



Emissionen des Containerschiffs „MS Aarburg“

Auswirkungen der Nachrüstung
mit einer Diesel-Wasser-Emulsionsanlage

[LANUV-Fachbericht 77](#)



Emissionen des Containerschiffs „MS Aarburg“

Auswirkungen der Nachrüstung mit einer Diesel-Wasser-Emulsionsanlage

LANUV-Fachbericht 77

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2017

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 Telefax 02361 305-3215 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
	Der vorliegende Fachbericht enthält den Abschlussbericht über Emissionsmessungen auf dem Containerschiff „MS Aarburg“ nach erfolgter Nachrüstung einer Diesel-Wasser-Emulsionsanlage, der vom TÜV Nord, Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität, Antrieb/Emissionen, Motoren/Nutzfahrzeuge/Geräte im September 2015 erstellt wurde
Autor	TÜV Nord Mobilität
Bearbeitung	Dr. Andreas Brandt (MKULNV), Dr. Dieter Busch (LANUV)
Titelfoto	Dr. Dieter Busch (LANUV)
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachberichte
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • www.lanuv.nrw.de Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Zielsetzung	5
3	Vorgehensweise	7
3.1	Allgemeines	7
3.2	Messablauf	8
3.3	Versuchsschiff MS Aarburg	9
3.3.1	Diesel-Wasser-Emulsionsanlage	12
3.4	Messtechnik	16
3.4.1	Messtechnik für gasförmige Komponenten	16
3.4.2	Messtechnik zur Bestimmung der Rußkonzentration	19
3.4.3	Messtechnik für gravimetrische Partikelmessung	21
3.4.4	Messung der Umgebungsdaten	22
3.4.5	Bestimmung des Abgasmassenstroms	23
3.4.6	Messanordnung auf dem Schiff	24
4	Ergebnisse	25
4.1	Ergebnisse der gasförmigen Emissionen	25
4.1.1	Ergebnisse in Anlehnung an ISO 8178-4 E3	25
4.1.2	Ergebnisse der Einzelmesspunkte	28
4.2	Ergebnisse der Partikelemissionen	30
4.2.1	Ergebnisse in Anlehnung an ISO 8178-4 E3	30
4.2.2	Ergebnisse der Einzelmesspunkte	32
4.2.3	Analyse der Partikelmassenemission	34
4.3	Diskussion der Ergebnisse	40
5	Zusammenfassung	42
6	Ausblick	43
7	Literatur	44

1 Einleitung

Mit der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen, 39. BImSchV vom 02.08.2010, wurden die Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21.08.2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa (2008/50/EG) sowie die Richtlinien 2001/81/EG und 2004/107/EG in deutsches Recht umgesetzt. Sie legen Luftqualitätsziele zur Vermeidung oder Verringerung schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt fest. Die Beurteilung der Luftqualität in den Mitgliedstaaten der EU erfolgt nach einheitlichen Methoden und Kriterien.

Als Folge der Umsetzung der EU-Richtlinien gelten wesentlich schärfere Grenzwerte für die wichtigsten Luftschadstoffe. Hierzu gehören auch Stickstoffoxide (NO_x und NO_2) und Partikel (PM_{10}). Die Richtlinie 2008/50/EG schreibt zudem vor, dass die Belastungssituation regelmäßig durch Messung oder Modellrechnung zu ermitteln und zu beurteilen ist. Im Falle der Feststellung einer unzulässig hohen Umweltbelastung muss ein Luftreinhalteplan (LRP) aufgestellt werden.

Bei der Aufstellung eines Luftreinhalteplans kommt der emissionsseitigen Verursacheranalyse eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere in Anrainerstädten zu Flüssen mit großem Schifffahrtsaufkommen sind die Schiffsantriebe als Emittenten näher zu untersuchen. Die Partikelemissionen sowie die Stickoxidemissionen der derzeit verwendeten Schiffsantriebe tragen sowohl punktuell an Belastungspunkten in der Nähe der Schifffahrtswege als auch im städtischen Hintergrund zur Schadstoffbelastung bei. Dem zufolge ist es notwendig, Anstrengungen zu unternehmen, die Emissionen der wichtigsten Schadstoffe PM und NO_x/NO_2 durch Verbesserungen an bestehenden Schiffen zu senken.

Es ist möglich, Schiffsantriebe mit moderner Abgasnachbehandlungstechnologie wirkungsvoll nachzurüsten, wie es in einem anderen Projekt des LANUV an einem Fahrgastschiff nachgewiesen wurde [KlbBour_2013; LANUV-Fachbericht 49], jedoch führt dies zu hohen Investitionskosten. Insbesondere bei Antrieben von Frachtschiffen mit höheren Motorleistungen, deren Motoren nicht aus Fahrzeugmotoren für Landfahrzeuge abgeleitet sind, erreichen die Investitionskosten sowie auch die laufenden Betriebskosten durch Wartung und zusätzliche Betriebsstoffe (Harnstoff) Höhen, die für den Reeder derzeit noch unwirtschaftlich erscheinen. Hierbei ist noch zu berücksichtigen, dass die Lebensdauer der Schiffsmotoren häufig mehrere Jahrzehnte beträgt, der Ersatz der Schiffsmaschinen durch neue Aggregate aber nur selten durchgeführt wird.

Als Folge dieser Situation sind für eine nachhaltige Senkung der Abgasbelastung Technologien zu suchen, die bei geringem Investitionsaufwand maximale Reduzierungen der Luftschadstoffe PM und NO_x/NO_2 bieten. Die Verwendung von Emulsionskraftstoffen, deren Anwendung in den letzten Jahren intensiv weiterentwickelt wurde, ist hierbei eine vielversprechende Technologie.

In dem hier beschriebenen Projekt wurde ein Schiff mit einer entsprechenden Anlage ausgerüstet. Die Auswahl des Projektschiffes sowie die Ausrüstung des Schiffes mit der Emulsionsanlage lagen in der Verantwortung des Anlagenherstellers (Exomission Umwelttechnik GmbH). Das LANUV übernahm in der geplanten Konstellation die Beauftragung der begleitenden Emissionsmessungen (TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG) inklusive der hierfür erforderlichen Projektkoordination.

Das Projekt wurde an dem im Jahre 2004 gebauten, 135 m langen Containerfrachtschiff „MS Aarburg“ der Reederei Deymann durchgeführt. Das Schiff hat eine Maschinenleistung von 1.324 kW.

Das hier beschriebene Vorhaben soll zum einen die Realemissionen des Projektschiffes bei Betrieb mit herkömmlichem Dieselkraftstoff aufzeigen und anschließend die Abgasemissionen bei Verwendung des Emulsionskraftstoffes ermitteln. Hauptziel des LANUV-Vorhabens ist, die Potenziale der Verwendung von Emulsionskraftstoffen zur Reduzierung des Schadstoffausstoßes von Binnenschiffen aufzuzeigen. Das Hauptaugenmerk des Anlagenherstellers Exomission liegt in der Darstellung der Möglichkeit einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs.

2 Zielsetzung

Die positiven Effekte auf die Schadstoffemissionen von Dieselmotoren bei Verwendung von Emulsionskraftstoffen sind seit langem bekannt [SiDöBe_2007]. In der Vergangenheit wurde hierzu bisher der Weg beschritten, extern eine vorgemischte stabilisierte Diesel-Wasser-Emulsion zu erzeugen und diese über das normale Einspritzsystem dem Motor zuzuführen. Dieses Verfahren hat jedoch mehrere Nachteile, die eine breite Verwendung bisher verhindert haben. So muss die Emulsion über längere Zeiträume stabil gehalten werden, was nur über die Zugabe chemischer Emulgatoren erreicht werden kann. Aber auch bei Verwendung dieser Emulgatoren sind weiterhin Entmischungsvorgänge zu beobachten. Ein weiterer Nachteil ist das festgelegte Diesel-Wasser-Verhältnis in der vorgemischten Emulsion. Es kann so nur die Wassermenge emulgiert werden, die der Verbrennungsmotor im ungünstigsten Betriebspunkt toleriert.

Ziel der Weiterentwicklungen der letzten Jahre war es, die Diesel-Wasser-Emulsion den Betriebspunkten angepasst in unmittelbarer Nähe der Einspritzanlage zu erzeugen und der Einspritzung zuzuführen. Schiffsmotoren erscheinen hier für die Anwendung solcher Verfahren geeignet, da sie Betriebsprofile mit quasistationärem Verhalten aufweisen.

Die Reduktionseffekte bei Ruß- und NO_x-Emissionen werden folgendermaßen erklärt: Die Verminderung der Rußemission wird auf eine deutlich verbesserte Gemischaufbereitung zurückgeführt, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die von Kraftstoff umhüllten Wassertröpfchen schlagartig verdampfen und so eine noch feinere Kraftstoffverteilung erzeugen („Mikroexplosion“, „micro explosion“). Abbildung 1 stellt dieses Funktionsprinzip dar. Der Rückgang der Stickoxidemissionen wird durch die Absenkung der Verbrennungsspitzentemperaturen erklärt, die aus der Energieaufnahme des Wassers bei der Verdampfung resultiert. Es werden Reduktionspotenziale benannt, die für Ruß bis zu 90% und für Stickoxidemissionen bis zu 45 % betragen. Die Reduktion erfolgt verbrauchsneutral, kann sogar zu geringfügigen Kraftstoffersparnissen führen [BrChaDaLaDu_2000].

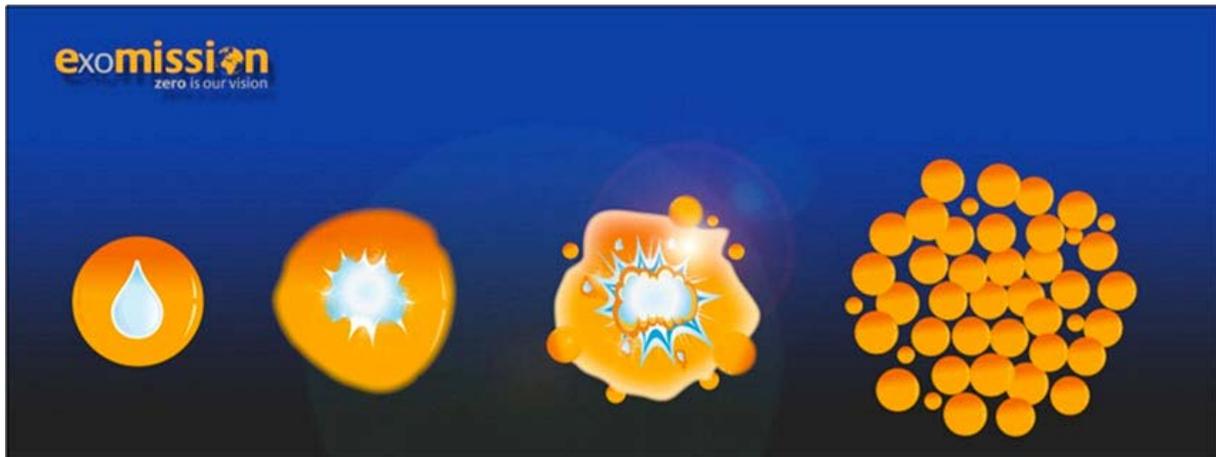


Abbildung 1: Funktionsmodell Diesel-Wasser-Emulsion.
[Quelle: Exomission Umwelttechnik GmbH]

Da die Verwendung von Emulgieranlagen außer der Kompensation des Wasservolumens in der Einspritzanlage grundsätzlich keine Motoränderungen erfordert und Bestandsschiffe mit vergleichsweise geringem Investitionsbedarf umgerüstet werden könnten, erscheint der Motorbetrieb mit Emulsionskraftstoffen als ein geeigneter Weg zur effektiven Emissionsminderung.

Die Zielsetzung des begleitenden Messprogramms ist es, die Funktionstüchtigkeit der Diesel-Wasser-Emulsionsanlage nachzuweisen sowie eine quantitative Ermittlung der Reduktionspotenziale für die Schadstoffkomponenten NO, NO₂, CO, THC, Ruß und Partikelmasse durchzuführen. Darüber hinaus soll auch ein eventuelles Potenzial für Kraftstoffverbrauchseinsparungen ermittelt werden. Zur Erreichung dieser Ziele wurde eine Messkampagne an Bord des Schiffes durchgeführt.

3 Vorgehensweise

3.1 Allgemeines

Das Containerschiff MS Aarburg wurde von der Reederei Deymann für das Untersuchungsvorhaben zur Verfügung gestellt. Die MS Aarburg ist langfristig verchartert und zwischen dem holländischen Hafengebiet Rotterdam und Mainz auf dem Rhein unterwegs. Während entsprechender Werftliegezeiten wurde die Diesel-Wasser-Emulsionsanlage installiert und anschließend in Betrieb genommen. Durch sehr enge Terminierungen bei der Charter konnte der Systemeinsatz immer nur in kleinen Abschnitten durchgeführt werden, was zu sehr langen Zeiten bis zur Systemfertigstellung führte. Die anschließend geplante Erprobungs- und Optimierungsphase reduzierte sich hierdurch auf eine einzige Applikationsfahrt.

Zudem führte die projektunabhängige Installation eines Aggregatmotors in unmittelbarer Nähe der Emulsionsanlage zu einer sehr hohen Wärmebelastung der Systemelektronik des Emulsionssystems durch die Abluftführung des Aggregats. Als Folge traten unmittelbar vor der Messkampagne Schäden durch Bauteilüberhitzung auf. Am Tag der Messkampagne konnte ein elektronisches Bauteil zwar noch ersetzt, aber nicht mehr vollständig programmiert werden.

Zur Erreichung der Projektziele wurde das Abgassystem des Schiffes mit entsprechenden Zugängen zur Installation der Messsonden ausgestattet. Die eigentliche Messung erfolgte in Form von temporären Messkampagnen. Hierfür wurde eine geeignete Messtechnik (PEMS, Portable Emission Measurement System) zur Ermittlung der gasförmigen Emissionen sowie der Partikelemissionen eingesetzt.

Messgrößen: Die gasförmigen Massenemissionen wurden zeitaufgelöst (1 Hz) für folgende Komponenten simultan ermittelt: THC, CO, NO, NO₂, CO₂ und O₂. Rußemissionen wurden zeitaufgelöst (1 Hz) als Rußkonzentrationen gemessen. Zusätzlich wurde eine gravimetrische Partikelmessung nach beschriebenen Messverfahren (ISO 16183 [ISO16183_2002] für stationäre Messpunkte durchgeführt. Die Messpunkte wurden in Anlehnung an den Prüfzyklus E3 gemäß ISO 8178-4 [ISO8178_2006] definiert.

Um leistungsbezogene Ergebnisse angeben zu können, ist die Erfassung der Motorleistung notwendig. Innerhalb dieses Projektes war zunächst geplant, die Propellerwelle des Schiffes mit Dehnmessstreifen zu versehen, um so das Abtriebsdrehmoment zu ermitteln. Diese Messtechnik konnte nicht installiert werden. Notwendige Stillstandzeiten des Antriebsmotors waren aufgrund des Schiffsbetriebes unter Charterbedingungen („real life“) nicht realisierbar. Zur Bestimmung einer Motorleistung wurde daher folgender Weg beschritten:

Über die gegebene Nennleistung des Motors wurden nach den Vorgaben der ISO 8178-4 die Messpunkte für einen E3-Zyklus ermittelt. Über eine Kurve dritten Grades wurde eine Propellerkurve für die ermittelten Leistungspunkte angenähert (Abbildung 2). So konnte für jede Motordrehzahl eine Motorleistung berechnet werden. Zum Abgleich der ermittelten Leistungsdaten mit den Leistungen der realen Propellerkurve wurden für alle Leistungspunkte die spezifischen Verbräuche ermittelt und mit den bekannten Daten für diesen Motor verglichen und anschließend eine mit den real erreichten Drehzahlen korrigierte Leistungskurve mit entsprechenden Messpunkten des E3-Zyklus bestimmt.

Für die praktische Durchführung der Messungen musste auf jeden Fall eine Bergfahrt gewählt werden, da bei Talfahrt die oberen Drehzahlen nicht gefahren werden können.

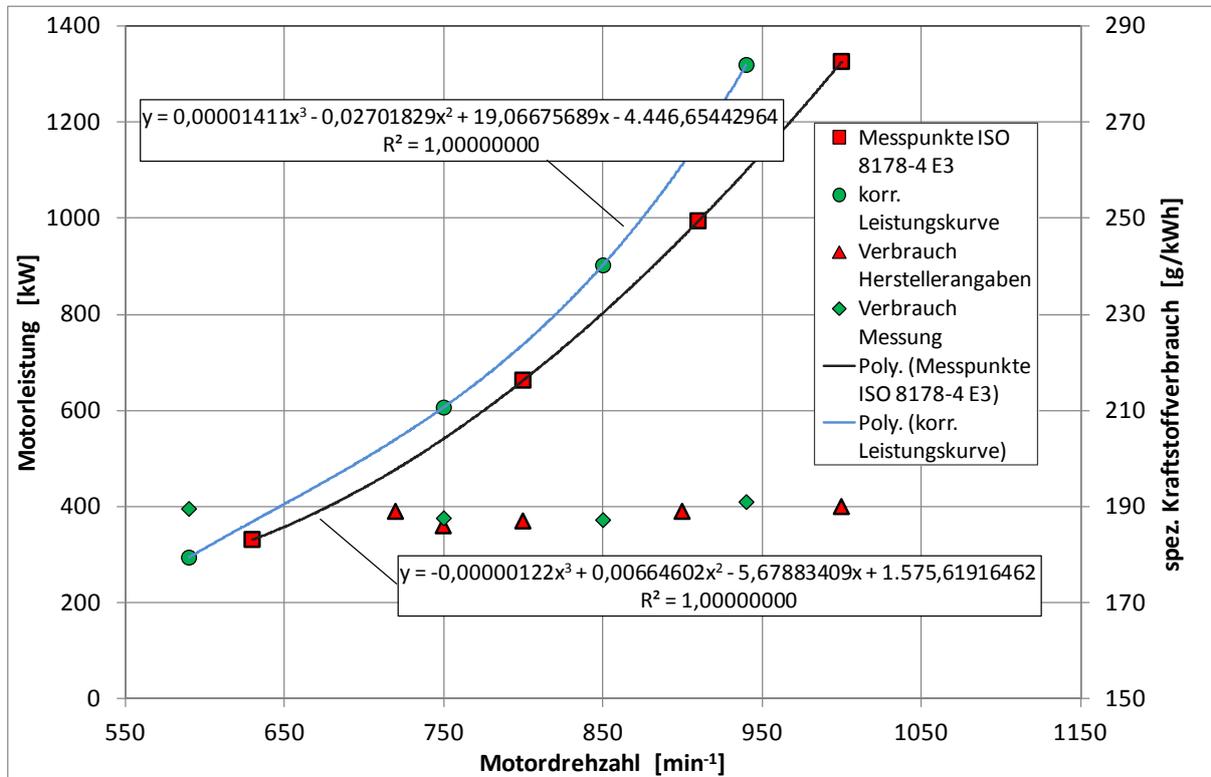


Abbildung 2: Leistungspunkte und angenäherte Leistungskurve.

3.2 Messablauf

Die Messkampagne wurde so geplant, dass der Schiffsbetrieb möglichst wenig beeinflusst wurde. Für den prinzipiellen Ablauf bedeutete dies:

- Aufnahme der Messtechniker und der Messtechnik entlang des Rheins bei Bergfahrt
- Installation der Messtechnik während der Fahrt
- Vermessung des Ausgangszustandes im reinen Dieselbetrieb in den Messpunkten des E3-Zyklus
- Vermessung der gleichen Messpunkte im Diesel-Wasser-Emulsionsbetrieb
- Abbau der Messtechnik während der Fahrt
- Anlegen an geeigneter Stelle, Abladen der messtechnischen Ausrüstung und Verlassen des Schiffes

Für die Durchführung der eigentlichen Messungen wurden die Probenahmen für die gasförmigen Emissionen sowie die Probenahme des Sootsensors gestartet und die Messdaten für die gesamte Messreihe mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Die vorgegebenen Drehzahlen wurden durch den Schiffsführer eingestellt und ein stabiler

Betriebspunkt abgewartet. Danach wurde für den jeweiligen Messpunkt auch die Probenahme für die gravimetrische Partikelmessung begonnen. Während der gesamten Messzeit in einem Betriebspunkt wurde der Kraftstoffverbrauch über das schiffsinterne Verbrauchsmesssystem sowie über die Messeinrichtung der Emulsionsanlage gemessen und protokolliert. Nach Ablauf der Sammelzeit der Partikelmessung konnte der nächste Betriebspunkt eingestellt werden.

Für die Messungen im Emulsionsbetrieb wurde verfahrensgleich vorgegangen. Zusätzlich wurde für jeden Betriebspunkt die zugeführte Wassermenge durch die Firma Exomission eingeregelt und ein stabiler Messpunkt abgewartet.

3.3 Versuchsschiff MS Aarburg

Abbildung 3 zeigt die MS Aarburg. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wesentlichen technischen Daten des Versuchsschiffs.



Abbildung 3: MS Aarburg [Quelle: Busch LANUV]

Tabelle 1: Technische Daten MS Aarburg
[Quelle: Reederei Deymann]

Technische Daten MS Aarburg	
Länge / Breite:	134,87 m / 11,50 m
Tonnage:	3.297 to.
Motor:	ABC 6DZC-1000-166A
Leistung (KW/PS):	1.324 kW / 1.800 PS
Baujahr:	2004
ADNR-Typ:	
Bauwerft:	Kilya Shipbuilding
Amtliche Schiffsnummer:	4803200
Heimathafen:	Haren (Ems)
Im Besitz seit:	2013
Umbauten:	-

Als Vortriebsmotorisierung besitzt die MS Aarburg einen auf die Propellerwelle wirkenden Motor der Firma ABC (Anglo Belgian Corporation) vom Typ 6DZC-1000-166A. Der Motor verfügt über keine Abgasnachbehandlung. Tabelle 2 zeigt die Abgastypprüfwerte der entsprechenden Motorfamilie.

Tabelle 2: Abgastypprüfwerte der Motorfamilie 6DZC [Quelle: ABC]

Typprüfergebnis im E3 - Zyklus der Motorfamilie 6DZC	
	g/kWh
NO _x	9,440
CO	1,150
THC	0,900
PM	0,230

In der Tabelle 3 sind die Technischen Daten des Antriebsmotors ABC 6DZC aufgelistet.

Tabelle 3: Technische Daten ABC 6DZC-1000-166-A/K

Hersteller:	Anglo Belgian Corporation
Motorbezeichnung:	6DZC-1000-166-A/K
Arbeitsverfahren:	4-Takt, einfach wirkend
Bohrung:	256 mm
Hub:	310 mm
Zahl und Anordnung der Zylinder:	6-Zylinder in Reihe
Gesamthubraum:	95,7 Liter
Nennleistung:	1324 kW
Nenn Drehzahl:	1000 min ⁻¹
Verdichtungsverhältnis:	12,1 / 1
Verbrennung:	Selbstzündung, Direkteinspritzung, mechanisches Einspritzsystem mit einer Pumpe pro Zylinder
Aufladung:	Abgasturboaufladung mit Axialturbine und Radialverdichter
Maximaler Ansaugunterdruck:	1,5 kPa
Maximaler Abgasgegendruck:	2,5 kPa



Abbildung 4: ABC Motor 6 DZC-1000-166-A/K [Quelle: Busch LANUV]

3.3.1 Diesel-Wasser-Emulsionsanlage

Der oben beschriebene Motor wurde durch die Firma Exomission Umweltechnik GmbH mit einer Diesel-Wasser-Emulgieranlage ausgerüstet. Das System mit der Bezeichnung KWEgen3 ist eine vollintegrierte Anlage zur Herstellung einer Diesel-Wasser-Emulsion aus dem Bunkerkraftstoff des Schiffes und im System aufbereitetem Wasser mit Bereitstellung der Emulsion am Einspritzsystemeintritt. Das System ist motorunabhängig, vollelektronisch geregelt und überwacht und liefert betriebspunktabhängig die Emulsion mit dem applizierten Wassergehalt zwischen 0% und 40%. Abbildung 5 zeigt die Anlage.

Bei der KWEgen3 wird der Kraftstoff aus dem vorhandenen Kraftstoffvorlauf nach der Vorförderpumpe des Motors abgenommen und in einer speziellen Vorrichtung mit aufbereitetem Frischwasser nach programmierten Mengen zunächst grob vermischt. Unter Druck wird daraus in einer patentierten Emulgierereinheit eine fein verteilte und homogene Emulsion erzeugt. Diese Emulsion wird dann wieder dem Kraftstoffvorlauf und damit dem Verbrennungsprozess zugeführt. Die nicht verbrauchte Emulsion, welche sich im Kraftstoffrücklauf befindet, wird dem Emulsionskreislauf wieder zugeführt. Über Sicherheitsventile ist es jeder Zeit manuell oder automatisch möglich, das KWEgen3-System abzuschalten, um den originalen Kraftstoffpfad wieder herzustellen. Das System besitzt eine Visualisierungs- und Bedienoberfläche für den Benutzer sowie eine Diagnose- und Applikationsschnittstelle.

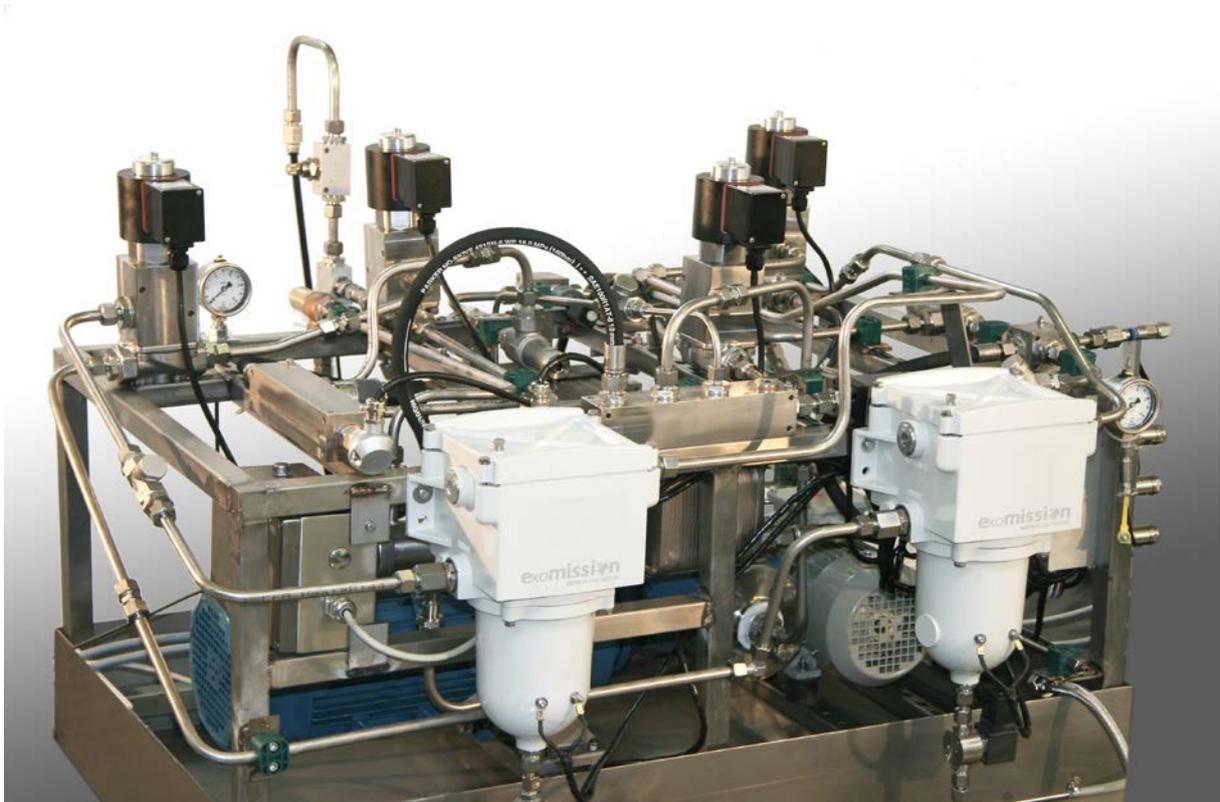


Abbildung 5: Diesel-Wasser-Emulgieranlage KWEgen3
[Quelle: Exomission Umwelttechnik GmbH]

Die Abbildung 6 zeigt ein Funktionsschema der Anlage mit den wesentlichen Bauteilen.

Der Benutzer erhält sowohl auf der Brücke, als auch im Maschinenraum eine Bedien- und Visualisierungsoberfläche. Anhand der angezeigten Daten wird permanent der aktuelle Betriebszustand erfasst. Die Anzeige umfasst

- den aktuell im System befindlichen Wassergehalt
- den aktuellen Dieserverbrauch (wird über den KWEgen3-seitig verbauten Sensor erfasst),
- den Systemstatus sowie
- die Betriebsdauer seit dem vorangegangenen Einschalten des Emulsionsbetriebs

Bedienung:

Die KWEgen3-Anlage wird durch den Schiffsführer mittels Brückenpult/Dashboard oder durch den Maschinist über den Maschinenraum bedient. In dem Pult integriert sind die Statusanzeigen, sowie die Start- Spül- und Stoptasten. Nach einem Abbruch oder Fehler, sowie einer Spülung wird die Anlage mit der Taste „Neustart“ erneut in Betrieb genommen.

Normalbetrieb

Sobald der Motor gestartet wurde und alle Startbedingungen / Freigabebedingungen für den KWEgen3-Betrieb erfüllt sind, startet die KWEgen3-Anlage vollautomatisch. Der aktuelle Status wird im Display des Brückenpults / Dashboards angezeigt.

Zur Bedienung stehen dem Benutzer sowohl auf der Brücke, als auch im Maschinenraum jeweils drei Hauptfunktionalitäten zur Verfügung:

AUS / NOT-Aus (Abbruch)

Sollte die Anlage aus Sicherheitsgründen unerwartet ausgeschaltet werden müssen, dann ist die Taste „NOT-AUS“ / „AUS“ auf dem Brückenpult zu betätigen. Damit wird die Kraftstoffversorgung aus dem Tagestank wieder hergestellt und die KWEgen3-Anlage wird außer Betrieb gesetzt. Zusätzlich kann die KWEgen3 auch im Maschinenraum ausgeschaltet werden.

SPÜLUNG

Unmittelbar vor dem Abschalten des Motors ist die Taste „SPÜLUNG“ zu drücken. Die Emulsionszufuhr zum Motor wird sofort unterbrochen, das Einspritzsystem des Motors sowie die KWEgen3-Anlage wird mit reinem Dieselmotorkraftstoff geflutet und damit das verbleibende Wasser entfernt. Das Spülende ist dann erreicht, wenn die Wassergehaltsanzeige auf dem Brückenpult 0,0% und das Statusfeld „Motor Aus“ anzeigt. Nach der Spülung kann der Motor abgeschaltet werden. Dies ist der Normvorgang zur Beendigung des KWEgen3-Betriebs vor dem Ausschalten des Motors.

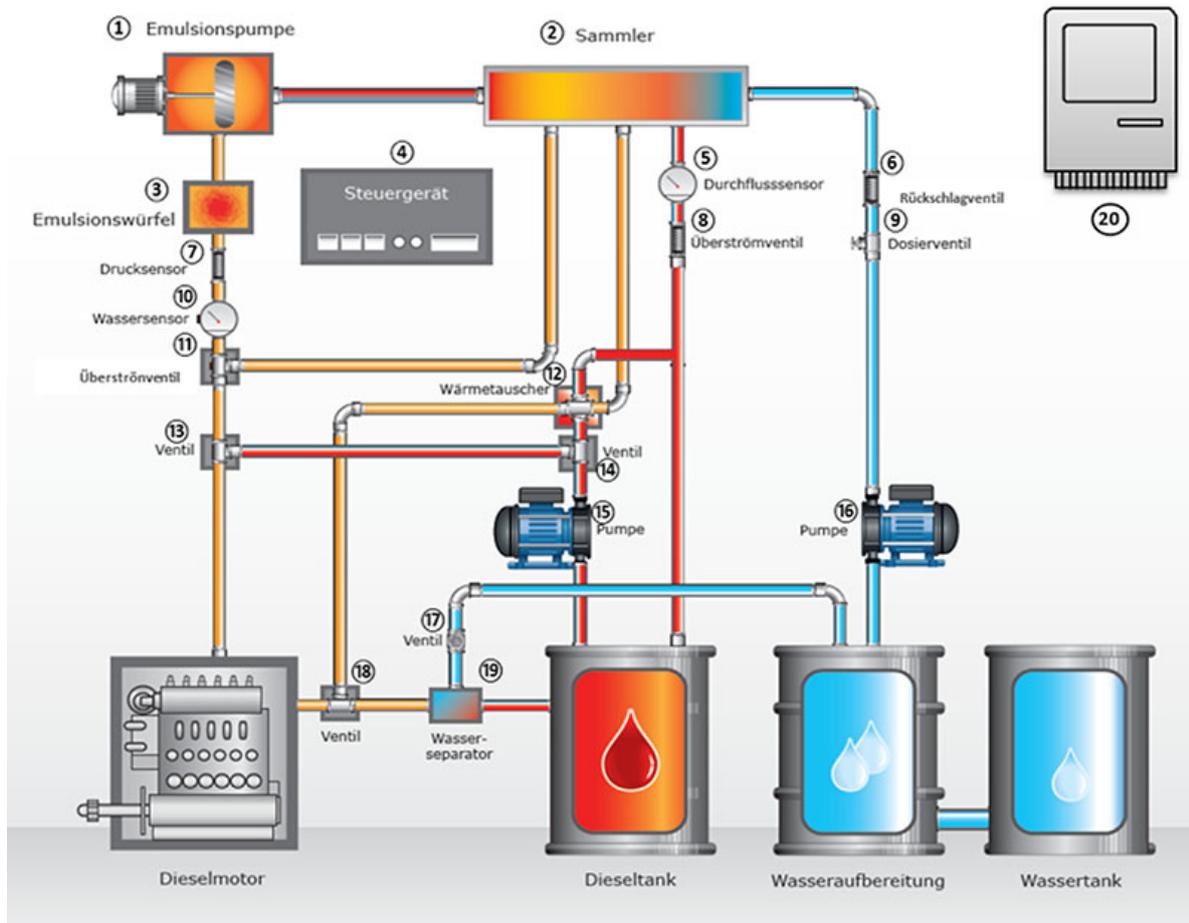
Wird die Spülung nicht oder nur unzureichend durchgeführt und der Motor trotzdem abgeschaltet, wird akustischer und optischer Alarm ausgelöst. Durch erneutes Starten des Motors und Fortführung der Spülung kann der Vorgang ausgelöst bzw. beendet werden.

NEUSTART

Über den Schalter NEUSTART wird ein erneuter Start des KWEgen3-Systems initiiert. Dies kann z. B. notwendig sein, um einen aufgetretenen Fehler zu quittieren oder das System zu starten, ohne dass der Verbrennungsmotor seit dem letzten Spülvorgang ausgeschaltet wurde.

Überwachung

Die KWEgen3-Anlage wird vollelektronisch geregelt und überwacht. Ein Eingriff durch den Schiffsführer ist nur im Rahmen der Bedienung des Brückenpults / der Dashboardtasten möglich. Alle Umgebungsdaten werden aufgezeichnet und helfen im Falle einer Fehlfunktion der schnellen Fehlererkennung.



- | | |
|-------------------------------|--|
| ① Emulsionspumpe | ⑪ Überströmventil |
| ② Sammler | ⑫ Wärmetauscher |
| ③ Emulsionswürfel | ⑬ 3/2-Wegeventil |
| ④ KWE-Steuergerät | ⑭ 3/2-Wegeventil |
| ⑤ Durchflusssensor Kraftstoff | ⑮ Motorseitig verbaute Kraftstoffpumpe |
| ⑥ Rückschlagventil | ⑯ Wasserpumpe |
| ⑦ Drucksensor | ⑰ 2/2- Wegeventil |
| ⑧ Überströmventil | ⑱ 3/2-Wegeventil |
| ⑨ Dosierventil | ⑲ Wasser-Separator |
| ⑩ Wassersensor | ⑳ Elektrische Versorgung und Unterverteilung |

Abbildung 6: Funktionsschema KWEgen3 [Quelle: Exomission Umwelttechnik GmbH]

3.4 Messtechnik

3.4.1 Messtechnik für gasförmige Komponenten

Für die Messung der gasförmigen Komponenten wurde das SEMTECH-DS der Firma Sensors benutzt. Mit Ausnahme des NO_x -Analysators ist der prinzipielle Aufbau des Systems ähnlich der Messtechnik, die in den Regelwerken der EG zur Messung von Dieselmotoren im unverdünnten Abgas beschrieben ist. Hierbei gibt es einen beheizten Teil, der die Entnahmeleitung von der Messgassonde, ein beheiztes Filter und den FID (Flammen-Ionisations-Detektor) zur Bestimmung der Kohlenwasserstoffe beinhaltet.

Die Beheizung auf mindestens 180°C ist notwendig, um die Kondensation von Kohlenwasserstoffen zu verhindern. Ein Teilstrom des Messgases wird zur Trocknung über einen Kühler geführt und dann dem NDIR Analysator (Nicht-Dispersiver-Infrarot-Analysator) zur Bestimmung der CO - und CO_2 -Konzentration, dem elektrochemischen O_2 -Analysator und der NDUV-Messbank (Nicht-Dispersive-Ultraviolett-Messbank) zur Bestimmung von NO und NO_2 zugeführt.

Die Trocknung ist notwendig, da diese Messgeräte nicht mit feuchtem Abgas betrieben werden können. Ein im Messsystem angeordneter Rechner verwaltet das Gesamtsystem und führt die Daten aus den unterschiedlichen Quellen zusammen. Die Abbildung 7 zeigt das Messsystem SEMTECH DS der Firma Sensors und verdeutlicht gleichzeitig den prinzipiellen Systemaufbau. Tabelle 4 bis Tabelle 7 geben eine Übersicht über die Spezifikationsdaten der verwendeten Analysatoren. Neben dem eigentlichen Analysesystem können ebenfalls Daten aus einem GPS-System, einem Abgasmassensensor und diversen analogen und digitalen Eingängen gesammelt werden. Angeschlossen sind auch Sensoren zur Erfassung der atmosphärischen Daten. Zur Bedienung des Systems wird ein externer Rechner mit der entsprechenden Software über ein LAN angebunden.

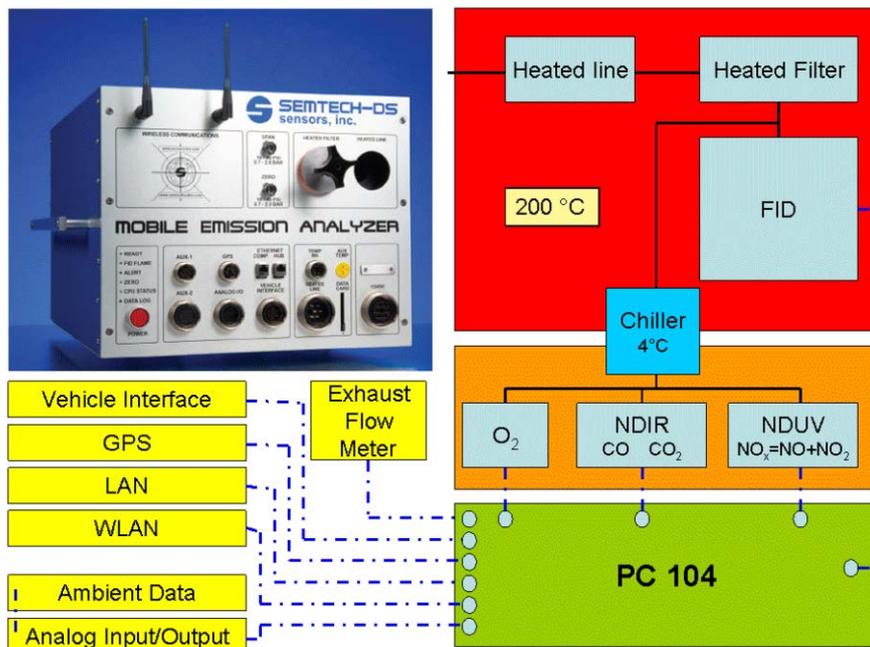


Abbildung 7: SEMTECH-DS Messsystem für gasförmige Komponenten

Tabelle 4: Spezifikationen des FID [Quelle: Bedienungsanleitung des Abgasanalysators Semtech DS der Fa. Sensors]

Range of Measurement	0 - 100, 0 - 1,000, and 0 - 10,000 PPMC User Selectable	
	0 - 100 PPM Range	0 - 10,000 PPM Range
Accuracy	± 1.0 % of reading or ± 5 PPM whichever is greater	± 1.0 % of reading or ± 25 PPM whichever is greater
Resolution	0.1 PPM	1.0 PPM
Linearity	± 0.5 % of reading or ± 3 PPM whichever is greater	± 0.5 % of reading or ± 10 PPM whichever is greater
Repeatability	± 0.5 % of reading or ± 2 PPM whichever is greater	± 0.5 % of reading or ± 10 PPM whichever is greater
Noise	± 2 PPM	± 10 PPM
Span drift	± 0.5 % of reading or 3 PPM Whichever is greater over 8 hrs	± 0.5 % of reading or 15 PPM Whichever is greater over 8 hrs
Warm up time	60 minutes	60 minutes
Response time	T90 \leq 2 seconds	T90 \leq 2 seconds
Flow rate	2 LPM	2 LPM
Data rate	Up to 4 Hz, configurable	Up to 4 Hz, configurable
Operating temperature	191 °C	191 °C

Tabelle 5: Spezifikationen der Nicht-Dispersiven-Infrarot Messbank [Quelle: Bedienungsanleitung des Abgasanalysators Semtech DS der Fa. Sensors]

Gas	CO Low Range	CO High Range	CO ₂
Range of Measurement	0 – 5,000 PPM	0 – 8%	0 – 20%
Accuracy	± 3 % of reading or 50 PPM, whichever is greater	± 3 % of reading or ± 0.02 %, whichever is greater	± 3 % of reading or ± 0.1 %, whichever is greater
Resolution	1 ppm	.001%	.01%
Linearity	± 1 % of reading or 20 PPM, whichever is greater	± 1 % of reading or ± 0.01 %, whichever is greater	± 1 % of reading or ± 0.05 %, whichever is greater
Repeatability	± 1 % of r whichever is greater reading or 20 PPM,	± 1 % of reading or ± 0.01 %, whichever is greater	± 1 % of reading or ± 0.05 %, whichever is greater
Noise	± 20 PPM	± 20 PPM	± 0.02 %
Span drift	± 0.5 % of reading or 20 PPM, whichever is greater over 8 hrs	± 0.5 % of reading or ± 0.01 %, whichever is greater over 8 hrs	± 2 % of reading over 8hours
Warm up time	45 minutes	45 minutes	45 minutes
Response time	T90 \leq 3 seconds	T90 \leq 3 seconds	T90 \leq 3 seconds
Flow rate	2 LPM	2 LPM	2 LPM
Data rate	0.83 Hz	0.83 Hz	0.83 Hz
Operating temperature	5 to 50 °C	5 to 50 °C	5 to 50 °C

Tabelle 6: Spezifikation der Nicht-Dispersiven-Ultraviolet Messbank (NDUV) [Quelle: Bedienungsanleitung des Abgasanalysators Semtech DS der Fa. Sensors]

	NO	NO₂
Range of Measurement	0 to 5,000 PPM	0 to 500 PPM
Accuracy	±3 % of reading or 15 PPM, whichever is greater	±3 % of reading or 10 PPM, whichever is greater
Resolution	1 PPM	1 PPM
Linearity	±1 % of reading or 5 PPM, Whichever is greater	±1 % of reading or 5 PPM, whichever is greater
Repeatability	±1 % of reading or 5 PPM, whichever is greater	±1 % of reading or 5 PPM, whichever is greater
Noise	±2 PPM	±2 PPM
Span drift	±1 % of reading or 20 PPM, whichever is greater over 8 hrs	±10 PPM over 8 hours
Warm up time	45 minutes	45 minutes
Response time	T90 < 2 seconds	T90 < 2 seconds
Data Rate	Up to 2 Hz, configurable	Up to 2 Hz, configurable
Flow rate	3 LPM	3 LPM
Operating temperature	5 to 50 °C	5 to 50 °C

Tabelle 7: Spezifikation des elektrochemischen O₂ Analysators [Quelle: Bedienungsanleitung des Abgasanalysators Semtech DS der Fa. Sensors]

Range of Measurement	0 to 25 %
Accuracy	±2 % of reading or ±1 % Oxygen whichever is greater
Resolution	0.1 %
Linearity	±0.5 % of reading or ±0.5 % whichever is greater
Repeatability	±0.25 % of reading or ±0.3 % Oxygen whichever is greater
Noise	0.1 % Oxygen
Span drift	1 % of reading or ±0.5 % Oxygen whichever is greater
Warm up time	5 minutes
Responsetime	T90 < 6 seconds
Flowrate	0.5 to 3 LPM
Operatingtemperature	5 to 50 °C

3.4.2 Messtechnik zur Bestimmung der Rußkonzentration

Zur Messung der Partikelemissionen (elementarer Kohlenstoff) wurde der Micro Soot Sensor 483 der Firma AVL eingesetzt. Abbildung 8 zeigt das PASS-System. Das Messprinzip basiert auf der photoakustischen Spektroskopie. Das Messgas wird mit einem modulierten Laserlicht bestrahlt. Dadurch werden die schwarzen, stark absorbierenden Rußpartikel periodisch erwärmt und wieder abgekühlt.

Die daraus resultierenden Ausdehnungen und Kontraktionen des Trägergases verursachen zyklische Gasschwingungen, die mit einem empfindlichen Mikrofon detektiert werden. Partikelfreie Luft produziert kein Signal, bei rußbeladener Luft ist das Signal proportional zur Konzentration des Rußes im Messgas. Da das Messgerät kohlenstoffsensitiv arbeitet, d.h. nur den elementaren Kohlenstoff detektiert, nicht aber die Gesamtheit der Partikel, sind die Messergebnisse nicht direkt mit den Werten aus den gravimetrischen Messungen vergleichbar. In der Abbildung 9 sind das Funktionsprinzip der photoakustischen Spektroskopie (a) und der Aufbau einer photoakustischen Zelle (b) dargestellt. In der Tabelle 8 sind die Spezifikationen des Messgerätes aufgeführt.



Abbildung 8: Micro Soot Sensor Typ 483 [Quelle: AVL]

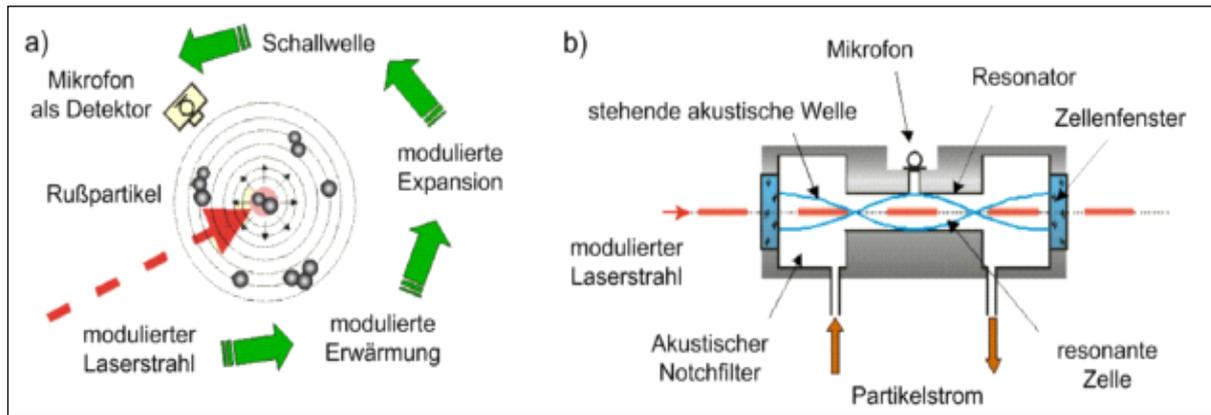


Abbildung 9: Funktion und Aufbau einer photoakustischen Messzelle [Quelle: AVL]

Tabelle 8: Spezifikationen des Micro Soot Sensors AVL 483

MESSEINHEIT	
Messwert:	Rußkonzentration (mg/m ³ , µg/m ³) im verdünnten Abgas
Messbereich:	0 – 50 mg/m ³
Auflösung Anzeige:	0,001 mg/m ³
Erfassungsgrenze:	~ 5 mg/ m ³
Stellverhältnis:	1 : 5.000
Datenübertragungsrate:	Digital: 10 Hz
	Analog: 100 Hz
Anstiegszeit:	≤ 1 sec
Betriebstemperatur:	5 °C bis 43 °C
Durchfluss Sonde/Bypass:	~ 2 + 2 l/min
Schnittstellen:	RS232, Digital I/O, Analog I/O, Ethernet
Laserklasse:	Lasergerät Klasse 1
KONDITIONIEREINHEIT	
Verdünnungsverhältnis (DR):	Verstellbar von 2 – 10 und von 10 – 20
	Das tatsächliche Verdünnungsverhältnis wird mit der unten stehenden Genauigkeit angegeben
Datenübertragungsrate:	Digital: max. 5 Hz
	Analog: 50 Hz
Genauigkeit (DR Anzeige):	max. ± 3 % im Bereich von DR [2..10],
	max. ± 10 % im Bereich von DR [10..20]
Stromversorgung:	90 bis 230 V, 50/60 Hz
Druckluft:	Eingangsdruck 1 ± 0,2 bar Überdruck
Durchfluss:	> 4 l/min
Abgastemperatur:	Bis 1000 °C
Abgasgegendruck:	Bis 2000 mbar
Druckpulsationen:	± 1000 mbar, aber max. 50 % des Abgasgegendrucks
Blowby-Menge:	Abhängig vom Druck, ~ 20 l/min bei 1000 mbar
Stromversorgung:	90 bis 240 V AC, 50/60 Hz, 500 VA
Maße Gerät:	Messeinheit: B x H x T ~ 19" x 5HE x 530 mm
	Konditioniereinheit: B x H x T ~ 19" x 5HE x 530 mm
Gewicht Gerät:	Messeinheit: ~20 kg
	Konditioniereinheit: ~ 12 kg

3.4.3 Messtechnik für gravimetrische Partikelmessung

Die Gravimetrie ist die vom Verordnungsgeber vorgeschriebene Beurteilungsgröße für die Bestimmung der Partikelemission aus Dieselmotoren. Bestimmt wird die emittierte Partikelmasse, die während eines definierten Testzyklus oder einer Prüfstufe auf einem Filterpapier abgeschieden wird.

Das **Particulate Sampling System Micro PSS** (Abbildung 10) entnimmt einen Teilstrom aus dem Abgasmassenstrom des Motors und verdünnt diesen mit gefilterter Umgebungsluft. Das so verdünnte Abgas durchströmt den Sammel-Filter (Pallflex Enfacg 47mm), auf dem die gravimetrisch zu bestimmenden Partikel zurückgehalten werden. Die Massen-Bestimmung erfolgt dann über eine Differenzbestimmung zwischen dem zuvor konditionierten und leer gewogenen und dem nach Beladung erneut konditionierten und ausgewogenen Filterpapier.

Das Micro PSS-20 ist ein Teilstrom-Verdünnungssystem mit Gesamtprobenahme. Dies bedeutet, dass das System nur einen Teil des Abgases verdünnt und dann das gesamte verdünnte Gas durch den Sammelfilter leitet. Ziel der Verdünnung ist eine Herabsetzung der Abgastemperatur, so dass das Abgas über den Filter geleitet werden kann, es dabei aber zu keinen Kondensationseffekten kommt.

Die Abbildung 11 zeigt ein Bild der Bedieneroberfläche (Software).



Abbildung 10: Gravimetrisches Partikelmessgerät Micro PSS [Quelle: Busch LANUV]

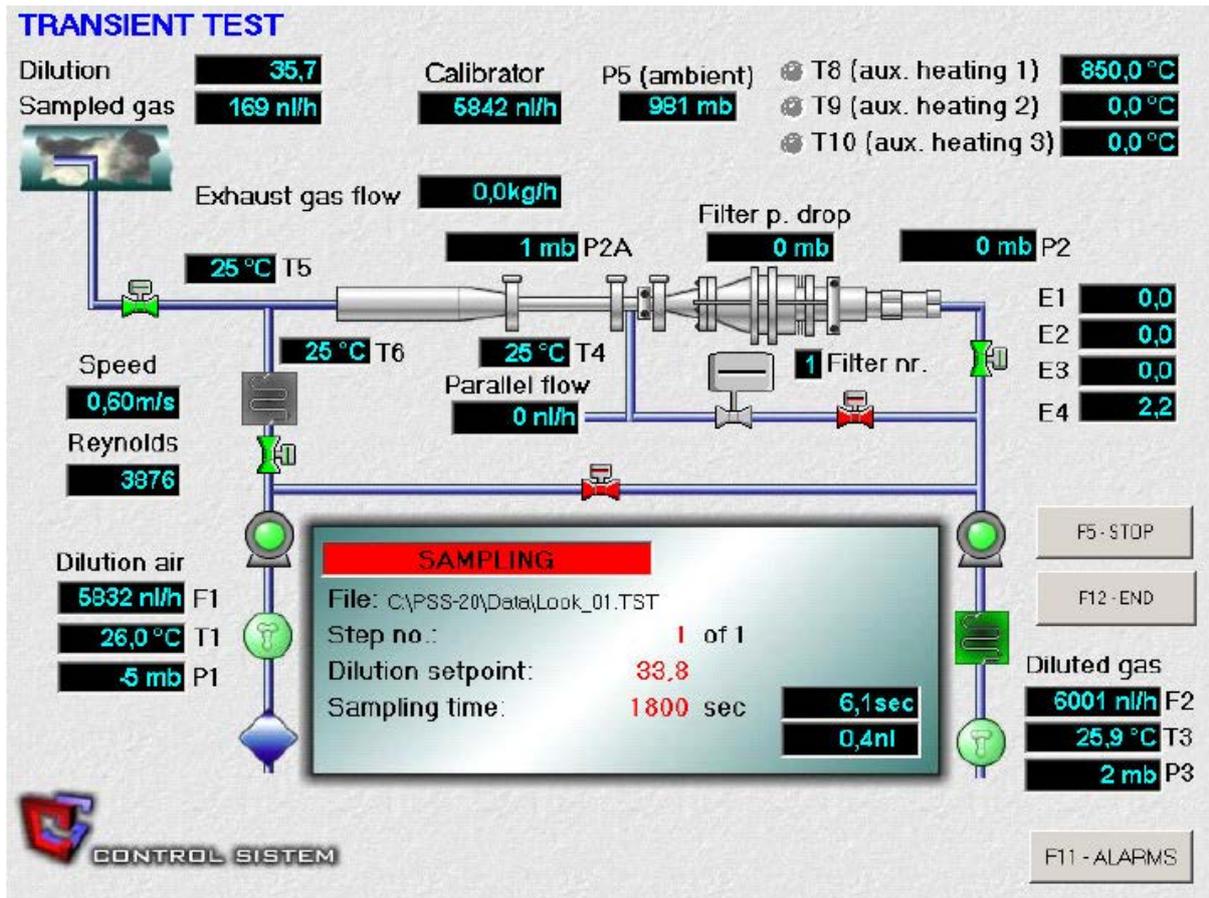


Abbildung 11: Darstellung des Gasflusses im Micro PSS [Quelle: Control Sistem]

3.4.4 Messung der Umgebungsdaten

Zur Bestimmung der für die Abgasberechnung notwendigen Korrekturfaktoren müssen die atmosphärischen Umgebungsdaten bestimmt werden. Temperatur und Barometerstand sowie die relative Feuchte wurden durch geeignete Sensoren erfasst. Die Anordnung der Temperatur- und Luftfeuchtemessstelle wurde hierbei so gewählt, dass sie möglichst nahe an der Ansaugung der Motorverbrennungsluft liegen. Es wurde ein handelsüblicher kombinierter Sensor zur Erfassung der Lufttemperatur und der relativen Feuchte benutzt und die Signale über die analogen Eingänge in das SEMTECH-DS eingelesen.

3.4.5 Bestimmung des Abgasmassenstroms

Das üblicherweise in Verbindung mit dem SEMTECH-DS benutzte Exhaust Flow Meter ist nicht für Massenströme ausgelegt, die ein Motor mit 95 Litern Hubvolumen produziert. Aus diesem Grund konnte bei den Messungen nicht auf eine direkte Messung des Abgasmassenstroms zurückgegriffen werden. Alternativ wurde ein Verfahren, welches in der ISO 8178 beschrieben ist, herangezogen. Mit den Kraftstoffverbrauchsdaten und dem Verfahren der Kohlenstoffbilanz wurde nach folgender Gleichung (Formel 1) der Abgasmassenstrom ermittelt. In diese Bestimmung gehen die Kraftstoffzusammensetzung sowie alle kohlenstoffhaltigen limitierten Abgaskomponenten ein.

$$q_{mew} = q_{mf} \times \left(\left(\frac{w_{BET} \times w_{BET} \times 1,4}{\left(\frac{1,4 \times w_{BET}}{f_C} + w_{ALF} \times 0,08936 - 1 \right) \times \frac{1}{1,293} + f_{fd}} + w_{ALF} \times 0,08936 - 1 \right) \times \left(1 + \frac{H_a}{1000} \right) + 1 \right)$$

Hierbei ist:

$$f_{fd} = -0,055593 \times w_{ALF} + 0,008002 \times w_{DEL} + 0,0070046 \times w_{EPS}$$

$$f_C = (c_{CO2d} - c_{CO2ad}) \times 0,544 + \frac{c_{COd}}{18\,522} + \frac{c_{HCw}}{17\,355}$$

mit

c_{CO2d}	dry CO ₂ concentration in the raw exhaust [%]
c_{CO2ad}	dry CO ₂ concentration in the ambient air [%]
c_{COd}	dry CO concentration in the raw exhaust [ppm]
c_{HCw}	wet HC concentration in the raw exhaust [ppm]
w_{ALF}	H content of fuel, % mass
w_{BET}	C content of fuel, % mass
w_{GAM}	S content of fuel, % mass
w_{DEL}	N content of fuel, % mass
q_{mf}	Fuel mass flow rate
H_a	g water per kg dry air

Formel 1: Bestimmung des Abgasmassenstroms mittels Kohlenstoffbilanz

Für den Betrieb mit der Diesel-Wasser-Emulsion wurde der Abgasmassenstrom mit dem auf den Kraftstoffverbrauch bezogenen Wasseraufwand korrigiert.

3.4.6 Messanordnung auf dem Schiff

Die Zugänglichkeit der Abgasleitung machte eine Messanordnung auf Deck notwendig. Abbildung 12 zeigt die Messsysteme mit der Probenahme am Kamin des Schiffes.

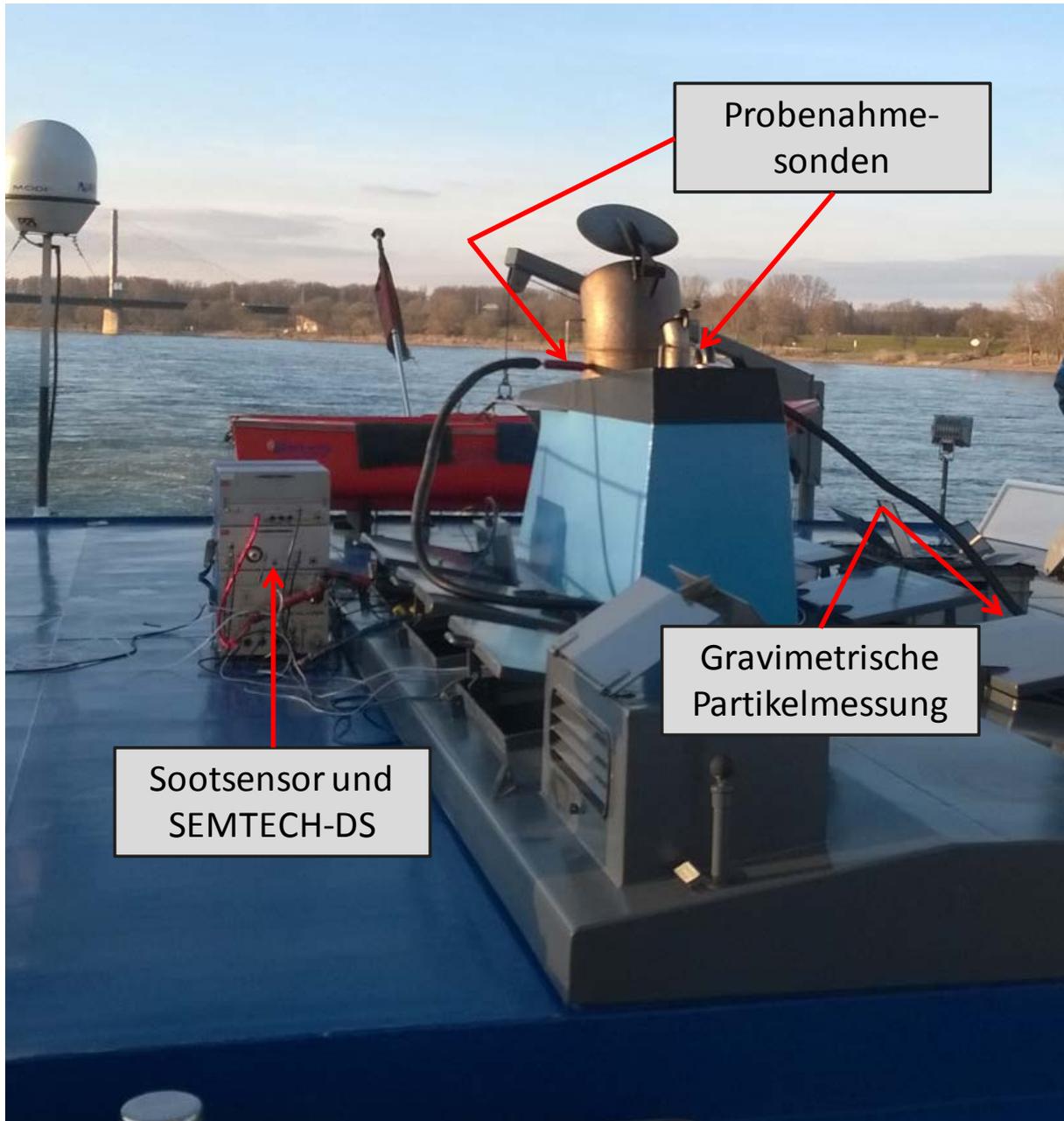


Abbildung 12: Messanordnung am Motorsystem [Quelle: TÜV Nord]

4 Ergebnisse

Es wurden zwei Messreihen gefahren, wobei jede Messreihe aus acht Messpunkten bestand. Hierbei wurden die vier Messpunkte eines E3-Zyklus beginnend mit der maximalen Drehzahl abgefahren und anschließend die gleichen Messpunkte, allerdings ausgehend von der kleinsten Zyklusdrehzahl, wiederholt. Für die erste Messreihe wurde der Motor mit reinem Dieselmotorkraftstoff betrieben, für die zweite Messreihe mit Diesel-Wasser-Emulsion.

Zur Berechnung eines an den E3-Zyklus angenäherten Ergebnisses wurden zuerst nur die ersten vier Messpunkte einer Messreihe herangezogen, da sie in der durch die ISO geforderten Reihenfolge gefahren wurden. Um jedoch eventuelle zeitabhängige Effekte zu erkennen, wurden auch mit den von der kleinen Drehzahl ausgehenden Messpunkten Ergebnisse eines E3-Zyklus berechnet, auch wenn die Reihenfolge nicht den Vorgaben der ISO entspricht. Da es sich um stationäre Messpunkte handelt, sind keine großen Ergebnisunterschiede zu erwarten.

4.1 Ergebnisse der gasförmigen Emissionen

4.1.1 Ergebnisse in Anlehnung an ISO 8178-4 E3

Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen die Emissionsergebnisse ermittelt in Anlehnung an ISO 8178 für den E3 Zyklus. Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigen die Emissionsergebnisse für eine E3-Auswertung aus den jeweils zweiten vier Messpunkten.

Tabelle 9: E3-Zyklusergebnis Dieselmotorkraftstoff

E3 -Ergebnis aus den ersten vier Messpunkten ohne Wasser	
	g/kWh
NO _x	10,403
CO	1,301
THC	1,080

Tabelle 10: E3-Zyklusergebnis
Diesel/Wasser-Emulsion

E3 -Ergebnis aus den ersten vier Messpunkten mit Wasser	
	g/kWh
NO _x	8,493
CO	0,901
THC	0,713

Tabelle 11: E3-Zyklusergebnisse Dieselkraftstoff aus zweiter Messreihe

E3 -Ergebnis aus den zweiten vier Messpunkten ohne Wasser	
	g/kWh
NO _x	10,163
CO	1,504
THC	1,060

Tabelle 12: E3-Zyklusergebnis
Diesel/Wasser-Emulsion aus zweiter Messreihe

E3 -Ergebnis aus den zweiten vier Messpunkten mit Wasser	
	g/kWh
NO _x	8,384
CO	0,875
THC	0,708

Die Ergebnisse der Messung mit üblichem Dieselkraftstoff bestätigen im Rahmen der normalen Streuungen die Typprüfwerte der Motorfamilie für die gasförmigen Komponenten sehr gut. Neben den Stickoxidemissionen von ca. 10,4 g/kWh (Typprüfwert 9,44 g/kWh) liegen auch die gemessenen CO- und HC-Emissionen in den Größenordnungen der Typprüfung. Auch die Ergebnisse, die aus den jeweils zweiten vier Messpunkten ermittelt wurden, liegen in gleicher Größenordnung. Die nachfolgende Messung im Diesel-Wasser-Emulsionsbetrieb zeigt Reduzierungen für alle Komponenten. Tabelle 13 und Tabelle 14

stellen die prozentualen Emissionsveränderungen beim Betrieb mit Diesel-Wasser-Emulsion für die jeweils ersten vier Messpunkte und die zweiten vier Messpunkte dar. Im Diesel-Wasser-Emulsionsbetrieb reduzierte sich die erreichte Maximaldrehzahl von 940 min^{-1} auf 925 min^{-1} . Dieser Effekt beruht auf der maximalen volumetrischen Förderleistung der Einspritzpumpe. Die Motorleistung hängt direkt von der eingespritzten Kraftstoffmasse ab. Ist das Einspritzsystem nicht mehr in der Lage, die zuemulgierte Wassermasse durch eine Erhöhung der Einspritzmenge auszugleichen, tritt ein Leistungsverlust auf, der sich in einer reduzierten Propellerdrehzahl ausdrückt.

Die Emissionsreduktionen lagen für die Komponenten CO und THC im erwarteten Bereich. Bei NO_x ist die gemessene Reduktion geringer ausgefallen als erwartet.

Tabelle 13: Prozentuale Emissionsreduktion durch den Betrieb mit Diesel/Wasser-Emulsion (E3-Zyklus)

Prozentuale Änderung im E3 - Zyklus	
	%
NO_x	-18,35%
CO	-30,72%
THC	-33,98%

Tabelle 14: Prozentuale Emissionsreduktion durch den Betrieb mit Diesel/Wasser-Emulsion (E3-Zyklus) für die zweite Messreihe

Prozentuale Änderung im E3 - Zyklus (zweite Messreihe)	
	%
NO_x	-17,50%
CO	-41,82%
THC	-33,23%

4.1.2 Ergebnisse der Einzelmesspunkte

Tabelle 15 bis Tabelle 16 zeigen die Einzelergebnisse der spezifischen, leistungsbezogenen gasförmigen Emissionen und Verbräuche der acht Messpunkte für den Betrieb mit reinem Dieselmotorkraftstoff und Diesel-Wasser-Emulsion. Tabelle 17 stellt die prozentuale Änderung zwischen den beiden Messreihen dar. Die nachfolgende Tabelle 18 bis Tabelle 20 stellen die Mittelwerte der beiden Messreihen sowie die prozentualen Veränderungen zwischen den beiden Messreihen dar.

Tabelle 15: Einzelergebnisse bei Betrieb mit reinem Dieselmotorkraftstoff

Diesel									
Messpunkt	Drehzahl	Leistung	NO	NO ₂	NO _x	CO	HC	CO ₂	be
-	min-1	kW	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
1	940	1235,4	9,401	0,361	9,763	1,223	1,042	628,7	201,0
2	850	900,6	9,959	0,325	10,284	1,298	1,087	585,5	187,3
3	750	605,5	10,861	0,337	11,199	1,383	1,096	587,0	187,7
4	590	294,2	13,011	0,548	13,559	1,591	1,195	593,6	189,6
5	590	294,2	12,889	0,598	13,487	1,658	1,187	593,8	189,6
6	750	605,5	10,634	0,378	11,012	1,603	1,060	587,9	187,9
7	850	900,6	9,805	0,324	10,128	1,642	1,065	599,5	191,6
8	940	1235,4	9,001	0,319	9,320	1,742	1,027	623,7	199,4

Tabelle 16: Einzelergebnisse bei Betrieb mit Diesel-Wasser-Emulsion

Diesel/Wasser									
Messpunkt	Drehzahl	Leistung	NO	NO ₂	NO _x	CO	HC	CO ₂	be
-	min-1	kW	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
1	925	1174,9	6,767	0,234	7,001	0,777	0,709	569,5	185,9
2	850	900,6	7,713	0,215	7,929	0,892	0,723	580,8	187,9
3	750	605,5	11,917	0,384	12,301	0,932	0,675	581,2	182,4
4	590	294,2	13,701	0,668	14,369	1,598	0,717	604,1	183,5
5	590	294,2	13,532	0,677	14,209	1,473	0,757	604,5	183,5
6	750	605,5	11,513	0,417	11,931	0,825	0,722	580,4	182,1
7	850	900,6	7,579	0,246	7,825	0,816	0,706	571,0	184,5
8	925	1174,9	6,763	0,229	6,992	0,894	0,696	561,0	182,9

Tabelle 17: Prozentuale Veränderungen Diesel-Wasser-Emulsion zu Diesel

Diesel/Wasser zu Diesel									
Messpunkt	Drehzahl	Leistung	NO	NO ₂	NO _x	CO	HC	CO ₂	be
-	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	-1,6	-4,9	-28,0	-35,3	-28,3	-36,5	-32,0	-9,4	-7,5
2	0,0	0,0	-22,5	-33,8	-22,9	-31,3	-33,5	-0,8	0,3
3	0,0	0,0	9,7	13,9	9,8	-32,6	-38,4	-1,0	-2,8
4	0,0	0,0	5,3	21,8	6,0	0,4	-40,0	1,8	-3,2
5	0,0	0,0	5,0	13,3	5,4	-11,2	-36,2	1,8	-3,2
6	0,0	0,0	8,3	10,5	8,3	-48,6	-31,9	-1,3	-3,1
7	0,0	0,0	-22,7	-24,0	-22,7	-50,3	-33,7	-4,7	-3,7
8	-1,6	-4,9	-24,9	-28,2	-25,0	-48,7	-32,2	-10,1	-8,3

Tabelle 18: Mittelwerte aus beiden Messreihen bei Dieselbetrieb

Diesel								
Drehzahl	Leistung	NO	NO ₂	NO _x	CO	HC	CO ₂	be
min ⁻¹	kW	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
940	1235,4	9,201	0,340	9,542	1,482	1,035	626,2	200,2
850	900,6	9,882	0,324	10,206	1,470	1,076	592,5	189,4
750	605,5	10,748	0,358	11,105	1,493	1,078	587,5	187,8
590	294,2	12,950	0,573	13,523	1,625	1,191	593,7	189,6

Tabelle 19: Mittelwerte aus beiden Messreihen bei Betrieb mit Diesel-Wasser-Emulsion

Diesel/Wasser								
Drehzahl	Leistung	NO	NO ₂	NO _x	CO	HC	CO ₂	be
min ⁻¹	kW	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
925	1174,9	6,765	0,231	6,997	0,836	0,702	565,2	184,4
850	900,6	7,646	0,231	7,877	0,854	0,714	575,9	186,2
750	605,5	11,715	0,401	12,116	0,878	0,698	580,8	182,2
590	294,2	13,617	0,672	14,289	1,535	0,737	604,3	183,5

Tabelle 20: Prozentuale Veränderungen der Mittelwerte der beiden Messreihen; Diesel-Wasser-Emulsion zu Diesel

Diesel/Wasser zu Diesel								
Drehzahl	Leistung	NO	NO ₂	NO _x	CO	HC	CO ₂	be
min ⁻¹	%	%	%	%	%	%	%	%
925/940	-4,89%	-26,48%	-32,00%	-26,67%	-43,64%	-32,10%	-9,74%	-7,92%
850	0,00%	-22,62%	-28,92%	-22,82%	-41,91%	-33,61%	-2,81%	-1,71%
750	0,00%	9,00%	12,12%	9,10%	-41,19%	-35,21%	-1,14%	-2,96%
590	0,00%	5,15%	17,35%	5,67%	-5,50%	-38,09%	1,78%	-3,24%

Die Betrachtungen der Einzelwerte der einzelnen Messpunkte zeigen unterschiedliche Effekte auf. Zum einen ist erkennbar, dass die Verbesserungen im E3-Ergebnis bei den Stickoxiden auf Emissionsreduktionen in den Messpunkten 1 und 2 (sowie 7 und 8) zurückzuführen ist. Bei den beiden kleinen Drehzahlen sind Erhöhungen der NO_x-Emissionen feststellbar.

Offensichtlich bewirkt die zuemulgierte Wassermenge bei den kleineren Drehzahlen nicht die gleiche Veränderung der Verbrennung wie bei den höheren Drehzahlen. Offenbar überkompensiert hier die Verbesserung der Verbrennung durch die Emulsion -sichtbar durch die deutlichen Reduktionen bei CO, THC und Kraftstoffverbrauch- die temperatur- und damit stickoxidsenkende Verdampfungsenthalpie des Wassers, so dass sich die Stickoxidbildung etwas erhöht. Nach Ansicht des Systemherstellers kann durch einfache Anhebung der Wassergehalte in diesen Punkten Abhilfe geschaffen werden, so dass auch hier Stickoxidreduktionen erzielbar sind.

4.2 Ergebnisse der Partikelemissionen

4.2.1 Ergebnisse in Anlehnung an ISO 8178-4 E3

Für die Partikelmessung wurden zwei unterschiedliche Messsysteme herangezogen. Zum einen wurde ein Soot Sensor zur Ermittlung der reinen Kohlenstoffkonzentration und zum anderen ein gravimetrisches Messsystem zur Bestimmung der Partikelmassenemission eingesetzt. Stellt man nun analog zu den gasförmigen Emissionen die Partikelmassenergebnisse in einer E3-Bewertung für die ersten vier Messpunkte und die zweiten vier Messpunkte der Messreihen mit Dieselkraftstoff und Diesel-Wasser-Emulsion dar, ergeben sich Tabelle 21 und Tabelle 22

Tabelle 21: E3-Zyklusergebnis Dieselkraftstoff

E3 Ergebnis für Partikelmasse bei Betrieb mit Dieselkraftstoff		
Messpunkte		g/kWh
1 bis 4	PM	0,079
5 bis 8	PM	0,080

Tabelle 22: E3-Zyklusergebnis Diesel-Wasser-Emulsion

E3 Ergebnis für Partikelmasse bei Betrieb mit Diesel-Wasser-Emulsion		
Messpunkte		g/kWh
1 bis 4	PM	0,062
5 bis 8	PM	0,044

Auffällig bei diesen Ergebnissen sind die sehr niedrigen Werte der Partikelmassenemission mit Dieselkraftstoff im Vergleich zu den Typrüferten (siehe Tabelle 2).

Tabelle 23: Prozentuale Änderungen der E3-Ergebnisse

Prozentuale Änderung der E3 Ergebnisse Diesel-Wasser-Emulsion zu Diesel		
Messpunkte		%
1 bis 4	PM	-21,247
5 bis 8	PM	-44,632

Tabelle 23 zeigt die prozentualen Änderungen zwischen Diesel-Wasser-Emulsionsbetrieb und Betrieb mit Dieselkraftstoff. Im Gegensatz zu den gasförmigen Emissionen und auch im Gegensatz zu den Partikelergebnissen mit Dieselkraftstoff, bei denen die Unterschiede zwischen den Messpunkten 1 bis 4 und 5 bis 8 nicht sehr groß sind, fallen hier die Ergebnisse für den Diesel-Wasser-Emulsionsbetrieb dadurch auf, dass die Minderung der Partikelmassenemission bei den Messpunkten 5 bis 8 mehr als doppelt so hoch ausfällt wie bei den Messpunkten 1 bis 4. Näheren Aufschluss kann hier vielleicht auch die Betrachtung der Einzelergebnisse liefern.

Das sehr niedrige Niveau der Partikelmassenemission im E3-Zyklus ist auch in den Ergebnissen aller Einzelmesspunkte zu erkennen. Wie bei der Beschreibung der verwendeten Messtechnik dargestellt, wurde neben der gravimetrischen Partikelmessung auch der Soot Sensor, ein System, das die reinen Rußemissionen ermittelt, benutzt. Die beiden Systeme hatten jeweils eine eigene Probenahme. Der Vergleich der Partikelmassenemission mit der Emission reinen Rußes (Soot) zeigt, dass 55% bis 73% der Massenemission bei Dieselbetrieb reiner Ruß ist. Diese Ergebnisse liegen im deutlich niedrigen Bereich der üblichen Verhältnisse bei Dieselmotoren, bestätigen aber die geringen Partikelmassenemissionen, da zwei Messsysteme unabhängig voneinander Ergebnisse in diesen Größenordnungen liefern.

4.2.2 Ergebnisse der Einzelmesspunkte

Tabelle 24: Einzelergebnisse der Partikel- und Rußmessung für Dieselbetrieb

Diesel					
Messpunkt	Drehzahl	Leistung	PM	Ruß	Rußanteil
-	min-1	kW	g/kWh	g/kWh	%
1	940	1235,4	0,081	0,043	53,3
2	850	900,6	0,081	0,053	65,6
3	750	605,5	0,067	0,048	71,2
4	590	294,2	0,071	0,054	75,5
5	590	294,2	0,078	0,053	67,7
6	750	605,5	0,065	0,049	75,4
7	850	900,6	0,081	0,059	73,1
8	940	1235,4	0,084	0,047	56,5

Tabelle 25: Einzelergebnisse der Partikel- und Rußmessung für Diesel-Wasser-Emulsionsbetrieb

Diesel-Wasser-Emulsion					
Messpunkt	Drehzahl	Leistung	PM	Ruß	Rußanteil
-	min-1	kW	g/kWh	g/kWh	%
1	925	1174,9	0,060	0,006	9,6
2	850	900,6	0,065	0,006	9,4
3	750	605,5	0,054	0,005	9,2
4	590	294,2	0,058	0,017	28,8
5	590	294,2	0,044	0,019	44,4
6	750	605,5	0,035	0,005	14,2
7	850	900,6	0,044	0,006	14,1
8	925	1174,9	0,049	0,006	12,0

Tabelle 26: Prozentuale Änderungen der Partikel- und Rußemissionen

Diesel-Wasser-Emulsion zu Diesel				
Messpunkt	Drehzahl	Leistung	PM	Ruß
-	%	%	%	%
1	-1,6	-4,9	-25,8	-86,6
2	0,0	0,0	-19,2	-88,5
3	0,0	0,0	-20,1	-89,7
4	0,0	0,0	-18,6	-69,0
5	0,0	0,0	-43,9	-63,2
6	0,0	0,0	-45,2	-89,7
7	0,0	0,0	-46,0	-89,6
8	-1,6	-4,9	-41,9	-87,7

Bei den Ergebnissen mit Diesel-Wasser-Emulsion betragen die Anteile der Rußemissionen an den Partikelmassenemissionen nur ca. 10% bis maximal 44%. Der Vergleich der Rußemissionen zwischen Diesel und Diesel-Wasser-Betrieb zeigt in drei Messpunkten eine Reduktion von ca. 90% und bei der kleinsten Drehzahl eine Reduktion von knapp 70%. Dies sind Größenordnungen, die bei der Nutzung der Diesel-Wasser-Emulsion für die Rußemission erwartet werden. Die Reduktion bei der Gesamtpartikelmassenemission in der Größenordnung von knapp über 30% wirft die Frage nach der Partikelzusammensetzung auf. Außerhalb dieses Projektes wird versucht werden, diese Fragestellung zu beantworten.

Auffällig sind hier die deutlich geringeren Partikelmassenemissionen der Messpunkte 5 bis 8, wobei die Rußemission nahezu konstant geblieben ist. Aus Betriebserfahrungen mit Diesel-Wasser-Emulsionsanlagen ist eine gewisse Reinigungswirkung des Emulsionsbetriebs bekannt. Da sich alle verbrennungsbegründeten Emissionsparameter in ähnlicher Größenordnung konstant verhalten, liegt die Vermutung nahe, dass die Nicht-Ruß-Fraktion der Partikelmassenemission auf Austragungseffekte oder andere nicht verbrennungsbegründete Quellen zurückzuführen sind. Aus diesem Grund wurden durch den Systemhersteller weitere Untersuchungen initiiert. Zum einen wurde die Zusammensetzung der Partikelemissionen aufgeschlüsselt und zum anderen eine theoretische Betrachtung zu Emissionen aus Wasserinhaltsstoffen durchgeführt.

4.2.3 Analyse der Partikelmassenemission

Zur weiteren Plausibilisierung der zunächst ungewöhnlich erscheinenden Partikelergbnisse, wurde über den TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG im Auftrag der Exomission Umwelttechnik GmbH eine chemische Aufschlüsselung der Probenfilter für die Messpunkte der Drehzahl 850 min⁻¹ durch die FEV GmbH in Aachen vorgenommen. Es wurden folgende Analysen durchgeführt:

- a) Extraktion der SOF (Soluble Organic Fraction)
- b) Extraktion der WSF (Water Soluble Fraction) inkl. Sulfatbestimmung aus WSF-Extrakt
- c) Bestimmung der Kraftstoff/Öl-Anteile aus dem SOF-Extrakt mittels Gaschromatographie
- d) Rechnerische Ermittlung der verbleibenden NSF (Non Soluble Fraction)

Tabelle 27 zeigt die tabellarische Darstellung der chemischen Analyse.

Tabelle 27: Ergebnisse der chemischen Aufschlüsselung der Partikelmassenemission, Messpunkt 850 min⁻¹ im Dieselbetrieb (M5, M17) und im Diesel-Wasser-Emulsionsbetrieb (M21, M27)

Filterbezeichnung	Beladung TÜV [µg]	vor SOF [µg]	nach SOF [µg]	SOF [µg]	SOF [µg] korr.	SOF [%] korr.
M5	260,9	81754	81704	50	23,0	8,8
M17	257,2	85570	85526	44	17,0	6,6
M21	213,5	88352	88309	43	16,0	7,5
M27	145,7	85135	85104	31	4,0	2,7
D1 (1.Blindprobe)	0,0	90979	90944	35		
D2 (2.Blindprobe)	0,0	91115	91096	19		
			Mittelwert	27		

Filterbezeichnung	vor WSF [µg]	nach WSF [µg]	WSF [µg]	WSF [µg] korr.	WSF [%] korr.
M5	81704	81565	139	75	28,7
M17	85526	85382	144	80	31,1
M21	88309	88136	173	109	51,1
M27	85104	84978	126	62	42,6
D1 (1.Blindprobe)	90944	90881	63		
D2 (2.Blindprobe)	91096	91031	65		
		Mittelwert	64		

Filterbezeichnung	NSF [µg] korr.	NSF [%] korr.	Dieselanteil in SOF [%]	Ölanteil in SOF [%]
M5	163	62,4	ca. 80	ca. 20
M17	160	62,3	ca. 80	ca. 20
M21	89	41,5	ca. 80	ca. 20
M27	80	54,7	ca. 80	ca. 20

Die Abbildung 13 zeigt eine grafische Darstellung der Analyseergebnisse. Auffällig ist der große Anteil an nicht löslichen Partikelbestandteilen. Kombiniert man nun die Ergebnisse der chemischen Analyse mit den Massenemissionsergebnissen, ergibt sich Abbildung 14. Hier fällt auf, dass bei den Ergebnissen im Diesel-Wasser-Emulsionsbetrieb ein großer Anteil an nicht löslichen Bestandteilen neben den Rußemissionen existiert. Dies legt natürlich die Vermutung nahe, dass sich Wasserinhaltsstoffe in der Probenfilterbeladung niederschlagen. Der Systemhersteller Exomission hat nach diesen Erkenntnissen weitere Recherchen zu Effekten unterschiedlicher Wasservorbehandlungen durchgeführt. Mit Ergebnissen früherer Messreihen [Ho_2012] und vorhandenen Wasseranalysen wurden Erkenntnisse zum quantitativen Niederschlag von Wasserinhaltsstoffen auf den Messfiltern gewonnen. Mit bisher nicht bekannten Umständen des Betriebs der Wasseraufbereitung auf der MS Aarburg sowie mit den neu gewonnenen Erkenntnissen über die Auswirkungen auf die gravimetrische Partikelemissionsbestimmung konnte gezeigt werden, dass die nicht löslichen Inhaltstoffe des auf der MS Aarburg verwendeten Wassers für den Anteil der nicht löslichen Fraktion neben der Rußemission verantwortlich sind.

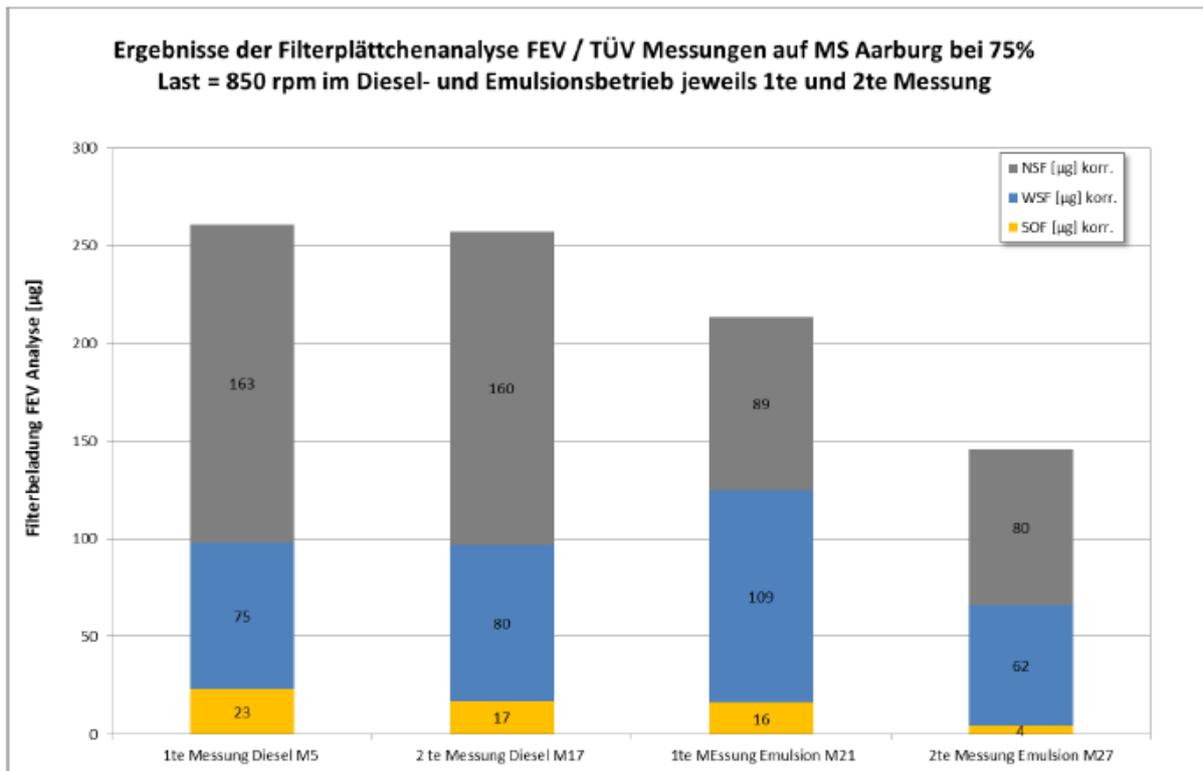


Abbildung 13: Grafische Darstellung der Zusammensetzung der Filterbeladung im Messpunkt 850 min^{-1} [Quelle: Exomission]

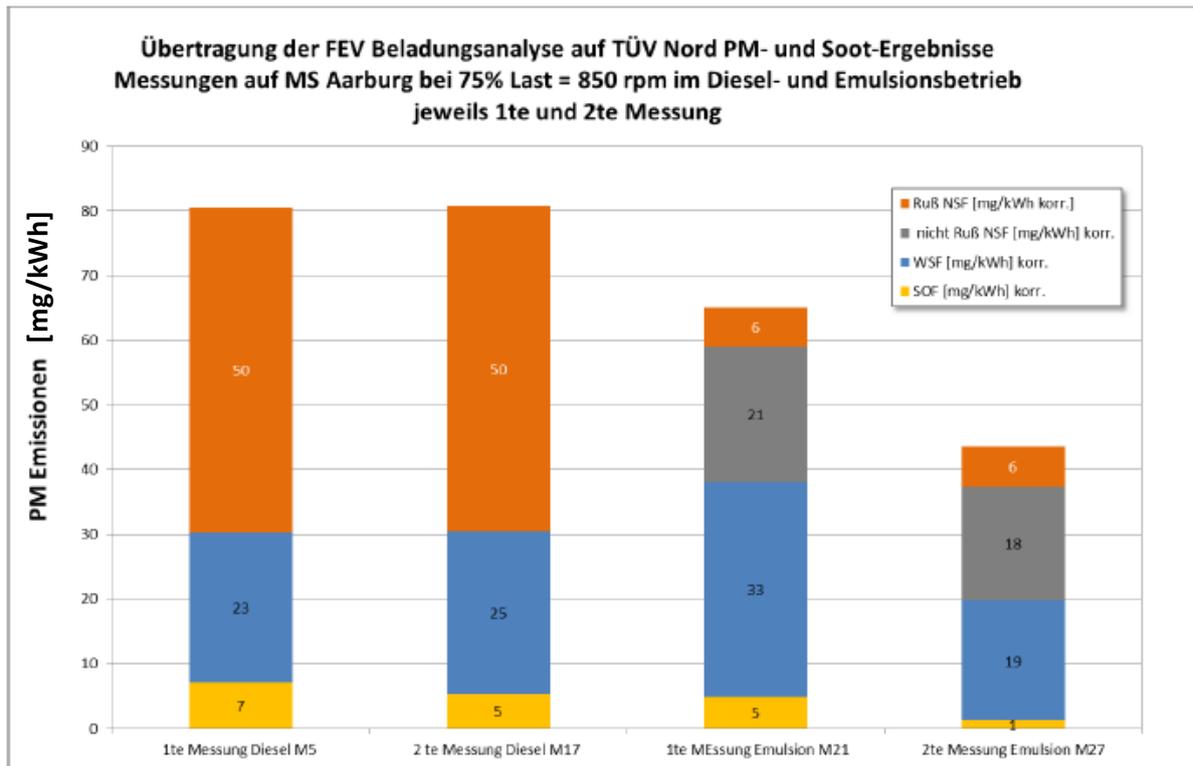


Abbildung 14: Übertragung der Beladungsanalyse auf die Massenemissionsergebnisse, Messpunkt 850 min^{-1} [Quelle: Exomission]

Setzt man eine Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf die anderen Messpunkte voraus, ergeben sich mit den bekannten Wasserdurchsätzen Abbildung 15 und Abbildung 16.

Da nach Meinung des Systemherstellers bei korrektem Betrieb der Wasseraufbereitung die nicht löslichen Inhaltsstoffe nahezu vollständig ausfilterbar sind, sind Betrachtungen von Ergebnissen mit einer E3-Bewertung nach Abzug der Wasserinhaltsstoffe von der Gesamtpartikelmasse vorgenommen worden (Tabelle 28). Zu erkennen ist, dass für die Messpunkte 5 bis 8 nach Abzug der Wasserinhaltsstoffe Reduktionswerte für die Gesamtpartikelmassemission erreicht werden, wie sie nach den bisherigen Erkenntnissen über die Wirkung von Diesel-Wasser-Emulsionsanlagen zu erwarten waren.

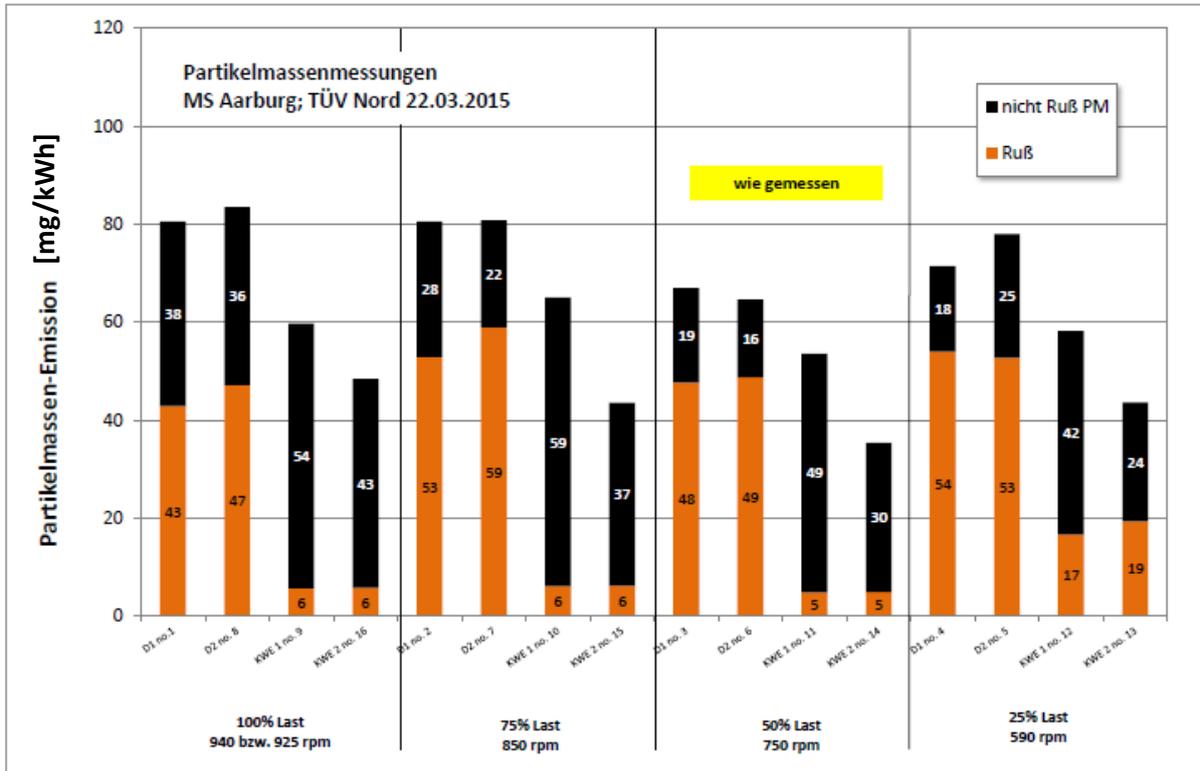


Abbildung 15: Rußmassenemissionsanteil an der Gesamtpartikelmassenemission

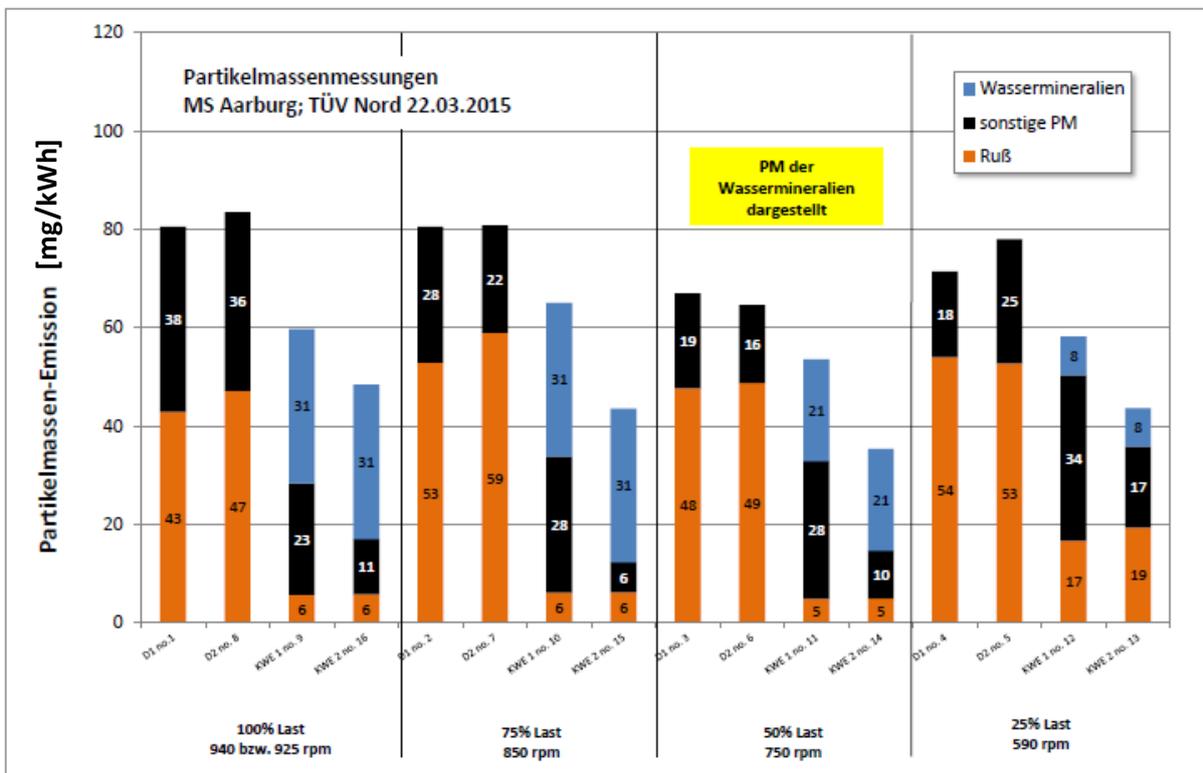


Abbildung 16: Anteil der Wasserinhaltsstoffe an der Gesamtpartikelmassenemission

Tabelle 28: Ergebnisse mit E3-Bewertung unter Berücksichtigung der Wasserinhaltsstoffe

	Motor-	PM	davon PM	reale PM
	Drehzahl	gemessen	Mineralien	ohne Mineralien
	1/min	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Mittelwerte Dieselmessungen	940	0,082	0	0,082
	850	0,081	0	0,081
	750	0,066	0	0,066
	590	0,075	0	0,075
E3 gewichtet	-	0,079	0	0,079

	Motor-	PM	davon PM	reale PM
	Drehzahl	gemessen	Mineralien	ohne Mineralien
	1/min	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Erste Messung mit Emulsion	925	0,060	0,031	0,028
	850	0,065	0,031	0,034
	750	0,054	0,021	0,033
	590	0,058	0,008	0,050
E3 gewichtet	-	0,061	0,026	0,035
Veränderung ggü. Diesel	-	-22%		-56%

	Motor-	PM	davon PM	reale PM
	Drehzahl	gemessen	Mineralien	ohne Mineralien
	1/min	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Zweite Messung mit Emulsion	925	0,049	0,031	0,017
	850	0,044	0,031	0,012
	750	0,035	0,021	0,015
	590	0,044	0,008	0,036
E3 gewichtet	-	0,043	0,026	0,017
Veränderung ggü. Diesel		-45%		-78%

Die Unterschiede zwischen der ersten und zweiten Messung mit Diesel-Wasser-Emulsion resultieren aus den wahrscheinlichen Austragungseffekten von Ablagerungen im Abgassystem wie bereits beschrieben.

4.3 Diskussion der Ergebnisse

Untersuchungen im Rahmen von anderen Projekten (Prüfstandläufen und umgesetzten Systemanwendungen) [Ho_2012] haben gezeigt, dass der Einfluss der Verwendung von Diesel-Wasser-Emulsionen sehr stark von der Verbrennungsauslegung des jeweiligen Motors abhängt. Die Projektplanung sah daher eine Erprobungs- und Optimierungsphase vor, mit der die optimalen Betriebsparameter für den konkreten Einsatzfall bestimmt werden sollten.

Das Projekt wurde unter hohem Zeitdruck durchgeführt. Durch organisatorische Probleme ergaben sich zeitliche Verzögerungen bei der Installation der Emulsionsanlage. Daher musste die ursprünglich geplante Erprobungs- und Optimierungsphase auf eine einzelne Applikationsfahrt reduziert werden. Die Systemeinstellungen basierten deshalb im Wesentlichen auf Erfahrungswerten aus Prüfstandläufen mit Nutzfahrzeugmotoren, bzw. anderen Anwendungen.

Bei Betrachtung der NO_x-Emissionsergebnisse im Vergleich der beiden Messreihen fällt auf, dass eine Reduktion lediglich bei den beiden Messpunkten bei höheren Drehzahlen erfolgt. Bei den beiden niedrigeren Drehzahlen ist sogar eine geringfügige Erhöhung der NO_x-Emission zu beobachten. Offensichtlich bewirkt hier der Emulsionsbetrieb mit den verwendeten Wasseranteilen eine Verbrennungsbeeinflussung zu höheren Prozesstemperaturen und leicht verbesserten Wirkungsgraden. Da die NO_x-Reduktionswirkung von Diesel-Wasser-Emulsionen auf einen temperaturabsenkenden Effekt zurückgeführt wird, liegt die Vermutung nahe, dass insbesondere bei den beiden niedrigeren Drehzahlen noch deutlich größere Wasseranteile zuemulgiert werden können. Eine entsprechende Erprobung und Optimierung sollte zu besseren Ergebnissen bei der Stickoxidabsenkung führen. Dies gilt natürlich für die kleineren Drehzahlen, aber auch bei den höheren Drehzahlen scheint das Potenzial noch nicht ausgeschöpft zu sein. Es stellt sich hier lediglich die Frage, ob ein zusätzlicher Leistungsverlust im Maximalleistungspunkt für den täglichen Schiffsbetrieb akzeptabel ist.

Die Reduktionen bei den CO- und HC-Emissionen, die bei über 30% für HC und über 40% (Ausnahme kleinste Drehzahl) bei CO liegen, deuten auf eine Verbesserung der Verbrennung hin, die sich auch in einer Verringerung der spezifischen Kraftstoffverbräuche bzw. CO₂-Emissionen widerspiegelt.

Die größten Fragestellungen werfen die Messergebnisse der Partikel- und Rußemissionen auf. Wie bereits erwähnt, liegen die Partikelmassenemissionen bei reinem Dieselbetrieb nur bei ca. einem Drittel der Ergebnisse, die bei der Typprüfung ermittelt worden sind. Zudem wurden zwischen der ersten und zweiten Messreihe mit Emulsion zwar nahezu konstante Rußemissionen gemessen und -Reduktionen ermittelt. Die zugehörigen Partikelmassenemissionen weichen jedoch von der ersten zur zweiten Messreihe mit Emulsion sehr deutlich voneinander ab, so dass die Partikelmassenreduktion mit Emulsion sich in der zweiten Messreihe verdoppelt hat. Berechnet man die Rußemissionen auf Basis der Daten des Sootsensors, werden die geringen Emissionen bestätigt. Da die Differenz der Rußemissionen zwischen Diesel- und Emulsionsbetrieb mit einer Reduktion um 90% im Rahmen der Erwartung liegt und die beiden Messsysteme (gravimetrische Messung mit PSS 20, Rußmessung mit Soot Sensor AVL 483) mit völlig eigenständigen Probenahmen betrieben wurden, erscheint die Wahrscheinlichkeit einer Fehlmessung zwar sehr gering,

muss aber in Erwägung gezogen werden. Grundsätzlich stellen sich deshalb bei der Bewertung der gemessenen Partikelemissionen zwei Fragen:

Kann ein Messfehler für beide unabhängig betriebenen Messsysteme vorliegen, der bei beiden Systemen zu einer Verdünnung der Abgasproben führt? Nur dies würde einen Einfluss auf die absolute Höhe der gemessenen Massenemissionen erklären.

Für den Fall, dass keinerlei Verdünnung vorgelegen hat, stellt sich die Frage der Nicht-Ruß-Fraktion der Partikelmassenemission, der nach den vorliegenden Messergebnissen einen sehr hohen Anteil darstellt.

Die erste Frage kann mit großer Sicherheit verneint werden, da die Probenahme des Soot-Sensors auf die gleiche Probenahmeleitung zurückgreift wie das Messsystem zur Bestimmung der gasförmigen Emissionen. Hätte hier eine Verdünnung vorgelegen, hätte sich diese in gleicher Weise auf die gasförmigen Emissionen auswirken müssen, was nicht der Fall ist.

Zur Beantwortung der zweiten Frage sind im Nachgang zu diesem Projekt weiterführende Untersuchungen durch den Systemhersteller durchgeführt worden. Zuerst wurden Analysen der Partikelproben für den Messpunkt 850 min^{-1} in Auftrag gegeben, um eine Aufschlüsselung der Partikelbestandteile zu erreichen. Mit den hier gewonnenen Erkenntnissen und weiteren Untersuchungen zu Massenemissionen aus Wasserinhaltsstoffen konnten die großen Nichtruß-Anteile an der Gesamtmassenemission plausibel erklärt werden.

Die deutlichen Unterschiede in der Partikelmassenreduktion zwischen der ersten und zweiten Messreihe sind offensichtlich auf Austragungseffekte aus dem Abgassystem zurückzuführen. Derartige Reinigungseffekte bei Diesel-Wasser-Emulsionsbetrieb sind beschrieben und lassen vermuten, dass die Ergebnisse der ersten Messreihe mit Diesel-Wasser Emulsionsbetrieb hierdurch beeinflusst sind. Die Ergebnisse der zweiten Messreihe sind offensichtlich weniger durch diese Austragungseffekte gekennzeichnet, so dass die PM-Reduktionsergebnisse von ca. 45% realistisch erscheinen.

Die Betrachtung der CO_2 -Emissionen bzw. der Kraftstoffverbräuche zeigen in allen Betriebspunkten Verbesserungen von bis zu 7,9% im Maximalleistungspunkt. Die absoluten Höhen der Verbrauchseinsparungen sind mit den Unsicherheiten der Leistungsermittlung und der Kraftstoffverbrauchsmessung behaftet, so dass die Angaben toleranzbehaftet sind. Der grundsätzlich positive Einfluss des Emulsionsbetriebs auf den Kraftstoffverbrauch ist allerdings belegt und wurde auch in anderen Untersuchungen mit der Technik des Anlagenherstellers in Motorprüfstandstestreihen [Ho_2012] nachgewiesen. Diese Beobachtungen werden durch die deutlichen innermotorischen Reduktionen der CO- und HC-Emissionen unterstützt, die auf einen positiven Einfluss des Emulsionsbetriebs auf den Verbrennungsablauf schließen lassen. Die geplante Veränderung der Systemkalibrierung mit dem Ziel der maximalen Schadstoffreduktion wird auch einen noch zu bestimmenden Einfluss auf die Kraftstoffverbrauchsänderungen haben.

5 Zusammenfassung

Für die Verwendung von Diesel-Wasser-Emulsionskraftstoffen ist seit langem eine positive Beeinflussung der Emissionssituation für die beiden Schlüsselkomponenten Partikel- und Stickoxidemissionen bekannt. Erst die Weiterentwicklungen der letzten Jahre haben diese Technologie auf einen Stand gebracht, der eine erfolgreiche Anwendung insbesondere bei quasistationär laufenden Motoren gut möglich macht. Für die Binnenschifffahrt könnte diese Technologie einen guten Ansatz für signifikante Emissionsverbesserungen bei paralleler Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und niedrigen Betriebskosten bei Bestandsschiffen darstellen. In dem hier beschriebenen Projekt wurde ein Container-Binnenschiff durch die Firma Exomission Umwelttechnik GmbH mit einem solchen System ausgerüstet. Das LANUV projektierte die messtechnische Begleitung, die das Potenzial der Emissionsabsenkung belegen soll.

Durch den sehr engen Charterplan verzögerte sich die Installation der Diesel-Wasser-Emulsionsanlage auf dem Schiff derart, dass die Optimierungs- und Erprobungsphase auf eine nicht ausreichende einzige kurze Applikationsfahrt reduziert werden musste.

Zur Darstellung der Ergebnisse wurde an Bord ein angenäherter E3-Testzyklus gefahren, wie er bei der Zertifizierung von Binnenschiffsmotoren verwendet wird. Dieser Test wurde mit reinem Dieselkraftstoff und mit Diesel-Wasser-Emulsion durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse führte bezogen auf den E3-Zyklus zu Emissionsreduktionen von 18,4% für die NO_x-Emissionen, 30,7% für CO-, 33,1% für HC-Emissionen, 21,3%, bzw. 44,6% für die Partikelmassenemissionen. Aus vorherigen Untersuchungen sind Absenkungen der Rußemissionen um 90%, der PM-Emission von 80% und Verringerungen der Stickoxidemissionen um 45% bekannt [Ho_2012], so dass die Ergebnisse auf dem Versuchsschiff MS Aarburg zumindest teilweise hinter den Erwartungen zurückblieben.

Genauere Aufschlüsselungen der Einzelmesspunkte und Betrachtungen der reinen Rußemissionen führten zu weiteren Erkenntnissen. In beiden Messreihen mit Emulsion lagen die Absenkungen der Rußemissionen bei jeweils rund 85% und damit in den erwarteten Größenordnungen. Die moderate Partikelmassenabsenkung von 21,3% in der ersten Messreihe, bzw. 44,6% in der zweiten Messreihe sowie die Massenunterschiede zwischen Partikelmasse und Rußmasse weisen auf einen ungewöhnlich hohen Anteil von Nicht-Rußpartikeln hin. Die sehr hohen Unterschiede zwischen der ersten und zweiten Messreihe hinsichtlich der Partikelmassenemission weisen auf Reinigungseffekte durch den Emulsionsbetrieb hin.

Bzgl. der hohen Nicht-Ruß-Massenanteilen konnte durch weitergehende Untersuchungen durch den Systemhersteller gezeigt werden, dass dieser hohe Anteil auf Wasserinhaltsstoffe des zugeführten Wassers zurückzuführen ist, die aufgrund eines nicht korrekten Betrieb der Wasseraufbereitung im Vorfeld der Messungen unbemerkt nicht ausgefiltert wurden. Würde man mit diesen Erkenntnissen die Partikelmassenergebnisse um die Wasserinhaltsstoffe korrigieren, ergäben sich Verbesserungen für die Partikelmassenreduktionen im Emulsionsbetrieb von 21% auf 56% bei der ersten Messreihe und von 44,6% auf 78% in der zweiten Messreihe.

Durch die baulichen Gegebenheiten wurden die Probenahme im Abgasendrohr an Deck nach Schalldämpfer realisiert. Die Ergebnisse der zweiten Messreihe mit Emulsion mit mehr

als verdoppelten PM-Reduktionen zeigten dabei, dass während der ersten Messreihe offenbar noch Reinigungs-/Austragungseffekte von Partikeln aus der Abgasanlage stattgefunden haben und die erste Messreihe mit Emulsion daher als nicht stabil betrachtet werden kann. Bei den Stickoxidemissionen wurden Absenkungen bei den beiden Messpunkten bei höheren Drehzahlen beobachtet (26,7% und 22,8%). Für die beiden kleineren Prüfdrehzahlen wurde hingegen ein leichter Anstieg verzeichnet. Die Betrachtung dieser Einzelergebnisse lässt den Schluss zu, dass die zuemulgierten Wasseranteile noch nicht richtig appliziert sind, was auf die fehlende Erprobungs- und Optimierungszeit zurückzuführen ist. Insbesondere bei den kleineren Drehzahlen sind laut Systemhersteller noch deutlich größere Wassermengen applizierbar. Durch entsprechende Optimierungen sollten deutlich höhere Emissionsminderungen erreichbar sein.

Die Ergebnisse für die CO₂-Emissionen bzw. den Kraftstoffverbrauch zeigen positive Einflüsse bei der Verwendung von Diesel-Wasser-Emulsion (bis 7,9%). Durch die Unsicherheiten bei der Leistungsbestimmung und Verbrauchsmessung wird erst eine Langzeitbetrachtung der Kraftstoffverbräuche genauere Werte liefern.

6 Ausblick

Die Messergebnisse auf der MS Aarburg bei der beschriebenen Messkampagne konnten die Erwartungen nicht vollständig erfüllen, aber es wurden Potenziale für Emissionsabsenkungen erkennbar und Indizien dafür deutlich, aus welchen Gründen die Ergebnisse von den Erwartungen abwichen. Eine Überarbeitung der Kalibrierung sowie der korrekte Betrieb der Wasseraufbereitung werden aller Wahrscheinlichkeit nach zu deutlich verbesserten Ergebnissen führen. Der in diesem Bericht beschriebene Emissionszustand würde für die MS Aarburg bereits ohne eine weitere Optimierung zur Erfüllung der ZKR II-Grenzwerte ausreichen.

7 Literatur

- [KlbBour_2013] Kleinebrahm, M.; Bourbon, G.J.: Minderung der Feinstaub-, Ruß- und Stickstoffoxidemissionen auf dem Fahrgastschiff „Jan von Werth“ durch Nachrüstung eines SCRT-Systems. LANUV-Fachbericht 49, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Recklinghausen, 2013
- [SiDöBe_2007] Prof. Dr.-Ing. Ch. Simon; Dipl.-Ing. (FH) H. Dörksen; cand. Ing. A. Berenz: Gegenüberstellung der Leistungs- und Abgasdaten beim Betrieb eines Dieselmotors mit reinem Dieselmotorkraftstoff und einer Diesel/Wasser-Emulsion; Fachhochschule Trier, Fachbericht 23_10_07
- [BrChaDaLaDu_2000] Brown, K., Chadderton, J., Daly, D., Langer, D. et al.: Opportunity for Diesel Emission Reductions Using Advanced Catalysts and Water Blend Fuel; SAE Paper 2000-01-0182; 2000
- [ISO16183_2002] International Standard ISO 16183; Heavy-duty engines - Measurement of gaseous emissions from raw exhaust gas and of particulate emissions using partial flow dilution systems under transient test conditions; 2002
- [ISO8178_2006] International Standard ISO 8178; Reciprocating internal combustion engines -exhaust emission measurement; second edition 2006
- [Ho_2012] Horn, M.: Untersuchungen an einem EURO III Nutzfahrzeugmotor mit Kraftstoff-Wasser-Emulsion zur Schadstoffreduzierung; TÜV NORD 2012

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

