

Pilotprojekt Kreiskrankenhaus Waldbröl

Eliminierung von Spurenstoffen aus Krankenhausabwässern mit Membran- technik und weitergehenden Behand- lungsverfahren



für das



Ministerium für Umwelt und
Naturschutz, Landwirtschaft und
Verbraucherschutz des Landes
Nordrhein-Westfalen

AZ IV – 9 – 042 1B4 0020

Projektpartner:

- Kreiskrankenhaus Waldbröl GmbH
- Pöyry GKW GmbH
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
- Aggerverband
- AV Aggerwasser GmbH
- ITT WEDECO GmbH

Aachen, im Juli 2009



Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen

Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp

Mies-van-der-Rohe-Str. 1 • 52074 Aachen

Tel: 0241 80 25207 • Fax: 0241 80 22285 • isa@isa.rwth-aachen.de

Kurzbericht

zum Forschungsvorhaben:

„Eliminierung von Spurenstoffen aus Krankenhausabwässern mit Membrantechnik und weitergehenden Behandlungsverfahren – Pilotprojekt Kreiskrankenhaus Waldbröl“

AZ IV – 9 – 042 1B4 0020

für das



Aachen, im Juli 2009

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
(Institutsdirektor)

Zusammenfassung

Im Rahmen des vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) geförderten Forschungsprojektes wurde mit dem Ziel der Elimination pharmazeutischer Spurenstoffe am Kreiskrankenhaus (KKH) Waldbröl eine Anlage zur separaten Erfassung und Reinigung des Abwassers errichtet. Die Anlage besteht aus einem Membranbioreaktor. Ziel des Projektes war die Entwicklung und Implementierung einer weiteren, dem MBR nachgeschalteten, Reinigungsstufe. Im Rahmen des Projektes wurde der Einsatz verschiedener nachgeschalteter Verfahren im halbtechnischen Maßstab untersucht. Im Einzelnen kamen die Verfahren Nanofiltration, Umkehrosmose, Ozonung und Aktivkohlefiltration vergleichend zum Einsatz. Die Verfahren wurden hinsichtlich ihrer Reinigungsleistung und im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit vergleichend betrachtet. Zur Bewertung der Reinigungsleistung wurden chemisch-physikalische, substanzspezifische sowie wirkungsbezogene Analysemethoden eingesetzt. Das am besten geeignete Verfahren wurde für eine großtechnische Umsetzung am Standort Waldbröl empfohlen.

Ergebnisse

- Das unbehandelte Krankenhausabwasser stellt eine bedeutende Punktquelle für eine Reihe der untersuchten Pharmaka und Röntgenkontrastmittel dar und zeigt eine deutlich höhere Toxizität für aquatische Organismen als rein kommunales Abwasser. Darüber hinaus zeigen sich im Krankenhausabwasser deutliche gentoxische und mutagene Effekte.
- Die Behandlung des Krankenhausabwassers im MBR führte zu einer weitreichenden Elimination organischer Stoffe. Das im MBR vorgereinigte Abwasser zeigte in den meisten der angewandten standardisierten, ökotoxikologischen Testsysteme keine toxischen Effekte mehr.
- Prinzipiell lässt sich mit den Verfahren Umkehrosmose (nicht jedoch Nanofiltration), Ozonung und Aktivkohlefiltration eine weitreichende Elimination der ausgewählten Leitsubstanzen aus dem vorgereinigten Krankenhausabwasser erzielen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit erwiesen sich Nanofiltration und Umkehrosmose im vorliegenden Fall jedoch als nicht umsetzbar.
- Sowohl mittels Ozonung als auch mittels Aktivkohlefiltration konnte für alle untersuchten pharmazeutischen Leitsubstanzen – mit Ausnahme der iodierten Röntgenkontrastmittel – eine sehr gute Elimination erzielt werden (Elimination in der Regel > 90 %). Aus betrieblichen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten wurde die Ozonung im vorliegenden Fall jedoch der Aktivkohlefiltration vorgezogen. Es wird eine spezifi-

sche Ozondosis von 1,0 mg O₃/mg DOC mit einer Kontaktzeit von 15 Minuten für die Auslegung der Spurenstoffeliminationsstufe empfohlen. Nach Ozonung des mechanisch-biologisch vorgereinigten Krankenhausabwassers mit dieser Ozondosis wurden mit eingesetzten ökotoxikologischen Testsystemen keine ökotoxikologischen Effekte detektiert.

Schlussfolgerung

In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass die Ozonung von mechanisch-biologisch vorgereinigtem Krankenhausabwasser ein effektives Verfahren zur Elimination pharmazeutischer Spurenstoffe aus Krankenhausabwasser ist.

Projektpartner

Wissenschaftliche Bearbeitung und Leitung	Bearbeiter
 <p>Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA) Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Telefon: 0241 - 80 25207 Telefax: 0241 - 80 22285 E-Mail: isa@isa.rwth-aachen.de http://www.isa.rwth-aachen.de</p>	<p>Dipl.-Ing. S. Beier Dipl.-Biol. C. Cramer Prof. Dr. rer. nat. H. Fr. Schröder Dr.-Ing. W. Gebhardt L.-Chem. U. Bieling</p>
Kooperationspartner	
 <p>Kreiskrankenhaus Waldbröl GmbH Dr.-Goldenbogen-Straße 10 51545 Waldbröl Telefon: 02291 - 82 0 Telefax: 02291 - 82 16 00 E-Mail: friedhelm.courth@kkh-waldbroel.de http://www.kkh-waldbroel.de</p>	<p>Wirtschaftsleiter F. Courth Ltd. Apotheker L. Lemmer Dipl.-Ing. K. Steinel Dipl.-Ing. N. Suma</p>
 <p>Pöyry GWK GmbH Kruppstraße 82 45145 Essen Telefon: 0201 - 82054 24 Telefax: 0201 - 82054 22 E-Mail: christian.mauer@poyry.com http://www.poyry.com</p>	<p>Dipl.-Ing. C. Mauer</p>
 <p>Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen Auf dem Draap 25 40221 Düsseldorf Telefon: 0211 - 1590 2378 Telefax: 0211 - 1590 2426 E-Mail: dorothea.selke@lanuv.nrw.de http://www.lanuv.nrw.de</p>	<p>Dipl.-Ing. D. Selke</p>

Kooperationspartner (Forts.)	Bearbeiter
 <p> Aggerverband Sonnenstraße 40 51645 Gummersbach Telefon: 02261 - 36 226 Telefax: 02261 - 36 8226 E-Mail: martin.weber@aggerverband.de http://www.aggerverband.de </p>	<p> Dipl.-Wirt.-Ing. M. Weber Abw.-Meister J. Runkel </p>
 <p> AV Aggerwasser GmbH Fabrikstrasse 1 51643 Gummersbach Telefon: 02261 - 91 55 215 Telefax: 02261 - 91 55 230 E-Mail: joachim.scholz@aggerwasser.de http://www.aggerwasser.de </p>	<p> Dipl.-Ing. J. Scholz Dipl.-Ing. A. Schreiber </p>
 <p> ITT WEDECO GmbH Boschstraße 6 32051 Herford Telefon: 05221 - 930 214 Telefax: 05221 - 930 783 E-Mail: joerg.mielcke@itt.com http://www.wedeco.com </p>	<p> Dr. rer. nat. J. Mielcke Vers.-Ing. M. Broman </p>

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	VI
VERZEICHNIS DER TABELLEN.....	VI
1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNGEN.....	1
2 STAND DES WISSENS.....	4
3 VORGEHENSWEISE	5
4 VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER WEITERGEHENDEN ABWASSERREINIGUNGSSTUFEN.....	8
4.1 Eliminationsleistung.....	8
4.2 Einhaltung des Zielwertes für Oberflächengewässer	9
4.3 Reduktion ökotoxikologischer Effekte	11
4.4 Ökonomische Aspekte	12
4.5 Betriebliche Aspekte.....	12
4.5.1 Implementierung in die vorhandene Anlagentechnik	12
4.5.2 Automatisierungsgrad	13
4.5.3 Arbeitssicherheit.....	14
4.6 Zusammenfassende Bewertung.....	14
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN.....	15
6 LITERATURVERZEICHNIS	18

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1: Struktur des Pilotprojektes Waldbröl	2
Abbildung 3-1: Entwässerungssituation am Kreiskrankenhaus Waldbröl und an der kommunalen Kläranlage Brenzigen mit Probeentnahmestellen	6

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3-1: Leitsubstanzen – Nachweis-, Bestimmungsgrenzen und Molare Masse ..	7
Tabelle 4-1: Gegenüberstellung der weitergehenden Behandlungsstufen hinsichtlich ihrer Eliminationsleistung	8
Tabelle 4-2: Vergleich der weitergehenden Behandlungsstufen hinsichtlich der Einhaltung von aktuell diskutierten Zielwerten für Arzneimittel und Röntgenkontrastmitteln (RKM) in Oberflächengewässern	10
Tabelle 4-3: Vergleich der weitergehenden Behandlungsstufen hinsichtlich ökotoxischer Effekte.....	11

1 Veranlassung und Zielsetzungen

Arzneimittel sind ein elementarer Bestandteil moderner Gesundheitsversorgungssysteme und ihr Nutzen in der Therapie vielfältiger Krankheiten nicht mehr wegzudenken. Arzneimitteln und ihren Metaboliten gelangen mit den Ausscheidungen ins Abwasser und in die aquatische Umwelt. Fragen zu akuten oder chronischen Wirkungen von Arzneimittelnrückständen auf die aquatische Biozönose sind bislang nicht hinreichend beantwortet. Zusätzlich herrscht Klärungsbedarf, welche Risiken pharmazeutische Spurenstoffe für die Umwelt darstellen und welches Gefährdungspotenzial für den Menschen bereits geringe Konzentrationen im Trinkwasser beinhalten. Aus Gründen eines vorbeugenden Gesundheits- und Umweltschutzes sollten Maßnahmen zur Begrenzung des Eintrags von Arzneistoffen in die Umwelt zukünftig stärker fokussiert werden. Doch welche Maßnahmen sind zielführend, praktikabel und finanzierbar?

Neben den Ansätzen, sowohl die Medikation als auch das Einnahmeverhalten der Patienten zu verbessern, um so mit geringstem Einsatz an Arzneimittelwirkstoffen ein Optimum an therapeutischem Erfolg zu erzielen, sind darüber hinaus verbesserte Entsorgungswege für nicht verwendete oder Altmedikamente zu etablieren. Nur so werden sich zukünftig die Konzentrationen an Humanpharmaka in den als Punktquellen erkannten Kläranlagenabläufen vermindern lassen. Des Weiteren ist es aber ebenso wichtig, Strategien zur Verminderung des Austrags dieser Stoffe aus Indirekteinleiter-Punktquellen, wie z.B. Krankenhäusern und Pflegeheimen, zu entwickeln.

Das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) hat im Jahr 2006 die Realisierung eines innovativen Pilotprojektes zur separaten Erfassung und Behandlung von Krankenhausabwasser ermöglicht. Im Rahmen des Pilotprojektes Waldbröl wurden am Kreiskrankenhaus (KKH) Waldbröl ein Membranbioreaktor (MBR) zur Reinigung des Krankenhausabwassers errichtet und in einem Forschungsvorhaben verschiedene technische Verfahren zur Eliminierung von Spurenstoffen erprobt. Das Pilotprojekt Waldbröl gliedert sich in 4 Teilprojekte, deren primäre Projektziele in Abbildung 1-1 dargestellt sind.

Die vorliegende Kurzfassung umfasst die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zur wissenschaftlichen Untersuchung zur Eliminierung von pharmazeutischen Spurenstoffen aus Krankenhausabwässern mit Membrantechnik und weitergehenden Behandlungsverfahren (Teilprojekt 3)

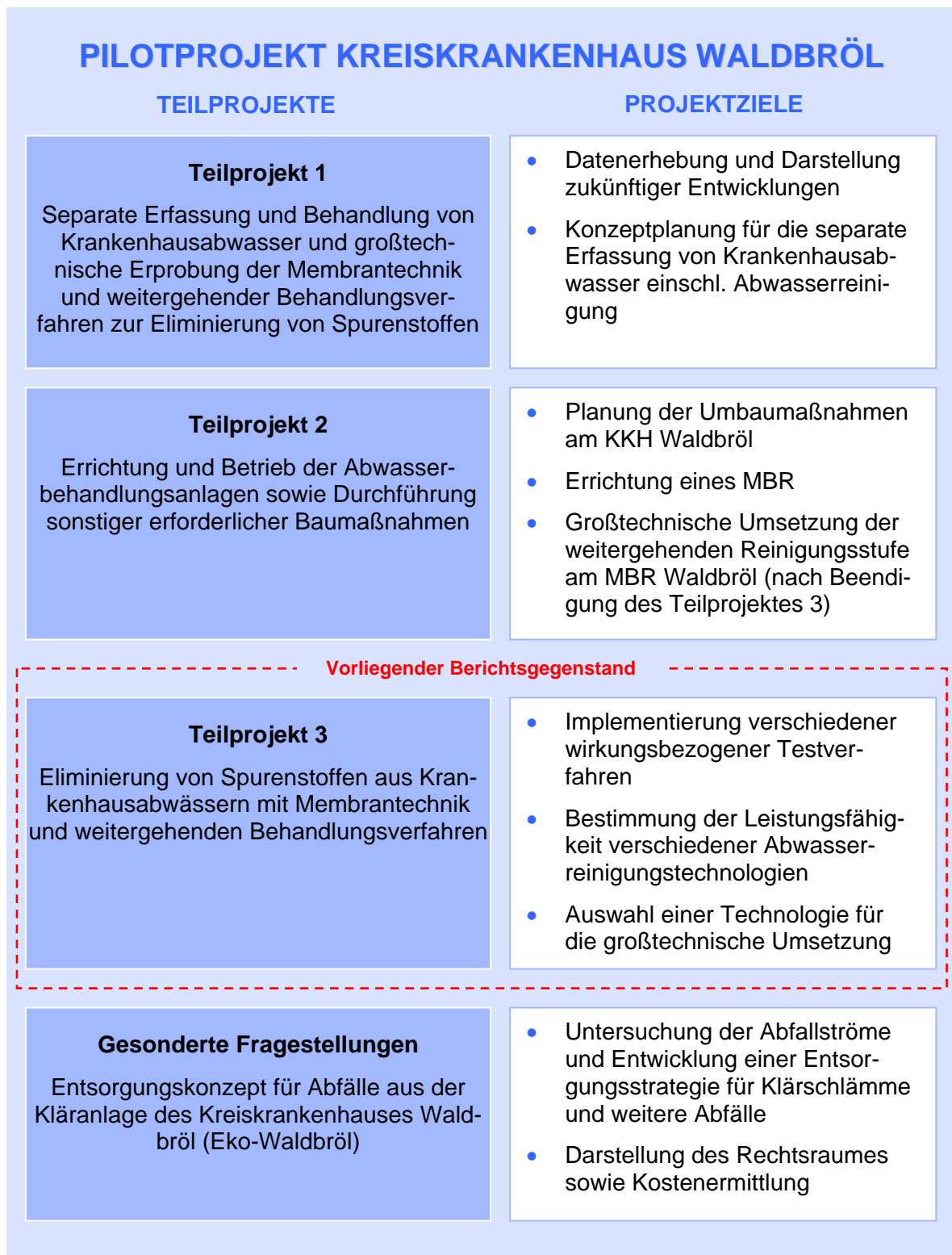


Abbildung 1-1: Struktur des Pilotprojektes Waldbröl

Im Rahmen des Vorhabens sollten im Wesentlichen die folgenden Ziele erreicht werden:

- Untersuchung, Optimierung und Bewertung von Verfahrenskombinationen vor dem Hintergrund der Eliminationsleistung bzgl. relevanter Stoffe sowie wirtschaftlicher Aspekte,
- Weiterentwicklung substanzspezifischer Analysenmethoden im Abwasserbereich und Etablierung geeigneter Methoden zur Bewertung ökotoxikologischer, endokriner und gentoxischer Wirkung von Inhaltstoffen aus Krankenhausabwässern unter Anwendung effektorientierter Verfahren (Kombination aus wirkungsbezogener und substanzspezifischer Analytik).
- Die großtechnische Umsetzung einer Anlage zur gezielten Reinigung von Krankenhausabwässern am Beispiel des KKH Waldbröl soll Modellcharakter für weitere Anwendungen besitzen.

2 Stand des Wissens

Bislang existieren nur wenige wissenschaftliche Studien, die den Beitrag der verschiedenen Eintragsquellen an der Gesamtbelastung des aquatischen Milieus mit Humanpharmaka untersuchen [HENNINGER UND KÜMMERER 2003; ALEXY ET AL. 2006; HEINZMANN ET AL. 2006; SCHUSTER ET AL. 2008]. Da der Mensch als Konsument von Arzneimitteln wesentlich zur Belastung des aquatischen Milieus beiträgt, werden insbesondere Indirekt-einleiter-Punktquellen wie Krankenhäuser und andere medizinische Einrichtungen diskutiert [SCHULTE-OEHLMANN ET AL. 2007; BEIER ET AL. 2008; KÜMMERER UND SCHUSTER 2008; PINNEKAMP UND MERKEL 2008].

Die Bedeutsamkeit von Krankenhausabwässern als Eintragsquellen für Arzneimittelrückstände in die aquatische Umwelt ist zu hinterfragen. Nach aktuellen Erkenntnissen liegt der aus Krankenhäusern eingetragene Anteil für die meisten Arzneimittelwirkstoffe im Abwasser bei maximal 20 %; bei einzelnen Wirkstoffen liegt der Anteil sogar nur im einstelligen Prozentbereich [FELDMANN ET AL. 2008; HEBERER UND FELDMANN 2005; ALDER ET AL. 2006]. Es ist davon auszugehen, dass die im Abwasser vorkommenden Arzneimittelwirkstoffe zum größten Teil aus Privathaushalten stammen [BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2005; SCHULTE-OEHLMANN ET AL. 2007]. Demnach sind Krankenhäuser bei weitem nicht als Haupteintragsquelle für Arzneimittelwirkstoffe ins Abwasser zu werten [HEINZMANN ET AL. 2006; KÜMMERER UND HELMERS 2000; SCHUSTER ET AL. 2008].

Dennoch bedürfen Abwässer aus Krankenhäusern einer gesonderten Betrachtung, da sie eine Reihe spezieller Inhaltsstoffe, darunter auch besonders umweltrelevante Arzneimittel in höheren Konzentrationen enthalten, als sie üblicherweise im kommunalen Abwasser zu finden sind [BEIER ET AL. 2008; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2005; FELDMANN 2005]. Neben hohen Konzentrationen an Desinfektions- und Reinigungsmitteln finden sich im Krankenhausabwasser deutlich höhere Konzentrationen an Röntgenkontrastmitteln, an verschiedenen hochwirksamen Analgetika, an Zytostatika und an bestimmten Antibiotikagruppen insbesondere sogenannte Reserve-Antibiotika, die fast ausschließlich in Krankenhäusern eingesetzt werden. Antibiotika wurden von wenigen µg/l bis in den zweistelligen µg/l Bereich nachgewiesen [HARTMANN ET AL. 1998; FÄRBER UND SKUTLAREK 2001] und Berechnungen großer Kliniken haben ergeben, dass im Mittel Zytostatikakonzentrationen von 0,03 mg/l im Abwasser auftreten können [MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG 2004]. In aktuellen Untersuchungen wurden Metabolite des Analgetikums Metamizol im Ablauf eines Krankenhauses in einer etwa 10fach höheren Konzentration als im Zulauf der kommunalen Kläranlage nachgewiesen [FELDMANN ET AL., 2008]. Von besonderer Bedeutung sind dabei die höheren Konzentrationen spezifischer Antibiotika wie Clarithromycin. Untersuchungen zeigen, dass die Reinigungsleistung von Kläranlagen durch krankenhausesinduzierte Antibiotikakonzentrationen im Abwasser

signifikant beeinträchtigt werden kann (Abnahme von Dichte und Zusammensetzung der Klärschlambakterien) [KÜMMERER ET AL., 2000; ALEXY ET AL., 2004]. Insgesamt belegen diese Ergebnisse nochmals, dass Krankenhausabwässer hinsichtlich der Belastung mit Arzneimitteln anders zu bewerten sind als kommunale Abwässer.

Neben der im Vergleich zum kommunalen Abwasser etwas andersartigen stofflichen Belastung sind Krankenhausabwässer wegen ihres ökotoxikologischen Potentials insbesondere hinsichtlich gentoxischer bzw. mutagener Effekte [HARTMANN ET AL., 1998; FERK, 2009; JOLIBOIS UND GUERBET, 2006; PANOUILLÈRES UND BIOLLOT, 2007; EMMANUEL ET AL., 2005] und vor dem Hintergrund des Anstiegs bakterieller Resistenzen gegenüber Antibiotika als kritisch zu bewerten [KÜMMERER, 2004; HENNINGER UND KÜMMERER 2003; LUA, 2006; SCHWARTZ UND KOHNEN, 2007]. Eine fundierte Abschätzung der ökotoxikologischen Risiken durch das Vorkommen von Arzneimittelwirkstoffen in Gewässern ist derzeit noch nicht möglich. Insbesondere Effekte im chronischen Bereich und Effekte durch gleichzeitige Exposition gegenüber verschiedenen Arzneimittelrückständen sind weitestgehend unerforscht. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten sollten krankenhausspezifische Arzneimittelrückstände ins Abwasser im Sinne des Minimierungsgebotes so gering wie möglich gehalten werden.

3 Vorgehensweise

In Abbildung 3-1 ist die Entwässerungssituation am Standort Waldbröl dargestellt. Das Abwasser des Krankenhauses wird zunächst einem MBR zur mechanisch-biologischen Vorreinigung zugeführt. Der Ablauf des MBR wird in das öffentliche Kanalnetz geleitet und geht der kommunalen Kläranlage Brenzingen zu.

Mit dem Ziel einer weitestgehenden Elimination von Arzneimittelrückständen aus dem Krankenhausabwasser wurden im Rahmen des Forschungsprojektes verschiedene, dem MBR nachgeschaltete, weitergehende Reinigungstechniken untersucht. Im Einzelnen wurden die Verfahren Nanofiltration/ Umkehrosmose, Ozonung und Aktivkohlfiltration im halbtechnischen Maßstab auf ihre Leistungsfähigkeit hin überprüft.

Da sich schon in einem sehr frühen Projektstadium zeigte, dass die Nanofiltration/ Umkehrosmose aus wirtschaftlichen Gründen nicht umsetzbar waren, wurden diese Technologien im weiteren Projektverlauf nicht näher untersucht. Detaillierte Untersuchungen im halbtechnischen Maßstab wurden für die Ozonung und die Aktivkohlfiltration durchgeführt. Die Verfahren wurden hinsichtlich ihrer Reinigungsleistung und im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit vergleichend betrachtet. Das am besten geeignete Verfahren zur weitergehenden Reinigung des vorbehandelten Krankenhausabwassers wurde für eine großtechnische Umsetzung am Standort Waldbröl empfohlen.

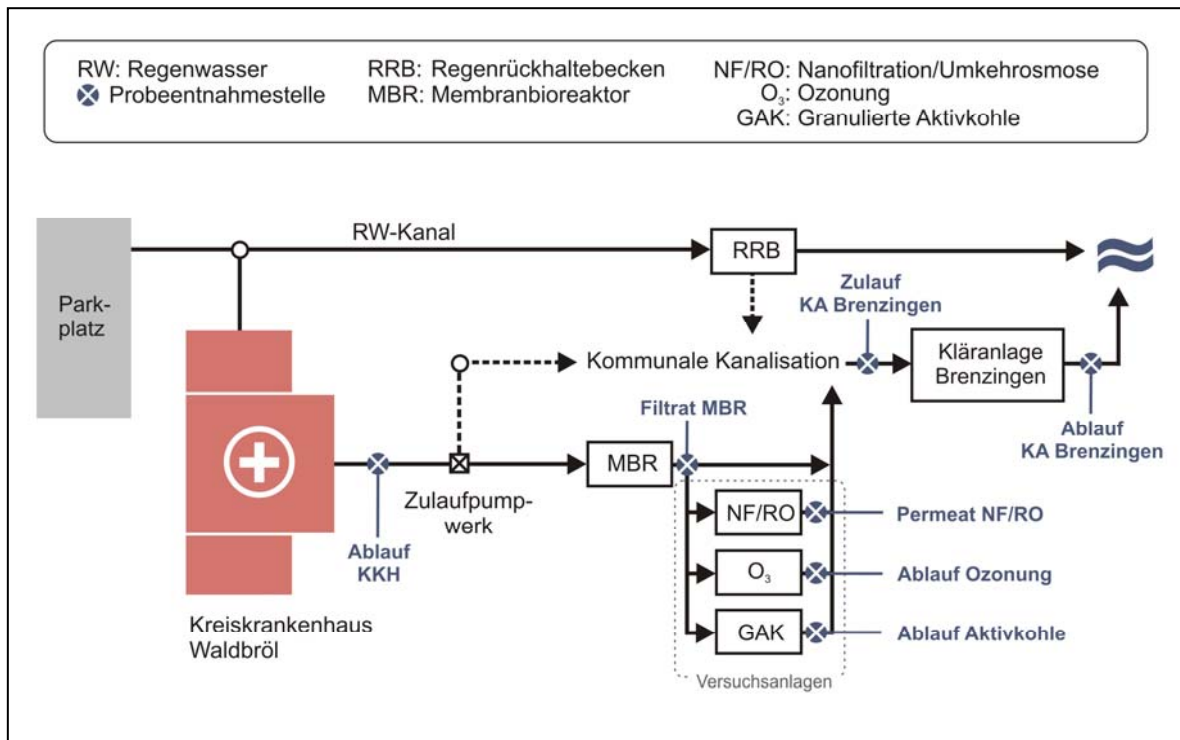


Abbildung 3-1: Entwässerungssituation am Kreiskrankenhaus Waldbröl und an der kommunalen Kläranlage Brenzingen mit Probeentnahmestellen

Zu Beginn des Vorhabens wurden insgesamt 15 repräsentative und relevante Pharmaka/Diagnostika als Leitsubstanzen ausgewählt (siehe Tabelle 3-1). Zur Bewertung der Reinigungsleistung des MBR und der pilotierten Technologien zur weitergehenden Behandlung wurden konventionelle chemisch-physikalische, substanzspezifische sowie biologische, wirkungsbezogene Analysemethoden eingesetzt. Im Rahmen des Projektes wurde damit ein sehr umfassender analytischer Ansatz gewählt. Die Weiterentwicklung substanzspezifischer Analysemethoden im Abwasserbereich und die Etablierung geeigneter Methoden zur Erfassung ökotoxikologischer, endokriner und gentoxischer Wirkungen von Krankenhausabwasser stellten weitere Ziele dieses Forschungsvorhabens dar.

Tabelle 3-1: Leitsubstanzen – Nachweis-, Bestimmungsgrenzen und Molare Masse

Stoffgruppe	Stoffbezeichnung	LOQ ¹ [ng/l]	LOD ² [ng/l]	Molare Masse [g/mol]
Analgetikum	Diclofenac	10	5	296,148
	Ibuprofen	20	10	206,280
	Tramadol	10	5	263,400
Antibiotikum	Ciprofloxacin	10	5	331,346
	Clarithromycin	30	10	747,953
	Metronidazol	10	5	171,150
	Moxifloxacin	10	5	401,431
Antiepileptikum	Carbamazepin	10	5	236,269
Antihypertonikum	Telmisartan	10	5	514,617
Lipidsenker	Bezafibrat	10	5	361,819
Röntgenkontrastmittel	Amidotrizoesäure	30	10	613,810
	Iopamidol	30	10	777,080
β-Blocker	Bisoprolol	10	5	325,440

¹) Bestimmungsgrenze (LOQ: Limit of Quantification)

²) Nachweisgrenze (LOD: Limit of Detection)

4 Vergleichende Bewertung der weitergehenden Abwasserreinigungsstufen

Die vergleichende Bewertung der weitergehenden Abwasserreinigungsstufen erfolgt anhand folgender Kriterien: Eliminationsleistung, Einhaltung von Zielwerten für Oberflächengewässer, ökotoxikologische Effekte, ökonomische Aspekte, betriebliche Aspekte.

4.1 Eliminationsleistung

In Tabelle 4-1 ist die Eliminationsleistung der Aktivkohlefiltration und der Ozonung (Ozondosis 12 mg O₃/l, entspricht einer spezifischen Ozonzehrung von 1,02 mg O₃/ mg DOC) vergleichend gegenüber gestellt.

Tabelle 4-1: Gegenüberstellung der weitergehenden Behandlungsstufen hinsichtlich ihrer Eliminationsleistung

Arzneimittel/ RKM	Ozonung (1,02 mg O ₃ / mg DOC)			Aktivkohlefiltration		
	N	Median Konzentration Zulauf [ng/l]	Mittlere Elimination [%]	N	Median Konzentration Zulauf [ng/l]	Mittlere Elimination [%]
Bisoprolol	6	511	97,9	17	1.060	99,2
Bezafibrat	3	101	95,2	6	10	96,1
Carbamazepin	6	625	98,1	17	725	98,6
Clarithromycin	6	125	76,2 ¹	17	108	79,4 ¹
Diclofenac	6	1.812	99,4	17	2.843	99,6
Ibuprofen	6	67	68,0 ¹	17	269	93,2
Telmisartan	5	223	95,5	17	295	96,6
Tramadol	6	243	95,9	17	419	97,5
Metronidazol	6	1.150	98,3	17	1.143	99,1
Moxifloxacin	6	734	96,7	17	738	94,6
Ciprofloxacin	6	2.289	98,5	17	2.900	95,9
Iopamidol	6	159.069	60,4	6 ²	152.257 ²	82,2 ²
Diatrizoat	6	493	- 7,9 ³	6 ²	1.623 ²	74,9 ²

¹ Zulaufkonzentrationen in Relation zur Bestimmungsgrenze zu gering, um höhere Elimination zu erzielen; ²Drei Wochen Laufzeit; ³Rechnerisch ergibt sich eine negative Elimination, da Konzentrationen im Zulauf teilweise geringer als im Ablauf der Ozonung

Es ist ersichtlich, dass beide Verfahren hinsichtlich der Elimination der untersuchten pharmazeutischen Leitsubstanzen vergleichbar sind. Mit Ausnahme der Röntgenkontrastmittel liegt die Elimination für alle Stoffe deutlich über 90 %. Die Röntgenkontrastmittel wurden mittels Aktivkohlefiltration in den ersten drei Wochen sehr gut eliminiert, aber nach drei Wochen kam es zu einem Durchbruch. Mittels der im Rahmen des Forschungsprojektes eingesetzten Ozondosen zwischen 7,5 mg/l und 30 mg/l konnte keine vollständige Elimination der Röntgenkontrastmittel erzielt werden. Das im Krankenhaus in hohen Mengen eingesetzte Röntgenkontrastmittel Iopamidol wurde bei einer spezifischen Ozondosis von 1,02 mg O₃/ mg DOC im Mittel zu 60 % eliminiert. Das Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure wurde bei der genannten Ozondosis quasi nicht eliminiert; erst ab einer spezifischen Ozondosis von 2,96 mg O₃/mg DOC zeigte sich tendenziell eine Abnahme der Konzentration dieser Verbindung.

4.2 Einhaltung des Zielwertes für Oberflächengewässer

Eine zeitgemäße Bewertung von Abwasserreinigungstechnologien muss vor dem Hintergrund bestehender und aktuell in Diskussion befindlicher gesetzlicher Rahmenbedingungen erfolgen. Bislang fehlt es an ausreichenden wissenschaftlichen Grundlagen zur Bewertung von Risiken einer langfristigen Exposition gegenüber Spuren von Arzneimitteln im Wasserkreislauf. In Folge dessen gibt es in Deutschland derzeit keine verbindlichen Grenzwerte für pharmazeutische Wirkstoffe in Oberflächengewässern und im Trinkwasser. Bislang existieren lediglich Zielwerte. Die Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet [IAWR 2008] hat als Zielwert für Arzneimittelrückstände pro Einzelstoff einen Wert von 100 ng/l und für Röntgenkontrastmittel von 1.000 ng/l vorgeschlagen. Es ist zu berücksichtigen, dass sich diese vorgeschlagenen Zielwerte auf Oberflächengewässer beziehen, die der Trinkwasserversorgung dienen. Auf gereinigte Abwässer sind diese Qualitätskriterien nicht anzuwenden. Im vorliegenden Fall wurden die genannten Zielwerte dennoch als Vergleichskriterium für die Leistungsfähigkeit der Ozonung und der Aktivkohlefiltration herangezogen.

In Tabelle 4-2 sind die mittleren Ablaufkonzentrationen der beiden Pilotanlagen zur weitergehenden Behandlung des vorgereinigten Krankenhausabwassers und der Anteil der gemessenen Überschreitungen der o. g. Zielwerte gegenübergestellt. In den Pilotversuchen konnte der für Oberflächengewässer vorgeschlagene Zielwert von 100 ng/l mittels Ozonung und Aktivkohlefiltration in den meisten Fällen eingehalten werden. Eine Ausnahme stellt die Antibiotikagruppe der Floxacine dar: mittels der für den Pilotversuch gewählten Auslegung der Aktivkohlefilter, der Kohle und der Kontaktzeit konnten die Konzentrationen für dies Stoffgruppe vielfach nicht unter 100 ng/l reduziert werden.

Für das Röntgenkontrastmittel Iopamidol konnte der vorgeschlagene Zielwert in Oberflächengewässern mit keinem der beiden untersuchten Verfahren sicher eingehalten werden. Der vergleichsweise geringe Anteil der Überschreitungen des Zielwertes bei Amidotrizoesäure ist auf die deutlich geringeren Zulaufkonzentrationen zurückzuführen.

Tabelle 4-2: Vergleich der weitergehenden Behandlungsstufen hinsichtlich der Einhaltung von aktuell diskutierten Zielwerten für Arzneimittel und Röntgenkontrastmitteln (RKM) in Oberflächengewässern

Arzneimittel/ RKM	Ozonung 12,5 mg/l für max. 15 Minuten			Aktivkohlefiltration bei einer Laufzeit von 3 Monaten		
	N	Median [ng/l]	Überschrei- tung Ziel- wert ¹ [%]	N	Median [ng/l]	Überschrei- tung Ziel- wert ¹ [%]
Bisoprolol	6	10*	0	17	10*	0
Bezafibrat	3	10*	0	6	10*	0
Carbamazepin	6	10*	0	17	10*	0
Clarithromycin	6	30*	0	17	30*	0
Diclofenac	6	10*	0	17	10*	0
Ibuprofen	6	20*	0	17	20*	0
Telmisartan	5	10*	0	17	10*	0
Tramadol	6	10*	0	17	10*	0
Metronidazol	6	20*	0	17	10*	0
Moxifloxacin	6	26	0	17	40	5,9
Ciprofloxacin	6	37	0	17	114	52,9
Iopamidol	6	48.005	100	17	82.419	100
Amidotrizoe- säure ²	6	541	33,3	17	617	22,2

* Bestimmungsgrenze, ¹⁾ Zielwert für Arzneimittel: 100 ng/l; Zielwert für RKM: 1000 ng/l

²⁾ Zulaufkonzentrationen meist unterhalb des Zielwertes

4.3 Reduktion ökotoxikologischer Effekte

In Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse der wirkungsbezogenen Untersuchungen für die Ozonung (spezifische Ozondosis 1,02 mg O₃/mg DOC) und die Aktivkohlefiltration zusammenfassend gegenüber gestellt.

Tabelle 4-3: Vergleich der weitergehenden Behandlungsstufen hinsichtlich ökotoxischer Effekte

Ozonung (1,02 mg O ₃ /mg DOC)	Aktivkohlefiltration
Toxizitätstests mit Wasserorganismen (Leuchtbakterien, <i>Pseudomonas putida</i>, Algen, Wasserlinsen, Daphnien)	
<p>Der Zulauf zur Ozonung zeigte mit Ausnahme der bakteriellen Wachstumshemmtests (<i>Leuchtbakterien, Ps. putida</i>) keine toxischen Effekte.</p> <p>Im Ablauf der Ozonung zeigten sich in keinem der eingesetzten Testsysteme toxische Effekte.</p>	<p>Der Zulauf zur Aktivkohlefiltration zeigte mit Ausnahme der bakteriellen Wachstumshemmtests (<i>Leuchtbakterien, Ps. putida</i>) keine toxischen Effekte.</p> <p>Im Ablauf der Aktivkohlefiltration zeigten sich in keinem der eingesetzten Testsysteme toxische Effekte.</p>
Gentoxizität (Ames-Test, umu-Test)	
<p>Im Zulauf zur Ozonung wurden regelmäßig gentoxische Effekte detektiert.</p> <p>Der Ablauf der Ozonung zeigte keine gentoxischen und mutagenen Effekte mehr.</p>	<p>Im Zulauf zur Aktivkohlefiltration wurden regelmäßig gentoxische Effekte detektiert.</p> <p>Die Aktivkohlefiltration führte zu einer Verringerung der gentoxischen und mutagenen Effekte.</p> <p>Im Ablauf der Aktivkohlefilter fanden sich vereinzelt noch positive Befunde.</p>
Estrogene Aktivität (LYES-Assay)	
<p>Im Zulauf zur Ozonung lag die estrogene Aktivität vielfach im Bereich der Hintergrundbelastung. In aufkonzentrierten Proben führte die Ozonung zu einer Verringerung der estrogenen Aktivität.</p>	<p>Die Untersuchungen auf estrogene Aktivität im Zu- und Ablauf der Aktivkohlefilter erfolgten nur an einem kleinen Probenkollektiv. Sowohl im Zulauf als auch im Ablauf lag die estrogene Aktivität auch nach 100-facher Aufkonzentrierung der Proben nicht über der in der Umwelt zu findenden, üblichen Hintergrundbelastung.</p>

Die Ergebnisse der im Rahmen des Forschungsprojektes eingesetzten Biotestbatterie geben keine Hinweise auf die Entstehung toxischer Nebenprodukte bei einer Ozonung des vorgereinigten Abwassers mit 1,02 mg O₃/mg DOC. Wie sich der Einsatz höherer Ozondosen auf die Toxizität des behandelten Wassers auswirkt, ist weiter klärungsbedürftig.

Da durch die Aktivkohlefiltration im vorliegenden Fall die mutagene Wirkung des Abwassers zwar verringert aber nicht vollständig eliminiert werden konnte, wäre unter dem Gesichtspunkt der Verminderung der mutagenen Wirkungen des Abwassers eine Ozonung einer Behandlung mittels Aktivkohlefiltration vorzuziehen.

4.4 Ökonomische Aspekte

Im Ergebnis zeigt sich unter den für das Kreiskrankenhaus Waldbröl spezifischen Randbedingungen hinsichtlich des Anlagendurchsatzes, des Ozon- und Aktivkohleeinsatzes sowie der Kosten für Strom und Aktivkohle, dass sich die Ozonbehandlung mit spezifischen Kosten in Höhe von 0,71 €/m³ ca. 25% günstiger darstellt als die Aktivkohlefiltration mit spezifischen Kosten in Höhe von 0,95 €/m³. Dieses Verhältnis kann sich jedoch bei steigenden Strompreisen und günstigeren Lieferkonditionen zu Gunsten der Aktivkohlefiltration entwickeln, sodass die Ergebnisse nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen auf andere Krankenhäuser übertragen werden können.

Auch verschiedene Literaturangaben zum Vergleich von Ozonung und Aktivkohlefiltration zur Aufbereitung des Ablaufs kommunaler Kläranlagen bestätigen den Kostenvorteil für die Ozonung gegenüber der Aktivkohleadsorption [PINNEKAMP UND MERKEL 2008; FAHLENKAMP ET AL. 2008], wobei die spezifischen Abwasserbehandlungskosten für die dort betrachteten Kläranlagen mit Ausbaugrößen zwischen 50.000 und 1.000.000 E aufgrund der Skaleneffekte deutlich geringer angegeben werden.

Auffallend ist der Unterschied in der Aufteilung der spezifischen Kosten auf einzelne Kostenarten. Bei der Ozonung überwiegen die Kapitalkosten, diese machen einen Anteil von ca. 68% an den Gesamtkosten aus, während nur ca. 32 % auf Betriebskosten entfallen. Bei der Aktivkohlefiltration entfallen lediglich 8 % auf die Kapitalkosten, während 92 % Betriebskosten entstehen. Maßgebend sind dabei die Kosten für den regelmäßigen Austausch der beladenen Aktivkohle.

4.5 Betriebliche Aspekte

4.5.1 Implementierung in die vorhandene Anlagentechnik

Sowohl Ozonung als auch Aktivkohlefiltration benötigen eine weitgehende Vorbehandlung, da sie nicht selektiv arbeiten. Im Fall des Pilotprojekts Waldbröl wird die weitgehende Vorreinigung durch einen MBR erreicht. Dieser liefert für beide Verfahren optimale Voraussetzungen, sodass die Implementierung in den Prozess in beiden Fällen in etwa denselben Aufwand verursacht. Beide Anlagen können entweder direkt mittels der Permeatpumpen oder aus dem Permeatvorlagebehälter beschickt werden. Die Auswirkungen eines intermittierenden Betriebes bei einer direkten Beschickung über die Permeatpumpen

müssen allerdings im großtechnischen Betrieb noch überprüft werden. Hier könnten häufige Schaltvorgänge insbesondere für den Ozonerzeuger problematisch sein. Auch der Platzbedarf der beiden Verfahren ist ähnlich.

4.5.2 Automatisierungsgrad

Die geplante Ozonanlage inklusive der Beschickungspumpen wird weitestgehend automatisiert und kann mit Ausnahme von Inspektions-, Wartungs- und Revisionsarbeiten vollständig über das installierte Fernwirkssystem durch den Anlagenbetreiber gesteuert werden. Bei Störungen bspw. des Ozongenerators oder der PSA-Anlage zur Sauerstoff-erzeugung wird eine Störmeldung abgesetzt, sodass das Betriebspersonal ständig über den aktuellen Anlagenzustand informiert ist. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass bei Betrieb von Ozongenerator und Injektorsystem bei der vorgegebenen Ozondosis die Arzneimittelrückstände im Wasser weitgehend oxidiert werden. Dies stellt einen Vorteil gegenüber der Aktivkohlefiltration dar.

Der Betrieb der nachgeschalteten Aktivkohlefiltration ist nicht in diesem Maße automatisiert. Lediglich die Beschickung der Filter durch die Permeatpumpen wird analog zur Ozonanlage über das Fernwirkssystem erfasst. Die fortschreitende Beladung und der damit verbundene Verlust der Eliminationsleistung werden hingegen nicht messtechnisch erfasst. Mit fortschreitender Standzeit der Filter kann daher ohne weitere manuelle Laboranalytik nicht mit ausreichender Sicherheit davon ausgegangen werden, dass noch eine ausreichende Elimination erzielt wird. Soll auf aufwändige Laboranalytik verzichtet werden, müssen sehr kurze Standzeitintervalle vorgegeben werden, bei denen gemäß den Ergebnissen der vorlaufenden Versuche die angestrebten Ablaufwerte für Arzneimittelrückstände eingehalten werden. Zudem ist für das Austauschen der Aktivkohlefilter händisches Eingreifen erforderlich. Sobald der erste von jeweils zwei in Reihe geschalteten Filtern beladen ist, wird dieser von der Beschickungsleitung abgeklemmt und der Entleerungshahn wird geöffnet, damit das Restwasser auslaufen kann. Anschließend müssen die Rohr- bzw. Schlauchverbindungen umgeklemmt werden, sodass der zweite Filter an die erste Stelle und ein bereitstehender unbeladener Filter an die zweite Stelle rücken kann. Dieses zyklische Versetzen der Filter stellt die optimale Ausnutzung der Beladungskapazität sicher. Bei insgesamt 6 Filtern (3 x 2) und einer Standzeit von 4 Monaten müssen rechnerisch pro Monat 1,5 Filter getauscht werden. Dies ist auch mit regelmäßigem Lieferverkehr verbunden.

4.5.3 Arbeitssicherheit

Im Umgang mit Ozon und Reinsauerstoff sind Sicherheitsvorschriften einzuhalten. So dürfen die Räume, in denen die Ozonanlage untergebracht ist nur durch unterwiesenes Personal betreten werden und sind zudem mit Gaswarngeräten und technischer Entlüftung auszurüsten. Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an einer solchen Anlage dürfen nur durch sachkundige Personen erbracht werden. Ozonwarngeräte und Restozonvernichter sind regelmäßig auf ihre Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Der Umgang mit Reinsauerstoff stellt besondere Anforderungen an Brand- und Explosionsschutz, da Sauerstoff Verbrennungsgeschwindigkeiten und –temperaturen steigert und Zündtemperaturen verringert. Unter sicherheitstechnischen Aspekten stellt sich die Aktivkohlefiltration somit wesentlich unkomplizierter dar, da sie geringere Anforderungen an die technische Ausrüstung als auch an die Qualifikation des eingesetzten Personals stellt.

4.6 Zusammenfassende Bewertung

Hinsichtlich der Kriterien Eliminationsleistung und Einhaltung von Zielwerten erwiesen sich die beiden untersuchten Behandlungsverfahren Ozonung und Aktivkohlefiltration als weitestgehend vergleichbar. Basierend auf den Ergebnissen der ökotoxikologischen Untersuchungen ist im vorliegenden Fall unter dem Gesichtspunkt der Verminderung mutagener Wirkungen des Abwassers eine Behandlung mittels Ozon einer Behandlung mittels Aktivkohlefiltration vorzuziehen. Die in Kapiteln 3.4 dargestellten ökonomischen Aspekte sprechen ebenfalls für eine Ozonung. Bei den betrieblichen Kriterien weist die Aktivkohlefiltration gegenüber der Ozonung den Vorteil geringerer Anforderungen im Bereich der Arbeitssicherheit auf. Demgegenüber ermöglicht eine Ozonung einen höheren Grad an Automatisierung. Zusammenfassend zeigte sich im Rahmen des Forschungsvorhabens, dass am Kreiskrankenhaus Waldbröl eine Vorbehandlung mittels MBR kombiniert mit einer nachgeschalteten Ozonung die am besten geeignete Verfahrenskombination ist.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Rahmen der aktuellen Diskussion zu Handlungsmöglichkeiten hinsichtlich der Verringerung des Eintrags von Arzneimittelwirkstoffen in die aquatische Umwelt kommt der Vermeidung von Einträgen über Abwässer aus Punktquellen wie z.B. Krankenhäusern eine besondere Bedeutung zu. In welchem Umfang Maßnahmen an Krankenhäusern effizient und zielführend sind, ist derzeit umstritten. Nach aktuellem Wissenstand sind Krankenhäuser nicht als Haupteintragsquelle von Arzneimittelwirkstoffen ins Abwasser zu werten. Im Einzelfall kann es jedoch durchaus sinnvoll sein, Arzneimittelrückstände direkt aus dem Krankenhausabwasser zu entfernen.

Am Kreiskrankenhaus Waldbröl, einem mittelgroßen Krankenhaus mit etwa 340 Betten im Oberbergischen Kreis, wurde im Rahmen eines vom MUNLV geförderten Forschungsprojektes die europaweit erste, großtechnische Anlage zur separaten Erfassung und mechanisch-biologischen Vorreinigung von Krankenhausabwasser errichtet. Schwerpunkt der vorliegenden Studie war die Untersuchung verschiedener Verfahrenstechniken zur weitergehenden Elimination von pharmazeutischen Spurenstoffen aus dem vorbehandelten Krankenhausabwasser. Im halbertechnischen Maßstab wurden die Verfahren Nanofiltration, Umkehrosmose, Aktivkohlefiltration und Ozonung sowohl hinsichtlich ihrer Eliminationsleistung als auch hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit vergleichend betrachtet.

Im Rahmen des Vorhabens zeigte sich, dass sowohl die Konzentrationen mehrerer untersuchter Pharmaka als auch die untersuchten ökotoxikologischen Effekte durch die mechanisch-biologische Vorreinigung des Krankenhausabwassers in einem Membranbioreaktor (MBR) deutlich reduziert wurden. Durch die alleinige Behandlung im MBR wurden jedoch nicht alle Pharmaka weitestgehend eliminiert. Darüber hinaus wurden im Ablauf des MBR noch ökotoxikologische und mutagene Effekte detektiert. Die Untersuchungen zu den weitergehenden Behandlungsverfahren im halbertechnischen Maßstab zeigten, dass mit Ausnahme der Nanofiltration, alle Verfahren für eine weitgehende Elimination von pharmazeutischen Spurenstoffen grundsätzlich geeignet sind. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und unter Berücksichtigung des betrieblichen Aufwandes ist jedoch im vorliegenden Fall die Vorbehandlung im MBR kombiniert mit einer nachgeschalteten Ozonung (spezifische Ozondosis 1,02 mg Ozon/mg DOC; Kontaktzeit 15 Minuten) als Vorzugsverfahren für eine großtechnische Umsetzung zu empfehlen. Die Elimination von Röntgenkontrastmitteln ist mit allen untersuchten Verfahren nur mit einem aus wirtschaftlicher Sicht unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich. Der Eintrag von Röntgenkontrastmitteln ins Abwasser und in die Umwelt sollte daher in erster Linie durch ergänzende Maßnahmen vorzugsweise beim Umgang mit Röntgenkontrastmitteln (Verhaltensänderungen bei Gebrauch und Entsorgung) minimiert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden verschiedene Methoden zur Bewertung der ökotoxikologischen, endokrinen und genotoxischen Wirkungen des behandelten und unbehandelten Krankenhausabwassers eingesetzt. Es zeigte sich, dass nach mechanisch-biologischer Vorreinigung im MBR, viele der eingesetzten standardisierten, ökotoxikologischen Testsysteme nicht sensibel genug waren, um Restbelastungen an pharmazeutischen Spurenstoffen zu detektieren. Als besonders empfindlich erwiesen sich im vorliegenden Fall bakterielle Testsysteme, wie der Wachstumshemmtest mit Leuchtbakterien sowie der umu-Test und Ames-Fluktuationstest zur Erfassung genotoxischer Wirkungen. Des Weiteren konnten im Rahmen des Forschungsprojektes die Grundlagen für die Etablierung eines Verfahrens zur Kopplung von substanzspezifischer und wirkungsbezogener Analytik von estrogenwirksamen Substanzen im Abwasser geschaffen werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte nachgewiesen werden, dass im Hinblick auf das Gesamteinzugsgebiet insbesondere die Stoffgruppe der Antibiotika zu einem nennenswerten Anteil (> 30%) aus der Punktquelle Kreiskrankenhaus stammt. Bei weitgehender Elimination (> 99%) dieser Stoffe, die in der kommunalen Kläranlage nur schlecht bis mäßig eliminiert werden, aus dem Krankenhausabwasser, kann die Belastung der aquatischen Umwelt mit Antibiotika somit um ca. 30% reduziert werden. Auch die Röntgenkontrastmittel stammen in ähnlicher Höhe aus dem Kreiskrankenhaus. Diese werden jedoch nur in geringem Maße durch die Abwasserbehandlungsanlage zurückgehalten. Für andere Arzneimittel spielt die Punktquelle Kreiskrankenhaus nur eine untergeordnete Rolle. Bei einer Übertragung der Ergebnisse auf andere Einzugsgebiete ist das spezifische Verhältnis von Einwohnerwerten zu Planbetten im Einzugsgebiet der örtlichen kommunalen Kläranlage zu berücksichtigen. Dieses liegt hier bei ca. 30 E/Bett.

Im Fall des KKH Waldbröl stellte sich die Kombination von MBR und Ozonung als wirtschaftlichste Option der Abwasserbehandlung heraus. Die spezifischen Investitionskosten für die Gesamtanlage lagen bei ca. 4.800 €/Bett. Die Kosten einer separaten Behandlung von Krankenhausabwasser mit der genannten Verfahrenskombination von MBR und Ozonung betragen ca. 5,30 €/m³.

Über die Projektlaufzeit konnten mehr als zwei Jahre Betriebserfahrungen mit dem großtechnischen MBR gesammelt werden. Es wurden kaum auffällige Unterschiede zwischen dem MBR am KKH Waldbröl und anderen vom Aggerverband betriebenen, kommunalen MBR festgestellt. Nennenswert sind - vermutlich aus der Wäscherei resultierende - Probleme wie z.B. Schaumbildung bei geringen TS-Gehalten sowie Probleme im Zulaufpumpwerk und der mechanischen Vorreinigung durch Faserstoffe. Darüber hinaus wurden auch im Winter regelmäßig Abwassertemperaturen über 20°C registriert. Als positiv hat sich die Übertragung des Betriebs der Abwasserbehandlungsanlage an den örtlichen Wasserver-

band herausgestellt. So kam ausschließlich qualifiziertes Personal mit ausgeprägtem abwassertechnischem Fachwissen zum Einsatz. Beim Betrieb der Anlage durch das krankenhaus-eigene Personal wäre eine hohe Vorlaufzeit zur Aneignung entsprechender Kenntnisse erforderlich gewesen. Dieses Vorgehen wurde durch eine Fernwirksoftware begünstigt, die dem zuständigen Personal einen Anlagenzugriff von jedem Ort aus bietet. Für die Zukunft sollte geprüft werden, inwieweit Anlagen zur Behandlung von Krankenhausabwasser direkt durch Wasserverbände und Kommunen an Krankenhäusern unter Umlage der Kosten errichtet und betrieben werden können.

Zur Überwachung des Betriebs des MBR wurden im Projektzeitraum die Standardparameter (CSB, N, P, pH, TS, DOC, SAK₂₅₄) durch Stichprobennahme in wöchentlichem Rhythmus überwacht. Dieses Vorgehen hat sich im Hinblick auf die betriebliche Überwachung der ablaufenden Prozesse als ausreichend erwiesen. Darüber hinaus sollte das Schlammalter möglichst hoch sein, da sich durch ein höheres Schlammalter eine bessere Adaptionsfähigkeit der Mikroorganismen an die spezifischen Abwasserinhaltsstoffe ergibt.

Basierend auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes zum Einsatz einer Ozonung und einer nachgeschalteten Aktivkohlefiltration zur weitestgehenden Elimination pharmazeutischer Spurenstoffe scheinen im Hinblick auf eine behördliche Überwachung die standardmäßig im Abwasserbereich untersuchten Summenparameter nicht ausreichend. Aufgrund der hohen Konzentrationen an Antibiotika sowohl im unbehandelten Krankenhausabwasser als auch nach Reinigung im MBR und ihrer hohen Umweltrelevanz bietet sich im vorliegenden Fall eine Analyse einzelner Vertreter dieser Stoffgruppe als Überwachungsparameter mit Indikatorfunktion an. Inwieweit substanzspezifische Untersuchungen auf bestimmte Antibiotika/ Antibiotikagruppen von praktischer Relevanz für die Überwachung krankenhaus-eigener Kläranlagen sein können, sollte im Rahmen eines wissenschaftlichen Begleitprogramms zur großtechnischen Umsetzung der Ozonung verifiziert werden. Im Bereich der wirkungsbezogenen Untersuchungsmethoden kristallisierten sich im vorliegenden Fall bakterielle Testsysteme, wie der Wachstumshemmtest mit Leuchtbakterien sowie der umu-Test und Ames-Fluktuationstest, als besonders empfindlich heraus. Auch deren Praktikabilität für die behördliche Überwachungspraxis sollte an großtechnischen Anlagen überprüft werden.

6 Literaturverzeichnis

- ALDER, A. C., BRUCHET, A., CARBALLA, M., CLARA, M., JOSS, A., LÖFFLER, D., MCARDELL, C. S., MIKSCH, K., OMIL, F., TUHKANEN, T., TERNES, T. (2006):** Consumption and Occurrence. In Ternes, T. und Joss, A (Hrsg.): Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrances – The challenge of micropollutants in urban water management. IWA Publishing: 15-54.
- ALEXY, R., KÜMPEL, T., KÜMMERER K. (2004):** Assessment of degradation of 18 antibiotics in the closed bottle test. *Chemosphere*, 57: 505-512.
- ALEXY, R., SOMMER, A., LANGE, F. T., KÜMMERER, K. (2006):** Local use of antibiotics and their input and fate in a small sewage treatment plant—Significance of balancing and analysis on a local scale vs. nationwide scale. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 34: 587–592.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2005):** Arzneistoffe in der Umwelt. (abrufbar unter: http://www.bayern.de/lfu/umwberat/data/chem/stoff/arznei_2005.pdf) 30.01.2007.
- BEIER, S., PINNEKAMP, J., SCHRÖDER, H.FR., GEBHARDT, W., CRAMER, C., BIELING, U., MAUER, C., COURTH, F., WEBER, M., MIELCKE, J., SELKE, D. (2008):** Untersuchungen zur separaten Erfassung und Behandlung von Krankenhausabwasser mit Membrantechnik und weitergehenden Verfahren Wasser, Abwasser, GWA, 211, 29/1-29/17 (2008), Aachen.
- EMMANUEL, E., PERRODIN, Y., KECK, G., BLANCHARD, JM., VERMANDE, P. (2005):** Ecotoxicological risk assessment of hospital wastewater. A proposed framework for raw effluents discharging into urban sewer network. *J Hazard Mater* 117: 1-11.
- FÄRBER, H. A., SKUTLAREK, D. (2001):** Occurrence of Antibiotics in Hospital Waste water, Municipal Wastewater and Surface Waters. Conference Transcript; 2nd International Meeting on Pharmaceuticals and Endocrine Disrupting Chemicals in Water, Oct. 2001, Minneapolis, Minnesota, USA.
- FELDMANN, D. (2005):** Modellberechnungen zum Verhalten und Verbleib von Arzneimittlrückständen im Krankenhausabwasser und Beurteilungsmöglichkeiten ihres ökotoxikologischen Gefährdungspotentials, Fakultät III – Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin, Dissertation, Berlin 2005.
- FELDMANN, D., ZUELHLKE, S., HEBERER, T. (2008):** Occurrence, fate and assessment of polar metamizole (dipyrone) residues in hospital and municipal wastewater. *Chemosphere* 71: 1754-1764.

- FERK, F., MISIK, M., GRUMMT, T., MAJER, B., FUERHACKER, M., BUCHMANN, C., VITAL, M., UHL, M., LENZ, K., GRILLITSCH, B., PARZEFALL, W., NERSESYAN, A., KNASMÜLLER, S. (2009):** Genotoxic effects of wastewater from oncological ward. *Mutat Res* 672: 69-75.
- HARTMANN, A., ALDER, A. C., KOLLER, T., WIDMER, R. (1998):** Identification of fluorochinolone antibiotics as the main source of umuC genotoxicity in native hospital wastewater. *Environ. Toxicol. Chem.* 17: 383-393.
- HEBERER, T., FELDMANN, D. (2005):** Contribution of effluents from hospitals and private households to the total loads of diclofenac and carbamazepine in municipal sewage effluents – modeling versus measurements. *J Hazard Mater* 122 (3): 211-218.
- HEINZMANN, B., SCHWARZ, R.-J., PINEAU, C. (2006):** Getrennte Erfassung von jodorganischen Röntgenkontrastmitteln in Berliner Krankenhäusern und deren Transformation. Paper presented at the Workshop: Getrennte Erfassung von jodorganischen Röntgenkontrastmitteln in Berliner Krankenhäusern und deren Transformation, Berlin, March.
- HENNINGER, A., KÜMMERER, K. (2003):** Promoting resistance by the emission of antibiotics from hospitals and households into effluent. *Clinical Microbiology and Infection*, 9: 1203–1214.
- JOLIBOIS, B., GUEBERT, M. (2006):** Hospital Wastewater Genotoxicity. *Ann Occup Hyg* 50 (2): 189-196.
- KÜMMERER, K., HELMERS, E. (2000):** Hospital effluents as a source of gadolinium in the aquatic environment. *Environ Sci Technol* 34: 573-577.
- KÜMMERER, K., AL-AHMAD, A., MERSCH-SUNDERMANN, V. (2000):** Biodegradability of some antibiotics, elimination of the genotoxicity and affection of wastewater bacteria in simple test. *Chemosphere*, 40: 701-710.
- KÜMMERER, K. (2004):** Resistance in the Environment. *J Antimicrobial Chemother.* 54: 311-320.
- KÜMMERER, K., SCHUSTER, A. (2008):** Substance flows associated with medical care - significance of different sources. In Kümmerer, K. (Hrsg.): *Pharmaceuticals in the Environment – Sources, Fate, Effects and Risks*. Springer, 2008: 43-59.
- LANDESUMWELTAMT NRW (LUA) (HRSG.) (2006):** Antibiotika, Resistenzen und Bakterien in Kläranlagen. LUA-Materialien, Essen, 2006.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG (2004):** Stellungnahme des Ministeriums zur parlamentarischen Anfrage „Schadstoffbelastung und gesundheitsgefährdendes Potenzial von Klinikabwässern.“ Drucksache 13/3631, 07.10.2004.

- PANOULLERES, M., BOILLOT, C., PERRODIN, Y. (2007):** Study of the combined effects of peracetic acid-based disinfectant and surfactant contained in hospital effluents on *Daphnia magna*. *Ecotoxicology*, 16: 327-340.
- PINNEKAMP, J., MERKEL, W. (HRSG.) (2008):** Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben "Senkung des Anteils organischer Spurenstoffe in der Ruhr durch zusätzliche Behandlungsstufen auf kommunalen Kläranlagen – Güte- und Kostenbetrachtung", Aachen/Mühlheim (abrufbar unter: <http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/wasser/abwasser/ruhrstudie/index.php>).
- SCHULTE-OEHLAMANN, U., OEHLMANN, J., PÜTTMANN, W. (2007):** Humanpharmakawirkstoffe in der Umwelt – Einträge, Vorkommen und der Versuch einer Bestandsaufnahme. *Umweltwiss Schadst Forsch* 19 (3): 168-179.
- SCHUSTER, A., HÄDRICH, C., KÜMMERER, K. (2008):** Flows of Active Pharmaceutical Ingredients Originating from Health Care Practices on a Local, Regional, and Nationwide Level in Germany – Is Hospital Effluent Treatment an Effective Approach for Risk Reduction? *Water Air Soil Pollut: Focus* (2008) 8: 457–471.
- SCHWARZ, T., KOHNEN, W. (2007):** Antibiotikaresistenzen in Abwasser. Nachweis und Vermeidung der Verbreitung. In: *GWF Wasser - Abwasser*, Jg. 148. Jahrgang, H. 12: 886–891.