

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt:

AZ 27072-2

Entwicklung einer Trübungsmessung für die kontinuierliche Betriebskontrolle vollbiologischer Kleinkläranlagen

Teilbereich: Untersuchungen der BUW

Auftraggeber: **Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)**

An der Bornau 2
49090 Osnabrück



Auftragnehmer: **IP Safety First e.K. (IPSF)**

Ketscher Landstraße 8
68804 Altlußheim-Luxhof

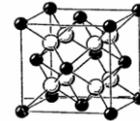
Projektleitung: Iris Pleus



Kooperationspartner 1: **WHOrga-Consult (WHOrga)**

Ketscher Landstraße 8
68804 Altlußheim-Luxhof

Projektleitung: Wolfgang Eberhard Henkel



Kooperationspartner 2: **Bauhaus - Universität Weimar (BUW)**

Professur Siedlungswasserwirtschaft
Coudraystraße 7
99423 Weimar

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. J. Londong

Sachbearbeiter: Dipl. Ing. Matthias Hartmann



Weimar, 21.12.2010

Prof. Dr.-Ing. J. Londong

- Projektleitung -

Dipl. Ing. M. Hartmann

- Sachbearbeiter -

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	1
2.	Veranlassung und Zielsetzung des F&E-Vorhabens	2
2.1.	Defizite bei Wartung und Eigenkontrolle von Kleinkläranlagen und mögliche Lösungsansätze	2
2.2.	Zielsetzung und Herangehensweise	4
2.3.	Überblick zu den Versuchen und Messreihen	7
3.	Untersuchungen zur Unterdrückung von Belagbildung an optischen Gläsern durch Bestrahlung mit UV-Licht	8
3.1.	Vor- und Dauerversuch der WHOrga mit Badeteichwasser	8
3.2.	Feldversuch der BUW im Ablauf einer SBR-KKA	12
3.2.1.	Versuchsaufbau und Durchführung	13
3.2.2.	Erwartungswerte, Abbruchkriterien und -ereignisse	15
3.2.3.	Visuelle Dokumentation der Muster und der Küvetten	18
3.2.4.	Mikroskopie der Testrohre und der Küvetten	22
3.2.5.	Ergänzende Untersuchungen zur Quantifizierung der Belagbildung	24
3.2.6.	Fazit der Feldversuche	27
3.3.	Laborversuche mit handelsüblicher Trübungsmesssonde	28
3.3.1.	Versuchsaufbau und Durchführung	29
3.3.2.	Erwartungswerte, Beobachtungen, Ergebnisse und Diskussion	35
3.3.3.	Fazit der Versuchsreihe	41
4.	Überprüfung der entwickelten Testmuster für eine neuartige Trübungsmesssonde	43
4.1.	Vorversuche mit handelsüblicher Trübungsmesssonde	43
4.2.	Hauptversuche mit D/S-Testmuster	48
4.2.1.	Verwendete Testsonden und Testmedien (Substrate)	49
4.2.2.	Versuchsaufbau und Durchführung der Messreihen 01-09	51
4.2.3.	Versuchsaufbau und Durchführung der Messreihen 10	54
4.2.4.	Vorgehen bei der Auswertung und Erwartungswerte	55

4.2.5.	Spannungsverläufe der D/S-Testmuster	57
4.2.6.	Substratspezifische Messkurven von D-Testmuster und IER-Messsonde.....	59
4.2.7.	D-Testmuster und handelsübliche Trübungsmesssonde im Vergleich.....	61
4.2.8.	Identifikation von Schlammabtrieb mit dem D-Testmuster - Korrelation von Durchlichtspannung (U_{DL}) und Abfiltrierbare Stoffe (AFS).....	63
4.2.9.	Fazit der Versuchsreihe	73
5.	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	75

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1:	Überblick zu den beteiligten Kooperationspartnern im F&E-Projekt	1
Tab. 2-1:	Hersteller, Spezifikation und Preise handelsüblicher Trübungsmesssonden (Auswahl)	5
Tab. 3-1:	Bestrahlungsintervalle und Dauern der Testeinheiten beim Dauerversuch der WHOrga.....	11
Tab. 3-2:	Bestrahlungsintervalle und Dauern der Testmuster mit UV-Licht.....	14
Tab. 3-3:	Mikroskopische Befunde an den Testrohen und den Küvetten nach 4 Wochen Versuchsdauer.....	23
Tab. 3-4:	Ergebnisse der chemischen Wasseranalytik	27
Tab. 3-5:	Zeitpunkte und Intervalle der Vergleichsmessungen.....	32
Tab. 4-1:	Verwendete Substrate für den Vorversuch	45
Tab. 4-2:	Überblick zu den Untersuchungen und den dabei verwendeten Substraten	50
Tab. 4-3:	Elimination von ungültigen Einzelwerten und Ersatz der Mittel- durch Einzelwerte	65
Tab. 4-4:	Anzahl und Herkunft der analytisch bestimmten Werte als Regressionsgrundlage	66
Tab. 4-5:	Durchlichtspannungen U_{DL} zur Identifikation unterer ($AFS_{min} = 0,3 \text{ g/l}$) und oberer ($AFS_{max} = 3,0 \text{ g/l}$) Grenzen in Bezug auf den Schlammabtrieb bei Ansatz unterschiedlicher Regressionsmodelle.....	70
Tab. 4-6:	Empfehlungen für geeignete Regressionsansätze in Abhängigkeit vom beabsichtigten Anwendungsbereich	73

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Prinzip der Ablaufüberwachung mittels Trübungsmesssonde und Informationsfluss der signalisierten Störung	4
Abb. 2-2:	Entwicklungsansatz für die Trübungsmesssonde	6
Abb. 2-3:	Überblick zu den Versuchsreihen	7
Abb. 3-1:	Testmuster der WHOrga zur Untersuchung der präventiven Wirkung von UV-Strahlen auf das Biofouling	9
Abb. 3-2:	Aufbau des Dauerversuchs der WHOrga	10
Abb. 3-3:	Visuelle Dokumentation der Testmuster aus Testreihe 4 und Testreihe 5	11
Abb. 3-4:	Modifiziertes Testmuster für die Untersuchungen der BUW mit Abwasser	13
Abb. 3-5:	Einbausituation der Versuchsstrecke im Ablaufe SBR-Anlage auf dem Versuchsfeld der MfPA in Mellingen	14
Abb. 3-6:	Einbausituation der Testmuster im Abwasserbehälter vor der Inbetriebnahme und im Betrieb	15
Abb. 3-7:	Erwartungswerte bzgl. unterschiedlicher Verschmutzungsgrade	16
Abb. 3-8:	Starkes Algenwachstum und Befall mit Fliegenlarven	17
Abb. 3-9:	Zuckmückenlarven beim Abweiden von Algen	17
Abb. 3-10:	Larve eine Zuckmücke unter dem Mikroskop	18
Abb. 3-11:	Belagbildung an den Testmustern nach 1 Woche Anlagenbetrieb	19
Abb. 3-12:	Belagbildung an den Testmustern nach 3 Wochen Anlagenbetrieb	19
Abb. 3-13:	Belagbildung an den Küvetten nach 1 Woche Anlagenbetrieb	20
Abb. 3-14:	Belagbildung an den Testmustern nach 4 Wochen Anlagenbetrieb	20
Abb. 3-15:	Horizontale Zonen bei der Belagbildung infolge des Versuchsbetriebs	21
Abb. 3-16:	Prinzip zur Vermessung der Küvetten mit einem Spektrometer zur unspezifische Überwachung anorganischer und/oder organischer Ablagerungen	24
Abb. 3-17:	Prinzip der Vor- und Rückwärtsvermessung der Küvetten	25
Abb. 3-18:	Vermessung der Küvetten mit einem UV/VIS-Spektrometer	26
Abb. 3-19:	Funktionsprinzip der Trübungsmesssonden TurbiSens und ihre Anordnung im Versuchsreaktor	29

Abb. 3-20:	Versuchsaufbau zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Trübungswerte	30
Abb. 3-21:	Ort und Menge der Bodenschlammentnahme sowie Art und Menge der Substratzugabe	32
Abb. 3-22:	Vorgehen bei der Vergleichsmessung gegen Luft und in klarem Wasser	33
Abb. 3-23:	Verschmutzung des Reaktors und der UVC-Lampe am 23.11.2009.....	34
Abb. 3-24:	Umbau der Trennwand als Konsequenz auf die Schwimmschlamm Bildung in der rechten Reaktorkammer von TS2-UV	34
Abb. 3-25:	Erwartete Unterschiede in der Messwertentwicklung bei der Trübungsmesssonde ohne und mit UVC-Bestrahlung	35
Abb. 3-26:	Kurvenverlauf der kontinuierlichen Trübungsmessung zur Identifikation der Trübungszunahme und Ereignissen der Betriebsführung	36
Abb. 3-27:	Dokumentierte Verschmutzung der Trübungsmesssonden TS1 und TS2-UV bei den Vergleichsmessungen U01 und U06.....	37
Abb. 3-28:	Einfluss der Vergleichsmessung auf den Messwertverlauf	38
Abb. 3-29:	Einfluss der UVC-Bestrahlung auf den Trübungswert.....	40
Abb. 3-30:	Spektrum des Puritec UVC-Strahlers im Wellenlängenbereich 202 - 858 nm ...	41
Abb. 4-1:	Versuchsaufbau des Vorversuchs	44
Abb. 4-2:	Substratspezifische Trübungswerte und AFS-Konzentrationen	46
Abb. 4-3:	Substratspezifischer Zusammenhang von Trübung und AFS-Gehalt.....	47
Abb. 4-4:	Aufbau und Funktionsweise der D/S-Testmuster	48
Abb. 4-5:	Für die Untersuchungen zum Einsatz kommende Messsonden	49
Abb. 4-6:	Versuchsaufbau bei den Messreihen mit Schlämmen (M01-M09)	51
Abb. 4-7:	Versuchsaufbau mit zwei Testmustern bzw. mit drei Testmustern	52
Abb. 4-8:	Verdünnungsreihen für Schlämme am Beispiel vom ÜSS der KA Ettersburg ...	53
Abb. 4-9:	Verdünnungsreihen für Formazin Standardlösung (M10).....	54
Abb. 4-10:	Durchführung der Messreihe 10 mit Formazinstandard: mit Plastiktüte für IER-Sonde „Turbisens“ und mit Becherglas für die Testmuster.....	55
Abb. 4-11:	Erwartungswerte für die Messsignale bei zunehmendem Feststoffgehalt, respektive abnehmender Verdünnung der Versuchsansätze.....	56
Abb. 4-12:	Gemessene Spannung am Photosensor der Durchlichtmessung und Streulichtmessung bei unterschiedlichen Substraten und deren Verdünnungen.....	57

Abb. 4-13: Messspannungen an den Testmustern bei unterschiedlichen Verdünnungen, respektive AFS-Gehalten am Beispiel der Messreihe M05.....	58
Abb. 4-14: Messkurven der D-Testmuster und der IER-Messsonde im Überblick.....	60
Abb. 4-15: Trübungswert und Durchlichtspannung bei Formazin als Standardsuspension ..	61
Abb. 4-16: Trübungswerte aller Messreihen versus zugehöriger Durchlichtspannung	62
Abb. 4-17: Substratspezifischer Zusammenhang von AFS-Gehalt in der Abwasser- suspension und resultierender Durchlichtspannung am D-Testmuster	63
Abb. 4-18: Substratspezifische Datenpaare und resultierende Regressionsfunktionen bei kollektiver Datenanalyse (Regression über alle Datenpaare).....	67
Abb. 4-19: Beziehung zwischen den substratspezifischen Residuen e_i und der unabhängigen Variable U_{DL} bei Ansatz der unterschiedlichen Regressionsmodellen.....	68
Abb. 4-20: Korrelation von AFS-Konzentration und CSB-Konzentration bei den Versuchsansätzen.....	70
Abb. 4-21: Ergebnis der optimierten Regression im Bereich $0,115 \leq U_{DL} \leq 3,025$ V	72

Abkürzungsverzeichnis

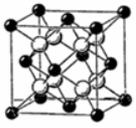
AB-BUW	Abschlussbericht der BUW
AZV	Abwasserzweckverband
BUW	Bauhaus-Universität Weimar (Weimar), Professur Siedlungswasserwirtschaft; Auftragnehmer im F&E-Vorhaben und Autor dieses Berichtes
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt – Osnabrück (Auftraggeber des F&E-Vorhabens)
EW	Einwohnerwert
IPSF	IP Safety First e.K. (Altlussheim-Luxhof); privatwirtschaftlicher Kooperationspartner der BUW im F&E-Vorhaben
KKA	Kleinkläranlage
MfPA	Materialforschungs- und Prüfanstalt Weimar
o.g.	oben genannt
R-KMU	Abschlussbericht der Kooperationspartner IPSF und WHOrga
WHOrga	WHOrga – Consult (Altlussheim-Luxhof); privatwirtschaftlicher Kooperationspartner der BUW im F&E-Vorhaben)
z.T.	zum Teil

1. Einführung

Mit dem vorliegenden Abschlussbericht werden Untersuchungen vorgestellt, die im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen 27072-23 geförderten F&E-Vorhabens „*Entwicklung einer Trübungsmessung für die kontinuierliche Betriebskontrolle vollbiologischer Kleinkläranlagen*“ von der Bauhaus-Universität Weimar (BUW) durchgeführt worden sind.

Das F&E-Vorhaben wurde im Zeitraum 02/2009 bis 08/2010 realisiert und war eine Kooperation zwischen drei Partnern (Tab. 1-1). Die Projektkoordination hatte die Firma *IP Safety First e.K.* (IPSF) inne. Die konstruktive und technologische Entwicklung der Messsonden wurde von *WHOrga – Consult* (WHOrga) geleistet, die außerdem sondierende Langzeitversuche zur Belagbildung auf optischen Gläsern mit Teichwasser durchführte.

Tab. 1-1: Überblick zu den beteiligten Kooperationspartnern im F&E-Projekt

Kooperationspartner	Aufgabe
 <p>IP Safety First e.K. (Altlußheim-Luxhof)</p>	<u>Projektkoordination:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Administration /Abrechnung • Organisation
 <p>WHOrga-Consult (Altlußheim-Luxhof)</p>	<u>Entwicklung, d.h. Konzeption und Konstruktion von:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Testmustern und Prototypen der Messsonden, • kompletter Messketten (inkl. Auslesegerät), • geeignete Einbausituationen.
 <p>Bauhaus-Universität Weimar Professur Siedlungswasserwirtschaft</p>	<u>wissenschaftliche Begleitung der Entwicklung:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Versuche zur Belagbildung an optischen Gläsern infolge Fouling/Scaling in Abwasser • Versuche zur Überprüfung der Messsonden, Messketten und der Einbausituation

Die BUW übernahm die wissenschaftliche Begleitung des Vorhabens. Sie führte Grundlagenversuche zur Entstehung bzw. Vermeidung von Belagbildungen an wassergetauchten Oberflächen durch UVC-Strahlung durch und überprüfte die von WHOrga entwickelten Testmuster und Prototypen sowohl unter Praxis- als auch Laborbedingungen.

Bezüglich der von IPSF und WHOrga geleisteten Arbeiten existiert ein eigenständiger Report (R-KMU), der zusammen mit dem hier vorliegenden Bericht der BUW (AB-BUW) den gemeinsam Sach- und Erkenntnisstand am Ende des F&E-Vorhabens dokumentiert. Beide Dokumente nehmen über entsprechende Querverweise Bezug aufeinander.

2. Veranlassung und Zielsetzung des F&E-Vorhabens

In diesem ersten Kapitel werden Defizite und Lösungsansätze erörtert, die in Zusammenhang mit der Sicherstellung und somit der Überwachung eines ordnungsgemäßen Betriebs der Abwasserbehandlung mittels Kleinkläranlagen stehen. Die geschilderten Zusammenhänge sollen den Forschungs- und Entwicklungsbedarf verdeutlichen, der den Anlass für das durchgeführte Vorhaben gab.

2.1. Defizite bei Wartung und Eigenkontrolle von Kleinkläranlagen und mögliche Lösungsansätze

Vollbiologische Kleinkläranlagen (KKA) müssen über eine **bauartrechtliche Zulassung** verfügen und entsprechend dieser Zulassung **eingebaut** und **betrieben** werden. Es wird davon ausgegangen, dass unter diesen Voraussetzungen die Ablaufgrenzwerte gemäß Abwasserverordnung ($CSB \leq 150$ mg/l, $BSB_5 \leq 40$ mg/l) sicher eingehalten werden und deshalb eine **behördliche Überwachung der Ablaufqualität von KKA entfallen kann** (Einhaltfiktion).

Tatsächlich kommt es aber häufig zu **Überschreitung von Ablaufgrenzwerten**. Dies zeigen zumindest zahlreiche Studien, bei denen Messungen im Ablauf von KKA durchgeführt wurden. Als Ursache kommen Planungs- und Baufehler in Frage, doch ist in den meisten Fällen die **mangelhafte Betriebsweise** der entscheidende Faktor. Die mangelhafte Betriebsweise geht teilweise auf unsachgemäße Nutzung (Zuführung von Stoffen und Mengen, die nicht in der Zulassung genannt sind) zurück. Von größerer Bedeutung sind aber die Defizite bei

- der Prozess- und Funktionskontrolle,
- der Instandhaltung und
- der rechtzeitigen Schlammentsorgung.

Grundsätzlich trägt der **Kläranlagennutzer** (der Eigentümer der KKA) die **Verantwortung** für den **ordnungsgemäßen Betrieb der KKA**, es sei denn, der ortsansässige Aufgabenträger der Abwasserentsorgung (z.B. Abwasserzweckverband) nimmt sich dieser Verpflichtung gewissermaßen rückwirkend wieder an.

Mit sogenannten **Eigenkontrollen** soll der Kläranlagennutzer die Funktionalität seiner KKA „regelmäßig“ sicherstellen. Umfang (zumeist Sichtkontrollen) und Intervalle (täglich bis halbjährlich) der Eigenkontrollen sind in der Zulassung der KKA beschrieben und somit mehr oder weniger verfahrens- bzw. herstellerspezifisch. Aufgrund der fachlichen Inkompetenz der Eigentümer aber auch deren latentem Desinteresse muss jedoch davon ausgegangen werden, dass die Eigenkontrollen **in den meisten Fällen ihre Wirkung verfehlen**.

Zusätzlich zu den Eigenkontrollen durch den Eigentümer sind deshalb regelmäßige **Wartungen** von fachkundigem Personal durchzuführen, wofür spezielle Wartungsverträge mit qualifizierten Firmen abzuschließen sind. Üblicherweise werden ein bis zwei Wartungen im Jahr zu fixen Zeitpunkten durchgeführt, bei denen die Funktionsfähigkeit technischer Aggregate

(z.B. Pumpen, Verteilerbauwerke) und die Ablaufqualität der Kleinkläranlage anhand von Stichproben überprüft werden. Problematisch an diesem Vorgehen ist, dass die Wartung zu festgesetzten Zeiten und somit **nicht bedarfsgerecht** erfolgt. Denn im schlimmsten Fall können bereits unmittelbar nach einer Wartung **Fehlfunktionen an der KKA** auftreten, die dann bis zur nächsten Wartung **unerkannt bleiben** und bis dahin **nicht behoben werden**.

Wie die bisherigen Ausführungen vermuten lassen, kann es trotz bauartrechtlicher Zulassung und regelkonformer Einbauten und Betriebsweisen zu Überschreitungen von Mindestanforderungen bezüglich der Ablaufqualitäten von KKA kommen, was aus Umweltschutzgründen – zumindest aber aus behördlicher Sicht – inakzeptabel ist. Offensichtlich sind die ordnungsrechtlichen Präventionen nicht ausreichend, um den einwandfreien Betrieb einer zugelassenen Kleinkläranlage dauerhaft sicherzustellen.

In dem Bemühen diesem Problem entgegenzuwirken, setzen Behörden und Fachverbände verstärkt auf Maßnahmen, welche die Eigenkontrollen bei und vor allem die Wartung von Kleinkläranlagen verbessern sollen. Weil die Ansätze zur Steigerung der Quantität und Qualität der Eigenkontrolle zwar gut gemeint aber i. d. R. nur kurzfristig von durchschlagendem Erfolg sind, fokussieren die Bemühungen auf eine Optimierung der Wartungsarbeiten. Hierzu zählen vorrangig **organisatorische Maßnahmen**, wie z.B.:

- die zertifizierte Aus- und Weiterbildung von Fachpersonal,
- die Zertifizierung von Wartungsfirmen,
- die Einführung digitaler (typisierter) Wartungsprotokoll für ein einheitliches und systematisches Vorgehen bei den Wartungsarbeiten.

Diese Maßnahmen erhöhen zwar die Qualität der Wartungen. Das Problem der unerkannten Fehlfunktionen der KKA zwischen den Wartungsterminen bleibt indes bestehen. Die Verkürzung der Wartungsintervalle könnte das Problem entschärfen, jedoch nicht vollends lösen. Ohnehin wäre dieser Ansatz mit höheren Kosten verbunden und aufgrund der z.T. langen Anfahrtswege auch aus ökologischer Sicht kritisch zu hinterfragen.

Generell sind der Intensivierung von personalgebundenen Eigenkontrollen und Wartungen zur Sicherstellung eines immerwährenden ordnungsgemäßen Betriebs der KKA aufgrund des damit verbundenen logistischen und arbeitsseitigen Mehraufwands enge Grenzen gesetzt. Hieraus resultiert der Bedarf an kostengünstigen technischen Lösungen zur **kontinuierlichen Prozess- und Funktionskontrolle** also nach **automatisierten, elektronischen Überwachungssystemen für KKA**, welche zuverlässig **kritische Betriebszustände** oder Funktionsstörungen der KKA und somit die Notwendigkeit einer **Inspektion der KKA** signalisieren (bedarforientierte Eigenkontrolle/Wartung).

Prinzipiell steht zwar auf dem Markt eine große Auswahl an ausgereifter Mess-, Überwachungs- und Prozessleittechnik zur Verfügung, doch ist die vorhandene Technologie für Einsätze im größeren Maßstab (industrieller Bereich, kommunale Wasserver- und Abwasserentsorgungsanlagen) konzipiert und mit Preisen, die sich im Bereich der durchschnittlichen Anschaffungskosten konventionellen KKA bewegen, viel zu teuer.

Dies gibt den Anlass für aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die sich mit der Suche nach effizienten Strategien und Verfahren für die kontinuierliche Prozess- und Funktionskontrolle von KKA beschäftigen. Auch das von der DBU geförderte und hier vorgestellte F&E-Vorhaben zur Entwicklung einer Trübungsmesssonde für die kontinuierliche Betriebskontrolle von KKA will seinen Beitrag dazu leisten.

2.2. Zielsetzung und Herangehensweise

Ziel des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Vorhabens war es, eine technische Lösung zur kontinuierlichen Betriebskontrolle von Kleinkläranlagen in Gestalt einer kostengünstigen Trübungsmesssonde zu entwickeln, mit der kritische Betriebszustände bzw. schwerwiegende Betriebsstörung im Ablauf der KKA erkannt werden und die somit die Notwendigkeit einer Prozess- und Funktionskontrolle signalisiert (Identifizierung von Schlammabtrieb, vgl. Abb. 2-1). Ausgangspunkt war die Überlegung, dass ein erhöhter Schlammabtrieb aus der Nachklärung ein sicheres Indiz für eine ernstzunehmende Funktionsstörung der KKA ist, die mit der Trübungsmessung prinzipiell identifiziert werden kann. In Abgrenzung zu anderen bzw. gegensätzlichen Entwicklungen ging es ausdrücklich nicht darum, die Trübungsmessung unter Ausnutzung der CSB/Trübungskorrelation als Instrument zur Überwachung von Grenzwerten von Kleinkläranlagenabläufen zu nutzen.

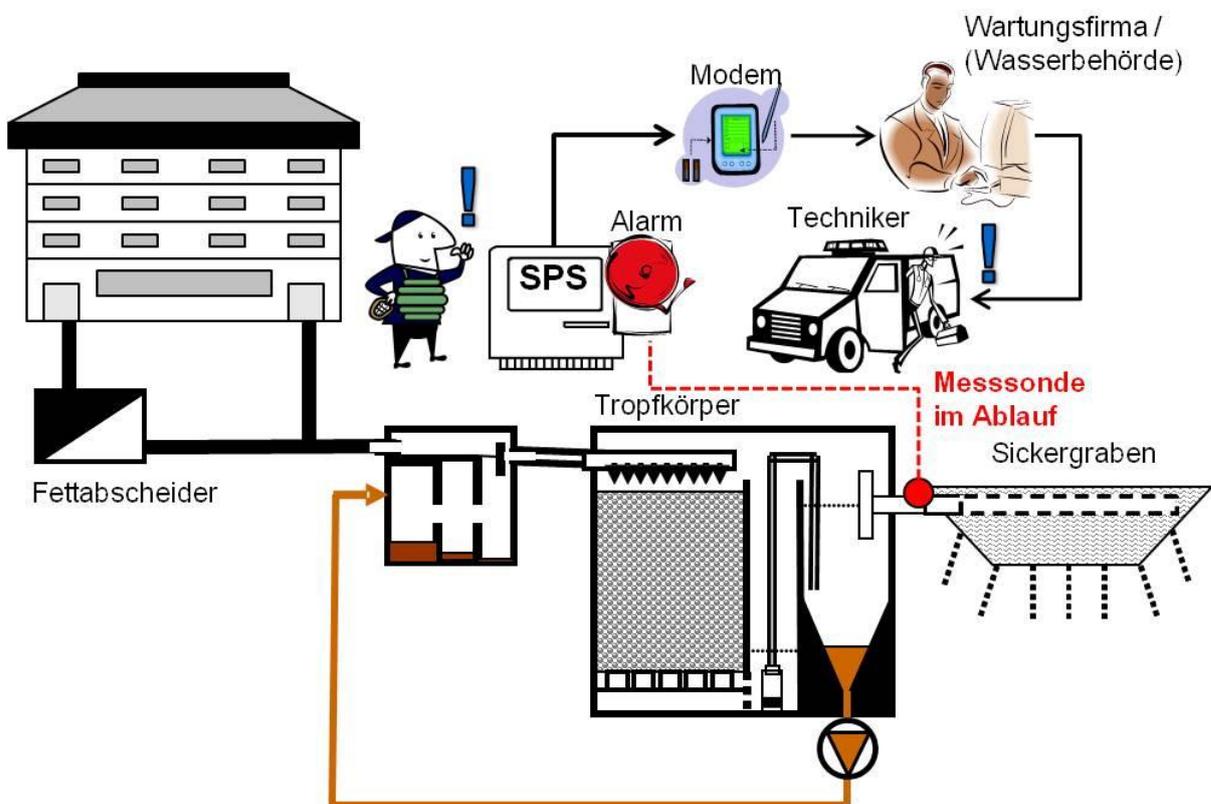


Abb. 2-1: Prinzip der Ablaufüberwachung mittels Trübungsmesssonde und Informationsfluss der signalisierten Störung am Beispiel einer Tropfkörper-KKA

Die Abschätzung des Schwebstoffrückhalts/Schlammabtriebs im Ablauf von Kläranlagen ist geradezu ein typisches Einsatzgebiet der Trübungsmessung. Allerdings sind die auf dem Markt verfügbare Trübungssonden aufgrund ihres hohen Preises sowie Kalibrier- und Wartungsaufwandes für den Einsatz in KKA ungeeignet (Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Hersteller, Spezifikation und Preise handelsüblicher Trübungsmesssonden (Auswahl)

Hersteller & Modell	Spezifikation			Preis [€]
	Messprinzip	Messbereich [FNU]	automatische Reinigung	
Endress + Hauser <i>TrubiMax CUS 41</i>	90°Streulichtmessung	0 bis 9999	Wischer	4140,-
BAMO IER GmbH <i>TurbiSens</i>	komb. Durchlicht- und 90°Streulichtmessung	0 bis 2000	-	2500,-
HACH LANGE GmbH <i>Solitax t-line</i>	komb. Durchlicht- und 90°Streulichtmessung	0 bis 4000	Wischer	3735,-
WTW GmbH <i>VisoTub</i>	90°Streulichtmessung	0 bis 4000	Ultraschall	3610,-

Der hohe Anschaffungspreis der auf dem Markt verfügbaren Trübungsmesssonden resultiert vor allem aus den hohen Ansprüchen an die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messgrößen. Daran ist die Notwendigkeit gebunden, den Einfluss von Störgrößen auf die Messung zu eliminieren bzw. weitestgehend zu minimieren. Von großer Bedeutung ist, die Verschmutzungen der Messsonden infolge Belagbildung (Biofouling, Scaling) so klein wie möglich zu halten, da die Sauberkeit der lichtdurchlässigen Wandungen grundlegende Voraussetzung für das Messverfahren ist¹.

Zwar kann die schleichende Verschmutzung der Tauchsonden in einem bestimmten Bereich automatisch ausgeglichen, d.h. rechnerisch kompensiert werden. Früher oder später wird es aber erforderlich, die Messsonden von anhaftendem Schmutz bzw. biologischem Bewuchs zu befreien. Um den Wartungsaufwand in Grenzen zu halten, verfügen die meisten Trübungsmesssonden über herstellerspezifische Selbstreinigungssysteme (Wischer, Ultraschall usw.), welche entscheidend zur Preisgestaltung der Geräte beiträgt (vgl. Tab. 2-1).

Konsequenterweise ging die Entwicklung einer kostengünstigen Alternative von folgenden Ansätzen aus:

¹ Bezgl. der Grundlagen von Trübungsmessung und Biofouling sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen. Eine zusammenfassende Darstellung wird auch im Antrag zum Forschungsprojekt gegeben.

- Robuste Technik mit ausreichender Empfindlichkeit sollte hochempfindlicher und präziser Technik vorgezogen werden. Von Interesse war nicht ein reproduzierbarer und standardisierter Messwert, sondern lediglich die Ausgabe einer binären Größe, sobald Schlammabtrieb stattfindet.
- Die zunehmende Verschmutzung der Messsonden infolge Belagbildung sollte einerseits mittels UVC-Bestrahlung verhindert und andererseits rechnerisch eliminiert werden. Die Bestrahlung der optischen Gläser mit handelsüblichen UVC-Strahlern stellte dabei ein Novum dar.

In Abb. 2-2 ist der Entwicklungsansatz der Trübungsmesssonde skizziert. Demnach kombiniert die Trübungsmesssonde die 90°Streulicht- und Durchlichtmessung mittels zweier Infrarotstrahler und einem Photosensor. Die Strahler und der Photosensor befinden sich auf einer gemeinsamen Leiterplatte im Messkopf, was die Herstellungskosten minimieren soll. Die Strahlen der Sender werden über Spiegel durch die Messzelle zum Sensor geleitet. Die Messzelle selbst wird von einer UVC-Lampe bestrahlt, wodurch die Belagbildung an den optischen Gläsern der Messzelle verhindert - zumindest aber gehemmt - werden soll.

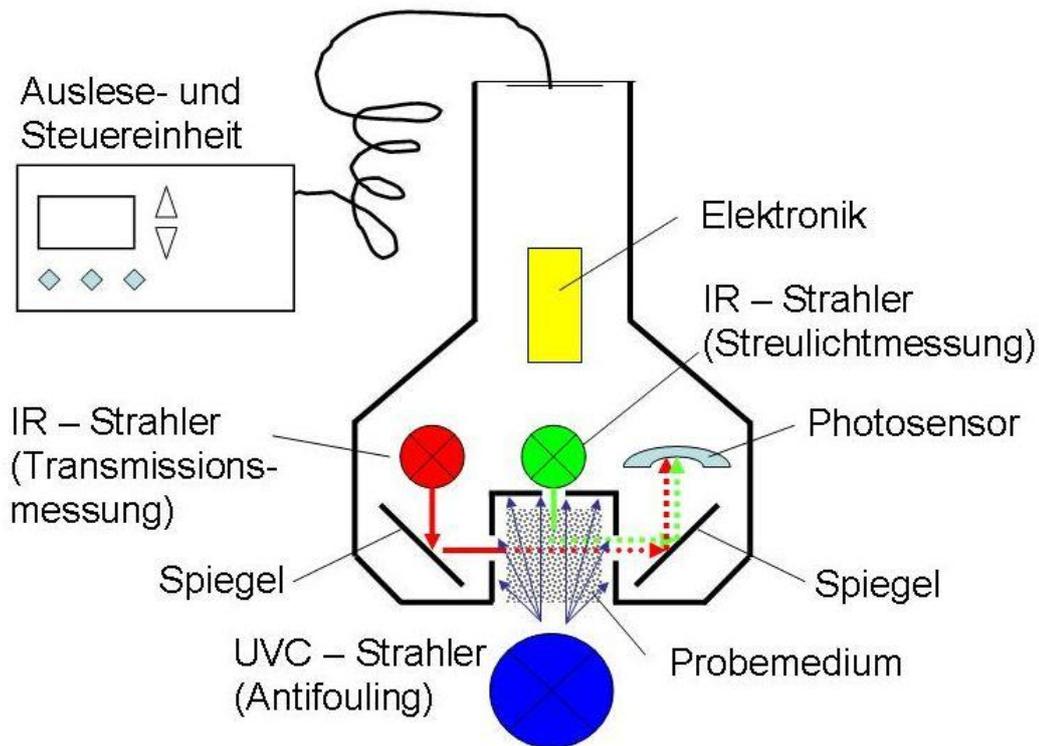


Abb. 2-2: Entwicklungsansatz für die Trübungsmesssonde

Oberstes Entwicklungsziel war ein Kaufpreis von maximal 600 € (max. 10% der Investitionskosten einer KKA), wobei sich die größten Einsparpotentiale bei der Produktion ergeben sollten. Einzelheiten zu den Entwicklungszielen und den verfolgten Lösungsansätzen sind im Bericht der Kooperationspartner nachzulesen, weswegen an dieser Stelle darauf verzichtet werden soll (vgl. Abschnitte 1 & 3 im R-KMU).

2.3. Überblick zu den Versuchen und Messreihen

Die im Rahmen des F&E – Vorhabens von der BUW durchgeführten Versuche lassen sich zwei Themenbereichen zuordnen, und zwar:

1. Untersuchungen zur Unterdrückung von Belagbildung bzw. deren Vermeidung durch UVC-Licht,
2. Überprüfung der entwickelten Prototypen für eine Trübungsmesssonde.

Abb. 2-3 gibt einen Überblick zu den einzelnen Versuchsreihen und deren Zuordnung in die beiden Themenbereiche. Die Zahlen rechts sind Querverweise auf die nachfolgenden Abschnitte, in denen die Versuchsreihen vorgestellt und diskutiert werden.

1. Untersuchungen zur Unterdrückung von Belagbildung an optischen Gläsern durch Bestrahlung mit UVC-Licht	
1.1. Vorversuche der WHOrga mit Badeteichwasser	3.1
1.2. Dauerversuch der WHOrga mit Badeteichwasser	3.2
1.3. Feldversuch der BUW mit Abwasser	3.3
1.4. Laborversuch der BUW mit Abwasser und handelsüblicher Trübungsmesssonde IER TurbiSens	3.3
2. Überprüfung der D/S-Testmuster als Erstentwicklung für eine Trübungsmesssonde	
2.1. Vorversuche mit handelsüblicher Trübungsmesssonde	4.1
2.2. Hauptversuche mit den Testmustern	4.2

Abb. 2-3: Überblick zu den Versuchsreihen

Ausgehend von der Überlegung, die Belagbildung auf den optischen Gläsern der Trübungsmesssonde durch die Bestrahlung mit UVC-Licht unterbinden zu können, wurden insgesamt vier Versuchsreihen durchgeführt, um das Potential dieser Verfahrensweise aufzuzeigen. Anhand verschiedener Screenings, an denen sich sowohl die WHOrga als auch die BUW beteiligten, sollte zunächst mit Testmustern unter Praxisbedingungen die grundsätzliche Eignung gezeigt und erste Aussagen in Bezug auf die notwendige Bestrahlungsdosis bzw. -dauer getroffen werden. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse bzw. die dabei aufgeworfenen neuen Fragestellungen gaben den Anlass für Laborversuche der BUW, bei denen handelsübliche Trübungsmesssonden der Firma IER (Modell *TurbiSens*) sowie ein handelsüblicher UVC-Strahler der Firma Radium (Modell *Puritec*) zum Einsatz kamen. Die Trübungsmesssonden

TurbiSens fand auch bei den Vor- und Hauptversuchen im zweiten Themenbereich Verwendung, welcher die eigentliche Entwicklung der Trübungsmessung zum Ziel hatte. In den Vorversuchen sollte die Bandbreite möglicher Abwasserzusammensetzungen und deren Einfluss auf den Messwert der Trübung nachvollzogen werden, um den erforderliche Messbereich zu einguzgrenzen. Parallel dazu entwickelte WHOrga einen Prototyp für die Trübungsmesssonde, der dann in den Hauptversuchen im Vergleich zur Trübungsmesssonde *TurbiSens* getestet wurde. Ursprünglich war geplant, den Prototypen anschließend einem Dauertest unter Praxisbedingungen zu unterziehen und eine Optimierung des gesamten Messsystems (Trübungsmesssonde inkl. Auswertgerät) durchzuführen. Aufgrund zeitlicher Verzögerungen bei der Prototypentwicklung konnte dies von der BUW aber nicht geleistet werden.

3. Untersuchungen zur Unterdrückung von Belagbildung an optischen Gläsern durch Bestrahlung mit UV-Licht

Nachfolgend sollen sowohl die Feldversuche als auch die Laborversuche der BUW im Themenbereich vorgestellt werden, wobei zunächst auch die Untersuchungen der WHOrga Erwähnung finden, wie sie im Abschnitt 3 des R-KMU ausführlich beschrieben sind. Wesentlicher Unterschied in den von WHOrga und BUW betreuten Versuchen war das verwendete Medium: während WHOrga mit Badeteichwasser testete, bediente sich die BUW gereinigten Abwassers.

3.1. Vor- und Dauerversuch der WHOrga mit Badeteichwasser

Von der WHOrga wurden seit Ende März 2009 zwei Vorversuche und ein Dauerversuch mit Teichwasser (privater Badeteich) durchgeführt:

1. Vorversuche mit dem Ziel, die Belagbildung auf einem handelsüblichen UV-Strahler zu beobachten und geeignete Testmuster für Dauerversuche zu entwickeln (vgl. Kap. 3.1 und 3.2 im R-KMU)
2. Dauerversuch mit dem Ziel, die Wirkung unterschiedlicher Strahlungsdosis auf die Belagbildung an den Testmustern zu überprüfen (vgl. Kap. 3.3 im R-KMU)

Für den *ersten Vorversuch* (vgl. Kap. 3.1 im R-KMU) wurde eine handelsübliche UV-Lampe „Puritec UVC“ (Fa. Radium, Typ UVC-LPC 9 CCG, 7 Watt) in einen 12 Liter PE Behälter eingebaut, der über eine Pumpe mit Teichwasser (ca. 3,5 l/min) kontinuierlich beaufschlagt und durchströmt wurde. Die UV-Lampe war permanent eingeschaltet, und es sollte herausgefunden werden, ob sich auf der Lampe Biofilm bildet. Als Referenzmuster wurde ein Glasrohr in 500 mm Tiefe in den Badeteich (Gesamttiefe 900 mm) gehängt. In Abständen von 4 Wochen wurde das Fouling auf der UV-Lampe und des Referenzmusters visuell überprüft. Dabei war ein deutlich unterschiedlicher Bewuchs festzustellen (vgl. Foto 1,2 und 3 auf S. 3 f. im R-KMU).

Weil sich sowohl auf dem Referenzglas als auch an der Innenseite des PE-Behälters massiver Biofilm ausbildete - jedoch nicht im Nahfeld der UV-Lampe - wurde geschlussfolgert, dass die UV-Strahlung einen hemmenden Einfluss auf die Belagbildung hat. In der Konsequenz wurde die Idee weiterverfolgt, die optischen Gläser der Trübungsmesssonde durch Bestrahlung mit UV-Licht vor Fouling zu schützen

Im *zweiten Vorversuch* sollte dann an eigens konstruierten Testmustern die Verstärkung des Bestrahlungseffekts bei zunehmender Bestrahlungsdosis herausgefunden werden. Im Gegensatz zum ersten Vorversuch kam dabei anstelle der Puritec-Lampe eine 5 Watt Hg-Niederdrucklampe als UVC-Strahlungsquelle zum Einsatz, die wasserdicht in einem Rohr aus Borosilikatglas eingelassen war. Weil jedoch Borosilikatglas eine Barriere für UVC-Strahlen darstellt, verlief der Test negativ, d.h. es konnte Fouling an der Außenwand des Borosilikatglasrohr festgestellt werden. Aufgrund dieser Erkenntnis entstand die Idee, unterschiedliche Materialien für die Fenster der Trübungsmessung (Messkopf) einerseits und der UVC-Strahlungsquelle andererseits einzusetzen (vgl. Kap. 3.2 im R-KMU).

Für den Messkopf standen nach wie vor Borosilikatglas aber auch transparente Kunststoffe zur Auswahl, für die UVC-Strahlungsquelle wurde hingegen Quarzglas obligatorisch. Hieraus resultierte die Konstruktion der Testmuster, wie sie beim Dauerversuch der WHOrga und in modifizierter Form beim Versuch der BUW zum Einsatz kamen. Der simple Aufbau der Testmuster geht aus nachstehen der Abb. 3-1 hervor.

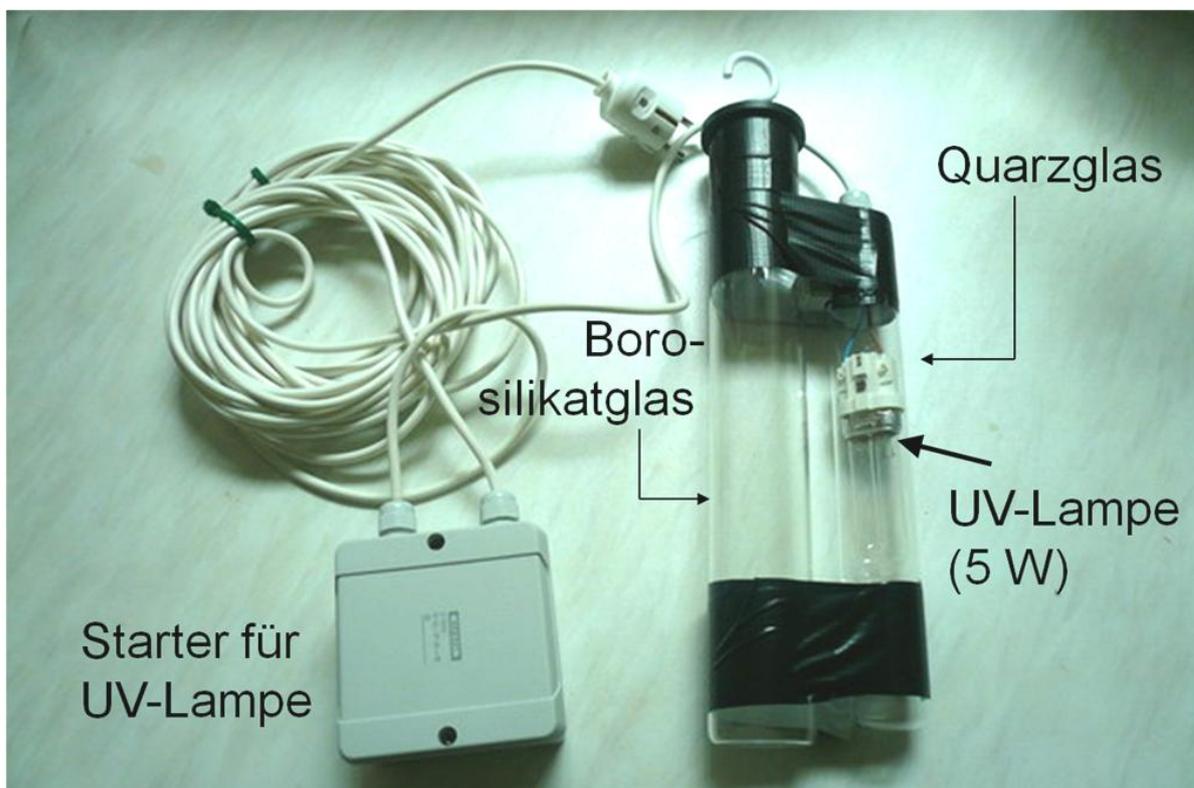


Abb. 3-1: Testmuster der WHOrga zur Untersuchung der präventiven Wirkung von UV-Strahlen auf das Biofouling

Wie in Abb. 3-1 ganz rechts zu sehen ist, befindet sich die Hg-Niederdrucklampe in einem Quarzglasrohr (im Folgenden kurz als *Strahler* bezeichnet). Demgegenüber ist ein Glasrohr aus Borosilikatglas (im Folgenden kurz als *Testrohr* bezeichnet) angeordnet, das gewissermaßen den späteren Trübungsmesskopf simulieren und als Aufwuchsfläche für den Biofilm dienen sollte. Der Abstand zwischen Strahler und Testrohr betrug 18 mm.

Im *Dauerversuch* der WHOrga sollte nun nachgewiesen werden, dass auch mit einer kostengünstigen 5 Watt Hg-Niederdrucklampe das Fouling am bestrahlten Testrohr gehemmt bzw. verhindert werden kann. Außerdem sollte herausgefunden werden, welche Schaltzyklen der UVC-Lampe den besten Kompromiss ermöglichen, um einerseits das Fouling auf dem Testrohr effektiv zu verhindern (Strahler möglichst lange an) und andererseits die Lebensdauer der UVC-Lampe zu erhöhen (Strahler möglichst lange aus).

Zu diesem Zweck wurden 20 Testmuster in 12 L –PE-Kanister gehangen, die ihrerseits wiederum parallel mit Teichwasser (ca. 0,08 l/ min) beaufschlagt und durchflossen wurden. Jeweils 4 Testmuster wurden als funktionale Testeinheit (insgesamt 5 Testeinheiten) zusammengefasst, die dann den gleichen Bestrahlungsdauern bzw. Intervallen ausgesetzt waren (Tab. 3-1). Der Versuchsaufbau geht aus nachstehender Abb. 3-2 hervor (vgl. hierzu auch Foto 5, S. 6 im R-KMU). Der Zulauf wurde von einer Tauchwasserpumpe aus dem Teich gepumpt und über Schläuche auf die Testeinheiten und die PE-Kanister verteilt. Die Regulierung bzw. Drosselung des Zuflusses pro Testeinheit erfolgte manuell per Kugelhahn.



Abb. 3-2: Aufbau des Dauerversuchs der WHOrga

Der Dauertest wurde im Juni 2009 erstmals in Betrieb genommen und in zwei Phasen bis ans Ende der Projektlaufzeit im August 2010 geführt. Wie aus Tab. 3-1 hervorgeht, waren die Bestrahlungsintervalle und deren Dauer je Testeinheit in den Phasen unterschiedlich. Die Umstellung wurde aufgrund der laufenden Beobachtung vorgenommen. Generell erfolgte die Begutachtung der Testmuster (visuelle Kontrolle) einmal wöchentlich.

Tab. 3-1: Bestrahlungsintervalle und Dauern der Testeinheiten beim Dauerversuch der WHOrga

Testeinheit	1. Phase: 06/09-07/09		2. Phase: 07/09 – 08/10	
	Intervalle	Dauer [h/d]	Intervalle	Dauer [h/d]
1	1x30min	0,5	Aus	0
2	2x30min	1,0	2x120min	0,5
3	3x30min	1,5	3x120min	6
4	4x30min	2,0	4x120min	14
5	Dauerbetrieb	24	Dauerbetrieb	24

Bereits nach 4 Wochen Laufzeit endete die erste Phase, denn es stellte sich heraus, dass die meisten Einschaltzeiten zu kurz gewählt waren. Lediglich bei Einschaltdauern von mehr als 2h pro Tag (Testeinheiten 4 und 5) konnte ein signifikanter Einfluss der UVC-Bestrahlung beobachtet werden. Allerdings traf diese Feststellung nur für die dem Strahler zugewandten Flächen der Testrohre zu, d.h. auf der direkt bestrahlten Seite war der Belag entweder nur ganz schwach (Testeinheit 4) oder gar nicht (Testeinheit 5) ausgebildet. Die Tatsache jedoch, dass an den „Schattenseiten“ der Testrohre das Gegenteil eingetroffen war (stärkerer Bewuchs auf Testmuster 5), gaben jedoch Anlass zur Diskussion (siehe Abb. 3-3).

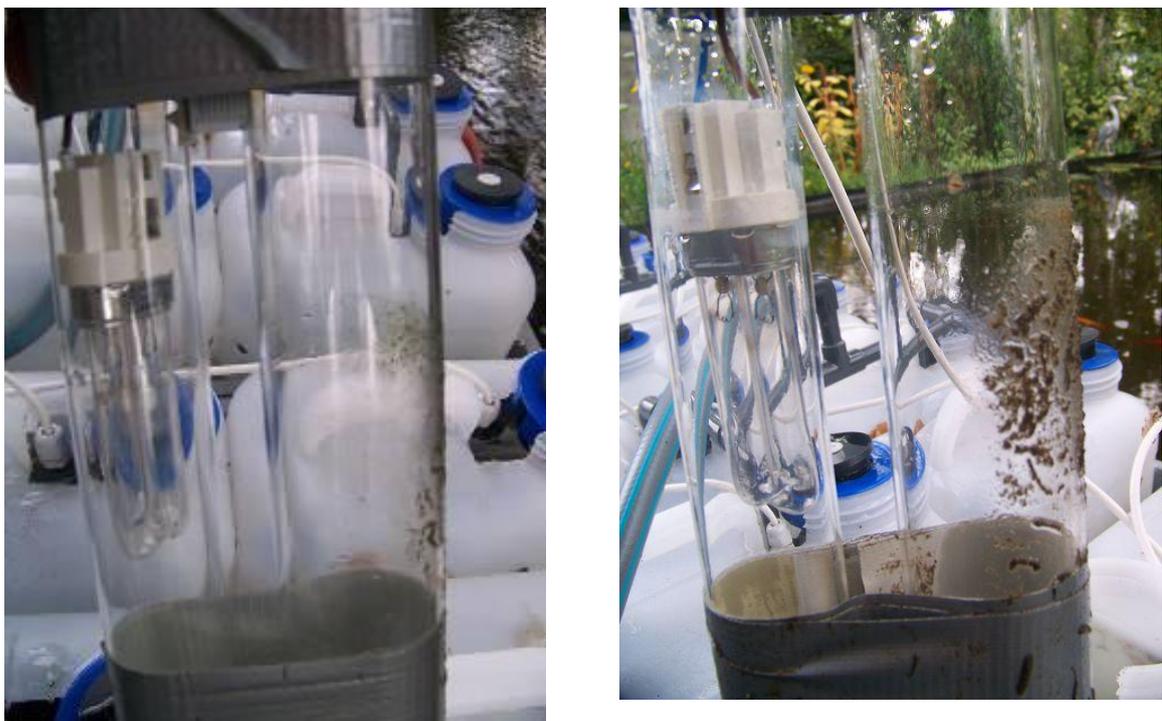


Abb. 3-3: Visuelle Dokumentation der Testmuster aus Testreihe 4 (links) und Testreihe 5 (rechts)

Als ursächlich für die Unstimmigkeiten wurden Mängel bei der Versuchsanordnung (ungleiche Wasserverteilung verursachte unterschiedlich starke hydraulische Belastungen der PET-Kanister und damit unterschiedlich starke Scherbeanspruchung der Biofilme an den Testmustern) aber auch beim Fotografieren gefunden werden. Nach Überprüfung aller Testmuster jeder Testreihe konnte das o.g. Ergebnis letztlich bestätigt werden. Konsequenterweise wurden in der zweiten Phase die Einschaltdauern von 2 h bis 24 h näher untersucht.

Vor Beginn der zweiten Phase wurden alle Testmuster gründlich gereinigt und das Wasserverteilungssystem optimiert (Einbau von Kugelhähnen). Im Gegensatz zur ersten Phase wurden außerdem die Testmuster der Testeinheit 1 fortan als Referenz eingesetzt, d.h. die UVC-Bestrahlung blieb bei dieser Testeinheit ausgeschaltet. Die zweite Phase bestätigte zunächst die Ergebnisse der ersten Phase, dass:

1. die Belagbildung auf den Oberflächen der Testrohre durch die Bestrahlung mit UVC-Licht gehemmt wird, da nur an den Testmustern der Testeinheit 1 starker Belag festzustellen war (vgl. Foto 9 und 10 auf S. 10 f. im R-KMU) und
2. die größere Bestrahlungsdauer einen größeren Effekt (stärkere Hemmung der Belagbildung) nach sich zieht.

Allerdings gingen die Unterschiede bei den bestrahlten Testmustern (Testreihen 2 bis 5) mit fortschreitender Versuchsdauer (wöchentliche visuelle Kontrolle) immer weiter zurück, was als Indiz für eine generell sinkende UVC-Strahlungsleistung (nachlassende Leuchtkraft der UVC-Lampe aufgrund Alterung) gedeutet wurde. Demnach konnte durch eine Erhöhung der Einschaltzeiten auf mehr als 2 mal 120 Minuten täglich (Testreihe 2) auf Dauer kein zusätzlicher Effekt erreicht werden. In der Konsequenz wurde deshalb die optimale Bestrahlungsdauer mit 2 mal 120 min pro Tag festgelegt. Mit diesen Intervallen wurden sodann die Laborversuche der BUW zur Überprüfung der Wirksamkeit von UVC-Strahlung auf die Belagbildung an handelsüblichen Trübungsmesssonden durchgeführt (siehe Abschnitt 3.3).

3.2. *Feldversuch der BUW im Ablauf einer SBR-KKA*

Parallel zum Dauerversuch der WHOrga mit Badeteichwasser wurden die Testmuster von der BUW einem Screeningtest mit Abwasser unterzogen. Zweck der Untersuchungen war es, die bis zum Versuchsbeginn vorliegenden Erkenntnisgewinne (Ergebnisse der WHOrga) zu bestätigen und bestehende Wissenslücken zu schließen.

Primäres Ziel der Untersuchungen war es deshalb, die präventive Wirkung von UVC-Strahlung auf das Fouling (Belagbildung) zu bestätigen und ergänzend den Effekt von unterschiedlichen Bestrahlungsintervallen bei gleicher Dosis auf das Ergebnis zu untersuchen. Sekundäres Ziel war es, einfache Methoden zur objektiven Quantifizierung des Foulings als Alternative zum Fotografieren zu finden, weil diesbezüglich Schwierigkeiten beim Dauerversuch der WHOrga offensichtlich wurden.

Um die gesetzten Ziele erreichen zu können, vor allem aber, um die Testmuster den härteren Einsatzbedingungen (Abwasser anstatt Badeteichwasser) anzupassen, wurden die von WHOrga gelieferten Testmuster (vgl. Abb. 3-1, S. 9) im Vorfeld der Untersuchungen folgendermaßen modifiziert:

1. Ertüchtigung der Verbindung von Strahler (Quarzglas) und Testrohr (Borosilikatglas) durch Rohrschellen anstatt Klebeband + Abstandhalter
2. Anbringen einer verschlossenen Quarzglasküvette gegenüber des Testrohrs im gleichen Abstand zum Strahler ($a=40$ mm)

Die Ertüchtigung der Verbindungselemente wurde für notwendig erachtet, um einerseits die Dauerhaftigkeit der bestehenden Verbindung im Abwasser sicherzustellen (ansonsten Zersetzung des Klebebandes) und andererseits, um das Testrohr für weitergehende Untersuchungsmethoden vom Strahler lösen zu können, z.B. für die Betrachtung unter einem Mikroskop. Die zusätzliche Küvette wurde angebracht, weil aufgrund der planen Flächen von einem deutlich besseren Handling bei der Mikroskopie auszugehen war. Außerdem wurde die Möglichkeit eines Vergleichs zwischen den Biofilmen auf dem Testrohr (Borosilikatglas) und der Küvette (Quarzglas) eröffnet. Schließlich sollte mit den Küvetten untersucht werden, inwieweit sich der Biofilmbewuchs mit einem Photometer quantitativ nachweisen lässt.

3.2.1. Versuchsaufbau und Durchführung

Der Aufbau des modifizierten Testmuster ist in Abb. 3-4 dargestellt. Im Gegensatz zum originären Testmuster der WHOrga (vgl. Abb. 3-1, S. 9) wurde der Abstand zwischen Strahler und Testrohr größer gewählt ($a=40$ mm anstatt 18 mm). Außerdem wurde das gesamte Testmuster beschwert, um Auftriebskräften entgegenzuwirken.

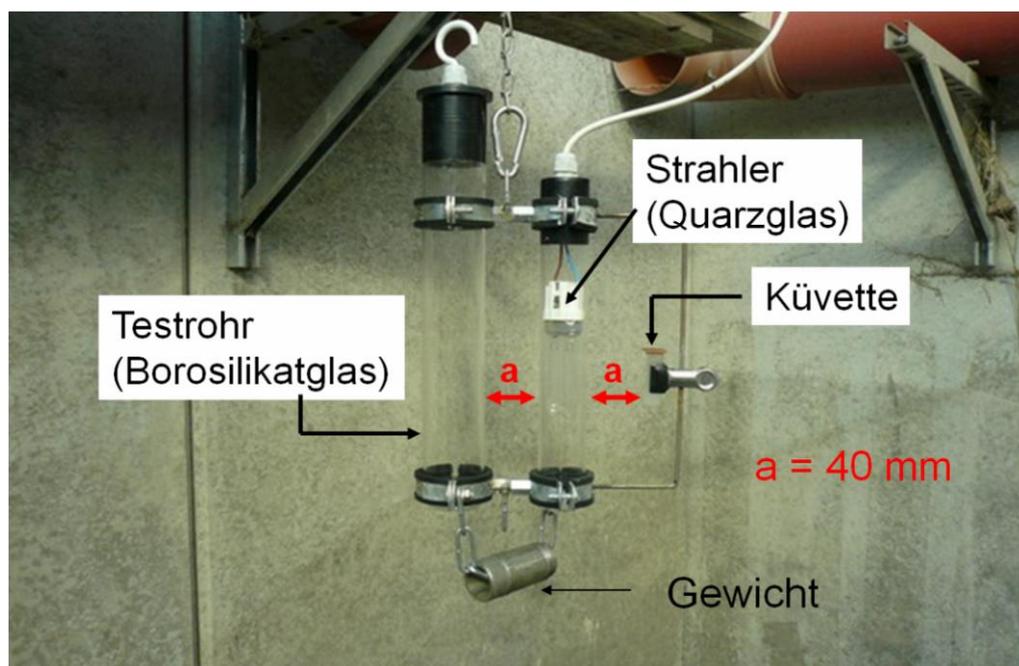


Abb. 3-4: Modifiziertes Testmuster für die Untersuchungen der BUW mit Abwasser

Die Untersuchungen wurden vom 09.07. 2009 bis 30.07.2009 unter Praxisbedingungen auf dem Versuchsfeld der Materialforschungs- und Prüfanstalt Weimar (MfPA) in Mellingen durchgeführt. Die Testmuster wurden in einen Behälter gehängt, der im Ablauf eine SBR-Anlage angeordnet wurde (Abb. 3-5). Die Zuführung des Abwassers erfolgte dabei seitlich am Behälterboden und der Überlauf auf der gegenüberliegenden Seite im oberen Drittel der Behälterhöhe, d.h. der Behälter wurde vorrangig aufwärts durchströmt (vgl. hierzu auch Abb. 3-6). Der Behälteroberseite war mit einer Wellplatte aus transparentem Kunststoff abgedeckt, um einerseits den Luftzutritt (zur Vermeidung von Faulungsprozessen) zu ermöglichen und andererseits den Zutritt von Niederschlagwasser zu verhindern.

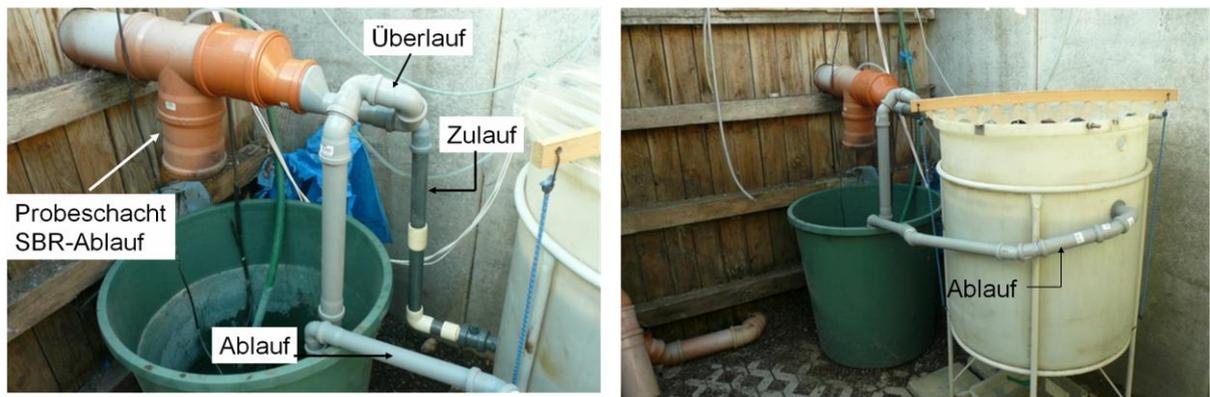


Abb. 3-5: Einbausituation der Versuchsstrecke im Ablauf einer SBR-Anlage auf dem Versuchsfeld der MfPA in Mellingen

Insgesamt standen 3 Testmuster zur Verfügung, deren Strahler (5 Watt Hg-Niederdrucklampe) täglich für 30 min aber jeweils in unterschiedlichen Intervallen eingeschaltet worden. Somit war die tägliche Strahlendosis für alle Testmuster gleich (Tab. 3-2). Zusätzlich zu den 3 Testmustern wurde mit einer Glasküvette ohne Strahler ein „Referenzmuster“ (Testmuster 0) in den Abwasserbehälter eingesetzt.

Tab. 3-2: Bestrahlungsintervalle und Dauern der Testmuster mit UV-Licht

Testmuster	Intervalle	Dauer [h/d]
0 (Referenzküvette)	-	-
1	1 x 30 min	0,5
2	6 x 5 min	0,5
3	15 x 2 min	0,5

Die räumliche Trennung der Test- und Referenzmuster und somit die Abschirmung der Strahler gegeneinander war durch eine Edelstahlkonstruktion (verschränkte Bleche) gegeben, welche von oben in den Behälter eingehängt wurde. In Verbindung mit dem zentrischen Abwasserzufluss am Behälterboden gewährleistete dieser Versuchsaufbau, dass alle Test- bzw. Referenzmuster den gleichen Umweltbedingungen ausgesetzt waren (Abb. 3-6).

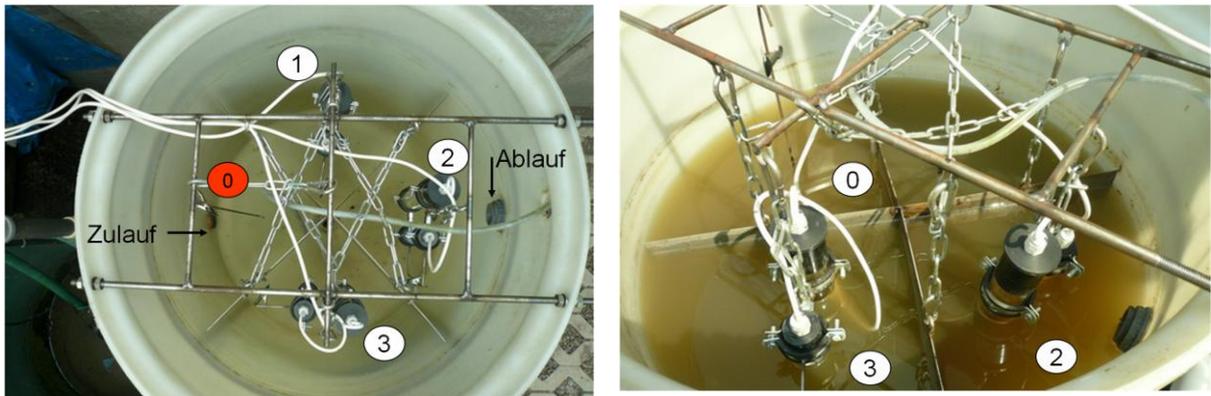


Abb. 3-6: *Einbausituation der Testmuster im Abwasserbehälter vor der Inbetriebnahme (links) und im Betrieb (rechts, ohne Testmuster 1)*

Die Funktionsweise der Anlage wurde zweimal wöchentlich (Montag und Donnerstag) anhand eines standardisierten Wartungsprotokolls überprüft. Neben Dichtheitskontrollen und Lampentests wurde auch Bodenschlamm aus dem Behälter abgelassen. Jeden Donnerstags, d.h. einmal wöchentlich, wurden die Testmuster sowie das Referenzmuster ausgebaut, um sie im Labor näher zu untersuchen. Für den Transport wurden sie in eine verschließbare, von innen befeuchtete Tonne gehangen, um das Austrocknen der Beläge an den Testrohren und den Küvetten zu verhindern. Im Labor wurden die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

1. visuelle Dokumentation der Testrohre & Küvetten,
 - 1.1. Fotografie
 - 1.2. Mikroskopie mit Auflichtmikroskop,
2. UV-/VIS Spektroskopie der Küvetten

Letztere Methode (2.) war der Versuch, die Belagbildung mit einfachen Mitteln zu quantifizieren. Die Methode ist nicht standardisiert und bedurfte einer generellen Eignungsprüfung. Sie wird im Abschnitt 3.2.5 (S. 24 ff.) besprochen.

3.2.2. Erwartungswerte, Abbruchkriterien und -ereignisse

Generell wurde davon ausgegangen, dass die Belagbildungen an den Testmustern deutlicher ausfallen würden, als dies bei den Versuchen der WHOrga der Fall gewesen war. Denn zum einen konnte durch die Verwendung von Abwasser anstatt Badeteichwasser aufgrund des größeren Substratangebotes von einem höheren Besiedlungspotential ausgegangen werden. Zum anderen war zu erwarten, dass aufgrund:

- kürzerer Einschaltzeiten der Strahler (30 min /d) ,
- größerer Abstandsweiten zwischen Strahler und Testrohr/Küvette ($a=40$ mm) und
- höherer UVC-Adsorption im Medium selbst (Transmissionsverluste im Abwasser)

eine wesentlich geringere UVC-Strahlendosis auf die Testrohre und Küvetten einwirken würde, wodurch auch das Fouling auf deren Oberfläche weit weniger behindert wäre.

Ausgehend von den Erkenntnissen aus den Vorversuchen der WHOrga sowie publizierten Erfahrungen bezüglich der Biofilmbildung an abwassergetauchten Messsonden wurde davon ausgegangen, dass sich innerhalb weniger Tage ein Biofilm an den Testrohren und Küvetten bilden würde. Die Versuche sollten aber mindestens 3 Wochen durchgeführt und darüber hinaus verlängert werden, sofern verwertbare Ergebnisse in Aussicht stehen.

Bezüglich der verschiedenen Belagbildungen an den Testrohren bzw. Küvetten infolge UVC-Bestrahlung mit unterschiedlichen Einschaltintervallen wurde erwartet, dass (1) die Referenzküvette (ohne UVC-Bestrahlung) die vergleichsweise stärkste Verschmutzung aufweisen würde und (2) die Unterschiede bei den bestrahlten Testrohren/Küvetten – sofern sie überhaupt auftreten - mit zunehmender Betriebszeit abnehmen (Abb. 3-7). Voraussetzung für beide Thesen war aber, dass die UVC-Bestrahlung nachweislich Wirkung zeigt.

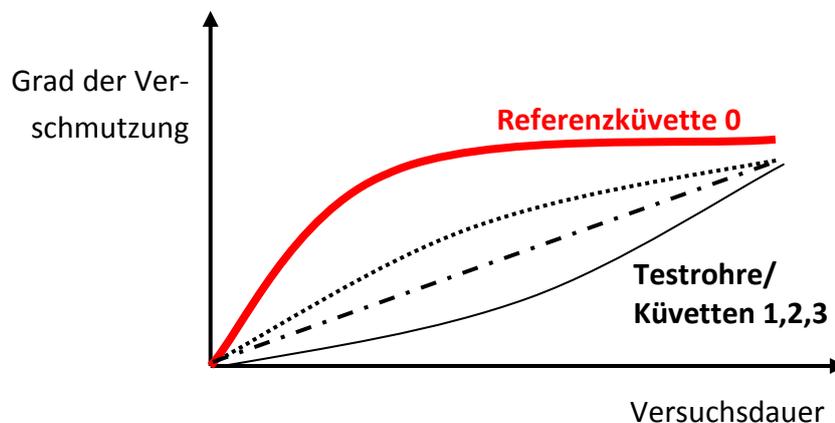


Abb. 3-7: Erwartungswerte bzgl. unterschiedlicher Verschmutzungsgrade

Die Abbruchkriterien für die Versuche stellte zum einen die Antithese dar, dass die UVC-Bestrahlung keine – zumindest aber keine nachweisbare- Wirkung hat. Für diesen Fall hätte die Strahlungs-dosis erhöht werden sollen. Zum anderen wurden unkontrollierbare Randbedingungen auf den Versuchsbetrieb als Abbruchkriterien gesehen. Tatsächlich gab die Kombination aus beiden Abbruchkriterien den Anlass, den Versuch am 30.07.2009 zu beenden.

Abb. 3-8 zeigt den Versuchsstand vom 28.07.2009. Deutlich werden zum einen der Algentep-pich auf der Wasseroberfläche und zum anderen der Befall mit Mückenlarven, wie er am Mü-ckengelege an der Behälterinnenseite unten links im Bild zu erkennen ist. Der Algentep-pich stellt ein schwerwiegendes Hindernis dar, weil die Testmuster zu Kontrollzwecken aus dem Behältern entnommen werden mussten. Zwar war ein vorheriges Abschöpfen bzw. Absieben der Algen möglich, doch konnte trotzdem nicht ausgeschlossen, dass bei der Herausnahme der Testmuster an ihnen Algen haften bleiben und somit das Ergebnis verfälschen würden.



Abb. 3-8: *Starkes Algenwachstum und Befall mit Fliegenlarven am 28.07.2009 (Versuchstag 19) geben den Anlass zum Abbruch der Versuchsreihe*



Abb. 3-9: *Zuckmückenlarven beim Abweiden von Algen*



Abb. 3-10: *Larve eine Zuckmücke unter dem Mikroskop*

Der massenhafte Befall mit Mückenlarven stellte deshalb ein Problem dar, weil sie sich von Mikroorganismen ernährten und somit den Biofilm abweideten (vgl. Abb. 3-9). Ungestörte Verhältnisse, wie sie zur Untersuchung der Belagbildung an den Testrohren und Küvetten erforderlich gewesen wären, lagen somit nicht mehr vor.

Aufgrund des massenhaften Algenwachstums und des Larvenbefalls wurde der Feldversuch nach vier Wochen am 30.07.2009 schließlich abgebrochen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die bis dahin gewonnen Untersuchungsergebnisse vorgestellt und diskutiert.

3.2.3. *Visuelle Dokumentation der Muster und der Küvetten*

Die nachstehenden Fotos zeigen die Testmuster nach einer Woche Betrieb (Abb. 3-11) und nach vier Wochen Betrieb (Abb. 3-12), wobei letzterer Zeitpunkt das Ende der Versuchsreihe markiert. Im Vergleich der beiden Bilder ist zwar eine Zunahme der Belagbildung und somit der Einfluss der längeren Betriebszeit auf allen Testmustern zu erkennen. Allerdings war die Belagbildung auch nach vier Wochen Betriebszeit sehr gering und blieb weit hinter den Erwartungen zurück. Aus diesem Grund sind auch die Unterschiede zwischen den Testmustern, d.h. der Einfluss unterschiedlicher Einschaltintervalle auf die Belagbildung, anhand der Fotos nicht erkennbar bzw. sind große Räume für Spekulationen vorhanden.



Abb. 3-11: *Belagbildung an den Testmustern nach 1 Woche Anlagenbetrieb (Datum 16.07.2009)*



Abb. 3-12: *Belagbildung an den Testmustern nach 3 Wochen Anlagenbetrieb (Datum 30.07.2009)*

Auch auf den Küvetten hatte sich kaum Belag gebildet, wenngleich - in Analogie zu der Beobachtung an den Testrohren - die Verschmutzung über die Versuchszeit etwas zugenommen

hatte (Abb. 3-13 und Abb. 3-14). Der Einfluss unterschiedlicher Einschaltintervalle auf die Belagbildung ist somit auch anhand der Küvettenfotos nicht erkennbar. Allerdings lässt die Tatsache, dass die Referenzküvette (Küvette 0, keine Bestrahlung) im Vergleich zu allen anderen Küvetten stärker verschmutzt war, auf die Wirkung des UVC-Strahlers schließen.

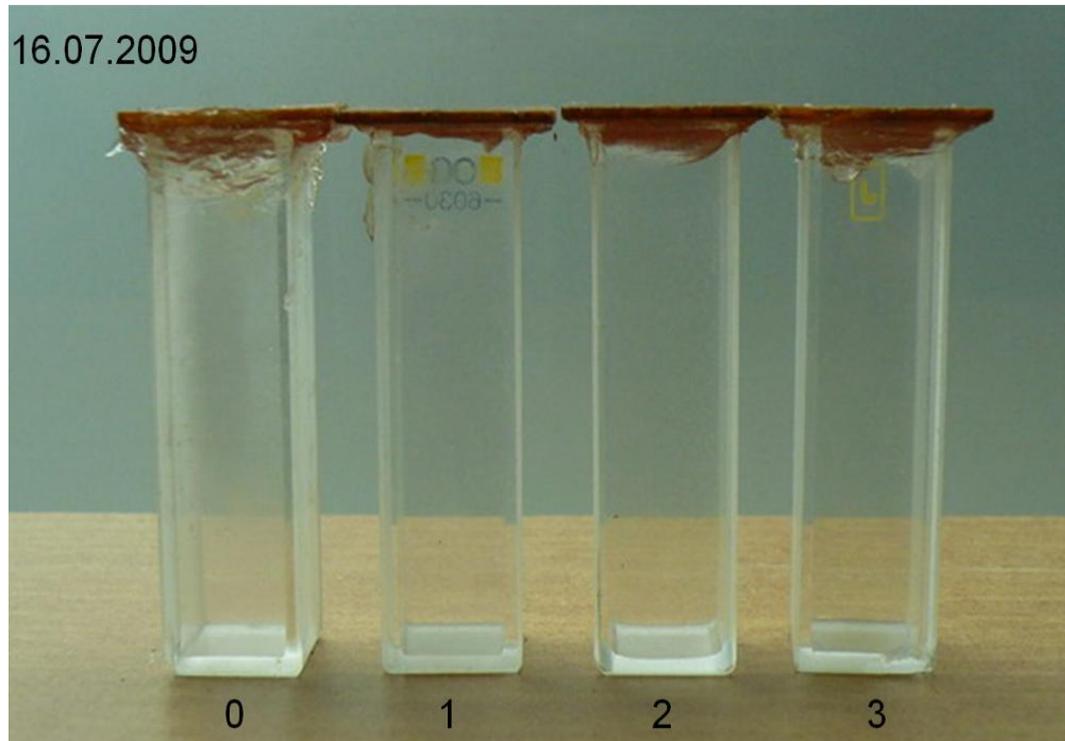


Abb. 3-13: *Belagbildung an den Küvetten nach 1 Woche Anlagenbetrieb (Datum 16.07.2009)*

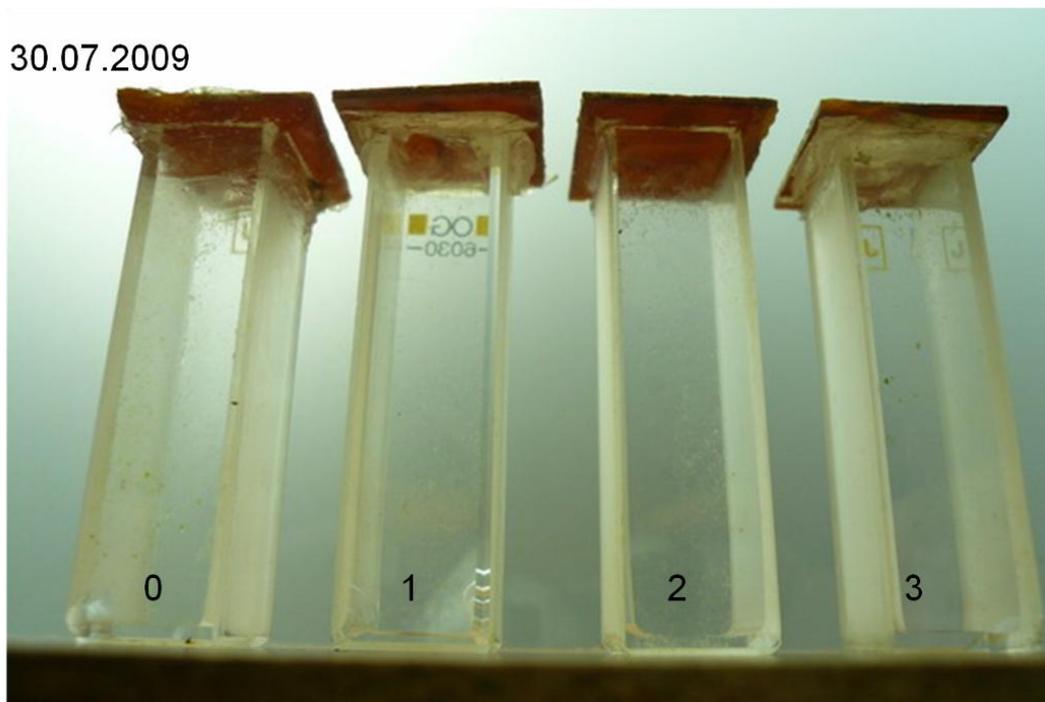
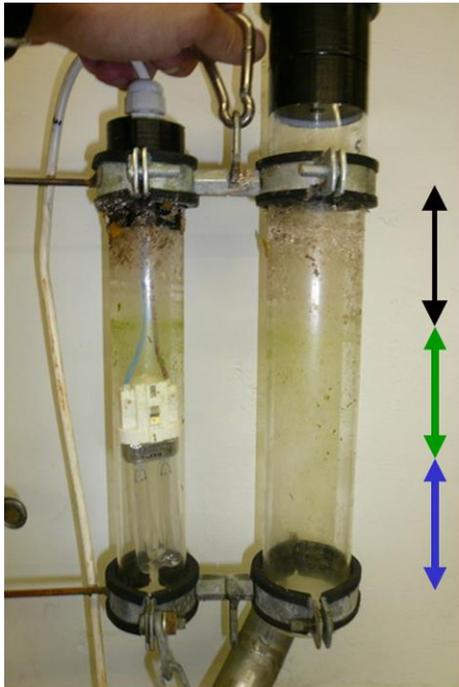


Abb. 3-14: *Belagbildung an den Testmustern nach 4 Wochen Anlagenbetrieb (Datum 30.07.2009)*

Im Vergleich von Testmuster (Abb. 3-11 und Abb. 3-12) und Küvetten (Abb. 3-13 und Abb. 3-14) werden zudem qualitative Unterschiede in der Belagbildung offensichtlich. Denn im Gegensatz zu den Küvetten ist an den Testmustern grüner Algenbewuchs zu erkennen. Zudem fällt die horizontale Verschiedenheit der anhaftenden Beläge auf, d.h. die Art des Foulings variierte offensichtlich mit der Eintauchtiefe. Dieses Detail ist für das Testmuster 3 in Abb. 3-15 dargestellt, und die Unterteilung des Belags in drei Zonen wird vorgenommen.



Obere Zone: org./anorg. Ablagerungen
→ Zone des schwankenden WSP

Mittlere Zone:
deutlicher Algenbewuchs
→ Zone des natürlichen Lichteinfalls,
kaum Beeinflussung durch UV-Lampe

Untere Zone: weniger Algen
→ Strahlungszone UV-Licht

Abb. 3-15: Horizontale Zonen bei der Belagbildung infolge des Versuchsbetriebs

Am geringsten ist die Belagbildung in der untersten Zone und somit im nahen Strahlungsbe-
reich der UVC-Lampe. Dies lässt zunächst auf eine präventive Wirkung der UVC-Strahlung
hinsichtlich der Belagbildung schließen. Allerdings sind keinerlei Unterschiede an der Vor-
der- und Rückseite² des Testrohrs festzustellen, weswegen der Effekt letztlich auch nicht auf
die UVC-Strahlung zurückgehen kann. Insofern muss auch die o. g. Vermutung angezweifelt
werden, dass die vergleichsweise stärkere Belagbildung auf der Referenzküvette, ein Resultat
fehlender UVC-Bestrahlung ist.

Die mittlere Zone markiert den Bereich mit Algenbewuchs, der infolge des natürlichen Licht-
einfalls (transparente Kunststoffabdeckung des Behälters) möglich war. Die Algen wuchsen
auf beiden Gläsern (Testrohr und Strahler), wobei die Besiedlung mit der zunehmender Ein-
tauchtiefe abnahm (natürliches Licht als limitierender Wachstumsfaktor). In der oberen Zone
lagerten sich hingegen Schwimmschlammteilchen und mineralische Produkte an, was ganz
offensichtlich ein Resultat schwankender Wasserstände im Behälter und somit der regelmäßi-
gen Schlammabnahme war.

² Vorderseite: dem Strahler zugewandte Mantelfläche des Testrohrs; Rückseite = „Schattenseite“

Anhand der fotografischen Dokumentation kann somit weder die zu erwartende Biofilmbildung noch ein präventiver Einfluss der UVC-Strahlung darauf gezeigt werden. Es wird aber deutlich, wie wichtig eine geeignete Einbausituation für die spätere Messsonde ist bzw. welche Anforderungen an den Einbauort zu stellen sind. Besonders kritisch scheinen hierbei Wechselbedingungen infolge temporären Eintauchens zu sein, weil dann an den Oberflächen organische und mineralische Partikel antrocknen, die nur schwer abzulösen sind. Einerseits darf die Messsonde also nicht trocken fallen, andererseits darf sie aber auch nicht permanent in Schlamm eintauchen, da dies einen gleichbleibend hohen Trübungswert liefern würde und somit Störfälle infolge Schlammabtrieb nicht mehr zu identifizieren wären.

3.2.4. *Mikroskopie der Testrohre und der Küvetten*

In Ergänzung zur visuellen Dokumentation mit einem Fotoapparat wurden die Testrohre und die Küvetten unter einem Auflichtmikroskop bei 50-facher Vergrößerung betrachtet und fotografiert. Im Hinblick der unterschiedlichen Verschmutzungsgrade lieferten die mikroskopischen Untersuchungen ähnlich wie die Befunde durch Fotografieren mehrdeutige Ergebnisse, d.h. die Wirkung der UVC-Strahlung im allgemeinen sowie der Einfluss verschiedener Einschaltintervalle ließ sich nicht zweifelsfrei beurteilen.

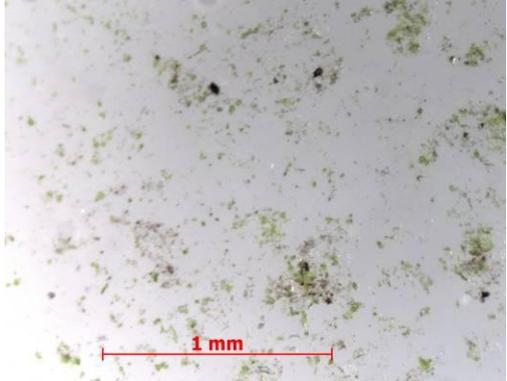
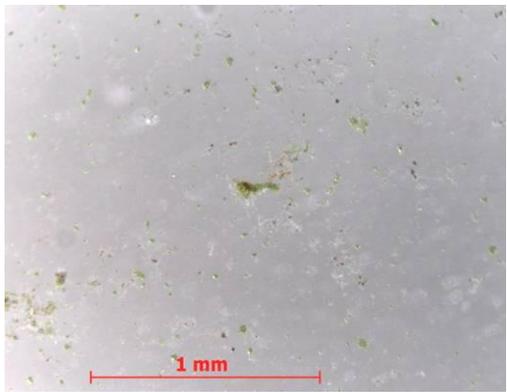
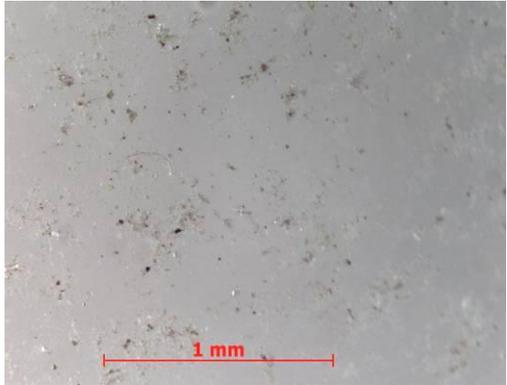
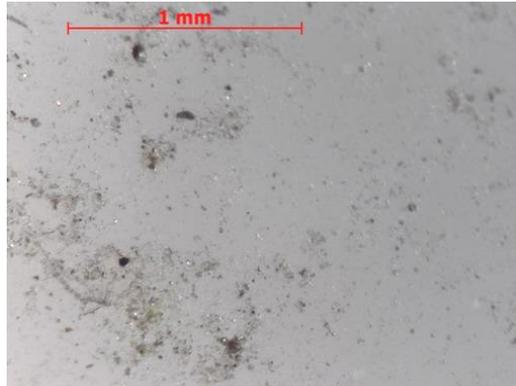
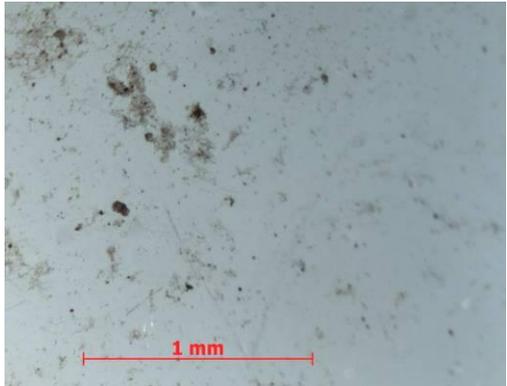
Gewissheit brachte die Mikroskopie aber dahingehend, dass sich auf allen Flächen nur geringer Biofilm gebildet hatte.

In Tab. 3-3 (S. 23) sind Aufnahmen von den Testrohren (links) und Küvetten (rechts) nach jeweils vier Wochen Betriebszeit zusammengestellt. Auf allen Fotos ist lediglich partieller Bewuchs bzw. Belag zu erkennen. Obschon somit die Unterschiede zwischen den Bildern marginal sind, fällt der vergleichsweise dichte Bewuchs mit Algen auf der Referenzküvette auf (Bild oben rechts in Tab. 3-3). Die Erwartung, dass sich der biologische Rasen auf der nicht bestrahlten Küvette am stärksten ausbreiten würde, wird somit bestätigt.

Besonderer Erwähnung bedarf die Tatsache, dass die Bilder in Tab. 3-3 nur kleine Ausschnitte von etwa 4 – 5 mm² zeigen und somit nicht repräsentativ für die gesamte Fläche der untersuchten Objekte sind. Dies trifft insbesondere für die Testrohre zu, deren Belag über die Eintauchtiefe, respektive die Objekthöhe, offensichtlich sehr unterschiedlich ausgeprägt war (vgl. Abb. 3-15, S. 21). Demgegenüber erschien der Belag auf den Küvetten wesentlich homogener, was zum einen auf ihre geringe Größe, zum anderen aber auf ihre fixe Einbaulage (nur im Strahlungsbereich) zurückzuführen war. Allerdings waren die zu beobachtenden Merkmalsunterschiede auf ein und derselben Küvette mindestens genauso stark ausgeprägt, wie dies ein Vergleich mit einer anderen Küvette ergeben hätte. Insofern konnte auch anhand Mikroskopie kein Hinweis dafür gefunden werden, dass die verschiedenen Bestrahlungsdauern einen Einfluss auf die Belagbildung haben.

Insgesamt erwies sich die Mikroskopie zur Beurteilung der Belagentwicklung auf den Testrohren und den Küvetten als wenig hilfreich. Die Ursache hierfür ist weniger in der Methode der Mikroskopie an sich, sondern vielmehr in der Tatsache zu suchen, dass generell nur sehr geringes Biofilmwachstum auftrat.

Tab. 3-3: Mikroskopische Befunde an den Testrohren (links) und den Küvetten (rechts) nach 4 Wochen Versuchsdauer (Aufnahmen in 50-facher Vergrößerung vom 30.07.2009)

Nr.	Testrohre	Küvetten
0	Für die Testrohre lag kein Referenzmuster (Nullmuster) vor.	
1		
2		
3		

3.2.5. Ergänzende Untersuchungen zur Quantifizierung der Belagbildung

Ergänzend zur visuellen Dokumentation der Küvetten durch Photographie und Mikroskopie wurde versucht, unter Verwendung eines UV/VIS-Spektrometers auf die Entwicklung der Belagbildung auf den Küvetten zu schließen. Ausgangspunkt für dieses Vorgehen war die Überlegung, mit möglichst einfachen, d.h. kostengünstigen Mitteln eine unspezifische Überwachung anorganischer und/oder organischer Ablagerungen vorzunehmen und somit den Trend der Belagbildung zumindest halb-quantitativ erfassen zu können.

Für die Untersuchungen wurde ein Spektrometer der Firm Perkin Elmer (Modell *Lambda2*) gewissermaßen zweckentfremdet, indem die leeren Küvetten (ohne Probeninhalt) über den gesamten Wellenlängenbereich (200 – 900 nm) bei einer Auflösung von 0,1 nm vermessen wurden. Die Idee dabei war, dass allein durch den Biofilm an der Außenseite der Küvette ein Transmissionsverlust auftreten würde, der dann mit zunehmender Biofilmstärke immer höher ausfällt. Demnach sollte der Transmissionsgrad³ $T = I/I_0$ mit der Versuchsdauer erwartungsgemäß zurückgehen. In Abb. 3-16 ist das Prinzip der Methode dargestellt.

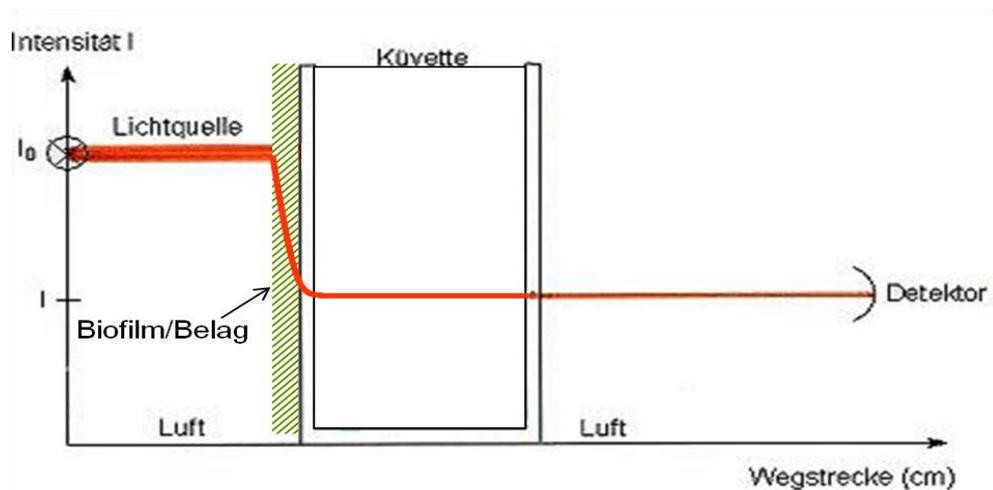


Abb. 3-16: Prinzip zur Vermessung der Küvetten mit einem Spektrometer zur unspezifische Überwachung anorganischer und/oder organischer Ablagerungen

Zu Beginn der Versuchsreihe, d.h. vor dem Einbau der Testmuster in den Ablauf der SBR-KKA auf dem Versuchsfeld Mellingen, wurden alle Küvetten (0,1,2, und 3) vermessen. Die hierbei festgestellten Transmissionsgrade waren für den gesamten Wellenlängenbereich nahezu identisch und auch typisch für die verwendeten Quarzglasküvetten (vgl. hierzu die gestrichelten Linien in Abb. 3-18, S. 26).

³ Der Transmissionsgrad T ist definiert als der Quotient zwischen der Wellenintensität I_0 ohne Küvette (vor dem Hindernis) und der Intensität I mit Küvette (nach dem Hindernis). Der Transmissionsgrad ist somit ein Maß für „durchgelassene“ Intensität der Strahlung und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an.

Während des Versuchsbetriebs wurden die Küvetten dann einmal wöchentlich (donnerstags) vermessen, wobei nacheinander folgende drei Methoden zur Anwendung kamen (Abb. 3-17):

1. Vorwärtsmessung sofort nach Eingang im Labor,
2. Rückwärtsmessung unmittelbar nach Vorwärtsmessung ($\Delta t \sim 1$ h),
3. Wiederholung der Vorwärtsmessung nach 2h Trocknung.

Das schrittweise Vorgehen wurde gewählt, da noch keine Erfahrungen mit dem Messprinzip vorlagen. Es musste demnach empirisch herausgefunden werden, welche Methode geeignet ist. Bei der Vorwärtsmessung zeigte der Biofilm zur Lichtquelle (Strahler), bei der Rückwärtsmessung zum Detector (Empfänger). Die Wiederholung der Vorwärtsmessung sollte den Einfluss des Wassergehaltes auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zeigen. Vor jeder Messung wurden die Küvetten mit einem Papiertuch gründlich gereinigt, jedoch nur an denjenigen drei Seiten, die nicht dem Strahler am Testmuster zugewandt waren.

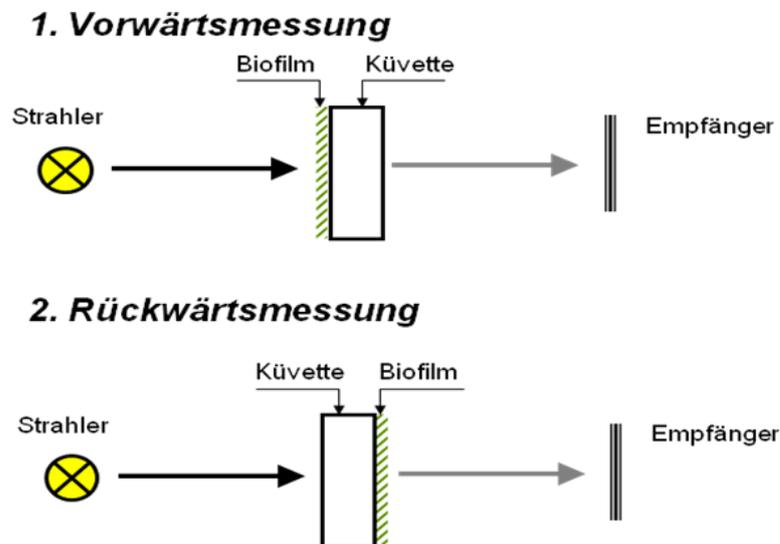


Abb. 3-17: Prinzip der Vor- und Rückwärtsvermessung der Küvetten

Ohne die Befunde der drei verschiedenen Methoden detailliert vorstellen zu müssen kann gesagt werden, dass die Unterschiede bezüglich der ermittelten Transmissionsgrade von Methode zu Methode überraschend gering ausfielen. Die Ursache dafür ist zwar weitestgehend unbekannt, doch dürfte der Umstand entscheidend gewesen sein, dass sich auf allen Küvetten nur sehr wenig Biofilm gebildet hatte und somit weder die Richtung der Vermessung (vor- oder rückwärts gerichtet) noch die Trocknungszeit einen maßgebenden Einfluss ausüben konnten. Praktisch scheiterte die Evaluation der Methode(n), weil eine systematische Auswertung der Ergebnisse aufgrund der dürftigen Datenlage - insbesondere für den Bereich stärkerer Belagbildungen - nicht möglich war.

Dass die Vermessung der Küvetten mit einem UV/VIS-Spektrometer durchaus Potential zur Erkennung des Biofilmwachstums besitzt, wird anhand von Abb. 3-18, S. 26 deutlich. Hier werden die Ergebnisse der ersten Vorwärtsmessung (Methode 1) für alle Küvetten nach 21 Tagen Versuchsdauer im Vergleich zur Referenzmessung (vor Versuchsbeginn) gezeigt.

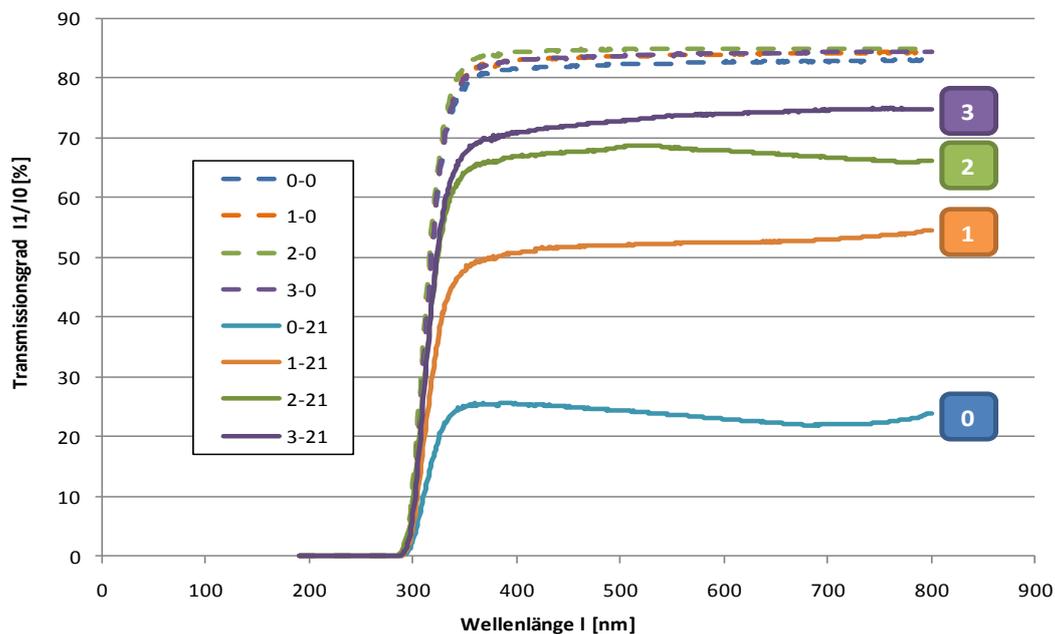


Abb. 3-18: Vermessung der Küvetten mit einem UV/VIS-Spektrometer (Änderung der Transmissionsgrade infolge Belagbildung)

An den gestrichelten Linien in Abb. 3-18 ist zunächst die gleichmäßige Transmission aller Küvetten ($k=0;1;2$ und 3) im ungebrauchten Zustand (Referenzzustand $k=0$) zu erkennen. Demnach betrug der Transmissionsgrad aller Küvetten vor Versuchsbeginn im Wellenlängenbereich von $380-800$ nm etwa 85% , was dem Qualitätsstandard dieser Quarzglasküvetten entspricht. Die durchgezogenen Linien geben das Resultat der Vermessung vom 30.07.2009 und somit nach 21 Tagen Versuchzeit wieder (Gebrauchszustand $k=21$). Erkennbar war der Transmissionsgrad für alle Küvetten zurückgegangen, wobei die stärksten Verluste bei der unbestrahlten Küvette (Referenzmuster; Küvette 0) und die geringsten Verluste bei Küvette 3 auftraten.

Damit wird anhand der Vermessung zunächst die Beobachtung der visuellen Dokumentation bestätigt, dass die Referenzküvette (Küvette 0, keine Bestrahlung) im Vergleich zu allen anderen Küvetten am stärksten verschmutzt war. Darüber hinaus ist aber auch ein Ranking der Küvetten 1 bis 3 und somit der Einfluss unterschiedlicher Einschalt Dauern möglich. Offensichtlich sind viele, kurze Einschaltvorgänge (15×2 min für Küvette 3) besser geeignet als lange Intervalle (1×30 min für Küvette 1), um das Biofilmwachstum zu behindern. Allerdings steht dies im Widerspruch zu einer möglichst langen Lebensdauer der UVC-Strahler, die durch häufiges An- und Ausschalten verkürzt werden würde.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Vermessung der Küvetten mit einem UV/VIS-Spektrometer eine interessante Möglichkeit zur metrischen Quantifizierung der Biofilmentwicklung darstellen könnte, die jedoch einer Weiterentwicklung bedarf.

3.2.6. *Fazit der Feldversuche*

Die Ergebnisse des Feldversuchs der BUW betrachtend muss festgestellt werden, dass mit der gewählten Versuchsanordnung der Nachweis, ob und inwieweit die Bestrahlung mit künstlichem UVC-Licht einen Einfluss auf das Fouling hat, nicht zweifelsfrei zu erbringen war. Als Kernproblem stellte sich dabei die generell geringe Belagbildung auf allen Testrohren bzw. Küvetten heraus. In diesem Punkt kommen die von BUW und WHOrga zeitgleich geführten Versuche mit ähnlichen Fragestellungen und Versuchsaufbauten zu unterschiedlichen Ergebnissen. Als mögliche Ursachen für den geringen Biofilmbelag bei den Versuchen der BUW kommen prinzipiell in Frage:

- generell schlechtere Aufwuchsbedingungen (Substratmangel, ungeeignete Oberfläche der Aufwuchsträger, zu kurze und damit unzureichende Versuchsdauer),
- Verluste an Biofilm durch hydraulische Stoßbelastungen (z.B. bei Entnahme der Testmuster) oder stoffliche Stoßbelastungen (z.B. toxische Spülstöße),
- Verluste an Biofilm durch Weidegänger (z.B. Mückenlarven).

Bezüglich der Aufwuchsbedingungen können sowohl die Versuchsdauer als auch die Beschaffenheit der Aufwuchsträger als Ursachen für die aufgetretenen Unterschiede ausgeschlossen werden, da sie in beiden Versuchsreihen identisch waren. Substratmangel und toxische Stöße sind ebenfalls sehr unwahrscheinlich, wie nicht zuletzt die Befunde der vergleichenden Wasseranalytik zeigen (Tab. 3-4). Hydraulische Stoßbelastungen im Betrieb konnten aufgrund des Versuchsaufbaus nicht auftreten (druckfrei aufwärts durchströmter Behälter und Überlaufvorrichtung in Zulaufrohr; vgl. Abb. 3-5, S.14). Das Abscheren bei der Probenahme (Entnahme der Muster zu Kontrollzwecken) und das Abweiden durch Fresser (vgl. Abb. 3-8 und Abb. 3-9, S. 17) stellen hingegen mögliche Ursachen dar

Tab. 3-4: *Ergebnisse der chemischen Wasseranalytik*

Parameter	Einheit	Badeteichwasser ¹⁾ (WHOrga)	Abwasser aus SBR-KKA ²⁾ (BUW)			
			25.06.09	16.07.09	23.07.09	Mittelwert
CSB	mg/l	3,1	47,0	125,0	63,0	78,3
BSB ₅	mg/l	1,0	5,0	20,0	7,0	10,7
TKN-N	mg/l	2,8	29,8	35,1	0,9	21,9
NO ₂ -N	mg/l	< 0,015	0,31	0,14	0,37	0,27
NO ₃ -N	mg/l	0,292	0,95	6,45	23,7	10,37
PO ₄ -P	mg/l	< 0,2	-	-	-	-

1) Stichprobe vom 02.09.2009 (Doppelbestimmung)

2) 24-h Mischproben (Doppelbestimmung)

Die geringe Belagbildung auf den Mustern bzw. Küvetten führte letztlich auch dazu, dass die Frage nach einer geeigneten Methode zur Quantifizierung des Fouling nicht endgültig geklärt werden konnte. Von den zur Anwendung gekommenen Methoden, stellte sich die Mikroskopie in Verbindung mit der visuellen Dokumentation zwar als grundsätzlich geeignet heraus. Allerdings liefern beide Methoden nur qualitative Ergebnisse, d.h. ein kardinalskaliertes Vergleich ist nicht möglich. Für beide Methoden sind plane Flächen, wie sie die Küvetten boten, von Vorteil. Demgegenüber ist das Handling der Muster (Glasrohre), insbesondere bei der Mikroskopie erheblich eingeschränkt.

Die Quantifizierung der Belagbildung anhand UV/VIS-Spektroskopie der Küvetten könnte eine Möglichkeit darstellen, doch bedarf diese Methode einer Weiterentwicklung, die als unvereinbar mit dem Projektauftrag angesehen und deshalb nicht weiter verfolgt wurde. Zum derzeitigen Stand ist die Methode aufgrund der geringen Datenlage anfällig für Fehlinterpretationen und somit insgesamt zu unsicher.

3.3. *Laborversuche mit handelsüblicher Trübungsmesssonde*

Wie die bisherigen Ausführungen nahe legen, konnte anhand der durchgeführten Feldversuche die Frage, inwieweit die UVC-Strahlung eine präventive Wirkung auf die Belagbildung an den Trübungsmesssonden haben würde und für die Entwicklung der Trübungsmesssonde unabdingbar ist, nicht abschließend geklärt werden. Denn den positiven Ergebnissen der WHOrga standen die Minderbefunde der BUW entgegen, wobei die Ursachen für die Divergenzen größtenteils im Ungewissen lagen. Zum einen bereitete der generell geringe Biofilmaufwuchs und folglich deren Nachweis bei den Feldversuche der BUW Probleme. Zum anderen erschwerten die Vielzahl, Komplexität und Dynamik der möglichen Einflussfaktoren unter Praxisbedingungen die Ursachenforschung.

Konsequenterweise führte die BUW einen zweiten Versuch im Labor durch, um die Umwelteinflüsse auf ein Minimum zu begrenzen - zumindest aber die Ursachen für den Abbruch des Feldversuchs (Algenbewuchs und Mückenbefall) ausschließen zu können. Von Bedeutung für die Fortsetzung der Versuche war, dass die UVC-Bestrahlung der Trübungsmesssonde das eigentliche Alleinstellungsmerkmal im Entwicklungsansatz darstellte und für die Erfüllung der Zielsetzung, eine Messsonde mit einem angestrebten Verkaufspreis von 500 € zu entwickeln, ohne Alternative angesehen wurde. Denn im Vergleich zu allen anderen Präventivmaßnahmen wurde nur in der UV-Bestrahlung eine kostengünstigste Option gesehen, wenngleich in verschiedenen Diskussionen die höchste Effektivität den mechanischen Reinigungseinrichtungen (z.B. Bürsten) zugesprochen wurde.

Letztlich waren die ergänzenden Laborversuche zum Nachweise der präventiven Wirkung von UVC-Strahlung gegen das Fouling der Messsonden wichtig, um das Risiko einer Fehlinvestition (z.B. Werkzeugbau für die Prototypenentwicklung) minimieren zu können. Erneutes Ziel der Untersuchungen war es deshalb, die von WHOrga unter Praxisbedingung beobachtete Wirkung der UVC-Strahlung auf den Biofilmaufwuchs quantitativ nachzuweisen. Vor dem Hintergrund jedoch, dass der quantitative Nachweis an Testrohen und/oder

Küvetten in den bisherigen Versuchen Schwierigkeiten bereitet hatte, wurde ein gänzlich neuer Versuchsansatz gewählt. Dieser sah vor, den Messwert von zwei handelsüblichen Trübungssonden, die in ein und dasselbe Testmedium (Abwasser) eintauchten, kontinuierlich zu erfassen, wobei nur eine Sonde mit UVC-Licht bestrahlt und die andere Sonde gegen diese Strahlung abgeschirmt sein sollte. Durch das kontinuierliche Aufzeichnen der von beiden Messsonden gelieferten Trübungswerte sollten die durch Bestrahlung mit UVC-Licht hervorgerufenen Unterschiede identifiziert werden.

3.3.1. Versuchsaufbau und Durchführung

Für die Versuche kamen die UV-Lampe der Firma Radium (Modell *Puritec* Typ UVC-LPC 9 CCG, 7 Watt) - wie sie bereits bei den Versuchen von WHOrga verwendet wurde- sowie zwei Trübungsmesssonden der Firma IER (Modell *TurbiSens*, Messbereich 0 – 2.000 FNU) zum Einsatz. Die Messsonden sind mit zwei IR-Strahlern und einem Photosensor als Empfänger ausgestattet und kombinieren 90° Streulicht- und Durchlichtmessung (Abb. 3-19, links). Die IR-Strahler schalten in kurzen Abständen abwechselnd ein und aus, wobei gleichzeitig die Empfindlichkeit des Photosensors wechselt (pulsierendes Wechsellichtverfahren). Somit liegen quasikontinuierlich Streu- und Durchlichtsignale vor, die von der internen Elektronik im Anschlusskopf mit einem speziellen Algorithmus verarbeitet (mathematisch verknüpft) und schließlich als trübungslineares Messsignal (4 -20 mA) ausgegeben werden.

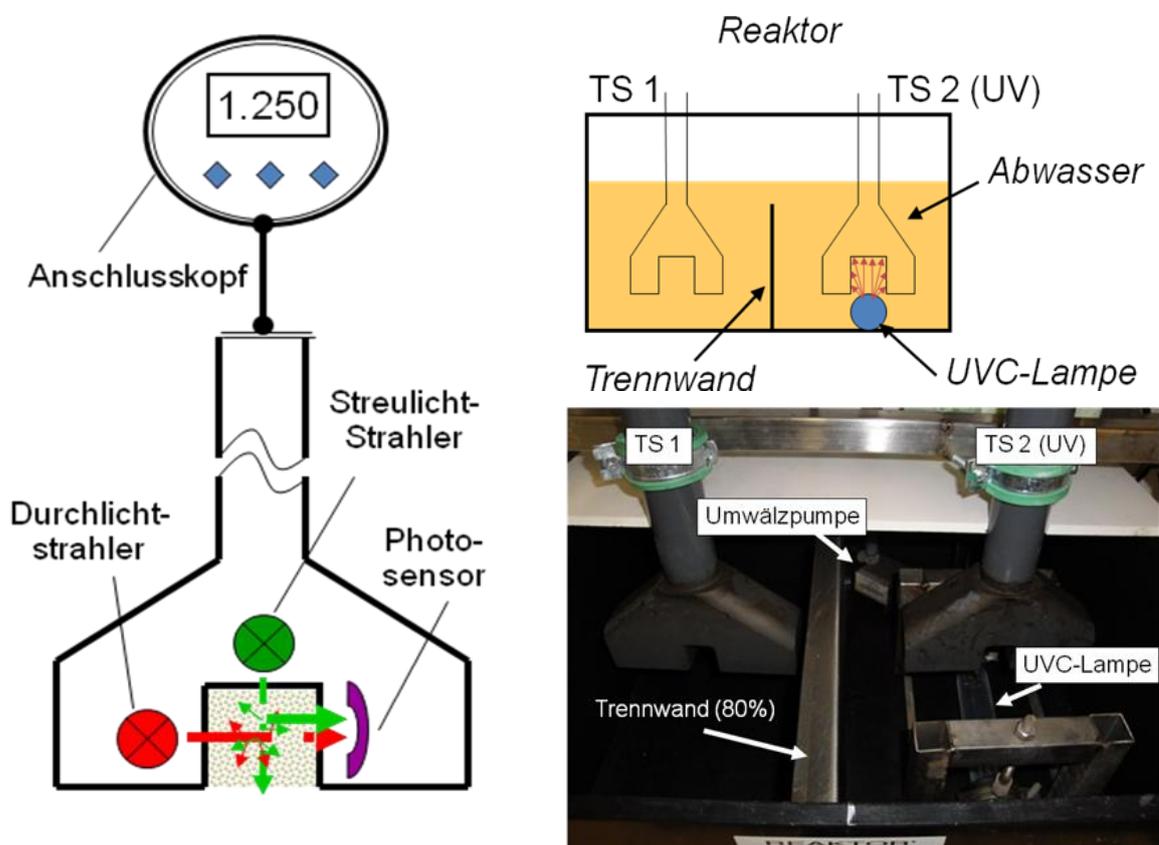


Abb. 3-19: Funktionsprinzip der Trübungsmesssonden TurbiSens (links) und ihre Anordnung im Versuchsreaktor (rechts)

Beide Messsonden wurden nebeneinander in einem Reaktor mit einem Abstand von 10 cm zum Behälterboden installiert, wobei unterhalb der zweiten Messsonde noch zusätzlich die UV-Lampe platziert wurde (Abb. 3-19, rechts). Zwischen beiden Messsonden schirmte eine Trennwand aus Edelstahl die Strahlen der UVC-Lampe ab. Die Trennwand entkoppelte jedoch nicht die beiden Reaktorhälften hydraulisch (Löcher außerhalb des Strahlbereichs). Die UVC-Lampe war - um sie gegen Auftrieb zu sichern - in einem Edelstahlgestell verankert, welches lose auf dem Reaktorboden auflag.

Abb. 3-20 zeigt die Einbausituation des Reaktors und der restlichen Anlagenkomponenten. In der Mitte ist der Reaktor mit den beiden Messsonden zu erkennen, deren Signale kontinuierlich im Memographen der Firma Endress+Hauser (Modell *Memograph RSG 10*) mit einer zeitlicher Auflösung von 1 Wert/ je 2 min aufgezeichnet wurden. Oberhalb des Reaktors befinden sich die Anschlussköpfe zur Anzeige des aktuellen Trübungswertes sowie die Steuerung zum Schalten der UVC-Lampe und der Umwälzpumpe (vgl. Abb. 3-19). Die Betriebszustände von Umwälzpumpe und UVC-Lampe (ein/aus) wurden im Memographen protokolliert.

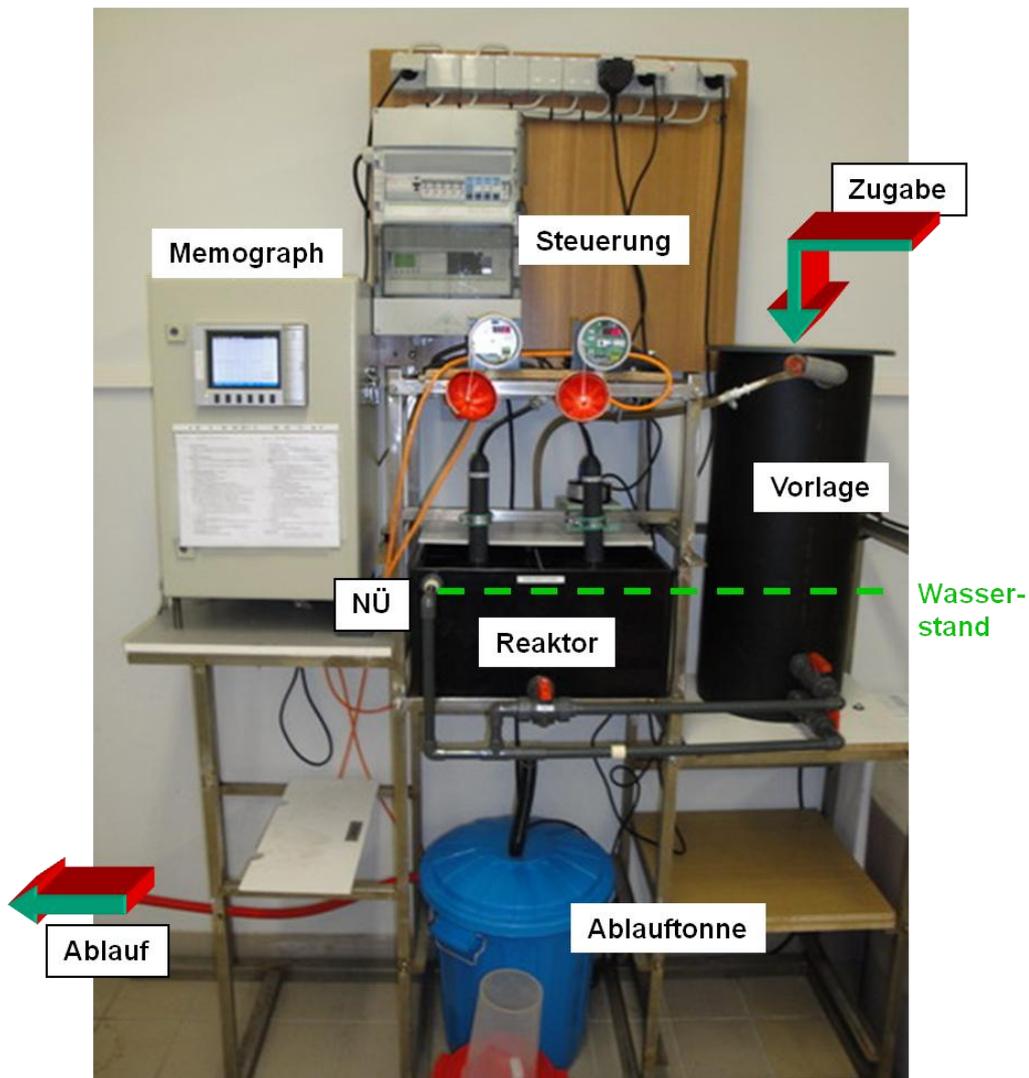


Abb. 3-20: Versuchsaufbau zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Trübungswerte

Das Einschaltintervall sowie die Einschaltdauer der UVC-Lampe wurden auf 2 x 120 min festgelegt, weil sich dies als optimal beim Dauerversuch der WHOrga herausgestellt hatte (vgl. hierzu Foto 7 auf S. 8 im R-KMU). Als Einschaltzeiten für die Lampe wurden die Stunden 06:00 – 08:00 Uhr & 18:00 – 20:00 Uhr gewählt.

Die Umwälzpumpe an der Rückseite des Reaktors förderte das Testmedium (Abwasser) diskontinuierlich in geringen Mengen (5 min stündlich mit $Q \sim 0,02$ l/s) in den Vorlagebehälter. Von hier aus floss es über verschließbare (durch Kugelhähne) Verbindungsleitungen zurück in den der Reaktor. Bei geöffneter Verbindungsleitung, d.h. im Umwälzbetrieb, stellte sich dauerhaft ein gleicher Wasserstand in beiden Behältern ein (Prinzip der kommunizierenden Röhren). Nur bei der Zugabe von frischem Substrat bzw. der Entnahme von Bodenschlamm wurde die Verbindungsleitung kurzzeitig verschlossen.

Als Zugabesubstrat wurde eine willkürliche Mischung aus unbehandeltem und behandeltem Abwasser einer anderen Versuchsanlage⁴ der BUW verwendet. Da mit der Sedimentation von Abwasserpartikeln sowohl im Reaktor als auch im Vorlagebehälter zu rechnen war, wurde jeweils vor der Substratzugabe aus dem System abgesetzter Bodenschlamm entnommen. Dies erfolgte wechselseitig, d.h. entweder aus dem Reaktor (BS-Entnahme Reaktor) oder aus dem Vorlagebehälter (BS-Entnahme Vorlage). Erst im Anschluss erfolgte dann die Substratzugabe in den Vorlagebehälter, wobei abwechselnd entweder Zu- oder Ablaufwasser der Versuchsanlage verwendet wurde (Zulauf VA bzw. Ablauf VA). Wie aus Abb. 3-21 (S. 32) hervorgeht, erfolgte dieses Vorgehen fast täglich, wobei die entnommene Menge an Bodenschlamm stets kleiner (1,0 – 1,4 l) als die Menge des zugegebenen Abwassers (1,4 – 1,8 l) war.

Die Verbindungsleitung zwischen Vorlagebehälter und Reaktor blieb während des Füllvorganges verschlossen und wurde erst nach Abschluss behutsam geöffnet, um einen langsamen Ausgleich der Wassersiegellagen zu erwirken, respektive hydraulische Stoßbelastungen zu unterbinden. Die überschüssige Abwassermenge ($V_{\text{Zugabe}} > V_{\text{Entnahme}}$) gelangte beim Ausgleichsvorgang über den Reaktorüberlauf (NÜ in Abb. 3-20) in eine Ablauftonne, aus der es eine Pumpe in die Kanalisation förderte.

Die Laborversuche wurden am 19.10.2010 begonnen und bis zum 11.01.2010 geführt. Während der dreimonatigen Versuchszeit wurde der Versuchsanlage

- 33 Mal Bodenschlamm aus dem Reaktor ($\sum V_{\text{BS-R}}=34,6$ l) und 27 Mal Bodenschlamm aus dem Vorlagebehälter ($\sum V_{\text{BS-V}}=30,2$ l) entnommen sowie
- 33 Mal unbehandelte Abwasser ($\sum V_{\text{Z-Zulauf}}=51,6$ l) und 28 Mal behandeltes Abwasser ($\sum V_{\text{Z-Ablauf}}=44,2$ l) über den Vorlagebehälter zugegeben.

⁴ Bei der Versuchsanlage handelt es sich um einen modularen Biofilter, der mit Abwasser aus dem Zulauf der KA Mellingen betrieben wird.

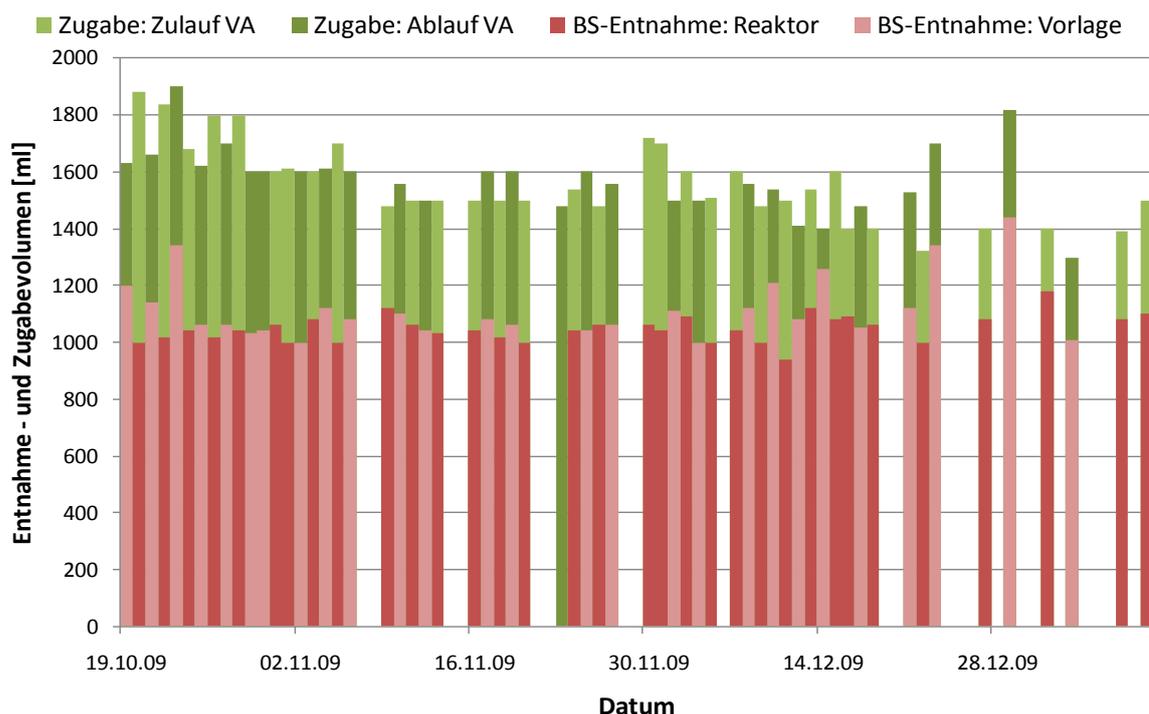


Abb. 3-21: Ort und Menge der Bodenschlamm-entnahme sowie Art und Menge der Substratzugabe

Zusätzlich zur turnusmäßigen Schlamm-entnahme wurde der Reaktor insgesamt 5 Mal vollständig entleert, mit Wasser befüllt, erneut entleert und schließlich mit ursprünglichen Substrat wiederbefüllt (Tab. 3-5). Ziel dieser Aktion war es, mit den Trübungssonden eine Vergleichsmessung im klaren Wasser sowie gegen Luft durchzuführen, ohne sie jedoch aus der Anordnung entfernen zu müssen (Gefahr des Abreisens von Biofilm). Die Notwendigkeit für die Vergleichsmessungen wurde gesehen, um eine Anreicherung von Feststoffen im Abwasser der Versuchsanlage als Ursache für eine Zunahme der gemessenen Trübungswerte ausschließen zu können. Bei den Vergleichsmessungen U02, U03 und U04 wurden außerdem der Reaktor und die UVC-Lampe gereinigt.

Tab. 3-5: Zeitpunkte und Intervalle der Vergleichsmessungen

Vergleichsmessung	U 01	U 02	U 03	U 04	U 05	U 06
Datum	02.11.'09	23.11.'09	07.12.'09	21.12.'09	04.01.'10	11.01.'10
Versuchstag	14	35	49	63	77	84
Intervall [d]	14	21	14	14	15	7
Reinigung*	-	R+L	L	R+L	-	-

* R: Reaktor; L: UVC-Lampe

In Abb. 3-22 (S. 33) ist das Vorgehen der Vergleichsmessung schematisch dargestellt. Demnach sind sechs Betriebszustände zu unterscheiden, die gleichermaßen den Zeitpunkt der Messwertaufnahme kennzeichnen. Die Messwerte wurden kontinuierlich mit dem Memographen mitgeschrieben und zusätzlich - nach Abklingen der Schwankungen - handschriftlich

protokolliert. Der Ausgangszustand (1) markiert den Start der Vergleichsmessung, d.h. den Beginn des Ablassvorgangs. Es folgten die erste Messung gegen Luft (2) sowie – nach Befüllen – die Vergleichsmessung gegen Wasser (3), die wiederholte Messung gegen Luft (4) usw.. Sowohl die Befüllung des Reaktors mit Trinkwasser als auch seine Wiederbefüllung mit Abwasser erfolgten dabei analog zur turnusmäßigen Substratzugabe, d.h. immer über den Vorlagebehälter. Infolge der behutsamen Vorgehensweise nahmen die Vergleichsmessungen jeweils etwa 3 Stunden in Anspruch.

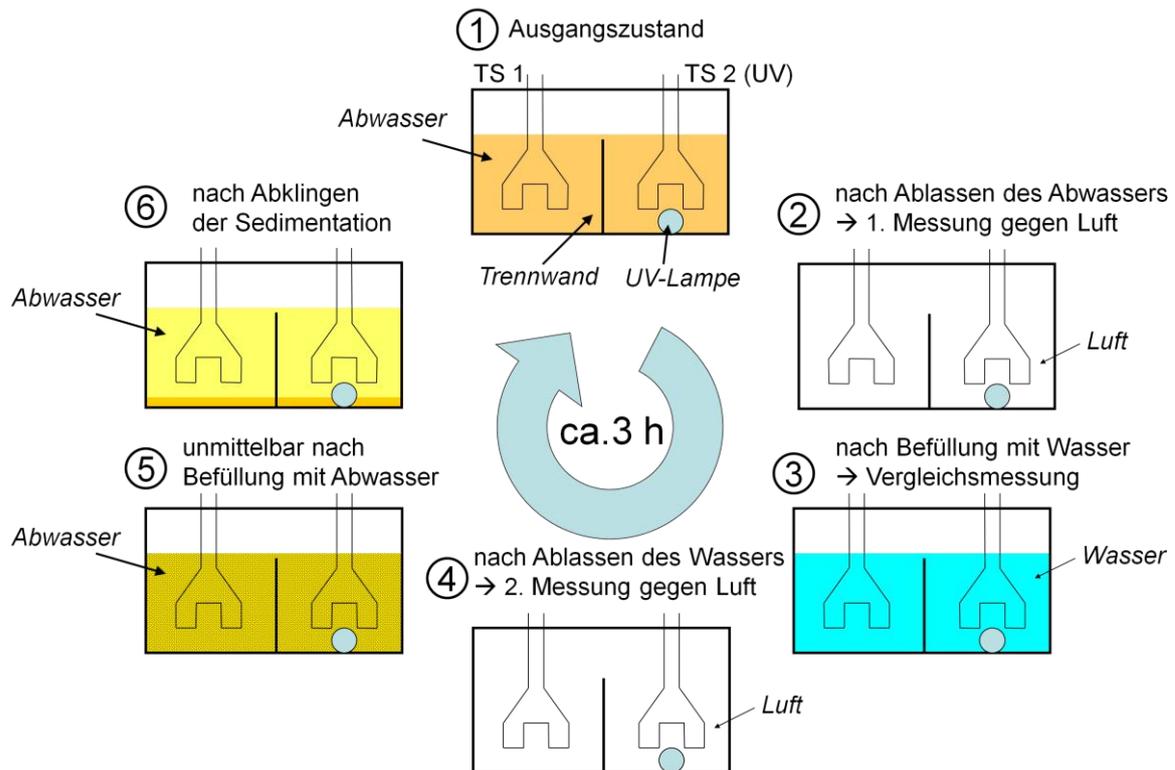


Abb. 3-22: Vorgehen bei der Vergleichsmessung gegen Luft und in klarem Wasser

Im Rahmen der zweiten Vergleichsmessung U02 am 23.11.2009 wurde der Reaktor einschließlich der Einbauteile (UVC-Lampe, Umwälzpumpe) gründlich gereinigt, und es wurde die Trennwand zwischen den Messsonden umgebaut. Aus Abb. 3-23 (S. 34) geht das Erfordernis einer gründlichen Reinigung der Anlagenkomponenten hervor. Im Reaktor sowie auf der UV-Lampe hatte sich erkennbar Schlamm abgelagert. Letzteres behinderte die Bestrahlung der betreffenden Sonde TS2-UV, weswegen der Ausbau UVC-Lampe unvermeidlich wurde.

Anlass für den Umbau der Trennwand war, dass sich in der Reaktorkammer von TS2-UV fortwährend Schwimmschlamm bildete, der sich weder durch Abschöpfen noch durch Absieben entfernen ließ und auch nach der Entleerung des Reaktors und dessen Befüllung mit Wasser noch präsent war. Da eine weitere Anreicherung des Schwimmschlammes nur in Reaktorkammer von TS2-UV zu ungleichen Versuchsbedingungen für die Messsonden TS1 und TS2-UV geführt hätte, wurde nach Reinigung des Reaktors die Trennwand auf 80% ihrer Höhe abgekantet, so dass sie unterhalb der Wasserspiegellage endete und zukünftig eine Verteilung von Schwammschlamm über den gesamten Reaktor erfolgen konnte.



Abb. 3-23: Verschmutzung des Reaktors (links) und der UVC-Lampe (rechts) am 23.11.2009

In den oberen Bildern von Abb. 3-24 ist das Ausmaß der unterschiedlichen Schwimmschlammbildungen in der Reaktorhälfte von TS1 (links) und TS2-UV (rechts) im Ausgangszustand, d.h. zu Beginn der Vergleichsmessung ersichtlich. Das untere, linke Bild zeigt den Zustand unmittelbar nach der Befüllung mit Wasser. Offensichtlich blieb der Schwimmschlamm trotz Ablassen und Wiederbefüllen des Reaktors erhalten. Das Bild rechts unten zeigt schließlich den Reaktor nach Umbau der Trennwand und Wiederbefüllung mit originärem Testsubstrat mit dem Ergebnis, dass die Wasseroberfläche vom Schwimmschlamm befreit. Bis zu Versuchsende traten dann keine weiteren Probleme mit Schwimmschlamm mehr auf.

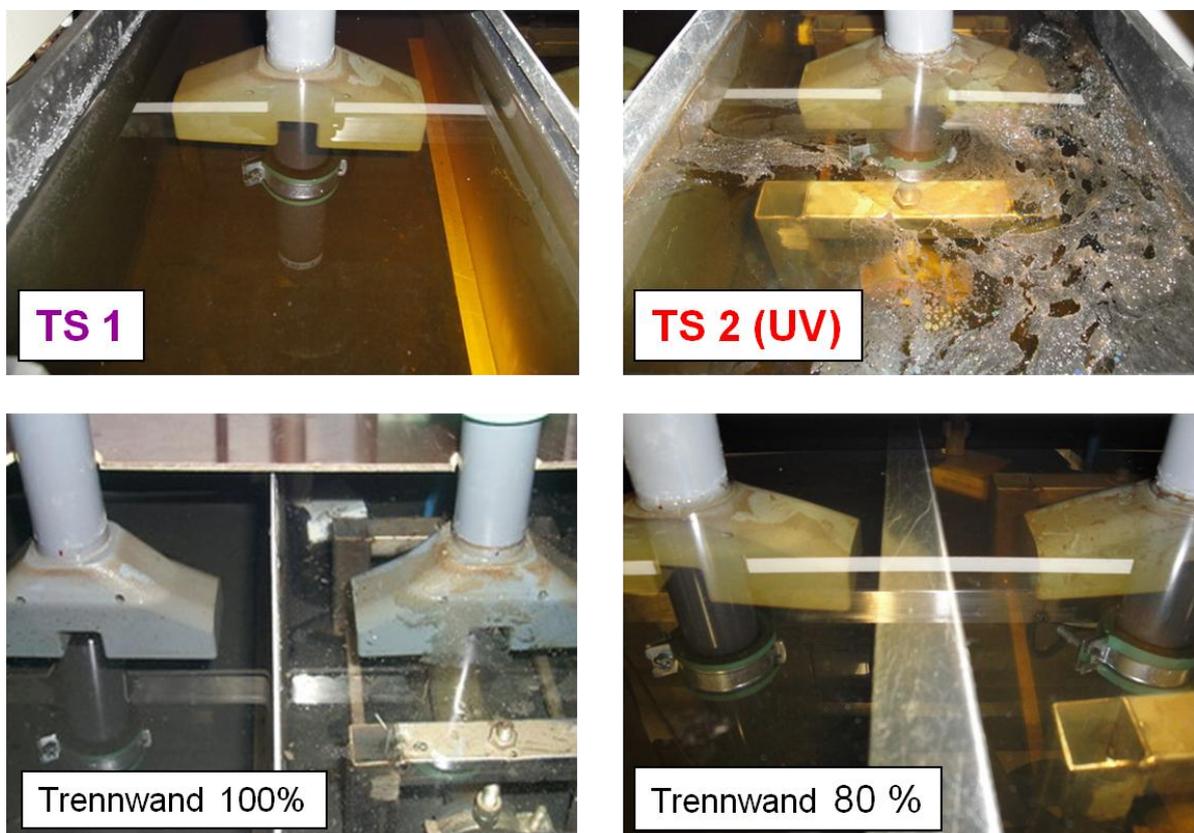


Abb. 3-24: Umbau der Trennwand als Konsequenz auf die Schwimmschlammbildung in der rechten Reaktorkammer von TS2-UV

Vor Beginn der Versuchsreihe wurde eine Referenzmessung der Trübungssonden gegen Luft und in klarem Wasser durchgeführt. Eine Kalibrierung der Messsonden war aufgrund der gelieferten Messwerte (jeweils 0 FNU) nicht erforderlich. Außerdem wurde die Trübung einer Mischung der Zugabesubstrate (1:1) gemessen, um einen Anhaltswert zur Festlegung geeigneter Messbereiche zu erhalten. Die Trübung des Mischsubstrats wurde mit 22 FNU gemessen und infolgedessen der Messbereich beider Sonden auf 100 FNU eingestellt.

3.3.2. Erwartungswerte, Beobachtungen, Ergebnisse und Diskussion

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse, insbesondere aber den Beobachtungen und Erfahrungen der WHOrga, wurde für beide Messsonden von einer steigenden Tendenz der Trübungsmesswerte infolge zunehmender Belagbildung an den optischen Fenstern ausgegangen. Da im Reaktor keine Durchmischung erfolgte wurde angenommen, dass die Trübung nicht aufgrund suspendierter Feststoffpartikel zunehmen könnte und folglich das Ergebnis des unabwendbaren Biofilmwachstums an den Messsonden sein müsste.

Ausgehend von einer nachhaltig präventiven Wirkung der UVC-Strahlen auf die Belagbildung wurde ferner erwartet, dass die schleichende Zunahme der Trübungswerte bei der Sonde ohne UVC-Strahler insgesamt höher ausfallen würde. Gemäß dieser Erwartung sollte die Differenz der Trübungswerte am Ende des Versuchs als Maß für die Wirksamkeit der UVC-Bestrahlung gewertet werden können. In Abb. 3-25 wird die eben geschilderte Erwartungshaltung grafisch dargestellt.

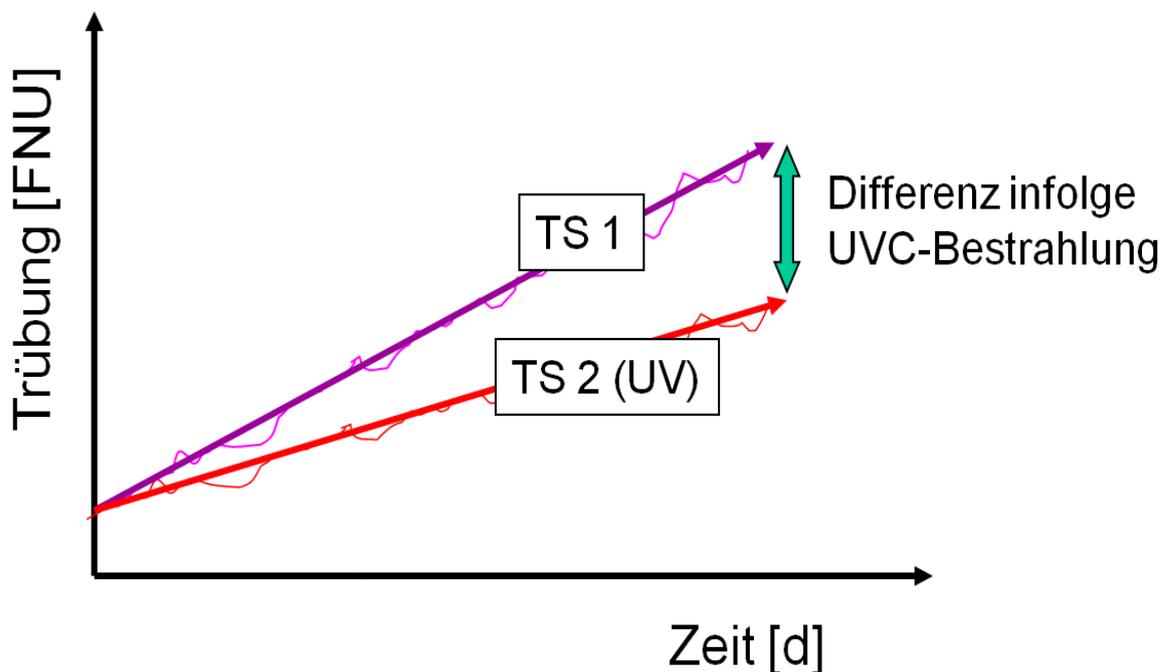


Abb. 3-25: Erwartete Unterschiede in der Messwertentwicklung bei der Trübungsmesssonde ohne UVC-Bestrahlung (TS1, violett) und mit UVC-Bestrahlung (TS2-UV, rot)

Wie die Messwertkurven aus der kontinuierlichen Datenerfassung über den gesamten Versuchszeitraum (Abb. 3-26) zeigen, wurden die Erwartungen aber nur dahingehend erfüllt, dass

beide Messonden einen geringfügigen Anstieg der Trübungswerte lieferten. Dies wird deutlich, wenn der gemeinsame Messpunkt im Anschluss an U 01 (gelber Punkt in Abb. 3-26) mit den unterschiedlichen Messpunkten zum Ausgangszustand bei U 06 (lila Punkt für TS 1 und roter Punkt für TS2-UV) verglichen werden. Demnach stieg die Trübung von ehemals 3 FNU auf 6 FNU für TS1 und auf 10 FNU für TS2-UV an. In beiden Fällen fiel der Unterschied aber gering aus ($dTS1= 3$ FNU; $dTS2-UV= 7$ FNU).

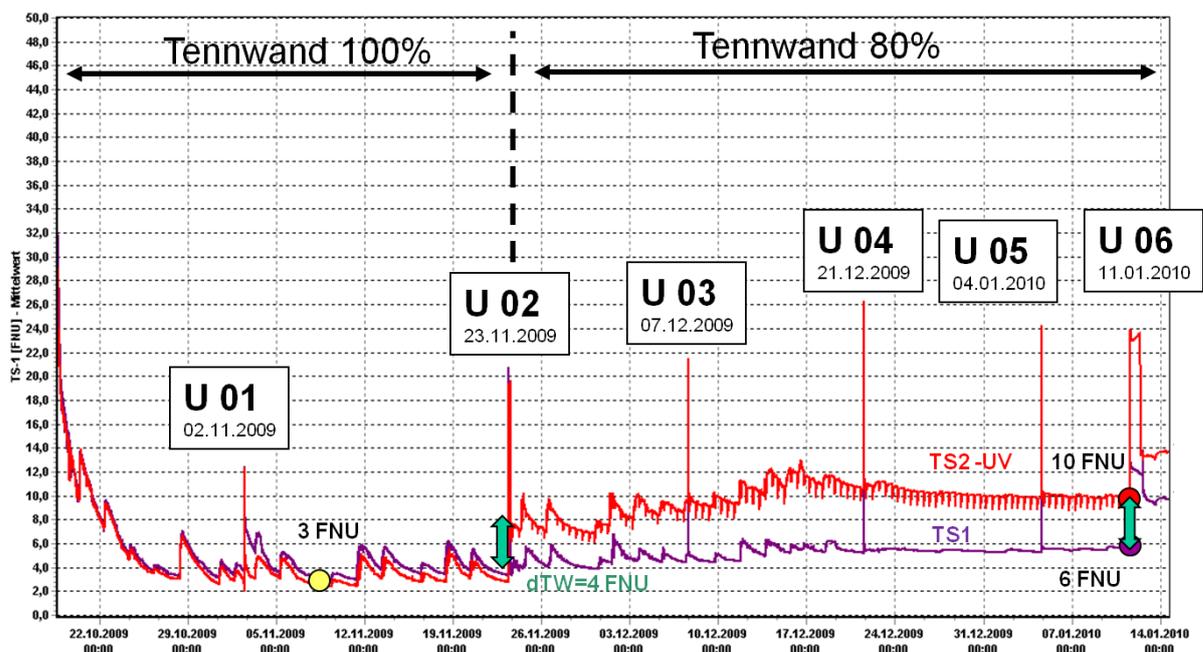


Abb. 3-26: Kurvenverlauf der kontinuierlichen Trübungsmessung zur Identifikation der Trübungszunahme und Ereignissen der Betriebsführung

Bemerkenswert ist, dass die bestrahlte Sonde TS2_UV am Ende der Versuchsdauer einen höheren Trübungswert lieferte als die Trübungssonde TS1. Diese Feststellung entspricht nicht den Erwartungen. Wie aus den Bildern der Abb. 3-27 (S. 37) hervorgeht, war die Sonde TS2_UV tatsächlich stärker verschmutzt, als die Sonde TS1. Allerdings lässt die partielle Ausprägung der Verschmutzung, d.h. einzelne größere Schlammartikel anstatt eines flächig geschlossenen Films, andere Ursachen als alleiniges Biofilmwachstum vermuten.

Die Messkurven im gesamten Versuchszeitraum betrachtend fällt schließlich auf, dass die bei U06 feststellbare Differenz des Trübungssignals von 4 FNU bereits am Ende der zweiten Vergleichsmessung U02 zu verzeichnen war und seitdem erhalten blieb (grüne Pfeile in Abb. 3-26). Offensichtlich kommt U 02, bei der die Trennwand aufgrund der Schwimmschlammproblematik umgebaut wurde, eine besondere Bedeutung zu.

Prinzipiell sind die Vergleichsmessungen (U 01 – U06) an dem kurzzeitigen und sprunghaften Anstieg der Trübungswerte von etwa 20 FNU in Abb. 3-26 erkennbar.

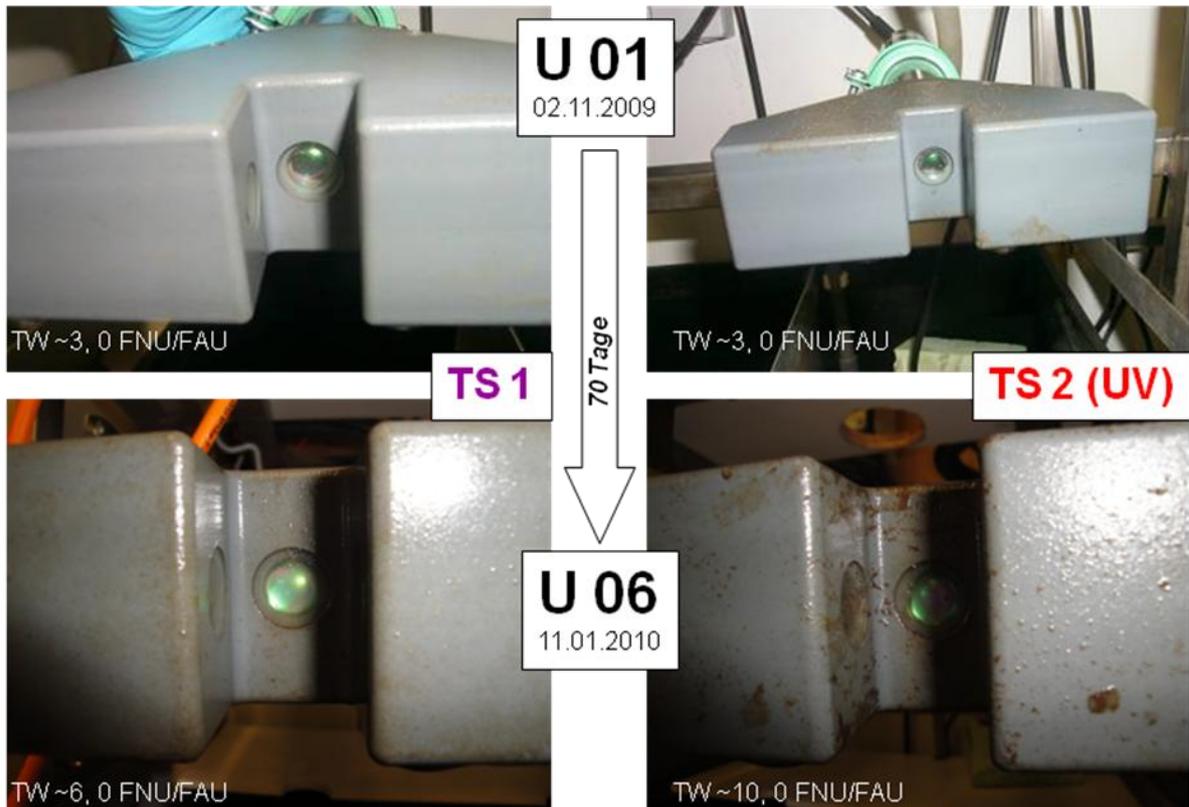


Abb. 3-27: Dokumentierte Verschmutzung der Trübungmesssonden TS1 (links) und TS2-UV (rechts) bei den Vergleichsmessungen U01 (oben) und U06 (unten)

Insgesamt wirft die Darstellung der Messkruven eine Reihe von Fragen auf, die einer gesonderten Erklärung bedürfen. In chronologischer Abfolge, d.h. von links nach rechts in Abb. 3-26 sind diese:

1. Worauf geht der degressive Messwertverlauf beider Sonden am Anfang der Untersuchung zurück?
2. Wie lässt sich das wellenförmige Auf und Ab der Messwerte beider Sonden zwischen den Vergleichsmessungen erklären?
3. Was ist die Ursache für den kurzzeitigen Anstieg der Trübungsmesswerte bei den Vergleichsmessungen und warum ging bei U02 die Auslenkung für die Sonde TS2_UV nicht wie bei allen anderen Vergleichsmessungen zurück?
4. Warum ist bei der Sonde TS2_UV ein gezackter bzw. sägezahnförmiger Messwertverlauf zu erkennen, während die Messkurve für TS1 vergleichsweise glatt verläuft?

Zul.) Für den Rückgang von 30 FNU auf 4 FNU innerhalb der ersten 24 Stunden bei beiden Messsonden liefert das verzögerte Absetzen von Abwasserpartikeln im Reaktor eine plausible Erklärung. Vereinfachend kann gesagt werden, dass in dieser Zeit eine Beruhigung der Verhältnisse von der ersten Befüllung stattgefunden hatte. Aufgrund der variierenden Zugabesubstrate (abwechselnden Zugabe von Zu- und Ablaufwasser der Versuchsanlage) ergeben sich innerhalb des degressiven Kurvenverlaufs wellenförmige Schwankungen.

Zu 2.) Jede weitere Substratzugabe führte zu einem kurzzeitigen Anstieg der Trübungswerte, und das anschließende Abklingen auf das ursprüngliche Niveau. Denn mit der Substratzugabe wurden zwangsläufig „neue“ Feststoffe in das System nachgeliefert. Je nach Charakteristik der zugegebenen Substrate viel der kurzzeitige Anstieg mehr (Zulauf der VA) oder weniger (Ablauf der VA) stark aus. Ab U04 ist diese Wellenbewegung deshalb nicht mehr zu erkennen, weil das Zugabesubstrat nahezu feststofffrei war. Denn über die Feiertage war die Lieferung von Abwasser aus dem Zulauf der KA Mellingen in das Labor nicht möglich, so dass bereits im Vorfeld größere Mengen gesammelt und zwischengespeichert wurden. Im Speicher hatte dann die Sedimentation der Feststoffe stattgefunden.

Zu 3.) Die Ursachen für den kurzzeitigen Anstieg der Trübungsmesswerte bei den Vergleichsmessungen kann anhand einer detaillierten Betrachtung nachvollzogen werden. In Abb. 3-28 die Messkurven für den Zeitraum der U02 gemeinsam mit den einzelnen Betriebszuständen des Reaktors dargestellt. Die farbigen Trapeze deuten den Füllstand im Reaktor mit dem jeweiligen Testmedium an (Abwasser, Luft, Wasser). Hieraus ableitend ergeben sich dann die sechs Punkte der manuellen Messwertaufnahme (vgl. Abb. 3-22, S. 33), z.B. kennzeichnen die Punkte 2 und 4 die Messungen gegen Luft bei leerem Reaktor.

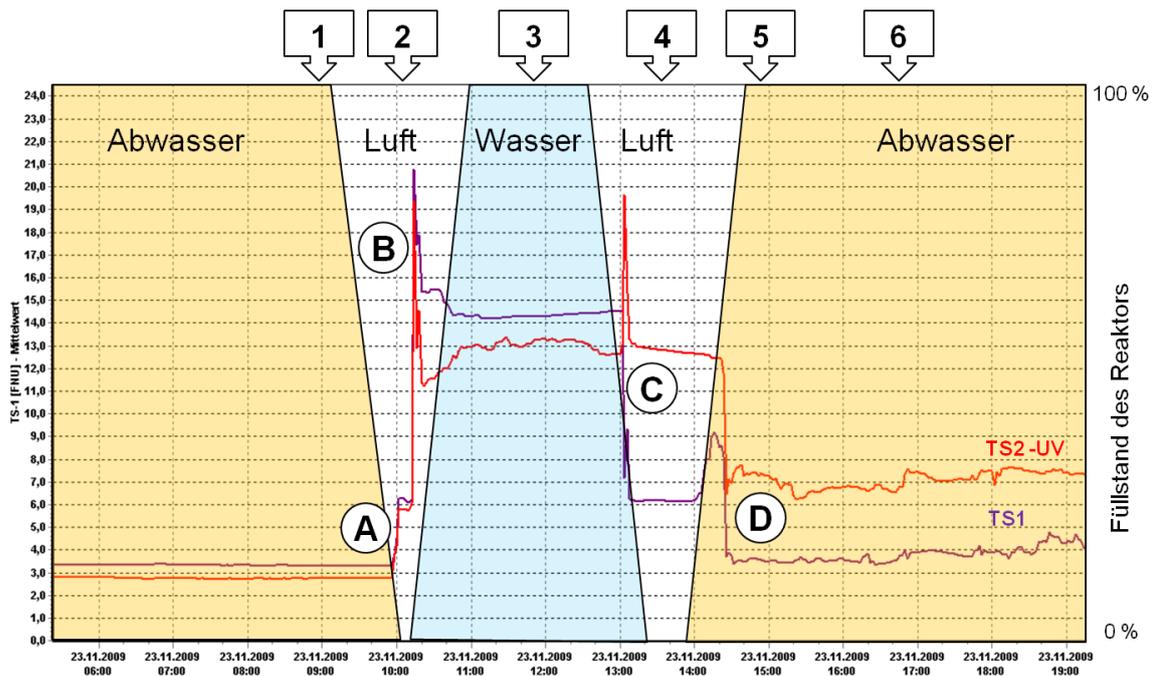


Abb. 3-28: Einfluss der Vergleichsmessung auf den Messwertverlauf am Beispiel der U02

Die Messkurven betrachend können 4 Sprünge (A, B, C und D) identifiziert werden, die jeweils durch bzw. beim Entleeren sowie Befüllen des Reaktors auftreten:

- Sprung A: beim Entleeren des Reaktors (Abwasser)
- Sprung B: beim Befüllen des Reaktors mit Wasser
- Sprung C: beim Entleeren des Reaktors (Wasser)
- Sprung D: beim Wiederbefüllen des Reaktors mit Abwasser

Prinzipiell können die Sprünge im Messwertverlauf auf die Variation der Testmedien (Abwasser, Luft, Wasser) zurückgeführt werden. Die Vergleichsmessung im Wasser (3) liefert höherer Werte als die Messung gegen Luft (2/4) und die Messung im Abwasser (1/5/6). Diese Reihenfolge ist überraschend, doch wurde sie in allen Vergleichsmessungen (U01-U06) so festgestellt. Auch die Messwertspitzen (Sprünge B und C), wie sie letztlich ausschlaggebend für die sichtbaren Maxima in Abb. 3-26 (S. 36) sind, traten bei jeder Vergleichsmessung auf.

Eine vollends schlüssige Erklärung für die generell hohen Messwerte bei der Vergleichsmessung in Wasser sowie die Klimaxe in deren Vorfeld bzw. Nachgang kann zwar nicht gegeben werden, doch dürften die schwankenden Wasserstände im Reaktor und das spezielle Messsystem der Trübungsmesssonden (Kombination aus Streu- und Durchlichtmessung, vgl. Abb. 3-19, S.29) eine Rolle spielen. Von großer Bedeutung ist, dass der von der Trübungssonde ausgegebene Messwert rechnerisch aus den Signalen der pulsierenden Streu- und Durchlichtmessung ermittelt wird, die ihrerseits auf die wechselnden Versuchsbedingungen in der Messzelle ganz unterschiedlich reagieren. An drei Stellen der Messzelle wird der Messwert allein durch Belagbildung beeinflusst: jeweils am Strahlerausgang (2x) und nochmals am Strahlereingang (vor dem Detektor). Letztlich macht die Unkenntnis bezüglich der genauen Funktionsweise der Trübungsmesssonden die Ursachenforschung sehr schwierig.

Als möglicher Grund für die höheren Messwerte bei der Vergleichsmessung kommt grundsätzlich die temporäre Verschmutzung der Messzelle in Frage, wie sie durch das Anhaften von Partikeln hervorgerufen wurde, die vom Boden des Reaktors bei dessen Befüllen mit dem Wasserstand als Schwimmschlamm mitgeführt wurden. Die Sprünge B und C in Abb. 3-28 können deshalb durchaus als Reaktion auf den vertikal wandernden Wasserspiegel durch die Messzelle verstanden werden, weil dann die Trübung in der Grenzfläche Wasser/Luft bzw. Wasser/Schwimmschlamm gemessen wurde.

Diese Partikel lösten sich dann wieder von Messzelle beim späteren Entleeren des Reaktors ab, so dass am Ende der Vergleichsmessung (Punkt 6 in Abb. 3-28, S. 38) i. d. R. der Ausgangszustand wieder hergestellt war. Diesbezüglich stellte aber U02, bei der sehr viel Schwimmschlamm in der rechten Reaktorhälfte bei TS2-UV auftrat (vgl. Abb. 3-24, S. 34) eine Besonderheit dar. Offensichtlich lösten sich die Partikel bei dieser Vergleichsmessung von der Sonde TS2-UV nicht wieder vollständig ab, so dass der Messwert nur auf 7 FNU zurückging (Sprung C in Abb. 3-28, S. 38). Ursache hierfür dürfte das durch den Umbau der Trennwand hervorgerufene längere Trockenfallen der Messsonde gewesen sein.

Die verbleibende Differenz von 4 FNU im Vergleich zu TS1 blieb dann bis Versuchsende bestehen. Demnach geht der Unterschied zwischen beiden Messwerte von 4 FNU am Ende der Versuchsreihe (6 FNU für TS1 und 10 FNU für TS2-UV, vgl. Abb. 3-26, S. 36) sehr wahrscheinlich allein auf die besonderen Umstände der U02 zurück. In der Konsequenz sind die Unterschiede nicht auf den Einfluss der UVC-Bestrahlung zurückzuführen. Demnach kommt auch dieser Versuch zu dem Ergebnis, dass die UVC-Bestrahlung keinen signifikanten Einfluss auf die Belagbildung an der Messsonde hat.

Zu 4.) Wie jedoch Abb. 3-29 (S. 40) zeigt, hatte die UVC-Bestrahlung der Messsonde zumindest einen Einfluss auf den aktuellen Trübungswert. In der Abb. 3-29 (S. 40) sind die Messkurven für den 24. und 25. 12. 2009 gemeinsam mit den Betriebszuständen der Umwälzpumpe (grüne Linie) und der UVC-Lampe (blaue Linie) dargestellt. Bezüglich der Betriebszustände bedeutet ein Wert größer Null den Einschaltzustand. Aus dem diskontinuierlichen Umwälzbetrieb resultieren dann die 48 Zacken der grünen Linie (Umwälzpumpe war zu jeder vollen Stunde für 5 min angeschaltet). Die Einschaltzeiten der UVC-Lampe (täglich 06:00 – 08:00 Uhr & 18:00 – 20:00 Uhr) sind an den 4 Plateaus der blauen Linie zu erkennen.

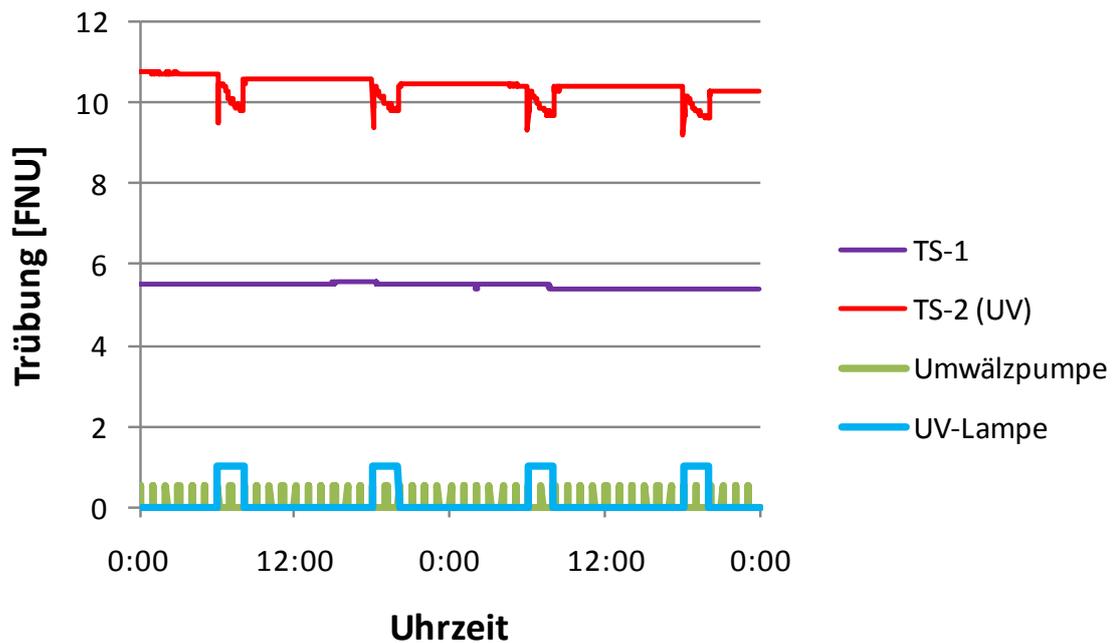


Abb. 3-29: Einfluss der UVC-Bestrahlung auf den Trübungswert am Beispiel der Messwerte vom 24.12.2009 und 25.12.2009

Bezug nehmend auf das erste Einschaltintervall am 24.12.2009 von 6 bis 8 Uhr lässt sich sagen, dass bei dem Einschalten der UVC-Lampe der Messwert an TS2-UV zunächst um 1,1 FNU zurückging (von 10,4 auf 9,3), unmittelbar danach aber wieder um 1,0 FNU auf 10,3 FNU anstieg. Während der Bestrahlung nahm der Messwert dann stetig bis zum Ausschalten der Lampe auf 9,7 FNU ab (degressiver Kurvenverlauf). Durch das Ausschalten der UVC stieg der Trübungswert dann wieder auf 10,3 FNU an. Demnach resultierte ein Nettoverlust von 0,1 FNU, d.h. der Trübungswert am Ende der Bestrahlung war um 0,1 FNU geringer als vor der Bestrahlung. Wenngleich der Unterschied somit sehr gering ausfiel, musste die Ursache in der UVC-Bestrahlung liegen. Denn bei der Sonde TS1 trat dieser Effekt nicht auf.

Insgesamt ergaben die 4 Einschaltvorgänge vom 24. und 25.12.2009 eine Abnahme des Trübungswerts um 0,5 FNU (von 10,8 auf 10,5) bzw. 4,6 % an der Sonde TS2-UV. Auch für die Sonde TS1 ohne Bestrahlung war ein Rückgang zu verzeichnen, doch fiel dieser mit 0,1 FNU (von 5,5 auf 5,4) bzw. 1,8 % geringer aus.

Offensichtlich ruft das Einschalten der UVC-Lampe also eine Änderung des Trübungssignals hervor, doch lässt dies nicht zwangsläufig auf eine präventive bzw. destruiende Wirkung der UVC-Strahlung auf die Belagbildung in der Messzelle schließen. Denkbar ist, dass infolge des Einschaltens der UVC-Lampe physiko-chemische Prozesse im Testmedium (Abwasser) initiiert werden, die ihrerseits das Trübungssignal beeinflussen (z.B. Fällungsreaktionen). Dies würde zumindest den neuerlichen Anstieg des Trübungssignals unmittelbar nach Ausschalten der UVC-Lampe erklären.

Wie schließlich aus Abb. 3-30 hervorgeht, emittiert die UVC-Lampe auch Strahlen außerhalb des UVC-Bereichs, wenngleich ein Intensitätsmaximum bei 254 nm Wellenlänge vorliegt. Das Strahlenspektrum ist nahezu typisch für alle Quecksilber-Niederdruckstrahler und legt nahe, dass mit dem Einschalten der Lampe ein Energieeintrag in das System erfolgt und somit eine Verschiebung thermodynamischer Gleichgewichte wahrscheinlich wird.

13.10.2009

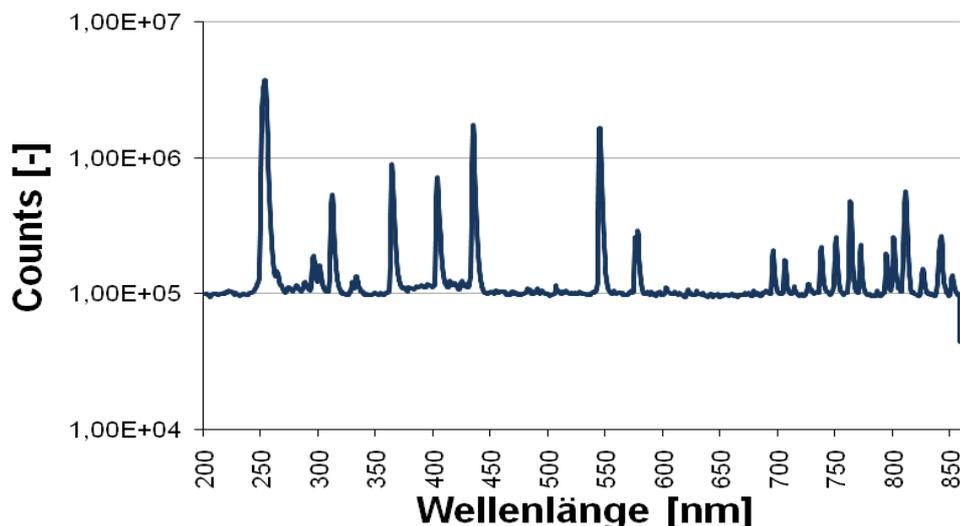


Abb. 3-30: *Strahlenspektrum des Puritec UVC-Strahlers im Wellenlängenbereich 202 - 858 nm,*

Im Hinblick einer möglichen direkten Beeinflussung der UVC-Lampe auf das Trübungssignal wird aus Abb. 3-30 außerdem ersichtlich, dass bei 860 nm Wellenlänge – bei der die Trübungsmessung erfolgt – keine bzw. nur sehr wenig Strahlung von der UVC-Lampe emittiert wird. Demnach kann die Trübungsmessung durch den UVC-Strahler nicht auf direktem Wege beeinflusst werden.

3.3.3. *Fazit der Versuchsreihe*

Am Ende der Versuchsreihe steht erneut das Ergebnis, dass ein signifikant positiver Einfluss der UVC-Strahlung im Hinblick der Vermeidung von Fouling an den optischen Gläsern der Trübungsmesssonde nicht nachzuweisen ist. Generell sind die durch Belegbildung innerhalb der Versuchsdauer (ca. 3 Monate) hervorgerufenen Änderungen der Trübungswerte im Bereich von 3 bis 7 FNU sehr gering. In Anbetracht der Tatsache, dass für den Schlammabtrieb in KKA (kritischer Zustand) mit Werten jenseits von 100 FNU zu rechnen ist und nur

geringe Anforderungen an die Genauigkeit der zukünftigen Messsonde gestellt werden sollen (10 % Abweichungen werden akzeptiert), können die im Versuch durch Fouling hervorgerufene Änderung der Trübung (< 10%) als vernachlässigbar gewertet werden.

Ein grundsätzliches Problem bei der Auswertung stellt die Unkenntnis bzgl. der mathematischen Verknüpfung des Streulicht- und Durchlichtmesssignals und deren anschließende Linearisierung zu einer einzigen Ausgabegröße dar (nur ein Trübungswert bzw. ein Analogsignal 4-20 mA), die jeweils herstellerspezifisch im Gerät vorgenommen wird.

Im Hinblick der verfolgten Zielsetzung der Versuchsreihe ist dies insofern von Bedeutung, als das mit der Messsonde *TurbiSens* nur ein Signal erfassbar ist, welches aber an drei Stellen durch Belagbildung beeinflusst werden kann: nämlich jeweils am Strahlerausgang (2x) und nochmals am Strahlereingang (vor dem Detektor). Möglicherweise ist die durch Belagbildung an den optischen Gläsern hervorgerufene Abschwächung des Lichtsignals wesentlich größer als dies durch die Anzeige der trübungslinearen Ausgabegröße (FNU) ersichtlich wird.

Hieraus resultiert für weitere Untersuchungen die Notwendigkeit eines Prototypen, der die separate Aufzeichnung der Signale der Streulicht- und Durchlichtmessung ermöglicht.

Schließlich zeigten die Versuche erneut die Notwendigkeit des permanenten Eintauchens der Trübungsmesssonde in das Probemedium (Abwasser) auf. Schwankende Wasserspiegel im Bereich der Messzelle, wie sie im Versuch durch Ablassen und Wiederbefüllen des Reaktors initiiert wurden, ziehen abrupte und drastische Änderungen des Messsignals nach sich. Bei Austrocknen der Messzelle verfestigt sich der anhaftende Belag an den optischen Gläsern, was irreversibel sein kann, somit unkontrolliert stattfindet und letztlich unerwünscht ist. Hieraus ergeben sich Anforderungen an die Einbausituation der Messsonde, wie sie bereits am Ende der Feldversuche formuliert wurden.

Bezüglich der Wechselwirkung von Trübungsmesssonde und UVC-Lampe kann ausgesagt werden, dass die Bestrahlung zwar nicht direkt die Trübungsmessung beeinflusst (Messung der Trübung erfolgt bei Wellenlänge 860 nm, die vom UVC-Strahler jedoch nicht emittiert wird). Allerdings deuten geringfügige Änderungen der Trübungswerte bei Einschalten der UVC-Lampe eine indirekte Beeinflussung durch Initialisierung physiko-chemischer Prozesse und somit eine Veränderung der Abwasserbeschaffenheit an.

Insgesamt lassen die Ergebnisse keinen Vorteil durch die Bestrahlung der Trübungsmesssonde mit einer handelsüblichen UVC-Lampe erkennen. Vor dem Hintergrund, dass der Einsatz eines UVC-Strahlers mit Sicherheit zusätzliche Kosten bei Entwicklung, Konstruktion und Herstellung des gesamten Messsystems aber auch höhere Betriebskosten (Energieverbrauch, Verschleiß) verursachen würde, der erhoffte Nutzen (Wartungsfreiheit der Trübungsmesssonde) jedoch nicht erkennbar ist, ist eine Weiterentwicklung des Lösungsansatzes nicht notwendig.

4. Überprüfung der entwickelten Testmuster für eine neuartige Trübungsmesssonde

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen der BUW vorgestellt, die zur Identifikation möglicher Betriebsstörungen an KKA durch eine Trübungsmessung durchgeführt wurden. Dem eigentlichen Hauptversuch, bei dem die Streulicht- und Durchlichtsignale von zwei Prototypen getrennt aufgezeichnet wurden, ging ein Vorversuch mit der Trübungsmesssonde *TurbiSens* voraus, wie sie bereits bei den Laborversuchen zur Unterdrückung der Belagbildung durch Bestrahlung mit UVC-Licht zum Einsatz kam.

4.1. Vorversuche mit handelsüblicher Trübungsmesssonde

Generell kann unterstellt werden, dass die Trübung eines Abwassers mit steigendem Feststoffgehalt zunimmt. Allerdings sind sowohl Trübung als auch Feststoffgehalt lediglich Summenparameter, die ihrerseits von verschiedenen Randbedingungen abhängen. Praktisch bedeutet dies, dass für jede Messstelle -respektive jeden Kläranlagenablauf- eine separate Regressionsfunktion notwendig ist, wenn der Zusammenhang von Feststoffgehalt und Trübung exakt beschrieben werden soll. Überdies muss die Regressionsfunktion in ausgewählten Abständen überprüft und ggf. an die veränderte Zusammensetzung des Abwassers angepasst werden. Dies widerspricht aber der Forderung nach einem allgemeingültigen Ansatz zur Identifizierung von Schlammabtrieb, wie er zur Signalisierung von Betriebsstörungen aller möglichen KKA notwendig wird.

Vor dem Hintergrund, dass die Trübungsmesssonde im Ablauf verschiedener Kleinkläranlagensystemen und somit verschiedenen Einbausituationen zum Einsatz kommen sollte, war es das Ziel der Vorversuche, die Bandbreite von Trübungswerten bei unterschiedlichen Abwasserzusammensetzungen festzustellen. Dabei ging es nicht darum, eine Korrelation von Trübungswert und Feststoffgehalten einzelner Abwässer herzustellen. Vielmehr sollte gezeigt werden, für welche Substrate die Bestimmungsmethoden überhaupt zugänglich sind.

Zu diesem Zweck wurden von verschiedenen Substraten unter standardisierten Bedingungen die Trübungswert und die Gehalte an abfiltrierbaren Stoffen (AFS in mg/l) bestimmt. Der Versuchsaufbau geht aus Abb. 4-1 hervor. Demnach tauchten zwei Trübungsmesssonden *TurbiSens* abwechselnd in einen mit Substrat gefüllten Eimer ein (Doppelbestimmung).

Die Homogenisierung des Substrats während der Messung erfolgte mit einem Magnetrührer unterhalb des Eimers. Der Trübungswert wurde kontinuierlich über den Memographen mitgeschrieben und gleichzeitig am Anschlusskopf der Trübungssonde abgelesen. Immer dann, wenn sich konstante Werte eingestellt hatten, wurden die Messwerte protokolliert.

Im Anschluss an die Trübungsmessung wurden aus dem homogenisierten Substrat 250 ml Probe zur Bestimmung der AFS entnommen. Die Analyse erfolgte dann als Doppelbestimmung nach DIN 38409 T2:1987-03 (DEV H 2).

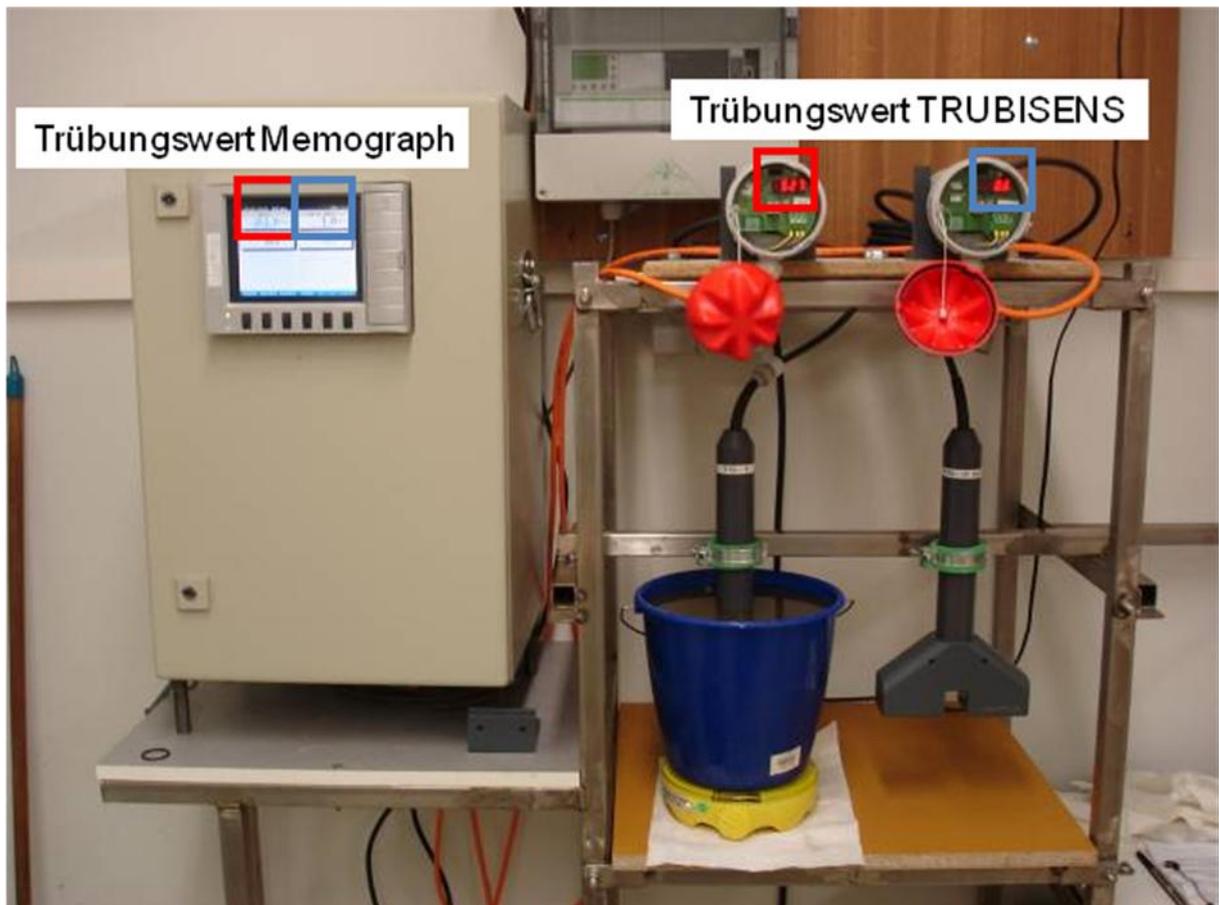


Abb. 4-1: Versuchsaufbau des Vorversuchs

Als Substrate kamen diverse Schlämme aus Kleinkläranlagen aber auch Lebensmittel (Cola, Milch und ein Cola/Milch-Gemisch) zum Einsatz. Letztere wurden als extreme Substrate bewusst gewählt, um die Grenzen der Trübungsmessung aber auch der AFS-Bestimmung aufzuzeigen.

Alle Schlämme wurden aus Kleinkläranlagen auf dem Versuchsfeld der MfPA in Mellingen entnommen. Zum Zeitpunkt der Probenahme waren hier 3 SBR Anlagen (A, B und C) sowie ein Wirbelschwebbettverfahren in Betrieb. Die Probenahmen erfolgten an unterschiedlichen Stellen der Verfahrenstypen (Vorklärung, Schlamm Speicher, Belebungsbecken).

Alle Substrate wurden mit destilliertem Wasser verdünnt, sofern dies die Trübungsmessung erforderlich machte. Mit Ausnahme der Cola (Substrat C) war dies für alle Substrate notwendig, d.h. die Trübung der unverdünnten Substrate lag außerhalb des Messbereichs der Trübungsmesssonde (0-2.000 FNU).

Tab. 4-1 (S.45) gibt eine Übersicht zu den verwendeten Substraten. Anhand der Bilder lässt sich auf unterschiedliche Färbungen aber auch Feststoffgehalte der Schlämme schließen. Bezüglich der Feststoffgehalte und daraus resultierend der Trübungswerte wurde die Rangfolge 1>4>2>3>5 erwartet, d.h. die AFS-Konzentration und Trübung wurde für Substrat 1 am höchsten eingeschätzt.

Tab. 4-1: *Verwendete Substrate für den Vorversuch*

Abk.	Bild	Beschreibung	Verdünnung
M(v)		Milch verdünnt ; REWE 3,5 % Fett	1 : 882
C		Vita Cola – schwarz; unverdünnt	1 : 1
MC		Gemisch (1:1) aus M(v) und C (1:1)	-
1		Bodenschlamm aus dem vom Schlamm-speicher (VK+NKB) einer SBR Anlage (SBR-A)	1 : 10
2		eingedickter Belebschlamm , aus dem Belebungsbecken einer SBR-Anlage (SBR-A), bei Stillstand der Belüftung entnommen	1 : 10
3		Belebschlamm (homogenisiert) aus dem Belebungsbecken einer SBR-Anlage (SBR-B); während der Belüftung entnommen	1 : 10
4		eingedickter Belebschlamm , aus dem Belebungsbecken einer SBR-Anlage (SBR-C); bei Stillstand der Belüftung entnommen	1 : 10
5		Primärschlamm aus erweiterter, zweiter Vorklärung eines Wirbelbett-schwebverfahrens (WSB)	1 : 10

In Abb. 4-2 sind die Ergebnisse der Trübungsmessung (linke Grafik) und der AFS-Bestimmung (rechte Grafik) gegenübergestellt. Bezüglich der Trübungswerte fällt zunächst auf, dass die Sonde 2 permanent höhere Werte als Sonde 1 lieferte. Der Fehler beträgt jedoch nur 4 - 9% und liegt damit innerhalb der vom Hersteller angegebenen Genauigkeitsgrenzen ($\pm 5\%$ vom aktuellen Messwert $\pm 1\%$ vom Messbereichsendwert, d.h. ± 20 FNU). Im Hinblick der AFS-Bestimmung ist festzustellen (Grafik rechts), dass es beim C-Substrat größere Unterschiede bei der Doppelbestimmung gab. Die ist auf die unzureichende Trocknung des Substrats zurückzuführen (hoher Zuckergehalt der Cola).

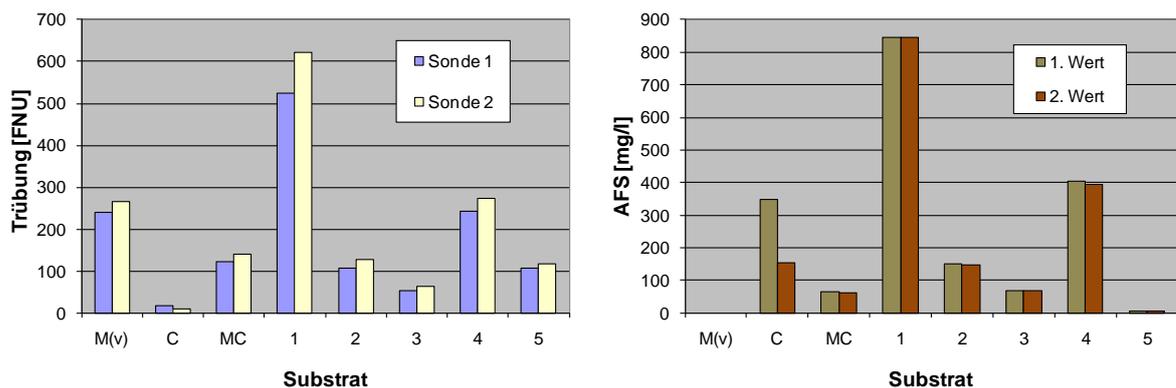


Abb. 4-2: Substratspezifische Trübungswerte (links) und AFS-Konzentrationen (rechts)

Bezüglich der substratspezifischen Messwerte ist bemerkenswert, dass die sehr stark verdünnte Milch (Substrat M(v)) einen relativ hohen Trübungswert liefert, aber keine - zumindest keine nachweisbaren - abfiltrierbaren Stoffe AFS enthält. Bei der Cola (Substrat C) ist genau das Gegenteil der Fall. Wie erwartet stellen beide Substrate somit Extreme dar, für die der ansonsten typisch lineare Zusammenhang von Trübung [FNU] und AFS [mg/l] ungültig ist. Bei den Schlämmen (Substrate 1 – 5) scheint dieser Zusammenhang hingegen zu existieren, wenngleich das Substrat 5 auch diesbezüglich eine Sonderstellung einnimmt. Denn obwohl im Primärschlamm aus der erweiterten Vorklärung des WSB-Verfahrens kaum abfiltrierbare Stoffe nachweisbar waren, lieferte dieses Substrat einen relativ hohen Trübungswert. Letztlich bestätigte sich deshalb auch die für die Schlämme erwartete Rangfolge der Trübungswerte nicht.

In Abb. 4-3 (S. 47) sind die Mittelwerte der gemessenen Trübungen und den zugehörigen AFS-Gehalten der Substrate gegenübergestellt, wodurch der substratspezifische Zusammenhang beider Messgrößen deutlich wird. Offensichtlich besteht nur für die Substrate 1 – 4 ein gemeinsamer, d.h. unspezifisch und somit substratübergreifender, linearer Zusammenhang. Das hohe Bestimmtheitsmaß der entsprechenden Regressionsfunktion (gestichelte Linie) bestätigt die Stärke der Korrelation. Demnach spielt die Festlegung geeigneter Einsatzbereiche für die Trübungsmesssonde eine entscheidende Rolle.

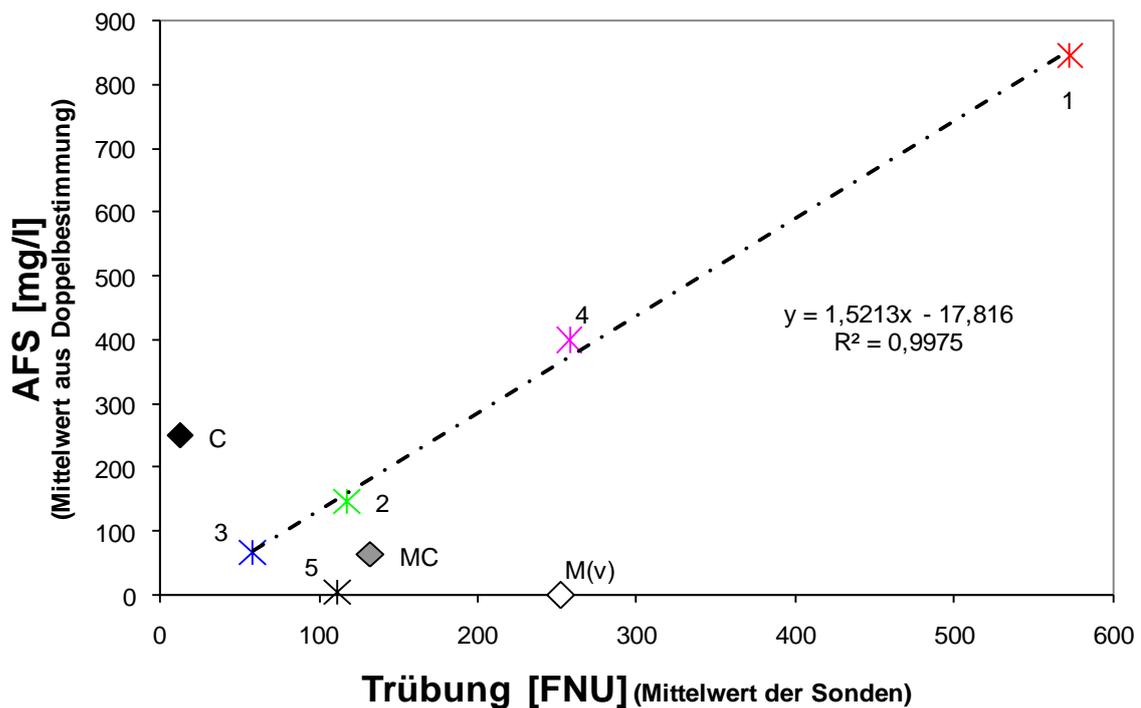


Abb. 4-3: Substratspezifischer Zusammenhang von Trübung und AFS-Gehalt

Als wesentliches Ergebnis der Vorversuche bleibt somit festzuhalten, dass es einerseits prinzipiell möglich ist, verschiedene Schlämme aus KKA anhand der Trübungsmessung vergleichend zu charakterisieren. Andererseits gibt es aber auch Substrate, bei denen entweder die Trübungsmessung oder/und die AFS-Bestimmung an ihre Grenzen stoßen und somit nicht auf einen Zusammenhang beider Messgrößen geschlossen werden kann. Gänzlich offen bleibt die Frage, inwieweit unterschiedliche Verdünnungen der Substrate zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Bezüglich der mangelhaften AFS-Bestimmung kann als Grund für die Anwendungsgrenzen die definierte Porenweite (0,3-1 μm) der verwendeten Filter angegeben werden, da kleinere Partikel den Filter passieren können und somit nicht miterfasst werden. Nichtsdestotrotz können gerade kleinste Partikel für eine sehr hohe Trübung des Mediums verantwortlich sein, was im Vorversuch anhand der Milch (Substrat M(v)) und dem atypischen Primärschlamm (Substrat 5) deutlich wurde. Ob dieser Effekt auf einen höheren Streueffekt oder eine verminderte Transmission zurückzuführen ist, lässt sich aufgrund der speziellen Funktionsweise der verwendeten Trübungsmesssonde (produktspezifische Verknüpfung der Streu- und Durchlichtsignale zu einem trübungslinearem Ausgabesignal) jedoch nicht sagen.

Insgesamt ergibt sich die Notwendigkeit, bei weiteren Untersuchungen die Streulicht- und Durchlichtsignale verschiedene Schlämme (Substrattests) bei verschiedenen Feststoffkonzentrationen (Verdünnungen) separat zu erfassen und auszuwerten. Vor diesem Hintergrund wurden die Hauptversuche zur Überprüfung der Prototypen durchgeführt.

4.2. Hauptversuche mit D/S-Testmuster

Als vorläufiges Ergebnis der geleisteten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hatten WHOrga und IPSF im Frühjahr 2010 erste Testmuster für eine Trübungsmesssonde gebaut, die der BUW als Prototypen für ihre Untersuchungszwecke zur Verfügung gestellt wurden. Die Testmuster hatten den Status einer Erstentwicklung, d.h. sie waren noch unvollkommen und bedurften einer Weiterentwicklung. Ihr Aufbau und ihre Funktionsweise geht aus Abb. 4-4 hervor (vgl. Foto 12, S. 17 R-KMU). Demnach waren im Messkopf bereits 2 IR-Sender und ein IR-Sensor sowie zwei Spiegel und zwei Einbauteile (in Form extrudierter Trapeze) zur Umlenkung der IR-Strahlen eingebaut. Allerdings waren die Testmuster nur mit einer Ersatzelektronik ausgestattet, so dass entweder der Durchlichtstrahler (D-Testmuster) oder der Streulichtstrahler (S-Testmuster) aktiviert waren. Ein Prozessor zur Verarbeitung beider Messsignale fehlte noch (vgl. Abschnitt 4.3, S. 18 ff R-KMU). Die Spannungsversorgung der Testmuster erfolgte mit 9 Volt Gleichstrom. Am Photosensor lag die Spannung in Abhängigkeit der Signalstärke von 0,02 bis 4,38 V an.

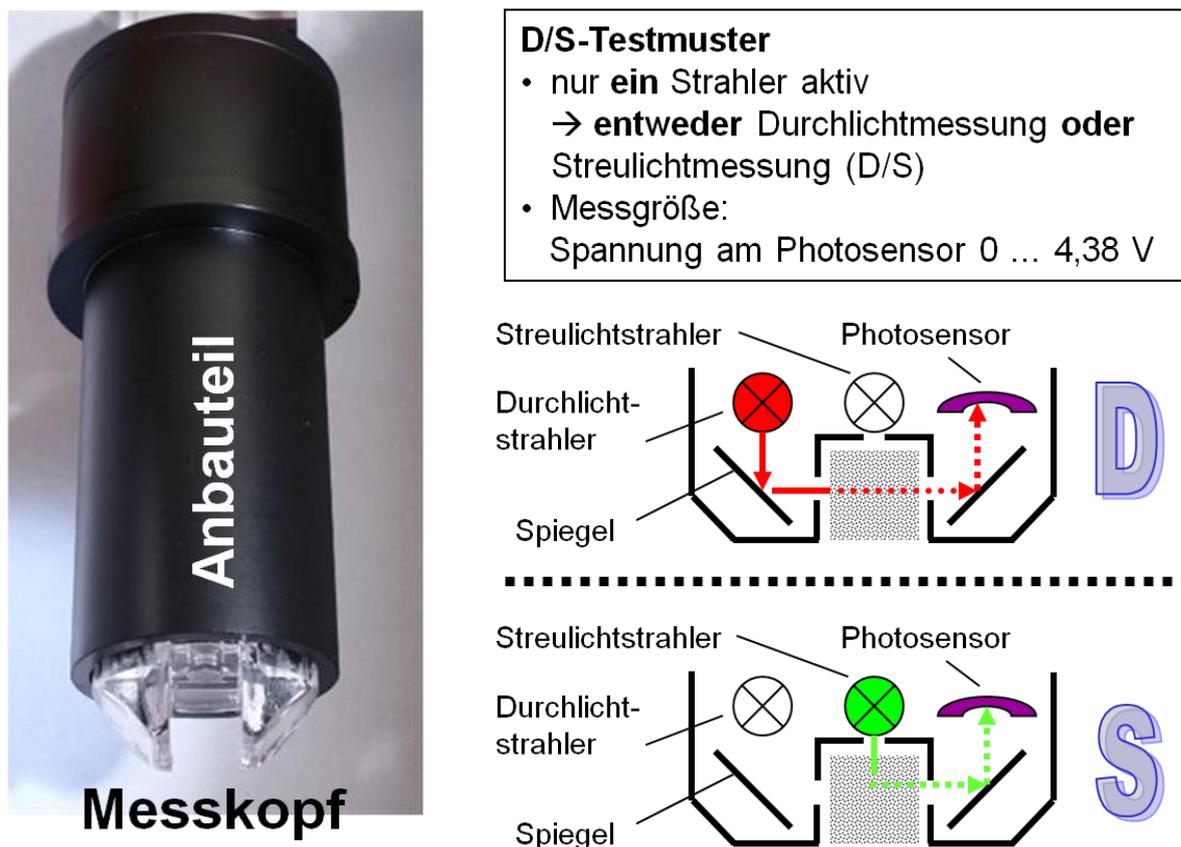


Abb. 4-4: Aufbau (links) und Funktionsweise (rechts) der D/S-Testmuster

Aufgrund des Erstentwicklungsstatus war es primäres Ziel der Untersuchungen, die prinzipielle Eignung der D/S-Testmuster festzustellen und Vorschläge für eine Anpassungsentwicklung zu erarbeiten. Zu diesem Zweck sollten die Messsignale der Testmuster, welche als Spannungen [V] im Bereich 0-4,38 V vorlagen, mit denen der Messsonde *TurbiSens* bei un-

terschiedlichen Substraten in unterschiedlichen Verdünnungen aufgezeichnet werden. Der Vergleich mit den Trübungswerten der Messsonde *TurbiSens* sollte Aufschluss darüber geben, in welchen Messbereich die Testmuster reproduzierbare Messsignale liefern.

Sekundäres Untersuchungsziel war es dann, die Messsignale der Trübungsmessungen untereinander sowie mit dem zugehörigen analytisch bestimmten Feststoffgehalt der Substrate zu korrelieren. Daraus ableitend sollten Grenzspannungen gefunden werden, die einen erhöhten Schlammabtrieb aus einer KKA signalisieren könnten.

4.2.1. *Verwendete Testsonden und Testmedien (Substrate)*

Für die Untersuchungen kamen insgesamt vier Sonden zum Einsatz (Abb. 4-5), und zwar:

- IER-Messsonde „TurbiSens“.
- D-Testmuster zur Durchlichtmessung,
- S1-Testmuster zur Streulichtmessung,
- S2-Testmuster zur Streulichtmessung (Option zu S1).

Das zweite S-Testmuster (S2) wurde in Ergänzung zum ersten betrieben. Denn S1 lieferte unbefriedigende Ergebnisse, und es sollte ein Baufehler ausgeschlossen werden.

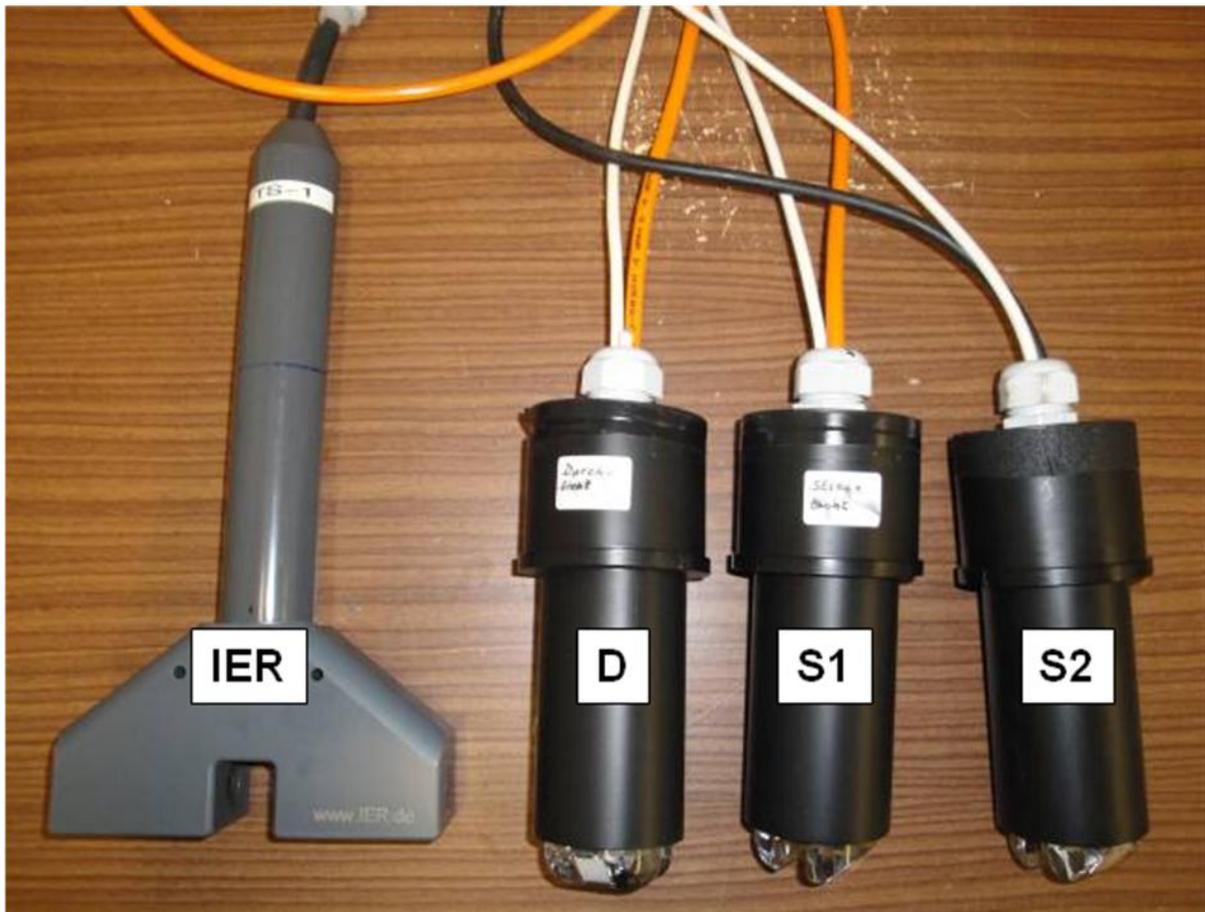


Abb. 4-5: *Für die Untersuchungen zum Einsatz kommende Messsonden*

Als Testmedien wurden unterschiedliche Schlämme verschiedener Kläranlagen in Weimar und dessen Umland sowie Formazin verwendet. Insgesamt wurden die Sonden in 10 Messreihen bzw. 10 Substraten mit 157 Verdünnungsansätzen (VA) getestet, wobei die Analyse der Ausgangssubstrate sowie ihrer Verdünnungsansätze in Abhängigkeit von der Fragestellung variierte (Tab. 4-2). Die Messreihen M01 bis M04 hatten grundlegenden bzw. sondierenden Charakter, weswegen lediglich die Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe erfolgte. Für die Messreihen M05 bis M08 wurden dann zusätzliche Parameter in das Analyseprogramm aufgenommen. Die Analyse der Parameter erfolgte in M01, M02 und M03 als Einzelbestimmung, in M05 bis M08 als Doppelbestimmung.

Tab. 4-2: Überblick zu den Untersuchungen und den dabei verwendeten Substraten (die angegebenen Werte beziehen sich auf die originären, d.h. unverdünnten Substrate)

Messreihe		Charakteristik der Substrate					Anzahl der VA*
Nr.	Substrat FS: Faulschlamm ; BS: Belebtschlamm ÜSS: Überschussschlamm	AFS [g/l]	oAFS [%]	TR [%]	oTR [%]	CSB [mg/l]	
01	FS KA Weimar	37,7**					28
02	BS KKA Mellingen (SBR)						17
03	ÜSS KA Weimar (1)	8,5	75,8				21
04	ÜSS KA Mellingen	3,3	85,8				16
05	ÜSS KA Weimar (2)	6,6					18
06	ÜSS KA Nohra	5,9	76,2	0,5	34,9	4220	16
07	ÜSS KA Ettersburg/Siedlung	5,4	69,5	0,5	40,0	5225	14
08	ÜSS KA Ettersburg	10,6	73,0	1,1	26,1	9530	15
09	BS KA Ottstedt (STK) ***						1
10	Formazin (Standard)						11

*VA: Versuchsansätze

** der angegebene Werte resultiert rechnerisch aus dem bei einem Verdünnungsverhältnis von $m = 1:n = 1:1,31$ analytisch bestimmten Wert von 28,82 g/l ($28,82 \times 1,31=37,7$)

*** Die Messreihe mit dem extrem verdünnten Belebtschlamm aus der Kläranlage Ottstedt wurde abgebrochen, da bereits die erste Messung der unverdünnten Probe den Maximalwert von $U_{DL}=4,38$ V zur Folge hatte.

Durch die Verwendung von Formazin als Substrat sollte die Messgenauigkeit der Sonden im Vergleich zur handelsüblichen Trübungssonde *TurbiSens* unter standardisierten Bedingungen ermittelt werden. Im Gegensatz zu allen anderen Substraten stand das Formazin aber nur in geringen Mengen zur Verfügungen, weswegen ein anderer Versuchsaufbau und ein anderes Vorgehen zur Herstellung der Verdünnungsreihe als bei den Untersuchungen mit den Schlämmen M01 – M09 gewählt wurde. Nachfolgend wird deshalb zwischen Versuchsaufbau und Durchführung der Messreihen M01-M09 sowie M10 (Formazin) unterschieden.

4.2.2. Versuchsaufbau und Durchführung der Messreihen 01-09

Der Versuchsaufbau für die Messreihen mit Schlämmen geht aus den Abb. 4-6 (S. 51) und Abb. 4-7 (S. 52) hervor. Im Prinzip waren alle Messsonden auf einer Traverse bei gleicher Höhe aller Messköpfe montiert. Während der Messung tauchten alle Sonden in einem Behälter (10 cm Abstand zum Behälterbodens) ein, in dem das Substrat durch ein Rührgerät homogenisiert wurde. Die Rührerdrehzahl wurde bei Bedarf der Viskosität der Substrate angepasst, d.h. mit zunehmender Verdünnung (steigender Viskosität) verringert. Zum Austausch der Substrate bzw. für deren Verdünnung und zur Reinigung der Sonden wurde die Traverse nebst Sonden an den Gestellen nach oben verschoben, so dass der Behälter entnommen werden konnte und die Sonden der Reinigung zugänglich waren.

Die Messsignale der Testmuster lagen als Spannungen [V] im Bereich 0 bis 4,38 V vor und waren entweder das Ergebnis der Durchlichtmessung (D-Testmuster) oder der Streulichtmessung (S-Testmuster). Das Messsignal der IER-Sonde wurde über den integrierten Messumformer in Trübungseinheiten [FNU] ausgegeben und auch als solches dokumentiert. Als Anzeigergerät für die Messsignale aller Sonden diente wiederum der Memograph (Firma Endress+Hauser, Modell *Memograph RSG 10*). Alle Messsignale wurden im Memographen kontinuierlich mitgeschrieben und zusätzlich von Hand protokolliert, nachdem sich konstante Werte am Auslesegeräte eingestellt hatten.



Abb. 4-6: Versuchsaufbau bei den Messreihen mit Schlämmen (M01-M09)

Zu Beginn jeder Messreihe und nach jeder Messung (im Verdünnungsansatz) wurden die Sondenköpfe vorsichtig mit Wasser und Wischtuch gereinigt und der Reinigungseffekt durch Kontrolle der Referenzwerte sichergestellt. Die Referenzwerte (Extrema) der einzelnen Messsonden wurden durch freie Messung gegen Luft bzw. durch Abdecken der Photosensoren kontrolliert. Für das S-Testmuster (Streulicht) musste die maximale Spannung durch Anhalten eines Spiegels ($U_{SL_max}=4,38$ V, d.h. 100% Reflexion bzw. Streuung des Lichtstrahls) und die minimale Spannung durch Messung gegen Luft ($U_{SL_min}=0$ V, d.h. keine Streuung) erreicht werden. Für das D-Testmuster (Durchlichtmessung) sollte die Messung gegen Luft den Maximalwert ($U_{DL_max}=4,38$ V, d.h. 100% Transmission) und das Abdecken des Photosensors den Minimalwert ($U_{DL_min}=0$ V, d.h. keine Transmission) der Spannung ergeben. Die IER-Messsonde musste bei Messung gegen Luft den Minimalwert 0 FNU und bei Abdecken des Photosensors die Meldung <dirty> (Messwert überschritten) liefern.

Zunächst waren nur die zwei Testmuster (D und S1) sowie die Referenzsonde *Turbisens* installiert (Abb. 4-7, links). Ab Messreihe M05 kam ein zweites S-Testmuster (S2) hinzu (Abb. 4-7, rechts). Alle Sonden befanden sich im annähernd gleichen Abstand zum Rührwerk bzw. zum Behälterrand, so dass alle optimal angeströmt wurden.

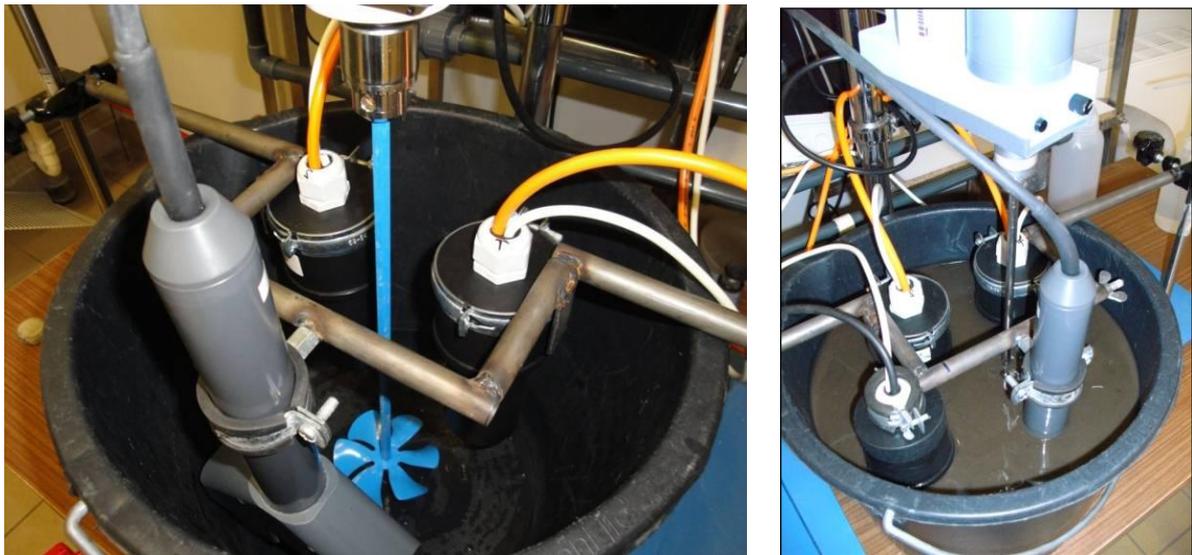


Abb. 4-7: Versuchsaufbau mit zwei Testmustern (links) bzw. mit drei Testmustern (rechts)

Die Herstellung der Versuchsansätze erfolgte durch die schrittweise Verdünnung von jeweils 12 Liter Ausgangssubstrat direkt im Behälter, d.h. das Ausgangssubstrat wurde sukzessive durch entionisiertes Wasser ersetzt bzw. mit diesem ausgetauscht. Die entnommene Substratmenge (V_E) entsprach dabei exakt der Zugabemenge (V_Z) an entionisiertem Wasser ($V_E=V_Z$), so dass für jeden Versuchsansatz 12 Liter im Behälter verblieben, z.B. 2 L Substratentnahme mit anschließender Zugabe von 2 L H_2O . Die substituierte Menge (Austauschvolumen $V_A=V_E=V_Z$) variierte zwischen 1 und 6 Liter und nahm i. d. R. mit zunehmender Verdünnung ab (vgl. Abb. 4-8, S. 53). Aus den protokollierten Austauschvolumina $V_{A(K)}$ der einzelnen Versuchsdünnungsansätze wurde im Nachgang der Messreihen auf das Verdünnungsver-

hältnis geschlossen (vgl. 4.2.4, S. 55). Dabei ergaben sich rationale Verdünnungsdivisoren (n_K), was jedoch ohne Bedeutung für die Ergebnisinterpretation war.

Zur Kontrolle der richtigen Entnahme- und Zugabemengen aber auch zum Ausgleich von Verdunstungs- und Entnahmeverlusten wurde jeder Ansatz (Behälter mit Substrat) vor und nach der Messung gewogen. Verdunstungsverluste wurden vor der Messung mit deionisiertem Wasser ausgeglichen. Die Entnahmeverluste, wie sie aus dem Anhaften von Substrat an den Außenflächen der Entnahmegerate (Schöpfer, Becherglas) sowie den Messsonden resultieren, wurden nach dem Messen durch Rückstellproben des vorhergehenden Verdünnungsansatzes korrigiert.

Abb. 4-8 zeigt am Beispiel des Überschussschlammes der KA Ettersburg (M08) das Vorgehen und das Ergebnis der schrittweisen Verdünnung. Im Diagramm ist das Austauschvolumen V_A angegeben. Außerdem wird ersichtlich, aus welchem Verdünnungsansatz die Probenahme (PN) für die Parameteranalyse erfolgte (gelbe Markierung). Generell wurden von jedem Verdünnungsansatz Rückstellproben generiert, doch wurden nur ausgewählte Verdünnungsansätze analysiert - im Fall der M08 jeder Vierte und zusätzlich der Letzte. Anhand der Stichprobenanalyse wurde ein Abgleich hypothetischer (rechnerisch ermittelt) und tatsächlicher (analytisch bestimmt) Konzentrationen in den Verdünnungsansätzen möglich. Ohne auf die Einzelheiten der Fehleranalyse eingehen zu wollen bleibt festzuhalten, dass mit dem gewählten Vorgehen exakte Verdünnungen hergestellt wurden.

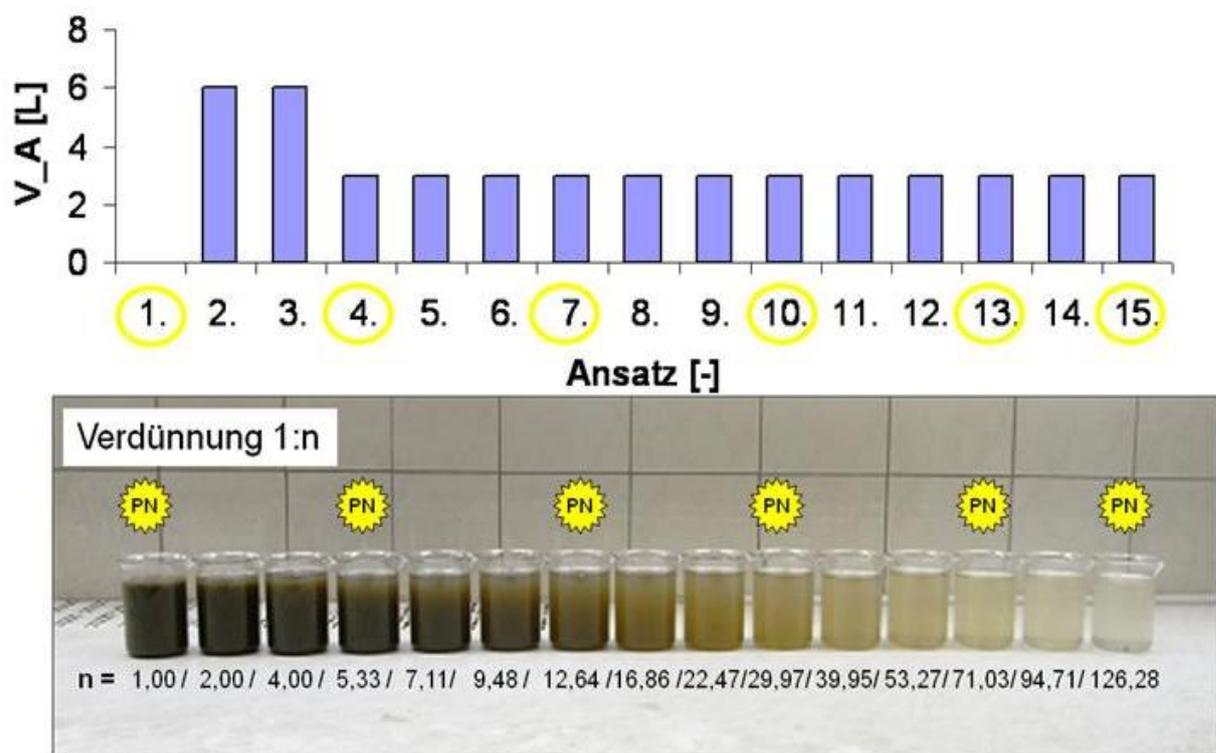


Abb. 4-8: Verdünnungsreihen für Schlämme am Beispiel vom ÜSS der KA Ettersburg (M08)

4.2.3. Versuchsaufbau und Durchführung der Messreihen 10

Bei der Messreihe 10 wurde Formazin 4.000 FNU als Substrat verwendet. Dieses stand aber nur in geringen Mengen zur Verfügung (200 ml), so dass der Versuchsaufbau aus den Messreihen M01-09 nicht zur Anwendung kommen konnte (Behälter mit 12 L Substratinhalt). Der Versuch wurde so aufgebaut, dass bei allen Verdünnungsansätzen lediglich 400 ml Substrat benötigt wurden. Dies führte allerdings dazu, dass die IER-Messsonde *Turbisens* und die D/S-Testmuster für alle Verdünnungsansätze sequentiell untersucht werden mussten.

In einem ersten Schritt wurde zunächst der jeweilige Verdünnungsansatz für die Messung hergestellt. Der erste Verdünnungsansatz entsprach einer Konzentration von 2.000 FNU, was die obere Messbereichsgrenze der IER-Messsonde *TurbiSens* und somit den Startpunkt der Untersuchungen darstellte. Er wurde durch Verdünnung des Formazins mit gleichen Teilen an entionisiertem Wasser erhalten (Abb. 4-9). Alle weiteren Verdünnungsansätze basierten auf der schrittweisen Weiterverdünnung des ersten Ansatzes. Sie wurden jeweils vor der Überprüfung der Messsonden (Schritte 2 und 3) hergestellt.

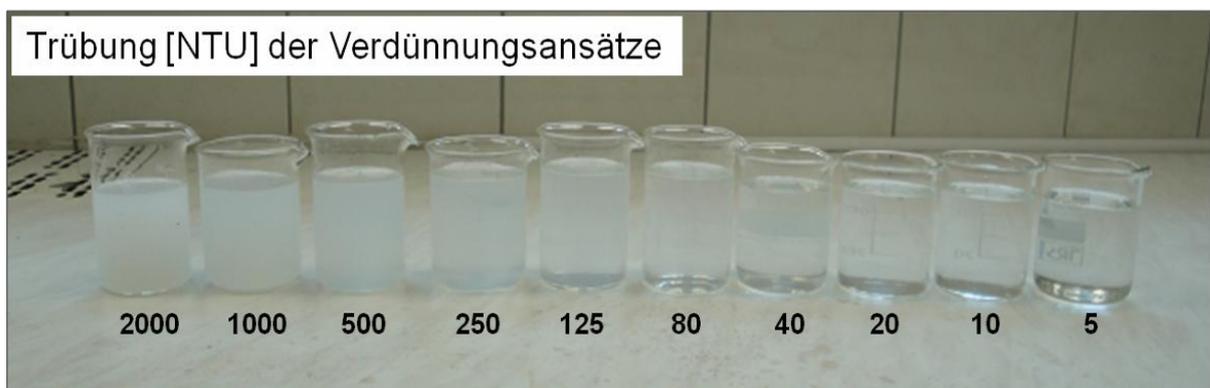
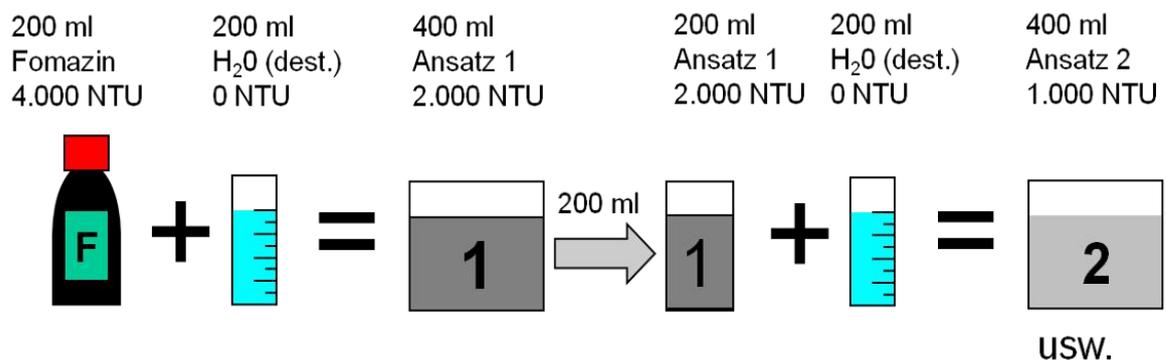


Abb. 4-9: Verdünnungsreihen für Formazin Standardlösung (M10)

In einem zweiten Schritt wurden zunächst die Messsignale der IER-Trübungsmesssonde *TurbiSens* des jeweiligen Verdünnungsansatzes aufgezeichnet. Dazu wurde der Verdünnungsansatz (jeweils 400 ml) gemeinsam mit der Messsonde in zwei ineinander gesteckte lichtundurchlässige Plastiktüten gegeben und der Inhalt durch walken und behutsames Schwenken homogenisiert. Die Messwerte wurden protokolliert, sobald an der Anzeige konstante Werte ablesbar waren (vgl. Abb. 4-10, S. 55, links).



Abb. 4-10: Durchführung der Messreihe 10 mit Formazinstandard: mit Plastiktüte für IER-Sonde „Turbisens“ (links) und mit Becherglas für die Testmuster (rechts)

Im dritten Schritt wurde dann der Verdünnungsansatz in einen Messbecher überführt, in dem die Messung mit den D/S-Testmustern vorgenommen wurde. Der Messbecher war durch eine Kunststoff-Doppelmuffe vor Lichteinfall geschützt. Die Homogenisierung des Verdünnungsansatzes erfolgte mit einem Magnetrührer (Abb. 4-10, rechts). Die Messsignale der D/S-Testmuster wurden am Memographen angezeigt und protokolliert, sobald sich konstante Werte einstellten. Nachdem die Überprüfung der Messsonden für den jeweiligen Verdünnungsansatz abgeschlossen war, wurden alle Sonden gründlich gereinigt. Der Reinigungserfolg wurde in Analogie zu den Messreihen M01-08 anhand der Referenzmessungen gegen Luft kontrolliert (vgl. 4.2.2, S. 51 f.). Vom homogenisierten Verdünnungsansatz wurden 200 ml entnommen, um den nächsten Verdünnungsansatz herzustellen (vgl. Abb. 4-10, S. 55).

4.2.4. Vorgehen bei der Auswertung und Erwartungswerte

Für die Überprüfung der Testmuster wurden die Messsignale, d.h. die Durchlichtspannung U_{DL} sowie die Streulichtspannung U_{SL} bei zunehmender Verdünnung der unterschiedlichen Substrate aufgezeichnet. Während bei Messreihe M10 die Verdünnung des Substrates vorgegeben war, musste für alle anderen Versuchsreihen die relative Verdünnung des jeweiligen Substrates zunächst errechnet werden. Aus den protokollierten Austauschvolumina $V_{A(K)}$ der einzelnen Versuchsansätze wurde dabei wie folgte auf die relative Verdünnung 1:n bzw. den Verdünnungsdivisor n_K des Ansatzes geschlossen:

$$n_k = \frac{n_{(k-1)} \times V_0}{(V_0 - V_{A(k)})}$$

- mit n_k : Verdünnungsdivisor der Verdünnungsstufe k
 $n_{(k-1)}$: Verdünnungsdivisor der vorhergehenden Verdünnungsstufe $k-1$
 V_0 Ausgangsvolumen des Ansatzes ($V_0 = 12 \text{ L}$)
 $V_{A(k)}$ Austauschvolumen der Verdünnungsstufe ($1 \text{ L} \leq V_{A(k)} \leq 6 \text{ L}$)

Mit der sukzessiven Verdünnung der Ansätze, d.h. mit abnehmendem Feststoffgehalt wurde eine kontinuierliche Zunahme des Durchlichtsignals respektive der Durchlichtspannung U_{DL} am D-Testmuster erwartet, da immer weniger Partikel den Lichtstrahl adsorbieren würden. Für die S-Testmuster wurde hingegen davon ausgegangen, dass die Streulichtspannungen U_{SL} nur bei geringen Feststoffgehalten messbar sind, da nur dann am Photosensor ein Lichtsignal ankommen würde. Der Spannungsverlauf am S-Testmuster wurde als quadratische Parabel erwartet, da mit zunehmender Verdünnung immer weniger Partikel den Lichtstrahl streuen.

Die geschilderten Zusammenhänge sind in Abb. 4-11 skizziert. Neben den Spannungsverläufen der Testmuster (U_{DL} Durchlichtspannung, U_{SL} Streulichtspannung) wird auch das lineare Trübungssignal der IER-Messsonde *TurbiSens* angegeben. Anzumerken ist, dass die Aufzeichnung der Spannungsverläufe bzw. der Trübungssignale im Versuch mit zunehmender Verdünnung und somit von rechts nach links in Abb. 4-11 erfolgte.

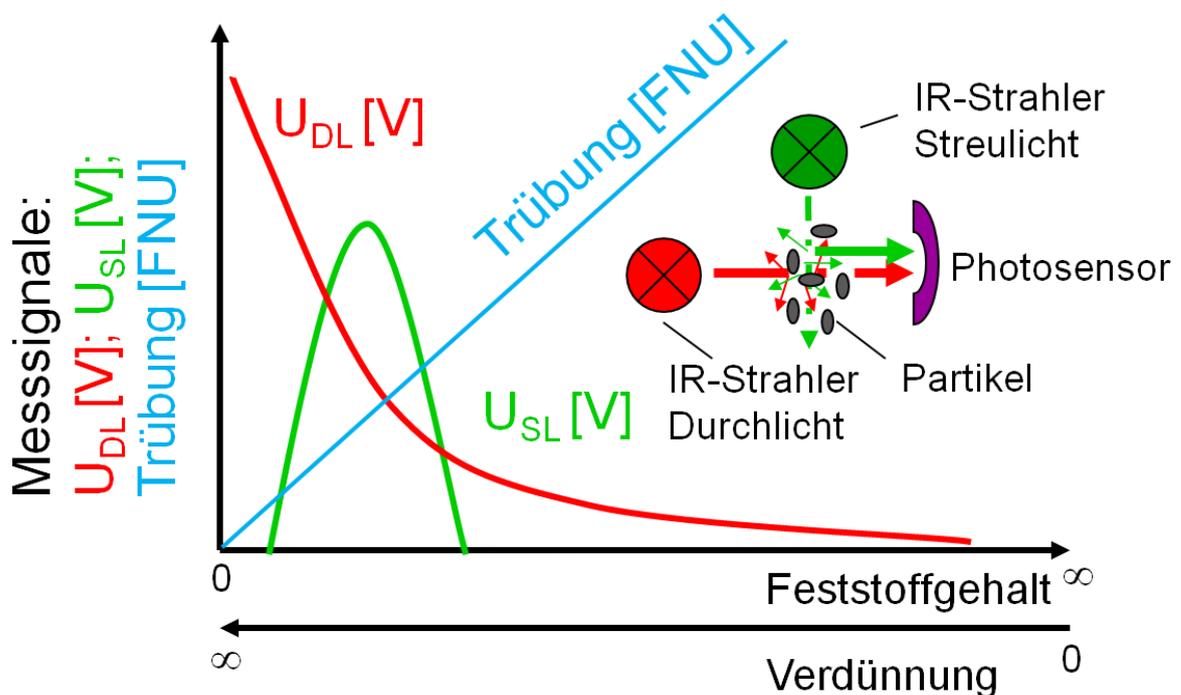


Abb. 4-11: Erwartungswerte für die Messsignale bei zunehmendem Feststoffgehalt, respektive abnehmender Verdünnung der Versuchsansätze

4.2.5. Spannungsverläufe der D/S-Testmuster

In Abb. 4-12 werden die aufgezeichneten Kurven der Testmuster für die Durchlichtmessung (D-Testmuster, links) und Streulichtmessung (S1-Testmuster, rechts) in Bezug auf die Verdünnungsansätze der Substrate angegeben. Zu beachten sind einerseits die logarithmischen Skalierungen der Abszissen (Verdünnungsdivisoren) in beiden Grafiken, zum anderen die unterschiedlichen Skalierungen der Ordinaten: 0 bis 5 V für die Durchlichtspannungen (links) und 0 -0,1 V für die Streulichtspannungen (rechts).

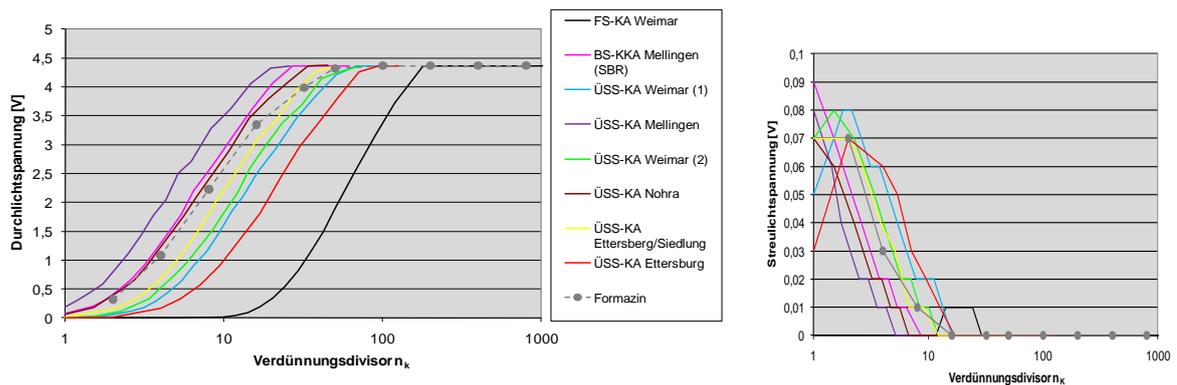


Abb. 4-12: Gemessene Spannung am Photosensor der Durchlichtmessung (links) und Streulichtmessung (rechts) bei unterschiedlichen Substraten und deren Verdünnungen

Die Ergebnisse der Durchlichtmessung (links) entsprechen durchaus den Erwartungen: Mit zunehmender Verdünnung nimmt die Spannung am Photosensor zu. Der Messbereich wird in vollem Umfang ausgenutzt (0 – 4,38 V). Im Bereich zwischen 1 bis 4 V ist offensichtlich ein logarithmischer Zusammenhang mit der Verdünnung gegeben (linearer Kurvenverlauf). Der parallele Verlauf der Kurven (gleicher Anstieg der Tangenten) deutet zudem an, dass dieser Zusammenhang unabhängig von der Substratart existiert. Vor dem Hintergrund, dass die Trübungsmesssonde bei unterschiedlichen Kleinkläranlagen (mit unterschiedlichen Schlämmen) zum Einsatz kommen soll, ist dies ein überraschend gutes Ergebnis.

Demgegenüber werfen die Resultate der Streulichtmessung in zweierlei Hinsicht Fragen auf: Warum bleiben die maximalen Spannungen für alle Substrate unterhalb von 0,1 V und wieso treten die Maxima bei geringen Verdünnungen respektive hohen Feststoffgehalten auf? Für die geringen Streulichtspannungen, d.h. die geringe Lichtintensität am Photosensor, kommen prinzipiell folgende Ursachen in Frage:

- fehlerhafter Zusammenbau des S-Testmusters (Baufehler).
- Leistung des Streulichtstrahlers zu gering und/oder Abschwächung des Lichtstrahls in der Messzelle zu stark, d.h. der Abstand von Austritt zu Eintritt des Lichtstrahls in der Messzelle ist zu groß (Konstruktionsfehler).

Um einen Baufehler des S1-Testmusters ausschließen zu können, wurden mit einem zweiten Streulichttestmuster (S2-Testmuster) ab der Messreihe M05 (ÜSS-KA Weimar 2) entspre-

chende Vergleichsmessungen durchgeführt. Im Ergebnis waren aber keine signifikanten Unterschiede festzustellen, d.h. ein Baufehler lag nicht vor.

In Abb. 4-13 sind beispielhaft die bei Messreihe M05 aufgenommen Messsignale der Testmuster bei unterschiedlichen Verdünnungen, respektive unterschiedlichen Feststoffgehalten angegeben. Demnach lagen für beide S-Testmuster die Messspannungen lediglich im Millivoltbereich (0 bis 0,09 V, abzulesen an der linken Ordinate). Explizit sei darauf hingewiesen, dass vor und nach der Untersuchung die Referenzwerte (Extrema) der Messsonden durch freie Messung gegen Luft ($U_{S_min}=0$ V, d.h. keine Streuung) bzw. durch Anhalten eines Spiegels ($U_{S_max}=4,38$ V, d.h. 100% Reflexion bzw. Streuung des Lichtstrahls) ermittelt wurden, d.h. die Elektronik der Testmuster konnte als fehlerfrei festgestellt werden.

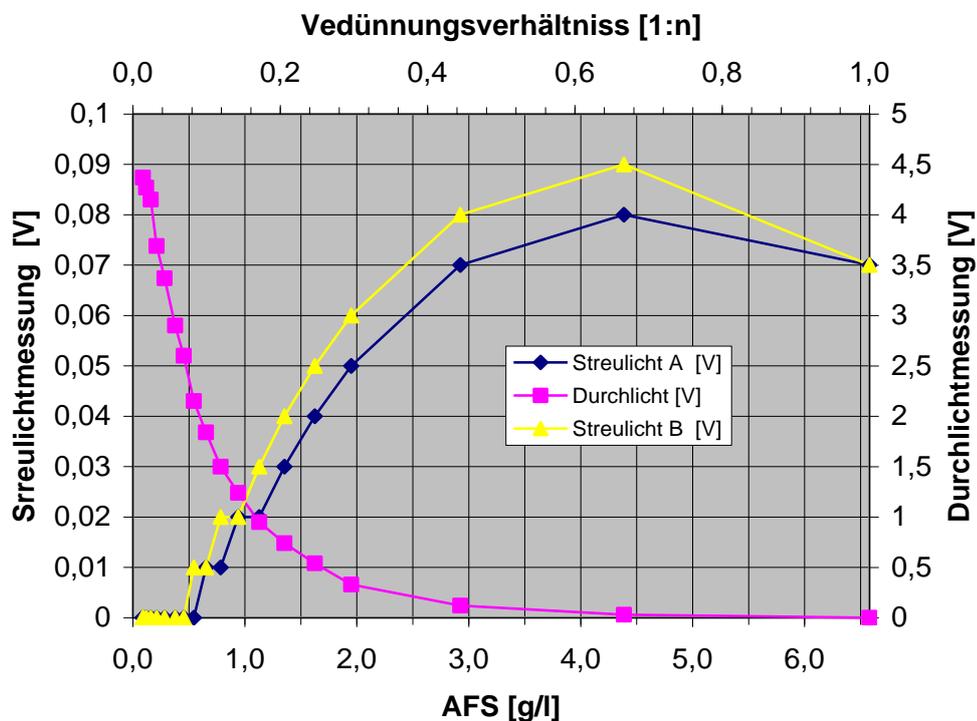


Abb. 4-13: Messspannungen an den Testmustern bei unterschiedlichen Verdünnungen, respektive AFS-Gehalten am Beispiel der Messreihe M05 (ÜSS KA Weimar 2)

Offensichtlich sind die Messspannungen der S-Testmuster konstruktionsbedingt sehr niedrig. In der Konsequenz kann die Streulichtmessung bei gleicher Konfiguration der S-Testmuster auch keinen Beitrag zur Trübungsmessung leisten. Interessant ist aber, dass die Messsignale beider S-Testmuster den für Streulichtmessung charakteristischen Verlauf einer Glockenkurve zeigen – wengleich das Maximum paradoxerweise bei relativ hohen Feststoffgehalten (abfiltrierbare Stoffe - AFS) auftritt. So wird das Streulichtsignal in der Messzelle zwar ultimativ abgeschwächt, doch ist im Bereich zwischen 0,02 und 0,09 V die Korrelation zum Feststoffgehalt gegeben. Für die weitere Entwicklungsarbeit stellt sich deshalb die Frage, mit welchem technischen und finanziellen Aufwand es möglich ist, den theoretisch vorhandenen Messbereich von 0 bis 5 V (100%) besser auszunutzen, so dass das Messsignal in höherer

Auflösung vorliegt. In Relation zur Durchlichtmessung (0 bis 4,5 V in Abb. 4-13 an der rechten Ordinate abzulesen) wäre eine Verstärkung des Streulichtsignals um den Faktor 50 eine denkbar Option, d.h. eine Erhöhung der Lichtintensität bzw. der Leistung der IR-Sende-LED.

Generell muss aber davon ausgegangen werden, dass die Integration der Streulichtmessung beim Bau der zukünftigen Trübungsmesssonde zusätzliche Kosten verursacht. Nichtsdestotrotz könnte dann ein breiterer Anwendungsbereich der Trübungsmesssonde in Aussicht gestellt werden, was im Hinblick der vielfältigeren Produktvermarktung sicherlich von Vorteil ist. In der getesteten Konfiguration kann das S-Testmuster jedenfalls keinen Beitrag zur Trübungsmessung leisten. Auch für die Versuchsauswertung sind die Ergebnisse der Streulichtmessung unbrauchbar, weswegen auf ihre Darstellung im Folgenden verzichtet wird.

4.2.6. *Substratspezifische Messkurven von D-Testmuster und IER-Messsonde*

In Abb. 4-14 (S.60) werden die Messkurven von D-Testmuster und IER-Messsonde *Turbisens* für alle Messreihen gezeigt. Gut zu erkennen ist die Gegenläufigkeit der Messsignale der Durchlichtspannungen des D-Testmusters (rote Linie mit Bezug auf linke Ordinate) einerseits und der Trübungswerte der IER-Messsonde (blaue Linie mit Bezug auf rechte Ordinate) andererseits. Mit zunehmender Verdünnung steigt die Durchlichtspannung an und der Trübungswert geht zurück. In diesem Punkt werden die Erwartungen somit bestätigt.

Die Anwendungsgrenzen der beiden Messprinzipien betrachtend (Durchlichtmessung beim D-Testmuster, kombinierte Streulicht- und Durchlichtmessung bei der IER-Sonde) fallen aber auch Unterschiede auf. So bietet die IER-Messsonde bei nahezu allen Substraten im stärker verdünnten Bereich (geringere Feststoffkonzentrationen) Vorteile, weil sie hier die feinen Unterschiede in den Feststoffkonzentrationen besser auflöst. Dies ist auf die zusätzliche Streulichtmessung des Gerätes zurückzuführen.

Mit zunehmenden Feststoffgehalt, respektive geringer Verdünnungen, fällt der Vorteil der Messgenauigkeit aber immer weniger ins Gewicht. Bei sehr hohen Feststoffgehalten scheint sogar das D-Testmuster von Vorteil, da der Messbereich der IER-Sonde hier überstiegen wurde (> 2.000 FNU) und die Sonde keine Werte mehr lieferte. Allerdings muss diese Aussage vor dem Hintergrund der Versuchsdurchführung relativiert werden, denn die Messreihen wurden in Richtung zunehmender Verdünnung geführt, d.h. die höchsten Trübungswerte je Messreihe sind das zufällige Ergebnis der jeweiligen Verdünnung und stellen somit nicht die Obergrenze des Messbereichs dar.

Bemerkenswert ist, dass die Messkurven des D-Testmusters bei allen Substraten einen stetigen Verlauf haben, während sich bei der IER-Messsonde diesbezüglich substratspezifische Unterschiede offenbaren. Sowohl bei Messreihe 01 als auch bei Messreihe 05 ist ein Knick bzw. ein Sprung im Kurvenverlauf zu erkennen. Ursache für diesen Knick dürfte die Tatsache sein, dass an dieser Stelle (200 FNU) der Umschaltzeitpunkt für die Durchlicht- und Streulichtmessung bei der IER-Trübungssonde liegt.

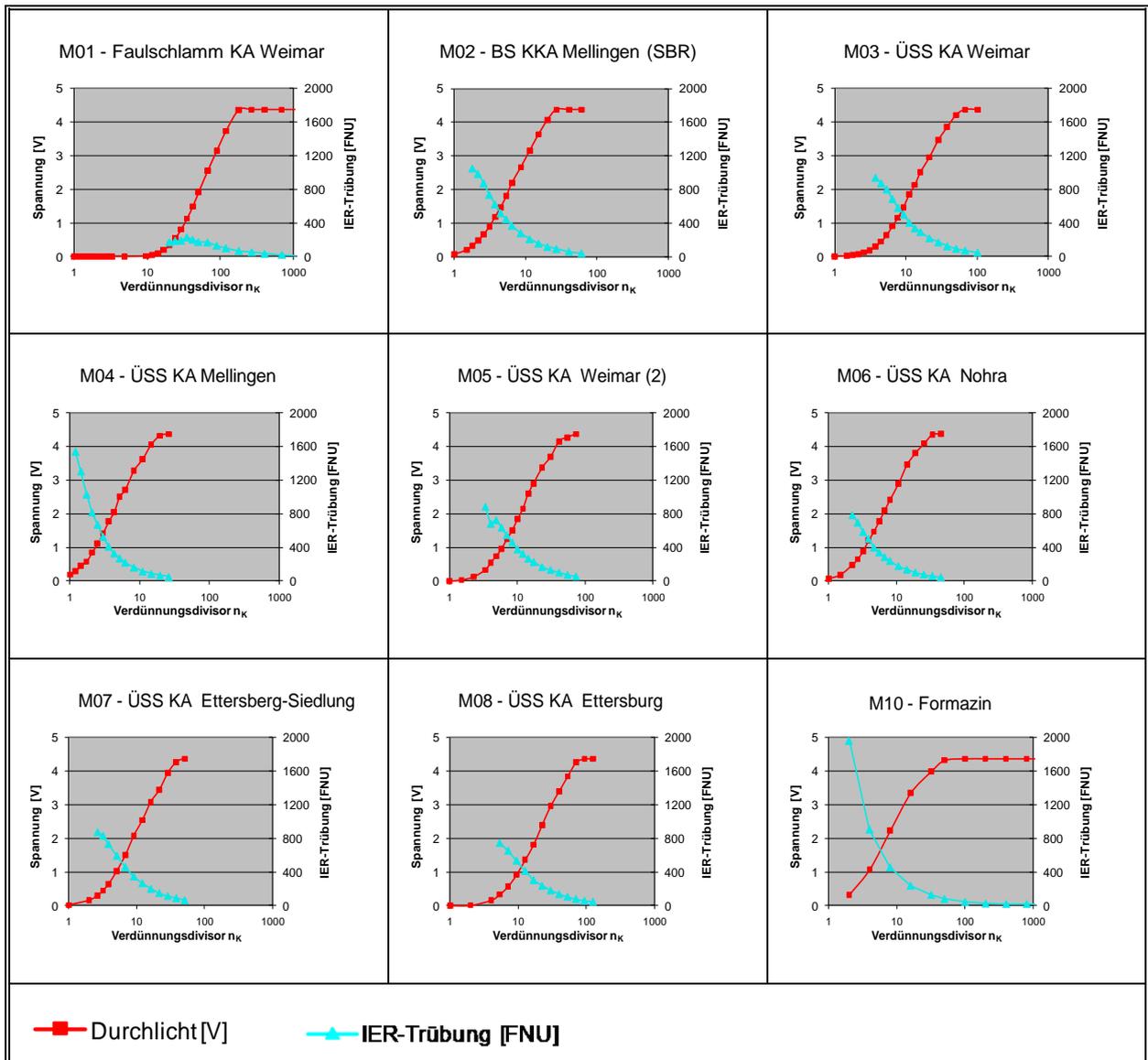


Abb. 4-14: Messkurven der D-Testmuster und der IER-Messsonde im Überblick

Wie die Recherchen der WHOrga zur Funktionsweise der IER-Messsonde ergaben, werden bis 200 FNU die Messsignale der Durchlichtmessung vom geräteinternen Prozessor ignoriert, d.h. nur die Messsignale der Streulichtmessung gelangen zur Auswertung. Oberhalb von 200 FNU ist jedoch das Gegenteil der Fall: das Signal der Durchlichtmessung wird verarbeitet, das der Streulichtmessung nicht. Offensichtlich stößt diese Art der Messsignalverarbeitung bei bestimmten Substraten – im vorliegenden Fall sind es Faulschlamm und Überschussschlamm der KA Weimar (M01 & M05) - an Grenzen. Die Unstetigkeit im Kurvenverlauf von M01 zeigt zu dem an, dass speziell im Faulschlamm die Aufkonzentrierung nicht identifiziert werden konnte (gleichbleibende bzw. sinkende Trübungswerte). Die Durchlichteinheit der IER-Sonde scheint deshalb im Vergleich zum D-Testmuster für Messungen mit Faulschlämmen weniger geeignet.

4.2.7. D-Testmuster und handelsübliche Trübungsmesssonde im Vergleich

Für einen direkten Vergleich des D-Testmusters und der IER-Trübungsmesssonde bietet es sich an, zunächst die Messkurven für Formazin als Standardlösung näher zu betrachten. In Abb. 4-15 wird der Zusammenhang von Trübungseinheiten [FNU] und Trübungswert der IER-Messsonde (blaue Dreiecke mit Bezug zur linken Ordinate) sowie Durchlichtspannung des D-Testmusters (rote Rechtecke mit Bezug zur rechten Ordinate) hergestellt.

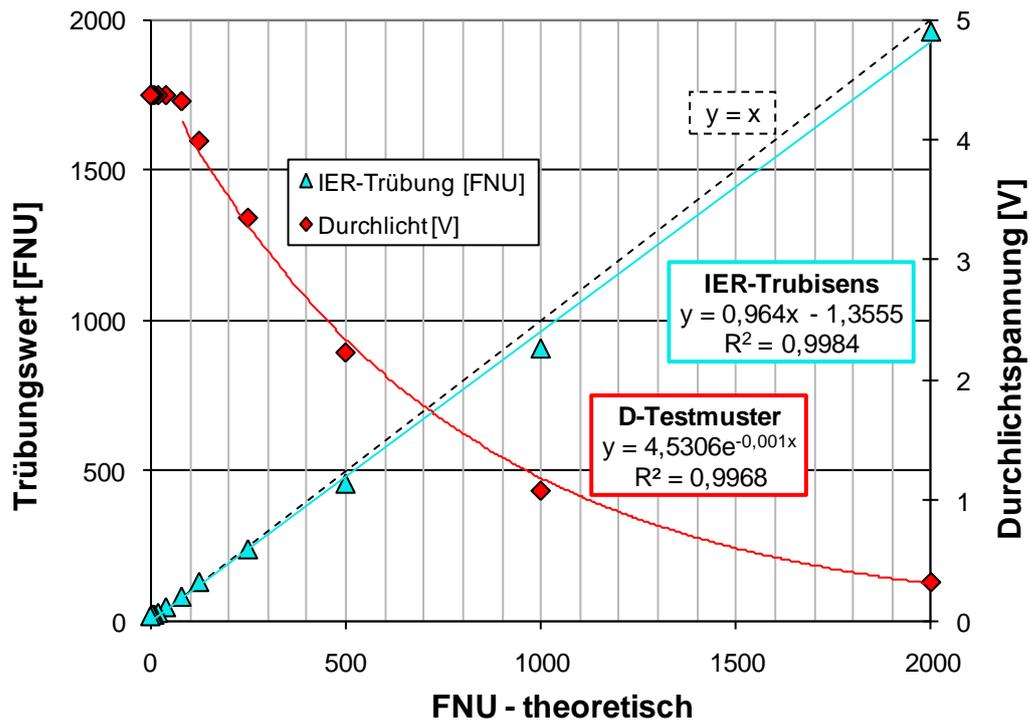


Abb. 4-15: Trübungswert und Durchlichtspannung bei Formazin als Standardsuspension

Die Messkurve der D-Testmuster betrachtend werden die bereits oben getroffenen Aussagen bezüglich der Anwendungsgrenzen bestätigt. Deutlich zu erkennen ist, dass das D-Testmuster im schwach getrüben Bereich < 100 FNU keine Auflösung bietet. Oberhalb von 2.000 FNU könnte es möglicherweise noch Werte abbilden, doch ist die Kurve für eine sinnvolle Auflösung bereits sehr flach. Bezogen auf die Formazin Standardlösung kann der Messbereich des D-Testmusters deshalb mit 100 – 2.000 FNU angegeben werden. Für diesen Bereich liefert die exponentielle Regressionsgerade ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,9968$, was die Stärke der Korrelation von Trübungseinheiten FNU und Durchlichtspannung U_{DL} unterstreicht.

Das Messsignal der IER-Messsonde *TurbiSens* löst die Trübungswerte hingegen wie erwartet über den gesamten Messbereich von 0 - 2.000 FNU linear auf. Die resultierende Regressionsgerade kommt der idealisierten Messgeraden (als gestrichelte Linie $x=y$ dargestellt) sehr nahe. Die durchschnittliche Abweichung von der Idealen beträgt 3,7 %, was innerhalb der vom Hersteller angegebenen Genauigkeitsgrenzen liegt ($\pm 5\%$ vom aktuellen Messwert), jedoch neben Messungenauigkeiten auch auf Verdünnungsfehler zurückzuführen sein kann.

Bereits aus den Abb. 4-14 und Abb. 4-15 war ein substratspezifischer Zusammenhang zwischen Trübungswerten der IER-Messsonde und der Durchlichtspannungen des D-Testmusters erkennbar. Die Darstellung in Abb. 4-16 macht nun deutlich, dass die Datenpaare für den Belebtschlamm sowie alle Überschussschlämme in ähnlicher Weise korrelieren, während das Formazin und der Faulschlamm der KA Weimar in dieser Hinsicht Ausnahmen darstellen. Generell treten die substratspezifischen Unterschiede bei hohen Trübungswerten, respektive hohen Feststoffgehalten stärker hervor.

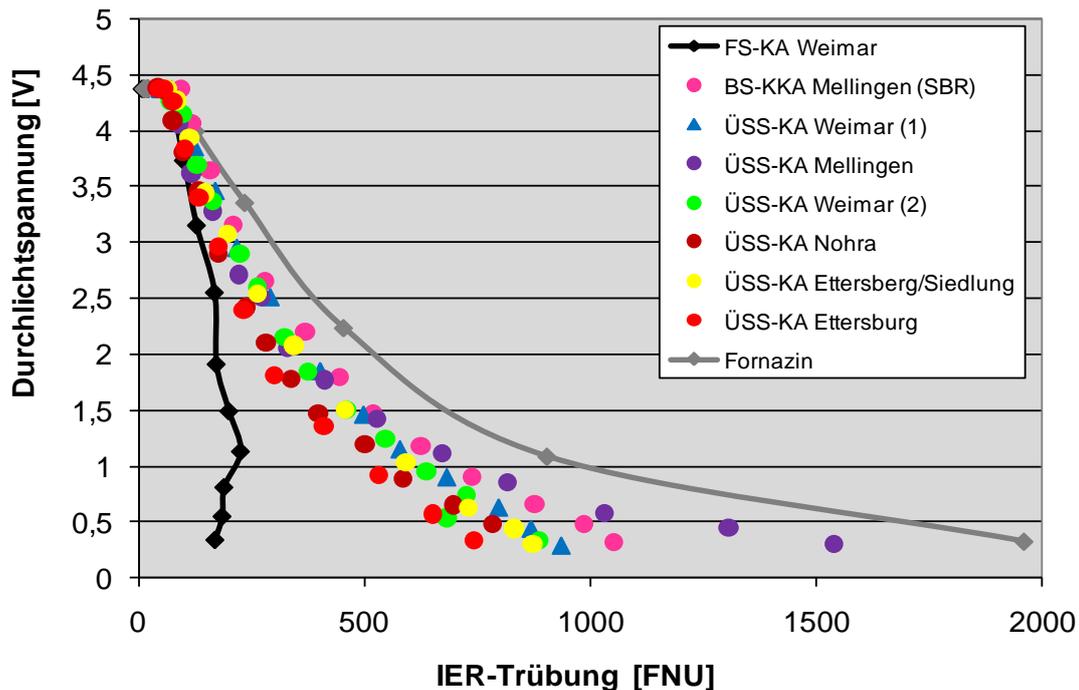


Abb. 4-16: Trübungswerte aller Messreihen versus zugehöriger Durchlichtspannung

Theoretisch können für alle Substrate durch lineare Regression transzendente Funktionen gefunden werden, welche den substratspezifischen Zusammenhang von IER-Trübungswert und Durchlichtspannung des D-Testmusters mathematisch exakt beschreiben. Von höherem Interesse ist aber der unspezifische Zusammenhang, der offensichtlich für die belebten Schlämme im Bereich von $0,5 \leq U_{DL} \leq 4,0$ V besteht. Ohne die Ergebnisse dieser Berechnungen im Detail vorzustellen sei erwähnt, dass im Bereich von 50 bis 1.000 FNU unter Ausschluss von Faulschlamm und Formazin exponentielle und logarithmische Funktionstypen mit sehr hohem Bestimmtheitsmaß ($R^2 > 0,9$) gefunden werden können. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass mit einem entsprechend programmierten D-Testmuster Messung analog zur IER-Sonde durchgeführt werden könnten.

Die Anwendung des D-Testmusters muss somit nicht auf die binäre Grenzwerterkennung beschränkt bleiben. Somit drängt sich die Frage auf, für welche Substrate und in welchen Bereich das D-Testmuster Gradienten in der Feststoffkonzentration abbilden kann.

4.2.8. Identifikation von Schlammabtrieb mit dem D-Testmuster - Korrelation von Durchlichtspannung (U_{DL}) und Abfiltrierbare Stoffe (AFS)

Die bisherigen Ausführungen legen nahe, dass anhand der gemessenen Spannungen am D-Testmuster (Durchlichtspannung U_{DL}) auf die Verdünnung der Abwasserprobe und somit prinzipiell auf deren Feststoffgehalt (Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen AFS in g/l bzw. Trockensubstanzgehalt TS in g/l) geschlossen werden kann. Allerdings wurde auch deutlich, dass dieser Zusammenhang mehr oder weniger substratspezifisch ist, was einem möglichst breiten Anwendungsbereich der Trübungsmesssonde zur Identifikation von Schlammabtrieb aus KKA entgegensteht.

Abb. 4-17 zeigt den prinzipiellen Zusammenhang zwischen analytisch ermittelten Feststoffgehalten (AFS in g/l) und denen am Photosensor der Durchlichtmesssonde registrierten Spannungen (U_{DL} in V) bei Verwendung unterschiedlicher Substrate. Die Darstellung ist zwar nicht exakt, weil die einzelnen Linien anhand von nur wenigen Messwerten (zwischen 5 und 7) konstruiert wurden. Sie hilft aber, das nachfolgende Vorgehen zur mathematischen Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Feststoffgehalt der verschiedenen Substrate und der resultierenden Durchlichtspannung am D-Testmuster (Durchlichtmesssonde) zu erörtern.

Erkennbar folgen alle Kurven dem erwarteten Trend, d.h. mit zunehmendem Feststoffgehalt AFS wurde der Lichtstrahl stärker adsorbiert, und die Schwächung des Lichtstrahls führte zu einer Abnahme der am Photosensor registrierten Durchlichtspannung U_{DL} . Der Zusammenhang ist jedoch offensichtlich *nicht linear*, d.h. zur mathematischen Beschreibung des Zusammenhangs müssen geeignete *nichtlineare Funktionstypen* gefunden werden. Wie sich zeigen wird, kann der Zusammenhang gleich durch mehrere *nichtlineare Funktionstypen* treffend beschrieben werden, so dass die Empfehlung eines bestimmten Funktionstyps die Diskussion und Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen erfordert.

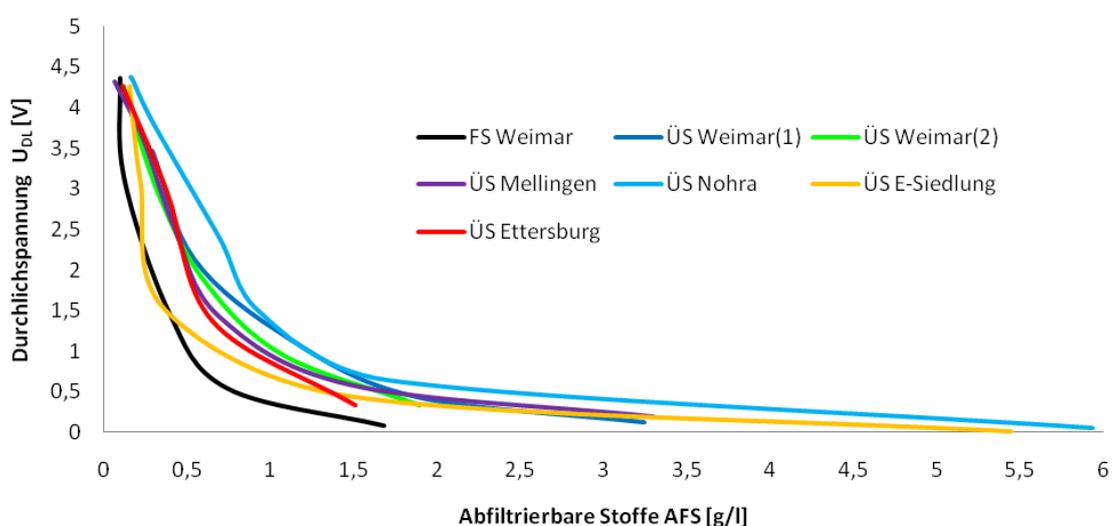


Abb. 4-17: Substratspezifischer Zusammenhang von AFS-Gehalt in der Abwassersuspension und resultierender Durchlichtspannung am D-Testmuster

In Abb. 4-17 werden außerdem die substratspezifische Unterschiede im Kurvenverlauf deutlich. Insbesondere im Bereich zwischen $0,5 \leq \text{AFS} \leq 1,5 \text{ g/l}$ bzw. $0,5 \leq U_{\text{DL}} \leq 1,5 \text{ V}$ sind die Abstände zwischen den Kurven besonders groß, d.h. die Streuung aller Datenpaare ist hier besonders stark. Auch ohne mathematische Beweisführung lässt sich daraus schlussfolgern, dass eine für alle Substrate gültige Regressionsfunktion in diesem Bereich sehr ungenau ist, d.h. der Vertrauensbereich (Konfidenzintervall für den Prognosewert) der Regressionsfunktion fällt hier sehr gering aus. Praktisch wird partiell nur mit geringer Sicherheitswahrscheinlichkeit von der einen Variablen exakt auf die andere Variable (AFS auf U_{DL} bzw. umgekehrt) zu schließen sein.

Bereits an dieser Stelle stellt sich die Frage, welche Feststoffgehalte AFS im Ablauf von KKA's charakteristisch sind bzw. ob das D-Testmuster diesen Bereich überhaupt zuverlässig abbilden kann. Schließlich sollen über die Durchlichtspannungen später Aussagen getroffen werden, ob eine betriebliche Störung der KKA durch Schlammabtrieb vorliegt. Ausgehend von üblichen Feststoffkonzentration sowohl im Ablauf von Nachklärbecken ($\text{TS}_{\text{NKB}} \sim 20 \text{ mg/l}$) als auch im Ablauf von Belebungsbecken ($\text{TS}_{\text{BB}} \sim 3,5 \text{ g/l}$) kann davon ausgegangen werden, dass Feststoffgehalte zwischen $0 \leq \text{AFS} \leq 3,0 \text{ g/l}$ im Ablauf einer KKA für eine entsprechende Fallbetrachtung von Bedeutung sind. Zurückblickend auf Abb. 4-17 (S. 63) wird klar, dass diese Spanne vom D-Testmuster abgebildet wird.

4.2.8.1. Auswahl der Datensätze (Stichprobenumfang)

Wie aus Tab. 4-2 (S.50) hervorgeht, wurden die einzelnen Messreihen nicht nur mit verschiedenen Substraten, sondern auch mit unterschiedlichen Analyseumfängen durchgeführt. In der Konsequenz sind die Messergebnisse (Datensätze) der Untersuchungen von unterschiedlicher Quantität und Qualität. In den Messreihen M01 bis M04 erfolgte Analytik hinsichtlich abfiltrierbarer Stoffe lediglich als Einzelbestimmung – bei U02 überhaupt nicht. Die Messreihen M05 -08 waren hingegen vergleichsweise intensiv: zum einen wurden zusätzliche Parameter (TR, oTR, CSB) in das Analyseprogramm aufgenommen; zum anderen erfolgte die Doppelbestimmung aller Parameter.

Somit war nur bei den Messreihen M05 bis M08 die Möglichkeit gegeben, Ausreißer zu identifizieren und zu eliminieren, die ansonsten ganz offensichtlich zu physikalisch unsinnigen Folgen beim Regressionsmodell geführt hätten. Als Prüfkriterien für die Ausreißeridentifizierung wurden dabei die folgenden herangezogen bzw. berechnet:

1. der Variationskoeffizient $VC_{1,2}$ als das relative Streuungsmaß der Einzelwerte AFS-1 und AFS-2 um den beobachteten Mittelwert (μ) berechnet nach:

$$VC_{1,2} = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \%$$

mit σ : Standardabweichung der Einzelwerte vom Mittelwert μ
 μ : Mittelwert der analytisch bestimmten Einzelwerte AFS-1 und AFS-2

A-Prüfung: für $VC_{1,2} \leq 15\%$ kein Verdacht \rightarrow Ende der Überprüfung
für $VC_{1,2} > 15\%$ Verdacht auf Aufreißer \rightarrow Prüfung B erforderlich

2. der Erwartungswert $E[\mu]_k$ als Schätzwert für den hypothetischen Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen AFS [g/l] infolge Verdünnung n_{k-1} [-] des vorhergehenden Ansatzes berechnet nach:

$$E[\mu]_k = AFS_{k-1} \times \frac{n_{k-1}}{n_k}$$

mit AFS_{k-1} : gültiger AFS-Wert (Einzel- oder der Mittelwert) des Vorgängers
($n_{k-1} < n_k$)
 n_{k-1} : Verdünnung des Vorgängers ($n_{k-1} < n_k$)
 n_k : Verdünnung des aktuellen Ansatzes ($n_{k-1} < n_k$)

B-Prüfung: für $0,7 * E[\mu]_k \leq \mu \leq 1,3 * E[\mu]_k$ (bzw. Abweichung μ von $E[\mu]_k$ kleiner als 30%) kein Verdacht \rightarrow Ende der Überprüfung
andernfalls \rightarrow Verdacht bestätigt: Elimination des Einzelwertes mit der größeren Abweichungen vom Erwartungswert $E[\mu]_k$

Für die Prüfung wurden zunächst die Mittelwerte betrachtet, und anschließend - im Fall des begründeten Verdachts- wurde der offensichtlich fehlerhafte Einzelwert eliminiert. In der Konsequenz verlor dann auch der arithmetische Mittelwert seine Gültigkeit, anstelle dessen nunmehr der verbleibende „gültige Einzelwerte“ aus der Doppelbestimmung rückte. Dies war bei den Messreihen M05, M07 und M08 insgesamt 6mal der Fall (Tab. 4-3).

Tab. 4-3: Elimination von ungültigen Einzelwerten und Ersatz der Mittel- durch Einzelwerte

Probe	AFS -1 [g/l]	AFS -2 [g/l]	μ [g/l]	$VC_{1,2}$ [%]	$E(\mu)$ [g/l]	$\mu/E(\mu)$ [-]	Ansatz für Regression
05-17	0,116	0,168	0,142	18,31	0,10	1,42	AFS-1
07-04	0,665	1,485	1,075	38,41	1,70	0,63	AFS-2
07-07	0,468	0,272	0,370	26,49	0,70	0,52	AFS-1
08-10	0,556	0,380	0,468	18,80	0,28	1,67	AFS-2
08-13	-0,226	0,114	-0,056	303,37	0,16	0,35	AFS-2
08-15	0,720	0,334	0,527	36,62	0,06	8,78	AFS-2

Des Weiteren wurden aus der Regressionsanalyse die Datenpaare mit Werten $U_{DL}=0$ V (Null als Messwert für die Durchlichtspannung) ausgeschlossen. Der Grund für dieses Vorgehen liegt in der bereits oben getroffenen Feststellung, dass für die Regression ausnahmslos *nicht-lineare Funktionstypen* Verwendung finden können, deren Wertebereiche - unter Ausnahme der hyperbolischen Funktion - an der Stelle $y(x) = 0$ bzw. U_{DL} (AFS) = 0 nicht definiert sind. Ohnehin hätte die Berücksichtigung dieser Nullwerte keinerlei Nutzen versprochen, da sie allesamt aus Messungen mit unverdünntem Substrat entstammen (AFS > 6,0 g/l) und somit außerhalb des Interesses liegen (vgl. Abb. 4-17, S. 63). Die Anzahl und Herkunft (Einzel-

bzw. Mittelwert) der letztlich für die Regression zum Ansatz kommenden Werte geht aus Tab. 4-4 hervor. Demnach fanden je Substrat zwischen 5 und 7 Datenpaare und somit insgesamt 41 Datenpaare unterschiedlicher Herkunft Eingang in die Regression.

Tab. 4-4: Anzahl und Herkunft der analytisch bestimmten Werte als Regressionsgrundlage

Ver-such	Substrat	Anzahl Einzelwer-te	Anzahl Mittelwerte	Anzahl $U_{DL} = 0$	Summe
01	FS Weimar	7	0	(-) 1	6
03	ÜS Weimar (1)	7	0	(-) 1	6
04	ÜS Mellingen	6	0	0	6
05	ÜS Weimar (2)	1	6	(-) 1	6
06	ÜS Nohra	0	7	0	7
07	ÜS Ettersburg/Siedlung	2	3	0	5
08	ÜS KA Ettersburg	3	3	(-) 1	5
				Gesamt	41

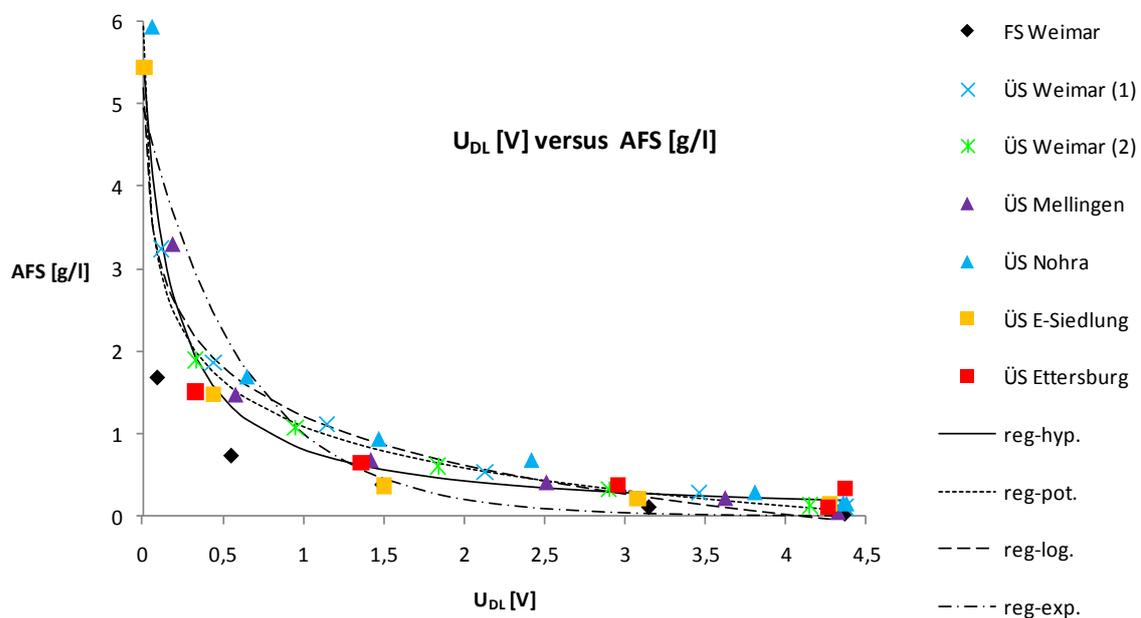
Im Hinblick der für die Regression zur Verfügung stehende Auswahldatensätze lässt sich an dieser Stelle zusammenfassen, dass

1. die Quantität und Qualität der einzelnen Datengruppen (substratspezifische Messwerte) unterschiedlich ausfallen,
2. die Datengruppen aus den Messreihen M01, M03 und M04 aus ungeprüften Einzelwerten bestehen und somit möglicherweise Ausreißer enthalten,
3. die Homogenität der Messwerte angezweifelt werden muss, weswegen die Zusammenfassung der substratspezifischen Datengruppen zu einer gemeinsamen Datengruppe nicht ohne weiteres möglich ist.

Es werden also wesentliche Grundvoraussetzungen einer profunden Regressionsanalyse gleich in mehreren Punkten nicht erfüllt. Dementsprechend müssten vor der Regression zunächst statistische Prüftests durchgeführt werden, um gegebenenfalls weitere Ausreißer zu eliminieren und die Homogenität der Datenpaare (Zugehörigkeit der zu einer gemeinsamen Grundgesamtheit) gewissermaßen post um sicherzustellen. Vor dem Hintergrund, dass gemäß der Zielsetzung von vornherein nur geringe Anforderungen an die Aussagekraft und somit an die Genauigkeit der Untersuchungen gestellt worden sind (Überprüfung der grundsätzlichen Eignung von Testmustern der ersten Generation) wird jedoch bewusst darauf verzichtet. Denn die Forderung, dass die gewonnenen Messergebnisse statistisch homogen vorliegen, d.h. normal verteilt und frei von systematischen Fehlern sind, würde unerreichbar bleiben. Überlagert wird dieser qualitative Mangel von dem quantitativen Problem, dass insgesamt nur 41 Datenpaare für die Regression zur Verfügung stehen (Stichprobenumfang $n=41$, vgl. Tab. 4-4, S.66) und eine weitere Dezimierung der Datenpaare kontraproduktiv wäre. Im Folgenden wird die Regression deshalb zunächst über alle Datenpaare geführt und die Selektion der Datenpaare erfolgt dann schrittweise auf Grundlage technisch-sachlicher Argumente.

4.2.8.2. Regression U_{DL} [V] auf AFS [g/l]

Abb. 4-18 zeigt das Ergebnis der Regressionen über alle Messwerte (alle Substrate) für hyperbolische, potentielle, logarithmische und exponentielle Funktionstypen. Die Wahl der vier Funktionstypen erfolgte nach mehrmaligen Wiederholungen unterschiedlicher Regressionsansätze mit dem Ziel, die Abhängigkeit zwischen den Variablen möglichst gut zu beschreiben (Minimum für die Summe der quadrierten Residuen bzw. Maximum für das lineare, einfache Bestimmtheitsmaß R^2). Die Berechnung erfolgte jeweils mit der Software *Microsoft Excel* nach der *Methode der Kleinsten Quadrate* (Add-In: *Solver*). Die einzelnen Regressionsparameter und die zugehörigen Bestimmtheitsmaße R^2 aller Funktionstypen in untenstehender Datentabelle zusammengefasst.



Typ		a	b	c	R ²
Hyperbolisch	$y = a/(x+b) + c$	0,975	0,166	-0,024	0,892
Potentiell	$y = a \cdot x^b + c$	5,772	0,132	4,685	0,857
Logarithmisch	$y = a \cdot \ln(x) + c$	-0,862	-	1,222	0,840
Exponentiell	$y = a \cdot e^{b \cdot x} + c$	5,016	-1,600	0	0,740

Abb. 4-18: Substratspezifische Datenpaare und resultierende Regressionsfunktionen bei kollektiver Datenanalyse (Regression über alle Datenpaare)

Wie aus Abb. 4-18 ersichtlich, sind die resultierenden Graphen der drei ersten Funktionstypen (hyperbolisch, potentiell, logarithmisch) sehr ähnlich, während der exponentielle Funktionstyp eine Sonderstellung einnimmt. Im Hinblick der Bestimmtheitsmaße ist ebenfalls die Sonderstellung des exponentiellen Funktionstypen festzustellen: die Qualität der Korrelation fällt hier mit $R^2=0,740$ vergleichsweise gering aus und liegt bei allen anderen Funktionstypen mit $R^2>0,84$ deutlich höher. Das höchste Bestimmtheitsmaß verzeichnet mit $R^2=0,892$ die hyperbolische Funktion (Hyperbel). Auch aus technischer Sicht scheint der hyperbolische Ansatz

am treffendsten, da die Abnahme der Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen AFS das Resultat einer Verdünnungsreihe ist, die ihrerseits den Charakter einer derartigen Funktion besitzt (Konzentration = Stoffmenge/Volumen).

Abb. 4-19 gibt über die Beziehung zwischen Residuen e_i und der Durchlichtspannung U_{DL} und somit die Differenz zwischen experimentell beobachteten AFS-Wert (y) und anhand des zugrundeliegenden Modells prognostizierten AFS-Wert (\hat{y}) Auskunft ($e_i = y - \hat{y}$). Hierbei wird zunächst die Ungenauigkeit aller Regressionsmodelle bei kleinen Durchlichtspannungen offensichtlich, denn unabhängig vom Funktionstyp (hyperbolisch, potentiell, logarithmisch oder exponentiell) streuen die Residuen unterhalb von $U_{DL} \approx 0,5$ V sehr stark.

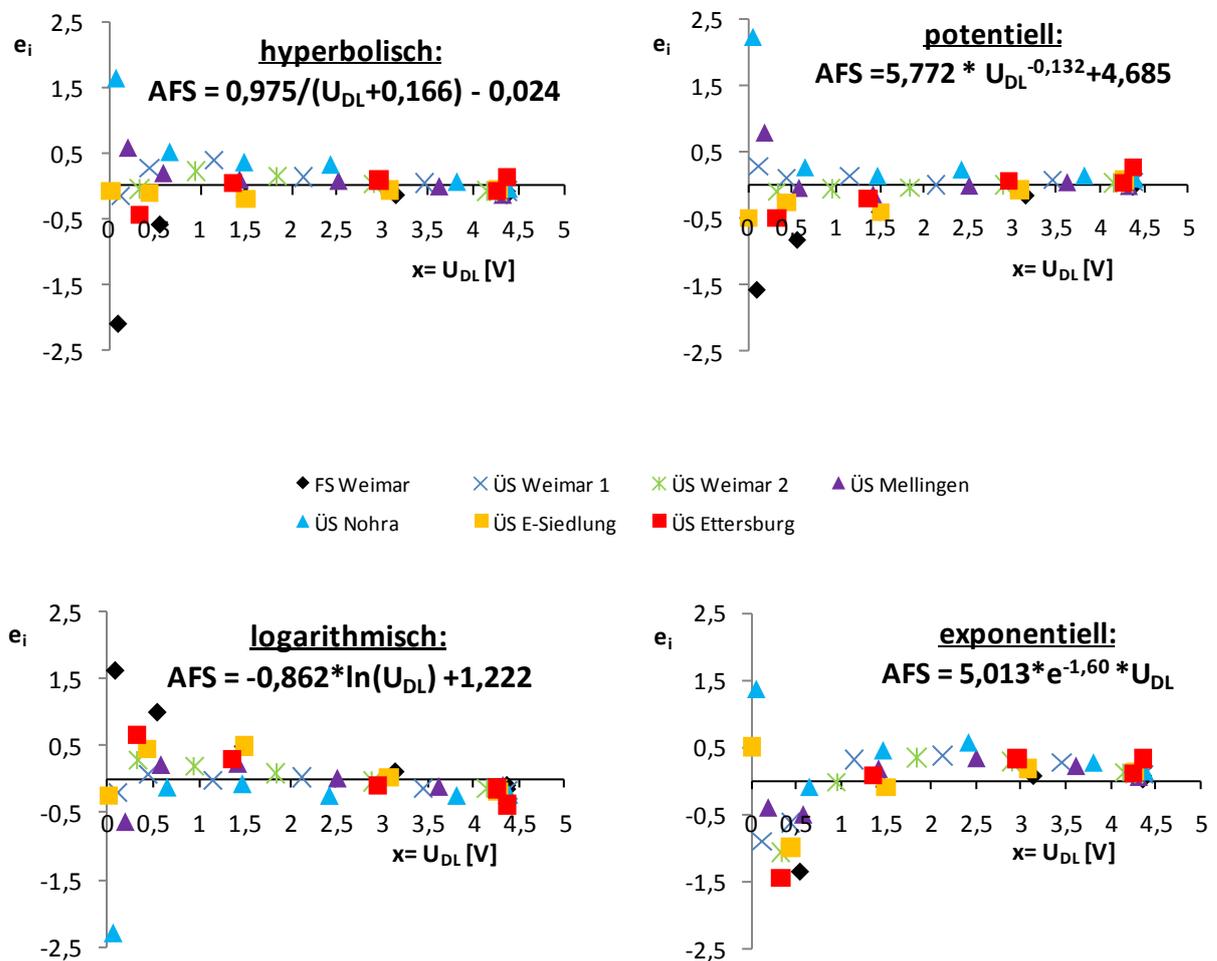


Abb. 4-19: Beziehung zwischen den substratspezifischen Residuen e_i und der unabhängigen Variable U_{DL} bei Ansatz der unterschiedlichen Regressionsmodellen

Die sich mit der Durchlichtspannung U_{DL} ändernde Varianz der Residuen ist ein klares Zeichen für das Bestehen von Heteroskedastizität, d.h. die bereits oben formulierte Verletzung der Homoskedastizitätsannahme wird hiermit bestätigt. In der Konsequenz ist keines der Modelle (Regressionsfunktionen) über den gesamten Definitionsbereich ($0 \leq U_{DL} \leq 4,38$ V) an-

wendbar. Mathematisch wäre es zum einen möglich, die beiden Teilbereiche $0 \leq U_{DL} \leq 0,5$ V und $0,5 \leq U_{DL} \leq 4,38$ V separat voneinander zu untersuchen und für beide Teilbereiche gültige Regressionsfunktionen zu finden (Variante A). Zum anderen könnte der Regression über den gesamten Datenbereich ein komplexerer Funktionstyp zu Grunde gelegt werden (Variante B). Aus praktischen Gründen werden aber beide Varianten verworfen, denn ansonsten müssten entweder zwei unterschiedliche Regressfunktionen (A) oder aber eine sehr komplexe Regressfunktion (B) bei der Signalverarbeitung berücksichtigt werden, was den elektronischen Aufbau der Messsonde verkomplizieren und letztlich deren Preis erhöhen würde.

4.2.8.3. *Optimierung der Regressionsmodelle und Empfehlung für einen Funktionstyp*

Eine Optimierung der untersuchten Regressionsmodelle ist durch Einführung von zusätzlichen Nebenbedingungen möglich. Unter Beachtung der bisherigen Erkenntnisse erscheinen insbesondere folgende zwei Nebenbedingungen von Relevanz:

- 1.) Durchlichtspannungen, welche die Konzentration an Abfiltrierbaren Stoffen außerhalb des Bereichs $0,3 \text{ g/l} \leq \text{AFS} \leq 3,0 \text{ g/l}$ repräsentieren, haben nur geringe praktische Bedeutung und könnten von der Regression ausgeschlossen werden,
- 2.) Der untersuchte Faulschlamm der Kläranlage Weimar (FS Weimar) stellt einen Sonderfall dar und könnte von der Regression ausgeschlossen werden.

Erste Nebenbedingung:

Diese Nebenbedingung basiert auf der Zielvorgabe, dass anhand der Durchlichtspannungen U_{DL} am D-Testmuster auf Störfälle der KKA infolge von Schlammabtrieb geschlussfolgert werden soll. Ausgehend von einem typischen Feststoffgehalt im Belebungsbecken einer KKA mit suspendierter Biomasse deckt der Höchstwert $\text{AFS}=3,0 \text{ g/l}$ den Fall ab, dass die Nachklärung in ihrer Funktion versagt hat und der Belebtschlamm sukzessive aus der KKA ausgespült wird. Demnach liegt bei Werten von $\text{AFS} \geq 3,0 \text{ g/l}$ ein Totalversagen der KKA vor, weswegen unverzüglich Maßnahmen zur Mängelbeseitigung ergriffen werden müssten. Das automatische Abschalten der Ablaufpumpe wäre eine mögliche - wenngleich drastische - Sofortmaßnahme.

Die Festlegung der unteren Bereichsgrenze, d.h. von kritischen Feststoffgehalten im Ablauf von KKA, die den Schlammabtrieb bereits vor dem Totalversagen identifizieren sollen, ist weitaus schwieriger. Praktisch liegen diesbezüglich keine Erfahrungen vor, weswegen Annahmen getroffen oder Analogieschlüsse gezogen werden müssen. Ausgangspunkt für die Festlegung auf $\text{AFS} = 0,3 \text{ g/l}$ war die Überlegung, dass mindestens eine 100%-ige Überschreitung der CSB-Ablaufgrenzwerte ($\text{CSB}=150 \text{ mg/l}$) toleriert werden sollte, und dass das Verhältnis $\text{AFS}:\text{CSB}=1:1$ beträgt⁵. Tatsächlich konnte dieses Verhältnis auch für die bei den

⁵ Biomasse enthält rechnerisch $1,42 \text{ g CSB/g TS}$ und der organische Anteil im Überschussschlamm von etwa $\text{oTR} = 72\%$ ist mit der Biomasse gleichzusetzen. Weil bei Schlammabtrieb die CSB –Fracht hauptsächlich aus der Biomasse resultiert, kann von einem Verhältnis $\text{AFS}:\text{CSB}=1:1$ im Ablauf von Kläranlagen ausgehen werden.

Messreihen M06-M08 verwendeten Substrate bzw. deren verschiedenen Verdünnungen gefunden werden (vgl. Abb. 4-20). Die starken Streuungen der Datenpaare im unteren Konzentrationsbereich ($CSB < 800 \text{ mg/l}$) deuten zwar auf eine schwache Korrelation hin - was letztlich nur die Ausweglosigkeit einer CSB-Grenzwertüberwachung per Trübungsmessung unterstreicht - doch wird die Annahme bestätigt, dass oberhalb von $AFS = 0,3 \text{ g/l}$ die CSB-Ablaufwerte um ein Vielfaches überschritten werden würden. Bei Werten kleiner als $0,3 \text{ g/l}$ kann indes unterstellt werden, dass die KKA funktionstüchtig ist. Demnach ist für die Identifikation von Schlammabtrieb nur der Bereich $0,3 \text{ g/l} \leq AFS \leq 3,0 \text{ g/l}$ von Interesse.

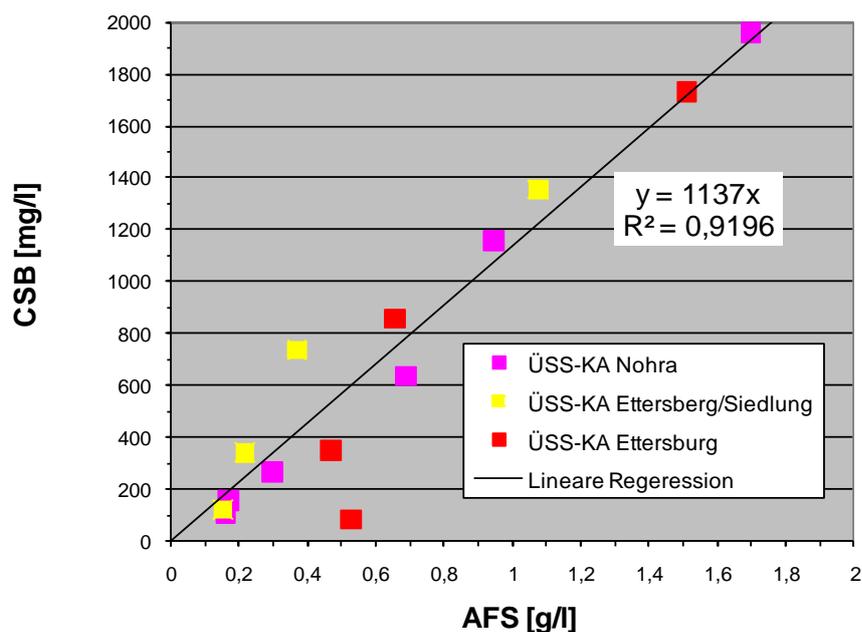


Abb. 4-20: Korrelation von AFS-Konzentration und CSB-Konzentration bei den Versuchsansätzen

In Abhängigkeit vom Regressionsmodell würden die untere ($AFS = 0,3 \text{ g/l}$) und die obere Bereichsgrenze ($AFS = 3,0 \text{ g/l}$) durch unterschiedliche Durchlichtspannungen U_{DL} identifiziert. Tab. 4-5 gibt hierzu einen Überblick, wobei den Berechnungen von U_{DL} die Regressionsparameter aus der Datentabelle von Abb. 4-18 (S. 67) zu Grunde liegen.

Tab. 4-5: Durchlichtspannungen U_{DL} zur Identifikation unterer ($AFS_{min} = 0,3 \text{ g/l}$) und oberer ($AFS_{max} = 3,0 \text{ g/l}$) Grenzen in Bezug auf den Schlammabtrieb bei Ansatz unterschiedlicher Regressionsmodelle

Fkt. Typ	Regression $AFS=y$	Umkehrung $U_{DL}=x$	$U_{DL,min}$ [V] für AFS_{max}	$U_{DL,max}$ [V] für AFS_{min}	Messspanne ΔU_{DL} [V]
Hyperbol.	$y = a/(x+b) + c$	$x = a/(y-c) - b$	0,156	2,843	2,687
Potentiell	$y = a \cdot x^b + c$	$x = ((y - c)/a)^{1/b}$	0,115	3,025	2,910
Logistisch	$y = a \cdot \ln(x) + c$	$x = e^{(y-c)/a}$	0,127	2,912	2,785
Exponent.	$y = a \cdot e^{b \cdot x} + c$	$x = \ln((y-c)/a)/b$	0,321	1,760	1,439

Wie aus Tab. 4-5 ersichtlich rückt somit insgesamt der Bereich von $0,115 \leq U_{DL} \leq 3,025$ V in den Focus. Bemerkenswert ist, dass beide Bereichsgrenzen vom Regressionsmodell mit potentiellen Funktionstyp herrühren und somit hier die größte Messspanne ($\Delta U_{DL} = 2,91$ V) vorliegt. Bezogen auf den Messbereich der Durchlichtsonden ($0 \leq U_{DL} \leq 4,37$ V) entspricht das 66% oder 2/3 der verfügbaren Werteskala. Demnach wäre mit dem potentiellen Regressionsstyp noch eine vergleichsweise hohe Auflösung der Messwerte möglich.

Zweite Nebenbedingung:

Bereits aus Abb. 4-17 (S.63) wurde ersichtlich, dass

- der Faulschlamm der Kläranlage Weimar (FS Weimar) und
- der Überschussschlamm der Kläranlage Nohra (ÜS Nohra)

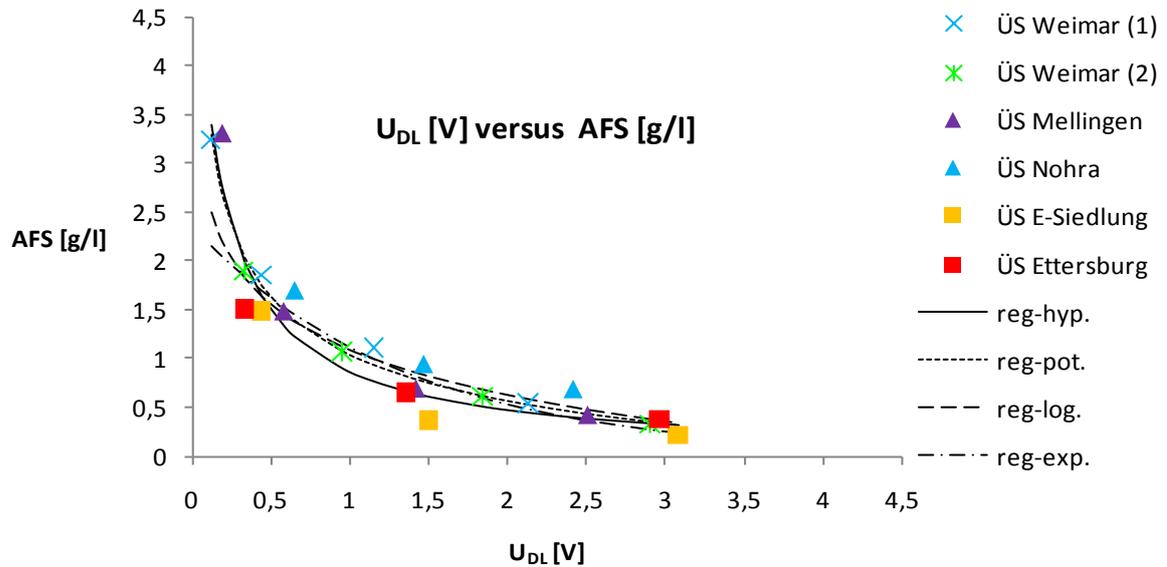
die Grenzfälle bei den Untersuchungen darstellten, d.h. die Unterschiede der resultierenden Durchlichtspannungen U_{DL} bei vergleichbaren Feststoffgehalten AFS (bzw. umgekehrt) fielen hier am größten aus. Mit Abb. 4-19 (S. 68) wird das nachdrücklich bestätigt. Bei allen Regressionsmodellen sind die größten Streubreiten für den Faulschlamm (FS Weimar) und für den Überschussschlamm der Kläranlage Nohra (ÜS Nohra) zu verzeichnen, insbesondere bei hohen Feststoffgehalten (AFS) bzw. niedrigen Durchlichtspannungen (U_{DL}).

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass durch Ausschluss einer bzw. auch beider Datengruppen (FS Weimar und/oder ÜS Nohra) der Streubereich der verbleibenden Datenpaare verringern würde und letztlich eine genauere Regression gefunden werden könnte. Gewissermaßen wird der Anwendungsbereich des D-Testmusters begrenzt bzw. post um definiert. Da jedoch der Überschussschlamm der Kläranlage Nohra einem durchaus üblichen Schlamm entspricht, gibt es keine inhaltliche Begründung, dieses Substrat von der Regression auszuschließen. Die Sonderstellung des Faulschlammes der Kläranlage Weimar (FS Weimar) ist jedoch offensichtlich. Denn erstens haben Faulschlämme naturgemäß gegenüber Belebtschlämmen, wie sie bei allen anderen Ansätzen verwendet wurden, eine deutlich abweichende Charakteristik; insbesondere im Hinblick der Partikeldichte, -größe und -verteilung. Zweitens wird im Ablauf von KKA`s nicht mit Faulschlamm zu rechnen sein.

Insgesamt liegt es also nahe, die Berechnungen der Regressionsfunktionen ohne den Faulschlamm (FS Weimar) und nur im Bereich von $0,115 \leq U_{DL} \leq 3,025$ V zu wiederholen. Problematisch daran ist, dass dadurch die Anzahl der Wertepaare von ehemals 41 drastisch auf lediglich 21 reduziert wird.

Wie aus Abb. 4-21 (S.70) und der zugehörigen Datentabelle ersichtlich wird, bilden nach entsprechender Optimierung alle vier Regressionsfunktionen den Zusammenhang zwischen Durchlichtspannung U_{DL} und Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen AFS zuverlässig ab. Bei niedrigen Durchlichtspannungen ($U_{DL} \leq 0,5$ V), respektive höheren Feststoffgehalten ($AFS \geq 1,5$ g/l), sind die Vorzüge der hyperbolischen und potentiellen Funktion offensichtlich.

Ohne die Residuen der einzelnen Funktionen an dieser Stelle im Detail diskutieren zu wollen sei angemerkt, dass deren größere Streuungen verantwortlich für die kleineren Bestimmtheitsmaße sowohl bei der logarithmischen als auch der exponentiellen Funktion sind. Somit rücken die hyperbolische und die potentielle Funktion bei der Suche nach einem geeignetem Regressionsmodell in die engere Wahl.



Typ		a	b	c	R ²
Hyperbolisch	$y = a/(x+b) + c$	1	0,175	0	0,979
Potentiell	$y = a \cdot x^b + c$	2,450	0,308	1,414	0,923
Logarithmisch	$y = a \cdot \ln(x) + c$	-0,668	-	1,019	0,843
Exponentiell	$y = a \cdot e^{b \cdot x} + c$	2,350	0,750	0	0,778

Abb. 4-21: Ergebnis der optimierten Regression im Bereich $0,115 \leq U_{DL} \leq 3,025$ V ohne M01

Die Entscheidung, welcher der Regressionen – hyperbolisch oder potentiell- letztlich der Vorzug zu geben ist, hängt in hohem Maße von der konkreten Spezifikation der elektronischen Bauteile bzw. den Möglichkeiten ihrer Programmierung ab. Generell spielen aber auch Überlegungen zum Einsatzzweck der zukünftigen Trübungsmesssonde eine wichtige Rolle. Hierbei ist der Antagonismus von möglichst breitem Anwendungsbereich einerseits, und möglichst hoher Reproduzierbarkeit andererseits zu beachten. Durch freie Programmierung des Prozessors über eine geeignete Schnittstelle ist dieses Problem aber beherrschbar.

In Tab. 4-6 (S. 73) werden abschließend Empfehlungen für geeignete Regressionen gegeben, wobei zwischen breitem und schmalen Anwendungsbereich der D-Testmuster unterschieden wird. Auffallend simpel ist der hyperbolische Ansatz im schmalen Anwendungsbereich (ohne Faulschlamm), der dann nur mit einem einzigen Parameter ($b=0,175$) abgebildet werden kann.

Aus ingenieurtechnischer Sicht wäre diesem Ansatz deshalb der Vorzug zu geben. Die Wahl eines bestimmten Ansatzes bleibt aber letztlich dem Entwickler selbst überlassen.

Tab. 4-6: Empfehlungen für geeignete Regressionsansätze in Abhängigkeit vom beabsichtigten Anwendungsbereich

Anwendung→ Typ ↓	breiter Anwendungsbereich	schmalere Anwendungsbereich
Hyperbolisch	$y(x) = 0,975/(x+0,166) - 0,024$	$y(x) = 1/(x+0,175)$
Potentiell	$y(x) = 5,772 x^{0,132} + 4,685$	$y(x) = 2,450 x^{0,308} + 1,414$

Schließlich sei nochmals auf die unzureichende Datenbasis der Regressionen und den Erstentwicklungsstatus der untersuchten D-Testmuster hingewiesen. Die Weiterentwicklung der D-Testmuster zu späteren Prototypen ist im Report von WHOrga und IPSF ausführlich beschrieben. Die verwendeten D-Testmuster unterscheiden sich vom letztlich gefertigten Prototypen *Kompakt-Trübungsmessgerät „SAFETY-TOP TSA 1“* durch folgende konstruktive Merkmale (vgl. Kapitel 7. S. 23 ff. R-KMU):

- Messkopf aus Epoxydharz → beim Prototyp aus Borosilikatglas gefertigt,
- Anbauteil (Baukörper: d~60 mm, h~120 mm) aus Polyoxymethylen (POM) → beim Prototyp aus Edelstahl gefertigt,
- Messkopf ist über O-Ring Dichtung und Fett mit Anbauteil verbunden → beim Prototyp eingeklebt,
- Verschlussklappe am Anbauteil (mit Klebestreifen fixiert) → entfällt beim Prototyp

Im Hinblick auf die abweichende Qualität des Messsignals (Durchlichtspannung U_{DL}) und somit der mangelnden Übertragbarkeit der dargestellten Zusammenhänge dürfte das geänderte Material des Messkopfes ein entscheidender Faktor sein. Von mindestens gleicher Bedeutung sind aber die an der Elektronik vorgenommenen Änderungen (Analoger Spannungsausgang 0...10 V) einzuschätzen.

Insgesamt können die gezeigten Ergebnisse und die angegebene Empfehlungen somit Anhaltswerte für zukünftige Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten darstellen.

4.2.9. Fazit der Versuchsreihe

Anhand der Vorversuche mit handelsüblichen Trübungsmesssonde *TurbisSens* und unterschiedlichen Substraten wurden zunächst Probleme in Bezug auf Substratanalytik und Interpretation von Trübungswerten identifiziert, die es im Rahmen der Hauptversuche zu minimieren galt. Die Hauptversuche wurden dann mit D/S-Testmustern der ersten Generation durchgeführt, die eine separate Aufzeichnung von Durchlicht- und Streulichtsignalen ermöglichten.

Die D/S-Testmuster hatten den Status einer Erstentwicklung, woraus auch der sondierende Charakter der Hauptversuche resultierte. Der für eine schnelle Durchführung konzipierte Ver-

suchsaufbau, insbesondere aber die sukzessive Verdünnung der Substrate, hat sich als sehr genaue und zugleich schnelle Methode bewährt.

Mit der Überprüfung der D/S-Testmuster für eine neuartige Trübungsmesssonde konnte zunächst der Weiterentwicklungsbedarf für die S-Testmuster aufgezeigt werden. Im Gegensatz zum D-Testmuster, welches die gestellten Erwartungen erfüllte bzw. sogar übertraf, erwies sich das S-Testmuster aufgrund schwacher Signalstärken (Streulichtspannungen lediglich im Millivoltbereich) als unbrauchbar. Da der für eine kontinuierliche Betriebskontrolle von KKA's zu erfassende Wertebereich an Feststoffgehalten ($0,3 \leq \text{AFS} \leq 3,0 \text{ g/l}$) allein mit dem D-Testmuster hinreichend genau abgebildet werden kann, scheint die Weiterentwicklung der Streulichtmessung (S-Testmuster) bzw. die bislang verfolgte Kombination aus Durchlicht- und Streulichtmessung für die zukünftige Trübungsmesssonde verzichtbar.

Der Vergleich des D-Testmusters mit der am Markt erhältlichen IER-Trübungsmesssonde *TurbiSens* bestätigt das große Potential des D-Testmusters zur permanenten Kontrolle des Feststoffgehaltes im Ablauf von Kläranlagen im Bereich 50 bis 1.000 FNU. Wie gezeigt werden konnte, ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten, die über eine binäre Grenzwerterkennung laut Zielvorgabe hinausgehen.

Bei der Ableitung von Regressionsfunktionen zur Beschreibung der Korrelation von Durchlichtspannung einerseits und Gehalt an Abfiltrierbaren Stoffen andererseits erwies sich die Datengrundlage als grundsätzliches Problem. Ungeachtet dessen wurde die Regressionsanalyse mit dem Ergebnis durchgeführt, dass der substratübergreifende bzw. unspezifische Zusammenhang anhand der hyperbolischen Funktion $\text{AFS} = 1/(\text{U}_{\text{DL}} + 0,175)$ beschrieben werden kann. Schließlich konnten wichtige Empfehlungen für das zukünftige Vorgehen hinsichtlich Produktentwicklung und weiterer Untersuchungen gegeben werden.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass mit dem D-Testmuster eine dem Zweck dienliche Sonde mit erweitertem Potential konstruiert wurde.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Mit dem vorliegenden Abschlussbericht werden Untersuchungen vorgestellt, die im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten F&E-Vorhabens „*Entwicklung einer Trübungsmessung für die kontinuierliche Betriebskontrolle vollbiologischer Kleinkläranlagen*“ von der Bauhaus-Universität Weimar (BUW) durchgeführt worden sind.

Zielsetzung

Ziel des Vorhabens war es, eine kostengünstige Trübungsmesssonde zur kontinuierlichen Betriebskontrolle von Kleinkläranlagen zu entwickeln, mit der kritische Betriebszustände bzw. schwerwiegende Betriebsstörung im Ablauf der KKA erkannt werden.

Ausgangspunkt war die Überlegung, dass ein erhöhter Schlammabtrieb aus der Nachklärung ein sicheres Indiz für eine ernstzunehmende Funktionsstörung der KKA ist, die mit der Trübungsmessung prinzipiell identifiziert werden kann. Ausgehend von üblichen Feststoffkonzentrationen sowohl im Ablauf von Nachklärbecken als auch im Ablauf von Belebungsbecken sind Feststoffgehalte zwischen $0 \leq \text{AFS} \leq 3,0 \text{ g/l}$ im Ablauf einer KKA für eine entsprechende Fallbetrachtung von Bedeutung.

Es ging ausdrücklich nicht darum, die Trübungsmessung unter Ausnutzung der CSB/Trübungskorrelation als Instrument zur Überwachung von Grenzwerten von Kleinkläranlagenabläufen zu nutzen.

Entwicklungsziel war ein Kaufpreis für die Trübungsmesssonde von maximal 600 €, wobei sich die Einsparpotentiale gegenüber konventionellen Trübungsmesssonden bei der Materialauswahl, der Produktion (Baukastenprinzip) sowie durch ein innovatives Reinigungssystem ergeben sollten. Konsequenterweise ging die Entwicklung von folgenden Ansätzen aus:

- Robuste Technik mit ausreichender Empfindlichkeit sollte hochempfindlicher und präziser Technik vorgezogen werden.
- Die zunehmende Verschmutzung der Messsonden infolge Belagbildung sollte mittels UVC-Bestrahlung verhindert und zusätzlich rechnerisch eliminiert werden.

Die Bestrahlung der optischen Gläser mit handelsüblichen UVC-Strahlern zur Unterdrückung von Biofouling/Scaling stellte dabei ein Novum dar.

Methodik

Die im Rahmen des F&E – Vorhabens von der BUW durchgeführten Versuche lassen sich zwei Themenbereichen zuordnen, und zwar:

- Untersuchungen zur Unterdrückung von Belagbildung durch UVC-Licht,
- Überprüfung von D/S-Testmustern als Erstentwicklung für eine Trübungsmesssonde.

Um das Potential der UVC-Bestrahlung zur Unterdrückung von Belagbildungen auf den optischen Gläsern von Trübungsmesssonden abzuschätzen, wurden von der BUW ein Feld- als

auch ein Laborversuch durchgeführt. Die WHOrga entwickelte zuvor Testmuster, wie sie in modifizierte Form für die Feldversuche der BUW zum Einsatz kamen, und führte auch eigene Feldversuche durch. Wesentlicher Unterschied in den von WHOrga und BUW betreuten Versuchen war das verwendete Medium: während WHOrga mit Teichwasser testete, bediente sich die BUW gereinigten Abwassers. Im Laborversuch der BUW kam eine handelsübliche Trübungsmesssonde der Firma IER (Modell *TurbiSens*) zum Einsatz, die auch bei den späteren Untersuchung Verwendung fand.

Bei den von WHOrga entwickelten D/S-Testmustern handelte es sich um eine Erstentwicklung für eine eigene Trübungsmesssonde, wobei das S-Testmuster für die Streulichtmessung und das D-Testmuster für die Durchlichtmessung konzipiert war. Die Messsignale der Testmuster lagen als Spannungen [V] im Bereich 0 bis 4,38 V vor und waren entweder das Ergebnis der Durchlichtmessung (D-Testmuster) oder aber der Streulichtmessung (S-Testmuster).

Ziel der Untersuchung war es, die prinzipielle Eignung der Testmuster zur Identifikation verschiedener Feststoffkonzentrationen unterschiedlicher Klärschlämme festzustellen. Zu diesem Zweck wurden die Messsignale der Testmuster in mehreren Messreihen, bei denen unterschiedliche Testmedien sukzessive verdünnt wurden, aufgezeichnet und ausgewertet. Als Testmedien kamen Schlämme verschiedener Kläranlagen in Weimar und dessen Umland sowie Formazin zum Einsatz. Durch die Verwendung von Formazin als Substrat sollte die Messgenauigkeit der Sonden unter standardisierten Bedingungen ermittelt werden. In allen Messreihen diente die Trübungsmesssonde der Firma IER (Modell *TurbiSens*) als Referenz.

Ergebnisse 1: Unterdrückung von Belagbildung durch UVC-Licht

In den Versuchen der WHOrga mit Teichwasser kam es zu einer deutlichen Belagbildung an den Testmustern, die durch den Einsatz von UVC-Strahlern reduziert werden konnte. In den Versuchen der BUW in realen Abwässern konnte jedoch nur eine geringe Belagbildung beobachtet werden. Ein signifikanter Einfluss der UVC-Bestrahlung war somit nicht zweifelsfrei nachweisbar. Trotz divergenter Versuchsergebnisse wurde bei der Weiterentwicklung der Sonde am Prinzip der UVC-Bestrahlung zur Prävention von Belagbildung festgehalten, um dieses Alleinstellungsmerkmal zu erhalten.

Generell verursacht der Einsatz eines UVC-Strahlers zusätzliche Kosten bei Entwicklung, Konstruktion und Herstellung des gesamten Messsystems, was sich letztlich im Preis widerspiegelt. Ob der erhoffte Nutzen des UVC-Strahlers (Wartungsfreiheit) die höheren Investitions- und Betriebskosten rechtfertigt, wurde im weiteren Entwicklungsprozess kritisch hinterfragt. Um die bestehenden Unsicherheiten zu minimieren, wurde schließlich eine Parallelentwicklung vorgeschlagen und angegangen. Im Ergebnis stehen nun zwei Bauformen von Messsonden zur Verfügung, die sich lediglich darin unterscheiden, ob ein UV-Strahler zum Einsatz kommt oder nicht. Möglicherweise können sich hierdurch höhere Verwertungschancen für das Produkt ergeben. Die optionalen Bauformen sind aber auch bei der Entwicklung und Konstruktion einer geeigneten Messstelle im Ablauf der KKA von Relevanz.

Grundsätzlich muss beachtet werden, dass der sich bildende Belag an Messsonde und Strahler nicht eintrocknet, da ansonsten die Entfernung praktisch unmöglich wird. Dies setzt eine permanente Benetzung der Messung mit Wasser/Abwasser voraus, was die Entwicklung einer geeigneten Einbaumesstelle erfordert. Von Vorteil wäre, wenn die Einbaumesstelle der Sonde die Funktion einer Probenahmestelle übernehmen könnte: denn die Probennahme von Abwasser aus KKA stellt nach wie vor ein großes Problem dar und könnte mit der Entwicklung einer geeigneten Messstelle einer Lösung näher gebracht werden.

Ergebnisse 2: Überprüfung der entwickelten Prototypen

Die Überprüfung der D-Testmuster (Durchlichtmessung) ergab ein gutes Ergebnis: Mit zunehmender Verdünnung nimmt die Spannung am Photosensor zu. Der Messbereich wird in vollem Umfang ausgenutzt. Im Bereich zwischen 1 bis 4 V ist unabhängig von der Substratart ein enger Zusammenhang des Messsignals mit dem Feststoffgehalt des Substrats gegeben.

Demgegenüber waren die Resultate der Streulichtmessung unbefriedigend, weil nur extrem geringe Messspannungen im Millivoltbereich erzeugt werden. In der Konsequenz kann die Streulichtmessung bei gleicher Konfiguration der S-Testmuster auch keinen Beitrag zur Trübungsmessung leisten. Interessant ist aber, dass die Messsignale der S-Testmuster den für Streulichtmessung charakteristischen Verlauf einer Glockenkurve zeigen. So wird das Streulichtsignal in der Messzelle zwar sehr abgeschwächt, doch ist im Bereich zwischen 0,02 und 0,09 V die Korrelation zum Feststoffgehalt gegeben. Für die weitere Entwicklungsarbeit stellt sich deshalb die Frage, mit welchem technischen und finanziellen Aufwand es möglich ist, den theoretisch vorhandenen Messbereich von 0 bis 5 V (100%) besser auszunutzen. Generell muss aber davon ausgegangen werden, dass die Integration der Streulichtmessung beim Bau der zukünftigen Trübungsmesssonde zusätzliche Kosten verursacht. Nichtsdestotrotz könnte dann ein breiterer Anwendungsbereich der Trübungsmesssonde in Aussicht gestellt werden, was im Hinblick der vielfältigeren Produktvermarktung sicherlich von Vorteil ist.

Der in der Messreihe mit Formazin identifizierte Messbereich des D-Testmusters kann mit 100 bis 2000 FNU angegeben werden. Im diesem Bereich besteht auch für andere Substrate eine enger funktionaler Zusammenhänge zwischen den Durchlichtspannungen U_{DL} [V] des D-Testmusters einerseits und den Messsignalen [FNU] der handelsüblichen Trübungsmesssonde. Die Anwendung des D-Testmusters muss somit nicht auf die binäre Grenzwerterkennung beschränkt bleiben.

Tatsächlich konnten durch entsprechende statistische Auswerteverfahren und logische Annahmen einige Regressionsfunktionen gefunden werden, die den Zusammenhang zwischen Durchlichtspannung U_{DL} und Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen AFS hinreichende genau beschreiben. Die hyperbolische Funktion $AFS = 1/(U_{DL} + 0,175)$ kann Feststoffgehalte im Ablauf von KKA für den Bereich $0,3 \text{ g/l} \leq AFS \leq 3,0 \text{ g/l}$ zuverlässig abbilden.

Bewertung

Mit der Überprüfung der D/S-Testmuster für eine neuartige Trübungsmesssonde konnte zunächst der Weiterentwicklungsbedarf für die S-Testmuster aufgezeigt werden. Im Gegensatz zum D-Testmuster, welches die gestellten Erwartungen erfüllte bzw. sogar übertraf, erwies sich das S-Testmuster aufgrund schwacher Signalstärken jedoch als unbrauchbar. Da der für eine kontinuierliche Betriebskontrolle von KKA's zu erfassende Wertebereich an Feststoffgehalten ($0,3 \leq \text{AFS g/l}$) allein mit dem D-Testmuster hinreichend genau abgebildet werden kann, scheint die Weiterentwicklung der Streulichtmessung (S-Testmuster) bzw. die bislang verfolgte Kombination aus Durchlicht- und Streulichtmessung für die zukünftige Trübungsmesssonde verzichtbar.

Der Vergleich des D-Testmusters mit der am Markt erhältlichen IER-Trübungsmesssonde *TurbiSens* bestätigt das große Potential des D-Testmusters zur permanenten Kontrolle des Feststoffgehaltes im Ablauf von Kläranlagen im Bereich 50 bis 1.000 FNU. Es ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten, die über die Identifikation von Schlammabtrieb aus KKA weit hinausgehen.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass mit dem D-Testmuster eine dem Zweck dienliche Sonde mit erweitertem Potential konstruiert wurde. Die Weiterentwicklung der D-Testmuster zum Prototypen und Produkt *Kompakt-Trübungsmessgerät „SAFETY-TOP TSA 1“* ist im Report von WHOrga und IPSF ausführlich beschrieben.