



INSTITUT FÜR  
SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT



PRÜF- UND ENTWICKLUNGSINSTITUT FÜR  
ABWASSERTECHNIK AN DER RWTH AACHEN E.V.



## **Abschlussbericht**

zum Forschungsvorhaben

### **Einbau und Betrieb großtechnischer Membrananlagen auf Fahrgastbinnenschiffen**

**Demonstrationsprojekt an Bord der RheinEnergie**

**AZ IV - 9 - 042 545 0010**

für das



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

Aachen, im Dezember 2006

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

  
Dr.-Ing. E. Dorgeloh  
(PIA)

## Projektpartner

Partner		Bearbeiter
	<p>Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Tel.: 02 41 / 8 02 52 07 Fax: 02 41 / 8 02 22 85 Email: <a href="mailto:isa@isa.rwth-aachen.de">isa@isa.rwth-aachen.de</a> <a href="http://www.isa.rwth-aachen.de">www.isa.rwth-aachen.de</a></p>	<p>Dr.-Ing. Regina Haußmann</p>
	<p>Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen e.V. Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Tel.: 02 41 / 7 50 82 - 0 Fax: 02 41 / 7 50 82 - 29 Email: <a href="mailto:info@pia.rwth-aachen.de">info@pia.rwth-aachen.de</a> <a href="http://www.pia.rwth-aachen.de">www.pia.rwth-aachen.de</a></p>	<p>Dr.-Ing. Elmar Dorgeloh Dipl.-Ing. Arndt Kaiser</p>
	<p>Martin Systems AG Köppelsdorfer Str. 94 96515 Sonneberg Tel.: 0 36 75 / 73 35 - 0 Fax: 0 36 75 / 73 35 - 15 Email: <a href="mailto:info@martin-systems.de">info@martin-systems.de</a> <a href="http://www.martin-systems.de">www.martin-systems.de</a></p>	<p>Dipl.-Ing. Eberhard Harms Dipl.-Ing. Mark Grigo</p>
	<p>Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG Frankenwerft 35 50667 Köln Tel: 02 21 / 20 88 - 3 18 Fax: 02 21 / 20 88 - 3 45 Email: <a href="mailto:info@k-d.com">info@k-d.com</a> <a href="http://www.k-d.com">www.k-d.com</a></p>	<p>Hr. Hecker (Leiter Technik)</p>

<b><u>Inhaltsverzeichnis</u></b>	<b>Seite</b>
Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis .....	IV
Kurzzeichen .....	V
1 Zusammenfassung .....	1
2 Veranlassung und Projektziele .....	6
3 Projektverlauf .....	11
4 Tagesausflugsschiff RheinEnergie .....	14
5 Kurzdarstellung der Ergebnisse aus den Voruntersuchungen im Jahr 2004 .....	16
6 siClaro-BMA <sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage .....	21
6.1 Anlagenbeschreibung und technische Daten .....	21
6.2 Technische Integration der siClaro-BMA <sup>®</sup> - Abwasseraufbereitungsanlage in das Abwasserentsorgungssystem der RheinEnergie .....	27
6.3 Kurzdarstellung des Anlageneinbaus .....	32
7 Beschreibung des zweijährigen Anlagenbetriebs .....	34
7.1 Einsätze der RheinEnergie .....	34
7.2 Wasserverbrauch und Abwasseranfall an Bord der RheinEnergie .....	36
7.3 Betrieb der Schiffskläranlage an Bord der RheinEnergie .....	39
8 Beurteilung des Anlagenbetriebs .....	48
9 Empfehlungen für ein Betriebskonzept .....	52
10 Literatur .....	58

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Eventschiff RheinEnergie am Liegeplatz Köln.....	14
Abbildung 2:	Funktionsschema siClaro-BMA <sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage....	21
Abbildung 3:	Aufstellplatz siClaro-BMA <sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage in Zwillingsdeck auf der RheinEnergie .....	27
Abbildung 4:	Abwasserentsorgungssystem an Bord der RheinEnergie vor Installation der Schiffskläranlage.....	28
Abbildung 5:	Abwasserentsorgungssystem an Bord der RheinEnergie nach Installation der Schiffskläranlage.....	30
Abbildung 6:	Einbau der Schiffskläranlagensegmente in den Maschinenraum der RheinEnergie .....	32
Abbildung 7:	Installation der siClaro <sup>®</sup> - Membranfilter in die Filterkammer .....	33
Abbildung 8:	Einsätze der RheinEnergie im Zeitraum des Forschungsvorhabens .....	35
Abbildung 9:	Häufigkeitsverteilung des täglichen Wasserverbrauchs an Bord der RheinEnergie in der Hauptsaison 2006.....	38
Abbildung 10:	Filtrationsleistungen (Brutto-Permeatflux) der Filtrationsstraßen 1 + 2 im Untersuchungszeitraum 2005/2006.....	42
Abbildung 11:	Transmembrandrücke der Filtrationsstraßen 1 + 2 im Untersuchungszeitraum 2005/2006.....	44
Abbildung 12:	Permeabilitäten der Membranen der Filterstraßen 1 + 2 im Untersuchungszeitraum 2005/2006.....	45
Abbildung 13:	Täglich behandelte Abwasservolumenströme an Bord der RheinEnergie .....	46
Abbildung 14:	Ermittlung des erforderlichen Speichervolumens in Abhängigkeit der täglichen Filtrationsleistung der Schiffskläranlage.....	54
Abbildung 15:	Ermittlung des erforderlichen Speichervolumens bei einer füllstandsabhängig gesteuerten Filtrationsleistung.....	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ratifizierungsstatus des Übereinkommens über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt der Mitgliedsstaaten (Stand Dez. 2006) [2].....	7
Tabelle 2:	Grenz- und Überwachungswerte für Bordkläranlagen von Fahrgastschiffen [1].....	7
Tabelle 3:	Technische Daten RheinEnergie.....	15
Tabelle 4:	Statistische Kenngrößen zu den Beprobungen aus den Abwassersammeltanks Tank 1 und Tank 2.....	17
Tabelle 5:	Statistische Kenngrößen zu den Beprobungen aus dem Küchenabwassersammeltank Tank 5.....	17
Tabelle 6:	Statistische Kenngrößen zum Wasserverbrauch an Bord der MS RheinEnergie in der Wintersaison 2004/2005.....	18
Tabelle 7:	Technische Auslegungsdaten siClaro-BMA <sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage .....	24
Tabelle 8:	Übersicht der Entsorgungspfade der Abwasserteilströme vor und nach Installation der Schiffskläranlage .....	31
Tabelle 9:	Haupt- und Nebensaisons auf der RheinEnergie .....	34
Tabelle 10:	Prozentuale Aufteilung der Fahrten mit Fahrgästen .....	35
Tabelle 11:	Wasserverbrauch an Bord der RheinEnergie im Untersuchungszeitraum .....	36
Tabelle 12:	Statistische Kenngrößen zum täglichen Wasserverbrauch an Bord der RheinEnergie in der Hauptsaison 2006 .....	37
Tabelle 13:	Übersicht des Schiffskläranlagenbetriebes an Bord der RheinEnergie.....	41
Tabelle 14:	Behandelte Abwasservolumenströme an Bord der RheinEnergie im Untersuchungszeitraum.....	46
Tabelle 15:	Vergleich Wasserverbrauch und behandelte Abwasservolumenströme im Untersuchungszeitraum.....	48

## Kurzzeichen

<b>Kurzform</b>	<b>Beschreibung</b>
BMA <sup>®</sup> - Verfahren	Membranbelebungsverfahren der Martin Systems AG im Aufstaureaktor mit integrierter submerser Ultra- filtration
KD	Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG aus Köln
kD	Kilo-Dalton
SKA	Schiffskläranlage
TMP	Transmembrandruck
ZKR	Zentralkommission für die Rheinschiffahrt; Sitz in Straßburg

## 1 Zusammenfassung

Von Januar 2005 bis Dezember 2006 wurde durch das Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen e.V. (PIA) und das Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA) im Auftrag des Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) der großtechnische Betrieb einer Belebungsanlage mit Membranfiltration an Bord eines Tagesausflugsschiffs untersucht. Als Projektpartner waren das Fahrgastunternehmen Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG und der Anlagenhersteller von Membranbelebungsanlagen Martin Systems AG beteiligt.

Inhalte des Forschungsvorhabens waren Planung, Bau und Integration einer Schiffskläranlage mit Membranfiltration in das Tagesausflugsschiff RheinEnergie der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG. Die RheinEnergie wird von insgesamt 40 Mitarbeitern aus dem nautischen und gastronomischen Bereich betreut. Das Personal ist während der Einsatzzeit des Schiffes in Personalkabinen im Unterdeck untergebracht. Dies gewährleistet einen sehr flexiblen Einsatz des Schiffes. Vorrangig wird die RheinEnergie im Eventbetrieb aber auch im Linienfahrtbetrieb eingesetzt.

Veranlassung des Forschungsvorhabens war ein zukünftiges Einleitverbot von unbehandelten häuslichen Abwässern in die Bundeswasserstraßen für Fahrgastbinnenschiffe. Das Einleitverbot ist im „Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschiffahrt“ der Zentralkommission für die Rheinschiffahrt (ZKR) geregelt, das zurzeit noch nicht in Kraft getreten ist. [1]

Das vorliegende Forschungsvorhaben ist Teil eines Gesamtprojekts, das insgesamt drei Vorhaben umfasst. Im Vorfeld zu diesem Vorhaben fanden im Jahr 2004 Untersuchungen zur Beurteilung der Abwassersituation auf der RheinEnergie statt, die als Dimensionierungshilfe der Schiffskläranlage herangezogen wurden. Zusätzlich zum vorliegenden Vorhaben wurde in den Jahren 2005 bis 2006 der Bordbetrieb der Schiffskläranlage in einem separaten Projekt wissenschaftlich begleitet.

Projektziele des vorliegenden Vorhabens waren, neben dem Einbau der Schiffskläranlage, die Entwicklung von Betriebsstrategien sowie die Überprüfung der Filtrationsleistung der installierten Membranmodule. Es sollte untersucht werden, inwieweit die Schiffskläranlage in das vorhandene Abwasserentsorgungssystem an Bord der

RheinEnergie integriert werden kann, ob auf die an Bord bereits vorhandenen Abwasserspeichertanks als Puffertanks von Zulaufspitzen zurückgegriffen werden muss bzw. inwieweit mit konstanten Filtrationsleistungen die Anlage betrieben werden kann und welche Vorgehensweise bei einem Ausfall der Anlage verfolgt werden sollte.

Aufgrund der Katamaranbauweise und der Länge der RheinEnergie war eine Auslegung des Abwasserentsorgungssystems an Bord mit zentral gelegenen Sammel tanks nicht möglich. Das Entsorgungssystem musste beim Bau des Schiffes für jeden Schiffsrumpf separat ausgeführt werden. Das im so genannten Zwillingdeck installierte Abwasserentsorgungssystem besteht aus insgesamt fünf Abwassersammelzellen (angeordnet im Bug-, Mittel- und Heckbereich des Schiffes) und zwei Abwasserspeichertanks. Die Schiffskläranlage wurde nachträglich integriert. Als Aufstellplatz wurde der hintere Storraum im backbordseitigen Schiffsheck vorgesehen. Vorrangig mussten die Raummaße des an Bord zur Verfügung stehenden Aufstellplatzes bei der Dimensionierung der Schiffskläranlage eingehalten werden. Die Schiffskläranlage vom Typ siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage der Firma Martin Systems AG aus Sonneberg/Soest basiert auf dem Membranbelebungsverfahren und dient zur Reinigung häuslicher Schiffsabwässer. Die Anlage besteht aus einer mechanischen Vorreinigung zur Grobstoffabscheidung durch Feinsiebung, dem BMA<sup>®</sup> - Biomembranreaktor zur biologischen Behandlung des vorgereinigten Abwassers und einer Membrantrennstufe bestehend aus getauchten Ultrafiltrationsmembranen. Zur Abtrennung des belebten Schlammes wurden vier Module mit Ultrafiltrationsmembranen (Trenngrenze 150 kD) in die Filterkammer installiert. Die Membranfilterfläche betrug 200 m<sup>2</sup>.

Der Einbau der Schiffskläranlage in das Fahrgastschiff RheinEnergie erfolgte während einer Werftliegezeit im Februar 2005. Mit Beginn der Hauptsaison Anfang Mai 2005 konnte die Schiffskläranlage in Betrieb genommen und Anfang Juli 2005 die Einfahrphase abgeschlossen werden.

In beiden Betriebsjahren gab es auf dem Schiff Schwierigkeiten mit der Abwasserableitung. Aufgrund des Einsatzes von Pumpen ohne Schneidwerk, die leicht verstopften, und fehlerhaft verlegten Abwasserentsorgungsleitungen mit zu geringem Gefälle war es nicht möglich, das gesamte anfallende Abwasser auf der RheinEnergie während des Betriebs durchgängig den Abwasserspeichertanks zuzuleiten und mit der

Schiffskläranlage zu behandeln. Immer wieder auftretende Rohrverstopfungen führten dazu, dass Notüberläufe geöffnet werden mussten, um das Abwasser ableiten zu können. Der Fahrgastbetrieb an Bord der RheinEnergie hatte oberste Priorität und durfte nicht beeinträchtigt werden.

Bei der Beurteilung des Anlagenbetriebs während des Untersuchungsvorhabens muss daher zwischen dem Anlagenbetrieb der Schiffskläranlage und dem Betrieb des gesamten Abwasserentsorgungssystems an Bord der RheinEnergie differenziert werden. Über den gesamten Untersuchungszeitraum betrachtet, konnten bis zu 2/3 des Wasserverbrauchs in der Schiffskläranlage behandelt werden. Der Wasserverbrauch lag bei 7.720 m<sup>3</sup>, der behandelte Abwasservolumenstrom bei 5.044 m<sup>3</sup>. Der Abwasseranfall an Bord der RheinEnergie wurde nicht explizit gemessen. Es konnte jedoch davon ausgegangen werden, dass der Abwasseranteil bei ca. 100 ± 10% des Gesamtwasserverbrauchs lag. Zusätzliche Wasserverbrauchsquellen lagen im Bereich der Gästebewirtung (Getränkeverzehr bis zu 3.000 Liter pro Veranstaltung). Senken liegen im Bereich der Küche und der Fensterreinigung.

Insgesamt musste während der Untersuchungen festgestellt werden, dass die installierte Membranfilterfläche von 200 m<sup>2</sup> nicht ausreichte, um mit den erreichten Filtrationsleistungen das gesamte Abwasser an Bord der RheinEnergie behandeln zu können. Es hatte sich im Untersuchungszeitraum gezeigt, dass Filtrationsleistungen von 5 bis 6 l/(m<sup>2</sup>\*h) (Brutto-Permeatflux) über einen längeren Zeitraum nicht erreicht werden konnten. Diese wären notwendig gewesen, um Abwasservolumenströme von bis zu 30 m<sup>3</sup>/d zu filtrieren. Eine vollständige Behandlung des anfallenden Abwassers wäre damit rechnerisch unter Einbeziehung des nutzbaren Volumens der Abwasserspeichertanks von 50 m<sup>3</sup> z.B. in der Hauptsaison 2006 möglich gewesen.

Es konnte ein Brutto-Permeatflux von 4,5 l/(m<sup>2</sup>\*h) mit Verhältnissen der Filtrations- und Pausenzeiten von 3 zu 1 bis 7 zu 1 über längere Zeiträume erreicht werden, die mit einer Membranfläche von 200 m<sup>2</sup> eine tägliche Netto-Filtrationsleistung von bis zu 19,0 m<sup>3</sup>/d Abwasser ergab. Dieser Abwasservolumenstrom entsprach in etwa dem mittleren täglichen Wasserverbrauch, der in der Hauptsaison 2006 ermittelt wurde. Diese Leistung ist in Kombination mit dem verfügbaren Speichervolumen jedoch nicht ausreichend, um Tagesspitzen von bis zu 57 m<sup>3</sup>/d zu filtrieren bzw. das gesamte anfallende Abwasser an Bord zu behandeln.

Zur Verbesserung des Schiffskläranlagenbetriebs werden neben der Installation eines Fettabscheiders zur Vorbehandlung der an Bord anfallenden Küchenabwässer folgende bauliche Maßnahmen als notwendig erachtet:

- Installation eines weiteren Membranmoduls und Erhöhung der Membranfilterfläche auf 250 m<sup>2</sup>.
- Installation eines Steuermoduls zur füllstandsabhängigen Filtrationssteuerung.

Untersuchungen zu lipophilen Stoffen, die im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung durchgeführt wurden, führen zu dem Ergebnis, dass die Installation eines Fettabscheiders notwendig ist. Auf Einzelheiten wird dazu im Abschlussbericht zum Vorhaben der wissenschaftlichen Begleitung (April 2007) eingegangen.

Nach Aussage des Anlagenherstellers Martin Systems steht in der Filterkammer noch ausreichend Platz zur Verfügung, um ein weiteres Membranmodul mit einer Filterfläche von 50 m<sup>2</sup> zu installieren. Neben einer Erweiterung der Membranfilterfläche ist als zusätzliche bauliche Maßnahme eine automatische füllstandsgesteuerte Filtrationsleistung denkbar. Zurzeit wird die Filtrationsleistung der Filtratpumpen manuell auf einen konstanten Wert eingestellt. Nach Angaben des Anlagenherstellers Martin Systems ist es möglich, in die Betriebssteuerung ein Steuermodul zu integrieren, das es ermöglicht, die Filtrationsleistung durch Zuschaltung eines Bypasses zu erhöhen, wenn ein bestimmter Füllstand im Abwasserspeichertank erreicht wird. Rechnerisch konnte nachgewiesen werden, dass es so möglich ist, das in der Hauptsaison 2006 angefallene Abwasser vollständig zu behandeln. Vorzusehen ist dabei eine konstante tägliche Netto-Filtrationsleistung von 19 m<sup>3</sup>/d. 57% aller gemessenen Wasserverbräuche lagen in der Hauptsaison 2006 darunter. Erreicht der Füllstand in den Abwasserspeichertanks 1/3 des maximalen Speichervolumens, wird ein Bypass mit einer Netto-Filtrationsleistung von 16 m<sup>3</sup>/d solange zugeschaltet, bis der Füllstand in den Tanks wieder abnimmt. Die maximale tägliche Netto-Filtrationsleistung ergibt sich damit zu 35 m<sup>3</sup>/d und entspricht dem Auslegungswert, der ursprünglich angesetzt wurde. Bei einer Membranfilterfläche von 250 m<sup>2</sup>, einem Verhältnis Filtrations- zu Pausenzeit von 6 zu 1 ergibt sich ein erforderlicher Brutto-Permeatflux von 7 l/(m<sup>2</sup>\*h) in der Spitze und ein Brutto-Permeatflux von 4 l/(m<sup>2</sup>\*h) als Grundlast. Beide Filtrationsleistungen liegen deutlich unter dem Maximalwert von 12 l/(m<sup>2</sup>\*h), der vom Anlagenhersteller Martin Systems angegeben wurde.

Das maximale Speichervolumen von 50 m<sup>3</sup> steht zudem bei einem Ausfall der Schiffskläranlage zur Verfügung. In den meisten Fällen ist dieses Volumen ausreichend, um zumindest das Abwasser für einen Tag während der Fahrt zwischen zu speichern und anschließend an Land abzugeben. In der Hauptsaison 2006 wurden nur an zwei Tagen Wasserverbräuche ermittelt, die über diesem Speichervolumen lagen. Bis zur Wiederinbetriebnahme der Schiffskläranlage ist es also möglich, als Notfallkonzept die Zwischenspeicherung an Bord mit anschließender Abgabe an Land vorzusehen.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Ertüchtigungsmaßnahmen und erläuterten Empfehlungen zu Betriebsstrategien kann davon ausgegangen werden, dass die Schiffskläranlage erfolgreich an Bord der RheinEnergie betrieben werden kann. Voraussetzungen sind, dass der Anlagenbetrieb vom Bordpersonal der KD ordnungsgemäß überwacht wird und die Schiffskläranlage im Rahmen eines Wartungsvertrages vom Anlagenhersteller Martin Systems in regelmäßigen Abständen kontrolliert wird.

Im Rahmen des Vorhabens der wissenschaftlichen Begleitung des Demonstrationsbetriebs der Schiffskläranlage (AZ IV-9-042 545 0020) erfolgten Untersuchungen zu erreichbaren Reinigungsleistungen (Eliminationsraten), Untersuchungen zur Einhaltung der geforderten Grenzwerte sowie Untersuchungen zur Überschussschlammproduktion und Speicherung. Der Abschlussbericht zu diesem Vorhaben wird im April 2007 vorgelegt.

## 2 Veranlassung und Projektziele

Mit Schreiben vom 24.01.2005 wurden das Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen e.V. (PIA) und das Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA) vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) beauftragt, das Forschungsvorhaben „Großtechnischer Betrieb von Membrananlagen auf Fahrgastbinnenschiffen – Demonstrationsprojekt an Bord der RheinEnergie“ in den Jahren 2005 und 2006 durchzuführen.

Inhalte des Forschungsvorhabens waren Planung, Bau und Integration einer Schiffskläranlage mit Membrantechnik in ein Tagesausflugschiff sowie ein 2-jähriger Demonstrationsbetrieb. Projektpartner waren die Firma Martin Systems aus Soest/ Sonneberg als Anlagenhersteller der Schiffskläranlage sowie das Fahrgastschifffahrtsunternehmen Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG aus Köln (KD), das im Rahmen dieses Projektes ein Tagesausflugsschiff zwecks Anlageneinbau zur Verfügung stellte sowie den Betrieb dieser Anlage in Teilen übernahm. Der Einbau der Schiffskläranlage erfolgte auf der im Jahr 2004 neu gebauten RheinEnergie.

Das vorliegende Forschungsvorhaben ist Teil eines Gesamtprojekts, das insgesamt 3 Vorhaben umfasst. Im Vorfeld zu diesem Projekt fanden im Jahr 2004 Untersuchungen zur Beurteilung der Abwassersituation auf der RheinEnergie statt (F+E-Vorhaben AZ IV-9-042 545 „Erfassung der Abwasserzusammensetzung und Abwasservolumenströme an Bord des KD-Tagesausflugsschiff MS RheinEnergie“, Dezember 2004). In den Jahren 2005 und 2006 wurde in einem separaten Projekt der Bordbetrieb der Schiffskläranlage wissenschaftlich begleitet (F+E-Vorhaben AZ IV-9-042 545 0020 „Wissenschaftliche Begleitung des großtechnischen Betriebes einer Membrankläranlage an Bord der MS RheinEnergie“). Die Ergebnisse der Voruntersuchungen werden im Rahmen dieses Berichtes noch einmal zusammenfassend dargestellt, die Fertigstellung des Abschlussberichts zum Vorhaben der wissenschaftlichen Begleitung erfolgt im Jahr 2007.

Veranlassung der Forschungsvorhaben ist ein zukünftiges Einleitverbot für Fahrgastschiffe von unbehandelten häuslichen Abwässern in die Bundeswasserstraßen. Das Einleitverbot ist im „Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschiffahrt“ der Zentralkommission für die Rhein-

schifffahrt (ZKR) geregelt [1]. Sobald dieses so genannte Abfallübereinkommen, das im Jahr 1996 fertig gestellt und veröffentlicht wurde, von jedem Mitgliedsstaat der ZKR ratifiziert wird, sind die Regelungen in nationales Recht zu überführen. Der Ratifizierungsstatus ist in folgender Tabelle dargestellt.

**Tabelle 1: Ratifizierungsstatus des Übereinkommens über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt der Mitgliedsstaaten (Stand Dez. 2006) [2]**

Mitgliedsstaat (alphabetisch geordnet)	Ratifikation	Hinterlegung der Ratifizierungsurkunde
Belgien	-	-
Deutschland	10. Februar 2004	10. März 2004
Frankreich	23. Mai 1997	15. September 2005
Luxemburg	22. Februar 2002	14. Mai 2002
Niederlande	28. Juni 2000	10. Juli 2000
Schweiz	25. Mai 1998	16. Juli 1998

Konkret sind im Übereinkommen Einleitungen von häuslichem Abwasser für Kabinenschiffe (Flusskreuzfahrtschiffe) mit mehr als 50 Schlafplätzen (geplanter Zeitpunkt 1. Januar 2005) und für Tagesausflugsschiffe mit einer Zulassung zur Beförderung von mehr als 50 Fahrgästen (geplanter Zeitpunkt 1. Januar 2010) verboten. Vorgeschrieben wird weiter, das Abwasser von diesen Schiffen entweder an Bord zu speichern und an Land abzugeben oder durch geeignete Schiffskläranlagen direkt an Bord zu behandeln. Bordkläranlagen zur Abwasserreinigung auf Binnenschiffen müssen nach Anhang V des Übereinkommens mindestens folgende Grenz- und Überwachungswerte im Betrieb einhalten. [1]

**Tabelle 2: Grenz- und Überwachungswerte für Bordkläranlagen von Fahrgastschiffen [1]**

Parameter	Sauerstoffkonzentration	Probe
Biochemischer Sauerstoffbedarf BSB <sub>5</sub>	40 mg/l	Stichprobe, homogenisiert
Chemischer Sauerstoffbedarf CSB	180 mg/l	Stichprobe, homogenisiert

Für die übrigen Schiffe (Güterschiffahrt usw.) ist darüber hinaus eine Einleitung von häuslichen Abwässern in die Wasserstraßen erlaubt.

Mit Blick auf die zukünftigen Anforderungen ist in den vergangenen Jahren bereits damit begonnen worden, Schiffskläranlagen in Neubauten von Flusskreuzfahrtschiffen zu installieren, um der neuen Reglementierung sowie dem allgemein gestiegenen Umweltbewusstsein in der Bevölkerung gerecht zu werden. Bei der Ausrüstung der Schiffe wurden dabei auf konventionelle Abwasserbehandlungstechniken, zumeist bestehend aus Belebungs- und Nachklärbecken, zurückgegriffen.

Erste Erfahrungen mit dem Anlagenbetrieb zeigen momentan jedoch, dass der Großteil der installierten Bordkläranlagen die erforderlichen Reinigungsanforderungen nicht erfüllen kann. Untersuchungen in der Schweiz ergaben, dass sich mit den heute zur Verfügung stehenden Bordkläranlagen die Abwässer nur unzulänglich reinigen lassen und die Grenzwerte der ZKR bis jetzt noch nicht eingehalten werden konnten [3]. Eigene Untersuchungen des PIA zeigten, dass herkömmliche Bordkläranlagen aufgrund an Bord vorherrschender Platzverhältnisse zu gering dimensioniert wurden bzw. auf Behandlungsschritte wie die Vorreinigung verzichtet wurde.

In den Jahren 2002 bis 2004 wurden bereits am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen und am Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen im Rahmen des MUNLV-F&E- Vorhabens „Einsatz der Membrantechnik zur Abwasserbehandlung auf Binnenschiffen“ (AZ IV-9-042 528) der Einsatz von Bordkläranlagen mit Membrantechnik untersucht. Dazu wurden an Bord des Fahrgastschiffes MS Asbach der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG (KD) zwei Membrananlagen im Pilotmaßstab betrieben. Die Untersuchungen zeigten insgesamt, dass Membranbioreaktoren aufgrund ihrer Konzeption gut für die Abwasserbehandlung an Bord von Fahrgastschiffen geeignet sind. [4]

Der Vorteil der Membrantechnik gegenüber herkömmlichen Verfahren für die Binnenschiffahrt wurde im Wesentlichen in den folgenden drei Punkten gesehen:

1. Eine Ausführung der Schiffskläranlagen in kompakter und damit auch platzsparender Bauweise ist möglich. Durch die Möglichkeit, eine höhere Biomassekonzentration im Belebungsbecken einzustellen, kann das Beckenvolumen bei gleicher Schlammbelastung um bis zu 75% gegenüber konventionellen

Anlagen reduziert werden. Ein nachgeschaltetes Nachklärbecken zur Phasenseparation des Schlamm-Wassergemisches entfällt.

2. Die Abwasserreinigung wird nicht durch das Auftreten von Fadenbakterien bzw. durch Bläh- und Schwimmschlamm-Bildung negativ beeinträchtigt, da die Trennung des Schlamm-Wasser-Gemisches beim Membranbelevungsverfahren weitgehend unabhängig von den Absetzeigenschaften des belebten Schlammes ist. Tägliche und wöchentliche Kontrollen können allein auf ein Kontrollieren der Aggregate reduziert werden, die Überprüfung des Schlammabsetzverhaltens entfällt.
3. Während bei konventionellen Anlagen der Trockensubstanzgehalt aus verfahrenstechnischen Gründen möglichst konstant gehalten werden muss (Schwankungsbreite  $\pm 1\text{g/l}$ ), um Überlastungen des Nachklärbeckens zu vermeiden, können die Schwankungsbreiten bei Membranbelevungsanlagen deutlich größer gewählt werden. Es ergibt sich damit auch die Möglichkeit, entstehenden Überschussschlamm im Belevungsbecken durch Aufkonzentrierung zu speichern. Ein separater Speichertank mit eigenen Vorrichtungen zur Frischhaltung des Überschussschlammes kann damit entfallen. Bei Erreichen eines vorab bestimmten maximalen TS-Gehaltes erfolgt der Überschussschlammabzug zur Abgabe an Land direkt aus dem Bioreaktor.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens sollten nach dem Einbau der Schiffskläranlage Betriebsstrategien entwickelt und die Leistungsfähigkeit der Anlage untersucht werden. Die Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit konzentrierten sich dabei hauptsächlich auf die Filtrationsleistung der Membrantrennstufe. Folgenden Fragestellungen sollte konkret nachgegangen werden:

### **1. Erarbeitung einer geeigneten Betriebsweise der Membrananlage**

Es wurde untersucht, inwieweit die Membrananlage in das Abwasserentsorgungssystem der MS RheinEnergie integriert werden kann, um eine sichere Betriebsweise zu gewährleisten. Hierbei wurde untersucht, inwieweit auf die vorhandenen Abwasserspeichertanks als Puffertanks zurückgegriffen werden muss

und ob die vorab gewählte Betriebsstrategie (konstanter Durchsatz) den Anforderungen an Bord gerecht wurde.

## **2. Gestaltung eines sicheren Bordbetriebs**

Zur Gewährleistung eines weitgehend störungsfreien Betriebs wurde ein Betriebskonzept entwickelt. Für den Störfall (Ausfall der Schiffskläranlage) wurden Handlungsanweisungen erarbeitet.

## **3. Untersuchungen zur Anlagenwartung und -kontrolle**

Hierbei wurde untersucht, inwieweit sich schiffsbetriebsverträgliche Wartungsintervalle realisieren lassen, welche Kontrollarbeiten vom Bordpersonal zu übernehmen bzw. welche Wartungsarbeiten im Laufe einer Fahrtsaison durchzuführen sind und wie sie in den Bordbetrieb integriert werden können.

Ziel des Vorhabens war es zudem, den Einsatz der Membrantechnik in Bordkläranlagen als zukunftsorientierte Technik darzustellen, um so Schifffahrtsunternehmen eine sichere Alternative bei der Wahl ihrer Bordkläranlage und damit auch eine notwendige Investitionssicherheit geben zu können.

Im Rahmen des Vorhabens der wissenschaftlichen Begleitung des Demonstrationbetriebs der Schiffskläranlage (AZ IV-9-042 545 0020) erfolgten Untersuchungen zu erreichbaren Reinigungsleistungen (Eliminationsraten), Untersuchungen zur Einhaltung der geforderten Grenzwerte sowie Untersuchungen zur Überschussschlammproduktion und Speicherung. Der Abschlussbericht zu diesem Vorhaben wird im April 2007 vorgelegt.

### 3 Projektverlauf

Mit Vertragsabschluss am 09.02.2005 wurde der Projektpartner Martin Systems mit dem Bau einer Membranbelebungsanlage und anschließender Integration in das Eventschiff RheinEnergie beauftragt. Gemeinsam mit dem Fahrgastschiffahrtsunternehmen Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG wurde die Schiffsbauwerft der RheinEnergie, DE HOOP LOBITH, beauftragt, während der Liegezeit in der firmeneigenen Werft von DE HOOP LOBITH vorab die notwendigen Umbaumaßnahmen im vorgesehenen Aufstellraum an Bord der RheinEnergie durchzuführen.

Während dieser Werftliegezeit vom 14. bis 24.02.2005 wurden die Behälter der Membranbelebungsanlage sowie zugehörige Belüftungsaggregate und Pumpen in das Schiff eingebracht und im untersten Deck, dem so genannten Zwillingdeck des Katamaran, montiert. Der Einbau der Anlage in das vorhandene Abwasserentsorgungssystem konnte ebenso wie die Installation der Tankbelüftung in den Vorlagetanks mit Ende der Werftliegezeit abgeschlossen werden. Im März wurde die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik während Liegezeiten des Schiffes in Köln installiert. Anfang April wurden die Membranmodule eingebaut.

Die Inbetriebnahme der Anlage inklusive Animpfung mit belebtem Schlamm erfolgte im Zeitraum vom 18. bis 29.04.2005. Mit Beginn der Hauptsaison Anfang Mai 2005 konnte die Membranbelebungsanlage in Betrieb genommen werden.

Zu Beginn der ersten Betriebswochen wurden durch das Bordpersonal Geruchsbelästigungen durch den Anlagenbetrieb festgestellt. Da vorher die Abwasserspeichertanks auf der RheinEnergie nicht in Gebrauch waren und das Abwasser bereits aus den Sammelzellen direkt in die Fahrstraße gepumpt wurde (vgl. Kapitel 6.2), war vor Inbetriebnahme der Membranbelebungsanlage das Problem in diesem Ausmaß nicht zu erkennen. Infolge des Schiffdesigns strömte die Abluft jedoch aufgrund von Luftverwirbelungen am Heck wieder auf und wurde über die Filteranlage der Klimaanlage angesaugt und damit in das Schiff geführt. Dieser Effekt führte dazu, dass die Membranbelebungsanlage bei zu starker Geruchsbelästigung ausgestellt wurde. Im Monat Mai 2005 war daher ein konstanter Betrieb nicht möglich. Eine durchgeführte Geruchsmessung am 07.06.2005 an den Emissionsorten (Entlüftungsleitungen der Speichertanks und der Membrananlage) zur Abschätzung der Beeinträchtigungen bestätigte das Empfinden des Bordpersonals. Aufgrund der spezifizierten Geruchsart

„fäkalisch, unangenehmer Geruch“ mit hohen Konzentrationen war eine Beeinträchtigung an Bord des Schiffes ableitbar. Um einen kontinuierlichen Betrieb in der Folgezeit zu gewährleisten, wurden gemeinsam mit dem Bordpersonal Möglichkeiten gesucht, das Problem zu minimieren. Durch Verschließen von Bodenöffnungen im Heck des Schiffes, aus dem die Abluft aufstieg sowie durch Verbesserung der Luftzufuhr in den Anlagenraum, wurde eine geringe Verminderung der Geruchsbelastung erreicht.

Nachdem im Juni 2005 ein weitgehend durchgängiger Betrieb der Membranbelebungsanlage realisiert werden konnte, konnte Anfang Juli 2005 die Einfahrphase abgeschlossen werden. In der Hauptsaison 2005 wurde die RheinEnergie vorwiegend im Linienbetrieb eingesetzt. In der Nebensaison von Oktober 2005 bis Mitte Januar 2006 war die RheinEnergie als Veranstaltungsort für die Revue-Show „Ganymée on Water“ im Einsatz. Im Anschluss an den Schiffeinsatz wurde während der Liegezeit im Kölner Hafen vom Projektpartner KD Abluftleitungen auf der RheinEnergie in Eigeninitiative verlegt, um die Geruchsbelästigungen weiter zu minimieren. Diese Umbaumaßnahmen konnten rechtzeitig vor Beginn der Hauptsaison Anfang Mai 2006 abgeschlossen werden. Die Hauptsaison 2006 war von zahlreichen Eventveranstaltungen geprägt, die neben einem zum Vorjahr reduzierten Linienfahrtbetrieb auf der RheinEnergie angeboten wurden. Seit Beginn der Nebensaison Mitte Oktober 2006 wird die RheinEnergie als Veranstaltungsort für die Dinnershow „BAJAZZO“ in den Städten Düsseldorf und Köln genutzt. Diese Show wird bis Ende Januar 2007 auf der RheinEnergie aufgeführt.

In beiden Betriebsjahren gab es auf dem Schiff Schwierigkeiten bei der Abwasserentsorgung. Aufgrund des Einsatzes von Pumpen ohne Schneidwerk, die leicht verstopften, und fehlerhaft verlegten Abwasserentsorgungsleitungen auf dem Schiff mit zu geringem Gefälle war es nicht möglich, das gesamte anfallende Abwasser auf der RheinEnergie während des Betriebsjahres 2005 durchgängig den Abwasserspeichertanks zuzuleiten und mit der Membranbelebungsanlage zu behandeln.

Ähnlich wie im Jahr 2005 führten auch im Jahr 2006 Verstopfungen in Rohrleitungen, insbesondere im Bereich der Gästetoiletten, Ausfälle von Beschickungspumpen bzw. durch Materialermüdung entstandene Undichtigkeiten an Rohrverbindungen dazu, dass Notabläufe geöffnet werden mussten. Dadurch konnte auch im zweiten Be-

triebsjahr nicht das gesamte anfallende Abwasser den Abwassersammeltanks und damit auch nicht der Membranbelebungsanlage zugeleitet werden.

Für die nächste Liegezeit im Kölner Hafen Anfang Februar 2007 sind weitere Umbaumaßnahmen am Abwasserentsorgungssystem geplant. Es kann davon ausgegangen werden, dass zukünftig das gesamte Abwasser den Abwasserspeichertanks zugeleitet werden kann.

## 4 Tagesausflugsschiff RheinEnergie

Das Tagesausflugsschiff RheinEnergie wurde im Jahr 2004 auf der niederländischen Werft De Hoop Lobith gebaut und von der KD im Juni 2004 in Betrieb genommen. Mit diesem neuartigen Schiff beabsichtigte die KD neue Maßstäbe im Eventbereich zu setzen und marktgerecht die gewandelten Bedürfnisse seiner Gäste zu erfüllen.



**Abbildung 1: Eventschiff RheinEnergie am Liegeplatz Köln**

Mittelpunkt des Schiffes ist eine Veranstaltungsbühne, die vom Hauptdeck sowie von einer Galerie im Oberdeck von maximal möglichen 1.000 Fahrgästen eingesehen werden kann. Die Bewirtung der Fahrgäste erfolgt über eine im Unterdeck eingerichtete bordeigene Küche. Das Angebot der Küche reicht von à la carte Gerichten bis hin zum Gala-Buffer. Ergänzt wird die Bewirtung durch drei Theken auf Haupt-, Ober- und Sonnendeck.

Die RheinEnergie wird von insgesamt 40 Mitarbeitern aus dem nautischen und gastronomischen Bereich betreut. Das Personal ist während der Einsatzzeit des Schiffes in Personalkabinen im Unterdeck direkt auf dem Schiff untergebracht. Dies gewährleistet einen sehr flexiblen Einsatz des Schiffes. Vorrangig wird die RheinEnergie im Eventbetrieb aber auch im Linienfahrtbetrieb eingesetzt. Die Einsatzstrecken konzentrieren sich auf den Mittelrhein zwischen Mainz und Düsseldorf; Einsatzorte für Veranstaltungen reichen von der Schweiz bis in die Niederlande. Die Eventve-

ranstaltungen umfassen Karnevalsveranstaltungen, Konzerte, Hauptversammlungen, Betriebsfeiern sowie Produktpräsentationen. Im Vergleich zu vielen anderen Tagesausflugsschiffen wird die RheinEnergie sowohl in der Haupt- wie auch in der Nebensaison im Winter eingesetzt.

Die technischen Daten der RheinEnergie sind nachfolgend tabellarisch aufgeführt.

**Tabelle 3: Technische Daten RheinEnergie**

Baujahr	2004
Werft	De Hoop Lobith/Niederlande
Schiffstyp	Katamaran
Länge	90,3 m
Breite	19,3 m
Anzahl Decks	3 + Sonnendeck
Nutzfläche	2.000 m <sup>2</sup>
Nutzfläche Sonnendeck	1.200 m <sup>2</sup>
Kapazitäten Passagiere	optimal: 400 bis 1.000 maximal: 1.650
Bordbesatzung	40 Personen
Anzahl Besatzungskabinen	22

## **5 Kurzdarstellung der Ergebnisse aus den Voruntersuchungen im Jahr 2004**

Die Voruntersuchungen zur Abwasserzusammensetzung an Bord der RheinEnergie erfolgten in den Monaten Oktober bis Dezember 2004. Über den Untersuchungszeitraum wurde die MS RheinEnergie als Veranstaltungsort für die Revue-Show „Gany-mée on Water“ und nicht im Linienfahrtbetrieb eingesetzt. Bei dieser Show handelte es sich um ein 4-stündiges Varietéprogramm (inklusive einem 4-Gänge-Menü für die Besucher), das neben einigen Mittagsvorführungen hauptsächlich abends aufgeführt wurde. Die Beprobungen erfolgten vorwiegend morgens, um eine Störung des Betriebs zu verhindern und um zusätzlich zu gewährleisten, dass der Einfluss des vorabendlichen Gästebetriebs auf die Abwasserzusammensetzung mit erfasst werden konnte.

Da zum Zeitpunkt der Untersuchungen die zentralen Fäkalienstehertanks nicht in Gebrauch waren, konnte eine „Mischprobe“ des Abwassers, bestehend aus den Zuflüssen aus den insgesamt fünf Sammel tanks nicht analysiert werden. Alternativ wurden drei Sammel tanks beprobt. Als Referenztank wurde der Tank im backbordseitigen vorderen Schiffsrumpf (Tank 1) insgesamt 10-mal, d.h. pro Probenahme vor Ort einmal, beprobt. Zusätzlich wurde der Tank im steuerbordseitigen vorderen Schiffsrumpf 6-mal beprobt (Tank 2). In diesen Sammel tanks werden die Abwässer aus den Gästetoiletten (Schwarzwasser) und den vorderen Personalkabinen (Schwarz- und Grauwasser) geleitet. Eine Beprobung des Küchenabwassersammel tanks (Tank 5) erfolgte insgesamt 4-mal (vgl. Abbildung 4). Bei den Probenahmen handelte es sich aufgrund der örtlichen Gegebenheiten um Stichproben.

Die Abwasserproben wurden auf Kohlenstoff- und Nährstoffparameter sowie auf abfiltrierbare und lipophile Stoffe untersucht. Die Beprobung der Abwasserzusammensetzung an Bord der MS RheinEnergie begann am 12.10.2004, die letzte Beprobung erfolgte am 29.11.2004. In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die statistischen Kenngrößen zu den Beprobungen aus den Abwassersammel tanks zusammengestellt.

**Tabelle 4: Statistische Kenngrößen zu den Beprobungen aus den Abwassersammeltanks Tank 1 und Tank 2**

Probenahmestelle: Tank 1		Mittelwert	Min	Max	Spannweite	Standardabweichung	Anzahl
pH	-	8,6	8,4	8,8	0,4	0,1	10
Leitfähigkeit	µS/cm	1.837	1.340	2.620	1.280	388	10
CSB <sub>hom.</sub>	mg/l	1.629	689	2.700	2.011	772	10
BSB <sub>hom.</sub>	mg/l	790	344	1.310	966	341	9
NH <sub>4</sub> -N	mg/l	137,5	81,6	224,1	142,5	41,1	10
N <sub>ges.</sub>	mg/l	216,1	110,0	358,0	248,0	68,9	10
P <sub>ges.</sub>	mg/l	30,1	13,0	67,7	54,7	15,8	10
AFS	mg/l	1.541	586	2.900	2.314	814	9
TOC	mg/l	473,3	260,0	830,0	570,0	184,1	9
Öle + Fette	mg/l	164,5	31,0	659,0	628,0	171,3	10
Probenahmestelle: Tank 2		Mittelwert	Min	Max	Spannweite	Standardabweichung	Anzahl
pH	-	8,5	8,3	8,8	0,6	0,2	6
Leitfähigkeit	µS/cm	2.017	1.740	2.270	530	188	6
CSB <sub>hom.</sub>	mg/l	3.197	1.030	9.200	8.170	2.884	6
BSB <sub>hom.</sub>	mg/l	989	512	2.080	1.568	569	5
NH <sub>4</sub> -N	mg/l	170,7	141,0	212,0	71,0	25,8	6
N <sub>ges.</sub>	mg/l	286,8	200,0	385,0	185,0	73,4	6
P <sub>ges.</sub>	mg/l	42,6	16,8	118,6	101,8	34,5	6
AFS	mg/l	2.909	787	8.870	8.083	2.970	6
TOC	mg/l	1065,0	270,0	3800,0	3530,0	1244,7	6
Öle + Fette	mg/l	690,5	102,0	2060,0	1958,0	784,6	6

**Tabelle 5: Statistische Kenngrößen zu den Beprobungen aus dem Küchenabwassersammeltank Tank 5**

Probenahmestelle: Küchentank 5		Mittelwert	Min	Max	Spannweite	Standardabweichung	Anzahl
pH	-	5,9	5,7	6,1	0,4	-	4
Leitfähigkeit	µS/cm	1.395	861	1.780	919	-	4
CSB <sub>hom.</sub>	mg/l	14.975	5.200	33.500	28.300	-	4
BSB <sub>hom.</sub>	mg/l	2.105	1.840	2.370	530	-	2
NH <sub>4</sub> -N	mg/l	2,9	0,9	7,0	6,1	-	4
N <sub>ges.</sub>	mg/l	101,8	37,0	204,0	167,0	-	4
P <sub>ges.</sub>	mg/l	93,5	26,0	184,0	158,0	-	4
AFS	mg/l	188.033	89.100	280.000	190.900	-	3
TOC	mg/l	1.873	920	2.700	1780,0	-	3
Öle + Fette	mg/l	21.125	14.700	35.900	21.200	-	4

Aus den gemessenen CSB- und BSB<sub>5</sub>-Einzelkonzentrationen konnte ein mittleres Verhältnis für Tank 1 von BSB<sub>5</sub> : CSB von 1 : 2,2 und für Tank 2 ein Verhältnis von 1 : 2,0 ermittelt werden. Aus den zusätzlich gemessenen Nährstoffkonzentrationen konnten in beiden Abwassersammeltanks ähnliche mittlere Verhältnisse von BSB<sub>5</sub> : N<sub>ges</sub> : P<sub>ges</sub> zu 100 : 33 : 4 (Tank 1) und 100 : 35 : 3 (Tank 2) bestimmt werden. Die sehr hohen Konzentrationen an lipophilen und abfiltrierbaren Stoffen (Öle und Fette) erschwerte die Bestimmung der BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen im Küchenabwasser, so dass nur zwei Ergebnisse ermittelt wurden. Die CSB-Konzentrationen im Küchenabwasser lagen um den Faktor 3 bis 10 über den Konzentrationen der übrigen untersuchten Abwasserproben.

Nach dem Einbau von Wasseruhren in den Versorgungsleitungen wurde zwischen dem 27.10.04 und 08.12.04 der Wasserverbrauch an Bord der MS RheinEnergie untersucht. Für den Untersuchungszeitraum von 6 Wochen wurden ein Frischwasserbedarf von 499 m<sup>3</sup> und ein Brauchwasserbedarf von 165 m<sup>3</sup> ermittelt. Beim Brauchwasser handelte es sich um Flusswasser, das nach Bedarf aus der Wasserstraße entnommen und vor der weiteren Verwendung über einen Sandfilter vorbehandelt wurde. Trinkwasser wird nach Bedarf für mehrere Tage an Bord gebunkert. Im Durchschnitt ergab sich für diesen Zeitraum ein täglicher Wasserverbrauch von 15,8 m<sup>3</sup>/d, aufgeteilt in 11,9 m<sup>3</sup>/d Frischwasser und 3,9 m<sup>3</sup>/d Brauchwasser. Insgesamt 20-mal wurde der Verbrauch über einen Zeitraum von 24 Stunden erfasst. Dazu wurde jeweils morgens der Stand der Wasseruhren abgelesen. Die statistischen Kenngrößen der so ermittelten „täglichen“ Wasserverbräuche sind nachstehend zusammengefasst.

**Tabelle 6: Statistische Kenngrößen zum Wasserverbrauch an Bord der MS RheinEnergie in der Wintersaison 2004/2005**

	<b>Frisch- wasser</b>	<b>Brauch- wasser</b>	<b>Gesamtverbrauch</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>13,2</b>	<b>4,4</b>	<b>17,5</b>
<b>Minimum</b>	<b>7,0</b>	<b>3,0</b>	<b>11,0</b>
<b>Maximum</b>	<b>19,0</b>	<b>7,0</b>	<b>26,0</b>
<b>Spannweite</b>	<b>12,0</b>	<b>4,0</b>	<b>15,0</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>2,9</b>	<b>1,0</b>	<b>3,4</b>

An allen Untersuchungstagen fand abends eine Veranstaltung statt, die Besucherzahlen lagen zwischen 150 und 500 Gästen. Diese Auswertung zum Wasserverbrauch gab damit nur die Belastungssituation während des Gästebetriebs wieder, ein Einfluss von Liegezeiten konnte ausgeschlossen werden. Der Mittelwert ließ sich zu  $17,5 \text{ m}^3/\text{d}$  bestimmen, der damit über dem Gesamtmittelwert von  $15,8 \text{ m}^3/\text{d}$  aus der sechswöchigen Erfassung lag. Mit einer Spannweite von 11 bis  $26 \text{ m}^3/\text{d}$  lag für diese Erfassung jedoch eine hohe Schwankungsbreite vor. Eine Auswertung bezogen auf den Wasserverbrauch pro Fahrgast war anhand der vorliegenden Daten nicht möglich, auch konnte der Wasserverbrauch bezogen auf das Bordpersonal bzw. auf einzelne Verbraucher wie die Küche nicht ermittelt werden.

Trotz der geringen Gästezahlen von 150 bis 500 Gästen pro Veranstaltung im Vergleich zu den maximalen Platzkapazitäten von 1.650 Personen wurde dieser Eventbetrieb als kritische Belastung bzw. „maximaler Belastungsfall“ für die zu installierende Schiffskläranlage eingestuft. Hauptgrund hierfür war die durch die Zubereitung der Mahlzeiten hohe Auslastung der Küche, die zu sehr hohen Konzentrationen im Küchenabwasser geführt hatte. Die Mahlzeiten, bestehend aus einem 4-Gänge-Menü für jeden Gast, waren wesentlicher Bestandteil der angebotenen Veranstaltung. Es wurde davon ausgegangen, dass die Belastung durch einen Linienfahrtbetrieb aufgrund eines geringeren Küchenbetriebes insgesamt niedriger liegen würde.

### **Folgendes Fazit wurde nach den Voruntersuchungen gezogen:**

Mit den gemessenen Konzentrationen im Abwasserzulauf und den Volumenströmen an Bord der MS RheinEnergie war für die geplante Schiffskläranlage im Hinblick auf die tägliche Frachtbelastung eine Obergrenze erreicht worden. Aufgrund der Tatsache, dass es nicht möglich war, die Abwasservolumenströme auf einzelne Verbraucher wie Küche, Gästetoiletten und Personalkabinen aufzuteilen, war eine Berechnung von Einzelfrachten nur schwer möglich. Um einen Anhaltswert einer möglichen  $\text{BSB}_5$ -Frachtbelastung abzuschätzen, wurde der Mittelwert über die mittleren  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen aus den drei untersuchten Tanks gebildet und mit dem mittleren Wasserverbrauch multipliziert. Es ergab sich damit eine  $\text{BSB}_5$ -Belastung von ca.  $23,0 \text{ kg}/\text{d}$ , womit die ursprüngliche angesetzte mittlere tägliche  $\text{BSB}_5$ -Fracht von  $16,8 \text{ kg}/\text{d}$  bei der Anlagenplanung überschritten wurde. Eine deutlich höhere Auslas-

tung der Küche mit damit verbundenen Schmutzfrachterhöhungen wurde aufgrund der begrenzten Kapazitäten an Bord allerdings ausgeschlossen.

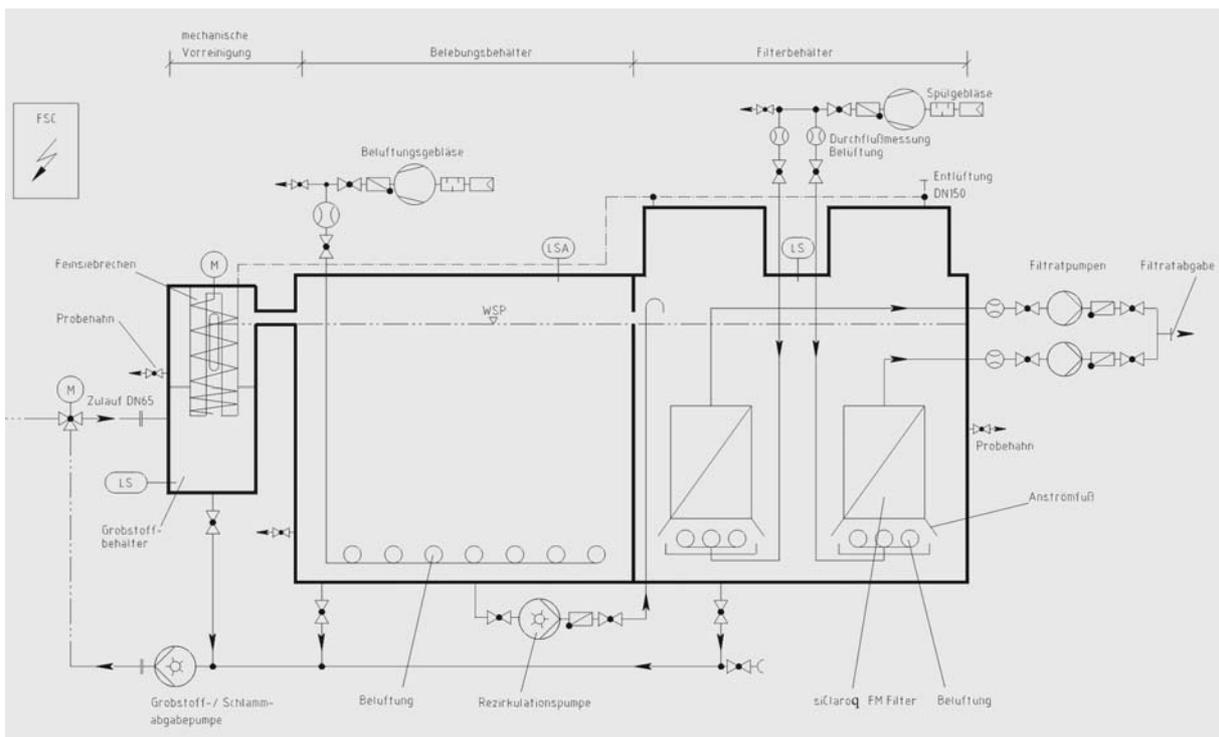
Der ermittelte maximale Wasserverbrauch mit 26,0 m<sup>3</sup>/d lag dagegen deutlich unter dem ursprünglich angesetzten mittleren Abwasseranfall von 35 m<sup>3</sup>/d, so dass keine Schwierigkeiten hinsichtlich der Durchsatzleistung der Membrantrennstufe erwartet wurden. Mit einer maximal möglichen Durchsatzleistung von 55,0 m<sup>3</sup>/d schienen ausreichend Reserven berücksichtigt worden zu sein.

Zu berücksichtigen war, dass die Auslegung der Membrananlage nach den örtlichen Gegebenheiten erfolgen musste und nur der an Bord frei verfügbare Raum als Aufstellplatz genutzt werden konnte. Die limitierten Platzverhältnisse ermöglichten keine Vergrößerung der Membrananlage, so dass die täglich zu behandelnden Schmutzfrachten dadurch begrenzt werden. Nach Einschätzung des Anlagenherstellers Martin Systems war es jedoch möglich, die geplante Anlage an die höheren Schmutzfrachten von bis zu 23 kg BSB<sub>5</sub>/d anzupassen. Der Einsatz von Fettabscheidern zur Vorbehandlung der Küchenabwässer wurde als nicht erfolgsversprechend angesehen, da die an Bord üblicherweise verwendeten Fettabscheider aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse nicht den deutschen Industrienormen entsprechen können und somit nur unzureichend funktionieren. Hauptursachen sind zumeist eine zu geringe Auslegung und unzureichende Betriebsüberwachung an Bord. Ein Fettabscheider wurde daher nicht mit berücksichtigt. [5]

## 6 siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage

### 6.1 Anlagenbeschreibung und technische Daten

Die siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage der Firma Martin Systems AG aus Sonneberg/ Soest basiert auf dem Membranbelebungsverfahren und dient zur Reinigung häuslicher Schiffsabwässer. Die Anlage besteht aus einer mechanischen Vorreinigung zur Grobstoffabscheidung durch Feinsiebung, dem BMA<sup>®</sup> - Biomembranreaktor zur biologischen Behandlung des vorgereinigten Abwassers und einer Membrantrennstufe, bestehend aus getauchten Ultrafiltrationsmembranen, zur Abtrennung des gereinigten Abwassers vom belebtem Schlamm. Zur Vorbehandlung von Teilstömen wie bspw. Küchenabwässer kann die Abwasserbehandlungsanlage mit einem Fettabscheider ergänzt werden. Die Steuerung der Anlage erfolgt vollautomatisch.



**Abbildung 2: Funktionsschema siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage**

Die Beschickung der Anlage erfolgt über eine trocken aufgestellte selbstansaugende Zuspaisepumpe mit Schneideinrichtung. Die Schneideinrichtung wurde gewählt, um ein häufiges Verblocken oder Verstopfen der Pumpe zu verhindern. Die ungelösten organischen und anorganischen Abwasserinhaltsstoffe werden in der mechanischen Behandlungsstufe durch Feinsiebung zurückgehalten. Die dabei anfallenden Grobstoffe werden in einem Sammelbehälter (Grobstoffsammelzelle) gespeichert und sind mit dem im Bioreaktor anfallenden Überschussschlamm an Land zu entsorgen. Die Reinigung des Feinsiebs erfolgt durch eine automatisierte Siebreinigung.

Das mechanisch gereinigte Abwasser fließt im freien Gefälle dem Membranbioreaktor zu. Der Reaktor ist in zwei Kammern, Belebungs-kammer und Filterkammer, aufgeteilt. Das Abwasser wird nach dem Belebungsverfahren biologisch durch Mikroorganismen gereinigt. Der Eintrag des erforderlichen Sauerstoffs zur Versorgung der aeroben Mikroorganismen erfolgt über ein Belüftungsgebläse, das über eine im Bioreaktor integrierte Sauerstoffmesssonde gesteuert wird. Die eingetragene Luft wird über feinblasige Rohrmembranbelüfter im Bioreaktor flächendeckend verteilt. Die biologische Stufe ist auf Kohlenstoffelimination ausgelegt. Belebungs- und Filterkammer sind über eine Tauchwand voneinander getrennt, die Rezirkulation des belebten Schlammes erfolgt über eine trocken aufgestellte selbstansaugende Rezirkulationspumpe. Die Durchmischung des belebten Schlammes im Bioreaktor erfolgt durch beide installierte Belüftergebläse. Rührwerke wurden nicht installiert.

Die Abtrennung des gereinigten Abwassers vom belebten Schlamm erfolgt über getauchte Ultrafiltrationsmembranen, die in insgesamt vier Filtern in der Filterkammer aufgestellt wurden. Jeweils zwei Filter bilden dabei eine Einheit (Filterstraße), die zum Teil unabhängig voneinander betrieben werden können. Über ein Spülgebläse wird Luft zur Reinigung der Membranoberflächen eingetragen und über einen unter den Modulen angeordneten Anströmfuß verteilt. So wird einer Verstopfung der Membranen entgegengewirkt. Bei den eingesetzten Ultrafiltrationsmembranen handelt es sich um organische, polymere Flachmembranen, die beidseitig auf einen Membranträger in Sandwichbauweise aufgeschweißt sind. Die Filtration erfolgt von außen nach innen, wobei das Filtrat über ein Drainagesystem mittels Unterdruck abgesaugt wird.

Der durch das Wachstum von Mikroorganismen entstehende Überschussschlamm wird durch Aufkonzentrierung im Bioreaktor gespeichert und ist periodisch an Land abzugeben.

Die technischen Daten zur Schiffskläranlage sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7: Technische Auslegungsdaten siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage**

<b>Abmessungen</b>		
Länge	3.450	mm
Breite	2.800	mm
Höhe	2.320	mm
Raummaße	22,41	m <sup>3</sup>
Gewicht leer	3.300	kg
Gewicht Anlage gefüllt	ca. 14.000	kg
<b>Anlagenaufbau /Behandlungsstufen</b>		
<b>Vorklärung</b>	<b>Feinsiebreehen zur Grobstoffabscheidung</b>	
Spaltweite Feinsiebreehen	1	mm
Speichervolumen Grobstoffbehälter	0,5	m <sup>3</sup>
<b>Biologische Behandlungsstufe</b>	<b>Membranbioreaktor bestehend aus Belebungs- und Filterkammer</b>	
Volumen Membranbioreaktor	10	m <sup>3</sup>
Volumen Belebungs-kammer	5	m <sup>3</sup>
Volumen Filterkammer	5	m <sup>3</sup>
Belüftungsgebläse zweistufiger Seitenkanalverdichter	100	Nm <sup>3</sup> /h Volumenstrom
Spülgebläse zweistufiger Seitenkanalverdichter	144	Nm <sup>3</sup> /h Volumenstrom
Rohrmembranbelüfter	11	Stück
<b>Membrantrennstufe</b>	<b>Filter siClaro Typ FM 642</b>	
Anzahl Filter	4	Stück
Filterfläche/Filter	50	m <sup>2</sup>
Filterfläche gesamt	200	m <sup>2</sup>
Filtratpumpen	2	Stück
Förderstrom Filtratpumpe	3,6	m <sup>3</sup> /h

**Tabelle 7: Technische Auslegungsdaten siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage (Fortsetzung)**

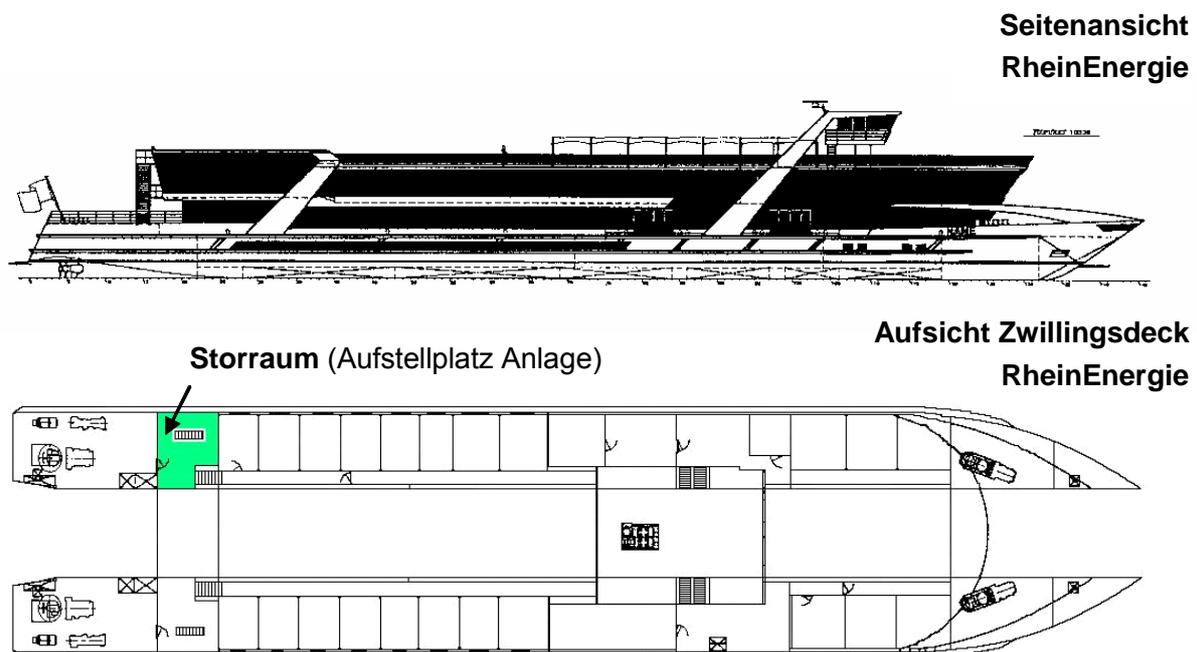
<b>Daten Filter</b>		
Membranmodule	8	Stück Flachmembrane
Filterfläche je Modul	6	m <sup>2</sup>
Trenngrenze (MWCO)	150	kDa
Flux	12	l/(m <sup>2</sup> /h)
TMP	≤ 200	mbar
Werkstoff/Fabrikat	org. Polymer/MartinSystems	
<b>Bemessungsdaten</b>		
Bemessungsparameter	Anlage ist auf Kohlenstoffelimination ausgelegt (BSB <sub>5</sub> )	
mittlere Betriebslast	16,8	kg BSB <sub>5</sub> /d
Spitzenlast	23,0	kg BSB <sub>5</sub> /d
mittlerer Volumenstrom	35,0	m <sup>3</sup> /d
maximaler Volumenstrom	55,0	m <sup>3</sup> /d (auf 48h begrenzt)
maximaler Volumenstrom	2,3	m <sup>3</sup> /d (auf 48h begrenzt)
<b>Ablaufanforderungen</b>		
BSB <sub>5</sub>	40	mg/l
CSB	180	mg/l

Die siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage wird füllstandsgesteuert betrieben. Erst bei Erreichen eines vorab definierten minimalen Füllstands im Bioreaktor wird frisches Abwasser der Anlage zugepumpt. Die Durchsatzleistung der Anlage selbst wird über die Filtratpumpen durch Einstellung von Laufzeiten und Filtrationsleistungen vorgegeben. Die Einstellungen erfolgen manuell. Übersteigt der Abwasseranfall die eingestellte Durchsatzleistung ist eine Zwischenspeicherung des Abwassers in einem vorgeschalteten Sammelbehälter erforderlich. Die Anlage geht in einen so genannten Stand-By Betrieb über, wenn im vorgeschalteten Sammelbehälter kein Abwasser mehr „zur Verfügung“ steht, d.h. wenn die eingestellte Durchsatzleistung größer als der momentane Abwasseranfall ist. Beim Stand-By Betrieb schalten die

Filtratpumpen automatisch ab, so dass ein Leerfiltrieren der Anlage verhindert wird. Der im Bioreaktor vorhandene belebte Schlamm wird im Stand-By Betrieb intervallweise belüftet, um den Abbau der Abwasserinhaltsstoffe zu drosseln bzw. die Durchmischung aufrecht zu erhalten.

## 6.2 Technische Integration der siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasseraufbereitungsanlage in das Abwasserentsorgungssystem der RheinEnergie

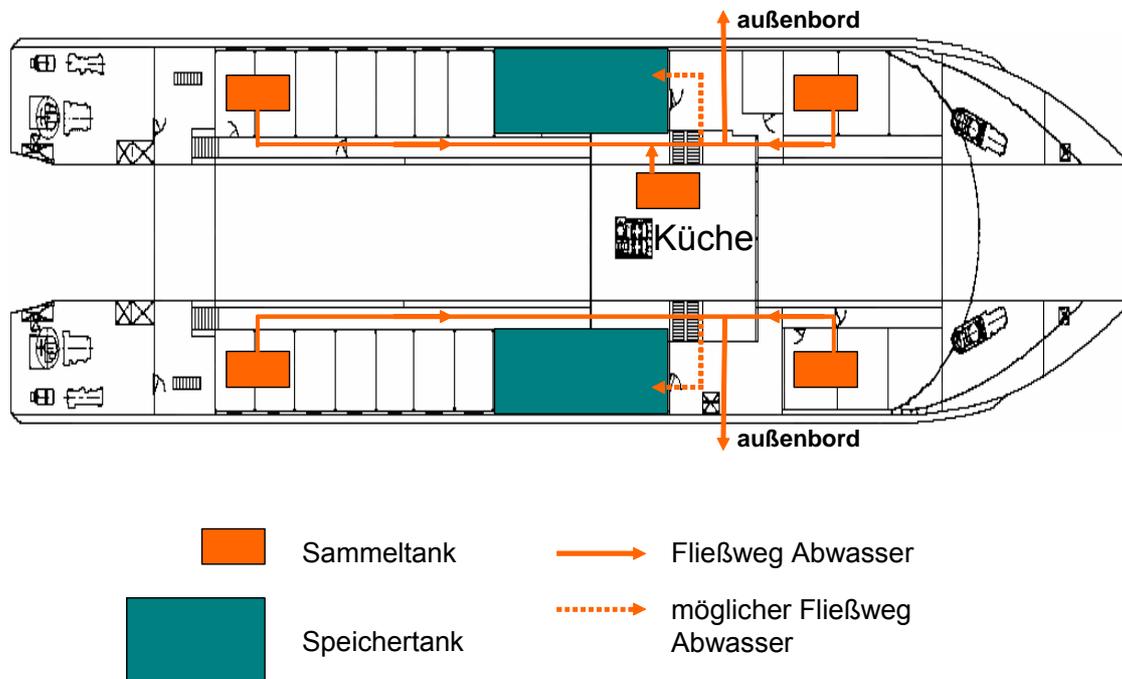
Als Aufstellplatz der Abwasserbehandlungsanlage wurde der hintere Storraum im backbordseitigen Schiffsheck der RheinEnergie vorgesehen. Der Zugang zum hinteren Storraum konnte nur über eine Treppe vom Hauptdeck aus erfolgen, so dass die komplette Schiffskläranlage in Segmentbauweise gebaut werden musste, damit ein nachträglicher Einbau möglich wurde.



**Abbildung 3: Aufstellplatz siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage in Zwillingssdeck auf der RheinEnergie**

Aufgrund der Katamaranbauweise und der Länge der MS RheinEnergie war eine Auslegung des Abwasserentsorgungssystems an Bord mit zentral gelegenen Sammel tanks nicht möglich. Das Entsorgungssystem musste für jeden Schiffsrumpf separat ausgeführt werden. Das im so genannten Zwillingssdeck installierte Abwasserentsorgungssystem bestand aus insgesamt fünf Abwassersammelzellen, angeordnet im Bug-, Mittel- und Heckbereich des Schiffes und zwei Abwasserspeichertanks, die optional betrieben werden konnten. Die Sammelzellen verfügten über ein Volumen von jeweils 500 Liter, die Speichertanks über ein Volumen von jeweils 35 m<sup>3</sup>.

Pro Schiffseite waren die Abwassersammelzellen über eine Verbundleitung mit dem jeweiligen Abwasserspeichertank verbunden. Über entsprechende Ventilsteuerung bestand die Möglichkeit, die Abwässer in die Speichertanks oder direkt nach außenbords zu leiten. Die Abwässer aus den Personalkabinen und des Gastronomiebetriebes (Küchenabwässer) flossen im freien Gefälle in die fünf Abwassersammelzellen. Bei Erreichen eines maximalen Füllstandes in den Sammelzellen wurde das Abwasser nach außenbords gepumpt. Die Abwasserspeichertanks wurden nicht in Betrieb genommen. Das ehemalige Abwasserentsorgungssystem ist in Abbildung 4 dargestellt und die damaligen Entsorgungspfade der einzelnen Abwasserteilströme sind in Tabelle 8 beschrieben.



**Abbildung 4: Abwasserentsorgungssystem an Bord der RheinEnergie vor Installation der Schiffskläranlage**

Das neue Abwasserentsorgungskonzept auf der RheinEnergie sah vor, dass das vorhandene Abwasserentsorgungssystem möglichst beibehalten werden konnte und nur an notwendigen Schnittstellen Umbaumaßnahmen durchgeführt wurden, die für einen Betrieb einer Abwasserbehandlungsanlage an Bord der RheinEnergie notwendig

waren. Neben Fundamentierungsarbeiten, Rohranpassungen und Elektrokabelverlegungen für die Anlagensteuerung wurden folgende wesentliche Umbaumaßnahmen im Abwasserentsorgungssystem durchgeführt:

1. Installation siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage im hinteren backbordseitigen Storraum inklusive Verlegung einer Filtrat-Ablaufleitung nach außenbords.
2. Installation einer Beschickungsleitung vom backbordseitigen Abwasserspeichertank aus zwecks Kopplung der siClaro-BMA<sup>®</sup> - Abwasserbehandlungsanlage mit Entsorgungssystem der RheinEnergie.
3. Installation einer Transferleitung zwecks Kopplung beider Abwasserspeichertanks.
4. Nachrüstung beider Abwasserspeichertanks mit Belüftungssystemen.
5. Nachrüstung beider Abwasserspeichertanks mit Füllstandsmesssonden.
6. Verlegung der Abwasserleitungen der Gästetoiletten direkt in den steuerbordseitigen Abwasserspeichertank.

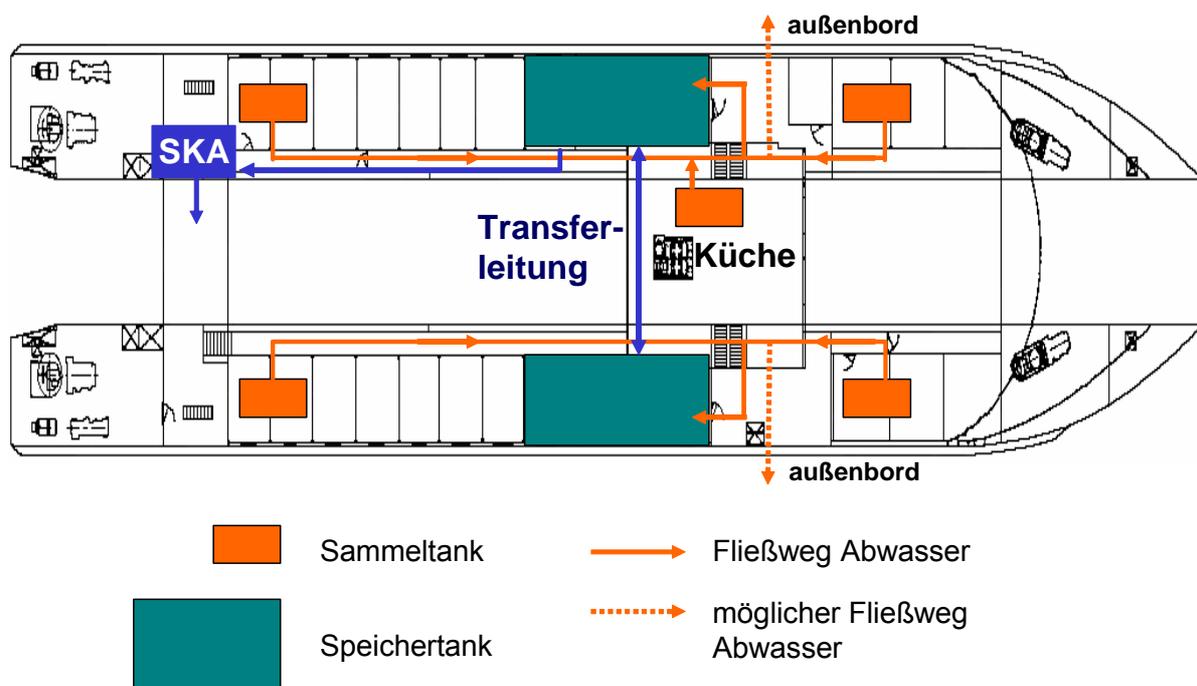
Wie bereits in Kapitel 6.1 beschrieben, wird der Zulauf zur Abwasserbehandlungsanlage manuell vorgegeben und ist damit steuerungstechnisch gesehen unabhängig vom eigentlichen Abwasseranfall. Abwasserzulaufspitzen müssen demzufolge abgepuffert und das überschüssige Abwasser zwischengespeichert werden. Als Zwischenspeicher wurden die beiden vorhandenen Abwasserspeichertanks in Betrieb genommen. Um ein vollständiges Absetzen der Feststoffe zu verhindern, wurden beide Tanks mit Belüftungssystemen ausgerüstet, die optional in Betrieb genommen werden konnten.

Beide Abwasserspeichertanks mussten durch eine direkte Transferleitung miteinander verbunden werden, damit eine Behandlung der im steuerbordseitigen Schiffsbereich anfallenden Abwässer auch gewährleistet werden konnte. Durch zusätzliche Installationen von Abwasserpumpen auf beiden Seiten der Transferleitung wurde ein Niveaueausgleich in beiden Abwasserspeichertanks möglich. Zur Erfassung der Füllstände wurden jeweils Füllstandsmesssonden in die Tanks integriert.

Da das Betriebskonzept der Abwasserbehandlung an Bord der RheinEnergie einen ständigen Betrieb der Abwasserspeichertanks vorsah, wurden von Seiten der KD

zusätzlich die Abwasserleitungen der Gästetoiletten direkt in den steuerbordseitigen Tank geleitet und damit die Sammel tanks im Schiffsbug übergangen. Im ersten Betriebsjahr hatte sich herausgestellt, dass die Sammelzellen bzw. die Abwasserpumpen in den Sammelzellen für die Aufnahme der Abwässer aus den Gästetoiletten zu gering dimensioniert waren und die Gefahr von Ausfällen bestanden hatte. Ein Ausfall hätte bedeutet, dass die Gästetoiletten außer Betrieb hätten genommen werden müssen. Diese Umbaumaßnahme war somit keine notwendige Maßnahme im Rahmen der Anlagenintegration sondern diente allein zur Sicherung und Aufrechterhaltung des Schiffbetriebs.

Das neue Abwasserentsorgungssystem ist in Abbildung 5 dargestellt und die neuen Entsorgungspfade der einzelnen Abwasserteilströme sind in Tabelle 8 beschrieben.



**Abbildung 5: Abwasserentsorgungssystem an Bord der RheinEnergie nach Installation der Schiffskläranlage**

**Tabelle 8: Übersicht der Entsorgungspfade der Abwasserteilströme vor und nach Installation der Schiffskläranlage**

Abwasserteilstrom	Abwasserentsorgungspfad	
	vorher	nachher
Abwasser aus Küche	über Sammel-tank Küche nach außenbords	über Sammel-tank Küche, Speichertank backbord zur SKA
Abwasser aus Gästetoiletten	über Sammel-tanks im Schiffsbug nach außenbords	direkte Einleitung in Speichertank steuerbord, über Speichertank backbord zur SKA
Abwasser aus Personalkabinen	über Sammel-tanks im Schiffsbug und -heck nach außenbords	über Sammel-tanks im Schiffsbug und -heck, Speichertank steuerbord und Speichertank backbord zur SKA
Abwasser aus Waschmaschinen	über backbordseitigen Sammel-tank im Schiffsheck nach außenbords	über backbordseitigen Sammel-tank im Schiffsheck, Speichertank steuerbord zur SKA

### 6.3 Kurzdarstellung des Anlageneinbaus

Anfang Februar 2005 wurde der Projektpartner Martin Systems mit dem Bau einer Membranbelebungsanlage und anschließender Integration in die RheinEnergie beauftragt. Vorab wurden notwendige Umbaumaßnahmen im vorgesehenen Aufstellraum an Bord der RheinEnergie durch den Schiffsbauer der RheinEnergie, DE HOOP LOBITH, durchgeführt. Der Einbau der Schiffskläranlage erfolgte auf der Werft des Schiffbauers. Der Ablauf des Einbaus eines Anlagensegments ist in Abbildung 6 dargestellt.



Bild 1



Bild 2



Bild 3



Bild 4



Bild 5



Bild 6

**Abbildung 6: Einbau der Schiffskläranlagensegmente in den Maschinenraum der RheinEnergie**

Vom 16.02.2005 bis zum 19.02.2005 wurde die Schiffskläranlage angeliefert und eingebaut. Aufgrund der örtlichen Verhältnisse an Bord der RheinEnergie musste die Schiffskläranlage in Segmenten ausgeführt werden, da nur so ein Einbau in den Maschinenraum möglich war. Die Größe der einzelnen Anlagensegmente wurde so gewählt, dass sie über die normalen Durchgangsöffnungen eingebracht werden konnten. Die Schiffskläranlage wurde auf einem Fundamentrahmen installiert.

In den Monaten März und April 2005 erfolgten die Installation des Filtratsystems, die elektrische Verkabelung und Funktionsüberprüfungen der Anlagenaggregate sowie eine Dichtigkeitsprüfung der Schiffskläranlage mit Frischwasser.



**Abbildung 7: Installation der siClaro<sup>®</sup> - Membranfilter in die Filterkammer**

Die Inbetriebnahme der Anlage inklusive Animpfung mit Belebtschlamm erfolgte im Zeitraum vom 18. bis 29.04.2005, so dass mit Beginn der Hauptsaison Anfang Mai die Membranbelebungsanlage in Betrieb genommen werden konnte.

## 7 Beschreibung des zweijährigen Anlagenbetriebs

Die Schiffskläranlage wurde nach ihrer Inbetriebnahme im April 2005 während der Hauptsaison 2005, der Nebensaison 2005/2006 sowie der Hauptsaison 2006 im Rahmen des Forschungsvorhabens an Bord der RheinEnergie betrieben. Die festgelegten Zeiträume der jeweiligen Saison sind in Tabelle 9 dargestellt.

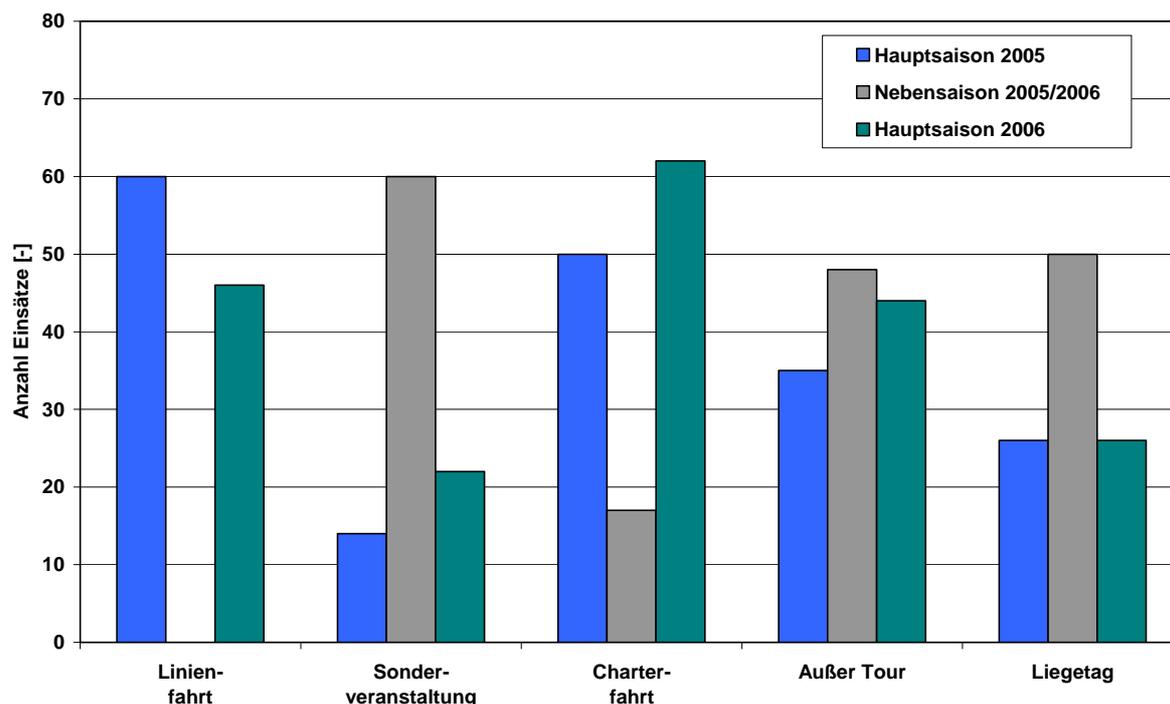
**Tabelle 9: Haupt- und Nebensaisons auf der RheinEnergie**

Saison	von	bis	Anzahl Tage
Hauptsaison 2005	30.4.2005	03.10.2005	156
Nebensaison 2005/2006	04.10.2005	28.4.2006	206
Hauptsaison 2006	29.4.2006	4.10.2006	158

### 7.1 Einsätze der RheinEnergie

In dem Zeitraum von insgesamt 520 Tagen wurde die RheinEnergie 132 mal im Linienverkehr und 230 mal für Sonderveranstaltungen und Charterfahrten eingesetzt. Zum Erreichen der jeweiligen Einsatzorte mussten insgesamt 124 so genannter Außer Tour Fahrten eingelegt werden, bei denen keine Fahrgäste befördert werden. Zusätzlich wurden 117 Liegetage zwecks Instandsetzung des Schiffes bzw. für Vorbereitungen für Großveranstaltungen oder für Betriebsferien eingelegt.

Während die RheinEnergie im Linienverkehr Fahrtrouten mit vorab festgelegten Haltestationen zum Ein- und Aussteigen der Fahrgäste befährt, sind Sonderveranstaltungen und Charterfahrten zumeist dadurch geprägt, dass die Fahrgäste zu Beginn der Veranstaltung das Schiff betreten und am Ende das Schiff am gleichen Ort (Haltestelle) wieder verlassen. Im Vergleich zu Linienfahrten ist die Gästezahl also konstant. In Abbildung 8 sind die Einsätze der RheinEnergie in Abhängigkeit der entsprechenden Fahrtsaison dargestellt. Als Datenbasis wurden die Schiffsbewegungslisten der KD aus den Jahren 2005 und 2006 herangezogen



**Abbildung 8: Einsätze der RheinEnergie im Zeitraum des Forschungsvorhabens**

Im Jahr 2006 ging die Tendenz mehr und mehr zu Sonderveranstaltungen und Charterfahrten über, da aufgrund der Größe der RheinEnergie ein Einsatz im Linienverkehr nur bedingt rentabel ist. Werden nur die Fahrten mit Fahrgästen berücksichtigt, ergeben sich für die Saisons abschließend folgende prozentuale Aufteilungen.

**Tabelle 10: Prozentuale Aufteilung der Fahrten mit Fahrgästen**

Saison	Summe Einsätze gesamt [-]	Anteil Linien- fahrt [%]	Anteil Sonder- veranstaltung [%]	Anteil Charter- fahrt [%]
Hauptsaison 2005	124	49	11	40
Nebensaison 2005/2006	77	0	78	22
Hauptsaison 2006	130	35	17	48

## 7.2 Wasserverbrauch und Abwasseranfall an Bord der RheinEnergie

Der Wasserbedarf an Bord der RheinEnergie wird über zwei Wasserversorgungssysteme gedeckt. Trinkwasser wird je nach Bedarf für mehrere Tage an Bord gebunkert. Zusätzlich wird Flusswasser aus der Wasserstraße entnommen, über einen Sandfilter vorbehandelt und als Brauchwasser zur Spülung der Toiletten verwendet (Sanitärwasser).

Zur Erfassung des gesamten Wasserverbrauchs an Bord der RheinEnergie wurden im November 2004 Wasseruhren in die Versorgungsleitungen des Trink- und Brauchwassersystems installiert, die im Untersuchungszeitraum regelmäßig abgelesen wurden. Anfang 2006 wurden für eine kontinuierliche digitale Erfassung des Wasserverbrauchs zusätzlich magnetisch-induktive Durchflussmesser in die Versorgungsleitungen installiert.

An Bord der RheinEnergie können folgende Wasserverbrauchsstellen identifiziert werden:

- Trink- und Sanitärwasser für Gästetoiletten
- Trink- und Sanitärwasser für Personalkabinen mit Nasszellen
- Trinkwasser für Restaurantbetrieb mit bordeigener Küche + Bartheken

In Tabelle 11 ist der Wasserverbrauch an Bord der RheinEnergie im Untersuchungszeitraum dargestellt.

**Tabelle 11: Wasserverbrauch an Bord der RheinEnergie im Untersuchungszeitraum**

Saison	von	bis	Anzahl Tage	Wasserverbrauch	
				Gesamt [m <sup>3</sup> ]	Mittel [m <sup>3</sup> /d]
Hauptsaison 2005	30.4.05	03.10.05	157	2.937	18,7
Nebensaison 2005/2006	04.10.05	28.4.06	207	1.836	8,9
Hauptsaison 2006	29.4.06	4.10.06	159	2.947	18,5

Das Verhältnis Trinkwasser zu Sanitärwasser lag in der Hauptsaison jeweils bei 55% zu 45%. Während der Nebensaison lag das Verhältnis bei 63% zu 37%. Zurückgeführt werden kann dies auf die unterschiedlichen Veranstaltungen, die in der jeweiligen Zeit stattgefunden hatten. Die Nebensaison war vorwiegend durch die Dinner-show „Ganymée on Water“ mit einem verstärkten Trinkwasserverbrauch im Restaurant und Küchenbetrieb geprägt. Der mittlere Wasserverbrauch während dieser Zeit lag bei etwa 14 m<sup>3</sup>/d.

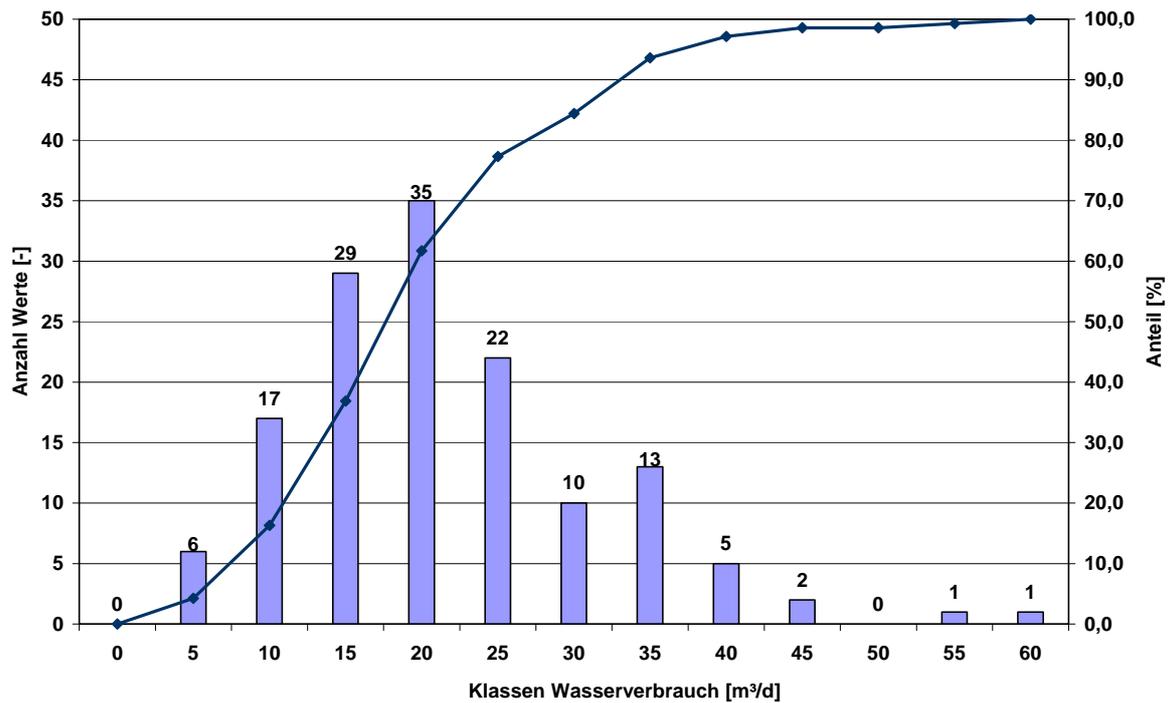
Zur Reinigung der Schiffsdecks insbesondere des Sonnendecks wird Wasser aus dem Fluss verwendet, das über das Feuerlöschsystem bezogen wird. Der Verbrauch von so genanntem Feuerlöschwasser wurde nicht ermittelt.

Zusätzlich wurde für die Hauptsaison 2006 der tägliche Wasserverbrauch an Bord der RheinEnergie ermittelt. Eine Auswertung dieser Daten ergab folgende statistische Kenngrößen.

**Tabelle 12: Statistische Kenngrößen zum täglichen Wasserverbrauch an Bord der RheinEnergie in der Hauptsaison 2006**

	Dim	Frischwasser	Brauchwasser	Gesamt
<b>Anzahl Messwerte</b>	-	141	141	141
<b>Min</b>	m <sup>3</sup> /d	2,5	0,4	3,1
<b>Max</b>	m <sup>3</sup> /d	19,5	37,8	57,1
<b>Mittelwert</b>	m <sup>3</sup> /d	10,7	8,3	19,0
<b>Median</b>	m <sup>3</sup> /d	10,5	6,1	17,1
<b>25%-Quartil</b>	m <sup>3</sup> /d	8,5	3,6	12,4
<b>75%-Quartil</b>	m <sup>3</sup> /d	13,1	10,9	24,0
<b>85%-Quartil</b>	m <sup>3</sup> /d	15,3	15,6	30,5

Die Häufigkeiten einzelner Messwerte in Wasserverbrauchsklassen mit Breiten von 5 m<sup>3</sup>/d sowie der entsprechende prozentuale Anteil sind für den Gesamtwasserverbrauch in nachstehender Abbildung dargestellt.



**Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung des täglichen Wasserverbrauchs an Bord der RheinEnergie in der Hauptsaison 2006**

Zu berücksichtigen ist, dass nur Messwerte für 141 Tage bei insgesamt 159 Saison-  
 tagen zur Auswertung vorlagen. Der Mittelwert aus den 141 Messwerten (19,0 m³/d)  
 lag etwa 0,5 m³/d über dem Mittelwert aus dem gesamten Betrachtungszeitraum  
 (18,5 m³/d). Damit liegen insgesamt die statistischen Kenngrößen etwas über den  
 tatsächlichen Wasserverbrauchsverhältnissen an Bord der RheinEnergie in diesem  
 Zeitraum.

Der Abwasseranfall an Bord der RheinEnergie wurde nicht explizit gemessen. Es  
 kann davon ausgegangen werden, dass der Abwasseranteil bei ca.  $100 \pm 10\%$  des  
 Gesamtwasserverbrauchs liegt. Zusätzliche Wasserverbrauchsquellen liegen im Be-  
 reich der Gästebewirtung (Getränkerverzehr bis zu 3.000 Liter pro Veranstaltung),  
 Senken im Bereich der Küche und der Fensterreinigung.

### 7.3 Betrieb der Schiffskläranlage an Bord der RheinEnergie

Nach Animpfung der Schiffskläranlage mit belebtem Schlamm erfolgte die Inbetriebnahme am 28.04.2005. Die Einfahrphase dauerte anschließend bis zum 30.06.2005, so dass mit dem regulären Anlagenbetrieb Anfang Juli 2005 begonnen werden konnte. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte geprüft werden, inwieweit die Filtrationsleistung der Membrantrennstufe im Vorfeld ausreichend für die Verhältnisse an Bord dimensioniert wurde bzw. inwieweit auf die an Bord vorhandenen Abwasserspeichertanks als Pufferbehälter zurückgegriffen werden musste (vgl. Projektziele aus Kapitel 2). Dazu wurde über den Untersuchungszeitraum in mehreren Phasen durch Einstellung der Filtrationsleistung, Filtrations- und Pausenzeiten eine tägliche Filtrationsleistung zwischen 20 bis 30 m<sup>3</sup>/d vorgegeben. Es wurde geprüft, inwieweit die Filtrationsleistung der Membrantrennstufe stabil verläuft oder aber eine Reduzierung aufgrund eines gestiegenen Transmembrandrucks über dem zulässigen Druck von 200 mbar notwendig war.

Zur Aufrechterhaltung der Filtrationsleistung war vom Anlagenhersteller Martin Systems im Vorfeld vorgesehen worden, die Membranen über den Untersuchungszeitraum dreimal zu reinigen. Insgesamt wurden die Membranen fünfmal gereinigt. Dreimal mussten defekte oder zu stark verschmutzte Membranplatten im Untersuchungszeitraum ausgewechselt werden. Probleme mit dem Abwasserentsorgungssystem führten dazu, dass es bei der Beseitigung dieser Probleme durch die Bordbesatzung zu Fehlbedienungen der Schiffskläranlage kam. So wurde z.B. am 14.07.2006 aufgrund eines Rohrbruches in den Entsorgungsleitungen die Schiffskläranlage fälschlicherweise leer gepumpt. Anschließend wurde sie ohne ausreichende Biomasse wieder in Betrieb genommen, so dass schließlich Rohabwasser filtriert wurde, was wiederum zu einer schnelleren Membranverblockung mit Leistungsminderung führte. Aufgrund einer Fehlbedienung am 13.07.2005 wurde die Beschickungspumpe der Membranbelebungsanlage im manuellen Modus auf Dauerbetrieb gestellt, so dass innerhalb einer Stunde 20 m<sup>3</sup> Abwasser durch die Anlage und über die Entlüftungsleitung nach außenbords flossen. Dies führte ebenfalls zu einem Abfall der Biomasse mit der Konsequenz einer schnelleren Verblockung und einer Reduzierung der Filtrationsleistung.

Die Schiffskläranlage wurde jeweils bis zur nächsten Membranreinigung mit einer reduzierten Durchsatzleistung weiter betrieben. Durch eine kontinuierliche Einweisung des Bordpersonals in die wesentlichsten Bedienelemente konnte über den Untersuchungszeitraum jedoch eine deutliche Verbesserung der Anlagenbedienung an Bord erreicht werden.

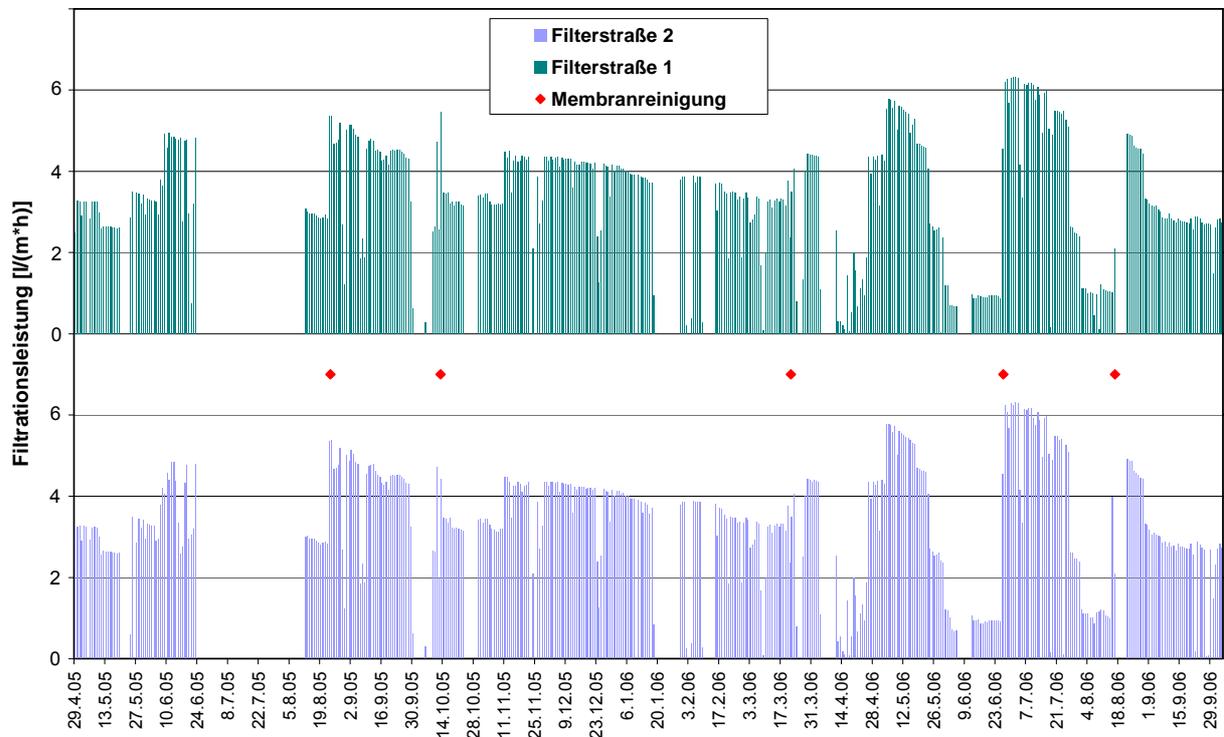
Defekte Membranen wurden auf Fehler bei der Herstellung der Membranen zurückgeführt. Defekte Membranen wurden zeitnah durch den Anlagenhersteller Martin Systems ersetzt. Der Umstand, dass an Bord kein Fettabscheider zur Vorbehandlung des Küchenabwassers eingesetzt wurde, führte letztendlich zu einer stetigen Zunahme von Membranverblockungen und zu einer Verschlechterung der Effektivität der Membranreinigungen. Mitte August 2006 wurden zu Versuchszwecken vom Anlagenhersteller Martin Systems bei der fünften Membranreinigung stark verschmutzte Membranplatten durch neue ausgetauscht. Ein daraufhin modifiziertes Membranreinigungsverfahren sollte noch im November oder Dezember im Jahr 2006 im Rahmen des Forschungsvorhabens der wissenschaftlichen Begleitung an Bord der RheinEnergie getestet werden.

Einen Überblick über den Anlagenbetrieb hinsichtlich untersuchter Filtrationsleistungen gibt Tabelle 13 auf nachstehender Seite.

**Tabelle 13: Übersicht des Schiffskläranlagenbetriebes  
 an Bord der RheinEnergie**

Betriebsverlauf	Datum		Vorgabe Durchsatz- leistung	Reduzierung Durchsatzleistung	
	von	bis		Q <sub>d,SOLL</sub>	Datum
	am		[m <sup>3</sup> /d]		[m <sup>3</sup> /d]
Inbetriebnahme	28.04.05				
Einfahrphase	29.04.05	30.06.05	16 - 17		
Orientierungsphase	01.07.05	23.08.05	20	9.8.05	12,6
Manuelle Fehlbedienung	13.07.05				
Membranreinigung 1	23.08.05				
Untersuchungsphase 1 Hauptsaison 2005	24.08.05	30.09.05	25		
Membranreinigung 2 + Austausch defekte Membranen	12.10.05				
Untersuchungsphase Nebensaison 2005	12.10.05	27.04.06	20		
Membranreinigung 3 + Austausch defekte Membranen	21.03.06	23.03.06			
Untersuchungsphase 1 Hauptsaison 2006	28.04.06	25.06.06	24	ab 9.5.06	21 bis 6
Membranreinigung 4	26.06.06				
Untersuchungsphase 2 Hauptsaison 2006	27.06.06	15.08.06	30	28.7.06	6
Rohrbruch	14.07.09				
Membranreinigung 5 + Austausch stark ver- schmutzte Membranen	16.08.06	22.08.06			
Untersuchungsphase 3 Hauptsaison 2006	23.08.06	04.10.06	24	29.8.2006	17

Der Verlauf der Filtrationsleistungen (Brutto-Permeatflux) der Filterstraßen 1 und 2 ist in Abbildung 10 dargestellt.

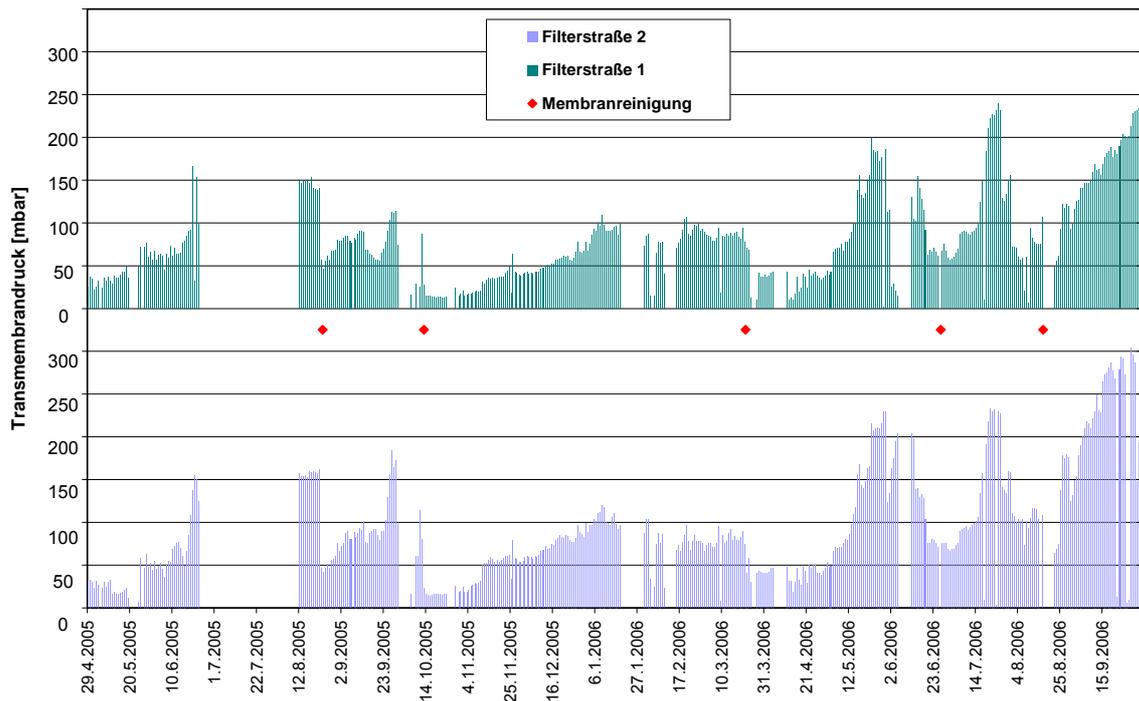


**Abbildung 10: Filtrationsleistungen (Brutto-Permeatflux) der Filtrationsstraßen 1 + 2 im Untersuchungszeitraum 2005/2006**

In weiten Teilen lagen die Filtrationsleistungen um  $4 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  (Brutto-Permeatflux). Kurzfristig konnten Leistungen von  $5$  bis  $5,8 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  (Brutto-Permeatflux) erreicht werden, um die vorgegebenen Abwasservolumenströme von  $20$  bis  $25 \text{ m}^3/\text{d}$  zu behandeln. Das Verhältnis Filtrationszeit zu Pausenzeit variierte dabei von  $3$  zu  $1$  bis  $7$  zu  $1$ . Änderungen bei der automatischen Datenerfassung an Bord Anfang Juli 2005 führte zu einem vollständigen Datenverlust für den Zeitraum  $24.06.05$  bis  $11.08.05$ , so dass der Zeitraum der Orientierungsphase nur bedingt auswertbar ist. Der erste Membrandefekt Anfang Oktober 2005 führte dazu, dass die erste Untersuchungsphase abgebrochen werden musste und die Verläufe der Filtrationsleistungen und Transmembrandrücke nicht weiter verfolgt werden konnten. Eine stabile Filtrationsleistung konnte während der Veranstaltung „Ganymée on Water“ in der Nebensaison 2005/2006 ( $01.11.05$  bis  $17.01.06$ ) erreicht werden. Der zu behandelnde tägliche Abwasservolumenstrom wurde dabei zu  $20 \text{ m}^3/\text{d}$  vorgegeben.

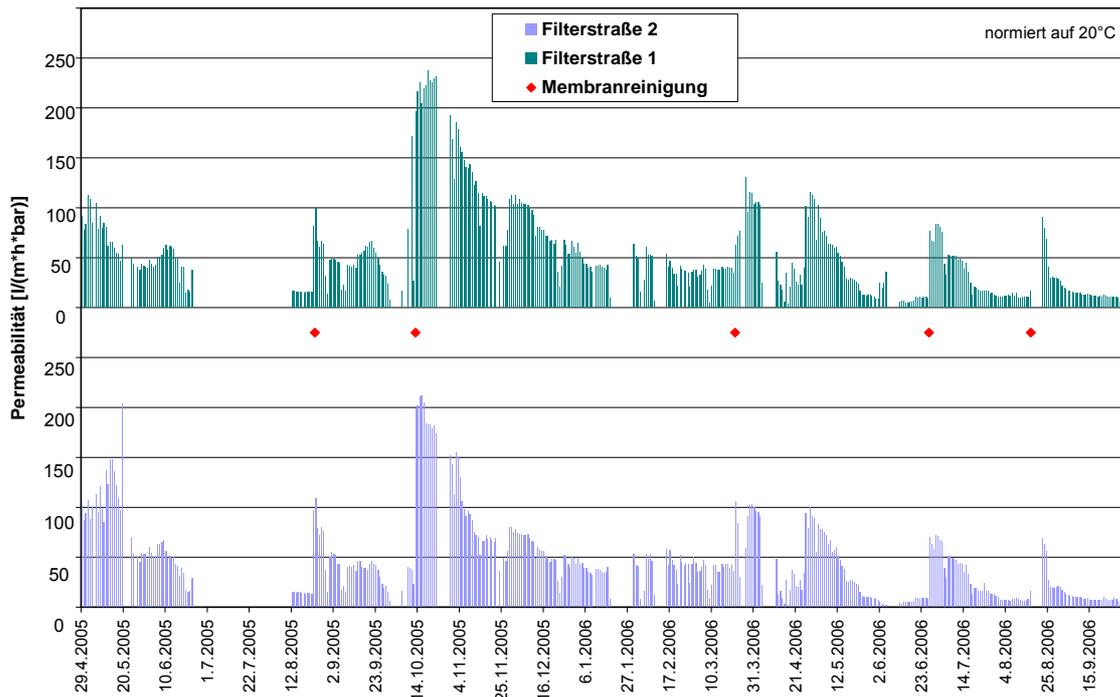
Um Abwasservolumenströme von bis zu 30 m<sup>3</sup>/d zu erreichen, wurde ab der Hauptsaison 2006 damit begonnen, nach Membranreinigungen den Brutto-Permeatflux auf 6 l/(m<sup>2</sup>\*h) einzustellen. Der erste Versuch nach der dritten Membranreinigung ab dem 28.04.2006 musste jedoch bereits nach 10 Tagen wieder abgebrochen werden, da Membranverblockungen zu einem erhöhten Anstieg der Transmembrandrücke in den Filtrationsstraßen führte, die erst nach Einstellung einer Leistung von 1 l/(m<sup>2</sup>\*h) zurückgingen. Der zweite Versuch nach der vierten Membranreinigung am 26.6.2006 konnte aufgrund der oben beschriebenen Schwierigkeiten beim Betrieb der Schiffskläranlage (Leerpumpen der Anlage am 14.07.2006) auch nicht – wie geplant - bis zum Ende der Hauptsaison 2006 verfolgt werden. Auch hier musste die Leistung ab dem 21.07.2006 auf unter 1 l/(m<sup>2</sup>\*h) reduziert werden, um den zulässigen Transmembrandruck von max TMP < 200 mbar einzuhalten.

Nach der darauf folgenden fünften Membranreinigung am 16.08.2006 musste die Leistung kurze Zeit später erneut von 5 auf etwa 3 l/(m<sup>2</sup>\*h) reduziert werden. Die Membranverblockungen hatten im Laufe der Betriebszeit so zugenommen, dass die Wirksamkeit dieser Membranreinigung nur von kurzer Dauer war und bereits Anfang September der maximale TMP erneut überschritten wurde. Der Verlauf der Transmembrandrücke in den Filtrationstraßen 1+ 2 ist in Abbildung 11 dargestellt.



**Abbildung 11: Transmembrandrücke der Filtrationsstraßen 1 + 2  
im Untersuchungszeitraum 2005/2006**

Aus den ermittelten Filtrationsleistungen und Transmembrandrücken ergeben sich für den Untersuchungszeitraum folgende Permeabilitätsverläufe (normiert auf eine Temperatur des Filtrats von 20°C) für die Membranen der Straßen 1 + 2.



**Abbildung 12: Permeabilitäten der Membranen der Filterstraßen 1 + 2  
im Untersuchungszeitraum 2005/2006**

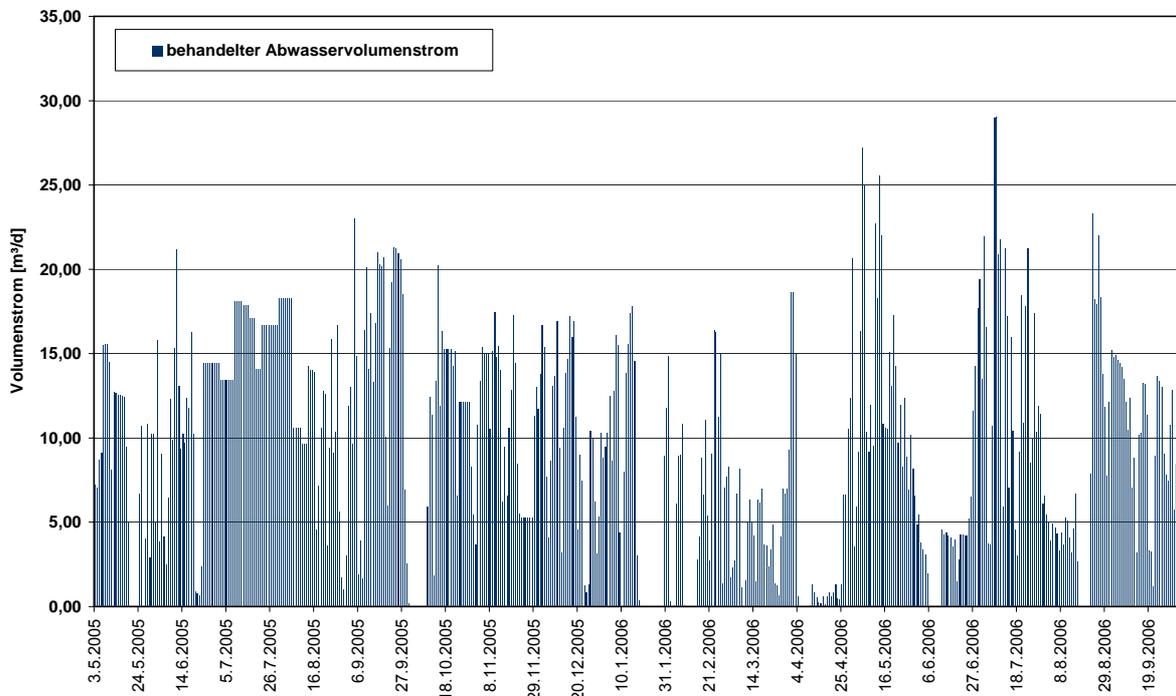
Nach der ersten Membranreinigung lagen die Permeabilitäten in den Filterstraßen um die  $50 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$  und damit in etwa wieder auf dem Niveau der Einfahrphase. Eine sehr gute Reinigungsleistung konnte mit der zweiten Membranreinigung zu Beginn der Nebensaison 2005/2006 erzielt werden. In Kombination mit einer geringeren vorgegebenen Durchsatzleistung von  $20 \text{ m}^3/\text{d}$  konnte die Anlage konstant auf diesem Niveau betrieben werden, die Permeabilitäten gingen jedoch von rund 200 auf unter  $50 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$  zurück. Anschließend kann an den Verläufen der Permeabilitäten abgelesen werden, dass die Wirksamkeit der Membranreinigungen drei bis fünf immer mehr nachließen. Am Ende des Untersuchungsvorhabens lagen die Permeabilitäten bei 10 bis  $20 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ . Ursachen der erhöhten Membranverblockungen lagen auch in der Betriebsweise der Schiffskläranlage bezogen auf die Wahl des Trockensubstanzgehaltes bzw. der Schlamm- und Raumbelastungen. Eine Betrachtung dieser Ursachen erfolgt gemäß den Projektzielen im Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben der wissenschaftlichen Begleitung, der im April 2007 erstellt wird.

In Tabelle 14 sind die behandelten Abwasservolumenströme im Untersuchungszeitraum dargestellt.

**Tabelle 14: Behandelte Abwasservolumenströme an Bord der RheinEnergie im Untersuchungszeitraum**

Saison	von	bis	Anzahl Tage	behandelter Abwasservolumenstrom	
				Gesamt [m <sup>3</sup> ]	Mittel [m <sup>3</sup> /d]
Hauptsaison 2005	30.4.05	03.10.05	157	1.945	12,4
Nebensaison 2005/2006	04.10.05	28.4.06	207	1.532	7,4
Hauptsaison 2006	29.4.06	4.10.06	159	1.567	9,9

Ein Vergleich der behandelten Abwasservolumenströme mit dem Wasserverbrauch an Bord der RheinEnergie erfolgt in Kapitel 8 „Beurteilung des Anlagenbetriebs“. Die täglichen behandelten Abwasservolumenströme im Untersuchungszeitraum sind in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13: Täglich behandelte Abwasservolumenströme an Bord der RheinEnergie**

Der über den Untersuchungszeitraum mittlere Abwasservolumenstrom lag bei 9,6 m<sup>3</sup>/d, die maximale tägliche Filtrationsleistung wurde in der zweiten Untersuchungsphase in der Hauptsaison mit 29,0 m<sup>3</sup>/d erreicht.

## 8 Beurteilung des Anlagenbetriebs

Bei der Beurteilung des Anlagenbetriebs während des Untersuchungsvorhabens muss differenziert werden zwischen dem Anlagenbetrieb der Schiffskläranlage und dem Betrieb des gesamten Abwasserentsorgungssystems an Bord der RheinEnergie. Werden als Beurteilungsgrundlage die Verhältnisse zwischen Wasserverbrauch/Abwasseranfall und behandelte Abwasservolumenströme herangezogen, muss berücksichtigt werden, dass nicht das gesamte anfallende Abwasser der Schiffskläranlage zugeleitet werden konnte. Aufgrund von immer wieder auftretenden Rohrverstopfungen mussten Notüberläufe geöffnet werden, damit das Abwasser schadlos abgeleitet werden konnte und nicht den Fahrgastbetrieb an Bord der RheinEnergie empfindlich störte. Mehrmals liefen Gästetoiletten über, da die Entsorgungsleitungen verstopften. Unter der Annahme, dass der Abwasseranfall dem Wasserverbrauch entspricht, ergeben sich folgende Verhältnisse.

**Tabelle 15: Vergleich Wasserverbrauch und behandelte Abwasservolumenströme im Untersuchungszeitraum**

Saison	1) Wasserverbrauch		2) behandelte Abwasservolumenströme		Verhältnis 1 zu 2
	Gesamt [m <sup>3</sup> ]	Mittel [m <sup>3</sup> /d]	Gesamt [m <sup>3</sup> ]	Mittel [m <sup>3</sup> /d]	[%]
Hauptsaison 2005	2.937	18,7	1.945	12,4	66,3
Nebensaison 2005/2006	1.836	8,9	1.532	7,4	83,1
Hauptsaison 2006	2.947	18,5	1.567	9,9	53,5
Gesamt	7.720	14,8	5.044	9,6	65,3

Über den gesamten Untersuchungszeitraum betrachtet, konnten bis zu 2/3 des Wasserverbrauchs/Abwasseranfalls in der Schiffskläranlage behandelt werden.

Werden nur die möglichen zu behandelnden Abwasservolumenströme berücksichtigt, d.h. der Abwasseranteil, der der Schiffskläranlage auch zugeleitet wurde, verschieben sich die Verhältnisse. In den unten aufgeführten Zeiträumen erfolgte eine vollständige Behandlung des zugeleiteten Abwassers bzw. kann davon ausgegangen werden, dass eine vollständige Behandlung des gesamten Abwassers möglich gewesen wäre:

1. Nebensaison 2005: 17.10.2005 – 18.01.2006
2. Hauptsaison 2006: 28.06.2006 – 13.07.2006

Bei dem Zeitraum in der Nebensaison handelt es sich um die Dauer der Veranstaltung „Ganymée on Water“. Im Zeitraum in der Hauptsaison 2006 wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens der wissenschaftlichen Begleitung des Anlagenbetriebes eine Intensivmessphase durchgeführt, in der das gesamte Abwasser behandelt werden sollte. Die Kürze des Zeitraumes in der Hauptsaison wurde durch den Rohrbruch im Entsorgungssystem bestimmt und kann nicht direkt auf eine Leistungsminderung der Schiffskläranlage zurückgeführt werden.

Insgesamt muss jedoch festgehalten werden, dass die installierte Membranfilterfläche von 200 m<sup>2</sup> nicht ausreicht, um mit den erreichten Filtrationsleistungen das gesamte Abwasser an Bord der RheinEnergie behandeln zu können. Ausgelegt war die Membranfilterfläche ursprünglich vom Anlagenhersteller Martin Systems zur Filtration eines täglichen mittleren Abwasservolumenstroms von 35 m<sup>3</sup>/d. Dieser Wert liegt sogar noch über dem 85%-Perzentil-Wert von 30,5 m<sup>3</sup>/d der Hauptsaison 2006. Die zu geringe Filtrationsleistung ist damit nicht auf eine fehlerhafte Dimensionierung zu Beginn des Vorhabens zurückzuführen sondern liegt insbesondere in den speziellen Betriebsbedingungen an Bord der RheinEnergie begründet:

Das im Vorfeld überlegte Schlammmanagement sah eine Überschussschlamm-speicherung durch Aufkonzentrierung im Bioreaktor vor. Dazu sollte der TS-Gehalt im Bereich 8 bis 16 g/l variiert werden. In der Praxis ergaben sich betriebsbedingt (Zeitpunkte der Anlagenüberwachung, Möglichkeiten zur ÜSS-Abgabe) jedoch weitaus höhere Schwankungsbreiten mit dem Umstand, das zeitweise geringe Schlammkonzentrationen (TS ~ 3 g/l) im Bioreaktor auf hohe Schmutzfrachten im Zulauf trafen. Dies führte zu Überlastsituationen der Biologie, wobei im Anschluss an solche hohen

Schlammbelastungsphasen eine Abnahme der Filtrationsleistung der Membranfilter festgestellt werden musste. Als Ursache der Abnahme wird eine durch Überlastung der Biologie hervorgerufene erhöhte EPS-Bildung gesehen, die zu einer schnelleren Verblockung der Membranen geführt hatte. Hinzu kommt die Tatsache, dass die Küchenabwässer nicht durch einen Fettabscheider vorbehandelt wurden und hohe Konzentrationen an lipophilen Stoffen im Zulauf die Membranverblockungen aller Wahrscheinlichkeit nach noch verstärkten. Zurzeit wird davon ausgegangen, dass die hohen Konzentrationen an lipophilen Stoffen im Zulaufwasser zur Schiffskläranlage einen wesentlichen Anteil an den festgestellten Membranverblockungen haben. Obwohl nach den Untersuchungen im Jahr 2004 der Einsatz von Fettabscheidern zur Vorbehandlung der Küchenabwässer als nicht erfolgsversprechend angesehen wurde, hat sich nun gezeigt, dass eine Vorbehandlung der Küchenabwässer notwendig ist. Es wurde im Vorfeld auf die Installation eines Fettabscheiders verzichtet, da sich gezeigt hatte, dass die bisher auf Flusskreuzfahrtschiffen üblicherweise verwendeten Fettabscheider aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse an Bord nicht den deutschen Industrienormen entsprachen und oftmals nur unzureichend funktionierten. Vielmehr sollten die anfallenden Essensreste und Küchenabfälle wie Bratfette und -öle separat gesammelt und entsorgt werden. [5]

Diese Maßnahmen konnten jedoch nur bedingt umgesetzt werden und hatten nicht den notwendigen Erfolg. Eine genauere Betrachtung der lipophilen Stoffe erfolgt im Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben der wissenschaftlichen Begleitung des Anlagenbetriebs.

Es hat sich im Untersuchungszeitraum gezeigt, dass ein Brutto-Permeatflux von 5 bis 6 l/(m<sup>2</sup>\*h) über einen längeren Zeitraum nicht erreicht werden konnte. Mit der vorhandenen Membranfilterfläche und einem Brutto-Permeatflux von 4,5 l/(m<sup>2</sup>\*h) konnte bei den verwendeten Verhältnissen der Filtrations- und Pausenzeiten von 3 zu 1 bis 7 zu 1 bis zu 19,0 m<sup>3</sup>/d Abwasser filtriert werden. Dieser Abwasservolumenstrom entspricht in etwa dem mittleren Wasserverbrauch, der in der Hauptsaison 2006 ermittelt wurde.

Nach Aussage des Anlagenherstellers Martin Systems steht in der Filterkammer noch ausreichend Platz zur Verfügung, um ein weiteres Membranmodul mit einer Filterfläche von 50 m<sup>2</sup> zu installieren. Mit einer gesamten Filterfläche von 250 m<sup>2</sup> könnte mit den gleichen Betriebsparametern ein Abwasservolumenstrom von knapp

24 m<sup>3</sup>/d filtriert werden. Dies entspricht dem oberen Quartil-Wert der ermittelten Wasserverbräuche in der Hauptsaison 2006. Eine Auslegung der Membranfilterfläche nach dem 85%-Perzentil-Wert (30,5 m<sup>3</sup>/d) und mit den vorab beschriebenen Parametern ergibt eine notwendige Membranfilterfläche von 320 m<sup>2</sup>, die deutlich über der möglichen zu installierenden Filterfläche liegt. Es ist ein Brutto-Permeatflux von 6,0 l/(m<sup>2</sup>\*h) bei einem Verhältnis Filtrations- zu Pausenzeit von 0,85 notwendig (Netto-Permeatflux von 5,1 l/(m<sup>2</sup>\*h)), um eine tägliche Filtrationsleistung von 30,5 m<sup>3</sup>/d bei einer vorhandenen Membranfilterfläche von 250 m<sup>2</sup> zu erreichen. Es ist daher ersichtlich, dass an anderen Stellen Veränderungen in der Betriebsstrategie getroffen werden müssen, um die Filtrationsleistungen zu erhöhen.

Neben einer Erweiterung der Membranfilterfläche von 50 m<sup>2</sup> ist als zusätzliche bauliche Maßnahme eine automatische füllstandsgesteuerte Filtrationsleistung denkbar. Zurzeit wird die Filtrationsleistung der Filtratpumpen manuell eingestellt. Nach Angaben des Anlagenherstellers Martin Systems ist es möglich, in die Betriebssteuerung ein Steuermodul zu integrieren, das es ermöglicht, die Filtrationsleistung durch Zuschaltung eines Bypasses zu erhöhen, wenn ein bestimmter Füllstand im Abwasserspeichertank erreicht wird. Dadurch ist es möglich, eine membranschonende Grundfiltrationsleistung zu fahren, die entsprechend dem Abwasseranfall automatisch auf ein höheres Niveau für einen entsprechenden Zeitraum (füllstands- oder zeitgesteuert) gestellt werden kann. Weitere Maßnahmen können die Vorbehandlung des Küchenabwassers durch einen Fettabscheider oder aber Änderungen im Schlammmanagement sein.

Die angestellten Überlegungen zur Betriebsstrategie zeigen jedoch auch, dass auf die Speicherkapazitäten der Abwassersammeltanks nicht verzichtet werden kann. Vielmehr sind diese Kapazitäten sorgfältig mit in das gesamte Abwasserentsorgungskonzept mit einzubeziehen. Entsprechende Planungen erfolgen dazu im Kapitel 9 „Empfehlungen für ein Betriebskonzept“.

## 9 Empfehlungen für ein Betriebskonzept

Bei den Untersuchungen und anschließender Beurteilung des bisherigen Anlagenbetriebs hat sich herausgestellt, dass es nicht möglich sein wird, die Schiffskläranlage ohne weitere bauliche Maßnahmen erfolgreich an Bord der RheinEnergie betreiben zu können. Folgende bauliche Maßnahmen werden als notwendig erachtet:

- Installation eines Fettabscheiders zur Vorbehandlung der an Bord der RheinEnergie anfallenden Küchenabwässer zur Reduzierung lipophiler Stoffe im Zulauf zur Kläranlage.
- Installation eines weiteren Membranmoduls und Erhöhung der Membranfilterfläche auf 250 m<sup>2</sup> zur Erhöhung der Filtrationsleistung der Membranfilter.
- Installation eines Steuermoduls zur füllstandsabhängigen Filtrationssteuerung zur Optimierung der Filtrationsleistung der Membranfilter.

Mit diesen Maßnahmen kann die hydraulische Leistungsfähigkeit der Schiffskläranlage den Verhältnissen an Bord der RheinEnergie besser angepasst werden. Wie bereits auch in Kapitel 8 gezeigt, ist es im Hinblick auf die Erarbeitung eines Betriebskonzeptes notwendig, die an Bord der RheinEnergie vorhanden Abwasserspeichertanks in das Konzept der Abwasserbehandlung mit einzubeziehen. Wasserverbräuche von bis zu 57 m<sup>3</sup>/d erfordern die Vorhaltung von Speichervolumen zur Abpufferung und Vergleichmäßigung von Zulaufspitzen. Zudem ist eine Einstellung einer geringeren und membranschonenderen Grundfiltration möglich.

Bei Berücksichtigung beider Abwasserspeichertanks steht ein nutzbares Speichervolumen von etwa 50 m<sup>3</sup> zur Verfügung. Auf Basis des täglichen Wasserverbrauchs in der Hauptsaison 2006 und verschiedenen täglichen Filtrationsleistungen der Schiffskläranlage wurde überprüft, inwieweit dieses Speichervolumen ausreicht bzw. in Anspruch genommen werden muss. Als tägliche zu erreichende Filtrationsleistungen wurden die in Kapitel 8 betrachteten Abwasservolumenströme herangezogen:

-  $Q_{d,1} = 19,0 \text{ m}^3/\text{d}$

Abwasservolumenstrom, der zurzeit mit der vorhandenen Membranfilterfläche von  $200 \text{ m}^2$ , einem Brutto-Permeatflux von  $4,5 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  und einem Verhältnis von Filtrations- zu Pausenzeit von 7 zu 1 pro Tag filtriert werden kann. Entspricht dem mittleren Wasserverbrauch in der Hauptsaison 2006.

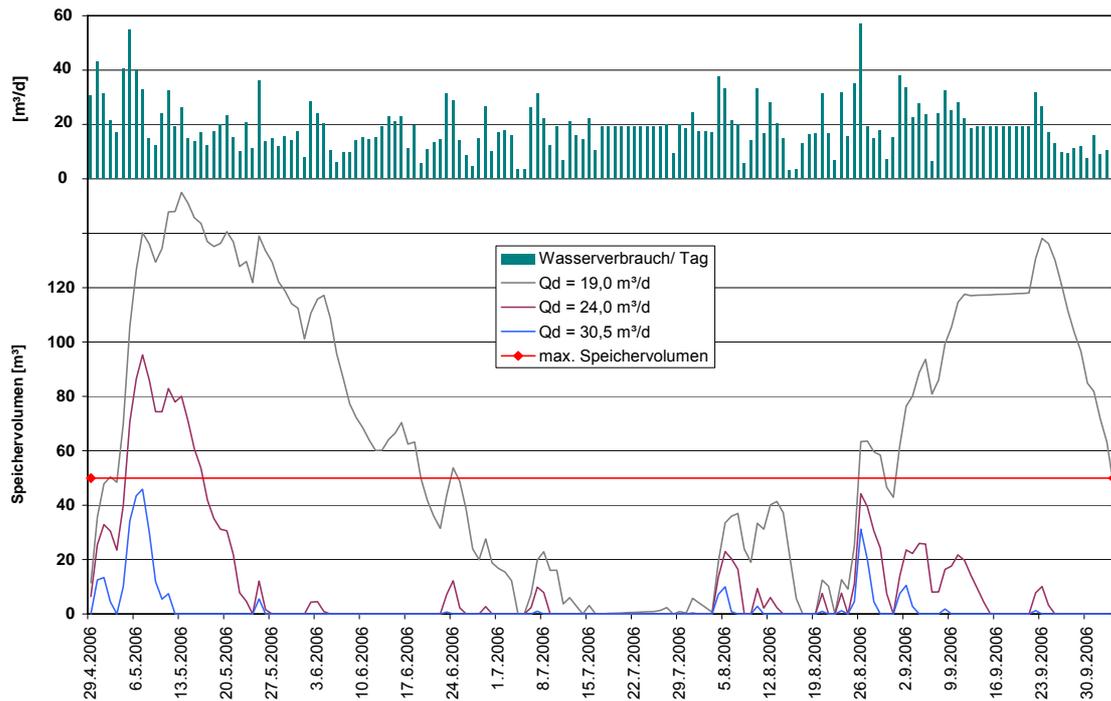
-  $Q_{d,2} = 24,0 \text{ m}^3/\text{d}$

Abwasservolumenstrom, der mit einer Membranfilterfläche von  $250 \text{ m}^2$ , einem Brutto-Permeatflux von  $4,5 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  und einem Verhältnis von Filtrations- zu Pausenzeit von 7 zu 1 pro Tag filtriert werden kann. Entspricht dem oberen Quartil-Wert des Wasserverbrauchs in der Hauptsaison 2006.

-  $Q_{d,3} = 30,5 \text{ m}^3/\text{d}$

Abwasservolumenstrom, der mit einer Membranfilterfläche von  $250 \text{ m}^2$ , einem Brutto-Permeatflux von  $6,0 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  und einem Verhältnis von Filtrations- zu Pausenzeit von 6 zu 1 pro Tag filtriert werden kann. Entspricht dem 85%-Perzentil-Wert des Wasserverbrauchs in der Hauptsaison 2006.

Fehlende Angaben zu einzelnen Tagesverbräuchen (vgl. Anmerkungen zu Abbildung 9 aus Kapitel 7.2) wurden durch den mittleren Wasserverbrauch von  $19 \text{ m}^3/\text{d}$  ersetzt. Es wurde weiter davon ausgegangen, dass der Abwasseranfall dem Wasserverbrauch an Bord der RheinEnergie entspricht. Das Ergebnis ist in Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14: Ermittlung des erforderlichen Speichervolumens in Abhängigkeit der täglichen Filtrationsleistung der Schiffskläranlage**

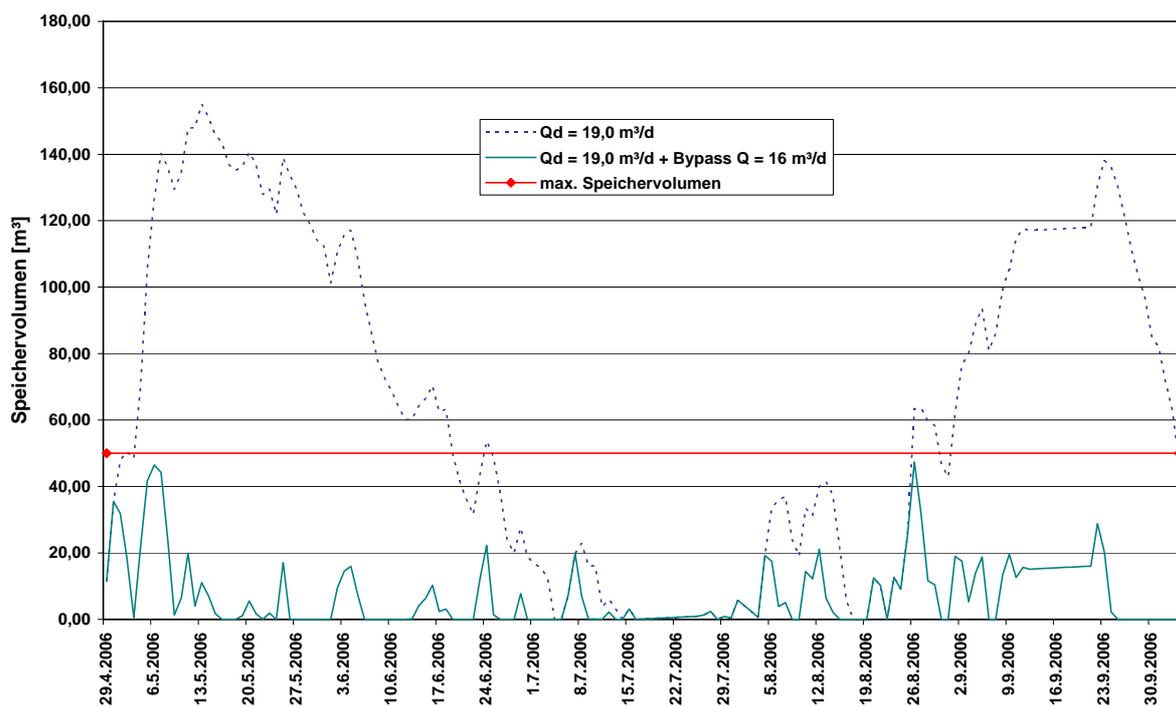
Deutlich zu erkennen ist, dass das vorhandene Speichervolumen von 50 m<sup>3</sup> nicht ausreicht, wenn die tägliche Netto-Filtrationsleistung nur zu 19 m<sup>3</sup>/d gewählt wird. Hier zeigt sich zudem sehr deutlich, dass die zurzeit vorhandene Leistung des gesamten Abwasserentsorgungssystem der RheinEnergie (Speichertanks in Kombination mit Schiffskläranlage) nicht ausreicht, um das an Bord anfallende Abwasser ordnungsgemäß zu behandeln. In Zeiten mit hohen Wasserverbräuchen ist eine Abgabe unbehandelter Abwässer an Land notwendig.

Wird eine tägliche Netto-Filtrationsleistung von 30,5 m<sup>3</sup>/d angesetzt, kann keine Überschreitung des maximalen Speichervolumens festgestellt werden. Die Filtrationsleistung wäre somit ausreichend. Mit Blick auf den täglichen Wasserverbrauch (Abwasseranfall) in der Hauptsaison 2006 zeigt sich aber auch, dass nur an 22 Tagen der Wasserverbrauch über dieser täglichen Filtrationsleistung lag und an den übrigen der insgesamt 159 Tagen dieser Wert unterschritten wurde.

Beim Verlauf der Speicherlinie bei einer täglichen Filtrationsleistung von 24 m<sup>3</sup>/d zeigt sich, dass nur zu Beginn eine Überschreitung des Speichervolumens eintritt,

darüber hinaus wäre die Leistungsfähigkeit des Abwasserentsorgungssystems ausreichend.

Insgesamt zeigt sich an dieser Stelle aber auch, dass die Installation eines Steuermoduls zur füllstandsabhängigen Filtrationssteuerung einen sehr hohen Nutzen hätte und unter Berücksichtigung der stark schwankenden Wasserverbräuche effektiv in das Entsorgungskonzept integriert werden könnte. 57% aller Wasserverbräuche liegen unter dem mittleren Wasserverbrauch von  $19 \text{ m}^3/\text{d}$ , so dass eine höhere konstante Filtrationsleistung die Membranen über mehr als die Hälfte der Zeit höher als notwendig belasten und zudem die Fließzeit des Abwassers im Bioreaktor verkürzen würde. Eine Anpassung der Filtrationsleistung an den Wasserverbrauch verfügt damit über ein Potential, auch die biologische Reinigungsleistung zu erhöhen. Wird ein Bypass zur Erhöhung der Filtrationsleistung installiert, ist das vorhandene Speichervolumen unter Anwendung des folgenden beispielhaften Betriebskonzeptes ausreichend wie Abbildung 15 verdeutlicht.



**Abbildung 15: Ermittlung des erforderlichen Speichervolumens bei einer füllstandsabhängig gesteuerten Filtrationsleistung**

Folgende Berechnungsgrundlagen wurden dabei festgelegt:

- Tägliche Netto-Filtrationsleistung von 19 m<sup>3</sup>/d.
- Zuschaltung eines Bypass und Erhöhung der Netto-Filtrationsleistung um 16 m<sup>3</sup>/d bei Erreichen eines Speichervolumens von 1/3 des maximalen Speichervolumens.

Die maximale tägliche Netto-Filtrationsleistung ergibt sich damit zu 35 m<sup>3</sup>/d und entspricht dem Auslegungswert, der ursprünglich angesetzt wurde. Bei einer Membranfilterfläche von 250 m<sup>2</sup>, einem Verhältnis Filtrations- zu Pausenzeit von 6 zu 1 ergibt sich ein erforderlicher Brutto-Permeatflux von 7 l/(m<sup>2</sup>\*h), der noch deutlich unter dem Maximalwert von 12 l/(m<sup>2</sup>\*h) liegt, der vom Anlagenhersteller Martin Systems angegeben wurde. Eine Erreichung dieser Filtrationsleistung sollte möglich sein, wenn den Ursachen der Membranverblockungen entsprechend den Optimierungsmaßnahmen aus Punkt 1 zu Beginn dieses Kapitels begegnet wird.

Bei Ausfall der Schiffskläranlage steht je nach Zeitpunkt des Ausfalls ein maximales Speichervolumen von 50 m<sup>3</sup> zur Verfügung. In den meisten Fällen ist dieses Volumen ausreichend, um zumindest das Abwasser für einen Tag während der Fahrt zwischen zu speichern und anschließend an Land abzugeben. In der Hauptsaison 2006 wurden nur an zwei Tagen Wasserverbräuche ermittelt, die über den 50 m<sup>3</sup> Speichervolumen lagen. Bis zur Wiederinbetriebnahme der Schiffskläranlage ist es also möglich, als Notfallkonzept die Zwischenspeicherung an Bord mit anschließender Abgabe an Land vorzusehen.

Vom Bordpersonal sollte ein Betriebstagebuch geführt werden, in dem die wesentlichsten Betriebsparameter wie Filtrationsleistung, Transmembrandruck, Sauerstoffgehalt im Bioreaktor erfasst werden. Über grüne und rote Signallichter wird der ordnungsgemäße Zustand der Anlagenaggregate wie Gebläse, Pumpen usw. am Schaltschrank der Anlage angezeigt, die auch in das Betriebstagebuch übernommen werden sollten. Die Kontrolle der Schiffskläranlage kann in den allgemeinen Kontrollgang auf dem Schiff aufgenommen werden, so dass der tägliche Arbeitsmehraufwand etwa 10 Minuten betragen würde. Darüber hinaus läuft die Anlage vollautomatisch, so dass nur der anfallende Überschussschlamm regelmäßig vom Bordpersonal an Land abgegeben werden muss. Reparatur- und Wartungsarbeiten sollten vom Anlagenhersteller Martin Systems übernommen werden.

Handelt es sich bei den Arbeiten vor Ort nicht um einen Notfall, können Wartungstermine mit dem Einsatzplan der RheinEnergie abgestimmt werden. In der Hauptsaison 2006 hatte die RheinEnergie insgesamt 26 Liegetage, an denen notwendige Wartungsarbeiten hätten durchgeführt werden können. Ähnliches galt auch für die Hauptsaison 2005 und die Nebensaison 2005/2006. Zu Beginn oder am Ende der Nebensaison steht zudem ausreichend Zeit für mehrtägige Reparatur- oder Wartungsarbeiten zur Verfügung, wenn die RheinEnergie im KD-eigenen Hafen liegt und auf ihre Einsätze vorbereitet wird bzw. Antriebs und Betriebsmaschinen des Schiffes gewartet werden. Ein Angebot für einen entsprechenden Wartungsvertrag wurde der KD bereits vom Anlagenhersteller überreicht.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Ertüchtigungsmaßnahmen und erläuterten Empfehlungen zu Betriebsstrategien kann davon ausgegangen werden, dass die Schiffskläranlage erfolgreich an Bord der RheinEnergie betrieben werden kann. Voraussetzungen sind, dass der Anlagenbetrieb vom Bordpersonal der KD ordnungsgemäß überwacht und die Schiffskläranlage im Rahmen eines Wartungsvertrages vom Anlagenhersteller in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden.

## 10 Literatur

- [1] N.N.; Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt, September 1996; Zentralkommission der Rheinschifffahrt (ZKR); Straßburg, Ausgabe 2002
- [2] N.N.; Ratifizierungsstatus der Übereinkommen der ZKR; Zentralkommission der Rheinschifffahrt (ZKR); Straßburg; Stand Dezember 2006; <http://www.ccr-zkr.org/>
- [3] N.N.; Einleitungsverbot für häusliche Abwässer von Fahrgastschiffen und Anforderungen an Bordkläranlagen; Mitteilung der Schweizerischen Delegation an den Ausschuss für Abfallbeseitigung und Umweltfragen in der Rheinschifffahrt; Oktober 2003, Basel; unveröffentlicht
- [4] Pinnekamp, Dorgeloh, Kaiser; Einsatz der Membrantechnik zur Abwasserbehandlung auf Binnenschiffen; Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AZ IV-9-042 528, durchgeführt im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW; Dezember 2004, unveröffentlicht
- [5] Pinnekamp, Dorgeloh, Kaiser; Erfassung der Abwasserzusammensetzung und Abwasservolumenströme an Bord des KD-Tagesausflugsschiffs MS RheinEnergie; Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AZ IV-9-042 545 im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Natur, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW; Dezember 2004, unveröffentlicht