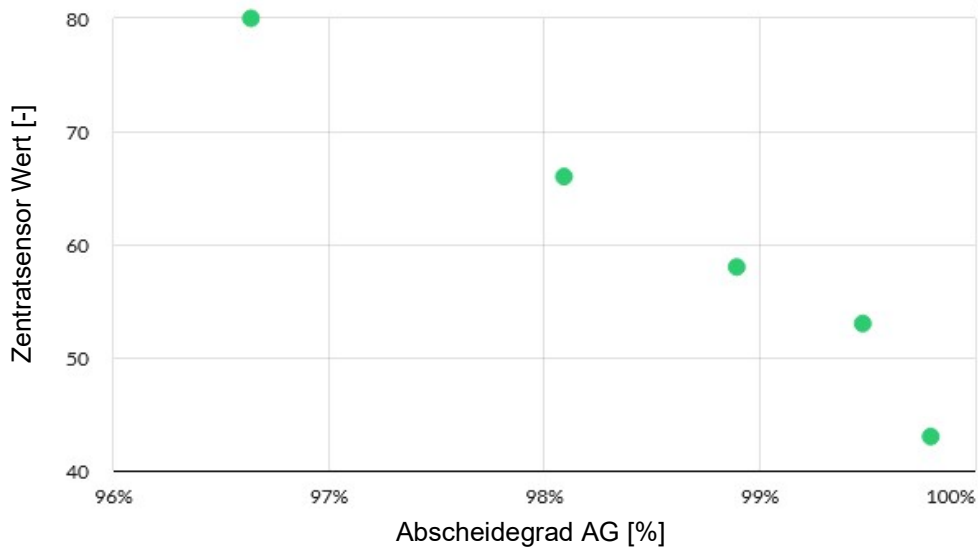


Abbildung 26: Sensorsignal über Abscheidegrad final

Man kann sehr gut die Abhängigkeit vom Sensorwert zum Abscheidegrad erkennen. Die Abweichung, dass das Sensorsignal auf 100% Abscheidegrad nicht zu Null verläuft, rührt aus der Softwarekompensierung der Schaumbildung. Ebenfalls wurde das Sensorsignal, welches bei dunklen Schlämmen z.B. Faulschlamm bis 5000, steigen kann, hier in einen sehr engen Bereich von 40 bis 100 gelegt, um zulässige Abscheidegrade von 95% zu erkennen. Abscheidegrade bis 98% erstrecken sich hingegen nur im Bereich von 40-65. Dieser sehr enge Bereich muss noch feiner aufgelöst werden. Dies wäre durch zentratseitige bessere Abscheidung von Schaumbildung und Versteifung des Zentratflusses möglich. Zudem ist durch eine Optimierung der Ausleuchtung und Anpassung auf „saubere“ Zentrates ebenfalls eine feinere Auflösung zu erwarten. So könnte das Signal voraussichtlich um den Faktor 10 feiner aufgelöst werden.

4.3.5.2 Auswertung der Randbedingungen auf das Zentrifugenkennfeld

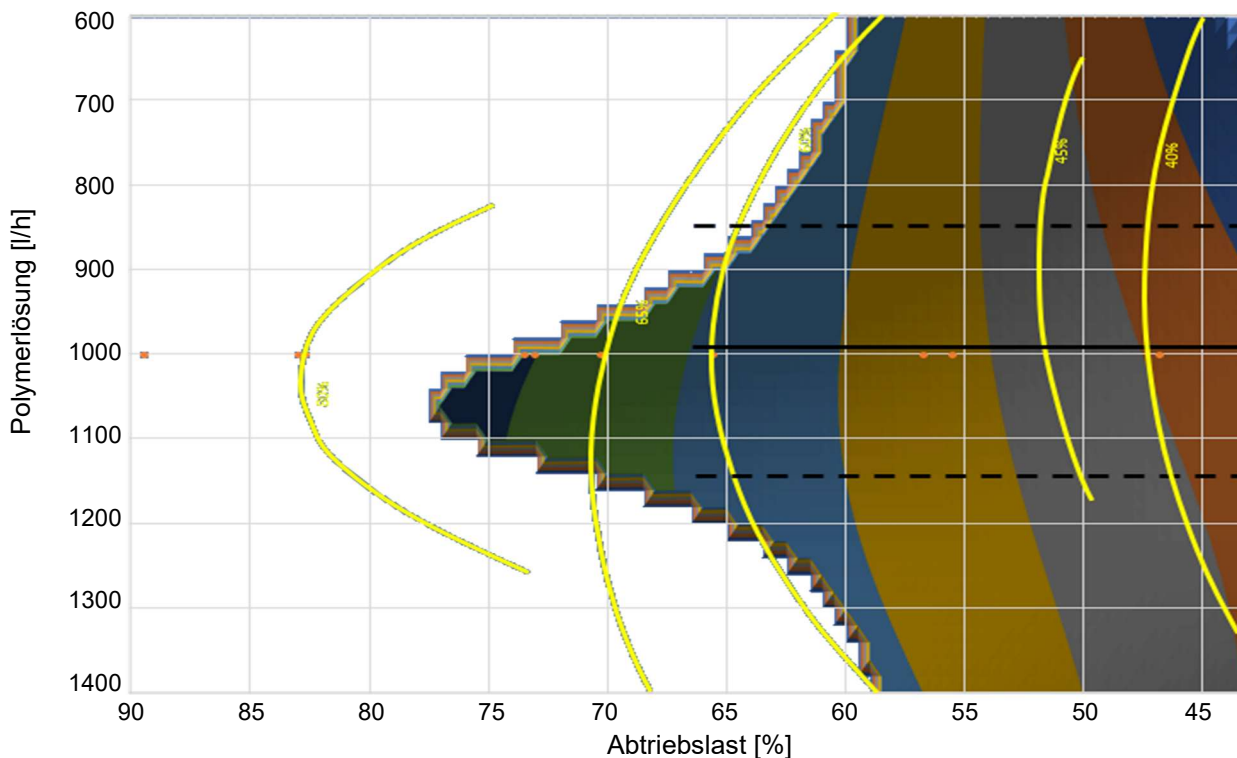


Abbildung 27: Zentrifugenkennfeld mit Linien konstanten Regelbeginns

Das oben beschriebene Zentrifugenkennfeld, hier in einer Draufsicht in Abbildung 27, zeigt das Kennfeld einer Zentrifuge, welches sich je nach Polymermenge und Antriebslast zu höheren Entwässerungswerten treiben lässt. Bei statischem Regelbeginn folgt die resultierende Antriebslast den gelben Linien. Sie verlaufen leicht gewölbt mit einem Maximum. Auf der X-Achse ist die dosierte Wirksubstanz abgebildet. Stellt man nun eine ebenfalls fixe Polymerlösungsvolumenstrom ein, ergibt sich ein fixer Punkt in dem Diagramm. Wird der Regelbeginn verändert, kann eine Linie (schwarz) an Entwässerungswerten TR erreicht werden, bis man das Kennfeld verlässt und das Zentrat in den unzulässigen Bereich abgleitet. Wie festgestellt wurde, schwanken jedoch die für die Polymerlösungsberechnung eingehenden Werte. Somit ergibt sich aus dieser Fehlberechnung eine zur gewünschten Linie abweichende Wirksubstanz. Die Streuung wurde im Diagramm mit den schwarz gestrichelten, parallel zur Wunschdosierung verlaufenden Linien dargestellt. Ohne Anpassung (Praxisfall) des Regelbeginns verändert sich das Entwässerungsergebnis nur marginal. Es ist aber auch zu erkennen, dass es auf den Linien jeweils unterschiedlich hohe maximale Antriebslasten gibt, bis das Zentrat unzulässig belastet wäre. Zudem gibt es einen maximalen Wert von RB 55%, in dem trotz aller Abweichungen zur Zieldosierung noch zulässiges Zentrat erreicht werden kann. Diesen Regelbeginn kann man daher als Komfortwert bezeichnen. Der maximal mögliche Regelbeginn liegt aber ca. 73% und somit fast 20% über dem Komfortwert. In diesem

Bereich genügen jedoch bereits sehr kleine Abweichungen, die in einer unzulässigen Zentratlbelastung resultieren.

Die Abweichungen in der Wirksubstanzdosierung sind in der Praxis deutlich stärker als hier dargestellt, da im Diagramm nur die Varianz der TS-Sonde und nicht die Varianz der Ansetzstation bei der Herstellung der Polymerlösung berücksichtigt wurde. Eine Reduzierung dieser Schwankungen wäre nur mit einer sehr feinmaschigen Überwachung und kurzen Wartungsintervallen möglich. Dies erfordert jedoch dafür nicht eingeplantes Personal. Somit bleibt in der Praxis nur abzuwägen, ob entweder mehr Personalaufwand oder geringere Entwässerungswerte bzw. höhere Zentratlbelastungen akzeptiert werden.

4.3.5.3 Übertragung der Zentralsensormessung auf das Zentrifugenkennfeld

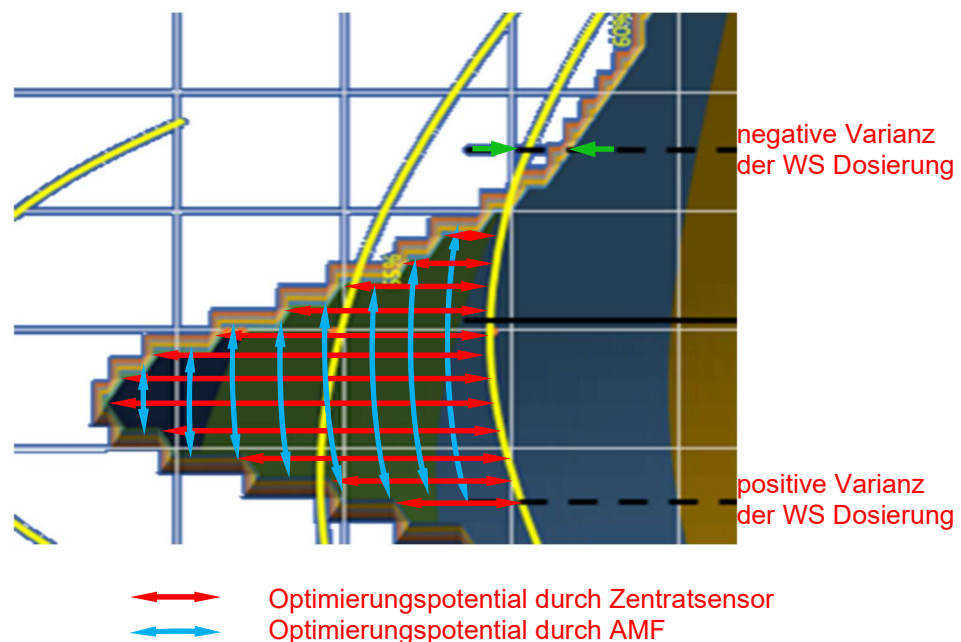


Abbildung 28: Zentrifugenkennfeld mit mit Linien kontanten Regelbeginns (qualitativ)

Die im Antrag angestrebten Ansätze, dass der Zentralsensor in Verbindung der AMF eine weitere Optimierung erzielt, sind nachweisbar und nicht unerheblich, wie Abbildung 28 zeigt.

Die Anwendung der Zentralsonde unterstützt das Nachregeln der Antriebslast (Y-Achse) in einem weiten Bereich (rote Pfeile) in Bezug auf eine Grundeinstellung von 60% Regelbeginn. Es können überwiegend höhere Antriebslasten trotz schwankender Ansetzkonzentration (ungeregelte Fahrweise) erreicht werden. Ebenso könnten unzulässige Zentratl bei Unterdosierung kompensiert werden (grüne Pfeile). Die Einbindung der AMF ermöglicht die Anpassung der Polymermenge bzw. Wirksubstanz in der Lösung (X-Achse), um Schwankungen in der Ansetzkonzentration zu kompensieren. Im Bereich höheren Regelbeginns (blaue Pfeile) sind für stabile Entwässerungswerte nur geringere Schwankungen zulässig, als die konventionelle Technik sicherstellen kann. Optimal eingestellt wäre die Entwässerung, wenn man

zudem in dem Bereich die Wirksubstanz so weit verringert, dass die Zentratgrenze (Kippunktlinie) abgefahren wird. Alternativ kann immer mit einer konstanten Wirksubstanz gefahren werden, womit es möglich ist, auch über längere Zeit trotz sehr kleinem Spielraum stabil in der Spitze des Kennfeldes die richtige Wirksubstanz zu dosieren. Mit diesen Einstellmöglichkeiten kann jederzeit die Grenze zu unzulässiger Polymermenge angefahren werden. Welcher Punkt auf der Zulässigkeitslinie angefahren wird, ist dann abhängig vom gewählten Regelkonzept und vom Integrationsgrad, da auch denkbar ist, dass der Zentratsensor allein fungieren könnte.

Die Anwendung der Messwerte auf das Entwässerungsergebnis ist vielversprechend. Ein Nachregeln der Zentrifuge bezüglich pFM-Lösung und vor allem der Antriebslast ist anzustreben. Hier besteht enormes Potential zur Betriebssicherheit und Senkung der Betriebskosten. Der Sensor kann auch alleinige Basis für eine Automatisierung darstellen und somit das „Auge des Betriebs“ sein.

4.4 Abschnitt 8 - Bewertung der Versuchsergebnisse

4.4.1 Anwendung der Versuchsergebnisse auf die praktische Umsetzung

Wie der Antrag schon skizziert, soll mindestens der Anlagenfahrer unterstützt werden, zu erkennen, wann das Zentrat in einen unzulässigen Bereich abgelenkt. Dafür können softwareseitig Grenzwerte hinterlegt werden. Die Messgenauigkeit wäre gegeben, um eine feine Abstufung im Umschlagbereich darzustellen. Ausreichend wäre es, dass eine Anzeige ein Ampelsystem wiedergibt, welches den Abscheidegrad in grün (> 98%), gelb (> 95%) und rot (<95%) untergliedert.

Zudem könnte bei der Einstellung *grün* die Empfehlung zu höheren Antriebslasten erfolgen. Ein fließender Übergang von einer Farbe zur nächsten würde dann eine Unterbindung des Nachregelns zur Folge haben, da man sich am jeweiligen Kippunkt befindet und ein weiteres Nachregeln der Antriebslast oder Polymermenge zu ungewünschten Zentratbelastungen führen würde.

Durch die Weitergabe der Qualität an den Anlagenfahrer kann so einerseits Polymer eingespart werden. Andererseits könnte das Entwässerungsergebnis %TR erhöht werden. Auch könnte bei unterschiedlicher Kapazität in der Klärung ein etwas geringerer oder etwas höherer Abscheidegrad angefahren werden. Es muss nicht immer das beste Zentrat sein, wenn dafür überproportional viel Polymer eingesetzt werden müsste.

4.4.2 Regelkonzepte für eine Steuerungssoftware

Aus den praktischen Versuchen hat sich durch den zeitlichen Aufwand der Grundzusammenhänge in Verbindung mit dem Zentralsensor leider keine praktische Umsetzung der ausgearbeiteten Konzepte mehr ergeben.

Trotzdem lassen sich anhand der gesammelten Erfahrungen die Konzepte nun besser auf ihre Wirkung hin überprüfen. Anhand von Randparametern wird versucht abzuschätzen, welchen Erfolg das eine oder andere Konzept erzielen kann. Die Konzeptzielpunkte werden folgend erläutert und sind mit ihren Zielpunkten in Abbildung 29 dargestellt.

Das erste Konzept beruht darauf, den maximalen TR-entwässert (Punkt 1 Abb. 29) zu erreichen. Dabei bleibt die Einsparung von Polymer unberücksichtigt. Es wird so viel Polymer zudosiert, dass man in die Spitze der Zentrifugenkennlinie gelangt. Um diesen Wert zu erreichen, ist ein iterativer Suchalgorithmus nötig, der sich Schritt für Schritt in die Spitze arbeitet. Dafür müssen Polymermenge und Antriebslast im Einklang gebracht werden. Dieses Konzept kann somit ausschließlich in Kombination von Zentralsensor und AMF erfolgen.

Der Punkt maximalen TR's zeichnet sich durch geringe Entsorgungskosten aus, da bei z.B. 2,5% TR bei einer 100T EW Kläranlage schon 50T€ pro Jahr gespart werden können.

Das zweite Konzept beruht auf einer minimalen Flockungsmittelmenge (Punkt 2 Abb. 29). Bei diesem Konzept ist man mit der pFM minimal Restriktion allein schon nicht gut beraten. Durch das Einsparen an pFM vom Maximum TR um bis zu 50% können immer noch gute Zentrante erzeugt werden. Der TR weist aber so starke Abweichungen vom TR-Max auf (bis 7%-Pkt.), dass die Halbierung der Wirksubstanz wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen ist. Allein die parallelen Randbedingungen wie z.B. Reduzierung des Stromverbrauchs der Dekanter oder ökologische Aspekte der Reduzierung von Flockungsmitteln können solch einen Betrieb rechtfertigen. Somit ist die Betriebsart ohne weitere Restriktionen nur selten zu empfehlen. Vielmehr macht es Sinn, dass man zur Flockungsmittelmenge eine gewisse Mindestantriebslast o.ä. hinterlegt, um zumindest die Entsorgungskosten kontrollieren zu können.

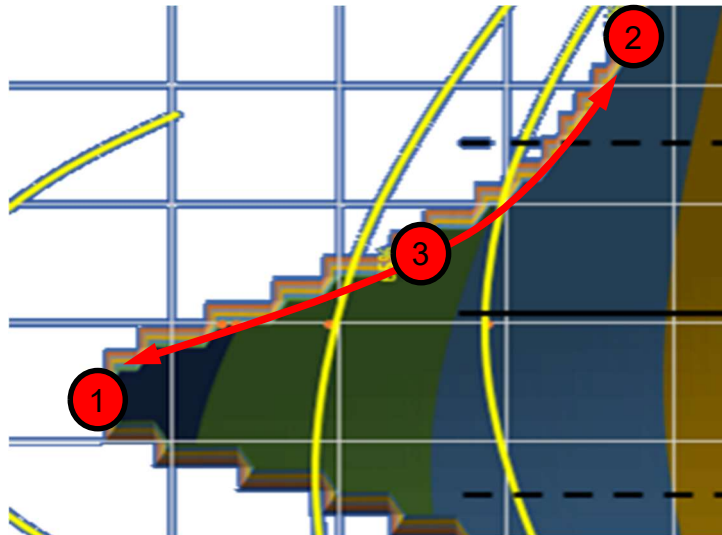


Abbildung 29: Regelkonzeptziel (qualitativ)

Die dritte mögliche Betriebsart des Systems beruht auf der Erreichung eines optimalen Betriebs. Der optimale Betrieb ist von mehreren Bedingungen abhängig, da zum einen die Kennlinie akzeptabler Abscheidegrade (Kippunktlinie 3 rot Abb. 29) stetig variiert und zum anderen Restriktionen das Maximum (1) und Minimum (2) ausschließen sollen. Ansonsten würde man in Regelkonzept 1 oder 2 übergehen.

Ergänzende Randbedingungen wären nun unter folgenden Aspekten zu suchen:

- Was soll optimiert werden?
- Was steht an Möglichkeiten zur Verfügung?
- Welches Gleichgewicht an Ökonomie und Ökologie wird gewünscht?

Somit ist Konzept 3 (Abb. 30) das flexibelste auf die Kläranlagenbedingungen anpassbare Konzept. Zu wählen sind dabei aber Randbedingungen wie z.B.

- reduzierter Polymerverbrauch z.B. Abstand um X% (3a) vom Maximum oder Minimum,
- stabiler Ziel-TR durch Halten einer vorgegebenen Antriebslast (3b), stabilisiert durch angepasste pFM-Menge,
- konstante pFM-Menge mit jeweils maximaler Entwässerung (3c).

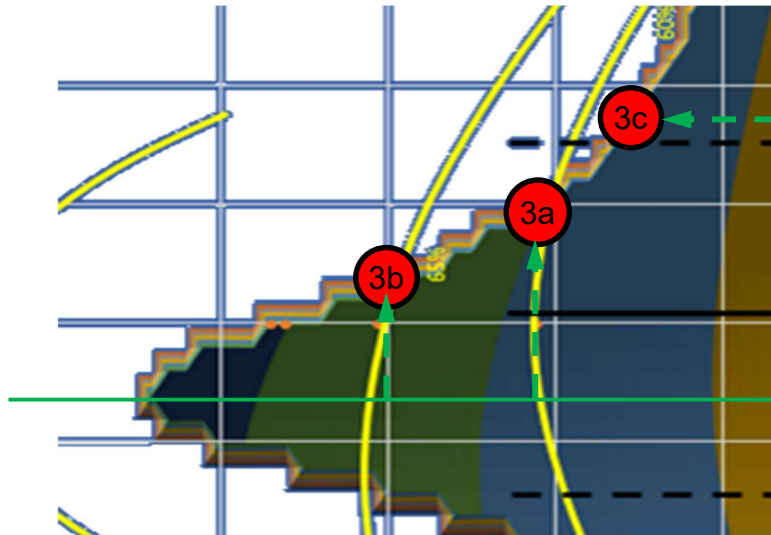


Abbildung 30: Regelkonzeptziel 3a-c (qualitativ)

Die Regelkonzepte sind alle darauf ausgelegt, dass der Zentralsensor je nach Fracht eine Empfehlung gibt, die direkt über die SPS-Kommunikation mit der Zentrifuge oder indirekt über die Umsetzung der Empfehlung mittels Vorgabeänderung durch das Betriebspersonal der Kläranlage eingestellt wird.

Die Regelungskonzepte können aber nur rein theoretisch in Zusammenhang mit ihrem Nutzen gebracht werden, da die Möglichkeit für einen Dauerbetrieb mit den jeweiligen Konzepten im Vergleich zur konventionellen Fahrweise aus erläuterten Gründen schwierig umzusetzen gewesen wäre.

Die Optimierungen und möglichen Einsparungen bzw. vermiedenen Zentratsbelastungen können hier nur empirisch bewertet werden. Ein kontinuierlicher Vergleichsbetrieb war in dem Projekt mehr nicht möglich.

4.4.3 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Für eine Bewertung gilt es, eine Vergleichsbasis bzw. einen Maßstab zu besitzen. In dem Fall sollen die bekannten Betriebswerte der Kläranlage Hildesheim zugrunde gelegt werden, welche ein repräsentatives Beispiel für eine 100T EW-Anlage ist. Von denen gibt es ca. 1000 Anlagen in Deutschland. Diese können als vorherrschende Größe mit vollständiger Abwasser- aufbereitung gewertet werden. Größere Kläranlagen sind seltener, kleinere umfassen selten den vollständigen maschinellen und verfahrenstechnischen Reinigungsprozess.

Entwässerungskennwerte Kläranlage Hildesheim

Betriebswerte:

TR-Entwässert unbetreuter Betrieb:	25,5%
TR-Max	27,0%
Zentratqualität AG ca.	93%
Polymerverbrauch ca.	12 kg WS/ t TR
TS-Anteil am Faulschlamm (FS)	26,5 g/l
Übliche Entwässerungsleistung FS	12 m ³ / h

Jahreswerte

Trockenrückstand / a	3.083 t/a
Entwässerter Schlamm /a ca.	12.584 t/a TR
Faulschlammmenge / a	116.340 m ³ /a
Betriebsstunden /a	9.695 h/a
Entsorgungskosten	100€/t TR
Polymerkosten	3€/kg WS

Zur Betrachtung des möglichen Nutzens allein des Zentratsensors wird bewertet, wie viel Feststoff bei der Entwässerung mit dem Zentrat ausgeschleust und über den Kreislauf Vorklärung/Primärschlamm-Belebung/Überschussschlamm-Faulung/Faulschlamm wieder dem Zulauf des Zentrifugendekanters zugeführt wird. Ausgehend von der Annahme, dass diese Feststofffracht keinen zusätzlichen Überschussschlamm erzeugt und als ausgefauter Schlamm auch nicht weiter verfault wird, kommt sie mit der gleichen Feststofffracht am Einlauf der Zentrifuge zusammen mit dem sonstigen Faulschlamm wieder an. Abbildung 31 zeigt die berechnete zusätzliche Schlammmenge in Abhängigkeit vom Abscheidegrad. Berechnungsgrundlage dafür sind die oben aufgeführten Kenndaten.

Der Abscheidegrad wurde bewusst schlecht mit 92% angenommen. Der wahre Wert ist im Mittel nicht bekannt, aber oft im unerwünscht hohen Bereich. Die Zentratleitungen nach der Zentrifuge verstopfen mehrfach pro Woche und im Zulauf der Kläranlage, wo das Zentrat eingeleitet wird, treten fortlaufend Störungen in der Sensorik wegen zugesetzter Filter auf. Deshalb wurde ein Wert von 3% unterhalb der noch akzeptablen Grenze von 95% angenommen.

Es wurde die Menge an zusätzlichem Faulschlamm berechnet, der entsteht, wenn Fracht durch das Zentrat im Kreis zirkuliert. Gerechnet wurde mit 5 Iterationsschleifen, da ja auch etwas vom zirkulierenden Schlamm wieder und wieder etwas ins Zentrat gelangt, und zwar so lange, bis die Frachten vollständig entnommen sind.

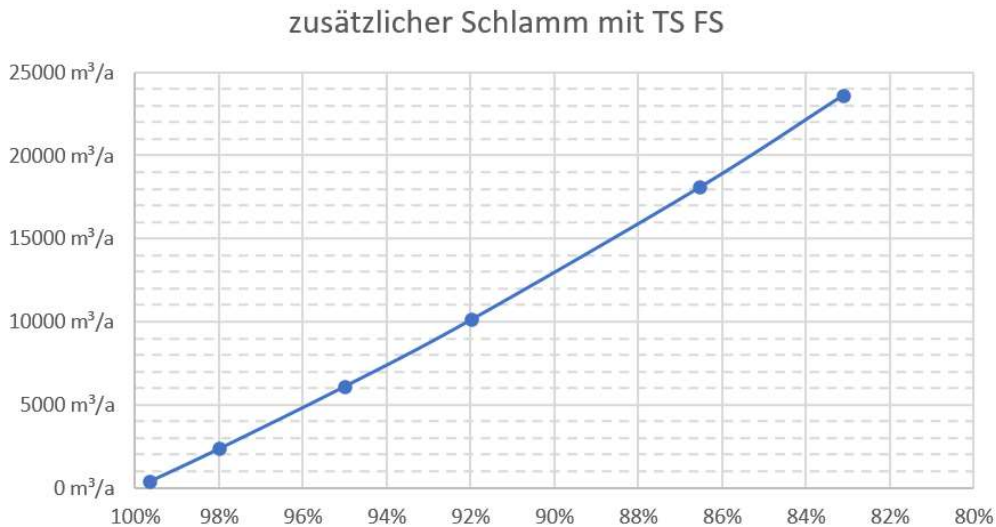


Abbildung 31: zusätzlicher Faulschlamm durch Zentratbelastung

Das Diagramm zeigt sehr gut, dass durch Abscheidegrade von 92% statt 99% ca. 9.000 m³/a an Faulschlamm zusätzlich entwässert werden müssen, weil diese im ersten Durchlauf nicht abgeschieden wurden, Abb 32.

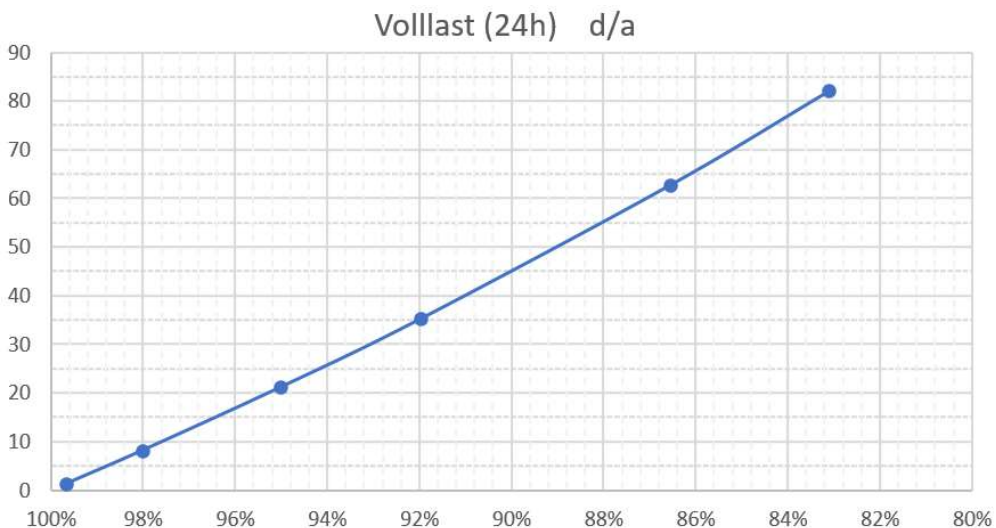


Abbildung 32: zusätzliche 24/7 Betriebsstunden pro Jahr

Dies entspricht einem Monat 24/7 Vollbetriebsstunden allein nur, um die nicht abgeschiedene Fracht erneut zu entwässern. Bei einem Stromverbrauch von ca. 5 kWh/m³ allein der Zentrifuge werden hier 45.000 kWh/a mehr verbraucht. Für den Schlammtransport wird nochmal 75% davon veranschlagt. Somit liegt der Mehrverbrauch bei ca. 78750 kWh/a. Das entspricht einem Verbrauch von ca. 50 Haushaltsjahresverbräuchen. Bei einer Eigenstromproduktion durch ein BHKW und einem elektrischen Wirkungsgrad von 32% entspricht das einem Erdgasverbrauch von 246.100 m³ und somit einem CO₂ Ausstoß von ca. 500t CO₂ im Jahr.

Hinzu kommen die Verbrauchsmaterialien von polymeren Flockungsmitteln und den Wartungs- und Instandhaltungskosten durch Verschleiß und Betriebspersonal.

Allein durch den Zentralsensor könnten so im Jahr allein in Deutschland nur bei der Anwendung auf den ca. 2.000 Kläranlagen vergleichbarer Größe ca. 1 Mio t CO₂ Emissionen eingespart bzw. 100.000 Haushalte mit Strom versorgt werden. Diese Werte gelten im Mittel für Deutschland. Aber selbst bei den hier referenzierten Entwässerungsaggregaten, die dem neuesten Stand der Technik entsprechen, sind es immer noch 1,4kWh/m³ und somit ca. 12.600 kWh_e/a pro Kläranlage, die verloren gehen.

Werden zu diesem Kreislauf noch zusätzlich 1,5% mehr TR durch das nachregeln der Antriebslast zu höheren Entwässerungsergebnissen über das Jahresmittel erreicht, würden die zu entsorgende Schlammmenge von 12.090 m³/a auf 11.418 m³/a sinken. Das sind ca. 670 m³/a mal 100€/t und entspricht ca. 67.000€ Betriebskosteneinsparungen. Dies entspricht aber auch ca. 30 LKW-Fahrten an CO₂ Einsparungen für die Entsorgung.

Können zudem noch Polymerreduzierungen um ca. 10% erreicht werden, sinkt der Bedarf um 3,7 t/a. Dies entspricht ca. 11.000€/a an polymeren Flockungsmitteln. Eine noch weitere Reduzierung von Flockungsmitteln erscheint erreichbar. In diesem Fall würde das aber den Entsorgungskosten entgegenstehen, weil auch das Entwässerungsergebnis abnehmen könnte. Ein Pluspunkt dabei wäre, dass dann auch die Antriebslasten gesenkt werden könnten, wodurch eine Einsparung der Betriebskosten für Strom erzielt wird.

Zudem ist bei bestimmten Abnehmern von Klärschlamm kein so hohes Entwässerungsergebnis gewünscht. In solchen Fällen können mit dem Regelungskonzept „min pFM“ erhebliche Umweltbelastungen und CO₂ Emissionen vermindert werden durch Einsparungen beim Stromverbrauch und den emittierten polymeren Flockungsmitteln (Abwasser / Ackerflächen).

Nicht berücksichtigt wird die gesamte personelle Betreuung der Anlage. Der Personalaufwand der fortlaufenden manuellen Anpassung der Entwässerung im Vergleich zur vollautomatisiert geplanten Entwässerung entspricht ca. 1-2 Vollzeitstellen in der Entwässerungshalle.

Zudem weist die Entwässerungsanlage durch die hohe Rückbelastung und längeren Laufzeiten einen höheren maschinellen Verschleiß auf, der ebenfalls nicht berücksichtigt wurde.

Auch die externen Kosten durch die Beseitigung von Betriebsstörungen wie zugesetzte Leitungen und Zentrifugen und der damit verbundene Mehrverschleiß kann hier nicht beziffert werden, dürfte jedoch in einem erwähnenswerten Bereich liegen.

Zusammenfassend betrachtet wurde das Potential des Zentralsensors in dem Projekt deutlich herausgearbeitet. Eine Amortisation wird bereits nach weniger als 2 Jahren erreicht. Dazu kommen noch, wie vorab erwähnt, mehrere softe Faktoren, die hier nicht quantitativ bewertet wurden. Ergänzend trägt der Zentralsensor einen guten Anteil zur Verbesserung der Energieeffizienz bei, wodurch Gas und Strom eingespart und energetische Abhängigkeiten reduziert werden.

Die ursprüngliche Zielsetzung, dass der Zentralsensor eine Optimierung der AMF darstellt, ist vollständig gegeben. Die erschwerten Bedingungen, um den Sensor aktuell in Betrieb zu halten, sind noch eine Herausforderung und konnten im Projekt nur durch viel Handbetriebsstunden kompensiert werden. Unter den Umständen sind aber auch keine verlässlichen automatisierten Vergleichsfahrten über einen längeren Zeitraum möglich gewesen. Anhand des ermittelten Zentrifugenkennfeldes ließ sich aber zeigen, dass der Zentralsensor auch bei den neuesten Entwässerungsmaschinen noch erhebliche Optimierungspotentiale beinhaltet.

Die hier dargestellten Ergebnisse werden in kommenden Fachkonferenzen und -tagungen angeführt und tragen dazu bei, die Zentraltbelastung und deren Folgen näher in den Blick zu nehmen.

Geplant sind Vorträge und Fachbeiträge auf Fachkonferenzen sowie Ausstellungen. Die Einbindung von Expertenmeinungen ist schon erfolgt.

Folgende Gelegenheiten der Veröffentlichung sollen voraussichtlich genutzt werden.

- Konferenz Tausendwasser Berlin
- DWA-Konferenz
- CUTEC
- Vorstellung auf ABA
- Vorstellung vor Fachexperten (Kopp, Sievers, Köster)
- Informationen vor Ort durch Aussteller, Plakate und Flyer teilen
- Vorträge mit Präsentation 2023 werden angefragt

5 Fazit

Die in diesem Projekt geplante und umgesetzte Erweiterung der AMF basiert auf der notwendigen Anpassung und Optimierung der maschinentechnischen Betriebsparameter von Zentrifugendekanter, weil auch bei optimaler Flockung ein schlecht eingestellter Zentrifugendekanter ein schlechtes Entwässerungsergebnis liefert. Mit Kenntnis des prognostizierten Verhaltens der Entwässerung anhand von online gemessenen Schlammflockenstrukturen (siehe AMF) und Kenntnis der maschinellen Betriebsparameter (Regelbeginn/-steilheit etc.) sowie maschinellen Auswirkungen hinsichtlich Antriebslast (TR-entwässert) und Differenzdrehzahl (Zentratqualität) können Vorhersagen zur Anpassung der Zentrifugenparameter getätigt und quantitativ bewertet werden. So werden Veränderungen hinsichtlich der Schlammeigenschaften und der Polymermenge festgestellt und anhand eines ermittelten Zentrifugenkennfeldes angepasst. Über diesen Vergleich und gemeinsam mit den erfassten Betriebszuständen des Zentrifugendekanters werden somit optimierte Betriebsparameter für den Dekanter abgeleitet und in intelligente Automatisierungsstrategien umgesetzt. Dadurch kann die gesamte Prozesskette der Schlammentwässerung optimiert werden.

Anhand der ausgewerteten Messungen ist sehr gut zu erkennen, wie konventionelle Regelstrategien bei sich ändernden Betriebsbedingungen, wie z.B. bei unzuverlässigen Polymeraufbereitungsstationen, ins Leere greifen. Insbesondere hinsichtlich Schwankungen bei den Polymeransatzkonzentrationen, welche bisher messtechnisch nicht erfasst werden konnten und somit unbemerkt blieben. Die Abweichungen stellten sich insgesamt als noch umfangreicher heraus als erwartet, trotz technisch neuestem Baustand.

Durch eine intelligente Sensorik wurde es ermöglicht, die im Rahmen der technischen Möglichkeiten bedingten, bekannten und akzeptierten Ungenauigkeiten von Funktionsgruppen und -einheiten wie auch der Polymeransatzstation auszugleichen.

Der Betreuungsaufwand für einen manuellen Ausgleich von Schwankungen in der konventionellen Entwässerung wäre enorm, um auch nur annähernd die Abweichungen zu den Regelsollwerten zu kompensieren, weil Abweichungen in der Wirksubstanzkonzentration zu völlig unterschiedlichen Polymerdosierungen und somit signifikanten Veränderungen des Betriebspunktes im Zentrifugenkennfeld führen. Dies kann und wird nur durch tolerantere Zentrifugenparameter (großzügig angelegter Arbeitsbereich) kompensiert, was zwangsläufig zu reduzierten Entwässerungsergebnissen führt, welche die Kläranlage ökologisch und ökonomisch belasten. So fallen für eine Kleinstadt in der Summe zusätzliche jährliche Kosten im unteren 6-stelligen Bereich an.

Der Einsatz der entwickelten Technik hat somit ein großes wirtschaftliches und umweltrelevantes Potenzial. Die automatisierte Anpassung einer sich ständig variierenden Betriebskennlinie entspricht einem komplexen Vorgehen, welches ein Anlagenfahrer mit dem erforderlichen manuellem Mess- und Analyseaufwand nicht zeitnah nachstellen kann.

Die Sinnhaftigkeit einer automatisierten Anpassung ist eingängig und somit vertrieblich verständlich zu vermitteln, auch weil kurzzeitige Prozessumstellungen im Vorfeld der Schlammmentwässerung einwandfrei den Änderungen der Entwässerungseigenschaften zugeordnet werden können. Zudem können Verschlechterungen bei der Entwässerungsgüte trotz konstanter Prozess- und Betriebsbedingungen z.B. auf sich ändernde Schlammeigenschaften oder auf eine abnehmende Wirkung der Polymere hinweisen.

Da der entwässerte Schlamm „downstream“ transportiert und/oder getrocknet und thermisch verwertet wird, lassen sich mit dem entwickelten Konzept auch zeitlich vorgegebene Kosten oder Qualitätsanforderungen für den entwässerten Schlamm einbinden und entsprechende Regelstrategien für eine stabile „vernetzte“ kosten- und qualitätsoptimierte Entwässerung umsetzen.

Das Fehlen an geeigneter Sensorik verhinderte bisher, dass derartige anspruchsvolle Regelkonzepte in der Praxis entsprechend umgesetzt werden konnten. Die nun entwickelten Algorithmen und Messtechniken können diese Lücke schließen.

Die für eine Marktreife noch zu nehmende Hürde ist die Schaffung einer notwendigen Robustheit des Systems für einen stabilen Dauereinsatz in der Praxis. Dazu gehören Softwareoptimierungen zur Selbsterkennung und Zuordnung von Fehlerursachen sowie ein sensorischer Aufbau, der die Messtechnik unempfindlicher gegenüber den beschriebenen Störeinflüssen macht.

Die angestrebte Marktdurchdringung ist somit aktuell noch nicht wie vorgesehen möglich. Dieses Risiko stand vorab im Raum und ist somit zunächst einmal eingetreten. Aufgrund der umfangreichen wertvollen Praxiserfahrungen, die im Verlauf des Projektes gesammelt werden konnten, ist die Weiterentwicklung als neue Aufgabe mit überschaubarem Risiko einzuschätzen, welche damit auch mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit eingestuft werden kann. Somit befindet man sich auf einem sehr guten Weg zur Serienreife.

Auch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Produktes wäre ein weiterer wichtiger Entwicklungsaspekt, um die Amortisationszeiten positiver, d.h. noch kürzer ansetzen können. Dies würde die Erfolgchancen deutlich erhöhen, auf dem recht konservativen Markt von Klärwerksprodukten, das Produkt zu etablieren.

6 Literaturverzeichnis

- [Kop22] *Abb.15, Kopp, J., Versuchsbericht v. 01.08.22, Kläranlagen Beratung Kopp, 2022*
- [Sie18] *Abb.5 ergänzt mit Zentralsensor, Sievers, M., Korrespondenz Abwasser, Schlammmentwässerung mit automatisierter Optimierung der Konditionierung- erste technische Betriebserfahrung mit neuem Flockungskonzept, 2018*
- [DWA19] *Merkblatt DWA-M 383: Kennwerte der Klärschlammmentwässerung, 2019*
- [DWA13] *Merkblatt DWA-M 366: Maschinelle Schlammmentwässerung, 2013*
- [DWA14] *Merkblatt DWA-M 350: Aufbereitung und Einsatz von polymerer Flockungsmittel zur Klärschlammkonditionierung, 2014*
- [Den01] *Denkert, R.: Eindickung und Entwässerung mit Dekantierzentrifugen- Grundlagen und Betriebserfahrungen, 2. ATV Klärschlammstage in Würzburg, 2001*
- [Sie03] *Sievers, M., Schroeder C., Bormann H., Onyeche T.I., Schlaefer O., Schaefer S.: Automation in sludge dewatering by novel on-line Characterization of flocculation, Water Science and Technology Vol. 47, No 2, 157-164, 2003*
- [Pap11] *L. Papula, Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 6. Hrsg., Bd. 3, Vieweg+Teubner Verlag, 2011.*
- [Hil22] *Hiller.de, 2-Phasen Trennung mittels Dekanter, <https://www.hillerzentri.de/de/homede/funktionsprinzip-dekanter-zentrifuge.html>, Zugriff 09.2022*
- [ATV97] *ATV1-Handbuch: Mechanische Abwasserreinigung. 4. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag., 1997*
- [ATV96] *ATV2-Handbuch: Klärschlamm. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 1996*
- [AWL13] *AWEL, Stand der Technik für die (mechanische) Entwässerung von Klärschlamm. Zürich: Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2013*
- [HoW02] *Cheremisinoff, N., Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. Washington: Butterworth-Heinemann, 2002*

- [DWA03] DWA, *Stand der Klärschlammbehandlung und -entsorgung in Deutschland, 2003*
- [DWA05] DWA, *Rückbelastung aus der Schlammbehandlung – Verfahren zur Schlammwasserbehandlung, 2005*
- [Fin001] Finke, G., *Kleinkläranlagen – Technik, Recht, Planung, Ausführung, Wartung. Hildesheim: ATV-DVWK Landesverband Nord, 2001*
- [För18] Förstner, U., *Umweltschutztechnik. 9. Auflage., Springer Vieweg, 2018*
- [Pöp94] Pöppinghaus, K., *Abwassertechnologie – Entstehung, Ableitung, Behandlung, Analytik der Abwässer. 2. Auflage. Aachen: Springer Verlag, 1994*
- [Fri99] Frimmel, F., *Wasser und Gewässer, Spektrum Akademischer Verlag, 1999*
- [Gör99] Görner, K., *Umweltschutztechnik. Springer Verlag, 1999*
- [Gör02] Görner, K., *Gewässerschutz und Abwasserbehandlung, Springer Verlag 2002*
- [Guj07] Gujer, W., *Siedlungswasserwirtschaft. 3. Auflage, Springer Verlag, 2007*
- [Gün09] Günthert, F., *Kommunale Kläranlagen – Bemessung, Erweiterung, Optimierung, Betrieb und Kosten, Expert Verlag, 2009*
- [Hel03] Hellmann, D., *Maschinentechnik in der Abwasserreinigung – Verfahren und Ausrüstung, Wiley VCH., 2003*
- [Kop01] Kopp, J., *Wasseranteile in Klärschlammuspensionen – Messmethode und Praxisrelevanz, TU Braunschweig (Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft), 2001*
- [Kop17] Kopp, J., *Optimierung der Klärschlammwässerung, Aargauische Klärwärtertagung, 2017*
- [Kun90] Kunz, P., *Betrieb von Schlammbehandlungsanlagen, Expert Verlag, 1990*
- [Tho74] Thomas, G., *Entwässerung von Klärschlamm, Chemie-Ing. Techn. (11/1974)*

- [Uba18] UBA, *Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*, Umweltbundesamt (UBA), 2018
- [Sie19-1] Sievers, M., *Neue Konzepte auf dem Weg zur Digitalisierung der Klärschlammwässerung*, 10. VDI-Fachkonferenz "Klärschlammbehandlung", Mainz, 2019
- [Sie19-2] Sievers, M et al., *Schlammwässerung mit automatisierter Optimierung der Konditionierung*. KA Korrespondenz Abwasser 2019 (66) Nr. 5, S. 386-391
- [Gas19] Gaßmann, J, „*Mit dem Wasser im Faulschlamm die Entsorgung, P-Recycling und Handlungshoheit sicherstellen*“, DWA Norddeutsches Netzwerk Klärschlamm, Gümmerwald, 2019

