



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

AAB Frey
Abwassertechnische
Ausbildung und Beratung



Institut für Wassergüte
Ressourcenmanagement
und Abfallwirtschaft

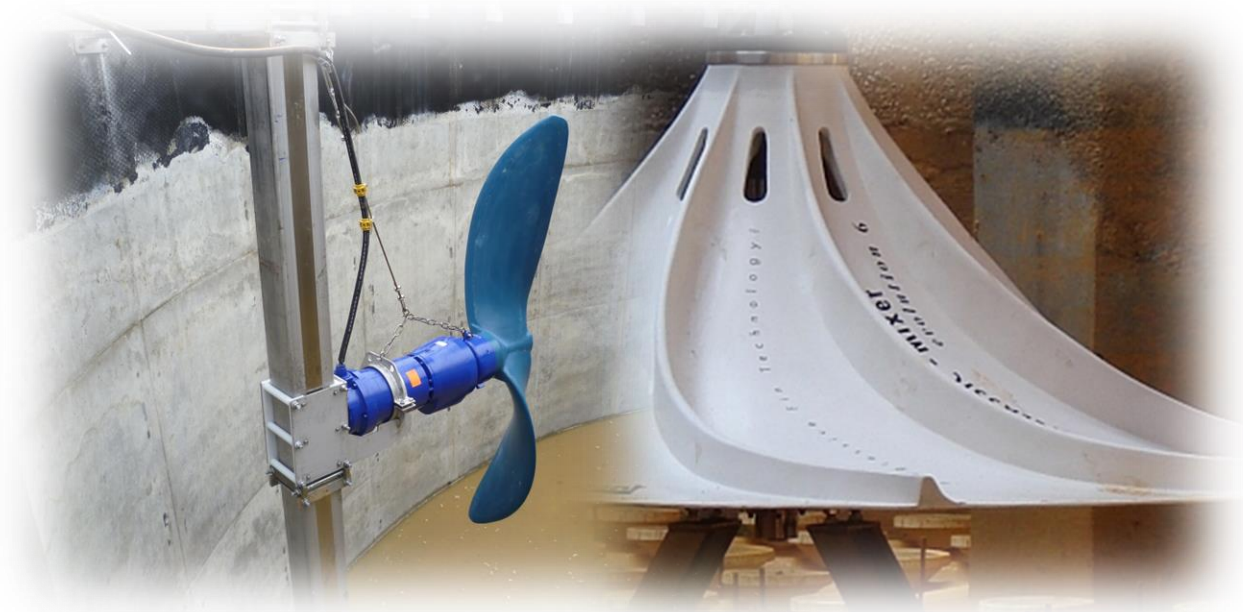
Karlsplatz 13/226
1040 Wien



ENERGIEVERBRAUCH VON RÜHRWERKEN AUF BELEBUNGSANLAGEN



FORSCHUNGSBERICHT AUS DEN
MITTELN DER KLÄRANLAGEN-
NACHBARSCHAFTEN



Klemens Füreder, TU Wien

Wilhelm Frey, AAB Frey

Karl Svardal, TU Wien

Jörg Krampe, TU Wien

Wien, März 2016

Impressum

Projekttitle:	Energieverbrauch von Rührwerken auf Belebungsanlagen
Auftraggeber:	Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) Marc-Aurel-Straße 5 A-1010 Wien
Auftragnehmer:	Technische Universität Wien Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft (Forschungsbereich Wassergütewirtschaft) Karlsplatz 13/226 A-1040 Wien
Projektleiter:	Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Svardal
Autoren:	Dipl.-Ing. Klemens Füreder Univ.Lektor Dipl.-Ing. Dr.techn. Wilhelm Frey Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Svardal Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Jörg Krampe

Inhaltsverzeichnis

0.	Kurzfassung.....	5
1.	Einleitung	6
2.	Grundlagen des Energieverbrauchs von Rührwerken	7
2.1	Aufgaben von Rührwerken	7
2.2	Zielwert und Toleranzwert.....	7
2.3	Einwohnerspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl A).....	7
2.4	Leistungsdichte (Kennzahl B).....	8
2.5	Volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl C).....	8
2.6	Leistungsspezifischer Propellerschub (Kennzahl D)	9
2.7	Sohlgeschwindigkeit	10
2.8	Rheologische Grundlagen der Belebtschlamm-Suspendierung.....	11
2.9	Einfluss von Beckengeometrie, Positionierung und Belüftung	13
3.	Datengrundlage der Untersuchung.....	14
4.	Ergebnisse Teil 1: IST-Zustand des Energieverbrauchs	16
4.1	Einwohnerspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl A).....	16
4.2	Leistungsdichte (Kennzahl B).....	18
4.2.1	Zielwerte und Toleranzwerte der Leistungsdichte	18
4.2.2	Leistungsdichte von belüfteten und unbelüfteten Becken	19
4.2.3	Einfluss des Rührwerkstyps auf Leistungsdichte	20
4.2.4	Einfluss von Becken- und Belüftungsart auf Leistungsdichte.....	22
4.2.5	Zielwerte der Leistungsdichte vs. Ablagerungen	22
4.3	Volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl C).....	22
4.3.1	Belüftete Becken.....	23
4.3.2	Unbelüftete Becken	23
4.4	Leistungsspezifischer Propellerschub (Kennzahl D)	24
4.5	Detailauswertung von drei Kläranlagen.....	25
4.5.1	Kläranlage Wartberg a. d. Krems (45.000 EW ₁₂₀)	26
4.5.2	Kläranlage Bad Aussee (25.000 EW ₁₂₀).....	28
4.5.3	Kläranlage 3 (32.000 EW ₁₂₀).....	32

5.	Ergebnisse Teil 2: Energieoptimierungspotentiale.....	35
5.1	Reduktion der Leistungsdichte (Kennzahl B).....	35
5.2	Zeit-Pause-Schaltung von Rührwerken (Kennzahl C).....	36
5.2.1	Belüftete Becken.....	36
5.2.2	Unbelüftete Becken	39
5.2.3	Auswirkung auf die Lebensdauer von Rührwerken	40
5.3	Diskussion Energieeinsparungsoptionen	40
5.3.1	Aktive Beckendurchmischung.....	40
5.3.2	Passive Beckendurchmischung.....	42
6.	Zusammenfassung.....	43
6.1	Teil 1: IST-Zustand des Energieverbrauchs.....	43
6.2	Teil 2: Energieoptimierungspotentiale.....	44
7.	Ausblick	46
7.1	Forschungsfelder der Energieoptimierung von Rührwerken	46
7.2	Physikalische Grundlagen der Belebtschlamm-Suspendierung.....	47
7.3	Integration von Beckengeometrie, Belüftungs- und Rührwerkssystem	48
	Literatur.....	50

Kurzfassung:

Rührwerke auf Belebungsanlagen verbrauchen in Abhängigkeit der Kläranlagenausbaugröße ca. 10 bis 25 % der Energie der „mechanisch-biologischen Abwasserreinigung“. Anhand der Parameter einwohnerspezifischer Energieverbrauch [kWh/EW_{120/a}], Leistungsdichte [W/m³] und volumenspezifischer Energieverbrauch [Wh/m³/d] liefert der vorliegende Forschungsbericht einen kompakten Überblick bezüglich Energieverbrauch und Energieoptimierung von Rührwerken. Die zwei grundlegenden Möglichkeiten der Energieoptimierung liegen in der Verminderung der Leistungsdichte sowie in der Verringerung der Laufzeiten von Rührwerken (Zeit-Pause-Schaltung). Das Spektrum der Energieeinsparungsoptionen reicht dabei von kontinuierlicher Durchmischung bei Leistungsdichten von < 1 W/m³ bis zur Durchmischung mittels kurzen, energieintensiven Impulsen (Impulsbelüftung, Impulsrühren). Es gilt dabei immer folgender Zusammenhang: Je kürzer die Dauer des Energieeintrags, desto höher die Leistungsdichte entlang der jeweiligen volumenspezifischen Energieverbrauchs-Isolinie. Unabhängig von der diesbezüglichen Verfahrenswahl können durch die Optimierung von Durchmischungskonzepten volumenspezifische Energieverbräuche von < 24 Wh/m³/d erreicht werden. Ein schon bekannter Zusammenhang wird durch den vorliegenden Bericht bestätigt: Die Leistungsdichte von Rührwerken steht in umgekehrt-proportionaler Abhängigkeit vom Beckenvolumen.

Key Words:

Rührwerke, Energieverbrauch, Energieoptimierung, Leistungsdichte, Beckenvolumen, Beckengeometrie, Zeit-Pause-Schaltung, volumenspezifische Energieverbrauchs-Isolinie

1. Einleitung

Der Stromverbrauch von Rührwerken stellt nach jenem der Belüftung einen wesentlichen Teil des Energieverbrauchs der „mechanisch-biologischen Abwasserreinigung“¹ dar. Im Gegensatz zu den Belüftungssystemen standen Rührwerke in den letzten Jahrzehnten jedoch noch nicht im zentralen Fokus der Energieoptimierung. Auf Grund fortlaufender gesellschaftlicher Bemühung zur Energieeinsparung beginnt man in den letzten Jahren, auch Rührwerke unter dem Blickwinkel der Energieeffizienz zu betrachten (DWA, 2013).

Basierend auf den bestehenden theoretischen Grundlagen zum Energieverbrauch von Rührwerken (Kapitel 2) und den Daten aus einer Umfrage (Kapitel 3) fokussiert sich der vorliegende Forschungsbericht auf den derzeit bestehenden Energieverbrauch und auf die vorhandenen Energieoptimierungspotentiale bei Rührwerken. Das Ziel der Untersuchung ist es einerseits, einen kompakten Überblick bezüglich der IST-Situation des Energieverbrauchs von Rührwerken bzw. generell von „Durchmischungs-Systemen“ auf Belebungsanlagen in Österreich zu schaffen (Kapitel 4). In einem weiteren Schritt werden die vorhandenen Optimierungspotentiale dieses Energieverbrauchs herausgearbeitet und diskutiert (Kapitel 5).

Die Analyse des IST-Zustands und der Optimierungspotentiale erfolgt dabei hauptsächlich anhand vier verschiedener Energie- bzw. Leistungskennzahlen. Kennzahl A bezieht sich auf die CSB-Belastung der Gesamtkläranlage, die Kennzahlen C und B auf durchmischte Becken und die Kennzahl D auf Rühraggregate (Tabelle 1).

Tabelle 1: Energie- bzw. Leistungskennzahlen des Energieverbrauchs von Rührwerken

Kennzahl A: einwohnerspezifischer Energieverbrauch [kWh/EW _{120/a}]	Kläranlage
Kennzahl B: Leistungsdichte [W/m ³]	Becken
Kennzahl C: volumenspezifischer Energieverbrauch [Wh/m ³ /d]	
Kennzahl D: leistungsspezifischer Propellerschub [N/kW]	Rühraggregat

¹ Der Begriff „mechanisch-biologische Abwasserreinigung“ ist in diesem Forschungsbericht und insbesondere in Abbildung 5 definiert als „Prozess 2“ des österreichischen Abwasserbenchmarkings (ÖWAV, 2013).

2. Grundlagen des Energieverbrauchs von Rührwerken

2.1 Aufgaben von Rührwerken

Durch Energieoptimierungsmaßnahmen bei Rührwerken darf es zu keiner Verschlechterung in der Erfüllung der verfahrenstechnischen Aufgaben von Rührwerken in Belebungsanlagen kommen. Diese sind nach DWA (2013) folgendermaßen definiert (Tabelle 2):

Tabelle 2: Aufgaben von Rührwerken in Belebungsanlagen – Auszug aus (DWA, 2013)

- Homogenisieren (Ausgleich von Konzentrations- und Temperaturgefälle),
- Suspendieren (Vermeidung und Mobilisierung von Ablagerungen) im System fest/flüssig bzw. fest/flüssig/gasförmig,
- Vermeiden von Kurzschlussströmungen,
- Einbringen einer gerichteten Strömung.

Homogenisierung und Suspendierung des Abwasser-Schlamm-Gemisches sind in jedem Becken erforderlich. Die Notwendigkeit des Einbringens einer gerichteten Strömung bzw. der Vermeidung von Kurzschlussströmungen ist von der Beckenart bzw. Verfahrenstechnik abhängig. Umlaufbecken unterscheiden sich hier z.B. von Rechteckbecken.

2.2 Zielwert und Toleranzwert

Angesichts der großen Anzahl verfahrenstechnischer Varianten und Rahmenbedingungen bei Rührwerken in Belebungsanlagen ist die Festlegung einer Benchmark (Best-Practice-Prinzip) bei Rührwerken nicht unproblematisch. Zur näherungsweise Erfassung von Optimumwerten werden in diesem Forschungsbericht in Anlehnung an Haberkern et al. (2008) Zielwerte und Toleranzwerte bezüglich Rührenergie (einwohnerspezifischer Energieverbrauch, Leistungsdichte) empirisch aus der Häufigkeitsverteilung abgeleitet:

- Zielwert: 25 %-Quantil (ohne Datenausreißer: 20 %-Quantil)
- Toleranzwert: Median

Bei fortlaufender Reduktion des Energieverbrauchs auf Belebungsanlagen werden auch die Ziel- und Toleranzwerte fortlaufend kleiner.

2.3 Einwohnerspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl A)

Der einwohnerspezifische Energieverbrauch [Einheit: kWh/EW₁₂₀/a] wird in diesem Forschungsbericht definiert als Quotient aus jährlichem Energieverbrauch und mittlerer CSB-Zulaufkraft zur Kläranlage. Er ist von der Ausbaugröße einer Kläranlage unabhängig. Der „Normalbereich“ des einwohnerspezifischen Energieverbrauchs von Rührwerken liegt nach Lindtner (2008) zwischen 1,5 und 4,5 kWh/EW₁₂₀/a (Tabelle 3).

Tabelle 3: „Normalbereich“ einwohnerspezifischer Energieverbrauch der „mechanisch-biologischen Abwasserreinigung“ (Lindtner, 2008)

Energieverbraucher		von	bis
Belüftung	kWh/EW _{120/a}	11,5	22,0
Rührwerk	kWh/EW _{120/a}	1,5	4,5
RS-Pumpen	kWh/EW _{120/a}	1,0	4,5
Sonstiges (VKB, NKB,...)	kWh/EW _{120/a}	0,5	2,0
mechanisch-biologische Abwasserreinigung (Summe)	kWh/EW_{120/a}	14,5	33

2.4 Leistungsdichte (Kennzahl B)

Ein zentraler Parameter bezüglich der Beurteilung und Einstufung des Energieverbrauchs von Rührwerken ist Ihre Leistungsdichte. Diese errechnet sich als Quotient aus Leistungsaufnahme und Beckenvolumen. Der Leistungsdichte wird in der Literatur u.a. oft das Formelzeichen W_R zugeordnet. Da „ W “ in der Physik jedoch der Arbeit (Energie) vorbehalten ist, erscheint es konsistenter, der Leistungsdichte das Formelzeichen P_R zuzuordnen, wobei das Subskript „ R “ für Raum steht:

$$P_R = P_{Raum} = \frac{P}{V_{BB}} \quad (1)$$

$[P_R]$	$= W \cdot m^{-3}$	Leistungsdichte
$[P]$	$= W$	Leistungsaufnahme
$[V_{BB}]$	$= m^3$	Belebungsbeckenvolumen

Aus einer Untersuchung in Baden-Württemberg und angrenzenden Bundesländern (Baumann et al., 2014) ergaben sich die vom Beckenvolumen abhängigen Zielwerte der Leistungsdichte von Rührwerken im Denitrifikations- bzw. Anaerobvolumen von Belebungsanlagen zu 4,0 - 1,5 W/m³ (Tabelle 4).

Tabelle 4: Zielwerte der Leistungsdichte von Rührwerken (Baumann et al., 2014)

Beckenvolumen	Leistungsdichte
m³	W/m³
200 - 500	4,0 - 2,5
500 - 1000	2,5 - 2,0
1000 - 2000	2,0 - 1,5
> 2000	1,5

2.5 Volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl C)

Rührwerke können aus Gründen der Energieoptimierung vor allem während der Belüftungsphasen teilweise oder ganz abgeschaltet werden (Haberker et al., 2008). Auch in unbelüfteten Becken ist die Zeit-Pause-Schaltung von Rührwerken eine Möglichkeit, Energie

einzusparen (Baumann et al., 2014). Für die Berechnung des volumenspezifischen Energieverbrauchs $W_{R,spez.}$ muss die Leistungsdichte P_R daher mit der täglichen Laufzeit der Rührwerke t_d multipliziert werden:

$$W_{R,spez.} = P_R \cdot t_d \quad (2)$$

$[W_{R,spez.}]$	$= \text{Wh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$	volumenspezifischer Energieverbrauch
$[t_d]$	$= \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$	tägliche Laufzeit der Rührwerke / allgemein: tägliche Dauer des Mischenergieeintrags

Mit Hilfe des Parameters $W_{R,spez.}$ kann der tatsächliche Energieverbrauch von Rührwerken (verallgemeinert: „Durchmischungs-Systemen“) berechnet bzw. miteinander verglichen werden. Analog zur Situation bei Rührwerken kann $W_{R,spez.}$ auch für Impulsbelüftungssysteme berechnet werden. Die von der Impulsbelüftung erzeugte Leistungsdichte wird dabei mit der mittleren täglichen Laufzeit der Impulsbelüftung multipliziert; selbiges gilt in gleicher Weise auch für Impulsrührsysteme.

2.6 Leistungsspezifischer Propellerschub (Kennzahl D)

Propellerschub

Maßgebend für die Beurteilung der Wirksamkeit/Effektivität von Rührwerken ist die durch das Rühraggregat an das Fluid (Wasser, Belebtschlamm) übertragene Kraft, also der „Schub“ bzw. „Propellerschub“ [N]. Da der Propellerschub bei vielen Rührwerken nicht gemessen wird, dient die Leistungsdichte häufig als sein Ersatzwert (DWA, 2013).

Leistungsspezifischer Propellerschub

Der leistungsspezifische Propellerschub R_{FP} (force-power ratio) gibt Auskunft über die energetische Effizienz eines Rühraggregats. Er errechnet sich als Quotient aus Propellerschub F und Leistungsaufnahme P :

$$R_{FP} = \frac{F}{P} \quad (3)$$

$[R_{FP}]$	$= \text{N} \cdot \text{kW}^{-1}$	leistungsspezifischer Propellerschub
$[F]$	$= \text{N}$	Propellerschub

Mit Hilfe des Parameters R_{FP} kann die energetische Effizienz verschiedener Rührwerksmodelle miteinander verglichen werden. Frey (2011a) gibt als typischen Wert für langsamlaufende Horizontalrührwerke 900 N/kW an. In Wilo (2013) wird für diese Rührwerkskategorie ein Bereich von ca. 600 bis 1.400 N/kW angegeben.

Die im Jahr 2007 veröffentlichte Vorschrift ISO 2163 dient der standardisierten Ermittlung des leistungsspezifischen Propellerschubs von Rührwerken und ermöglicht somit den Vergleich der Leistungsfähigkeit von verschiedenen Rühraggregaten (Frey, 2011a).

2.7 Sohlgeschwindigkeit

Der erste und bekannteste Hinweis bezüglich Sohlgeschwindigkeiten findet sich schon in der 2. (und 3.) Auflage des ATV-Handbuchs der Abwassertechnik (ATV, 1975; ATV, 1985): „...*Strömungsgeschwindigkeiten von minimal 15 cm/s bei leichtem Schlamm (mit einem Index über 100 ml/g) bis 30 cm/s für schweren Schlamm...*“. Diese Angaben bezogen sich damals jedoch noch auf Belüftungssysteme. Ohne die Differenzierung in leichten/schweren Schlamm erfolgt dann in der 4. Auflage des ATV-Handbuchs (ATV, 1997) ein Hinweis für anaerobe bzw. anoxische Mischbecken, wo „*ablagerungsfreie Geschwindigkeiten*“ von 0,20 - 0,30 m/s empfohlen werden. Im Arbeitsblatt A 131 (DWA, 2000) wurden bezüglich Sohlgeschwindigkeiten „*in Bereichen außerhalb von an der Sohle installierten Belüftungseinrichtungen*“ die Angaben von ATV (1975, 1985) übernommen. Im Entwurf der Neufassung des Arbeitsblatts A 131 (DWA, 2015) wird schließlich auf das Merkblatt M 229-1 (DWA, 2013) verwiesen:

„Bei einem gut absetzbaren Schlamm (ISV < 80 ml/g) und geringen Feststoffkonzentrationen im Belebungsbecken (TS_{BB} < 2 g/l) mit entsprechend höheren Sinkgeschwindigkeiten ist davon auszugehen, dass eine bodennahe Geschwindigkeit von mindestens 0,25 m/s zur Vermeidung von Ablagerungen ausreichend ist... Bei schwerer absetzbarem Schlamm (ISV > 130 ml/g) und höheren Feststoffgehalten (TS_{BB} > 4 g/l) und damit geringeren Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes kann von einer bodennahen Geschwindigkeit von mehr als 0,1 m/s ausgegangen werden, um Ablagerungen zu vermeiden.“

An dieser Stelle ein wichtiger Hinweis: Zur Verhinderung von Ablagerungen ist nicht der Mittel- oder Medianwert der Sohlgeschwindigkeit ausschlaggebend, sondern die „*Spitzenwerte und deren Häufigkeit*“ (Frey, 2009). Ob es sich bei den Mindest-Geschwindigkeitsangaben in DWA (2013) um Mittelwerte (bei eingeschaltetem Rührwerk) oder um „mindestens zu erreichende Spitzenwerte“ handelt, ist dort nicht definiert. Nach Frey (2009) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Angaben in DWA (2013) als „mindestens zu erreichende Spitzenwerte“ der Sohlgeschwindigkeit gehandhabt werden können.

In Tabelle 5 sind die Mindest-Sohlgeschwindigkeitsangaben der in diesem Kapitel zitierten Regelwerke zusammengefasst:

Tabelle 5: Übersicht über Mindest-Sohlgeschwindigkeitsangaben

Regelwerk (Jahr)	v [m/s]	bei ISV [ml/g]	bei TS_{BB} [g/L]
ATV-Handbuch 2. u. 3. Auflage (1975, 1985)	0,15 bis 0,30	> 100 -	- -
ATV-Handbuch 4. Auflage (1997)	0,20 - 0,30	-	-
DWA-A 131 (2000)	0,15 - 0,30	-	-
DWA-M 229-1 (2013)	0,10 bis 0,25	> 130 < 80	> 4 < 2

2.8 Rheologische Grundlagen der Belebtschlamm-Suspendierung

Daucher (1980) weist darauf hin, dass Mindest-Sohlgeschwindigkeitsangaben wie in ATV (1975) (Kapitel 2.7) unbefriedigend sind, da „die Schleppkraft einer Strömung entscheidend von der Form des Strömungsprofils bzw. vom Geschwindigkeitsgradienten an der Beckensohle abhängt und die gleiche mittlere Geschwindigkeit sich aus sehr unterschiedlich geformten Strömungsprofilen ergeben kann.“ Er identifiziert als das entscheidende Kriterium bezüglich Ablagerungen den an der Beckensohle bzw. an der Oberfläche eines schon festsitzenden (= abgelagerten) Belebtschlammes angreifenden „kritischen Geschwindigkeitsgradienten“.

Der Ausgangspunkt der theoretischen Herleitung des „kritischen Geschwindigkeitsgradienten“ in Daucher (1980) ist die Tatsache, dass Belebtschlamm auch schon bei kleinen Trockensubstanzgehalten (TS_{BB}) ein nicht-newtonsches Fließverhalten aufweist. Einen guten Überblick über diesbezügliche Untersuchungen bietet Ratkovich et al. (2013). Daucher (1980) postuliert in Bezug auf das Suspendierungs-/Ablagerungsverhalten ein bingham'sches Verhalten des Belebtschlammes:

$$\tau = \tau_B + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

$[\tau]$	= Pa	Schubspannung
$[\tau_B]$	= Pa	Bingham-Fließgrenze
$[\eta_B]$	= Pa·s	Bingham-Viskosität
$[\dot{\gamma}]$	= s ⁻¹	Geschwindigkeitsgradient (= Scherrate)

Um Belebtschlamm zu bewegen, ist demnach das Überschreiten der Bingham-Fließgrenze τ_B erforderlich. Ein an der Beckensohle abgelagerter (festsitzender) Schlamm weist dabei – vor allem auf Grund des höheren TS_{BB} (u.a. Rosenberger et al., 2002) – andere rheologische Parameter (τ_B , η_B) auf als suspendierter (fließender) Schlamm (Abbildung 1).

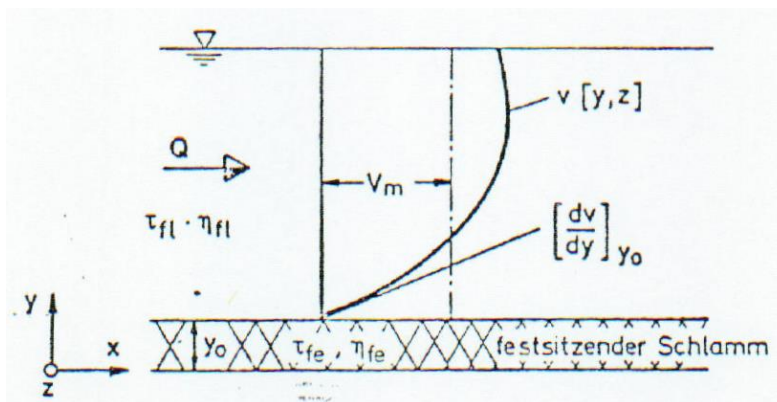


Abbildung 1: Geschwindigkeitsgradient $\dot{\gamma}$ ($=dv/dy$) einer Belebtschlamm-Strömung Q mit dem Geschwindigkeitsprofil $v[y,z]$ und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_m über einer Schicht festsitzenden Schlammes mit der Schichtdicke y_0 (Daucher, 1980)

Der festsitzende Schlamm setzt sich theoretisch genau dann in Bewegung, wenn die an der Oberfläche des festsitzenden Schlammes angreifende Schubspannung des fließenden Schlammes τ_{fl} die Bingham-Fließgrenze des festsitzenden Schlammes $\tau_{B,fe}$ erreicht. Von dieser Gleichgewichtsbedingung ausgehend, kann Daucher (1980) den „kritischen Geschwindigkeitsgradienten“ $\dot{\gamma}_{y0,krit}$ wie folgt formulieren:

$$\dot{\gamma}_{y0,krit} = \frac{\tau_{B,fe} - \tau_{B,fl}}{\eta_{B,fl}} \quad (5)$$

$[\dot{\gamma}_{y0,krit}]$	= s ⁻¹	kritischer Geschwindigkeitsgradient / kritische Scherrate
$[\tau_{B,fe}]$	= Pa	Bingham-Fließgrenze des <u>f</u> estsitzenden Belebtschlammes
$[\tau_{B,fl}]$	= Pa	Bingham-Fließgrenze des <u>fl</u> üssigen Belebtschlammes
$[\eta_{B,fl}]$	= Pa·s	Bingham-Viskosität des <u>fl</u> üssigen Belebtschlammes

Zusammenfassend folgert Daucher (1980), dass es dann zu keiner Schlammablagerung kommt, wenn der Geschwindigkeitsgradient $\dot{\gamma}$ an der Beckensohle größer ist als der „kritische Geschwindigkeitsgradient“ $\dot{\gamma}_{y0,krit}$.

Rheologische Approximations-Parameter wie τ_B und η_B lassen sich durch rheologische Versuche in Abhängigkeit des TS_{BB} quantifizieren. Die Bingham-Fließgrenze τ_B und die Bingham-Viskosität η_B bilden die tatsächliche Fließgrenze und das tatsächliche Fließverhalten von Belebtschlamm jedoch nur ungenau ab (Moshage, 2004). Eine viel genauere Abbildung der Fließgrenze und des Fließverhaltens von Belebtschlamm kann u.a. mit der Anpassungsfunktion nach Herschel-Bulkley erfolgen (u.a. Füreder, 2013). Die Anpassungsfunktion nach Herschel-Bulkley berücksichtigt dabei nicht nur die tatsächlich messbare Fließgrenze τ_y , sondern auch die Abhängigkeit der dynamischen Viskosität η vom Geschwindigkeitsgradienten $\dot{\gamma}$. Diese Abhängigkeit wird durch den Konsistenzfaktor K und den Fließindex n beschrieben, die auch zentrale Parameter bei der Rohrhydraulik von Klärschlamm mit hohem Trockensubstanzgehalt (Slatter, 2008; Füreder, 2014) darstellen:

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

$[\tau_y]$	= Pa	Fließgrenze
$[K]$	= Pa·s ⁿ	Konsistenzfaktor
$[n]$	= -	Fließindex

Unabhängig von der Art der verwendeten Anpassungsfunktion kann abschließend folgendes festgehalten werden: Die Fragestellung nach dem Suspendierungs-/Ablagerungsverhalten von Belebtschlamm in Abhängigkeit des in den Belebtschlamm eingetragenen Propellerschubs, kann auf eine rheologische Fragestellung zurückgeführt werden. Die theoretischen Grundlagen

bzw. die praktischen Messmethoden der Klärschlamm-Rheologie könnten demnach dabei helfen, den zur Suspendierung minimal notwendigen Energieeintrag in Abhängigkeit des jeweilig vorliegenden Belebtschlammes exakter als bisher zu quantifizieren.

2.9 Einfluss von Beckengeometrie, Positionierung und Belüftung

Weicht die Leistungsdichte von Rührwerken stark von den Zielwerten ab, kann das mitunter ausschließlich eine Rührwerksproblematik darstellen (z.B. Überdimensionierung oder schlechter Wirkungsgrad). In vielen Fällen ist es jedoch nötig, das baulich-verfahrenstechnische Gesamtkonzept einer Belebungsanlage bzw. eines Beckens detaillierter zu betrachten. Zentrale Punkte sind hierbei das Zusammenspiel zwischen Rührwerken und Beckengeometrie (Abbildung 2; DWA, 2013), zwischen Rührwerken und Belüftung (Frey, 2011a; Frey, 2011b; DWA, 2013) sowie die Frage nach der optimalen Positionierung der Rührwerke (DWA, 2013). Auch die Positionierung und Ausgestaltung von Zuläufen sollte in diesem Zusammenhang nicht außer Acht gelassen werden (Hunze, 2015).

Der durch Optimierung erreichbare Wert der Leistungsdichte eines Umlaufbeckens steht mitunter in sehr großer Abhängigkeit von der geometrischen Ausführung der Umlenkung. Die einfache Prinzipskizze in Abbildung 2 soll dies verdeutlichen. Bei einer Beckengeometrie mit der „Schulnote 5“ sind die in diesem Forschungsbericht erarbeiteten Zielwerte der Leistungsdichte (Kapitel 4.2.1) mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreichbar.

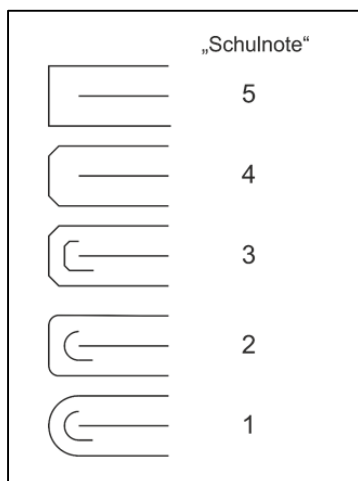


Abbildung 2: Güteklassen der Beckengeometrie bei Umlaufbecken in Bezug auf die minimal einzutragende Leistungsdichte – Prinzipskizze


Bezüglich des Zusammenspiels Belüftung/Rührwerke weist Frey (2011a, 2011b) auf den Umstand hin, dass Dysfunktionen in einem der beiden Teilsysteme oftmals ihre Ursache im anderen Teilsystem haben bzw. in der suboptimalen „Aufeinander-Abgestimmtheit“ der beiden.

Bezüglich Fragen der „Planung, Projektierung und Ausführung“ von „Rührwerken in Belebungsbecken von Abwasserreinigungsanlagen“ sei an dieser Stelle auch auf das Einheitsblatt 24656 (VDMA, 2010) verwiesen.

3. Datengrundlage der Untersuchung

Die Datengrundlage der Untersuchung wurde mittels der in Zusammenarbeit mit dem ÖWAV im Jahr 2014 durchgeführten „Umfrage zu Rührwerken auf Belebungsanlagen“ gewonnen. Von den 393 rückgesendeten Fragebögen konnten die Daten von 220 Kläranlagen (ca. ein Viertel aller österreichischen Kläranlagen) für die Auswertung herangezogen werden². Bezogen auf die CSB-Zulaufkraft aller Kläranlagen wurden damit ca. 28% der Ausbaupkapazität in Österreich erfasst.


Der Fragebogen bestand aus zwei Teilen. Im ersten Teil (ALLGEMEINES) waren von den teilnehmenden Kläranlagen zwölf Fragen (A - M) zu beantworten, die die gesamte Belebungsanlage betreffen (Abbildung 3).



kanal- und kläranlagen-nachbarschaften

Fragebogen zu Rührwerken auf Belebungsanlagen

Institut für Wassergüte
Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft



Bitte ausfüllen und abschicken bis spätestens 15. Dezember 2014 an: k.fuereder@iwag.tuwien.ac.at

ALLGEMEINES

A	Name der Kläranlage	
B	KAN-Nummer	
C	Ausbaupkapazität der Kläranlage laut Bescheid	EW
D	mittlere CSB-Tageszulaufkraft zur Kläranlage (im Jahr 2013)	kg CSB/d
E	Vorklärung - JA/NEIN?	noch auszuwählen
F	Gesamtvolumen aller Belebungsbecken (alle belüfteten u. unbelüfteten Becken)	m ³
G	Indeschlammvolumen ISV (niedrigster Monatsmittelwert)	mL/g
H	Art der Denitrifikation?	noch auszuwählen
I	Bio-P-Becken - JA/NEIN?	noch auszuwählen
J	jährlicher Energieverbrauch Biologie (laut Betriebsprotokoll, Jahr 2013)	kWh/Jahr
K	jährlicher Energieverbrauch aller Rührwerke der Biologie (Jahr 2013)	kWh/Jahr
L	Summe der Nennleistungen aller Rührwerke der Biologie	kW
M	Anzahl der Beckentypen (wenn > 4 bitte 2 Fragebögen ausfüllen)	-

Abbildung 3: Fragebogen Teil 1 – Allgemeine Fragen zur Belebungsanlage

Grün hinterlegte Antwort-Felder waren für die Auswertung zwingend erforderlich, orange hinterlegte Antwort-Felder waren von etwas geringerer Bedeutung. Die Kläranlagen-Betreiber wurden gebeten so viel Felder wie möglich auszufüllen.

Im zweiten Teil wurden jeweils 23 Fragen zu den „Beckentypen“ gestellt, aus denen sich die jeweilige Belebungsanlage der Teilnehmer zusammensetzt (Abbildung 4). Betrachtet wurden

² Die restlichen 173 Fragebögen konnten auf Grund der zu geringen Datenqualität nicht in die Auswertung miteinbezogen werden.

dabei nur durchmischte Becken, also Becken in denen der Belebtschlamm in Schwebelage gehalten wird. Die Fragen von Teil 1 und Teil 2 bezogen sich dabei auf das Kalenderjahr 2013.

BECKENTYP 1		
B1-1	Bezeichnung (wenn vorhanden)	<input type="text"/>
B1-2	Anzahl der Becken	<input type="text"/> -
B1-3	Nutzvolumen je Becken (bei SBR-Anlage hier nichts eintragen)	<input type="text"/> m ³
B1-3-1	max. Füllvolumen je Becken (nur bei SBR-Anlagen eintragen)	<input type="text"/> m ³
B1-3-2	min. Füllvolumen je Becken (nur bei SBR-Anlagen eintragen)	<input type="text"/> m ³
B1-4	Beckentiefe (=Wasserspiegelhöhe); (bei SBR-Anlagen hier nichts eintragen)	<input type="text"/> m
B1-4-1	max. Beckentiefe (nur bei SBR-Anlagen eintragen)	<input type="text"/> m
B1-4-2	min. Beckentiefe (nur bei SBR-Anlagen eintragen)	<input type="text"/> m
B1-5	Beckenform	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-6	Belüftetes oder unbelüftetes Becken?	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-7	Art der Belüftung? (entfällt wenn B1-6 = "unbelüftetes Becken")	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-8	Belüftung läuft ständig / nicht ständig? (entfällt wenn B1-6 = "unbelüftetes Becken")	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-9	Gibt es Rührwerke im Becken - JA/NEIN?	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-10	Anzahl der Rührwerke je Becken?	<input type="text"/> -
B1-11	Bauart der Rührwerke (Rührwerkstyp)?	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-12	Modellbezeichnung und Hersteller Rührwerke (wenn bekannt; mehrere Nennungen möglich)	<input type="text"/>
B1-13	Nennleistung je Rührwerk (nur wenn alle Rührwerke im Becken die gleiche Nennleistung haben)	<input type="text"/> kW
B1-14	Summe der Nennleistungen aller Rührwerke eines Beckens	<input type="text"/> kW
B1-15	gesamte Leistungsaufnahme aller Rührwerke eines Beckens	<input type="text"/> kW
B1-16	mittlere tägliche Laufzeit der Rührwerke (nur wenn bekannt)?	<input type="text"/> h/d
B1-17	wenn mittlere tägliche Laufzeit nicht bekannt, dann bitte hier schätzen:	<input type="text"/> h/d
B1-18	Werden die Rührwerke während der Belüftung ausgeschaltet? (entfällt wenn B1-6 = "unbelüftetes Becken")	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-19	Werden die Rührwerke in den Belüftungspausen teilweise ausgeschaltet? (entfällt wenn B1-6 = "unbelüftetes Becken")	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-20	Ablagerungen an der Beckensohle?	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-21	Verzopfungen an Rührwerken?	<input type="text"/> noch auszuwählen
B1-22	Propellerschub der Rührwerke in Newton [N] (wenn bekannt)	<input type="text"/> N
B1-23	Anmerkungen zu Besonderheiten des Beckentyps...	<input type="text"/>

Abbildung 4: Fragebogen Teil 2 – Detailfragen zu den einzelnen Becken(typen), aus denen sich die Belebungsanlage der jeweiligen Kläranlage zusammensetzt

4. Ergebnisse Teil 1: IST-Zustand des Energieverbrauchs

4.1 Einwohnerspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl A)

Der auf die mittlere CSB-Zulaufkraft zur Kläranlage³ [EW₁₂₀] bezogene einwohnerspezifische Energieverbrauch der Rührwerke steht in umgekehrt-proportionaler Abhängigkeit zu dieser Zulaufkraft. Je größer also die CSB-Zulaufkraft – und damit tendenziell einhergehend auch die Ausbaugröße sowie die Beckenvolumina einer Kläranlage – desto kleiner der einwohnerspezifische Energieverbrauch.

In Abbildung 5 ist der einwohnerspezifische Rührerenergieverbrauch der ausgewerteten Kläranlagen, sowie dessen 25 %-Quantil (Zielwert) und Median (Toleranzwert), dem Median des einwohnerspezifischen Energieverbrauchs der gesamten „mechanisch-biologischen Abwasserreinigung“ gegenübergestellt. Die Auswertung der beiden Mediane zeigt, dass der Rührerenergieverbrauch in einer Größenordnung von rund 10 bis 25 % des Energiebedarfs der „mechanisch-biologischen Abwasserreinigung“ liegt. Dabei sinkt der Rührerenergieanteil bei steigenden CSB-Zulaufkräften. Bei kleinen Kläranlagen mit einer Zulaufkraft bis ca. 5.000 EW₁₂₀ liegt der Rührerenergieanteil bei rund 25 %, bei Kläranlagen ab 30.000 bis 40.000 EW₁₂₀ bei rund 10 % (Abbildung 5).

³ Um die Aussagekraft der Zahlen für die Leserschaft schneller zugänglich zu machen, wird für die CSB-Zulaufkraft zur Kläranlage anstatt „kg CSB/d“ die anschaulichere Einheit „EW₁₂₀“ verwendet.

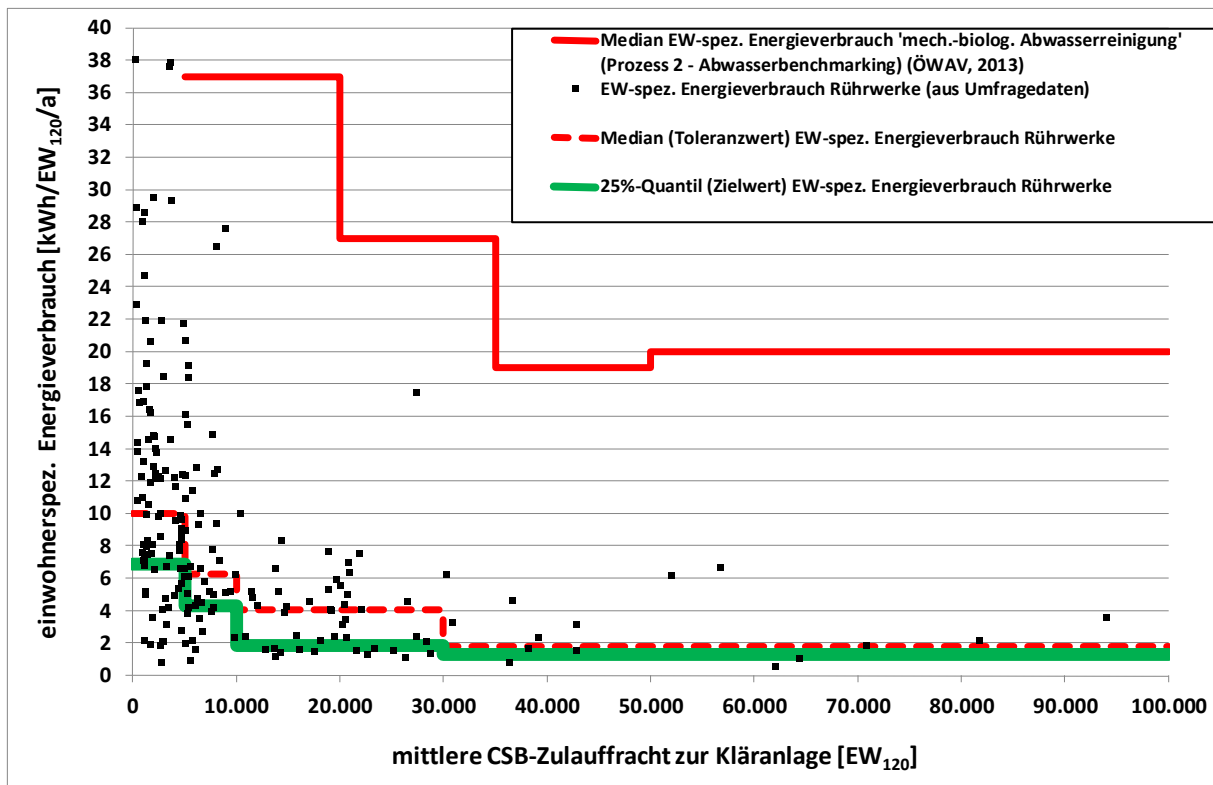


Abbildung 5: Einwohnerspezifischer Energieverbrauch in Abhängigkeit der mittleren CSB-Zulaufkraft zur Kläranlage: Rührwerke im Vergleich mit „mechanisch-biologischer Abwasserreinigung“ lt. ÖWAV (2013); n = 220 Kläranlagen

Die bezüglich einwohnerspezifischem Rührenergieverbrauch ausgewerteten Kläranlagen wurden in vier verschiedene „CSB-Zulaufkraft-Klassen“ eingeteilt, wobei ersichtlich wurde, dass Toleranz- und Zielwert bei steigender Zulaufkraft sinken (Tabelle 6 bzw. Abbildung 5). Die Zielwerte liegen bei derzeitigem Optimierungsstand der Kläranlagen zwischen 6,8 kWh/EW₁₂₀/a (< 5.000 EW₁₂₀) und 1,3 kWh/EW₁₂₀/a (> 30.000 EW₁₂₀) (Tabelle 6 bzw. Abbildung 5). Bei den „CSB-Zulaufkraft-Klassen“ ab 5.000 EW₁₂₀ decken sich die Zielwerte des einwohnerspezifischen Rührenergieverbrauchs mit der in Lindtner (2008) angegebenen Bandbreite von 4,5 - 1,5 kWh/EW₁₂₀/a, die dort als „Normalbereich“ bezeichnet wird (sh. Tabelle 3).

Tabelle 6: Einwohnerspezifischer Energieverbrauch von Rührwerken in Abhängigkeit der mittleren CSB-Tageszulaufkraft [EW₁₂₀] der Kläranlage (n = 220 Kläranlagen)

mittlere CSB-Tageszulaufkraft EW₁₂₀	TOLERANZWERT (Median) kWh/EW₁₂₀/a	ZIELWERT (25%-Quantil) kWh/EW₁₂₀/a
bis 5.000	10,0	6,8
5.000 - 10.000	6,2	4,3
10.000 - 30.000	4,0	1,8
> 30.000	1,7	1,3

4.2 Leistungsdichte (Kennzahl B)

Es wurden die Daten von insgesamt 285 belüfteten und unbelüfteten Becken zwischen 50 m³ und 15.000 m³ ausgewertet. Die für die Berechnung der Leistungsdichte erforderliche Leistungsaufnahme wurde bei ca. 15 % der ausgewerteten Rührwerke direkt angegeben. Bei allen anderen Rührwerken wurde sie aus der Nennleistung wie folgt abgeschätzt:

$$\text{Leistungsaufnahme} = \text{Nennleistung} \cdot 0,74 \text{ [kW]}$$

Der Quotient 0,74 entspricht dabei dem Mittelwert der Quotienten aus Leistungsaufnahme und Nennleistung von jenen 15 % der Rührwerke, bei denen die Leistungsaufnahme angegeben wurde. Die Bandbreite der einzelnen Quotienten reicht dabei von 0,50 bis 0,95 (Abbildung 6).

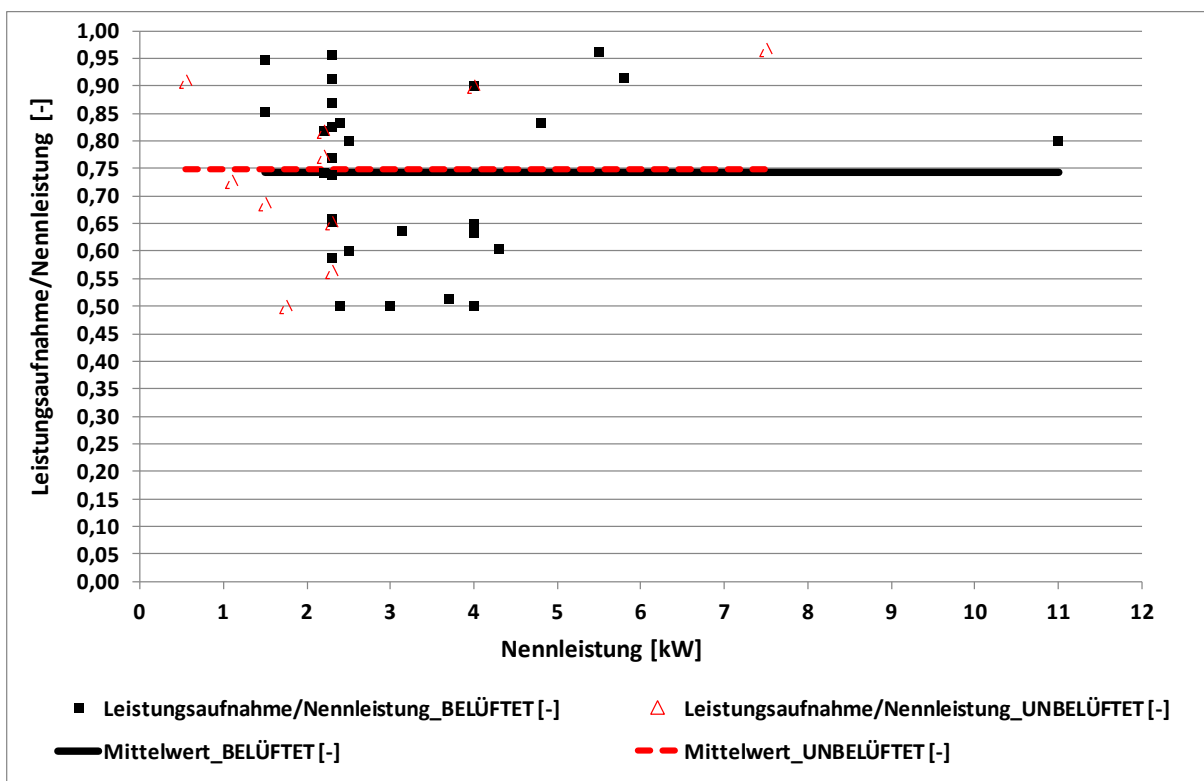


Abbildung 6: Quotient Leistungsaufnahme/Nennleistung bei Rührwerken; n = 43 Rührwerke

4.2.1 Zielwerte und Toleranzwerte der Leistungsdichte

Zur Datenanalyse wurden die ermittelten Leistungsdichten in Abhängigkeit des Beckenvolumens in fünf verschiedene Volumenklassen eingeteilt, die in Abbildung 7 farblich gekennzeichnet sind (schwarz / rot / grün / blau / gelb). Zugeordnet zu den jeweiligen Volumenklassen sind in Abbildung 7 auch die Ziel- und Toleranzwerte sowie das 75 %-Quantil der Leistungsdichte ausgewiesen. Es zeigt sich, dass die Leistungsdichte von Rührwerken sowie die Toleranz- und Zielwerte der Leistungsdichte in umgekehrt-proportionaler Abhängigkeit zum Beckenvolumen stehen.

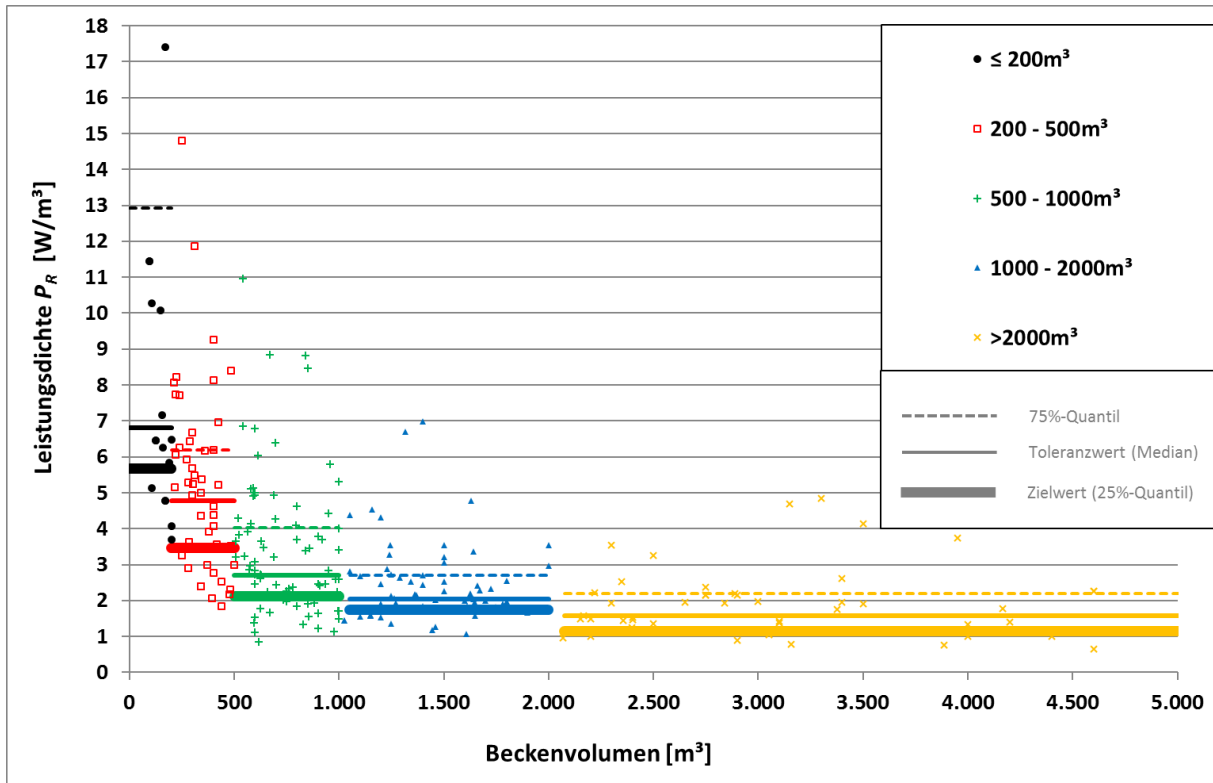


Abbildung 7: Rührwerks-Leistungsdichte belüfteter und unbelüfteter Becken in Abhängigkeit des Beckenvolumens; n = 285 Becken

Die sich aus der Auswertung ergebenden Zielwerte (25%-Quantile) und Toleranzwerte (Mediane) sind in Tabelle 7 aufgelistet. Die Zielwerte liegen dabei jeweils innerhalb⁴, die Toleranzwerte tendenziell an der Obergrenze der Zielwertbereiche von Baumann et al. (2014).

Tabelle 7: Toleranz- und Zielwert der Rührwerks-Leistungsdichte bei belüfteten und unbelüfteten Becken in Abhängigkeit des Beckenvolumens

Becken- volumen m ³	TOLERANZWERT (Median) W/m ³	ZIELWERT (25%Quantile) W/m ³	Baumann et al. (2014) W/m ³
≤ 200	6,8	5,7	-
200 - 500	4,8	3,5	4,0 - 2,5
500 - 1.000	2,7	2,1	2,5 - 2,0
1.000 - 2.000	2,0	1,7	2,0 - 1,5
> 2.000	1,6	1,1	1,5

4.2.2 Leistungsdichte von belüfteten und unbelüfteten Becken

Die 285 Becken teilen sich bei dieser Auswertung in 227 belüftete und 58 unbelüftete Becken auf. Tendenziell weisen unbelüftete Becken eine höhere Leistungsdichte auf als belüftete Becken (im Mittel der jeweiligen Beckenvolumenklassen ca. 5-20%). Dies zeigt sich auch

⁴ bei der Beckenvolumenklasse > 2.000 m³: unterhalb des Zielwerts von Baumann et al. (2014)

anhand der 25 %-Quantile (Tabelle 8). Die Aussagekraft dieses Zusammenhanges wird jedoch durch die stark voneinander abweichenden Datendichten limitiert.

Tabelle 8: 25 %-Quantile belüftete/unbelüftete Becken

Becken- volumen m^3	25%-Quantil_ belüftet W/m^3	25%-Quantil_ unbelüftet W/m^3	<i>Baumann et al.</i> (2014) W/m^3
≤ 200	6,3	5,1	-
200 - 500	3,2	4,2	4,0 - 2,5
500 - 1.000	2,1	2,3	2,5 - 2,0
1.000 - 3.500	1,6	1,9	2,0 - 1,5

4.2.3 Einfluss des Rührwerkstyps auf Leistungsdichte

Bei dieser Auswertung wird zwischen vier Rührwerkstypen unterschieden (Abbildung 8).

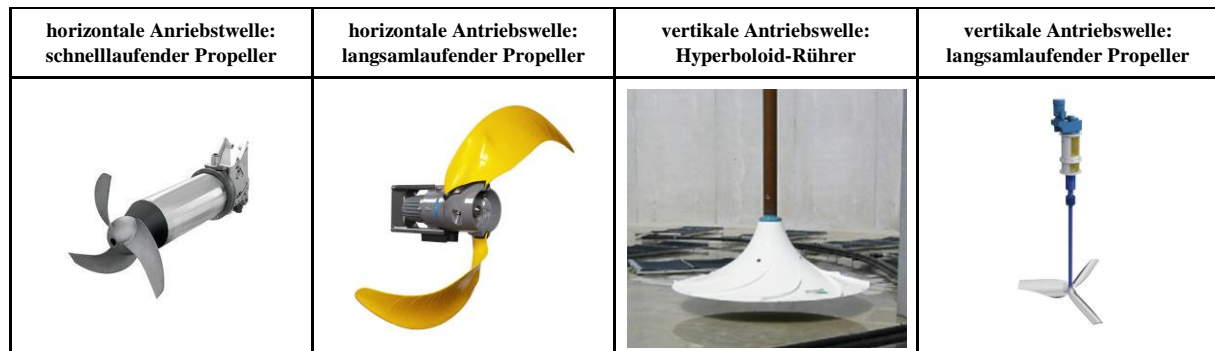


Abbildung 8: Rührwerkstypen

Schnelllaufende Propellerrührwerke mit horizontaler Antriebswelle werden nur bei kleinen Beckenvolumen eingesetzt und weisen in der Regel eine deutlich höhere Leistungsdichte auf als die restlichen Rührwerkstypen (Abbildung 9). Da die Leistungsdichte eines Rührwerks neben dem Beckenvolumen und dem Rührwerkstyp auch von anderen Faktoren abhängt (Beckengeometrie, Rührwerk-Positionierung, Wirkungsgrad etc.), weisen die Bestimmtheitsmaße R^2 in Abbildung 9 Werte $< 0,50$ auf. Aus Gründen der Anschaulichkeit wurden die Regressionsfunktionen dennoch abgebildet.

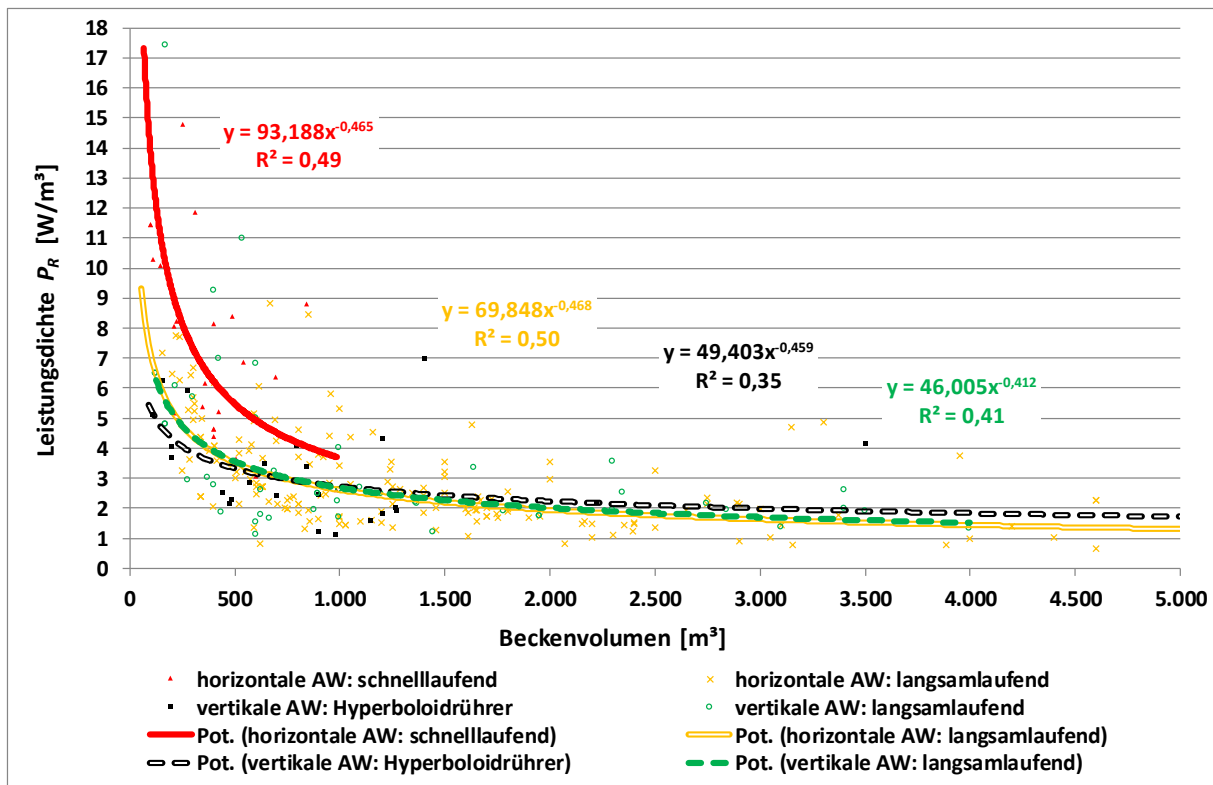


Abbildung 9: Einfluss des Rührwerktyps auf die Leistungsdichte

Vergleicht man die Becken $< 1.000 \text{ m}^3$ liegt der Median (bzw. das 25 %-Quantil) der Leistungsdichte der schnelllaufenden Propellerrührwerke bei mehr als dem doppelten der anderen Rührwerkstypen. Auffallend ist, dass sich die 25 %-Quantile von langsamlaufenden Propellerrührwerken und Hyperboloid-Rührern nicht voneinander unterscheiden (Tabelle 9).

Tabelle 9: Einfluss Rührwerkstyp auf Leistungsdichte ($V_{BB} < 1.000 \text{ m}^3$)

Rührwerkstyp	Median W/m ³	25%-Quantil W/m ³
horizontale AW: schnelllaufend	8,1	5,2
horizontale AW: langsamlaufend	3,5	2,4
vertikale AW: Hyperboloidrührer	3,4	2,4
vertikale AW: langsamlaufend	3,0	2,4

An dieser Stelle sei angemerkt, dass bei der Wahl eines langsamlaufenden Propellerrührwerkes mit vertikaler Antriebswelle auf die richtige Drehrichtung geachtet werden sollte. Wird der Belebtschlamm von unten nach oben gefördert, kann sich unterhalb des Propellers keine ausreichende Turbulenz ausbilden und/oder zu einer Kurzschlussströmung führen. Beides kann unerwünschten Ablagerungen zur Folge haben (Abbildung 10).

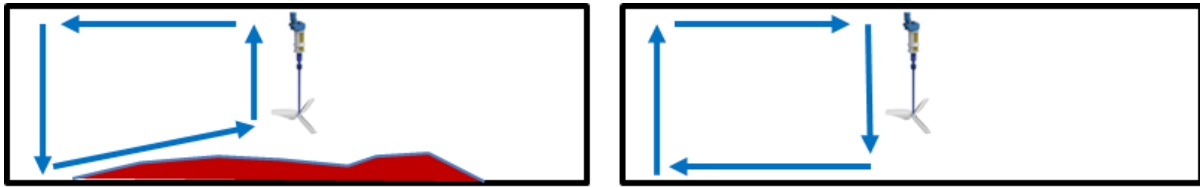


Abbildung 10: Ungünstige (links) und bevorzugte (rechts) Drehrichtung bei langsamlaufenden Propellerrührwerken mit vertikaler Antriebswelle

4.2.4 Einfluss von Becken- und Belüftungsart auf Leistungsdichte

Auf Basis des herangezogenen Datenmaterials konnte kein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen Beckenart (Rechteckbecken / Umlaufbecken / Rund-/ Kreisringbecken) bzw. Belüftungsart (Druckbelüftung / Walzenbelüfter) und der Leistungsdichte von Rührwerken festgestellt werden.

4.2.5 Zielwerte der Leistungsdichte vs. Ablagerungen

Aus den Umfragedaten konnte abgeleitet werden, dass Leistungsdichten unterhalb der Zielwerte nicht zu mehr Ablagerungen führen als Leistungsdichten oberhalb der Zielwerte (Tabelle 10). Das verfahrenstechnisch realisierbare Minimum der für die Aufrechterhaltung der Durchmischung erforderlichen Leistungsdichte liegt demnach unterhalb der in Tabelle 7 ermittelten Zielwerte. Die Feststellung dieses Minimalwerts bedarf weiterführender theoretischer und praktischer Untersuchungen, bei der die Rheologie von Klärschlamm einen wichtigen Beitrag leisten könnte (Kapitel 2.8).

Tabelle 10: Anteil Ablagerungen vs. Leistungsdichte (berechnet mit Zielwerten lt. Tabelle 7)

Ablagerungen in Becken	$P_R < \text{Zielwert}$	$P_R > \text{Zielwert}$
keine	28%	25%
wenig	66%	68%
erheblich	7%	7%
Summe	100%	100%

4.3 Volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl C)

Der volumenspezifische Energieverbrauch von Rührwerken bzw. generell von „Durchmischungs-Systemen“ auf Belebungsanlagen ist vor allem beeinflusst von folgenden Faktoren:

- Leistungsdichte P_R des Mischsystems im Becken [W/m^3]
- Laufzeit des Mischsystems t_d (Zeit-Pause-Schaltung / Impulssysteme) [h/d]
- belüftetes oder unbelüftetes Becken (Einfluss auf Laufzeit t_d des Mischsystems!)

Es wurden insgesamt 216 belüftete Becken zwischen 50 m^3 und 15.000 m^3 und 58 unbelüftete Becken zwischen 100 m^3 und 3.500 m^3 ausgewertet.

4.3.1 Belüftete Becken

Bei belüfteten Becken liegt der volumenspezifische Energieverbrauch im Mittel bei ca. 50 Wh/m³/d. Abhängig von Energieoptimierungsmaßnahmen und verfahrenstechnischer Spezifika reicht die Bandbreite des tendenziell auch vom Beckenvolumen abhängigen volumenspezifischen Energieverbrauchs dabei von ca. 15 Wh/m³/d bis ca. 120 Wh/m³/d (Abbildung 11).

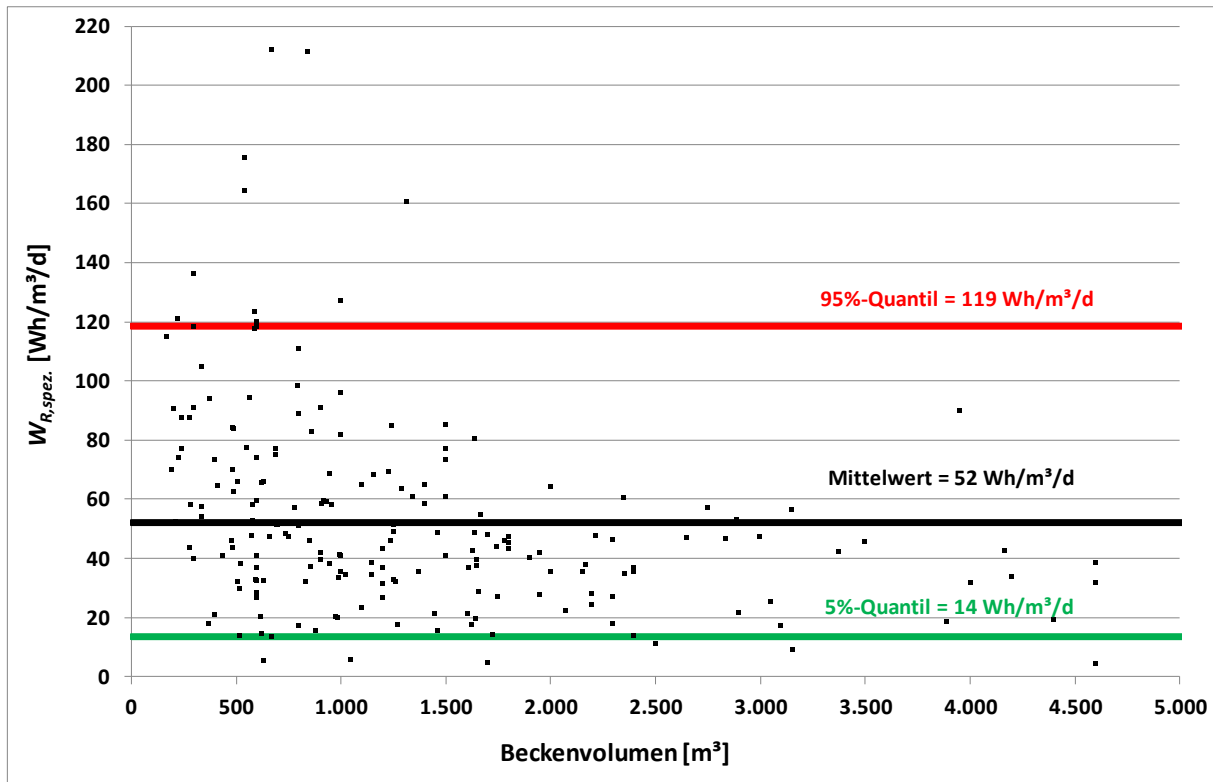


Abbildung 11: volumenspezifischer Energieverbrauch belüfteter Becken; n = 216

Bei 82% der ausgewerteten Becken liegt der Energieverbrauch bei > 24 Wh/m³/d (Energiebedarf bei einer kontinuierlicher Leistungsdichte von 1 W/m³). Vor allem Beispiele von Impulsbelüftungs- bzw. Impulsrührsystemen zeigen aber, dass der „Durchmischungs-Energiebedarf“ in belüfteten Becken auch auf < 10 Wh/m³/d gesenkt werden kann (Kapitel 5.3.1).

4.3.2 Unbelüftete Becken

Bei unbelüfteten Becken liegt der volumenspezifische Energieverbrauch vor allem auf Grund der längeren Laufzeiten der Rührwerke (keine Belüftungsphasen) im Mittel rund doppelt so hoch wie bei belüfteten Becken (ca. 110 Wh/m³/d). Abhängig von Energieoptimierungsmaßnahmen und verfahrenstechnischer Spezifika reicht die Bandbreite des – tendenziell auch vom Beckenvolumen abhängigen – volumenspezifischen Energieverbrauchs dabei von ca. 45 Wh/m³/d bis ca. 240 Wh/m³/d (Abbildung 12).

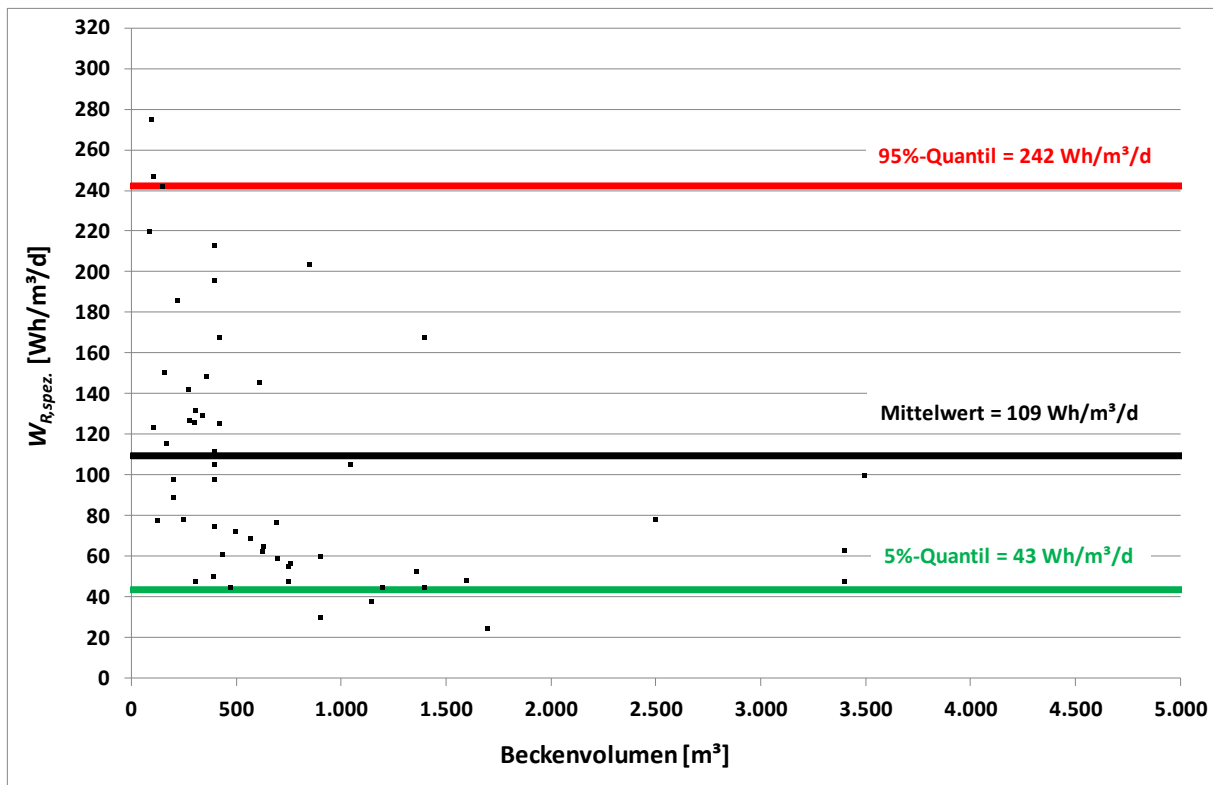


Abbildung 12: volumenspezifischer Energieverbrauch unbelüfteter Becken; n = 58

Bei 83 % der ausgewerteten Becken liegt der Energieverbrauch bei $> 48 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$ (Energiebedarf bei einer kontinuierlichen Leistungsdichte von 2 W/m^3). Ein bei optimal ausgeführter Beckengeometrie, auch bei unbelüfteten Becken realisierbarer „Durchmischungs-Energiebedarf“ von $24 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$ konnte nur bei einem der untersuchten Becken festgestellt werden.

4.4 Leistungsspezifischer Propellerschub (Kennzahl D)

Bei insgesamt 19 Rühraggregaten wurde der Propellerschub angegeben, konnte also der leistungsspezifische Propellerschub ermittelt werden:

- 14 langsamlaufende Rührwerke mit horizontaler Antriebswelle
- 3 langsamlaufende Rührwerke mit vertikaler Antriebswelle
- 2 schnelllaufende Rührwerke mit horizontaler Antriebswelle

Der mittlere leistungsspezifische Propellerschub der 14 langsamlaufenden Rührwerke mit horizontaler Antriebswelle liegt bei $\sim 1.000 \text{ N/kW}$ und somit in der Größenordnung des von Frey (2011a) angegebenen „*typischen Werts*“ von 900 N/kW . Die Werte des leistungsspezifischen Propellerschubs für diese Rührwerkskategorie schwanken dabei zwischen einem Minimum von $\sim 650 \text{ N/kW}$ und einem Maximum von $\sim 1.600 \text{ N/kW}$.

Bei der Auswertung zeigte sich ein tendenziell proportionaler Zusammenhang zwischen leistungsspezifischem Propellerschub und Beckenvolumen. Dies steht im Einklang damit, dass die Energieübertragung umso effizienter erfolgt, desto weiter sich der vom Rührwerk

ausgehende Schub ungehindert in das umgebende Abwasser-Schlamm-Gemisch ausbreiten kann (DWA, 2013). Bei Becken mit größerem Volumen ist dies eher der Fall.

Weiters zeigte sich ein tendenziell negativ proportionaler Zusammenhang zwischen leistungsspezifischem Propellerschub und Leistungsdichte (Abbildung 13). Dies kann als Bestätigung dafür angesehen werden, dass eine möglichst verlustarme Energieübertragung ins Abwasser-Schlamm-Gemisch ein wichtiger Teilfaktor bei der Optimierung der Leistungsdichte von Rührwerken ist.

Beide Zusammenhänge sind auf Grund des geringen Datenvolumens jedoch noch durch detailliertere Untersuchungen (erweiterte Datenbasis bezüglich Propellerschub) zu verifizieren.

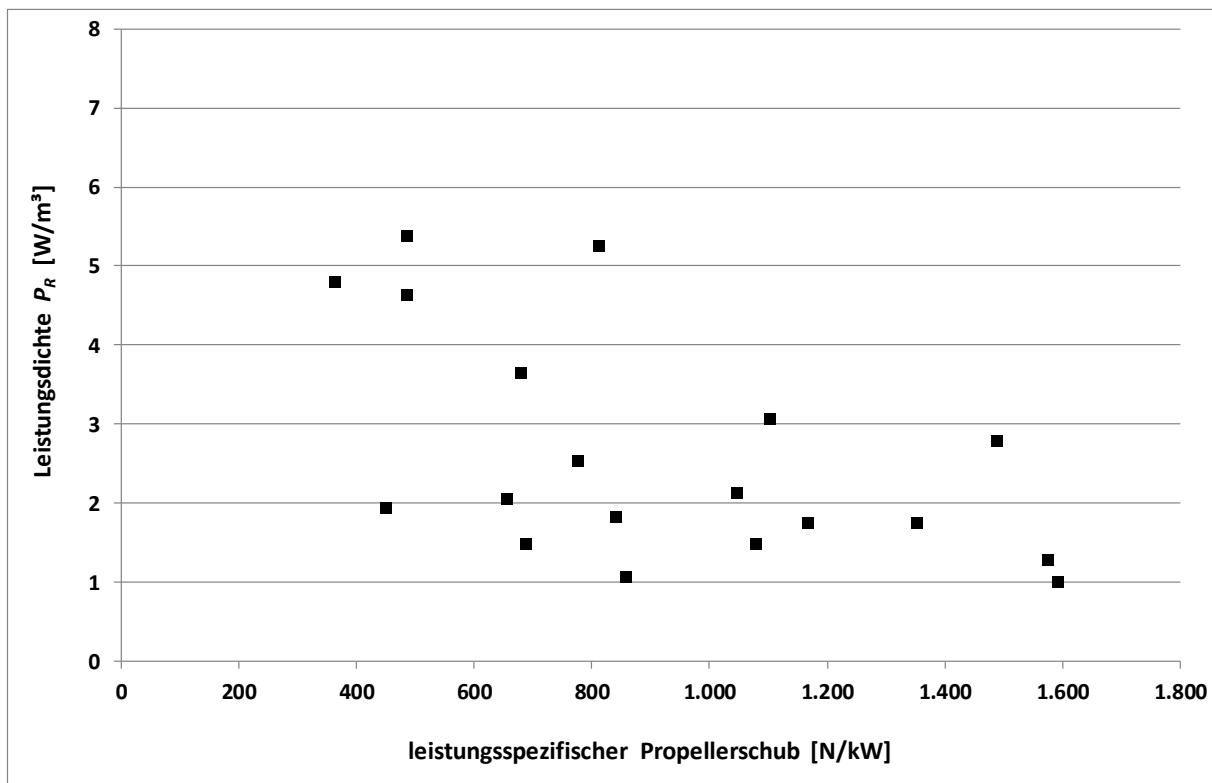


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen leistungsspezifischem Propellerschub und Leistungsdichte (gemeinsame Auswertung aller Rührwerkstypen; n = 19)

4.5 Detailauswertung von drei Kläranlagen

In diesem Kapitel werden drei Kläranlagen der Größenklasse III (Ausbaugröße: 5.000 - 50.000 EW_{120}) einer detaillierteren „Vor-Ort“-Analyse unterzogen. Zentraler Bestandteil dabei ist jeweils die Messung der Leistungsaufnahme der Rührwerke (Durchführung: Wilhelm Frey) und die Kontrolle der Beckenkubaturen, d.h. eine exakte Ermittlung der Leistungsdichte. Weiters wurden Sohlgeschwindigkeiten gemessen (Durchführung: Wilhelm Frey) sowie relevante Schlammparameter in Bezug auf die Leistungsdichte ermittelt: ISV , TS_{BB} , oTS -Gehalt. Für die Messung der Sohlgeschwindigkeit wurde ein offenes magnetisch induktives Messgerät eingesetzt (Abbildung 14).

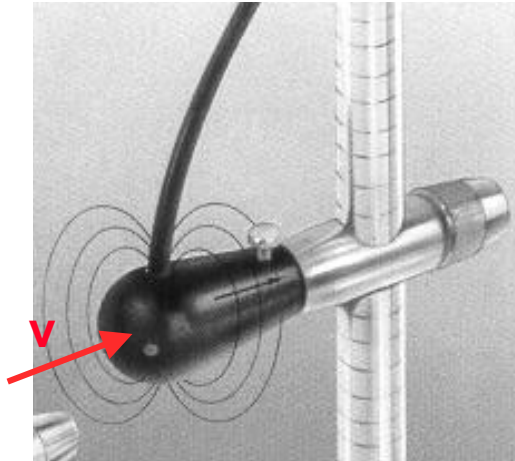


Abbildung 14: Zur Messung der Sohlgeschwindigkeit verwendetes magnetisch-induktives Messegerät: Flow Mate 2000 von Marsh & McBirney

4.5.1 Kläranlage Wartberg a. d. Krems (45.000 EW₁₂₀)

Die biologische Reinigungsstufe der Kläranlage Wartberg a. d. Krems besteht aus zwei seriell durchflossenen Umlaufbecken, die von je einem langsamlaufenden Propellerrührwerk mit horizontaler Antriebswelle durchmischt werden. Das jeweils zweite Rührwerk der Umlaufbecken wurde aus Gründen der Energieeinsparung außer Betrieb genommen.

Einwohnerspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl A):

Die mittlere CSB-Zulaufkraft zur Kläranlage im Jahr 2013 betrug ca. 26.300 EW₁₂₀. Der einwohnerspezifische Energieverbrauch errechnet sich bei Annahme einer über das Jahr konstanten Leistungsdichte von 1,0 W/m³ (gemessen: 0,92 W/m³) zu 1,4 kWh/EW₁₂₀/a. Die Kennzahl liegt somit deutlich unterhalb des Zielwerts der „CSB-Zulaufkraft-Klasse“ von 10.000 - 30.000 EW₁₂₀ (Tabelle 6).

Umlaufbecken 1 (Becken 2 ist baugleich)

➤ Grundlegende Angaben:

- Umlaufbecken ($V = 2.070 \text{ m}^3$, $h_{WSP} = 4,30 \text{ m}$)
- langsamlaufendes Propellerrührwerk mit horizontaler Antriebswelle
- Nennleistung = 2,3 kW
- Leistungsaufnahme = 1,9 kW
- Laufzeit = 24 h/d
- $ISV = 104 \text{ ml/g}$
- $TS_{BB} = 3,6 \text{ g/L}$
- $oTS\text{-Gehalt} = 67 \%$
- zusätzliche Angabe: Becken 1 wird nach Becken 2 durchflossen

➤ Leistungsdichte und volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl B und C)

Die gemessene Leistungsdichte liegt mit $P_R = 0,92 \text{ W/m}^3$ knapp unterhalb des Zielwerts der Beckenvolumenklasse $> 2.000 \text{ m}^3$ (Tabelle 7). Ein wichtiger Mitgrund für die geringe Leistungsdichte liegt in der optimalen baulichen Ausführung der Umlaufbecken (Abbildung 15). Die Beckengeometrie entspricht dabei „Schulnote 1“ nach Abbildung 2. Der volumenspezifische Energieverbrauch errechnet sich zu $22 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$.



Abbildung 15: Bauliche Ausführung der Umlaufbecken Wartberg a. d. Krems

➤ Strömungsgeschwindigkeit und Ablagerungen

Die Strömungsgeschwindigkeiten an den drei Messstellen A - C der Beckensohle (Abbildung 16) betragen im Mittel zwischen 13 cm/s und 23 cm/s , die Maximalwerte liegen zwischen 16 cm/s und 30 cm/s (Tabelle 11). Es konnten keine nennenswerten Ablagerungen festgestellt werden.

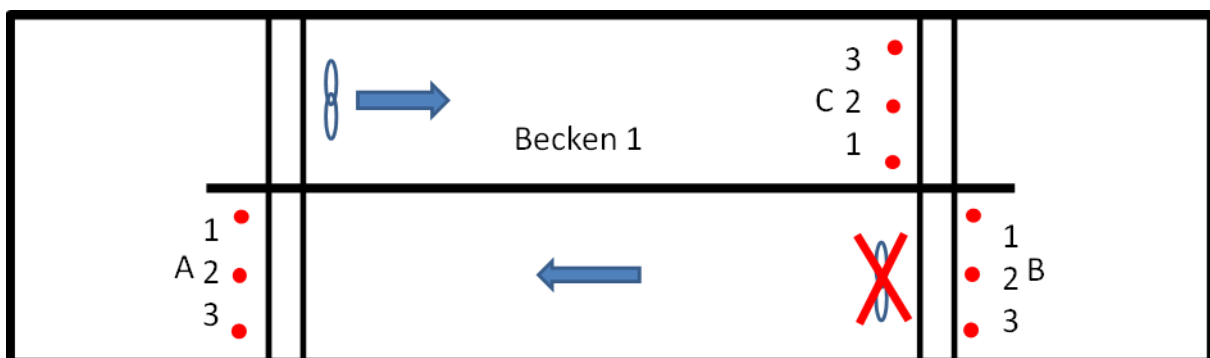


Abbildung 16: Positionen der Strömungsgeschwindigkeitsmessungen in Umlaufbecken 1 der Kläranlage Wartberg a. d. Krems – schematische Darstellung ohne ausgerundete Umlenkung (sh. dazu Abbildung 15)

Tabelle 11: Strömungsgeschwindigkeiten Umlaufbecken 1 Kläranlage Wartberg a. d. Krems
(sh. Abbildung 16)

Stelle	Pos.	Strömungsgeschwindigkeit ca. 15 cm über der Sohle in Pfeilrichtung [cm/s]						Mittelwert	Maxima
A	1	14,3	16,6	13,8	17,4	15,1	17,5	16	18
A	2	20,6	19,4	20,0	17,1	19,4		19	21
A	3	15,9	17,0	23,9	20,8	25,6		21	26
B	1	29,9	27,8	27,0	29,9	0,2		23	30
B	2	17,9	22,7	17,8	21,3	12,0	17,6	18	23
B	3	18,9	20,6	20,6	20,5	17,3	24,3	20	24
C	1	11,1	14,2	10,3	13,0	16,4		13	16
C	2	20,2	17,7	15,6	14,0	18,3	12,7	16	20
C	3	11,3	8,5	15,1	19,7	15,0	16,0	14	20

➤ Fazit

Bei einer Umlaufbeckengröße ab ca. 2.000 m³ kann bei optimaler Geometrie der Umlenkung (Abbildung 15, Abbildung 2) schon eine geringe Leistungsdichte von nur ca. 1 W/m³ ausreichen, um maximale Sohlgeschwindigkeiten von 15 – 30 cm/s zu erreichen bzw. um Ablagerungen an der Beckensohle zu verhindern.

4.5.2 Kläranlage Bad Aussee (25.000 EW₁₂₀)

Die biologische Reinigungsstufe der Kläranlage Bad Aussee besteht aus einem vorgeschalteten Denitrifikationsbecken und drei parallel durchflossenen Belebungsbecken, die mittels Impulsbelüftung durchmischt werden.

Einwohnerspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl A):

Die mittlere CSB-Zulaufkraft zur Kläranlage im Jahr 2013 betrug ca. 16.000 EW₁₂₀. Der einwohnerspezifische Energieverbrauch errechnet sich zu 1,8 kWh/EW₁₂₀/a. Die Kennzahl der gesamten Belebungsanlage entspricht somit dem Zielwert der „CSB-Zulaufkraft-Klasse“ von 10.000 - 30.000 EW₁₂₀ (Tabelle 6). Der einwohnerspezifische Energieverbrauch der vorgeschalteten Denitrifikation ($V = 1.360 \text{ m}^3$) beträgt dabei 1,4 kWh/EW₁₂₀/a, jener der Impulsbelüftungs-Belebung ($V_{ges.} = 3.300 \text{ m}^3$) beträgt nur 0,4 kWh/EW₁₂₀/a.

Vorgeschaltete Denitrifikation

➤ Grundlegende Angaben:

- Rundbecken ($V = 1.360 \text{ m}^3$, $h_{WSP} = 4,35 \text{ m}$)
- langsamlaufendes Propellerrührwerk mit vertikaler Antriebswelle
- Nennleistung = 4,0 kW
- Leistungsaufnahme = 2,5 kW
- Laufzeit = 24 h/d
- $ISV = 117 \text{ ml/g}$

- $TS_{BB} = 5,8 \text{ g/L}$
- $oTS\text{-Gehalt} = 76\%$

➤ Leistungsdichte und volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl B und C)

Die gemessene Leistungsdichte liegt mit $P_R = 1,84 \text{ W/m}^3$ nur knapp oberhalb des Zielwerts der Beckenvolumenklasse 1.000 - 2.000 m^3 (Tabelle 7). Der volumenspezifische Energieverbrauch errechnet sich zu $44 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$.

➤ Strömungsgeschwindigkeit und Ablagerungen

Am Beckenrand (Position 1) konnten am Boden Ablagerungen mit einer Schichthöhe von ca. 10 cm ertastet werden. Zwischen der Position 2 und der Beckenmitte konnten am Boden deutlich mehr Ablagerungen festgestellt werden (Abbildung 17).

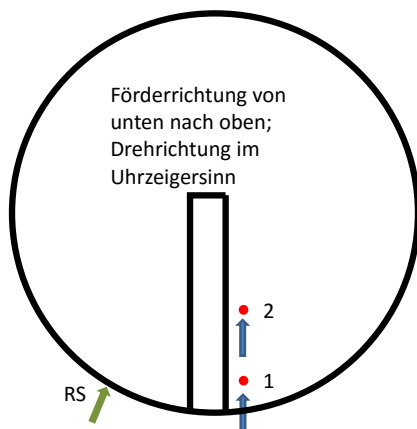


Abbildung 17: Positionen der Geschwindigkeitsmessungen Denitrifikationsbecken Bad Aussee (schematische Darstellung)

Der Maximalwert der Strömungsgeschwindigkeit bei Position 1 betrug 7 cm/s (Tabelle 12). Die sehr geringen Geschwindigkeiten bei Position 1 ergeben sich aus der spezifischen Geometrie des Beckens (ehemaliges Nachklärbecken \rightarrow toter Winkel unterhalb der ehemaligen Ablaufschwelle). Bei Position 2 lag die Geschwindigkeit im Mittel bei 15 cm/s , das Maximum bei 21 cm/s (Tabelle 12). Eine Erklärung für die relativ starken Ablagerungen bei Position 2 lässt sich einerseits wiederum in der Geometrie des Beckens finden (ehemaliges Nachklärbecken \rightarrow kegelförmige Sohle mit ca. 40 cm Kegeltiefe), andererseits an der ungünstigen Drehrichtung des Rührwerks (Förderung des Belebtschlammes von unten nach oben; vgl. dazu Abbildung 10). Die Sohlgeschwindigkeit in Position 2 dürfte nach DWA (2013) hingegen ausreichend sein.

Tabelle 12: Strömungsgeschwindigkeiten Rundbecken Bad Aussee (sh. Abbildung 17)

Pos.	Strömungsgeschwindigkeit ca. 15 cm über der Sohle in Pfeilrichtung [cm/s]							Mittelwert (Betrag)	Maxima
1	7,3	0,6	-3,8	-2,5	-0,6	0	-0,5	2	7
2	12,1	15,1	13	13,9	15,2	16,1	21,4	15	21

➤ Fazit

Bei langsamlaufenden Propellerrührwerken mit vertikaler Antriebswelle ist unbedingt auf die richtige Drehrichtung des Rührwerks, d.h. die Förderung des Belebtschlammes von oben nach unten, zu achten! Mitunter wird damit auch der Ausbildung von schlecht durchströmten Bereichen (toten Winkeln) an der Beckensohle entgegengewirkt.

Rechteckbecken mit Impulsbelüftung

➤ Grundlegende Angaben:

- Rechteckbecken ($V = 3 \times 1.100 \text{ m}^3$, $h_{WSP} = 5,10 \text{ m}$)
- keine Rührwerke → Impulsbelüftung
- $ISV = 110 \text{ ml/g}$
- $TS_{BB} = 4,0 \text{ g/L}$
- $oTS\text{-Gehalt} = 76 \%$

➤ Leistungsdichte und volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl B und C)

Die Impulsbelüftung wird während der Denitrifikationsphasen alle 10 min für 18 Sekunden aktiviert. Die sich daraus ergebende tägliche Laufzeit der Impulsbelüftung liegt bei 0,23 h/d. Bei einer gemessenen Leistungsdichte von 25 W/m^3 errechnet sich daraus ein volumenspezifischer Energieverbrauch von $6 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$ (Tabelle 13).

Tabelle 13: Volumenspezifischer Energieverbrauch Impulsbelüftung
Bad Aussee im Jahre 2014

Impulse/Tag	47 -
Dauer eines Impuls	18 Sek./Impuls
Gesamtdauer Impulsbelüftung	0,23 h/d
Leistungsaufnahme Belüfter bei Impulsbelüftung	28 kW
Beckenvolumen	1100 m ³
Leistungsdichte Impulsbelüftung	25 W/m ³
mittlerer volumenspezifischer Energieverbrauch	6 Wh/m³/d

Bei einer Beckengröße von 1.100 m^3 (Volumen eines der drei Becken) beträgt der volumenspezifische Energieverbrauch der Impulsbelüftung in Bad Aussee somit nur ca. 25 % des diesbezüglichen Energieverbrauchs von gleich großen Belebungsbecken mit Rührwerkslaufzeiten von 2 - 12 h (Abbildung 18).

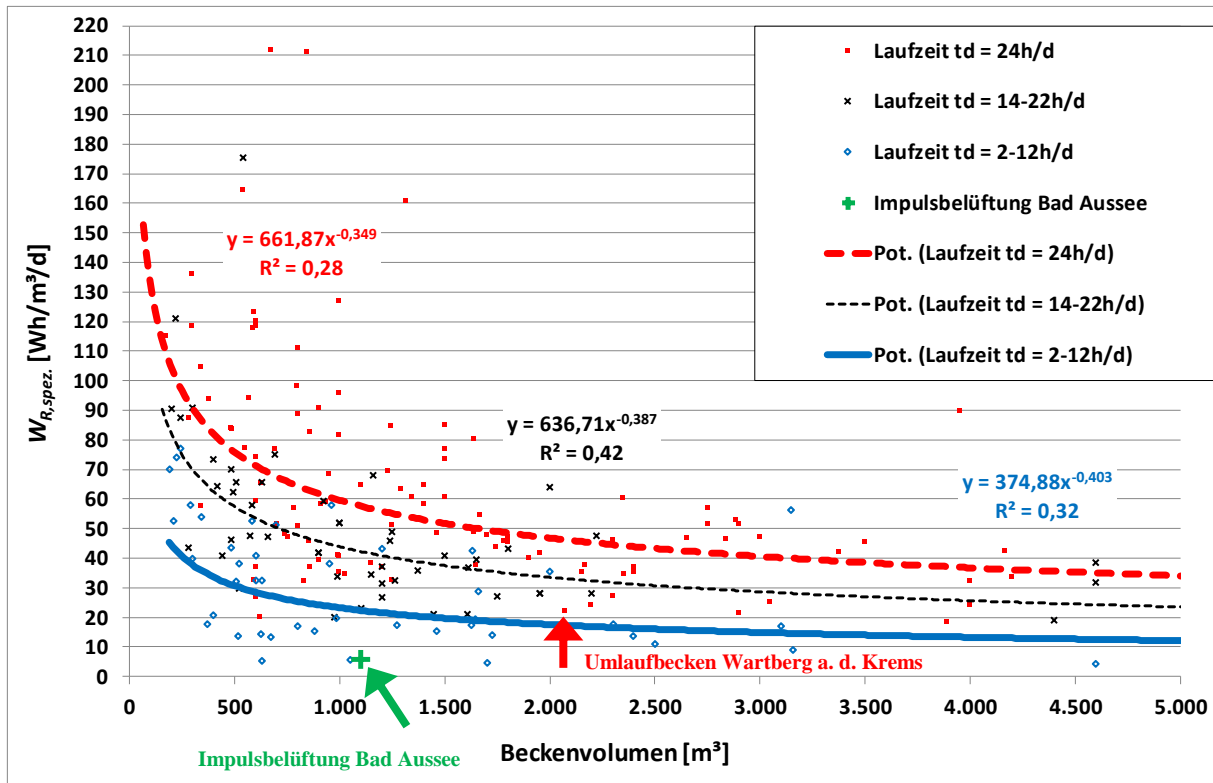


Abbildung 18: Volumenspezifischer Energieverbrauch Impulsbelüftung Bad Aussee im Vergleich mit belüfteten Becken mit Rührwerken (zusätzlich im Vergleich mit kontinuierlich betriebenen Rührwerk im Umlaufbecken Wartberg a. d. Krems)

Impulsbelüftung Bad Aussee vs. „optimal kontinuierlich-gerührtes“ Umlaufbecken

Interessant ist auch der Vergleich zwischen der Impulsbelüftung in Bad Aussee und dem baulich und rührwerkstechnisch optimal ausgeführten Umlaufbecken in Wartberg a. d. Krems (Kapitel 4.5.1). Bei dem kontinuierlich mit $< 1 \text{ W/m}^3$ betriebenen Umlaufbecken in Wartberg a. d. Krems werden umgerechnet $22 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$ für das Rühren aufgewendet. Die Impulsbelüftung in Bad Aussee verbraucht im Vergleich dazu nur ca. ein Viertel dieser Rührenergie (Abbildung 18).

Impulsbelüftung Bad Aussee vs. Impulsbelüftung/Impulsrühren Amperverband

Eine vergleichbare Impulsbelüftung in Bayern/Amperverband verbraucht $24 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$. Versuche des Amperverbands bezüglich Impulsrühren ergeben einen Energieverbrauch von $7 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$. Es handelt sich hierbei um ein Becken, das zur Zeit der Versuche ausschließlich als Denitrifikationsbecken, d.h. unbelüftet betrieben wurde (Kopmann, 2015; Kapitel 4.5.1).

➤ Strömungsgeschwindigkeit und Ablagerungen

Es treten nur wenige Ablagerungen im Becken auf. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit bei der Durchmischung mittels Impulsbelüftung ist nicht durchführbar bzw. nicht zweckführend.

➤ Fazit

Wie an diesem Beispiel zu sehen, kann ein gut ausgeführtes Impulsbelüftungssystem eine gangbare Alternative bei der Durchmischung von Belebungsbecken darstellen. Die laufenden Betriebskosten für die Durchmischung können in diesem Beispiel auch im Vergleich zu optimal ausgeführten Rührwerks-Systemen geringer gehalten werden.

4.5.3 Kläranlage 3 (32.000 EW₁₂₀)

Die biologische Reinigungsstufe der dritten näher untersuchten Kläranlage besteht aus einem Bio-P-Becken und drei seriell durchflossenen rechteckigen Belebungsbeckenkaskaden. Die dritte Kaskade besteht dabei aus zwei parallel durchflossenen Becken (Abbildung 19).

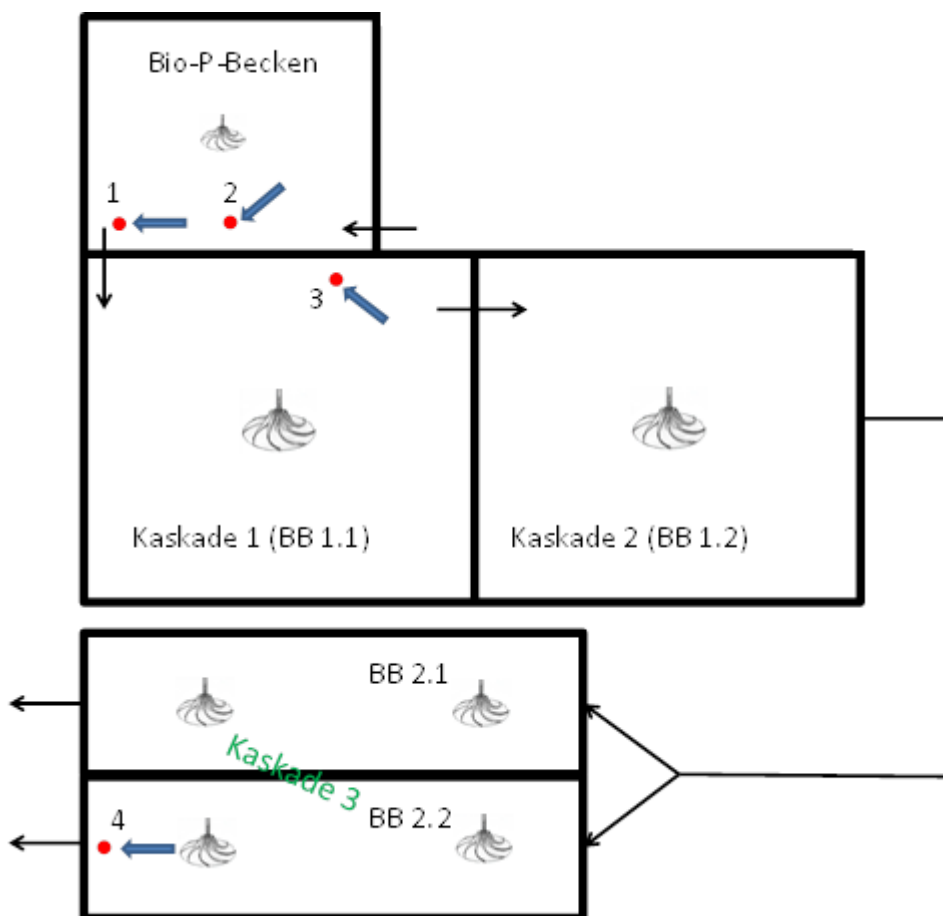


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Kläranlage 3; inklusive Positionen der Hyperboloid-Rührwerke und der Strömungsgeschwindigkeitsmessungen

Einwohnerspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl A):

Die mittlere CSB-Zulaufkraft zur Kläranlage im Jahr 2013 betrug ca. 20.200 EW₁₂₀. Der einwohnerspezifische Energieverbrauch errechnet sich zu 4,7 kWh/EW₁₂₀/a. Die Kennzahl der gesamten Belebungsanlage liegt somit oberhalb des Toleranzwerts der „CSB-Zulaufkraft-Klasse“ von 10.000 - 30.000 EW₁₂₀ (Tabelle 6).

Bio-P-Becken

➤ Grundlegende Angaben:

- Rechteckbecken ($V = 476 \text{ m}^3$, $h_{WSP} = 5,30 \text{ m}$)
- Hyperboloid-Rührwerk
- Nennleistung = 1,50 kW
- Leistungsaufnahme = 1,63 kW
- Laufzeit = 20,5 h/d
- $ISV = 104 \text{ ml/g}$
- $TS_{BB} = 1,34 \text{ g/L}$
- $oTS\text{-Gehalt} = 69\%$

➤ Leistungsdichte und volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl B und C)

Die gemessene Leistungsdichte liegt mit $P_R = 3,42 \text{ W/m}^3$ knapp unterhalb des Zielwerts der Beckenvolumenklasse 200 - 500 m^3 (Tabelle 7). Die Leistungsaufnahme bei diesem Rührwerk ist größer als die Nennleistung! Der Grund dafür liegt in einem zusätzlichen angebrachten Rührflügel im oberen Bereich der Welle. Auf Grund des dadurch entstehenden Sauerstoffeintrags und des höheren Energieverbrauchs erweist sich der zusätzliche Flügel als ungünstig. Der volumenspezifische Energieverbrauch errechnet sich zu $70 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$.

Belebungsbecken Kaskade 1 (Baugleich mit Kaskade 2)

➤ Grundlegende Angaben:

- Rechteckbecken ($V = 1.264 \text{ m}^3$, $h_{WSP} = 5,10 \text{ m}$)
- Hyperboloid-Rührwerk
- Nennleistung = 4,0 kW
- Leistungsaufnahme = 3,47 kW
- Laufzeit = 17,5 h/d
- $ISV = 114 \text{ ml/g}$
- $TS_{BB} = 2,8 \text{ g/L}$
- $oTS\text{-Gehalt} = 70\%$

➤ Leistungsdichte und volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl B und C)

Die gemessene Leistungsdichte liegt mit $P_R = 2,75 \text{ W/m}^3$ deutlich oberhalb des Toleranzwertes der Beckenvolumenklasse 1.000 - 2.000 m^3 (Tabelle 7). Der volumenspezifische Energieverbrauch errechnet sich zu $48 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$.

Belebungsbecken Kaskade 3 (BB 2.2 → Baugleich mit BB 2.1)

➤ Grundlegende Angaben:

- Rechteckbecken ($V = 976 \text{ m}^3$, $h_{WSP} = 5,10 \text{ m}$)
- Zwei Hyperboloid-Rührwerke
- Nennleistung = $2 \times 3,0 \text{ kW}$
- Gesamte Leistungsaufnahme = $3,28 \text{ kW}$
- Laufzeit = $15,7 \text{ h/d}$
- $ISV = 128 \text{ ml/g}$
- $TS_{BB} = 2,3 \text{ g/L}$
- $oTS\text{-Gehalt} = 68 \%$

➤ Leistungsdichte und volumenspezifischer Energieverbrauch (Kennzahl B und C)

Die gemessene Leistungsdichte liegt mit $P_R = 3,36 \text{ W/m}^3$ deutlich oberhalb des Toleranzwerts der Beckenvolumenklasse $500 - 1.000 \text{ m}^3$ (Tabelle 7). Der volumenspezifische Energieverbrauch errechnet sich zu $53 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$.

➤ Strömungsgeschwindigkeiten und Ablagerungen

Die Strömungsgeschwindigkeiten an den Messstellen 1 - 4 (Abbildung 19) betragen im Mittel zwischen 9 cm/s und 23 cm/s , die Maximalwerte betragen zwischen 11 cm/s und 27 cm/s (Tabelle 14). Es konnten in keinem der Becken erwähnenswerte Ablagerungen festgestellt werden.

Tabelle 14: Strömungsgeschwindigkeiten Kläranlage 3

Pos.	Becken	Strömungsgeschwindigkeit ca. 15 cm über der Sohle in Pfeilrichtung [cm/s]						Mittelwert	Maxima
		1	2	3	4	5	6		
1	Bio_P	12,4	9,6	18,2	15,2	16,7	5,8	13	18
2	Bio_P	26,6	21,2	20,3	24,4	21,5	21,3	23	27
3	BB 1.1	8,0	8,4	10,2	10,5	9,7		9	11
4	BB 2.2	16,8	16,6	16	17,3	18,4	12,3	16	18

➤ Fazit

Bei den Belebungsbeckenkaskaden 1 und 3 der Kläranlage 3 besteht bezüglich Leistungsdichte ein erhebliches Optimierungspotential im Vergleich zum Toleranz- bzw. Zielwert der jeweiligen Beckenvolumenklassen.

5. Ergebnisse Teil 2: Energieoptimierungspotentiale

Die Energieoptimierung von Rührwerken auf Belebungsanlagen lässt sich in zwei über weite Strecken getrennt voneinander analysierbare Teilbereiche untergliedern. Der Energieverbrauch kann einerseits dadurch gesenkt werden, dass die Leistungsdichte P_R eines Rührwerks auf den Ziel- oder zumindest Toleranzwert gesenkt wird (Kapitel 5.1). Davon über weite Strecken unabhängig kann der Energieverbrauch auch dadurch gesenkt werden, dass Rührwerke nicht 24 h/d durchlaufen, sondern intermittierend (Zeit-Pause-Schaltung) betrieben werden (Kapitel 5.2).

Im „Optimalfall“ wird sowohl die Leistungsdichte [W/m^3] als auch die Laufzeit eines Rührwerks [h/d] optimiert. Dieser gewinnbringenden Herangehensweise sind jedoch bezüglich des volumenspezifischen Energieverbrauchs [$\text{Wh}/\text{m}^3/\text{d}$], der sowohl von der Leistungsdichte als auch von der Laufzeit abhängt, verfahrenstechnische Grenzen gesetzt. Der energetische Zusammenhang zwischen Leistungsdichte und Energieeintragsdauer wird in Kapitel 5.3 näher betrachtet.

Abschließend darf nicht vergessen werden, dass auch die verfahrenstechnische Qualität der Integration von Beckengeometrie, Belüftungs- und Rührwerkssystem einen maßgeblichen Einfluss auf das theoretische und praktische Energieoptimierungspotential von Rührwerken hat. Bei Umlaufbecken z.B. ist die geometrische Ausformung der Umlenkung ein ganz zentraler Faktor bei den minimal ausreichenden Leistungsdichten (Kapitel 2.9).

5.1 Reduktion der Leistungsdichte (Kennzahl B)

In einer – die verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen auf den jeweiligen Kläranlagen außer Acht lassenden – Näherung kann gesagt werden, dass rund 50 bis 75 % der Rührwerke auf Belebungsanlagen ein energetisches Optimierungspotential bezüglich Leistungsdichte aufweisen; je nachdem ob der Toleranzwert (Median) oder der Zielwert (25%-Quantil) als Optimierungsziel angesetzt wird.

Auf dieser einfachen Überlegung basierend, erfolgt in diesem Unterkapitel eine Abschätzung des gesamten Energieeinsparungspotentials von Rührwerken in Österreich bei Reduktion der Leistungsdichte P_R auf den Toleranzwert bzw. Zielwert (Tabelle 7). Für die Berechnung dieses Potentials wurden 220 Kläranlagen mit einer Gesamtausbaugröße von ca. 6 Mill. EW_{120} ausgewertet. Würde bei allen untersuchten Becken, deren Leistungsdichte oberhalb des Zielwerts liegt, die Leistungsdichte auf den Zielwert gesenkt werden, könnten dadurch hochgerechnet ca. 40% der gesamten Rührenergie auf Belebungsanlagen in Österreich eingespart werden. Bei Reduktion auf den Toleranzwert könnten ca. 25% der Rührenergie eingespart werden (Tabelle 15).

Tabelle 15: Abgeschätztes Energieeinsparungspotential bei Reduktion der Leistungsdichte auf Toleranzwert bzw. Zielwert bei allen untersuchten Kläranlagen: 220 Kläranlagen (Ausbaugröße ~ 6 Mill. EW₁₂₀; V_{ges.} ~ 830.000 m³)

Becken-Volumen m ³	Becken-anzahl n	rel. Becken-anzahl %	Einsparpotential bei Reduktion auf "Toleranzwert"		Einsparpotential bei Reduktion auf "Zielwert"	
			kWh/Jahr	%	kWh/Jahr	%
≤ 200	20	7	104.892	35	147.354	49
200 - 500	54	19	243.509	27	385.893	43
500 - 1000	88	31	909.446	28	1.462.456	45
1000 - 2000	69	24	739.676	22	1.193.757	35
> 2000	55	19	1.117.941	21	2.264.390	43
	286	100	3.115.464	24	5.453.850	41

Die Gesamtausbaukapazität aller österreichischen Kläranlagen liegt bei 21,6 Mill. EW₁₂₀ (BMLFUW, 2014; Stand 31.12.2012). Hochgerechnet ergibt sich daraus für Österreich ein theoretisches Energieeinsparungspotential von 19 Mill. kWh/Jahr bei Reduktion der Rührwerks-Leistungsdichten auf den Zielwert. Bei Reduktion auf den Toleranzwert könnten theoretisch ca. 11 Mill. kWh/Jahr eingespart werden (Tabelle 16).

Tabelle 16: Theoretisches Energieeinsparungspotential für Rührwerke in Österreich

Gesamtkapazität Rührwerksstudie	~6 Mill. EW _{CSB120}
Ausbaukapazität Österreich 2012	~21,6 Mill. EW _{CSB120}
Faktor Ausbaukapazität Ö/ Rührwerksstudie	3,6 -
theoretisches Einsparpotential Rührwerke bei Reduktion auf "Toleranzwert"	~11 Mill. kWh/Jahr
theoretisches Einsparpotential Rührwerke bei Reduktion auf "Zielwert"	~19 Mill. kWh/Jahr

5.2 Zeit-Pause-Schaltung von Rührwerken (Kennzahl C)

5.2.1 Belüftete Becken

Wie schon in Kapitel 2.7 dargelegt, ist für die Verhinderung von Schlammablagerungen an der Beckensohle nicht der Mittel- oder Medianwert der Sohlgeschwindigkeit ausschlaggebend, sondern die „Spitzenwerte und deren Häufigkeit“ (Frey, 2009). Selbiges gilt auch für die Homogenisierung des Belebtschlammes. Rührwerke müssen demnach nicht 24 h/d durchlaufen, sondern können vor allem bei vielen belüfteten Becken intermittierend betrieben werden. Das Energieeinsparungspotential bei Reduktion der Laufzeiten von Rührwerken zeigt sich in Abbildung 20 anhand des volumenspezifischen Energieverbrauchs $W_{R, spez.}$. Generell gilt: Je geringer die Laufzeit, desto geringer der volumenspezifische Energieverbrauch der belüfteten Becken (Abbildung 20).

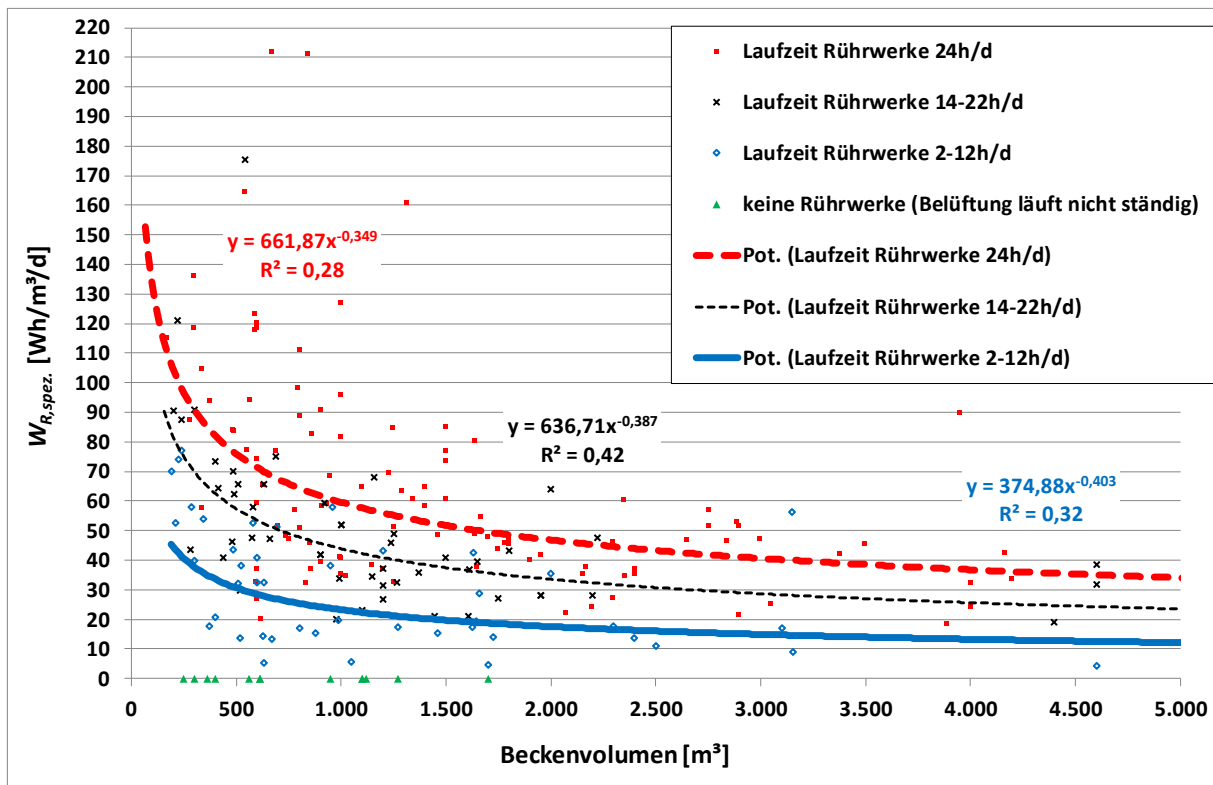


Abbildung 20: Volumenspezifischer Energieverbrauch $W_{R,spez.}$ in Abhängigkeit der Laufzeit von Rührwerken bei belüfteten Becken (n = 216)

Bei den Laufzeiten der Rührwerke gibt es allerdings große Unterschiede zwischen den verschiedenen Belebungsbeckentypen bzw. Belüftungsarten. Bei Umlaufbecken mit Druckbelüftung werden 74 % der Rührwerke 24 h/d betrieben, bei Rund-/Kreisringbecken 63 %. Bei Rechteckbecken mit Druckbelüftung werden hingegen nur 33 % der Rührwerke 24 h/d betrieben, bei Umlaufbecken mit Walzenbelüftern 20 % (Tabelle 17).

Tabelle 17: Rührwerkslaufzeiten [h/d] bei belüfteten Becken in Abhängigkeit des Beckentyps bzw. der Belüftungsart

Laufzeit Rührwerke h/d	Druckbelüftung			Walzenbelüfter
	Umlaufbecken (n=92)	Rund-/ Kreisringbecken (n=35)	Rechteckbecken (n=61)	Umlaufbecken (n=25)
	%	%	%	%
24	74	63	33	20
14-22	14	17	34	44
2-12	12	20	33	36
Summe	100	100	100	100

Umlaufbecken mit Druckbelüftung

Der große Anteil an 24h/d betriebenen Rührwerken (74 %) kann dadurch erklärt werden, dass in Umlaufbecken mit Druckbelüftung nach dem derzeitigen Stand des Wissens auch während der Belüftungsphasen durch die Rührwerke eine gerichtete Strömung einzubringen ist

(Weiterförderung des Abwassers gegen „Belüftungsbarrieren“; Vermeidung von Kurzschlussströmungen (Baumann et al., 2014)). Konterkariert wird diese verfahrenstechnische Übereinkunft jedoch durch ca. 25 % der Umlaufbecken mit Druckbelüftung, in denen die Rührwerke nicht ständig durchlaufen. Die potentiellen Möglichkeiten der teilweisen Abschaltung von Rührwerke in diesen Becken (bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer geordneten Abwasserreinigung) bedürfen daher weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen bzw. praktischer Versuche der jeweiligen Betreiber.

Rund-/Kreisringbecken mit Druckbelüftung

Selbiges gilt in noch deutlicherem Maße für Rund-/Kreisringbecken. In dieser kombinierten Beckenkategorie werden die Rührwerke bei 37 % der Becken diskontinuierlich betrieben (Tabelle 17). Einen Spezialfall stellen dabei Rundbecken mit nicht-sektoraler Anordnung der Belüfterelemente dar, die bezüglich der Möglichkeit der Abschaltung von Rührwerken wie Rechteckbecken mit Druckbelüftung behandelt werden können.

Rechteckbecken mit Druckbelüftung

Bei Rechteckbecken gibt es keine Notwendigkeit zur Einbringung einer gerichteten Strömung. Während der Belüftungsphasen sollten die Rührwerke daher abgeschaltet werden (Baumann et al., 2014). Anhand 33 % belüfteter Rechteckbecken, bei denen die Rührwerke 24h/d durchlaufen, ist ersichtlich, dass es diesbezüglich Optimierungsbedarf gibt (Tabelle 17). Insbesondere zu erwähnen sind hier elf Becken, bei denen sowohl die Belüftung als auch die Rührwerke ständig durchlaufen!

Umlaufbecken mit Walzenbelüftern

Die fünf Umlaufbecken mit Walzenbelüftern (entsprechend 20 % der ausgewerteten Becken; (Tabelle 17)) bei denen die Rührwerke ständig durchlaufen, weisen eine für die vollständige Durchmischung optimale Wassertiefe von 2,2 - 2,6 m auf. Bei Walzenbelüftern ist das ständige Durchlaufen von Rührwerke bei dieser Wassertiefe als unzweckmäßig zu erachten!

Verfahrenstechnische Spezifika hinsichtlich Nitrifikation-/Denitrifikation

Generell muss jedoch einschränkend festgehalten werden, dass die Möglichkeit der Abschaltung bzw. die realisierbare Reduktion der täglichen Laufzeiten von Rührwerken mitunter abhängig ist von verfahrenstechnischen Spezifika des jeweiligen Beckens. Insbesondere muss beim praktischen Austesten des intermittierenden Betriebs von Rührwerken immer darauf geachtet werden, dass es dabei zu keiner Verschlechterung der Nitrifikations-/Denitrifikationsleistung kommt. Diesbezügliche Erfahrungen der Kläranlage Linz-Asten zeigen, dass es mitunter notwendig ist, gerade bei N-Spitzen die Rührwerke (wieder) einzuschalten, um die für die Nitrifikation-/Denitrifikation notwendige Verfrachtung/Einmischung von O₂ in allen Beckenzonen gewährleisten zu können.

Becken ohne Rührwerke

Abschließend sind noch jene Becken hervorzuheben, die nicht ständig belüftet sind und dennoch gänzlich ohne Rührwerke auskommen (Abbildung 20). Teilweise handelt es sich hier um Becken mit Impulsbelüftung.

5.2.2 Unbelüftete Becken

Bei den 59 ausgewerteten unbelüfteten Becken zeigten sich bezüglich der Abschaltung von Rührwerken trotz der geringen Datengrundlage keine Unterschiede zwischen den Beckenkategorien. Sowohl bei Umlaufbecken und Rund-/Kreisringbecken als auch bei Rechteckbecken werden ca. 85 % der Rührwerke kontinuierlich betrieben (Tabelle 18).

Tabelle 18: Rührwerkslaufzeiten [h/d] bei unbelüfteten Becken in Abhängigkeit des Beckentyps

Laufzeit Rührwerke h/d	Umlaufbecken (n=14) %	Rund-/Kreisringbecken (n=7) %	Rechteckbecken (n=38) %
24	86	86	82
< 24	14	14	18
Summe	100	100	100

Die jeweilig verbleibenden ca. 15 % der Becken, in denen die Rührwerke nicht 24 h/d durchlaufen, zeigen jedoch, dass der kontinuierliche Betrieb dieser Rührwerke verfahrenstechnisch nicht immer zwingend erforderlich sein muss. Dies steht im Einklang mit DWA (2013), wo u.a. drauf hingewiesen wird, dass es in runden oder rechteckigen Denitrifikationsbecken ausreichend sein kann, „*das Rührwerk im Wechsel für jeweils einen definierten Zeitraum an- und abzuschalten*“. Auch bei unbelüfteten Becken gibt es also ein Optimierungspotential bezüglich der Abschaltung von Rührwerken. Für Betreiber von Kläranlagen kann empfohlen werden, die verfahrenstechnische Funktionalität der zeitweisen Abschaltung von Rührwerken in praktischen Versuchen auszutesten.

Baumann et al. (2014) beschreiben die Vorgehensweise bei einem derartigen probeweisen Zeit-Pause-Betrieb von Rührwerken in Denitrifikationsbecken (z.B. 30 min Rühren, 30 min Pause). Zentraler Bestandteil bei diesen Versuchen sollte die Kontrolle des Nitratgehalts bzw. des Schlammvolumens im Ablauf des Beckens sein. Bei einem verfahrenstechnisch vollwertig implementierten Zeit-Pause-Betrieb sollte darauf geachtet werden, dass der intermittierende Betrieb der Rührwerke bei Mischwasserereignissen bzw. N-Spitzen regelungstechnisch außer Kraft gesetzt wird (Baumann et al., 2014).

Ein weiterer wichtiger Kontrollparameter bei der Zeit-Pause-Schaltung von Rührwerken ist die vertikale Schichtung der TS_{BB} über die Beckentiefe (Kopmann, 2015). Diese lässt sich mit einem TS-Handmessgerät relativ leicht feststellen.

5.2.3 Auswirkung auf die Lebensdauer von Rührwerken

Grundsätzlich ist beim Zeit-Pause-Betrieb von Rührwerken zwischen thermischer und mechanischer Belastung der Konstruktionselemente zu unterscheiden. Die thermische Belastung betrifft in erster Linie den E-Motor (Beanspruchung der Isolation und Dichtungen, schlechterer Wirkungsgrad, etc.). Bei Abwassertemperaturen unter 25°C ist jedoch davon auszugehen, dass die thermische Belastung von Tauchmotoraggregaten von untergeordneter Bedeutung ist.

Mechanisch belastet werden u.a. Lager, Aufhängungen und Rührblätter. Durch den Zeit-Pause-Betrieb treten hier höhere Belastungen auf. Da Rührwerke konstruktiv jedoch ohnehin auf Belastungsspitzen („Stößen“ durch Turbulenzen im Fluid bzw. durch Luftblasen) auszulegen sind, sollten auch sehr häufige Schaltvorgänge zu keinen Defekten an Rührwerken oder deren Aufhängungen führen. Es gibt hierzu aber noch keine Untersuchungen.

5.3 Diskussion Energieeinsparungsoptionen

5.3.1 Aktive Beckendurchmischung

Es zeigt sich, dass das Spektrum der Energieeinsparungsoptionen bei der aktiven Durchmischung von Becken auf Belebungsanlagen zwischen zwei entgegengesetzten Polen oder Grundideen beheimatet ist:

Am einen Ende des Spektrums stehen Becken, die 24h/d mit geringer Leistungsdichte durchmischt/gerührt werden (Beispiel: **Umlaufbecken Wartberg a. d. Krems**). Am anderen Ende des Spektrums stehen Becken, die mit kurzen, energieintensiven Impulsen durchmischt werden (Beispiel: **Impulsbelüftung Bad Aussee**) (Abbildung 21). Diese kurzen Energieimpulse können entweder per Lufteintrag (Impulsbelüftung) oder per Rührwerk (Impulsrühren; (Kopmann, 2015)) in den Belebtschlamm übertragen werden. Zwischen diesen beiden Polen finden sich viele Kombinationsmöglichkeiten dieser beiden „Extremvarianten“.

Die Wahl der jeweils passenden Energieeinsparungsoption ergibt sich auch aus den verfahrenstechnischen Spezifika des jeweiligen Beckens bzw. des jeweiligen „Durchmischungssystems“. So ist die Abschaltung von Rührwerken bei einer geringen Leistungsdichte von $< 1 \text{ W/m}^3$ mit größerer Wahrscheinlichkeit nicht mehr realisierbar. Auf der anderen Seite kann das Impulsrühren als eine „Extremvariante“ der Abschaltung von Rührwerken betrachtet werden.

In Abbildung 21 wird der Zusammenhang zwischen Leistungsdichte $P_R [\text{W/m}^3]$ und Dauer des Energieeintrags $t_d [\text{h/d}]$ anhand eines volumenspezifischen Energiebedarfs $W_{R, \text{spez.}}$ von $24 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$ (entsprechend einer kontinuierlichen Leistungsdichte von 1 W/m^3) aufgezeigt: Je kürzer die Dauer des Energieeintrags, desto höher steigt die Leistungsdichte entlang der volumenspezifischen Energieverbrauchs-Isolinie (Abbildung 21). Der Zusammenhang

zwischen täglicher Dauer des Energieeintrags t_d und Leistungsdichte P_R folgt dabei immer einer Potenzfunktion mit dem negativem Exponenten $n = -1$:

Zusammenhang Leistungsdichte/Energieeintragsdauer
$$P_R = W_{R,spez.} \cdot t_d^{-1} \left[\frac{W}{m^3} \right]$$

Die Impulsbelüftung des Amperverbands/Bayern (Kopmann, 2015) liegt auf der 24 Wh/m³/d-Isolinie. Die Umlaufbecken in Wartberg a. d. Krems knapp darunter. Die Impulsbelüftung in Bad Aussee liegt mit 6 Wh/m³/d deutlich darunter, ebenso die Versuche des Amperverbands bezüglich Impulsrühren (Kopmann, 2015) (Abbildung 21). Es ist dabei gesondert hervorzuheben, dass es sich bei den Versuchen zu Impulsbelüftung / Impulsrühren des Amperverbands/Bayern um ein reines Denitrifikationsbecken (unbelüftetes Becken!) handelte.

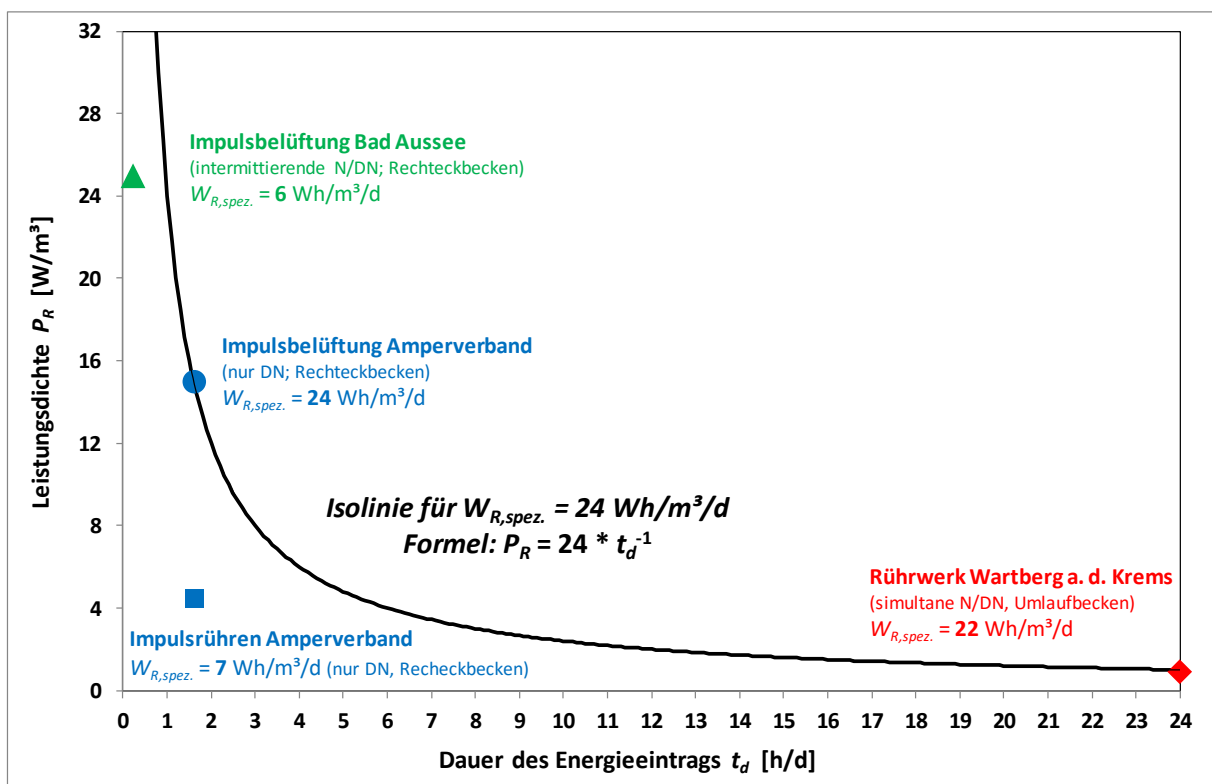


Abbildung 21: Spektrum aktive Beckendurchmischung bezüglich Leistungsdichte P_R [W/m³] und täglicher Dauer des Energieeintrags t_d [h/d] – Isolinie beispielhaft für einen niedrigen volumenspezifischen Energieverbrauch von $W_{R,spez.} = 24 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$

An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass bei 82 % der untersuchten belüfteten Becken der volumenspezifische Energieverbrauch höher lag als 24 Wh/m³/d (Kapitel 4.3.1). Wie die Impulsbelüftung in Bad Aussee und die Versuche des Amperverbands/Bayern bezüglich Impulsrühren zeigen, kann jedoch auch ein Energieverbrauch von 24 Wh/m³/d deutlich unterschritten werden. Um es nochmal hervorzuheben: Der zentrale Faktor bei diesen geringen Durchmischungs-Energieverbräuchen sind auf theoretischer Ebene die Ausführungen von Frey (2009), wonach bezüglich der Verhinderung von Ablagerungen nicht der Mittel- oder Medianwert der Sohlgeschwindigkeit ausschlaggebend ist, sondern die „Spitzenwerte und deren Häufigkeit“.

Gerade die Versuche bezüglich Impulsrühren des Amperverbands/Bayern zeigen ein großes energetisches Optimierungspotential bei bautechnisch unveränderten Rühraggregaten. Anstatt die Rührwerke konstant mit einer Leistungsdichte von $4,5 \text{ W/m}^3$ durchlaufen zu lassen, wurde eine Zeit-Pause-Schaltung eingeführt (43 min Pause / 3 min Rühren bei $4,5 \text{ W/m}^3$). Es konnten damit 93 % der Energie eingespart werden (Kopmann, 2015).

5.3.2 Passive Beckendurchmischung

Bei der passiven Durchmischung kann durch die simulationsbasierte, strömungsdynamische Optimierung der Beckengeometrie (Leitwände, Tauchwände, optimierte Positionierung von Rührwerken und Belüftung etc.) auf aktiven Mischenergieeintrag verzichtet werden. Bei dieser Herangehensweise werden die Becken einer Kläranlage an sich als Strömungsmaschinen betrachtet (Armbruster, 2009). Bei diesen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführten Strömungssimulationen können sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungsmaßnahmen Einsparungen in Investitions- und Betriebskosten erzielt werden. Zudem kann eine systematische Verbesserung der physikalischen Strömungsführung auch zu einem stabileren biochemischen Stoffabbau beitragen (Armbruster, 2009).

6. Zusammenfassung

6.1 Teil 1: IST-Zustand des Energieverbrauchs

Der Anteil des Energieverbrauchs von Rührwerken an der „mechanisch-biologischen Abwasserreinigung“ zeigt eine tendenzielle Abhängigkeit von der mittleren CSB-Zulaufkraft (bzw. der Ausbaugröße und der Beckenvolumina) der Kläranlagen und liegt in einer Größenordnung von 10 bis 25 % (Abbildung 5).

Kennzahl A: Die Zielwerte (25 %-Quantile) des einwohnerspezifischen Rührenergieverbrauchs von Belebungsanlagen in Österreich liegen bei derzeitigem Optimierungsstand in Abhängigkeit der mittleren CSB-Zulaufkraft der Kläranlage zwischen 6,8 kWh/EW₁₂₀/a (< 5.000 EW₁₂₀) und 1,3 kWh/EW₁₂₀/a (> 30.000 EW₁₂₀) (Abbildung 5 / Tabelle 6).

Kennzahl B: Die Zielwerte der Leistungsdichte von Belebungsbecken auf österreichischen Kläranlagen liegen bei derzeitigem Optimierungsstand in Abhängigkeit des Beckenvolumens zwischen 5,7 W/m³ (≤ 200 m³) und 1,1 W/m³ (> 2.000 m³) (Abbildung 7 / Tabelle 7). Anhand der Detailanalyse der Kläranlage Wartberg a. d. Krems konnte gezeigt werden, dass bei Umlaufbecken > 2.000 m³ Leistungsdichten von ca. 1 W/m³ ohne Ablagerungen verfahrenstechnisch realisierbar sind (Kapitel 4.5).

Es konnte festgestellt werden, dass Leistungsdichten unterhalb der Zielwerte nicht zu mehr Ablagerungen führen als Leistungsdichten oberhalb der Zielwerte (Tabelle 10). Das in der Praxis realisierbare Minimum der für die Aufrechterhaltung der Durchmischung erforderlichen Leistungsdichte liegt demnach unterhalb der in diesem Forschungsbericht ermittelten Zielwerte. Die Feststellung dieses Minimalwerts bedarf weiterführende Untersuchungen, bei denen die Rheologie von Klärschlamm einen wichtigen Beitrag leisten könnte (Kapitel 2.8).

Schnelllaufende Propellerrührwerke mit horizontaler Antriebswelle werden nur bei Beckenvolumen < 1.000 m³ eingesetzt und weisen in der Regel eine mehr als doppelt so hohe Leistungsdichte auf als die anderen untersuchten Rührwerkstypen (Abbildung 9 / Tabelle 9).

Kennzahl C: Bei belüfteten Becken liegt der volumenspezifische Energieverbrauch im Mittel bei ca. 50 Wh/m³/d. Beispiele von Impulsbelüftungs- bzw. Impulsrührsystemen zeigen jedoch, dass der „Durchmischungs-Energiebedarf“ in belüfteten Becken auch auf < 10 Wh/m³/d gesenkt werden kann. Bei unbelüfteten Becken liegt der volumenspezifische Energieverbrauch im Mittel ca. 110 Wh/m³/d rund doppelt so hoch wie bei belüfteten Becken (Kapitel 4.3).

Kennzahl D: Der mittlere leistungsspezifische Propellerschub der 14 diesbezüglich auswertbaren langsamlaufenden Rührwerke mit horizontaler Antriebswelle liegt bei ~ 1.000 N/kW. Die Werte dieser Rührwerkskategorie schwanken dabei zwischen einem Minimum von ~ 650 N/kW und einem Maximum von ~ 1.600 N/kW (Kapitel 4.4).

6.2 Teil 2: Energieoptimierungspotentiale

Für Kläranlagenbetreiber wird empfohlen, die Leistungsdichte P_R aller auf der eigenen Kläranlage vorhandenen Beckentypen zu ermitteln und mit den volumenabhängigen Zielwerten in Tabelle 7 zu vergleichen. Selbige Empfehlung gilt auch bezüglich des einwohnerspezifischen Energiebedarfs von Rührwerken (Tabelle 6). Es soll damit in einem ersten Schritt ein allgemeines Bewusstsein für das Themenfeld Energieverbrauch und Energieoptimierungspotential von Rührwerken auf Belebungsanlagen geschaffen werden.

Die Energieoptimierung von Rührwerken auf Belebungsanlagen lässt sich in zwei über weite Strecken getrennt voneinander analysierbare Teilbereiche untergliedern. Der Energieverbrauch kann einerseits dadurch vermindert werden, dass die Leistungsdichte P_R eines Rührwerks in Richtung Toleranz- bzw. Zielwert gesenkt wird (Kapitel 5.1). Davon über weite Strecken unabhängig kann der Energieverbrauch gesenkt werden, in dem die installierten Rührwerke mittels Zeit-Pause-Schaltung betrieben werden (Kapitel 5.2). Im „Optimalfall“ wird sowohl die Leistungsdichte [W/m^3] als auch die Laufzeit eines Rührwerks [h/d] optimiert. Dieser gewinnbringenden Herangehensweise sind jedoch bezüglich des volumenspezifischen Energieverbrauchs [$Wh/m^3/d$], der sowohl von der Leistungsdichte als auch von der Laufzeit abhängt, verfahrenstechnische Grenzen gesetzt (Kapitel 5.3). Weiters darf nicht vergessen werden, dass auch die Qualität der verfahrenstechnischen Integration von Beckengeometrie, Belüftungs- und Rührwerkssystem einen maßgeblichen Einfluss auf das Energieoptimierungspotential von Rührwerken hat. Bei Umlaufbecken z.B. ist die geometrische Ausformung der Umlenkung ein entscheidender Faktor bei der Frage nach der minimal ausreichenden Leistungsdichte (Kapitel 2.9).

Näherungsweise kann davon ausgegangen werden, dass rund 50 bis 75 % der Rührwerke auf Belebungsanlagen in Österreich bezüglich der Leistungsdichte ein energetisches Optimierungspotential aufweisen. Würde bei allen untersuchten Becken, deren Leistungsdichte oberhalb des Zielwerts liegt, die Leistungsdichte auf den Zielwert gesenkt werden, könnten dadurch rund 40 % der gesamten verbrauchten Rührenergie auf Belebungsanlagen in Österreich eingespart werden (Kapitel 5.1).

Die Zeit-Pause-Schaltung von Rührwerken wird – unter Rücksichtnahme auf die jeweiligen verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen – in der Praxis bereits von vielen Betreibern erfolgreich umgesetzt. Dies gilt vor allem für belüftete Becken. Doch auch bei unbelüfteten Becken kann durch Zeit-Pause-Schaltungen Strom eingespart werden. Dies zeigen ca. 15 % der unbelüfteten Becken, bei denen die Rührwerke nicht kontinuierlich betrieben werden (Kapitel 5.2).

Das Spektrum der Energieeinsparungsoptionen bei der aktiven Durchmischung von Becken reicht von einer kontinuierlichen Durchmischung bei $< 1 \text{ W/m}^3$ bis zur Durchmischung mittels kurzen, energieintensiven Impulsen (Impulsbelüftung, Impulsrühren). Die Wahl der passenden Energieeinsparungsoption ergibt sich auch aus den verfahrenstechnischen Spezifika des Beckens bzw. „Mischsystems“. Es gilt dabei jedoch immer: Je kürzer die Dauer des Energieeintrags t_d , desto höher die Leistungsdichte P_R entlang der jeweiligen volumenspezifischen Energieverbrauchs-Isolinie (Abbildung 21). Bei den in der vorliegenden Studie untersuchten belüfteten Becken verbrauchen 82 % mehr Energie als $24 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$. Beispiele zeigen jedoch, dass bei Impulsbelüftungs- bzw. Impulsrührsystemen der Energieverbrauch auch auf $< 10 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$ gesenkt werden kann (Kapitel 5.3).

7. Ausblick

7.1 Forschungsfelder der Energieoptimierung von Rührwerken

Betrachtet man Rührwerke unter dem Gesichtspunkt der Energieoptimierung, ist die verfahrenstechnisch realisierbare Untergrenze der einzubringenden Leistungsdichte sowie der täglich einzubringenden volumenspezifischen Energiemenge eine noch ungenügend beantwortete Frage. Stellen Beispiele für Leistungsdichten $< 1 \text{ W/m}^3$ bzw. volumenspezifische Energieverbräuche bei belüfteten Becken von $< 24 \text{ Wh/m}^3/\text{d}$ nur optimierte Ausnahmen dar, oder sollte man den Stand der Technik bei Neubauten und Sanierungen generell auf diese Werte hin orientieren?

Dies gilt es u.a. mit weiteren „Vor-Ort“-Analysen, mit verfahrenstechnischen Überlegungen zum Einfluss der Rührwerke auf die biochemisch-kinetischen Prozesse sowie mit Labor- bzw. großtechnischen hydraulischen Versuchen zu klären. Die Antworten auf diese Frage sind auch von der Beckenart und Geometrie abhängig. Es erscheint u.a. sinnvoll, Umlaufbecken und Rechteckbecken hier getrennt voneinander zu betrachten. Bei Umlaufbecken sollten weiterführende Analysen der Zielwerte der Leistungsdichte P_R bzw. des volumenspezifischen Energieverbrauchs $W_{R, \text{spez.}}$ außerdem in Abhängigkeit der geometrischen Ausformung der Umlenkung (Abbildung 2) durchgeführt werden.

Der bezüglich Energieoptimierung letzten Endes aussagekräftigste Parameter ist der volumenspezifische Energieverbrauch. Bei der näheren Erforschung zu Möglichkeiten der Optimierung des volumenspezifischen Energieverbrauchs sollten folgende eng miteinander verwobene Detailbereiche abgedeckt bzw. auch getrennt voneinander betrachtet werden:

- Optimierung Leistungsdichte
 - Optimierung Beckengeometrie / Hydraulik
 - Optimierung Lage der Rühraggregate
 - Optimierung Wechselwirkung Rührwerke / Belüftung
 - Optimierung Energieübertragung von Rühraggregaten auf Belebtschlamm
 - Optimierung Motorwirkungsgrad Rühraggregate
- Optimierung Abschaltung der Rührwerke / des Mischsystems
- Optimierung Rührwerke in Abhängigkeit von Beckentyp und Geometrie
- Energieverbrauch Rührwerke vs. $ISV / TS_{BB} / oTS\text{-Gehalt}$?
- Energieverbrauch Rührwerke vs. Viskosität von Belebtschlamm ?

Bei all diesen noch detaillierter zu untersuchenden Teilbereichen der Energieoptimierung darf jedoch niemals die eigentliche Aufgabe der Abwasserreinigung außer Acht gelassen werden, also der biochemisch-kinetische Aspekt.

Wie die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen, ist die Erforschung und Analyse von Impulsrührsystemen bzw. Impulsbelüftungssystemen vielversprechend. Impuls-Mischsysteme können als Extremfälle der Abschaltung von Rührwerken (bzw. der Mischeinrichtung) betrachtet werden. Jedoch auch die vielseitigen Möglichkeiten der Abschaltung von Rührwerken bei konventionellen Mischsystemen sind ein offenes Forschungsgebiet.

Weiters vielversprechend ist die detaillierte Erforschung und Analyse von passiven Mischsystemen. Bei diesen werden die Becken der Kläranlage an sich als „*Strömungsmaschinen*“ betrachtet (Armbruster, 2009). Anoxische Becken, die ohne den Eintrag von aktiver Mischenergie auskommen (Energieeintrag = 0 Wh/m³/d; ohne Berücksichtigung der potentiellen Energie des Abwassers auf Grund der Fallhöhe), stellen vom rein energetischen Standpunkt aus betrachtet das absolute Optimum beim Energieverbrauch von „Rührwerken“ auf Belebungsanlagen dar.

7.2 Physikalische Grundlagen der Belebtschlamm-Suspendierung

Als Maßzahlen für die ausreichende Suspendierung (bzw. Homogenisierung) von Belebtschlamm wurden in der wasserwirtschaftlichen Literatur bisher meistens Sohlgeschwindigkeit und Leistungsdichte angeführt. Diese beiden Parameter stellen aus physikalischer Sicht jedoch nur Hilfsparameter dar. Es ist daher als Aufgabe der Zukunft anzusehen, die Theorie der Belebtschlamm-Suspendierung auf eine tatsächlich physikalische bzw. physikalisch-rheologische Grundlage zu stellen. Ein bekanntes und lehrreiches Beispiel für die Wirksamkeit dieser Vorgehensweise sind diesbezügliche Arbeiten im Umfeld des Lehrstuhls für Strömungsmechanik der Universität Erlangen-Nürnberg (Höfken, 1994), die zur Entwicklung und Etablierung des Hyperboloid-Rührwerks in der Abwasserreinigung führten. Das Fachgebiet der Klärschlamm-Rheologie könnte hierbei helfen, den zur Suspendierung minimal notwendigen Schubkräfteintrag in Abhängigkeit des jeweilig vorliegenden Belebtschlammes exakter als bisher zu quantifizieren (Kapitel 2.8).

Ziel von weiterführenden theoretischen Überlegungen und praktischen Untersuchungen in diesem Gebiet sollte es sein, eine Methodik zu entwickeln, die mit möglichst geringem (rheologischem) Messaufwand Aussagen über den in den Belebtschlamm einzutragenden Propellerschub möglich macht. Es gilt hierbei u.a., das vorhandene Fachwissen bezüglich Rührleistungsverhalten nicht-newtonscher Fluide in homogenen und begasten Flüssigkeiten (Zlokarnik, 1999) mit den neueren Erkenntnissen der Klärschlamm-Rheologie (Ratkovich et al., 2013; Eshtiaghi et al., 2013; Klinksieg, 2010) zu integrieren. Diese Vorgehensweise könnte u.U. auch Möglichkeiten eröffnen, die Auslegung und Abnahme von Rührwerken auf eine – in Anlehnung an die Situation bei Belüftungssystemen (DWA, 2007;

EN 12255-15) – von einzelnen Rührwerksherstellern unabhängige theoretische Basis zu stellen.

Auf praktischer Ebene muss jedoch einschränkend darauf hingewiesen werden, dass bei der Installation der Rührwerke die rheologischen Parameter des Belebtschlammes noch nicht bekannt sein können. Abhilfe leisten kann hierbei eine weiterführende Erforschung der Zusammenhänge zwischen spezifischen klassischen Schlammparametern (TS_{BB} , oTS -Gehalt, EPS -Gehalt, Schlammalter, ISV , Temperatur) und den rheologischen Parametern des Belebtschlammes (Moshage, 2004; Kinksieg, 2010; Eshtiaghi, 2013; Füreder, 2014). Bei guter Kenntnis dieser Zusammenhänge könnten die für die Suspendierungs-Berechnung bzw. Rührwerks-Auslegung notwendigen rheologischen Parameter aus den angeführten klassischen Schlammparametern der Kläranlagen-Bemessung abgeleitet werden.

7.3 Integration von Beckengeometrie, Belüftungs- und Rührwerkssystem

Auf Basis des herangezogenen Datenmaterials konnte in dieser Untersuchung kein allgemeiner Zusammenhang zwischen Beckenart (Rechteckbecken/Umlaufbecken/Rund-/Kreisringbecken) oder Belüftungsart (Druckbelüftung/Walzenbelüfter) und der Leistungsdichte von Rührwerken festgestellt werden (Kapitel 4.2.4). Dennoch erscheint es gewinnbringend, spezifische Aspekte des Themenfelds der optimalen Kombination von Beckengeometrie, Belüftungssystem und Rührwerkssystem aus dem Blickwinkel des Energieverbrauchs von Rührwerken wieder eingehender zu betrachten. Hierzu ein Beispiel: Die geometrische Form der Umlaufbecken ergab sich historisch betrachtet aus der geometrischen Form bzw. der physikalischen Wirkungsweise von Walzenbelüftern. Rein verfahrenstechnisch betrachtet bilden Umlaufbecken und Walzenbelüfter also eine logische Einheit. Bei Umlaufbecken mit Druckbelüftung hingegen kann untersucht werden, ob der energetische Aufwand für die „Umlauf-Führung“ des Belebtschlammes überhaupt einen Mehrwert zum eigentlichen Ziel der Abwasserreinigung leistet. Andererseits konnte in diesem Forschungsbericht aufgezeigt werden, dass bei geometrisch optimal ausgeführten Umlaufbecken mit Druckbelüftung eine Leistungsdichte von ca. 1 W/m^3 realisierbar ist. Auch wenn die Lösung auf jeder Kläranlage also nur eine individuelle sein kann, bietet die Fragestellung nach der optimalen Kombination von Beckengeometrie, Belüftungssystem und Rührwerkssystem jedenfalls weiterhin Forschungsbedarf.

Technische Universität Wien, 24. März 2016



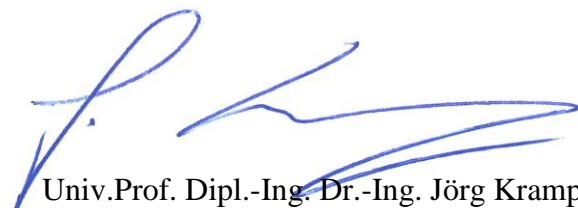
Dipl.-Ing. Klemens Füreder



Univ.Lektor Dipl.-Ing. Dr.techn. Wilhelm Frey



Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. K. Svoldal



Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Jörg Krampe

Korrespondenz an:

Klemens Füreder

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien
Karlsplatz 13/226, 1040 Wien

Tel.: 01/58801/22629

Mail: k.fuereder@iwag.tuwien.ac.at

Literatur

- Armbruster, M. (2009). „Effizientere Belebungsanlagen und Energieeinsparung durch simulationsgestützte Optimierung der Strömungsführung“. Beitrag der Firma hydrograv GmbH zum 10. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium 23./24. September 2009. Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 13, S. 27/1-10.
- ATV (1975). ATV Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band 2, 2. Auflage. Abwassertechnische Vereinigung e. V. in Bonn, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin München Düsseldorf 1975.
- ATV (1985). ATV Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band 4: Biologisch-chemische und weitergehende Abwasserreinigung, 3. überarbeitete Auflage. Abwassertechnische Vereinigung e. V. in St. Augustin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1985.
- ATV (1997). ATV-Handbuch: Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, 4. Auflage. Abwassertechnische Vereinigung e. V. in Hennef, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1997.
- Baumann, P., Maurer, P., Roth, M. (2014). Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen. DWA-Landesverband Baden-Württemberg (Hrsg.), Heft 4, 3. Aufl.
- BMLFUW (2014). Kommunales Abwasser – Österreichischer Bericht 2014. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Juni 2014.
- Daucher, H. (1980). Strömungsgeschwindigkeiten und Sauerstoffeintrag in einem Strahldüsenbelüfteten Oxidationsgraben. Seminarbeitrag vom 23.10.1980, Österreichische Arbeitsgruppe chemisches Apparateswesen und Verfahrenstechnik.
- DWA (2000). Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131. Bemessung einstufiger Belebungsanlagen. Mai, 2000.
- DWA (2007). Merkblatt DWA-M 209. Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm. April, 2007.
- DWA (2013). Merkblatt DWA-M 229-1. Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen – Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung. Mai, 2013.
- DWA (2015). Arbeitsblatt DWA-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Entwurf – März, 2015.
- EN 12255-15 (2003). Messung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser in Belüftungsbecken von Belebungsanlagen. Dezember 2003.

- Eshtiaghi, N., Markis, F., Yap S.D., Baudez, J. C., Slatter, P. T. (2013). Rheological characterisation of municipal sludge: A review. *Water Research*, Volume 47, Issue 15, 1 October 2013.
- Frey, W. (2009). Garantienachweise für die maschinelle Ausrüstung von Kläranlagen – Belüftungssysteme und Rührwerke, Schriftenreihe Kläranlagennachbarschaften, Band 17.
- Frey, W. (2011a). Messwerte und Kennzahlen der maschinellen Ausrüstung auf Kläranlagen. *Wiener Mitteilungen*, Band 224, S. 253-268, 2011.
- Frey, W. (2011b). Energieeffizientes Mischen und Belüften von Belebungsbecken. 25. Kalsruher Flockungstage, KIT Karlsruhe, 14.-15. November 2011.
- Füreder, K. (2013). Der Einfluss des Trockensubstanzgehalts auf die Fließfähigkeit von Überschuss-, und Faulschlamm der Hauptkläranlage Wien. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Füreder, K. (2014). Fließverhalten von Schlämmen mit hohem Trockensubstanzgehalt. Ein Beitrag zur Rheologie von Klärschlamm. *Wiener Mitteilungen*, Band 230, S. 263 - 278, 2014.
- Haberkern, B., Maier, W., Schneider, U. (2008). Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Umweltbundesamt (Hrsg.), UBA-Texte, 11/08, Berlin
- Höfken, M. (1994). Moderne experimentelle Methoden für die Untersuchung von Strömungen in Rührbehältern und für Rührwerksoptimierung. Dissertation, Technische Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg.
- Hunze, M. (2015). Abstimmung von Belüftungssystemen und Rührwerken zur Energieeinsparung mit Hilfe von CFD-Berechnungen. Tagungsband 5. Infotag IWAR Abwassertechnik, 26. November 2015: Planung und Optimierung von Belüftungssystemen im Spiegel neuer Entwicklungen.
- ISO 21630 (2007): Pumps - Testing - Submersible mixers for wastewater and similar applications
- Kopmann, T. (2015). Mischen mit Luft. Seminarband „Belüftung auf Abwasserreinigungsanlagen“. Wien, 19. Mai 2015.
- Klinksieg, K. (2010). Charakterisierung des Absetzverhaltens von kommunalen Klärschlämmen mit Hilfe rheologischer Messungen. Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft an der Technischen Universität Braunschweig e.V.

Lindtner, S. (2008). Leitfaden für die Erstellung eines Energiekonzeptes kommunaler Kläranlagen. Ingenieurbüro k2W.

Moshage, U. (2004). Rheologie kommunaler Klärschlämme – Messmethoden und Praxisrelevanz. Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft an der Technischen Universität Braunschweig e.V.

ÖWAV (2013). Öffentlicher Bericht. Benchmarking für Kläranlagen. Geschäftsjahr 2013.

Ratkovich, N., Horn, W., Helmus, F., Rosenberger, S., Naessens, W., Nopens, I. & Bentzen, T. (2013). Activated sludge rheology: A critical review on data collection and modelling. Water Research, Vol. 47, 463-482.

Rosenberger, S., Kubin, K. & Kraume, M. (2002). Rheologie von Belebtschlamm in Membranbelebungsreaktoren. Chemie Ingenieur Technik, 74. Jahrgang, Nr. 4, 487-494.

Slatter, P.T. (2008). Pipe flow of highly concentrated sludge. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering Vol. 43, 1516-20.

VDMA (2010). VDMA-Einheitsblatt 24656. Rührwerke in Belebungsbecken von Abwasserreinigungsanlagen. Hinweise zur Planung, Projektierung und Ausführung. März 2010.

Wilo (2013). Rührwerkstechnik – Abwassertechnik für die Wasserwirtschaft. Planungshandbuch, 1. Aufl. 2013.

Zlokarnik, M. (1999). Rührtechnik: Theorie und Praxis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999.