





**Universität der Bundeswehr München**  
**Institut für Wasserwesen**  
**Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik**

**Mitteilungen**  
**Heft 104 / 2010**

**Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von belüfteten  
Sandfängen auf Kläranlagen**

**Dr.-Ing. Christina Hirschbeck**

München 2010

## **Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Mitteilungen / Institut für Wasserwesen; Heft 104

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Disse  
Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert  
Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek  
Hydromechanik und Wasserbau

Institut für Wasserwesen  
Universität der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg  
Tel: +49 (0)89/6004-3491  
Fax: +49 (0)89/6004-3858  
<http://www.unibw.de/ifw/swa>

Satz: Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München  
85577 Neubiberg

Copyright: Shaker Verlag, Aachen 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

Druck gefördert aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr München

**ISBN 978-3-8322-9093-1**

Shaker Verlag GmbH \* Postfach 101818 \* 52018 Aachen  
Telefon : 02407 / 9596-0 \* Telefax 02407 / 9596-9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) \* E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die Abwasserreinigung besteht aus mehreren Verfahrensstufen, die zusammenwirkend sicherstellen müssen, dass die Anforderungen erfüllt werden und die Gewässer vor nachteiligen Auswirkungen aus Abwassereinleitungen geschützt werden. Der Sandfang, als erste Behandlungsstufe nach dem Rechen und vor der mechanischen und biologischen Abwasserreinigung, hat dabei die Aufgabe, die nachfolgenden Reinigungsstufen, sowie die Pumpen und Leitungen vor Schäden durch Abrasion, Verstopfungen und Ablagerungen zu schützen. Damit hat die Leistung des Sandfangs entscheidende Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit der gesamten Kläranlage. Eine hohe Abscheideleistung von Sand und anderen mineralischen Stoffen kann durch lange Durchflusszeiten erreicht werden. Diese Durchflusszeiten haben allerdings zum Nachteil, dass auch organische Stoffe mit abgeschieden werden. Dieser Effekt, der sich einerseits auf die Qualität des Sandfanggutes im Hinblick auf dessen Verwertung negativ auswirkt und andererseits organische Stoffe entfernt, die in den nachfolgenden Stufen zur Denitrifikation oder zur Biogaserzeugung erwünscht sind, sollte vermieden werden. Um dies zu reduzieren, werden Sandfänge mit Belüftung gebaut und betrieben.

Durch den Lufteintrag werden die Durchflussschwankungen im Tages- und Wochengang durch eine Sekundärströmung ausgeglichen, so dass eine gute Abscheideleistung des Sandes bei gleichzeitigem in Schwebelagern Halten der organischen Abwasserinhaltsstoffe erreicht werden kann. Obwohl es inzwischen eine Vielzahl an Bemessungsempfehlungen für belüftete Sandfänge gibt, unterliegen die empfohlenen Werte für den Lufteintrag erheblichen Schwankungen. Für die Durchflusszeiten sind in den letzten Jahren auch Empfehlungen von bisher 20 Minuten bis zu 5 Minuten zu finden. Dies ist gekoppelt mit nicht standardisierten Verfahren für die Abscheideleistung, so dass bei Anlagenbauern, Planern und Betreibern Diskussionen und Unsicherheiten über die richtige Auslegung von Sandfängen bestehen. Frau Christina Hirschbeck (geb. Schwarz) hat sich daher für ihre Promotion die Aufgabe gestellt, an Hand grundlegender Untersuchungen hierfür Lösungsvorschläge zu erarbeiten.

Zielsetzung der Dissertation war die Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von belüfteten Sandfängen und deren Abscheidegrad. Aus diesen Ergebnissen sollten Vorschläge für das Prüfverfahren und die dazu gehörigen Prüfstände, sowie konstruktive und betriebliche Empfehlungen abgeleitet werden. Als Vorgehensweise wurden zunächst großtechnische Untersuchungen an bestehenden Sandfängen mit Massenbilanzen durchgeführt. Um die einzelnen Einflussfaktoren detailliert erfassen zu können, wurde ein physikalisches Modell im Maßstab 1:4 entwickelt und aufgebaut. Daran konnte der Einfluss der Sandkonzentration, Korngrößenverteilung, Lufteintrag, Einblastiefe, Anordnung der Belüfter, Durchfluss und Querschnittsgestaltung auf die Geschwindigkeitsverteilung, die turbulente kinetische Energie und den Abscheidegrad systematisch untersucht werden.

Zunächst wurden 55 Anlagen bezüglich der Bauformen ausgewertet, wobei 80 % der Sandfänge einen trapezförmigen Querschnitt aufweisen. Die Beckenlänge mit  $i. M. 10,7 \cdot b_{SF}$  entspricht den DWA-Bemessungsvorschlägen. Dabei fällt auf, dass bei 78 % der Anlagen der Zulaufstrom oben in den Sandfang eingeleitet wird und bei den

restlichen mittig. Umfangreiche Messungen an den Sandfängen der Kläranlage München I und der Kläranlage Karlsfeld ergaben einen ersten Einblick in die Geschwindigkeitsverteilungen bei verschiedenen Durchflussgeschwindigkeiten und Lufteinträgen. Untersuchungen zum Abscheidegrad an 6 Kläranlagen anhand von Sieblinien im Zu- und Ablauf des Sandfangs, der Korngrößenverteilung und der Sandkonzentration im Zulauf ergaben als wesentliches Ergebnis, dass die Sandkonzentration der Korngrößen  $\geq 0,2$  mm im Zulauf des Sandfangs den Abscheidegrad maßgeblich beeinflusst. Bei Konzentrationen unter 50 mg/l nimmt der Abscheidegrad erheblich ab.

Die Versuchsergebnisse des Sandfangmodells sind nach Fließgeschwindigkeit und turbulenter kinetischer Energie unter den Einflüssen des Luftvolumenstromes, der Einblastiefe, des Durchflusses und der Querschnittsgestaltung gegliedert. Mit zunehmender Einblastiefe und Durchfluss steigen die Wasserströmung und die turbulente kinetische Energie. Die Querschnittsform hat insbesondere im Sohlbereich Einfluss auf die Walzengeschwindigkeit. Der Abscheidegrad wurde wie die Geschwindigkeitsverteilung nach den oben genannten Einflussfaktoren untersucht. Der Abscheidegrad nimmt dabei insbesondere mit zunehmender Sandfanglänge, abnehmendem Lufteintrag, Einblastiefe und Durchfluss zu. Bei feinerem Sand und geringerer Sandkonzentration nimmt der Abscheidegrad ab.

Zusätzlich sind in der Arbeit Vorschläge zum Prüfverfahren von Sandfängen und zu betrieblichen und konstruktiven Aspekten enthalten. Daraus werden Schlussfolgerungen und Bemessungshinweise abgeleitet, u. a. dass zwei Lastfälle, Trockenwetter mit Sandkonzentrationen von 200 mg/l und Regenwetter mit Sandkonzentrationen von 500 mg/l, untersucht werden sollten. Aus energetischer Sicht wird ein möglichst niedriger Lufteintrag von unter  $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  empfohlen, sowie eine möglichst große Einblastiefe.

Diese grundlegenden, umfangreichen Untersuchungsergebnisse sind eine wertvolle Hilfe für künftige Auslegungen von belüfteten Sandfängen.

München, März 2010

Prof. Dr.-Ing. F. W. Günthert

## Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation : Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit  
von belüfteten Sandfängen auf  
Kläranlagen

Verfasser : Christina Hirschbeck

Promotionsausschuss

Vorsitzender : Prof. Dr.-Ing. M. Keuser  
Universität der Bundeswehr München

1. Berichterstatter : Prof. Dr.-Ing. F.W. Günthert  
Universität der Bundeswehr München

2. Berichterstatter : Prof. Dr.-Ing. K.-H. Rosenwinkel  
Leibniz Universität Hannover

Tag der mündlichen Prüfung : 16.12.2009

Mit der Prüfung erlangter

akademischer Grad : Doktor der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)



## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Wasserwesen an der Universität der Bundeswehr München.

Herrn Professor Dr.-Ing. F.W. Günthert danke ich für seine Unterstützung und die wertvollen Anregungen.

Herrn Professor Dr.-Ing K.-H. Rosenwinkel danke ich für die Übernahme des Koreferats, die konstruktiven Gespräche und das Interesse an meiner Arbeit.

Den Mitgliedern des DWA-Fachausschusses KA-5 „Absetzverfahren“ danke ich für die gute Zusammenarbeit und die konstruktiven Anregungen.

Bei Professor Dr.-Ing. Andreas Malcherek bedanke ich mich für die angeregten Diskussionen.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch Dr.-Ing. Helmut Kulisch und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern vom Labor der Professur für Hydromechanik und Wasserbau, sowie Dr.-Ing. Steffen Krause und seinen Mitarbeiterinnen vom Labor der Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Wasserwesen bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und die freundschaftliche Atmosphäre.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Kläranlagenbetreibern, die mir die Untersuchungen ihrer Sandfänge ermöglichten.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinem Mann Siegfried für die Unterstützung während der ganzen Zeit.

München, im März 2010

Christina Hirschbeck, geb. Schwarz



# INHALTSVERZEICHNIS

1	Nomenklatur .....	5
2	Einführung .....	8
3	Stand der Forschung .....	9
3.1	Sandfangtypen .....	9
3.2	Bemessungsgrundlagen für belüftete Sandfänge.....	9
3.2.1	Lufteintrag .....	9
3.2.2	Konstruktive Empfehlungen.....	11
3.3	Modellsandfänge.....	16
3.3.1	Bisher verwendete Versuchsanlagen .....	16
3.3.2	Ähnlichkeitsgesetze .....	18
3.4	Geschwindigkeitsverteilung.....	20
3.4.1	Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung.....	22
3.4.2	Luftblaseninduzierte Sekundärströmung.....	25
3.4.2.1	Luftblasen in Flüssigkeiten.....	25
3.4.2.2	Bewegter Wasserstrom $Q_c$ .....	32
3.4.2.3	Maximalgeschwindigkeiten.....	33
3.4.2.4	Lage des Walzenmittelpunktes.....	38
3.4.2.5	Mathematische Ansätze für die Geschwindigkeitsverteilung .....	39
3.4.3	Wasserinduzierte Sekundärströmung .....	41
3.4.4	Turbulenz.....	42
3.5	Abscheidegrad .....	44
3.5.1	Anforderungen an die Sandabscheidung .....	44
3.5.2	Parameter der Korngrößenverteilung .....	45
3.5.3	Sinkgeschwindigkeiten nach verschiedenen Ansätzen.....	46
3.5.4	Absetzvorgang in laminarer und turbulenter Strömung .....	51
3.5.5	Kritische Geschwindigkeit zum Transport von Schwebstoffen und Sedimenten.....	52
3.5.6	Sandanfall und Sandbeschaffenheit.....	54
3.5.7	Prüfverfahren und Prüfsande zur Messung des Abscheidegrades .....	59
3.5.8	Ergebnisse von Messungen zum Abscheidegrad.....	63
4	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	69
4.1	Ziele .....	69
4.2	Offene Fragen .....	69
4.3	Aufgaben.....	71

4.4	Vorgehensweise .....	72
5	Versuchsbeschreibung .....	73
5.1	Beschreibung der ausgewählten belüfteten Sandfänge.....	73
5.2	Beschreibung des physikalischen Sandfangmodells.....	81
5.3	Messverfahren.....	83
5.3.1	Messung der Fließgeschwindigkeiten.....	83
5.3.2	Regressionsanalysen der Messwerte.....	85
5.3.3	Messung der Korngrößenverteilung .....	86
5.3.4	Messung des Abscheidegrades .....	89
5.4	Versuche im physikalischen Sandfangmodell .....	91
5.4.1	Kalibrierung .....	91
5.4.2	Versuche am kalibrierten physikalischen Modell.....	94
6	Ergebnisse.....	99
6.1	Messungen an großtechnischen, belüfteten Sandfängen .....	99
6.1.1	Ausgeführte Bauformen von belüfteten Sandfängen.....	99
6.1.2	Ergebnisse der Messungen der Fließgeschwindigkeiten .....	101
6.1.2.1	Sandfang mit Rechteckquerschnitt (Kläranlage München I).....	101
6.1.2.2	Sandfang mit Trapezquerschnitt (Kläranlage Karlsfeld) .....	107
6.1.3	Ergebnisse der Messungen des Abscheidegrades.....	110
6.1.3.1	Abscheidegrad durch Probenahme im Zu- und Ablauf des Sandfanges .....	110
6.1.3.2	Abscheidegrad durch Untersuchung von Sandfanggut und Primärschlamm des Vorklärbeckens .....	118
6.2	Untersuchungen an einem physikalischen Sandfangmodell im Maßstab 1:4.....	119
6.2.1	Auswahl des Versuchssandes .....	119
6.2.2	Ergebnisse der Kalibrierung des physikalischen Modells .....	122
6.2.2.1	Ähnlichkeit des Luftertrages.....	122
6.2.2.2	Einfluss des Düsendurchmessers auf die Walzenströmung und die turbulente kinetische Energie .....	124
6.2.3	Fließgeschwindigkeit und turbulente kinetische Energie im kalibrierten physikalischen Modell .....	129
6.2.3.1	Einfluss des Luftvolumenstroms auf die Blasengröße .....	129
6.2.3.2	Einfluss des Luftvolumenstroms auf die Walzenströmung und die Turbulenz.....	131

6.2.3.3	Einfluss der Einblastiefe auf die Walzenströmung und die Turbulenz.....	136
6.2.3.4	Einfluss des Durchflusses und des Lufteintrages auf die Strömung in Sandfanglängsrichtung und die Turbulenz.....	141
6.2.3.5	Einfluss der Querschnittsgestaltung auf die Strömung und auf die Turbulenz.....	148
6.2.3.6	Lage des Walzenmittelpunktes.....	152
6.2.4	Abscheidegrad im physikalischen Sandfangmodell.....	154
6.2.4.1	Einfluss des Luftvolumenstroms auf den Abscheidegrad.....	154
6.2.4.2	Einfluss der Einblastiefe auf den Abscheidegrad.....	160
6.2.4.3	Einfluss des Durchflusses auf den Abscheidegrad.....	163
6.2.4.4	Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Abscheidegrad.....	166
6.2.4.5	Einfluss der Sandkonzentration auf den Abscheidegrad.....	169
6.2.4.6	Einfluss der Querschnittsgestaltung auf den Abscheidegrad.....	171
6.2.5	Modellierung der Strömung und des Partikeltransports.....	172
6.2.5.1	Wirkungsgraph.....	172
6.2.5.2	Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes.....	174
6.2.5.3	Verifikation des mathematischen Modells anhand von eigenen Messungen.....	185
6.2.5.4	Verifikation des mathematischen Modells anhand von Literaturangaben.....	188
6.2.5.5	Partikelbahnen.....	190
7	Diskussion der Ergebnisse.....	201
7.1	Fließgeschwindigkeit und turbulente kinetische Energie.....	201
7.1.1	Kritische Geschwindigkeiten für eine Wiederaufwirbelung von Sand.....	201
7.1.2	Geschwindigkeitsverteilung in Querrichtung.....	202
7.1.3	Geschwindigkeitsverteilung in Längsrichtung.....	204
7.1.4	Turbulente kinetische Energie.....	205
7.2	Simulation der Partikelbahnen.....	210
7.3	Maßgebliche Einflußfaktoren auf den Abscheidegrad.....	213
7.4	Prüfverfahren zum Abscheidegrad.....	219
7.5	Betriebliche und konstruktive Aspekte.....	221
8	Schlussfolgerungen und Bemessungshinweise.....	227
8.1	Prüfverfahren zum Abscheidegrad.....	227
8.2	Betriebliche und konstruktive Aspekte.....	230

---

9	Berechnungsbeispiel .....	236
9.1	Bemessung nach den vorliegenden Ergebnissen .....	236
9.2	Bemessung nach DWA (2008) .....	241
10	Zusammenfassung und Ausblick .....	244
11	Literaturverzeichnis .....	252
12	Abbildungsverzeichnis .....	257
13	Tabellenverzeichnis .....	265