

Elektrochemisch-physikalisches Verfahren

Aufbereitung von Prozessabwasser

Dr.-Ing. Jörg STRUNKHEIDE; Achim HÖCHERL

Kläranlage Bonn-Duisdorf:
Reduktion von Arzneistoffen und Entkeimung
mit der IONERGY®-Technologie.

Das Gesetz über den Verkehr mit Arzneimitteln (Arzneimittelgesetz) definiert im § 2 Arzneimittel u. a. als „Stoffe oder Zubereitungen aus Stoffen, die dazu bestimmt sind, durch ihre Anwendung am oder im menschlichen oder tierischen Körper Krankheiten, Leiden, Körperschäden oder krankhafte Beschwerden zu heilen, zu lindern, zu verhüten oder zu erkennen“.

Vorkommen von Arzneistoffen im Zu- und Ablauf von kommunalen Kläranlagen

Der Haupteintragspfad von Humanarzneistoffen und deren Metabolite in die Umwelt ergibt sich bei bestimmungsgemäßem Gebrauch über den Patienten in das kommunale Abwasser – über private Haushalte, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen usw. – und somit in die Kläranlage (Bild 1) /1/. Von hier gelangen Arzneistoffe über das gereinigte Kläranlagenabwasser in den Vorfluter (Fließgewässer) und über den Klärschlamm ist bei der Verwertung in Landwirtschaft und Landschaftsbau eine Kontamination des Bodens nicht auszuschließen /2/. Aufgrund einer oder mehrerer der folgenden umweltrelevanten Eigenschaften der meisten Arzneistoffe ist eine potenzielle Gefährdung von Mensch und Natur gegeben /3/:

- ! hohe Persistenz in der Umwelt
- ! hohe Mobilität in der wässrigen Phase
- ! umwelt- und gesundheitsschädigendes Potenzial.

In Tabelle 1 ist für deutsche Kläranlagen eine Auswahl von nachgewiesenen Arzneistoffen mit Angabe der Schwankungsbreiten bezüglich der Konzentrationsangaben und Rückhalt aufbereitet.

Hygienische Anforderungen bei der Brauchwassernutzung auf Kläranlagen

Da eine besondere Gefährdung für den Menschen bei direktem Kontakt mit kontaminiertem Wasser besteht, wird als Richtlinie bzw. Güteanforderung an die Gewässernutzung häufig die EG-Richtlinie über die Qualität der Badegewässer herangezogen /4/. Die hier genannten mikrobiologischen Richtwerte lassen sich auf die Anforderungen an die mikrobiologische Abwassergüte übertragen. Bei Kläranlagen wird neben Brunnenwasser in vielen Fällen gereinigtes Abwasser anstatt teurem Trinkwasser als Betriebswasser (z. B. für Reinigungsvorgänge) genutzt. Dieses wird aus dem gereinigten Abwasser entnommen und in einer Behandlungstechnologie (z. B. Filtration mit nachgeschalteter UV-Entkeimung) für den gesundheitlich unbedenklichen Gebrauch z. B. für Reinigungsvorgänge aufbereitet.

Escherichia coli und Darmenterokokken sind im Prinzip ausschließlich auf Verunreinigungen durch Fäkalien

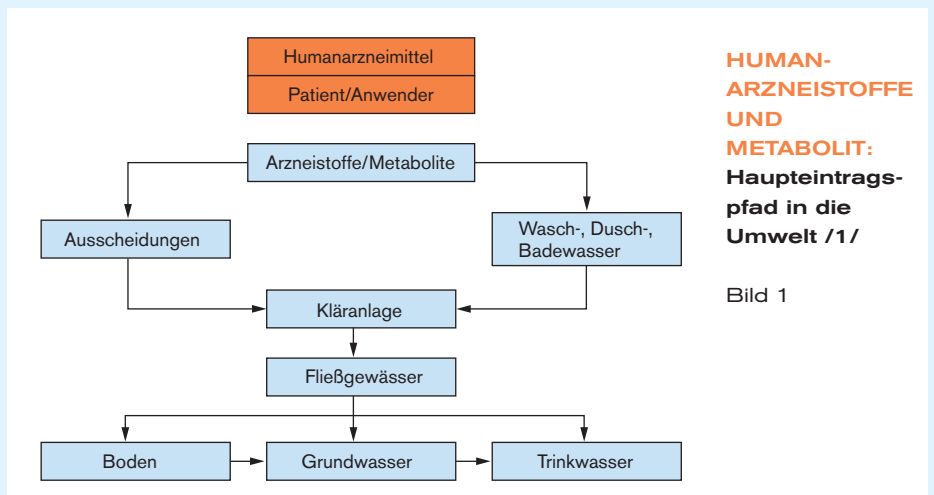
menschlicher und tierischer Herkunft zurückzuführen und signalisieren mit hinreichender Sicherheit ein Infektionsrisiko. In Deutschland wird in der Praxis als Qualitätskriterium gefordert, dass das aus gereinigtem Abwasser (Ablauf Nachklärung) aufbereitete Brauchwasser bezüglich der mikrobiologischen Parameter E.Coli und Enterokokken die Leitwerte 100 cfu/100 ml der alten EG-Badegewässerrichtlinie einhalten sollte.

Aufbau und Wirkungsmechanismen der IONERGY®-Technologie

Die elektrochemisch-physikalisch arbeitende IONERGY-Kompaktanlage (B 200) besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten (Bild 3):

- ! Elektroflokkulationszelle (EF)
- ! IONERGY-Filtereinheit (Abwärtsfilter)
- ! nachgeschaltete UV-Einheit.

Die patentierte Elektroflokkulationszelle (Bild 4) stellt das eigentliche Kernstück des IONERGY®-Modules dar. Durch eine optimierte Beschichtung der



HUMAN-ARZNEISTOFFE UND METABOLIT: Haupteintragspfad in die Umwelt /1/

Bild 1



PROBEBETRIEB:
Behandlung von Brauchwasser mit der Anlage IONERGY® B-200 /5/

Bild 2

Elektroden sowie Eisenspäne als Elektronendonator konnte eine großflächige Anode entwickelt werden, die auf engstem Raum Platz findet. Durch das pulsierende Eindüsen von Druckluft wird eine kontinuierliche Durchmischung des Eisenspannettes sichergestellt. Die Kraft des Zeta-Potenzials verhindert bei

Abwasserinhaltsstoffen mit einer Teilchengröße von weniger als 20 µm ein Zusammenballen – diese Teilchen haben die gleiche elektrische Ladung und stoßen sich daher ab, so dass diese mit wirtschaftlichen Verfahren nicht filtrierbar sind. In der Elektroflockulationszelle wird das Klärabwasser (Ablauf Nachklä-

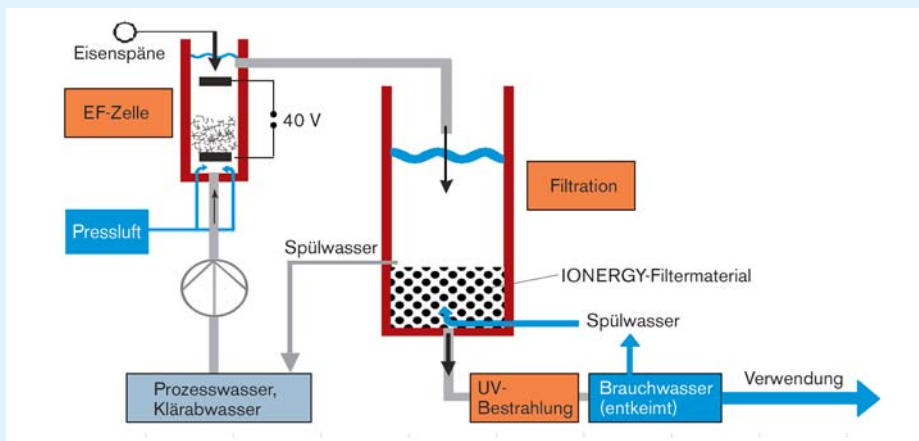
rung) an Edelmetallanoden mit Eisenspänen (FESP) als Verbrauchsanoden elektroflokkuliert. Dabei wird das Zeta-Potenzial der Feinstteilchen (< 20 µm) weitgehend zerstört und eine gut filtrierbare Flocke aus diesen zusammengeballten Teilchen mit Fe(OH)₃ erzeugt. Diese abfiltrierbaren Flocken werden dann in der nachgeschalteten Filtereinheit (Abwärtsfilter) zurückgehalten. Nach der Filtereinheit ist eine UV-Einheit zur Nachentkeimung installiert.

Versuchsbetrieb auf der Kläranlage Bonn-Duisdorf

Die Abwasserreinigung auf der Kläranlage Bonn-Duisdorf mit einer Ausbaugröße von 30.000 EW erfolgt mit Hilfe des A (Hochlastbelebungs)/B (Schwachlastbelebungs)-Verfahrens. Der B-Stufe ist zum Rückhalt der feinstverteilten Abwasserinhaltsstoffe (Suspensa) eine Filtrationseinheit nachgeschaltet. Die Klärschlammbehandlung setzt sich aus den Prozessstufen Voreindicker, maschinelle Vorentwässerung mittels Siebband, Faulungsstufe (2 Faulbehälter), maschinelle Entwässerung des ausgefaulten Schlammes mittels Zentrifuge zusammen. Der entwässerte Schlamm wird anschließend der Verbrennungsanlage auf der Kläranlage Bonn-Salierweg zugeführt. Die Faulgasverwertung erfolgt mittels Heizkesselanlagen und Blockheizkraftwerken (BHKW). Zusätzlicher Fremdenergiebedarf wird über Erdgas abgedeckt. Zur Minderung der Geruchsemissionen wird die Abluft aus den abgedeckten Bauwerken über einen Biofilter (Rindenmulche) geführt. Die Durchführung des Versuchsbetriebes erfolgte mit personeller und technischer Unterstützung durch das Betriebspersonal der Kläranlage Bonn-Duisdorf.

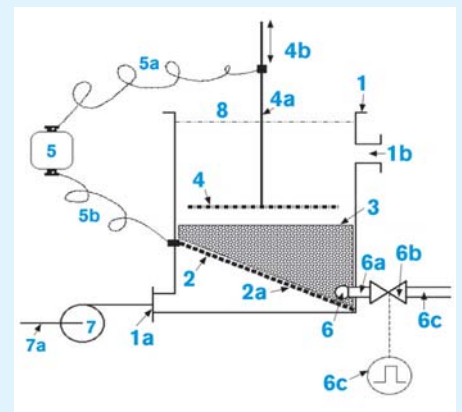
Prozessziele

Die Untersuchungen wurden auf der 2-straßigen Kläranlage Bonn-Duisdorf in



VEREINFACHTE DARSTELLUNG:
Funktionseinheiten der IONERGY-Elektroflockulationsanlage

Bild 3



SCHEMATISCHE DARSTELLUNG: die IONERGY-Elektroflockulationszelle

Bild 4

Arzneistoffe in Kläranlagenabläufen /1/			Tab. 1
Arzneistoffe	Kläranlagen-Ablauf-Konzentration µg/l	Rückhalt in Kläranlagen %	
Acetylsalicylsäure	0,29 – 0,92	81	
Clofibrinsäure	< BG – 4,55	6 bzw. 51	
Bezafibrat	0,29 – 4,8	75 – >95	
Diclofenac	> 0,10 – 10,0	15 – 69	
Phenazon	0,042 – 0,13	33	
Ibuprofen	< 0,05 – 3,7	90 – 99	
Carbamazepin	0,92 - 22,00	kein Rückhalt bzw. max 10	
Iopamidol	0,59 – 9,4	k. A.	

Arzneimittel-Analytikwerte, Minimum, Maximum und Mittelwert über die 5 Versuchsreihen /5/							Tab. 2
Parameter	Zulauf IONERGY Messstelle A			Ablauf IONERGY Messstelle C			
	Minimum µg/l	Maximum µg/l	Mittelwert µg/l	Minimum µg/l	Maximum µg/l	Mittelwert µg/l	
Clofibrinsäure	0,010	6,800	2,678	0,010	0,500	0,238	
Clarithromycin	0,050	0,210	0,132	0,001	0,003	0,001	
Clindamycin	0,050	0,262	0,128	0,050	0,057	0,051	
Erythromycin	0,051	0,140	0,092	0,001	0,021	0,010	
Roxithromycin	0,001	0,060	0,027	0,001	0,001	0,001	
Carbamazepin	0,390	1,560	0,950	0,320	1,270	0,664	
Phenazon	0,020	0,074	0,039	0,009	0,043	0,019	
Atenolol	0,069	0,200	0,140	0,010	0,150	0,087	
Metoprolol	0,150	0,390	0,246	0,110	0,230	0,170	
Sotalol	0,180	0,640	0,391	0,116	0,390	0,249	
Metronidazol	0,075	0,310	0,173	0,010	0,047	0,028	
Sulfamethoxazol	0,170	1,700	0,875	0,150	0,690	0,403	
Trimethoprim	0,035	0,160	0,106	0,001	0,040	0,022	
Bezafibrat	0,001	0,230	0,123	0,001	0,190	0,085	
Iopamidol	0,520	3,600	1,656	0,230	1,200	0,895	
Primidon	0,180	0,570	0,348	0,160	0,440	0,285	
Diclophenac	0,130	0,810	0,468	0,045	0,192	0,108	
Sulfadiazin	0,034	0,130	0,078	0,029	0,098	0,058	
Sulfathiazol	0,001	0,066	0,032	0,001	0,040	0,016	
Lidocain	0,086	0,420	0,188	0,050	0,140	0,100	
Iohexol	0,100	0,310	0,168	0,100	0,100	0,100	
Iopromid	0,160	0,380	0,260	0,010	0,240	0,114	

Nordrhein-Westfalen mit den folgenden Prozesszielen durchgeführt:

- ▮ Reduktion von Arzneimittelsubstanzen
- ▮ Desinfektion des Brauchwassers
- ▮ Reduktion des Feststoffanteils.

Verfahrenstechnische Einbindung

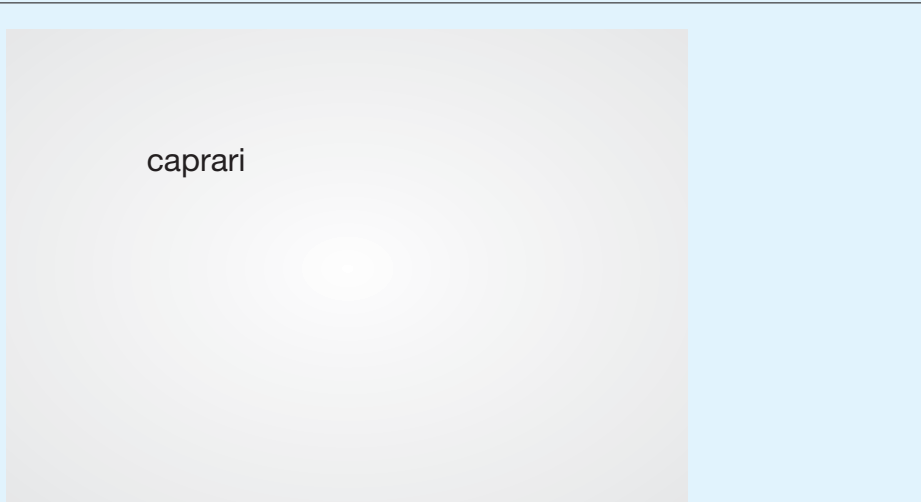
Die Brauchwasserbehandlungsanlage IONERGY war in der Nähe der Nachklärbecken der B-Stufe gegenüber dem Biofilter platziert (Bild 2). Der mit der

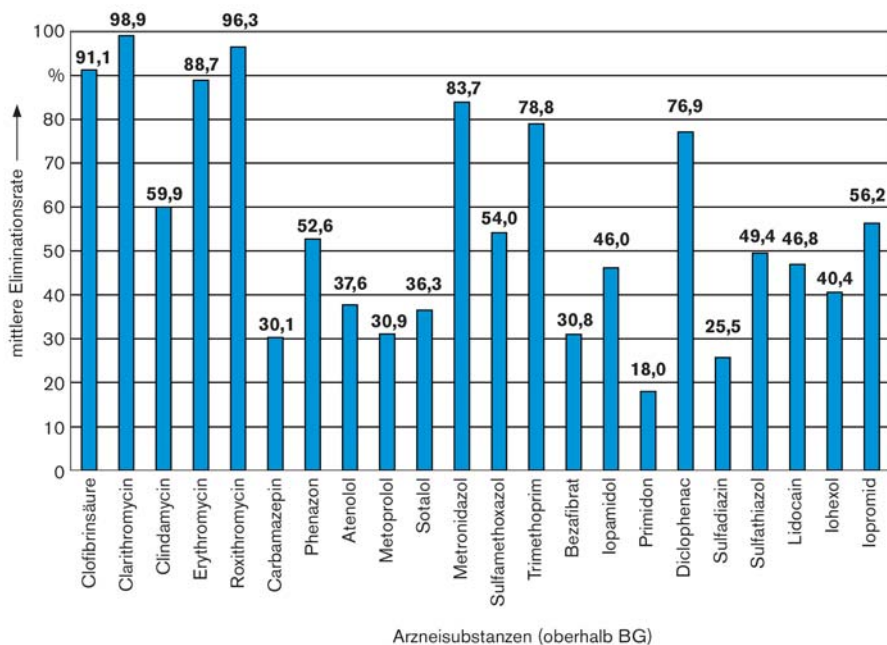
IONERGY®B-200-ANLAGE zu behandelnde Teilstrom (10 m³/h) wurde im Schacht vor der Filtration mittels Tauchpumpen entnommen und entspricht somit qualitativ dem Ablauf der Nachklärung. Das Rohabwasser wurde über eine Druckleitung vom Entnahmeschacht zur IONERGY®B-200-ANLAGE gefördert und dort mittels Pumpe in den Behandlungsprozess eingespeist /5/.

Versuchszeitraum

Für die Erprobung der IONERGY-Technologie war ein Betriebsversuch mit 13 Analysenreihen auf der Kläranlage Bonn-Duisdorf durchgeführt worden. Das Versuchsprogramm wurde in zwei Versuchsabschnitte unterteilt:

- ▮ Versuchsabschnitt I: Drei Vorversuche, Versuchsreihen 0.1, 0.2 und 0.3, zur Einstellung der Versuchsrandbedingungen, Betriebsspannung in der Elektroflockulationszelle: 40 Volt
- ▮ Versuchsabschnitt II: Zehn Versuche, Versuchsreihen 1 bis 10, zur Überprüfung der Versuchsrandbedingungen





MITTLERE ELIMINATIONS-RATEN:
der Arzneisubstanzen berechnet über die 5 Versuchsreihen /5/

Bild 5

und der erzielten Ergebnisse im Dauerbetrieb.-

Probenahmestellen

Die Probenahme erfolgte an den folgenden Messstellen:

Messstelle A: im gereinigten Abwasser (Ablauf Nachklärung) als Nullprobe vor der Elektroflokkulationszelle

Messstelle B: direkt nach der Elektroflokkulationszelle (vor dem Abwärtsfilter)

Messstelle Z: direkt nach dem Filter (vor der UV-Behandlung)

Messstelle C: in der behandelten Probe (nach Passage der IONERGY-Technologie, d. h. direkt nach der UV-Einheit).

Analytikprogramm

Das begleitende Analytikprogramm schloss neben der im Rahmen der Eigenüberwachung erfassten „Standardanalytik“ im Ablauf der Nachklärung folgende Parameter mit ein:

- Mikrobiologische Parameter, Messstelle A, Z und C: E.Coli (cfu/100 ml) Enterokokken (cfu/100 ml)
- Feststoff-Parameter, Messstelle A, B und C: abfiltrierbare Stoffe (filtriert über 20 µm bzw. 1 µm (Glasfaserfilter))
- Arzneimittel-Substanzen, Messstelle A und C.

Ergebnisse

Reduktion der Arzneimittel

Die ermittelten Arzneistoffkonzentrationen der Gruppe I und II waren zum Teil deutlich oberhalb der Bestimmungsgrenze, im Bereich von einigen µg/l, nach-

weisbar. Die Höhe der erzielten Eliminationsrate war abhängig von der betrachteten Arzneisubstanz und schwankte zwischen 0 und nahezu 100 %. Die Minima, Maxima und Mittelwerte der gemessenen Arzneistoffkonzentrationen sind für die Substanzen, deren Werte an der Messstelle A oberhalb der Bestimmungsgrenze lagen, in der Tabelle 2 für die 5 durchgeführten Arzneimittel-Analytikreihen zusammengefasst. Für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts der Arzneistoffkonzentrationen erfolgte bei Analysen mit dem Ergebnis „kleiner Bestimmungsgrenze“ („<BG“) die Verwendung des Zahlenwerts der Bestimmungsgrenze (BG) bei allen Auswertungen. Die erzielten mittleren Eliminationsraten der Arzneisubstanzen sind in Bild 5 aufbereitet. Insgesamt konnte ein signifikanter Abbau der Arzneimittel-Substanzen nachgewiesen werden.

Die Arzneisubstanzen Clofibrinsäure (Antiarteriosklerotikum), Clarithromycin (Antibiotikum), Erythromycin (Antibiotikum), Roxithromycin (Antibiotikum), Metronidazol (Chemotherapeutikum), Trimethoprim (Chemotherapeutikum) und Diclophenac (Antiphlogisticum) wurden am besten (> 70 %) durch die IONERGY-Technologie zurückgehalten.

Reduktion der mikrobiologischen Parameter

Desinfektion des Brauchwassers
Die Werte für E.Coli (Tabelle 3) und Enterokokken (Tabelle 4) der Wasserproben nach Passage des IONERGY-Filters lagen oberhalb der für die Beur-

Messe
München

E.Coli-Analysenwerte /5/						Tab. 3
Versuchsreihe Nr.	E.Coli Messstelle Z Ablauf Filter cfu/100 ml	E.Coli Messstelle C Ablauf UV cfu/100 ml	Grenzwert gemäß /4/		Leitwert für Brauchwasser cfu/100 ml	
			gute Qualität cfu/100 ml	ausgezeichnete Qualität cfu/100 ml		
1	2.175	0				
2						
3		0				
4	1.825	0				
5		0				
6		0	500	250	100	
7	810	0				
8		0				
9		0				
10	< 200	0				

Enterokokken-Analysenwerte /5/						Tab. 4
Versuchsreihe Nr.	Enterokokken Messstelle Z Ablauf Filter cfu/100 ml	Enterokokken Messstelle C Ablauf UV cfu/100 ml	Grenzwert gemäß /4/		Leitwert für Brauchwasser cfu/100 ml	
			„Gute Qualität“ cfu/100 ml	„Ausgezeichnete Qualität“ cfu/100 ml		
1	228	0				
2						
3		0				
4	292	0				
5		0				
6		0	200	100	100	
7	112	0				
8		0				
9		0				
10	285	0				

teilung der Brauchwasserqualität etablierten Leitwerte von 100 cfu/100 ml. Der Ablauf an der Messstelle C (nach der UV-Zelle) war auch im gesamten Versuchsabschnitt vollständig keimfrei.

Reduktion des Feststoffanteils

Wie aus Tabelle 5 zu ersehen ist, kam es durch den Prozess der Elektroflockulation zu einem signifikanten Anstieg der abfiltrierbaren Stoffe (Messstelle B) aus zusammengeballten Teilchen mit Fe(OH)₃.

Die gut filtrierbaren Flocken wurden im Abwärtsfilter weitestgehend zurückgehalten, so dass der Ablauf an Messstelle C quasi feststofffrei und somit konform mit den Nullwerten der Mikrobiologie war.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die spezifischen Betriebs- und Kapitalkosten der IONERGY B 200-Anlage sind in Tabelle 6 aufbereitet und liegen mit 0,15 €/m³ deutlich unter den am Markt platzierten Konkurrenzverfahren.

Bei Ultrafiltrationsanlagen mit nachgeschalteten Behandlungsstufen wie beispielsweise Aktivkohleeinheiten oder eine Ozonung kombiniert mit UV-Licht liegen die Kosten bei gleicher Leistungsfähigkeit deutlich oberhalb von 0,40 €/m³.

LITERATUR

- /1/ Landesamt für Umweltschutz in Sachsen-Anhalt: Arzneistoffe in Zu- und Abläufen von kommunalen Kläranlagen des Landes Sachsen-Anhalt. Bericht zum Sondermessprogramm 2002-2004, Nr. 3/2006
- /2/ UBA (2005): Arzneimittel in der Umwelt. Zu Risiken und Nebenwirkungen fragen Sie das Umweltbundesamt. UBA-Texte 29/05
- /3/ Kümmerer, K. (2001): Arzneimittel, Diagnostika und Desinfektionsmittel in der Umwelt – Beurteilung und Risikomanagement. UMSF – Z Umweltchem Ökotox 13 (5) 269-276
- /4/ Richtlinie 2006/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Februar 2006 über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung und zur Aufhebung der Richtlinie 76/160/EWG
- /5/ IWB-Gutachten: Versuchsbetrieb zur wissenschaftlichen Analyse beim Einsatz des Brauchwasseraufbereitungssystems IONERGY® B-200 bei der Kläranlage Bonn-Duisdorf, Dezember 2007

EAZ
Aktuell für Wasserprofis

Feststoff-Analytikwerte filtriert über 1 µm Glasfaserfilter /5/ Tab. 5

Versuchsreihe Nr.	Abfiltrierbare Stoffe 105 °C Messstelle A Zulauf mg/l	Abfiltrierbare Stoffe 105 °C Messstelle B Ablauf EF-Zelle mg/l	Abfiltrierbare Stoffe 105 °C Messstelle C Ablauf UV mg/l
1	3,7		< 2
2	2,1		< 1
3	2,3		< 2
4	3,6	39,0	< 2
5	4,1	17,3	< 2
6	5,0	34,0	< 2
7	5,0	46,0	< 2
8	3,0	42,0	< 2
9	5,0	17,0	< 2
10	2,0	120,0	< 2

Zusammenfassung und Ausblick

Die mit der IONERGY-Technologie erzielten Ergebnisse dokumentieren, dass neben der Reduktion von Arzneistoffen auch eine vollständige Reduktion der mikrobiologischen Parameter und der Feststoffe möglich ist. Der Wartungs- und Betriebsaufwand sowie die Investi-

tions- und Betriebskosten sind im Vergleich zu Konkurrenzverfahren (z. B. Ultrafiltration) als gering einzustufen. Bemerkenswert dürfte für die Praxis die Erkenntnis sein, dass diese Ergebnisse bereits bei einer Betriebsspannung der Elektroflokkulationszelle von 40 Volt erzielt worden sind. Hier sollten noch durch weitere Betriebsversuche die

Möglichkeiten der Variation der Freiheitsgrade der IONERGY-Technologie (Variation der Betriebsspannung oberhalb von 40 Volt, Belüftung, Reaktionszeit, Filtergeschwindigkeit) im Hinblick auf eine weitere Optimierung der Entfernung von Arzneistoffen untersucht werden. In der Praxis werden sich viele Anwendungsfälle ergeben – wie z. B. die Behandlung von Krankenhausabwässern, Grauwasseraufbereitung, industrielle Prozesswasseraufbereitung, z. B. die chemische Industrie, Farbherstellung/Lackieranlagen, Papier-, Lebensmittel- und Textilindustrie. Auch wird es mit geringfügigen Modifikationen möglich sein, Arsen aus Trinkwasser bzw. Abwässern zu entfernen.

KONTAKT

IBW Institut Wasser und Boden e. V.
Dr.-Ing. Jörg STRUNKHEIDE (Vorsitzender)
 Ruhrallee 19 · 45525 Hattingen
 Tel.: 02324/594465 · Fax: 02324/594646
 E-Mail: iwb-mail@t-online.de
www.iwb-bochum.de

Spezifische Betriebs- und Kapitalkosten der IONERGY B 200-Anlage Tab. 6

Betriebskosten netto	Einheit		Bemerkung
Durchflussmenge	m³/a	73.000	200 m³/d
Energiekosten			
Rohwasser-Beschickungspumpe	kWh/m³	0,033	
Rückspülpumpe	kWh/m³	0,033	
Elektroflokkulation	kWh/m³	0,100	
UV-Zelle	kWh/m³	0,050	
Summe spezifischer Energieverbrauch	kWh/m³	0,216	
Kosten pro kWh	€/kWh	0,08	
Summe spezifische Energiekosten	€/m³	0,017	
verbrauchte Eisenspäne			
spezifischer Eisenverbrauch	g/m³	10	
Eisenkosten	€/kg Eisen	0,3	
spezifische Eisenkosten	€/m³	0,003	
verbrauchtes Filtermaterial			
spezifischer Filtermaterialverbrauch	g/m³	18	
Filtermaterialkosten	€/kg	0,65	
spezifische Filterkosten	€/m³	0,012	
Personalkosten			
Kontrolle/Reinigung	h/a	61	10 min/d
Kosten pro Jahr (30 €/h)	€/a	1.825	
spezifische Personalkosten	€/m³	0,025	
Einsparung Fällmittel in der Kläranlage (Substitution von FeCl ₂ zur P-Fällung bei Rückführung des Rückspülwassers in die Belebung)			
	€/m³	0,010	
spezifische Betriebskosten	€/m³	0,047	
Kapitalkosten (netto)			
Gesamtinvestitionskosten IONERGY B 200-Anlage	€	100.000	
Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR (i,n) (Realzinssatz: 4,5 %; Nutzungsdauer: 20 Jahre)	–	0,07688	
Kapitaljahreskosten (AfA+Zins)		7.687,61	
spezifische Kapitalkosten	€/m³	0,105	
Summe spezifische Betriebs- und Kapitalkosten	€/m³	0,15	