

Kohlenstoffausschleusung durch biologische Vorbehandlung zur Steigerung der Energieeffizienz - neue Perspektiven für das AB-Verfahren

J. Pinnekamp^{1*}, C. Keysers² und M. Kaleß¹

¹ISA RWTH Aachen University, DE

²Wasserverband Eifel-Rur, DE

*Kontaktperson: Pinnekamp@isa.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Die Sichtweise auf die im Abwasser enthaltenen Schmutzstoffe wandelt sich. Waren organische Belastungen des Abwassers zunächst unerwünschte, zu entfernende Stoffe, so werden sie heutzutage als Energieträger angesehen. Für eine möglichst energieeffiziente Abwasserreinigung ist die Nutzung dieser im Abwasser enthaltenen stofflich gebundenen Energie erforderlich, welche eine weitgehende Ausschleusung des im Abwasser enthaltenen Kohlenstoffs voraussetzt. Zur Kohlenstoffausschleusung sind viele Verfahren einsetzbar. Die Ausschleusung kann physikalisch, chemisch oder biologisch erfolgen. Ein Verfahren zur biologisch physikalischen Kohlenstoffausschleusung ist das zweistufige Verfahren, das neben partikulär gebundenem Kohlenstoff auch gelösten Kohlenstoff über Adsorption am Schlamm bei anschließender Sedimentation ausschleust. Unter den zweistufigen Verfahren wird in diesem Textbeitrag das Adsorptions (A)- Belebungsverfahren (B) vorgestellt. Das zweistufige A-B Verfahren wurde in den 70er Jahren als kostengünstige Alternative für einstufige Verfahren entwickelt (Böhnke, 1977) und strebte eine verfahrenstechnisch möglichst weitgehende Trennung der Kohlenstoff- und Stickstoffelimination an. Es verlor wegen zusätzlicher Anforderungen an die Reinigungsleistung später an Bedeutung. Im Kontext der heutzutage geforderten energieeffizienten Abwasserreinigung könnte das Verfahren eine Renaissance erfahren.

1 Entwicklung der biologischen Abwasserreinigung

Dank des Klosetts mit Wasserspülung und Schwemmkanalisation wurden zur Mitte des 19. Jahrhunderts die Fäkalien unterirdisch aus den Städten abtransportiert und in Flüsse eingeleitet. Die Beobachtung der hässlichen und übelriechenden Schlammبانke, die sich in den Gewässern bildeten, hatte zur Folge, dass die Abwässer vor der Einleitung mechanisch gereinigt wurden. In Frankfurt entstanden im Jahr 1887 die ersten großen Absetzanlagen für kommunales Abwasser. Die Selbstreinigungskraft der aufnehmenden Gewässer war den unbehandelten bzw. den mechanisch behandelten Abwassermengen aus den Städten nicht gewachsen. Fischsterben, die in abwasserbelasteten Gewässern auftraten, wurde als Folge der übermäßigen Sauerstoffzehrung erkannt. Zudem wurden mit dem Abwasser Krankheitserreger in die Fließgewässer eingetragen. Dies führte zur Entwicklung der biologischen Abwasserreinigung. Am Anfang der biologischen Abwasserreinigung standen natürliche Verfahren wie das weiträumige Aufbringen auf landwirtschaftlichen Flächen oder das Auffangen in Abwasserteichen im Vordergrund. Nach englischem Vorbild wurden zum Ende des 19. Jahrhunderts in Deutschland Rieselfelder angelegt. Das Belebungsverfahren wurde 1914 in Boston entwickelt. Es ahmte die im Fluss ablaufenden Vorgänge der biologischen Selbstreinigung am stärksten nach. Im sogenannten belebten Schlamm wurden die Organismen, die auch in der Natur für die Reinigung verantwortlich sind, angereichert. Um einen Mangel an Sauerstoff zu verhindern, musste ständig Luft eingeblasen werden. Die erste deutsche Kläranlage nach dem Belebungsverfahren wird 1925 in Essen-Rellinghausen in Betrieb genommen. (Imhoff, 1979; Lange, 2002)

Das Adsorptions-Belebungsverfahren (A-B-Verfahren) wurde von Böhnke (1976) als Weiterentwicklung des einstufigen Belebungsverfahrens in den 1970er Jahren entwickelt. Nach erfolgreicher Pilotierung erfolgte die Planung für den Ausbau der Kläranlage Krefeld auf eine Ausbaugröße von 800.000 E nach dem A-B-Verfahren. In den 1980er Jahren wurden mehrere Anlagen auf eine zweistufige Abwasserreinigung umgestellt. Die Bedeutung des Verfahrens ging jedoch in Folge weitergehender Anforderungen zur vollständigen Stickstoffelimination und den damit einhergehenden Bedarf an organischen Kohlenstoff zur Denitrifikation zurück. Dies führte auf mehreren kommunalen Kläranlagen, die vorwiegend durch häusliche Schmutzwässer belastet werden,

dazu, dass die erste biologische Stufe außer Betrieb genommen, ein Bypass zur (Teil)-Umfahrung der ersten Stufe errichtet oder die Zwischenklärung zur Vorklärung umgebaut wurde, um ausreichend Kohlenstoff für die Denitrifikation bereitzustellen. Dennoch sind einige zweistufige, großtechnische Anlagen, wie bspw. Krefeld, Köln-Stammheim, Düsseldorf, Eisenhüttenstadt, Wien, Strass, in Betrieb.

Die vermehrte Kohlenstoffausschleusung ist Gegenstand der Forschung. Im Projekt CARISMO (2011-2014) wurde ein Feinsieb mit der Maschenweite 100µm unter der Zugabe von Flockungs- und Flockungshilfsmitteln eingesetzt. Die Kohlenstoffausschleusung erfolgte so effizient (bis 78 %), dass zur anschließenden Stickstoffelimination eine externe C-Quelle eingesetzt werden musste (Remy et al., 2014). Das Projekt Powerstep (Großtechnische Demonstrationsversuche von energiepositiven Klärwerkskonzepten), begonnen am 1.7.2015, versucht die im Pilotbetrieb gewonnenen Erkenntnisse großtechnisch zu bestätigen. Dabei wird auch die Deammonifikation im Hauptstrom betrachtet, um Problemen bei der Denitrifikation, die bei Kohlenstoffmangel entstehen, zu begegnen. Das durch das BMBF geförderte Projekt E-Klär (Laufzeit 1.5.2104 – 30.4.2017) untersucht unter anderem innovative Verfahren zur Kohlenstoffausschleusung aus Abwasser (www.e-klaer.de).

Studien zur Kläranlage der Zukunft sehen ebenfalls die vermehrte Kohlenstoffausschleusung als wichtigen Schritt zu einer energieeffizienten Abwasserreinigung vor. In den Niederlanden wird die Kläranlage zukünftig zu einer Wasser-, Nährstoff- und Energiefabrik (stowa, 2010). Eine weitere Studie zur Kläranlage der Zukunft, finanziert durch das Bayerische Landesamt für Umwelt, empfiehlt ebenfalls eine weitergehende Ausschleusung von Kohlenstoff zur Nutzung als Energieträger und untersucht in einem rechnerischen Verfahrenskonzept die Hochlastbelegung als eine mögliche Variante zur Kohlenstoffausschleusung (Horn et al, 2009).

1.1 Kohlenstoff: vom Schmutzstoff zum Wertstoff

Abwasser ist ein aus organischen und anorganischen Substanzen bestehendes Vielstoffgemisch. Die Bestandteile liegen in gelöster und ungelöster Form vor. Die Hauptbestandteile an organischen Inhaltstoffen von kommunalem

Abwasser sind im Allgemeinen Fette, Kohlenhydrate, Proteine sowie weitere Lebensmittelzusatzstoffe (Koppe und Stozek, 1999). In Abhängigkeit der Struktur des Einzugsgebiets kann die Zusammensetzung des Abwassers von Fall zu Fall stark variieren. Durch die Erfassung der organischen Substanz über den CSB kann stöchiometrisch direkt das Energiepotenzial ermittelt werden, 1 g CSB entspricht dabei 0,35 Normliter Methan bzw. 3,5 Wh. Im Allgemeinen entspricht der spezifische, chemisch gebundene Energiegehalt von kommunalem Abwasser 153 kWh/(E·a). (Svardal und Kroiss, 2011)

Mit der Einführung des Belebungsverfahrens wurden die im Abwasser enthaltenen organischen Verbindungen unter Zugabe von Sauerstoff oxidiert, um den Sauerstoffhaushalt der aufnehmenden Gewässer zu entlasten. Die organischen Inhaltsstoffe wurden ausschließlich als sauerstoffzehrende Schmutzstoffe angesehen, die die Gewässer belasten. Die energetische Nutzung der chemisch gebundenen Energie spielte zu dieser Zeit keine Rolle. Im Jahr 1927 wird auf der Kläranlage Iserlohn erstmals Faulgas zum Antrieb von Gasmotoren verwendet. Überwiegend wurde das anfallende Faulgas abgefackelt. In Folge der Anforderungen zur gezielten Denitrifikation Anfang der 1980er Jahre kam es zum Wandel der Sichtweise auf die organischen Inhaltsstoffe: Aus den vormals organischen Zehrstoffen wurden prozessintern brauchbare Nutzstoffe. Jüngstes Beispiel zum Wandel des Kohlenstoffs vom Schmutz- zum Wertstoff ist die Verfahrensumstellung der Kläranlage von gemeinsamer aerober Stabilisierung auf Schlammfäulung. Bei Anlagengrößen von < 20.000 EW wurden in der Vergangenheit überwiegend Anlagen mit simultaner aerober Schlammstabilisierung konzipiert, während der übliche Einsatzbereich für Fäulungsanlagen erst bei Ausbaugrößen von etwa 30.000 EW begann. Meyer und Biebersdorf (1995) verweisen aufgrund entsprechender Berechnungen darauf, dass sich bei sachgerechter Planung eine Fäulung bereits ab 10.000 bis 20.000 EW wirtschaftlich umsetzen lässt.

2 Verfahren der Kohlenstoffausschleusung

Kohlenstoffverbindungen liegen im Abwasser partikulär oder gelöst vor. Diese Verbindungen können über physikalische, biologische und chemische Prozesse

aus dem Abwasser ausgeschleust werden. Zu den physikalischen Prozessen zählen Sedimentation, Siebung, Flotation und Adsorption. Mit der Zugabe von Chemikalien in das Abwasser kann die Ausschleusung kohlenstoffhaltiger Substanzen über Fäll- und Flockungsprozesse unterstützt werden. Biologische Kohlenstoffausschleusung erfolgt über den Weg der Inkorporation von organischen Substanzen in Zellmasse. Eine Übersicht über die Prozesse und den zu den Prozessen gerechneten Verfahren zur Kohlenstoffausschleusung inklusive der Angabe, ob mit dem jeweiligen Verfahren partikulär, gelöst oder kolloidal vorliegende Kohlenstoffverbindungen aus dem Abwasser entfernt werden können, gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Möglichkeiten zur Kohlenstoffausschleusung

		Möglichkeit zur Ausschleusung von Kohlenstoff	
		partikulär	gelöst
physikalisch	Sedimentation	ja	nein
	Siebung	ja	nein
	Flotation	ja	nein
	Adsorption	ja	ja
biologisch	biologische Inkorporation	nein	ja
chemisch	Fällung / Flockung	ja	teilweise

Meistens liegt eine Kombination verschiedener Prozesse zur Kohlenstoffausschleusung aus kommunalem Abwasser vor. Insbesondere wird zur Abscheidung des biologisch inkorporierten Kohlenstoffs die Sedimentation oder Filtration nachgeschaltet, um das Wasser- Feststoffgemisch zu separieren.

2.1 Funktionsweise, Entwicklung und Stand des A-B-Verfahrens

Das A-B- Verfahren kombiniert die Verfahren Adsorption und biologische Inkorporation. Das Verfahren zeichnet sich durch zwei strikt voneinander

getrennte Schlammkreisläufe aus. Das Ziel dieser Entwicklung bestand darin, ähnlich gute Ablaufwerte, wie sie zu dieser Zeit durch andere (einstufige) Verfahren bereits erreicht wurden, mit einem Verfahren zu erzielen, welches geringere spezifische Bau- und Energiekosten erfordert (Böhnke, 1977). Eine weitgehende Trennung der Kohlenstoff- und Stickstoffelimination wurde durch das Verfahren möglich, was eine hochbelastete erste Stufe zur Kohlenstoffelimination und eine schwach belastete zweite Stufe impliziert. Die erste Stufe des A-B-Verfahrens zeichnet sich nach Gethke (1983) und Eitner (1984) dabei durch

- hohe Belastungsbereiche,
- niedrige Trockensubstanzgehalte,
- kurze Durchflusszeiten,
- geringe Schlammalter von wenigen Stunden,
- hohe Eliminationsleistung bei geringem Energieeinsatz und
- gute Eindickfähigkeit des Schlammes aufgrund eines niedrigen Schlammindex

aus.

Das Verfahrensschema des zweistufigen A-B-Verfahrens mit der ersten höchstbelasteten und der zweiten schwachbelasteten Stufe ist in Abbildung 1 dargestellt.

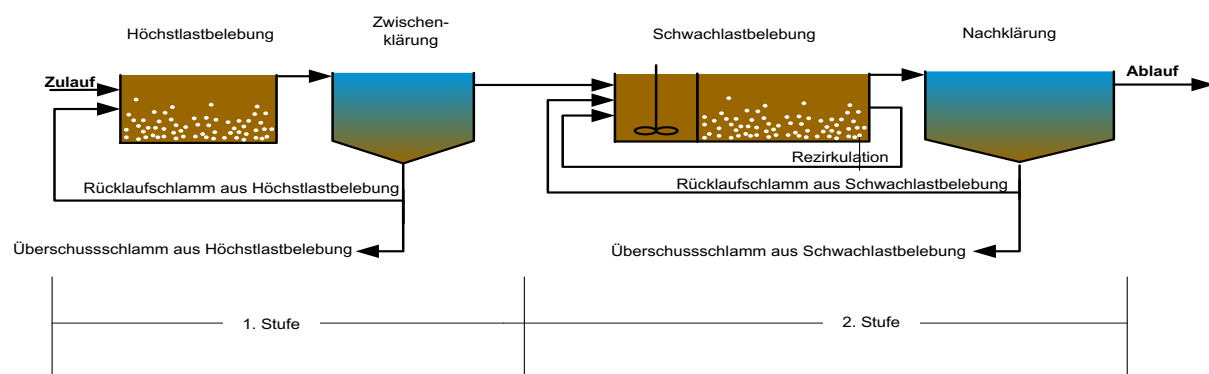


Abbildung 1: Verfahrensschema des A-B-Verfahrens

Die strikte Trennung der beiden Schlammkreisläufe ermöglicht die Abwasserreinigung mit zwei verschiedenen an unterschiedliche Bedingungen angepassten Biozönosen. Eine Vorklärung existiert nicht.

3 Halbtechnische Untersuchungen an der ersten Stufe eines zweistufigen Verfahrens

In der Vergangenheit wurden die Eliminationsleistungen des A-B- Verfahrens hinsichtlich des gesamten Kohlenstoffs untersucht. Die Untersuchungen bezogen sich maßgeblich auf den Summenparameter CSB der homogenisierten Probe. In den hier vorgestellten im Jahr 2014 durchgeführten halbtechnischen Untersuchungen hingegen wurde nicht nur der CSB der homogenisierten Proben sondern auch der CSB der filtrierten Proben für den Zu- und Ablauf der ersten Stufe ermittelt, um die Adsorption von gelöstem Kohlenstoff quantifizieren zu können. Die Untersuchungen fanden mit Abwasser aus dem Zulauf der Kläranlage Neuss auf der halbtechnischen Kläranlage (HtK) Neuss des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) statt. Die Kohlenstoffelimination in der ersten Stufe wurde in Abhängigkeit des Schlammalters der ersten Stufe untersucht. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis der halbtechnischen Untersuchungen für die Elimination des Gesamt- CSB.

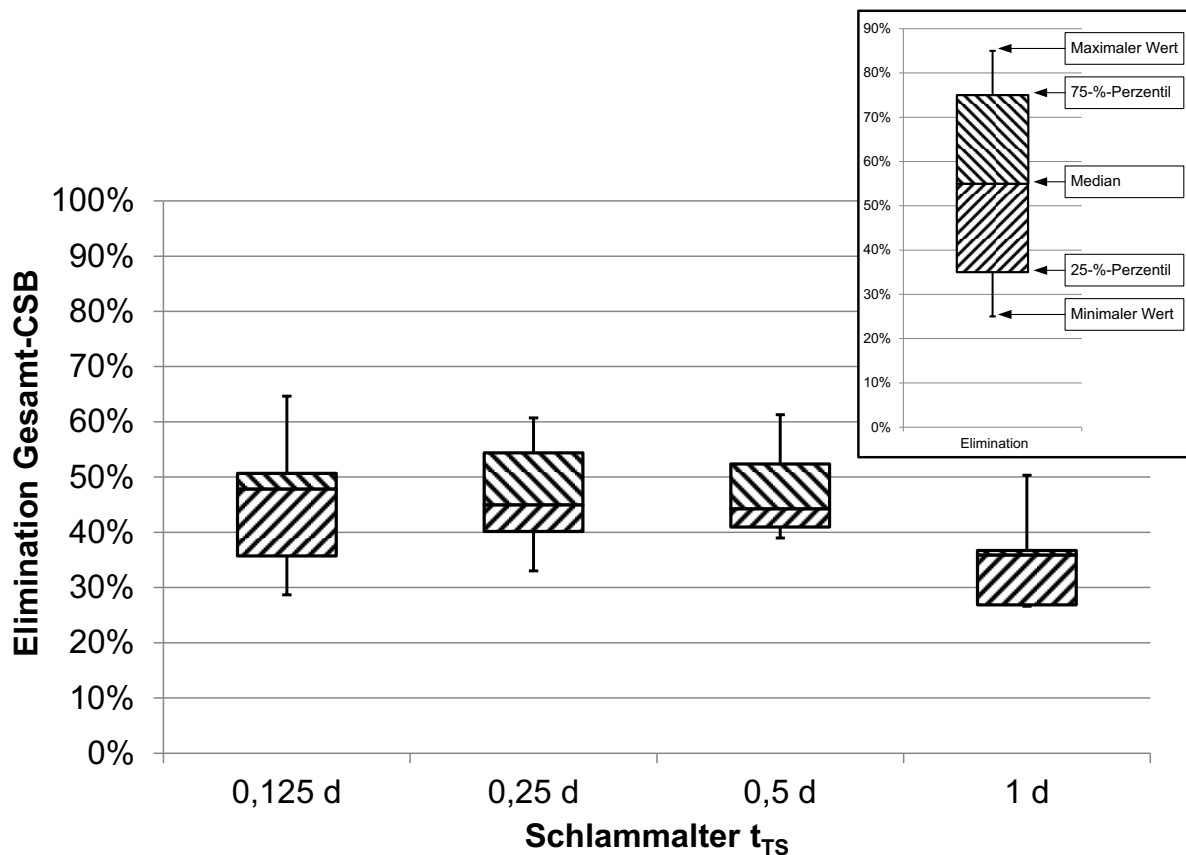


Abbildung 2: Elimination des Gesamt- CSB in der ersten Stufe sowie Erläuterung Boxplot (Ruppelt, 2014)

Es bestätigten sich die schon in der Vergangenheit gewonnenen Erkenntnisse (Gethke, 1981), dass eine Elimination des Gesamt-CSB in der ersten Stufe in Höhe von 45 % im Median bei niedrigen Schlammaltern möglich ist. Das untersuchte Schlammalter von einem Tag erreicht diese relative Eliminationsleistung nicht. Im Zeitraum der Untersuchungen zu diesem Versuchspunkt wies der CSB im Zulauf zur ersten Stufe jedoch einen außergewöhnlichen hohen Wert über 1.000 mg/l auf, so dass die Eliminationsleistung bei $t_{TS} = 1$ d relativ niedrig ist, absolut jedoch eine hohe Elimination vorliegt.

Der Gesamt-CSB setzt sich aus gelöst und partikulär vorliegenden Verbindungen zusammen. Die in Abbildung 2 gezeigten Eliminationswerte verteilen sich wie folgt auf die gelöste sowie partikuläre Fraktion (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4):

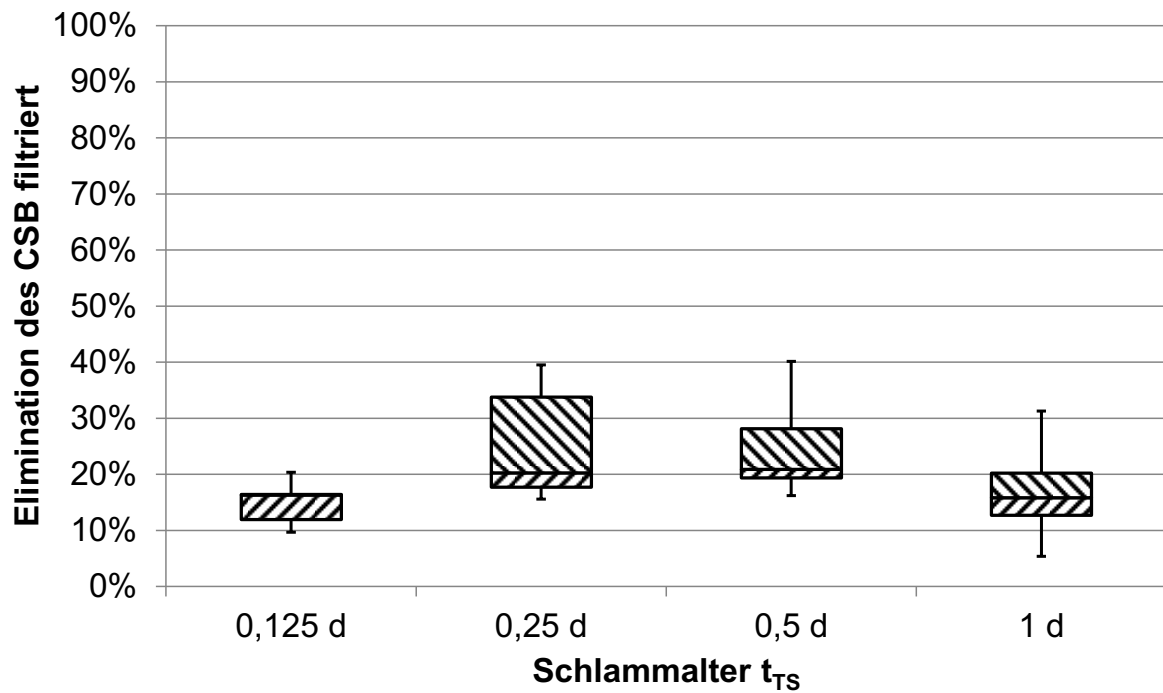


Abbildung 3: Elimination des CSB filtriert in der ersten Stufe (Ruppelt, 2014)

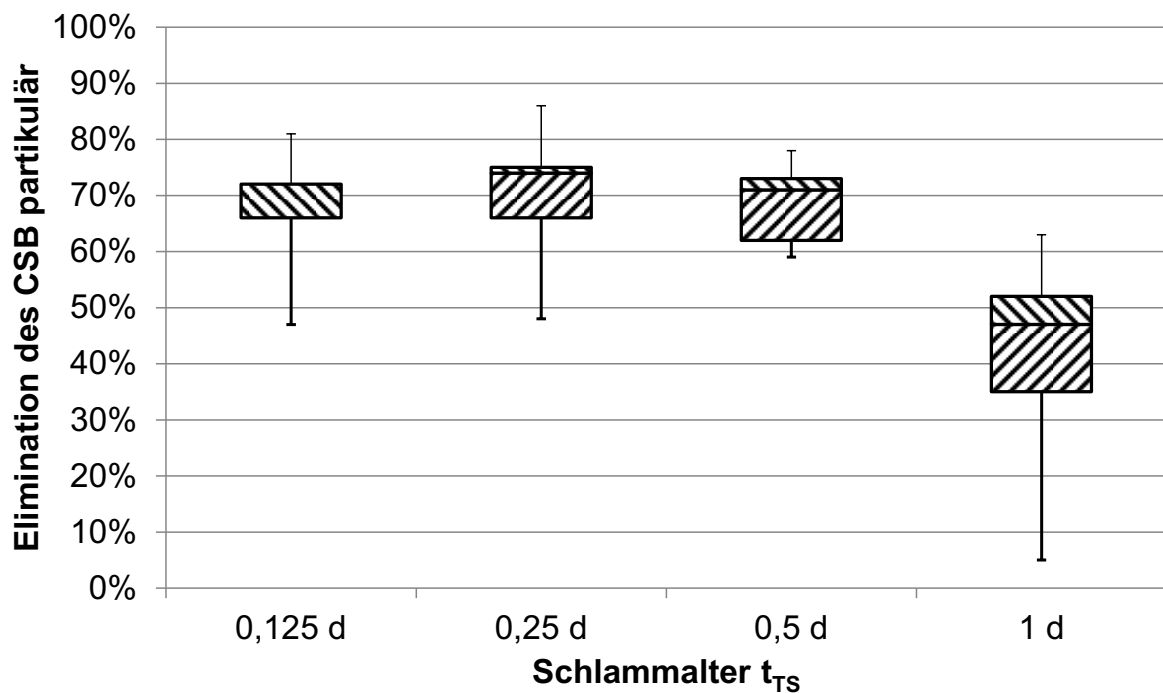


Abbildung 4: Elimination des CSB partikulär in der ersten Stufe (Ruppelt, 2014)

Es zeigt sich, dass partikulär gebundener CSB mit im Median bei ca. 70 % der drei geringsten untersuchten Schlammalter gut ausschleusbar ist. Die gesunkene Eliminationsleistung bei einem Schlammalter von einem Tag korreliert mit den veränderten Zulaufbedingungen während des Versuchszeitraums. Gelöst vorliegender CSB (Abbildung 3) ließ sich im Median in der ersten Stufe zu 15 bis 20 % ausschleusen. Maximalwerte wiesen eine Elimination von bis zu 40 % auf. Aufgrund des geringen Schlammalters kann davon ausgegangen werden, dass die Ausschleusung des gelöst vorliegenden CSB hauptsächlich über Adsorption am Schlamm erfolgt. Die Elimination des gelöst in der Abwassermatrix vorliegenden CSB ist von besonderem Interesse, da die Entfernung gelöster Substanzen in einstufigen Verfahren maßgeblich über die Inkorporation in Biomasse stattfindet, bei der das Verstoffwechsell und die daraus resultierende teilweise Mineralisation des gelöst vorliegenden CSB eine Reduktion des stofflich gebundenen energetischen Potentials des Abwassers bedeutet. Über Adsorption an den Schlamm ausgeschleuster CSB hingegen kann in der Faulung energetisch genutzt werden.

4 Fazit

Im Gegensatz zur heutigen Abwasserreinigung, bei der unter Zuhilfenahme von Energie die im Abwasser enthaltenen Wert- und Schmutzstoffe mineralisiert bzw. transformiert sowie in andere Umweltbereiche verschoben werden, liegt die Zukunft der Abwasserreinigung in der weitergehenden Nutzung der Wertstoffe und der Vermeidung und umweltfreundlichen Umwandlung von Schadstoffen bei minimalen Energieeinsatz. Die organische Belastung des Abwassers ist somit nicht mehr als zu eliminierende Schmutzfracht, sondern als zu nutzende Energiequelle zu verstehen; der Fokus der Abwasserreinigung verschiebt sich weg von der Kohlenstoffelimination hin zur Kohlenstoffausschleusung mit anschließender Kohlenstoffnutzung unter der Prämisse, die gesamte Reinigungsleistung nicht zu beeinträchtigen. In diesem Textbeitrag wird neben der Historie des Umgangs mit Schmutzstoffen im Abwasser auch das A-B- Verfahren erläutert, welches sich für die vermehrte Ausschleusung von Kohlenstoff aus Abwasser eignet. Mit dem Verfahren kann nicht nur partikulär, sondern auch gelöst vorliegender Kohlenstoff partiell eliminiert werden. Da über die gewöhnlichen Abwasserreinigungsverfahren gelöster Kohlenstoff maßgeblich nur nach Inkorporation in Biomasse

ausgeschleust werden kann, bei der Teile des Kohlenstoffs zu Kohlendioxid veratmet werden und somit einer energetischen Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen, stellt das A-B-Verfahren eine energieeffiziente Verfahrensweise der Abwasserreinigung dar. Zudem wird der Sauerstoffeintrag im Vergleich zu einstufigen konventionellen Belebungs-verfahren reduziert. Unter der Prämisse einer autotrophen Stickstoffelimination im Hauptstrom, bei der die Anwesenheit von kohlenstoffhaltigem Substrat nicht zwingend erforderlich ist, oder der ausreichenden Versorgung der Denitrifikanten mit Kohlenstoff kann das zweistufige A-B-Verfahren in Zukunft wieder an Bedeutung gewinnen.

5 Literatur

B. Böhnke: Das Adsorptions-Belebungsverfahren. In: Korrespondenz Abwasser, Ausgabe 2/77, S. 33-42, 1977.

D. Eitner: Kombinationssystem nach dem A-B-Verfahren für kleinere und mittlere Kläranlagen durch Nutzung eines belüfteten Sandfangs und einer Vorklärung als Höchstlastbelebungsstufe (Teil A). In: Böhnke, B (Hrsg.): Gewässerschutz, Wasser, Abwasser (GWA), Band 64, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, 1984.

H.-G. Gethke: Energieminimierung durch das Adsorptions-Belebungsverfahren. In: BÖHNKE, B (Hrsg.): Gewässerschutz, Wasser, Abwasser (GWA), Band 49, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, 1981.

H.-G. Gethke: Untersuchung und Anwendung eines zweistufigen Belebungsverfahrens mit einer Höchstlastbelebungsstufe in der 1. Stufe und einer Schwachlastbelebungsstufe in der 2. Stufe (Adsorptions-Belebungs-Verfahren), In: Böhnke, B. (Hrsg.): Gewässerschutz, Wasser, Abwasser (GWA), Band 66, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, 1983.

H. Horn, S. Rapp-Fiegle, W. Günthert, M.S. Holtorff, F. Bischof, F., M. Chwistek: „Schlussbericht Forschungsvorhaben „Kläranlage der Zukunft“ – Themenbereiche Faulgasproduktion, Anaerobtechnik und Deammonifikation“, 2009, http://www.sww.bgu.tum.de/fileadmin/w00bom/www/_migrated_content_uploads/LfU-Abschlussbericht_2009_Rapp-Fiegle.pdf, zuletzt abgerufen am 29.07.2015

K. R. Imhoff „Die Entwicklung der Abwasserreinigung und des Gewässerschutzes seit 1868.“ Gas- und Wasserfach, Wasser-Abwasser 120 (1979), S. 563-576.

P. Koppe, A. Stozek: „Kommunales Abwasser – Seine Inhaltsstoffe nach Herkunft, Zusammensetzung und Reaktionen im Reinigungsprozess einschließlich Klärschlämme.“ 4. Auflage, ISBN: 3-8027-2833-5, 4. Auflage, Vulkan Verlag, Essen, 1999.

J. Lange: „Zur Geschichte des Gewässerschutzes am Ober- und Hochrhein - Eine Fallstudie zur Umwelt- und Biologiegeschichte.“ Dissertation an der Fakultät für Biologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2002.

H. Meyer, N. Biebersdorf: Schlammfäulung oder simultane aerobe Stabilisierung. In: Gewässerschutz, Wasser, Abwasser, 1995.

C. Remy, M. Boulestreau, B. Lesjean: „Technischer Nachweis eines innovativen Konzepts für ein energie-positives Klärwerk“, GWA Band 234, 47. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft vom 19.3.-21.3.2014 in Essen, ISBN 978-3-938996-40-9.

J. Ruppelt: Kohlenstoffausschleusung aus kommunalem Abwasser in der ersten Stufe zweistufiger Belebungsverfahren, Masterarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, 2014.

Stowa: The dutch roadmap for the wwtp of 2030, news 24/2010; <http://www.stowa.nl/Upload/publicaties/stowa%20rapport%202010-24%20engels.pdf>, zuletzt abgerufen am 29.07.2015

Svardal, K., Kroiss, H. (2011): Energiebedarf und Reinigungsleistung von Kläranlagen. GWA Band 223, 44. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft vom 23.3.-25.3.2011 in Essen, ISBN 978-3-938996-29-4, 4/1 – 4/13.