



Zur Seepromenade gerichtete Fassadengestaltung der Anlage

Fotos und Tabellen: HS Flensburg

Reinigung des Scrubber-Waschwassers mit Membrantechnologie

PROJEKT CLEANMARINE4.0 Im Rahmen eines Projekts an der Hochschule Flensburg wurde eine schiffsgerechte Anlage (Bleed Of Treatment Unit) zur Reinigung von Scrubber-Waschwässern erstellt. Dieses aus einem Closed-Loop-Scrubber und einer Membranreinigungsanlage zusammengesetzte System ging 2020 erfolgreich in Betrieb. Der Fokus der laufenden Forschungsarbeiten richtet sich auf die Erfassung und Identifizierung der Schiffsemissionen bei der Schwerölverbrennung und die Weiterentwicklung der Membrantechnologie zu deren Reduzierung.

Prof. Dr. Wiktoria Vith, Prof. Dr. Michael Thiemke, Dennis Fischer, Prof. Dr. Rom Rabe

Die weltweiten Bestrebungen zur Verringerung der Umweltbelastung verpflichten den maritimen Sektor nach schadstoffarmen Emissionslösungen zu suchen. Die nachhaltige und sichere Nutzung der Meere und die damit verbundenen Fortschritte im maritimen Umweltschutz können nur durch den Einsatz von Spitzentechnologien gewährleistet werden.

Durch die Errichtung der ECA-Umweltschutzzonen (Emission Control Areas) benötigt die nach wie vor in hohem Umfang auf Schweröl als Treibstoff basierte Schifffahrt technische Lösungen zur signifikanten Reduktion der SO_x-Emissionen und der in Fokus geratenen Partikelemissionen.

Das Auswaschen von Schadstoffen wie Schwefeloxiden aus den Verbrennungsabgasen mittels bereits etablierter Scrubber-

Technologie ermöglicht die Einhaltung aktuell geltender SO_x- Grenzwerte. Das dabei anfallende Scrubberwaschwasser (bleed-off) enthält neben Schwefelverbindungen auch Rußpartikel, Asche, toxische polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Schwermetalle, die bei direkter Weiterleitung ins Meer der Meeresumwelt erheblichen Schaden zufügen.

In diesem Fall ginge der Schutz der Atmosphäre auf Kosten der Gewässer. Der Handlungsbedarf wurde erkannt und jetzt gilt es, Lösungen zu entwickeln, in denen die rechtlichen und wirtschaftlichen Aspekte der Entwicklung und Einführung einer effizienten Reinigungstechnologie für die Schifffahrt berücksichtigt werden.

Der maritime Forschungsstandort der Hochschule Flensburg mit einem vor

Ort installierten mittelschnelllaufenden Viertakt-Schiffsdieselmotor erwies sich als geeignet für die Errichtung einer schiffsgerechten Scrubberwasser-Aufbereitungsanlage bestehend aus dem Closed-Loop-Scrubber und einer Membranfiltrationsanlage. Das zur Untersuchung von Abgasemissionen von Schiffen installierte System wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes „CleanMarine4.0“ 2019/20 errichtet und in Betrieb genommen.

Die Forschungsumgebung, die sonst an Bord eines fahrenden Schiffes zu finden wäre, eröffnet ein großes Potenzial – vor allem mit Blick auf die bisherigen und angestrebten Forschungsmöglichkeiten auf dem Gebiet des maritimen Umweltschutzes. Seit der Initiierung der Forschungsaktivitäten an der Gesamtanlage konnten bereits

erste Betriebserfahrungen und vielversprechende Erkenntnisse in Hinblick auf die Schiffsemissionen und deren Reduktionspotenzial gesammelt werden.

Rechtliche Grundlagen

Rechtlich werden die Grenzwerte für die Schiffsemissionen durch den Umwelt-Ausschuss MEPC der IMO vorgegeben. Mit der Verschärfung der Grenzwerte für SO₂-Emissionen in Schiffsabgasen wurde im Jahr 2015, durch die IMO-Resolution MEPC.259(68), die letzte Änderung zu diesem Themengebiet aufgenommen. Aufgrund der neuesten Erkenntnisse zu negativen Auswirkungen der Waschwässer auf die Umwelt werden nun diverse Änderungen im Bereich der PAK-Messung und dessen Grenzwerte von der MEPC erwogen. Ein neuer Entwurf der Richtlinie mit den geplanten Änderungen in den Emissionswerten ist vorbereitet und sollte in der 76. Sitzung des MEPC vom 10.-17. Juni 2021, verabschiedet werden. Jedoch blieb dieser Tagungspunkt weitestgehend unangetastet und eine Entscheidung hierzu wurde auf den kommenden Tagungszeitraum im November 2021 verschoben.

Die angestrebten Änderungen zur aktuell geltenden Fassung sind in der Tabelle 1 blau hervorgehoben. Dabei werden die Waschwässer in Hinblick auf die Einhaltung der PAK-Werte strenger behandelt, vor allem, wenn sie aus den Closed-Loop-Anlagen mit reduziertem eingeleitetem Massenstrom stammen und zwischengespeichert werden müssen (Tabelle 2).

Forschungsschwerpunkte

Das Konzept des Forschungsvorhabens ist die Antwort auf den aktuellen Handlungsbedarf und Fragestellungen der Industrie zur Entwicklung umweltfreundlicher Technologien im Bereich des „Green-Shipping“-Klima- und Umweltschutz im Seeverkehr. Durch die Zusammenführung der Motorentechnik mit Teilanlagen der Abgasnachbehandlung und der Abwasserreinigung – verbunden über gemeinsame Automation und Datenauswertung – ist es möglich, den Gesamtprozess der Entstehung und Reduzierung maritimer

MESSGRÖSSE	EINSCHRÄNKUNGEN/AUSNAHMEN	GRENZWERT
PAK ^{phe}	Bei einem Waschwassermassenstrom von 45 t/MWh (siehe untere Tabelle) Der Grenzwert darf in einem Zeitraum von 12 Std. für 15 Min. um 100 % überschritten werden Sollte der Schiffsbetrieb eine mehrmalige Inbetriebnahme erfordern, so beginnt die Zeitnahme erneut (z.B. bei der Inbetriebnahme des Abgaswäscher)	$PAK_{aus}^{phe} - PAK_{ein}^{phe} \leq 50 \mu\text{g/l}$
	Waschwasser, welches durch nationale Gesetze nicht außenbords geleitet werden darf und daher in einem Tank zwischen gespeichert werden muss und Permeat aus Waschwasseraufbereitungsanlagen von Closed-Loop-Anlagen	$PAK^{phe} \leq 50 \mu\text{g/l}$
pH	In Fahrt	$pH_{aus} - pH_{ein} \leq 2$
	Stillstand	$pH \geq 6,5$
	4 m von der Austrittsöffnung entfernt gemessen oder mithilfe einer wissenschaftlich anerkannten empirischen Berechnungsformel bzw. Methode berechnet (fest gemacht im Hafen)	$pH \geq 6,5$
Trübung	Mittelwert über 15 Min.	$NTU_{aus} - NTU_{ein} \leq 25 \text{ NTU}$
Nitrat	Der jeweils höhere Wert wird berücksichtigt	$\leq 60 \text{ mg/l}$
	In den ersten drei Monaten nach Erst-Inbetriebnahme soll eine Probe des Waschwassers auf Nitrate an Land untersucht werden	Ergibt sich bei einer Auswaschung von 12 % der im Abgas befindlichen Stickoxide

Tab.1: Geplante Änderungen in den Einleitparametern von Scrubber-Waschwässern nach MEPC(76)

Eingeleiteter Massenstrom gemessen von einer Verdünnungseinheit für die Einhaltung des pH-Wertes (t/MWh)	GRENZWERT PAK ^{phe} (µg/l)	MESSMETHODE
0-1	2250	UV oder alternative Messmethode
2,5	900	UV oder alternative Messmethode
5	450	Fluoreszenz
11,25	200	Fluoreszenz
22,5	100	Fluoreszenz
45	50	Fluoreszenz
90	25	Fluoreszenz

Tab. 2: Grenzwerte für die PAK-Konzentrationen in Scrubber-Waschwässern nach MEPC(76)



SDC SHIP DESIGN & CONSULT GMBH

NAVAL ARCHITECTS info@shipdesign.de
MARINE ENGINEERS www.shipdesign.de





Abb.1: Closed-Loop-Scrubber an der Hochschule Flensburg während des Schwerölbetriebs

Emissionen in Echtzeit zu überwachen, die Zusammenhänge zu eruieren und Emissionsreduktionspotenziale aufzuzeigen. Die Erkenntnisse dienen hauptsächlich der Weiterentwicklung der Membrantechnologie zur Reinigung von Bleed-Off. Für diesen Zweck wurden und werden während der Messkampagnen die Daten zu gasgetragenen Emissionen vor und nach dem Scrubber analysiert. Weiterhin erfolgt eine physiko-chemische Untersuchung des anfallenden Scrubber-Abwassers vor dem Eintritt und nach Austritt aus der Membranfilteranlage. Das geschieht sowohl durch die Onlineüberwachung von Parametern wie pH, Temperatur und Leitfähigkeit sowie durch Laboranalysen der Feststoffe, Schwermetalle und PAKs. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf dem stabilen Betrieb und der Reinigungsleistung der innovativen Membrananlage.

Betriebskonzept der schiffsgetreuen Forschungsanlage

Das Aufbaukonzept der Forschungsanlage basiert auf dem Zusammenschluss folgender Teilanlagen:

› Forschungsmotor

Der verwendete Forschungsmotor „FOMO 4524“ mit einer Leistung von 0,72 MW ist ein zweitstufig aufgeladener, mittelschnelllaufender 3 Zylinder-Viertakt-Motor mit einem Hub von 450 mm und einem Bohrungsdurchmesser von 240 mm. Es handelt



Abb. 2: Membrananlage zur Reinigung von Scrubber-Abwasser

sich um eine Sonderanfertigung, abgeleitet aus den Serienmotoren MAK 452 und MAK 282 und ausgestattet mit speziell angefertigten Komponenten und modifizierten Serienbauteilen.

› Closed-Loop-Scrubber

Der installierte Scrubber stellt eine patentierte Entwicklung der dänischen Firma PureteQ dar und gehört hinsichtlich seiner Funktion zu den nassen Abgaswäschern. Das Wirkprinzip besteht darin, dass durch Führen des schwefelhaltigen Abgases durch einen mit NaOH versetzten Wasserregen, die säurebildenden Komponenten SO_2 und SO_3 neutralisiert werden. Der Scrubber ist auf die vom Forschungsmotor ausgestoßene Abgasmenge ausgelegt und hat eine Höhe von 8,2 m und einen Durchmesser von 0,8 m. Die Besonderheit des Scrubbers liegt in der spiralförmigen Zirkulationswasserführung im Inneren und der somit verlängerten Kontaktzeit des Waschwassers mit den Abgasen.

› Scrubber-Wasserreinigungsanlage mit Membrantechnologie

Die eingesetzte Membrananlage ist eine neuartige Entwicklung des Industriepartners der Fa. Boll und Kirch. Das Prinzip zur Reinigung des Scrubber-Wassers basiert auf der Abtrennung nahezu aller Feststoffe mithilfe einer Ultrafiltrationsmembran. Die Trennungsstufe bildet eine Aluminiumoxid (Al_2O_3)-Keramikmembrane mit

einer Trenngrenze von 50 nm. Der Werkstoff weist eine hohe mechanische und chemische Stabilität auf. Das Wasser wird nach dem Prinzip der Cross-Flow-Filtration durch die Membran gepresst und verlässt die Anlage als gereinigtes Filtrat (Permeat). Auf der Retentatseite entsteht ein konzentriertes Schlammgemisch bestehend aus Rußpartikeln, Asche, Schwermetallen und PAK's. Die Separation findet ohne die Zugabe von weiteren Chemikalien statt.

Emissionen und Betriebserfahrungen

Der Betrieb der Gesamtanlage ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung des Anlagenbetriebs ähnlich dem fahrenden Schiff und die ganzheitliche Überwachung und Analyse der Schiffsemissionen in Echtzeit. Während eines Zyklus der Messkampagne arbeitet der Forschungsmotor bis zu 72 h in Dauerbetrieb bei einer Drehzahl von 6000 1/min und erzeugt repräsentative Abgase, die direkt im Closed-Loop-Scrubber mit dem mit NaOH zugesetztem Meerwasser (pH bis zu 7) gewaschen und neutralisiert werden. Zur Überwachung der Schwefelemissionsreduktionen wird kontinuierlich das SO_2 zu CO_2 -Verhältnis am Scrubber-Ein- und -austritt gemessen. Erwartungsgemäß funktionierte die Entschwefelung bei unterschiedlichsten Betriebspaparametern von Beginn an zufriedenstellend. Die SO_x -Reduzierung von 98 Prozent wird durchgehend erreicht und damit die geltenden Emissionsanforderungen erfüllt.

Das im System zirkulierende alkalische Seewasser wäscht neben dem SO_x auch die partikulären Emissionen aus dem Abgas heraus und hat aufgrund des Closed-Loop-Betriebs eine begrenzte Reinigungskapazität. Entsprechend wird es aus dem Kreislauf als Bleed-Off in der Menge von bis zu 0,1 m^3/MWh in den Vorlagetank abgeschlämmt und kontinuierlich der Membranfilteranlage zugeführt. Die Trennungsleistung der Ultrafiltrationsmembran wurde bereits mit einem Flux zwischen 150 bis 300 $\text{l}/\text{m}^2\text{h}$ getestet. Dabei betrug die Feststoffkonzentration im Zulauf 200 mg/l in der Anfahrtsphase und bis zu 1200 mg/l im kontinuierlichen Betrieb, in dem sich ein Gleichgewicht zwischen dem neu produzierten und den abfiltrierten Feststoffen durch die Membrananlage einstellt. Der abfließende Permeat wird kontinuierlich mithilfe eines Water-Monitoring Systems auf die Einleitparameter überwacht und entweder in die Kanalisation abgeführt oder für weitere Tests zwischengespeichert. Unter allen Versuchsbedingungen wird eine geforderte Bleed-Off-Qualität erreicht. Die

Trübung schwankt zwischen 1 bis 3 NTU und die Summenkonzentration von den maßgeblichen 16 PAKs (EPA) übersteigt in seltenen Fällen 1 µg/l im Vergleich zu Feed-Konzentration von bis zu 100 µg/l. Die Schwermetalle (Ar, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni und Zn) sind in dem Permeat mit Atomabsorptionsspektrometer unter 0,5 mg/l nachweisbar.

Der Filtrationsrückstand (Retentat) kann je nach Betriebsweise bis zur Eindickung von 30 Prozent im Kreislauf der Membrananlage zurückgehalten und schlagartig beim Erreichen eines voreingestellten Filtrationsdrucks abgezogen werden. Bei Langzeitbetrieb des Systems wird eine kontinuierliche Schlammabnahme praktiziert, wobei die Feststoffkonzentration im Retentat um 15 Prozent eingestellt wird.

Je nach Feststoffkonzentration im Feed verbleiben nach der Bleed-Off-Reinigung mit der Membrantechnologie zwischen 3 bis 10 l Schlamm aus 1 m³ Scrubber-Waschwasser, der gesammelt und kostenpflichtig entsorgt wird.

Fazit

Die ersten Betriebserfahrungen belegen die Effizienz der Membrantechnologie bei

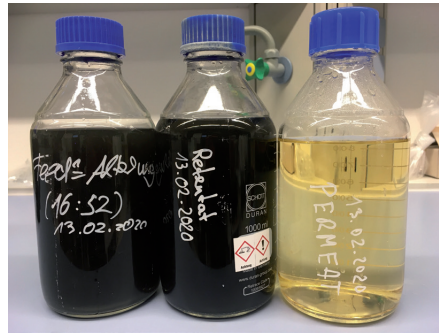


Abb.3: Scrubber-Waschwasser v.l.n.r Zulauf (Feed) zur Membrananlage, Retentat und Permeat

der Reinigung von Scrubberabwasser von schwerölbetriebenen Schiffen. Die Qualität des Ablaufs übertrifft die gesetzlichen Einleitforderungen bei Weitem, selbst bei der engen Wasserkreislaufschließung im Closed-Loop-Betrieb.

Die zu recht kritisierten Schwächen heutiger Nass-Entschwefelungsverfahren können somit deutlich verringert werden, damit diese Brückentechnologie, die die Schifffahrt voraussichtlich noch einige Jahre begleiten wird, nicht nur den minimalen Anforderungen gerecht wird, sondern eine hochwertige

Alternative zu schwefelfreien Kraftstoffen darstellt, ohne dabei ein erhöhtes Risiko für die maritime Umwelt darzustellen.

Die weiteren Forschungsarbeiten in diesem Projekt konzentrieren sich auf die Identifikation und Optimierung aller verfahrenstechnischen Parameter des Prozesses, um eine zuverlässige und benutzerfreundliche alternative Technologie zur Reduzierung der Schiffsemissionen bereitzustellen.

Die Autoren:

Prof. Dr. Wiktoria Vith, Wasserbehandlung und Membrantechnologie; Prof. Dr.-Ing. Michael Thiemke, Schiffsbetriebstechnik, Fachbereich Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Maritime Technologien; Hochschule Flensburg; Dennis Fischer M.Sc., Boll und Kirch Filterbau GmbH, Prof. Dr. Rom Rabe, ehemals Hochschule Flensburg

Die Dozenten der Hochschule Flensburg bedanken sich bei dem Industriepartner – der Firma Boll und Kirch – für die Mitwirkung an den Forschungsarbeiten, bei den Mitarbeitern des Maritimen Zentrums und den Studierenden der Schiffsbetriebstechnik für die tatkräftige Unterstützung während des mehrtägigen Drei-Schicht-Betriebs der Gesamtanlage. Weiterführende Informationen zum Projekt unter: <https://hs-flensburg.de/forschung/fue/forschungsprojekte/cleanmarine40>



SHIP EFFICIENCY

by STG 8th International Conference
Hamburg 27-28 September 2021

Ship Efficiency – New fuels, new rules, new tools



27th September 2021

Welcome by Hermann J. Klein
President of STG

"The Gas Question – which gas will suit me best?"

Future fuels in shipping – opportunities and costs – an update

GMW Marine, Process-, Energy-Technology Consultancy, Hammah

Strategic considerations, commercial and operational aspects in respect of alternative fuels – LNG, methanol, and ammonia
DNV, Hamburg

To get a grip on the toxic hazard – onboard safety concepts for the use of ammonia as fuel
GEA, Berlin

Carbon capture for shipping – a key transition technology to achieve CO₂ reduction targets
Ionada, Hamburg

The usage of hydrogen in shipping – chances and risks
Becker Marine Systems, Hamburg

Liquid organic hydrogen carrier – a solution for storing and transporting hydrogen
Siemens Energy, Erlangen/Hamburg

Panel discussion and resume of the first day
Get together buffet

28th September 2021

"Will EEXI and other regulations destroy the market?"

EEXI – introduction and overview of the Energy Efficiency Existing Ship Index
Hamburg University of Technology

EEXI – boon or bane, carrot or stick with regulation? – a shipowner's view
BSM, Hamburg

The EEXI puzzle – solutions for bulk and tanker operators
Oldendorff Carriers, Lübeck

IMO-Strategy on reduction of GHG emissions from ships
Bureau Veritas, Hamburg

How a vessel rating is done – some basics
Right Ship, London

"Propulsion: New ways ahead or old wine in new bottles?"

Multiple ways to save energy on medium-size heavy load vessels
SAL, Steinkirchen

Ways to EEXI compliance – Hydrodynamic Measures
The Hamburg Ship Model Basin

The ECO-Ship project – green cruising with LNG, fuel cells, sails and solar panels
Ingenieurbüro Loell, Peenemünde

Panel discussion and resume of the second day
Farewell buffet

Conference language: English
Venue: Hotel Hafen Hamburg

For conference fees, booking and rate:

www.ship-efficiency.org

The German Society for
Maritime Technology
Schiffbautechnische
Gesellschaft e.V.

