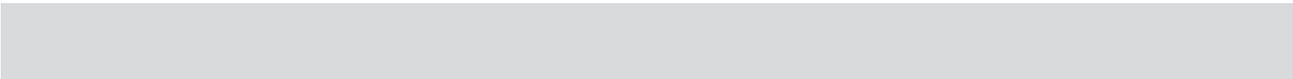




Minderung der Feinstaub-, Ruß- und Stickstoff-oxidemissionen auf dem Fahrgastschiff „Jan von Werth“ durch Nachrüstung eines SCRT-Systems

LANUV-Fachbericht 49



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 Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2013

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 Telefax 02361 305-3215 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
Autoren	Dipl.-Ing. Martin Kleinebrahm, Dipl.-Ing. Gaston-José Bourbon (TÜV NORD Mobilität GmbH & CO. KG, Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität, Fachgebiet Motoren/Nutzfahrzeuge)
Projektbetreuung/Redaktion	Dr.-Ing. Andreas Brandt (LANUV)
Fotos	TÜV NORD Mobilität GmbH & CO. KG, wenn nicht anders angegeben
Projektmitglieder	TÜV NORD Mobilität GmbH & CO. KG, Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität, Adlerstraße 7, 45307 Essen Köln-Düsseldorfer, Deutsche Rheinschiffahrt AG, Frankenwerft 35, 50667 Köln TEHAG Deutschland GmbH, Gutenbergstraße 42, 47443 Moers Emitec Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Hauptstraße 128, 53797 Lohmar INTERKAT Katalysatoren GmbH, Eduard-Rhein-Straße 25, 53639 Königswinter
ISSN	1864-3930 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.

Inhaltsverzeichnis

1	AUSGANGSSITUATION	5
2	EINLEITUNG	6
3	PROJEKTSCHIFF	6
3.1	Motor und Antrieb	7
4	VORGEHENSWEISE	7
4.1	Allgemeines	7
4.2	Messtechnik zur Langzeitdatenerfassung	8
4.2.1	Messtechnik zur Datenaufzeichnung	8
4.2.2	Drehmomentmessung	8
4.2.3	Messung der Motordrehzahl	10
4.2.4	Temperaturmessung	10
4.2.5	Abgasgegendruck	10
4.3	Bestimmung des Abgasmessprogramms	11
5	EINGESETZTE MESSTECHNIK	12
5.1	Messtechnik für gasförmige Abgaskomponenten	12
5.2	Messtechnik zur Bestimmung der Rußkonzentration	15
5.3	Messtechnik für gravimetrische Partikelmessung	17
5.4	Messung der Umgebungsdaten	18
5.5	Bestimmung des Abgasmassenstroms	18
6	ERGEBNISSE DER 1. MESSKAMPAGNE	20
6.1	Allgemeines	20
6.2	Leistungsaufnahme der Schiffschraube	22
6.3	Auswertung des 4-Stufentest	23
6.4	Ergebnis der gravimetrischen Partikelmessung	27

6.5	Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen	28
6.6	Ergebnisse der Vergleichsmessungen	29
7	AUSBLICK FÜR DIE 2. MESSKAMPAGNE	30
8	ERGEBNISSE DER 2. MESSKAMPAGNE	31
8.1	Allgemeines	31
8.2	Auswertung des 4-Stufentests	32
8.3	Ergebnis der Partikelmessung	35
9	AUSWERTUNG DER LANGZEITDATEN	36
10	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSBEMERKUNG	39
11	ANHANG	41

1 Ausgangssituation

Mit der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen -39. BImSchV vom 02.05.2010- wurden die Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 21.05.2008 über die 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 Mitgliedsstaaten 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 Stickstoffdioxide (NO₂) und Partikel (PM₁₀). 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 Luftreinhalteplanes 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/NO₂ durch Verbesserungen an bestehenden Schiffen zu senken.

Neben der Güterschifffahrt sind auch Fahrgastschiffe (FGS) an den Emissionen beteiligt. Dies gilt insbesondere für Städte, die auch touristische Zielpunkte sind. Durch die hohe Lebensdauer von Schiffen sind auch häufig die Antriebsmotoren älteren Baujahres. Sie werden üblicherweise nach entsprechender Laufleistung technisch überholt und wieder eingesetzt. Im Gegensatz zum Straßenverkehr ist auf Schiffen somit die Durchdringung mit moderner Motorentechnik ein sehr lang dauernder Prozess. Die Nachrüstung mit Abgasnachbehandlungssystemen kann in dieser Situation eine vielversprechende Maßnahme zur Senkung der Emissionen aus Schiffsantrieben sein.

Das hier beschriebene Projekt soll zum einen die Realemissionen des Fahrgastschiffes „Jan von Werth“ im derzeitigen Zustand aufzeigen und anschließend, nach erfolgter Nachrüstung, die Abgasemissionen bei Verwendung moderner Abgasnachbehandlungsverfahren ermitteln.

Das Demonstrationsprojekt, finanziert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW), soll aufzeigen, inwieweit Nachrüstmaßnahmen an Schiffen helfen können, die Schadstoffbelastungen in flussnahen Anrainerstädten zu reduzieren.

2 Einleitung

In dem vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) beauftragten Demonstrationsvorhaben wurde das FGS „Jan von Werth“ (JvW) für die Nachrüstung mit einem SCRT-Abgasnachbehandlungssystem der Firma TEHAG Deutschland ausgewählt. Die Anlage wurde Ende Juli / Anfang August 2012 dem linken, backbord seitigen der beiden Antriebsmotoren nachgeschaltet. Das SCRT-System besteht aus einem passiv regenerierenden geschlossenen CWF Rußpartikelfilter (2 Filterpatronen) und einem SCR-Katalysator mit einer steuerbaren Dosiereinrichtung für die wässrige Harnstofflösung AdBlue® zur Reduktion der NOX-Emissionen. *(Eine Beschreibung des SCRT-Systems findet sich im Anhang, Firma TEHAG, Firma Emitec)*

Die zentrale Aufgabe des technischen Dienstes TÜV NORD Mobilität GmbH & CO. KG im Projekt besteht darin, durch

- -Messung der gasförmigen Schadstoffemissionen und
- -Messungen der Ruß- und Partikelemissionen

die Wirksamkeit des Abgasnachbehandlungssystems unmittelbar nach dem Einbau (1. Messkampagne) und zum Ende des Projektzeitraumes (2. Messkampagne) zu überprüfen und zu beurteilen.

3 Projektschiff

Das Fahrgastschiff „Jan von Werth“ (Abbildung 1) ist ein Ausflugsschiff der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG (KD). Es wird in der Hauptsaison im Rundfahrtverkehr auf dem Niederrhein bei Köln eingesetzt. Erbaut wurde die „JvW“ im Jahr 1992 und 1993 von der KD übernommen.

Die technischen Daten des Schiffes sind:



Schiffsdaten:

Baujahr:	1992
Länge:	40,20 m
Breite:	7,52 m
Tiefgang:	max. 1,50 m
Fahrgäste:	max.170 Personen

Abbildung 1: FGS „Jan von Werth“ am Anleger 5 der KD in Köln [Quelle: TÜV NORD]

3.1 Motor und Antrieb

Das Fahrgastschiff „JvW“ verfügt über zwei 6 Zylinder DAF 1160M Antriebsmotoren. Die Leistung wird mit je 200 kW / 2000 min⁻¹ auf dem Typenschild angegebenen (weitere motorspezifische Daten waren vom Hersteller nicht zu bekommen). Der Hubraum der Motoren beträgt 11630 cm³. Die Getriebe stammen von der Firma Twin Disc und untersetzen die Abtriebs Drehzahl im Verhältnis 3,10:1. Die Motoren verfügen über je einen Abgasturbolader und einem Ladeluftkühler des Herstellers Längerer&Reich. Abbildung 2 zeigt den linken der beiden Antriebsmotoren der „Jan von Werth“, der in diesem Projekt nachgerüstet und vermessen wurde.

Zum Zeitpunkt des Baus der „JvW“ galten für Binnenschiffe noch keine speziellen Abgasgrenzwerte. Der Motor ist somit nicht einem Emissionsstandard zuzuordnen. Die Rohemissionen des Motors bewegen sich auf einem Niveau, wie es vor Beginn der Abgasemissionsgesetzgebung auch bei Nutzfahrzeugen zu finden war.

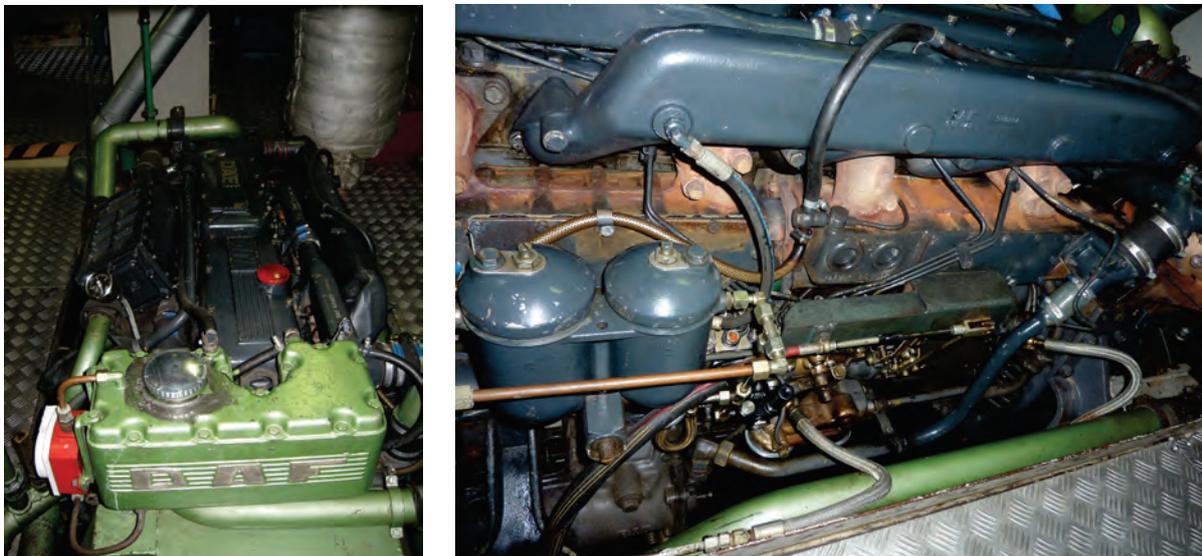


Abbildung 2: Antriebsmotor der „Jan von Werth“ (Links/Backbord)

4 Vorgehensweise

4.1 Allgemeines

Im Vorfeld der Messkampagnen und vor Einbau des SCRT-Systems wurde die für eine Langzeiterfassung erforderliche Messtechnik installiert. Somit war es möglich, verschiedene Motorparameter und Fahrleistungsdaten für die Auslegung des Systems zu ermitteln.

Die für eine Abgasmessung erforderlichen Probenahmestutzen und Messflansche wurden bei Einbau der SCRT-Anlage mit dem Anlagebauer TEHAG abgestimmt und für die Messkampagnen in die Abgasnachbehandlungsanlage integriert.

Nach Auswertung erster Fahr- und Motordaten wurde ein Abgasmessprogramm ausgearbeitet und mögliche Messtermine mit den Projektpartnern verabredet.

4.2 Messtechnik zur Langzeitdatenerfassung

4.2.1 Messtechnik zur Datenaufzeichnung

Die Messtechnik für eine Langzeitüberwachung des Schiffes wird durch den Einbau eines separaten Datenerfassungsgerätes (Datenlogger) realisiert. Der genutzte Logger (Firma Delphin) nimmt die ausgewählten Werte parallel und kontinuierlich auf (Abbildung 3). Zur Langzeitspeicherung werden die einzelnen Messsignale zwecks Analyse dynamischer Vorgänge mit 1 Hz aufgenommen und zur Visualisierung größerer Zeitbereiche minütlich abgelegt. Zur Bestimmung der geodätischen Daten wird eine zusätzliche GPS-Antenne angeschlossen und mit Hilfe eines analogen Modems sind alle eingespeisten Daten von TÜV NORD abrufbar.



Abbildung 3: Datenerfassung auf der „Jan von Werth“

4.2.2 Drehmomentmessung

Um leistungsbezogene Emissionsdaten ermitteln zu können, bedarf es der zeitaufgelösten Ermittlung des Drehmomentes. Die Applikation solcher Drehmomentmessungen an Bord eines Schiffes, ohne Änderungen des Ausgangszustandes, lässt nicht viele Möglichkeiten zu. In diesem Projekt wird die Drehmomentbestimmung über Dehnmessstreifen (DMS), ange-

bracht auf der Abtriebswelle, realisiert (Abbildung 4). Auf Grund des direkt am Motor angeflanschten Getriebes werden die DMS auf dem FGS „Jan von Werth“ auf der Getriebeausgangswelle angebracht und das Übersetzungsverhältnis sowie der Getriebewirkungsgrad entsprechend berücksichtigt.

Die Anbringung der DMS ist ein zeitaufwendiger Vorgang, der entsprechende Sorgfalt und Sachkenntnis verlangt. Zwei DMS werden um jeweils 180° versetzt auf der Welle angeordnet. Die anschließende elektrische Verschaltung zu einer Wheatstone'schen Messbrücke dient der Kompensation von Temperatur und Längsdehnungseinflüssen; Sender, Antenne und Dauerspannungsversorgung des Messsystems vervollständigen die Messkette. Zur Kalibrierung der DMS auf dem FGS „JvW“ wird die Messkette über die Dehnungs- und Torsionsparameter des Wellenmaterials sowie über den k-Faktor der DMS realisiert. Der k-Faktor gibt hierbei an, wie stark das DMS-Spannungssignal in Abhängigkeit zur Dehnung verstärkt wird. Dieses Verfahren wird oftmals auch als „elektrische Kalibrierung“ bezeichnet und kommt immer dort zum Einsatz, wo der Einbaufall keine mechanische Kalibrierung über geeichte Gewichte zulässt.

Die DMS-Messdaten werden über den Datenlogger als Analogwert zur Verfügung gestellt und abgespeichert. Somit lassen sich die tatsächlichen Drehmomentwerte unter Berücksichtigung der Getriebeuntersetzung und eines angenommenen Getriebewirkungsgradverlustes von 3% berechnen.

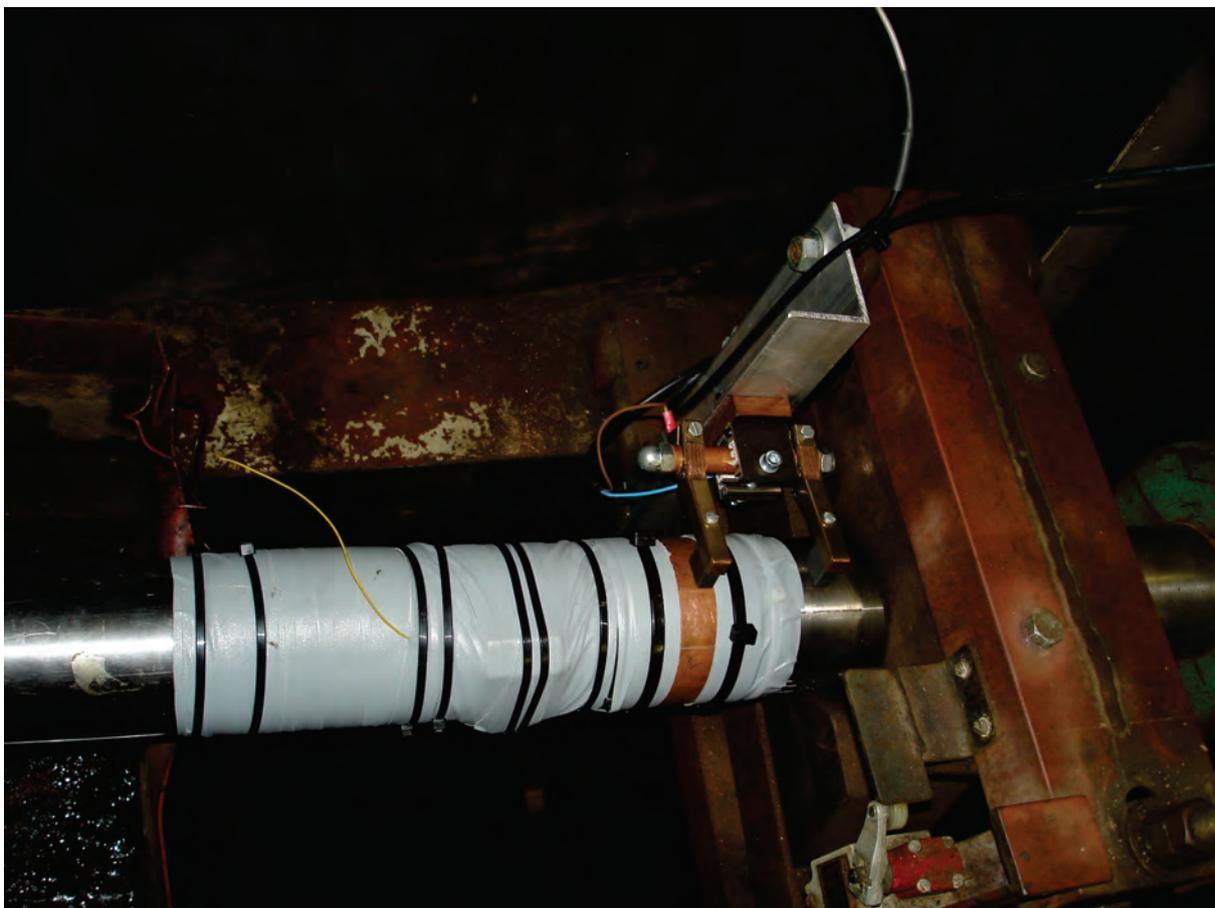


Abbildung 4: Messtechnik und Dauerstromversorgung zur Drehmomentmessung

4.2.3 Messung der Motordrehzahl

Um die ermittelten Emissionsergebnisse im motorischen Kennfeld einordnen zu können, wird die Motordrehzahl an Bord ebenfalls separat bestimmt. Das am Schiff vorliegende Drehzahlsignal wird mit einer geeigneten Messdatenverarbeitung in ein Analogsignal umgeformt und für die Langzeitaufnahme an den Datenlogger weitergegeben. Auf dem FGS „JvW“ wird mit Hilfe eines Initiators (siehe Abbildung 5) die Motordrehzahl abgegriffen und mittels Frequenzumwandler F/O analog an den Datenlogger weitergegeben. Das Drehzahl-Analogsignal wird im Anschluss mit Hilfe eines opto-elektronischen Drehzahlmessers abgeglichen.



Abbildung 5: Messung der Motordrehzahl

4.2.4 Temperaturmessung

Zur Temperaturmessungen werden ausschließlich 3 mm Einschraub-Thermoelemente NiCr-Ni des Typ K verwendet. Durch unterschiedliche Fühlerlängen können die notwendigen Positionierungen im Abgasstrom realisiert werden. Der Messbereich dieser Thermoelemente wird seitens des Thermoelemente Herstellers von -90°C bis +1370°C angegeben.

4.2.5 Abgasgegendruck

Die Druckdifferenzmessung über den DPF erfolgt mit handelsüblichen Druck-Messsystemen ähnlich den Überwachungssystemen von Partikelfiltern in Personen- und Nutzfahrzeugen. Der Messbereich der hier eingesetzten Sensoren liegt bei 0 – 750 mbar.

4.3 Bestimmung des Abgasmessprogramms

Für Antriebsmotoren von Binnenschiffen gilt ein Typprüfverfahren, welches das Emissionsverhalten der Motoren auf dem Motorprüfstand in unterschiedlichen stationären Testverfahren ermittelt. Bei Motoren mit Festpropeller kommt der Testzyklus E3 gemäß ISO/FDIS 8178-41 zur Anwendung. Dieser Testzyklus definiert über Leistung, Last und Drehzahl die heranzuziehenden Prüfstufen. Da im realen Fahrbetrieb kein direkter Einfluss auf die Leistung bzw. das Drehmoment genommen werden kann, dienen ausschließlich die Prüfdrehzahlen als reproduzierbare Einstellgröße. Diese liegen bei 100%, 91%, 80% und 63% der Nenndrehzahl. Als Testergebnis wird dann der gewichtete (0,2; 0,5; 0,15; 0,15) Mittelwert über den 4-Stufentest angegeben.

Erste Auswertungen der Fahrdaten ergeben, dass eine Motordrehzahl von maximal 1650min^{-1} in den Betriebszuständen nicht überschritten wird. Basierend auf dieser Grundlage und der obigen DIN ISO wird für die erste Messkampagne folgendes Messprogramm durchgeführt.

1. Messungen der gasförmigen Emissionen in vier Punkten (1040 min^{-1} ; 1320 min^{-1} ; 1502 min^{-1} und 1650 min^{-1}) auf der sich einstellenden Lastkurve. Parallele Messungen mit dem PASS-System (Micro Soot-Sensor AVL 483) zur Erfassung der elementaren kohlenstoffhaltigen Partikelkonzentration sowie gravimetrische Partikelmessungen in den quasi stationären Fahrzuständen mit dem Particulate Sampling System Micro-PSS.
Bei diesen Messungen sollen die Dieselpartikelfilter als auch der SCR-Kat durch funktionslose „Dummies“ ersetzt werden (siehe Kapitel 6.1; Ergebnisse 1. Messkampagne). Somit ist eine Vergleichbarkeit der Probenentnahme mit und ohne Nachbehandlung gesichert.
2. Messungen der gasförmigen Emissionen in vier Punkten (1040 min^{-1} ; 1320 min^{-1} ; 1502 min^{-1} und 1650 min^{-1}) auf der sich einstellenden Lastkurve. Parallele Messungen mit dem PASS-System (Micro Soot-Sensor AVL 483) zur Erfassung der elementaren kohlenstoffhaltigen Partikelkonzentration sowie gravimetrische Partikelmessungen in den quasi stationären Fahrzuständen mit dem Particulate Sampling System Micro-PSS.
Entsprechend der unter 1. genannten Messung werden diese Messungen mit funktionsbereitem SCRT-System gefahren.
3. Ergänzend werden zur Beurteilung des Systems Vollastbeschleunigungen durchgeführt, wie sie beispielsweise bei Anlege- und Rangiermanöver vorkommen, indem der Antriebsmotor kurzzeitig aus dem Leerlauf heraus auf ca. 75% Nenndrehzahl beschleunigt wird.

¹ International Standard ISO/FDIS 8178-4, Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Steady-state test cycles for different engine application, Reference number: ISO/FDIS 8178-4:2007

5 Eingesetzte Messtechnik

5.1 Messtechnik für gasförmige Abgaskomponenten

Für die Messung der gasförmigen Komponenten wird das SEMTECH-DS der Firma Sensors benutzt. Mit Ausnahme des NOX-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 (Flammenionisations-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 CO₂-Konzentration, dem elektrochemischen O₂-Analysator und der NDUV-Messbank (Nicht-Dispersive-Ultraviolett-Messbank) zur Bestimmung von NO und NO₂ 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 6 zeigt das Messsystem SEMTECH DS der Firma Sensors und verdeutlicht gleichzeitig den prinzipiellen Systemaufbau. Die Abbildungen 7 bis 10 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.

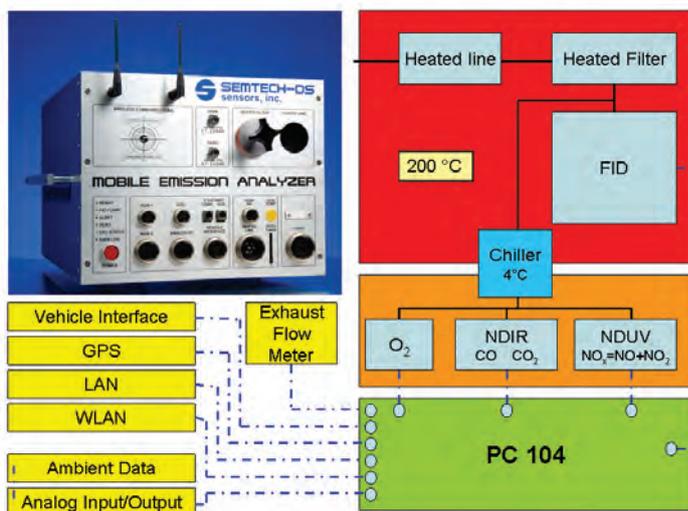


Abbildung 6: Semtech DS-Messgerät und Systemaufbau [Quelle: Sensors]

Die zum Betrieb des Messsystems notwendigen Gase werden auf dem Projektschiff mitgeführt. Da der Gasverbrauch sehr gering ist, können grundsätzlich kleinere Druckgasflaschen benutzt werden, die teilweise auch im SEMTECH-DS Gehäuse untergebracht werden können. Für umfangreichere Messungen ist es jedoch sinnvoll, auch größere Flaschen zu verwenden. Da der gesamte Gasentnahmeweg sowie ein Teil des Messsystems auf 190°C beheizt werden, ist vom Zeitpunkt des Einschaltens der Geräte bis zur Betriebsbereitschaft mit mindestens zwei Stunden Auf-

wärm- und Vorbereitungszeit zu rechnen. Am Ende dieser Vorbereitung steht die Kalibrierung des Systems an. Dies wird bei den Messkampagnen vor und nach jeder Messung durchgeführt.

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 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 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

Abbildung 7: Spezifikationen des Flammen-Ionisations-Detektor (FID)

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 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 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

Abbildung 8: Spezifikationen der Nicht-Dispersiven-Infrarot Messbank

	NO	NO ₂
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

Abbildung 9: Spezifikation der Nicht-Dispersiven-Ultraviolet Messbank (NDUV)

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

Abbildung 10: Spezifikation des elektrochemischen O₂ Analysators

5.2 Messtechnik zur Bestimmung der Rußkonzentration

Zur Messung der Partikelemissionen (elementarer Kohlenstoff) wird der Micro Soot Sensor der Firma AVL 483 eingesetzt. Abbildung 11 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 resultierende 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 12 sind das Funktionsprinzip der photoakustischen Spektroskopie (a) und der Aufbau einer foto-akustischen Zelle (b) dargestellt. In der Abbildung 13 sind die Spezifikationen des Messgerätes aufgeführt.



Abbildung 11: Micro Soot Sensor Typ 483 [Quelle: AVL]

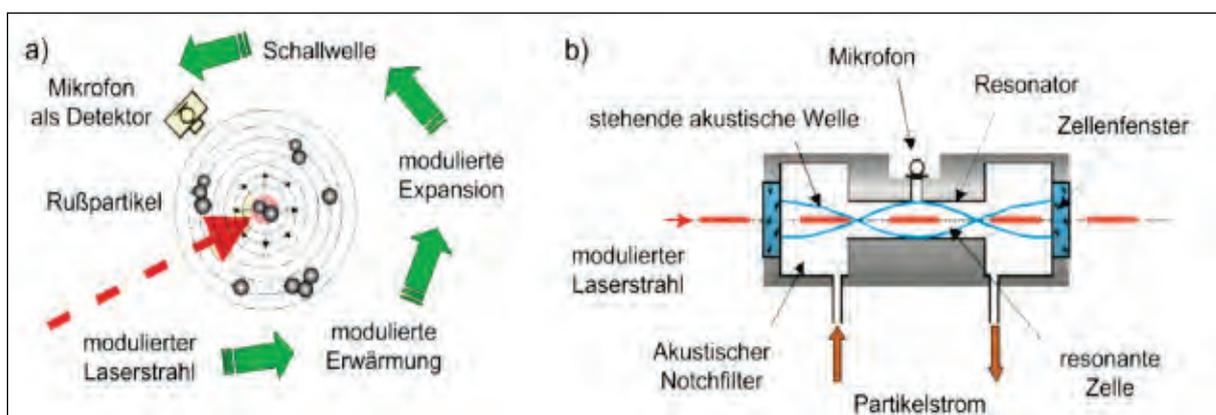


Abbildung 12: Funktion und Aufbau einer fotoakustischen Messzelle [Quelle: AVL]

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:	Lasengerät 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

Abbildung 13: Spezifikationen des Micro Soot Sensors AVL 483

5.3 Messtechnik für gravimetrische Partikelmessung

Die Gravimetrie ist die vom Ordnungsgeber 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 14) entnimmt einen Teilstrom aus dem Abgasmassenstrom des Motors und verdünnt diesen mit gefilterter Umgebungsluft. Das so verdünnte Abgas durchströmt den Sammel-Filter (Pallflex Enfag 47 mm), 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 konditioniert und ausgewogenen Filterpapier.

Das Micro PSS-20 ist ein Teilstrom-Verdünnungssystem mit Gesamtprobennahme; dies bedeutet, dass das System nur einen Teil des Abgases verdünnt und dann das gesamte verdünnte Gas durch den Sammel-Filter 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.

Abbildung 15 zeigt ein Bild der Bedieneroberfläche (Softwaresteuerung).



Abbildung 14: Gravimetrisches Partikelmessgerät Micro PSS [Quelle: Control Sistem]

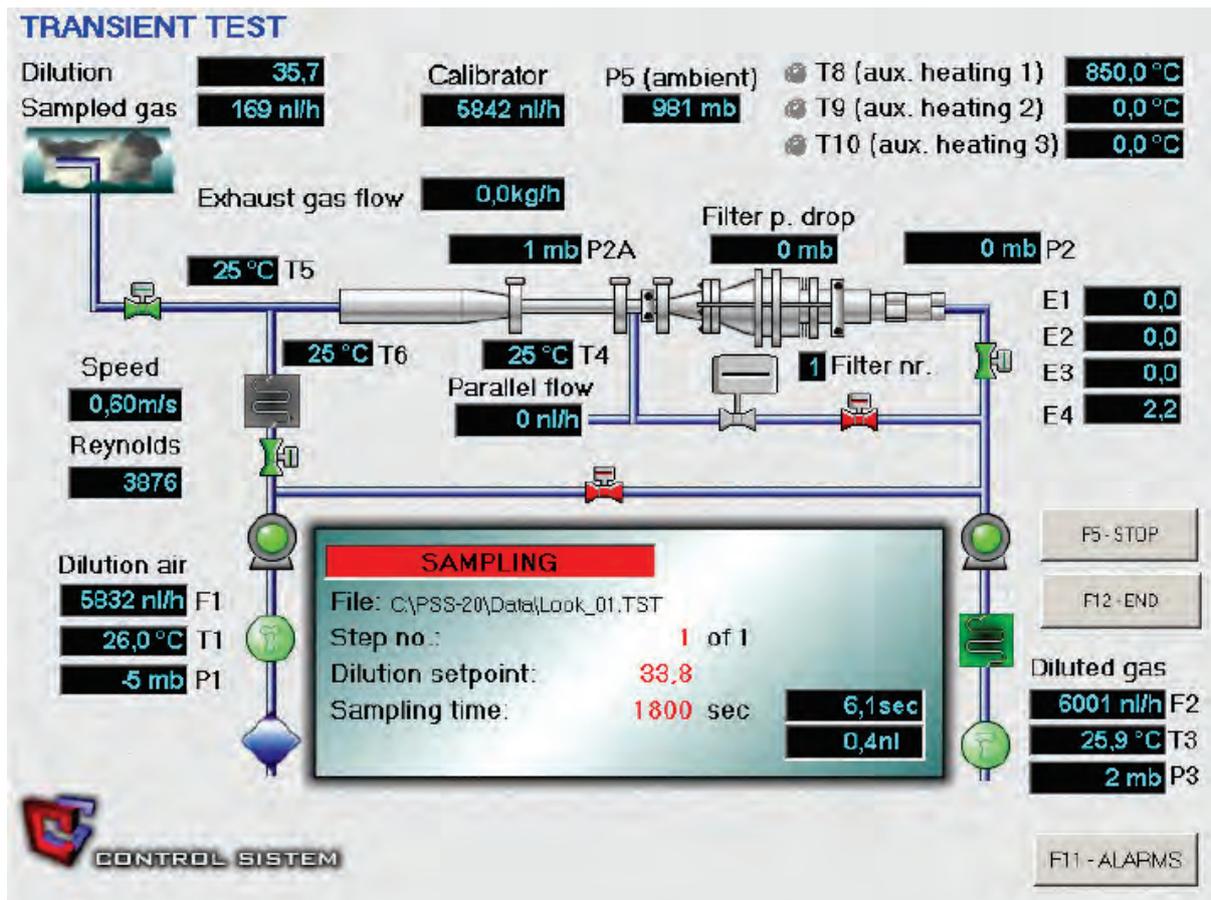


Abbildung 15: Darstellung des Gasflusses im Micro PSS [Quelle: Control System]

5.4 Messung der Umgebungsdaten

Zur Bestimmung der für die Abgasberechnung notwendigen Korrekturfaktoren müssen die atmosphärischen Umgebungsdaten bestimmt werden. Temperatur und Barometerstand sowie die relative Feuchte werden durch geeignete Sensoren erfasst. Die Anordnung der Temperatur- und Luftfeuchtemessstelle wird hierbei so gewählt, dass sie möglichst nahe an der Ansaugstelle der Motorverbrennungsluft liegen. Es wird 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.

5.5 Bestimmung des Abgasmassenstroms

Zur Messung des Abgasmassenstromes kommt ein EFM (Electronic Flow Meter) der Firma SENSORS zum Einsatz. Das System arbeitet nach dem Prandtl'schen-Staurohr Prinzip, wobei über den dynamischen Staudruck im Vergleich zum statischen Druck die durchströmende Masse ermittelt wird. Die Abbildung 16 zeigt das Messrohr und die Auswerteeinheit. Die Tabelle 17 gibt einen Überblick über die Spezifikationen des Messsystems.



Abbildung 16: Electronic Flow Meter [Quelle: Sensors]

Tabelle 17: Spezifikationen des SEMTECH-EFM [Quelle: Sensors]

Exhaust temperature range:	-5°C to 700°C standard, higher temp capability available upon request
Exhaust temperature accuracy:	±1% of reading or ±2°C, whichever is greater
Flow measurement linearity:	< 1.0% of full scale exceeds 1065 Subpart D and ISO 16183 standards
Flow measurement accuracy:	±2% of reading or ±0.5% of full scale, whichever is greater
Warm up time:	< 5 minutes at 20°C ambient
System response time:	< 2 ms
Data rate:	5 Hz standard; 500 Hz with High Speed Option (100 Hz display rate)
Resolution:	0.1 SCFM
Power requirement:	12 VDC, 30 W; 110VAC
Communications:	RS232
Control module dimensions:	36cm x 18cm x 10cm (LxDxW)
Control module weight:	4 kg (9 lbs)

6 Ergebnisse der 1. Messkampagne

6.1 Allgemeines

Die erste Messkampagne fand vom 01.-02.10.2012 bei Köln auf dem Niederrhein statt. Es wurden zuerst die Rohemissionen des Motors ermittelt. Hierzu wurde ein Umbau der SCRT-Anlage vorgenommen. Anstelle der Dieselpartikelfilter (DPF) wurden leere Filtergehäuse („Dummies“) eingesetzt und der SCR-Katalysator wurde mittels einer Bypass Leitung umgangen, da ein Umbau im zugebauten hinteren Teil des Motorraumes sehr aufwendig gewesen wäre (Abbildung 18). Hierdurch verlagerten sich die Abgasmassenmessung sowie die Probenahme aus dem Motorraum unmittelbar hinter den Abgasaustritt an der Außenbordwand des Schiffes. Abbildung 19 zeigt die Probenahme und Abgasmassenstrommessung am FGS „JW“. Die Messtechnik und Probensonde zur Bestimmung der gravimetrischen Partikelmassen wurde für beide Messungen im Motorraum vor Austritt der Abgase an der Bordwand gemessen. Somit konnte man den sensiblen Filterplättchenwechsel des Micro PSS im geschützten Motorraum durchführen (Abbildung 20).



Abbildung 18: Umbau der Abgasleitung für die Rohemissionsmessung



Abbildung 19: Abgasmassenbestimmung am Austritt der Abgasleitung



Abbildung 20: Gravimetrische Partikelmessung im Motorraum

Nachdem die Rohemissionsmessungen am ersten Messtag durchgeführt waren, wurde die SCRT-Anlage wieder in einen funktions- und fahrfähigen Zustand gebracht und durch einen Probelauf die Funktionalität der Anlage überprüft. Somit konnten am 02.10.2012 die Messungen mit dem Abgasminderungssystem erfolgen und es war genug Spielraum für weitere Untersuchungen (siehe Kapitel 6.6). Der Ablauf der 1. Messkampagne war wie folgt aufgebaut:

- Aufbau der Messtechnik an Bord und gleichzeitig Umbau der SCRT-Anlage zur Messung der Rohemissionen (Köln-Nieher Hafen)
- Abfahrt und Erprobung der Messtechnik, Konditionierung und Funktionsüberprüfung der Analysatoren, Aufwärmung (Fahrt zum Rhein)
- Messungen der Rohemissionen im 4-Stufentest und Messungen bei Volllastbeschleunigung (Rheinaufwärts)
- Umbau der SCRT-Anlage (Köln, Anleger 5)
- Messungen der Emissionen mit Abgasminderungssystem im 4-Stufentest und bei Volllastbeschleunigung (Rheinaufwärts)
- zusätzliche Emissionsmessungen mit und ohne Harnstoffeindüsung in den Drehzahlstufen

6.2 Leistungsaufnahme der Schiffschraube

Zur leistungsbezogenen Auswertung der Messergebnisse musste die abgegebene Leistung des Motors bestimmt werden. Hierzu wurde das Drehmoment des Propellers an der Antriebswelle gemessen und aufgezeichnet. Ein typischer Messwertverlauf der Drehmomente zeigt Abbildung 21. Hier sind die Drehmomente über der Drehzahl aufgetragen. Die Drehmomentwerte für die stabilisierte letzte Minute einer Stufe sind farblich eingebracht und werden für die Auswertung herangezogen. Als Vergleich zu den Messwerten ist die theoretische Propellerkurve, wie sie für diesen Motor in der Norm errechnet wird, dargestellt.

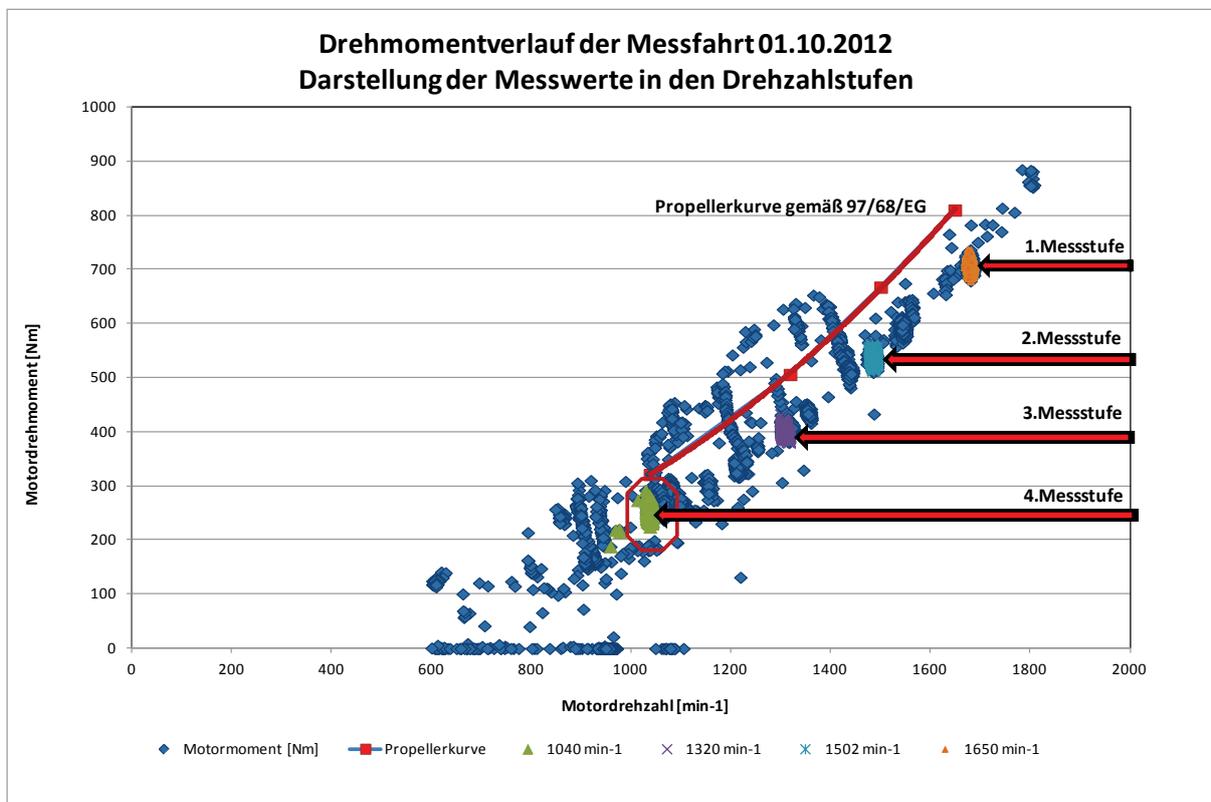


Abbildung 21: Verteilung der Drehmomente über der Drehzahl

6.3 Auswertung des 4-Stufentest

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt in mehreren Schritten. Als erstes werden die einzelnen Stufenergebnisse ausgewertet. Hierzu wird am Ende einer Drehzahlstufe der quasistationäre Teil herausgefiltert, gemittelt und dargestellt. Diese Werte dienen zur Berechnung des gewichteten Gesamtergebnisses entsprechend den Auswertekriterien der ISO. Die errechneten Gesamtergebnisse der Emissionsmessungen mit und ohne SCRT-Anlage sind in Tabelle 26 dargestellt.

Abbildung 22 zeigt die Messwertaufnahme verschiedener Motorparameter während der Rohemissionsmessung. Deutlich zu erkennen sind die konstanten Drehzahlen des Stufentestes, sowie die freien Beschleunigung im Anschluss an den Testlauf. Abbildung 23 zeigt den Verlauf der gleichen Messwertaufnahmen am zweiten Messtag mit funktionsbereiter SCRT-Anlage. Im Anschluss an die freien Beschleunigungen werden zusätzlich nochmals die Drehzahlstufen mit und ohne Eindüsung von Harnstoff durchfahren.

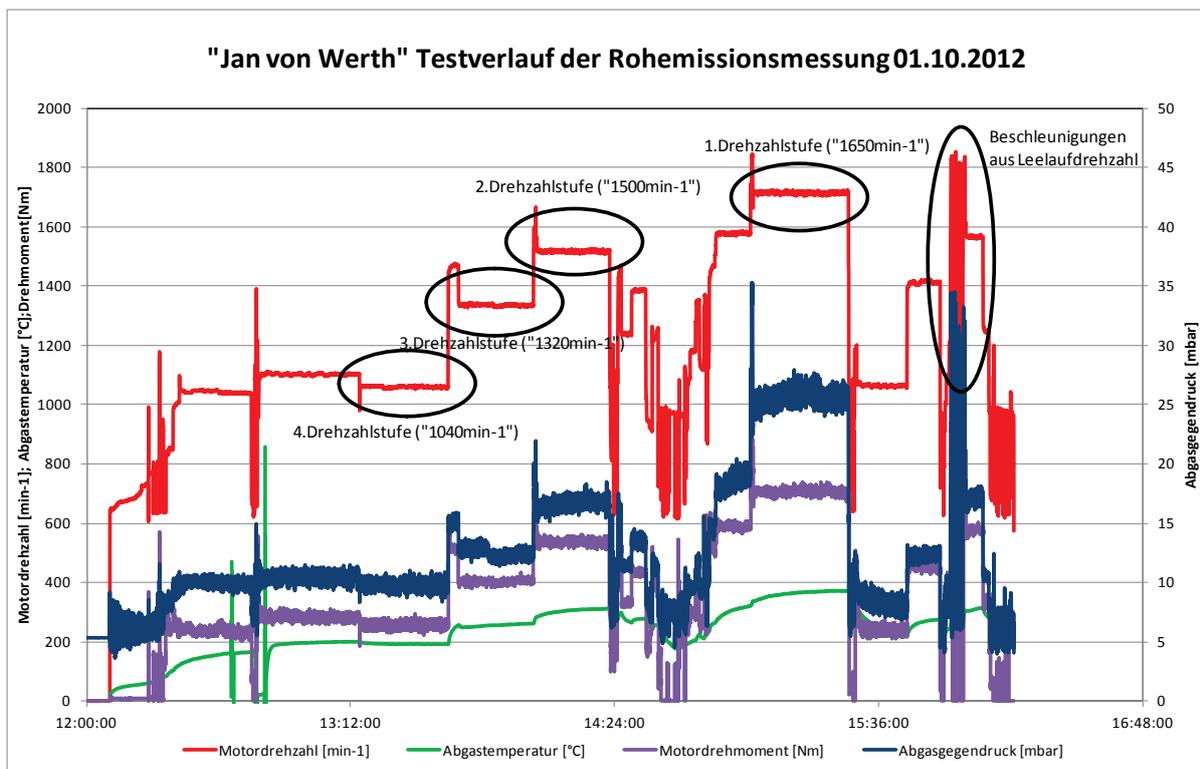


Abbildung 22: Messwerte verschiedener Parameter während der Rohemissionsmessung (1. Messkampagne)

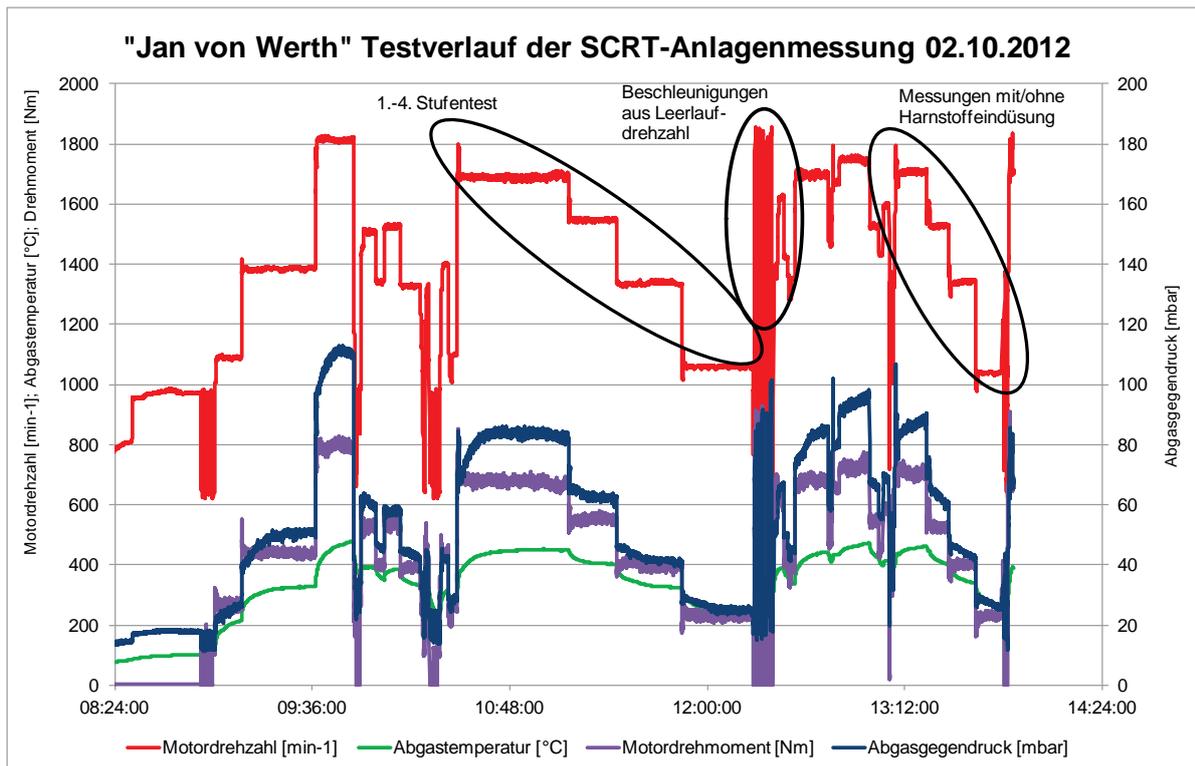


Abbildung 23: Messwerte verschiedener Parameter während der SCRT-Anlagenvermessung (1. Messkampagne)

- Durch den provisorischen Umbau zur Rohemissionsvermessung sind sowohl die Abgasgegendrücke als auch die Abgastemperaturen bei der Rohemissionsmessung deutlich geringer als mit SCRT-Anlage. Hierdurch ändert sich auch die Druckdifferenz über den Abgasturbolader. Die Motorparameter (Temperatur und Gegendruck), die vor dem Einbau der SCRT-Anlage gemessen werden, entsprechen auf Grund des Schalldämpfers denen mit SCRT-Anlage (Abbildung 24).
- Die Messungen mit SCRT-Anlage zeigen eine Reduktion der Stickoxidemissionen (NOX) von 67,4% über den gewichteten Test. Dabei variieren die Testergebnisse von der niedrigsten zur höchsten Drehzahlstufe zwischen 63,5%-79,6%.
- Die Kohlenwasserstoffe (HC) werden im Test fast vollständig umgesetzt (98%).
- Der Kohlenmonoxidanteil erhöht sich um 22,6% über die gewichteten Testergebnisse. Insbesondere in der 3. und 4. Drehzahlstufe (1040 min^{-1} und 1320 min^{-1}) wird dieser Erhöhung deutlich (Abbildung 25). Dieser Effekt wird auch später bei den optionalen Vergleichsmessungen, Fahrten mit/ohne Harnstoffeindüsung beobachtet (siehe Kapitel 6.6).

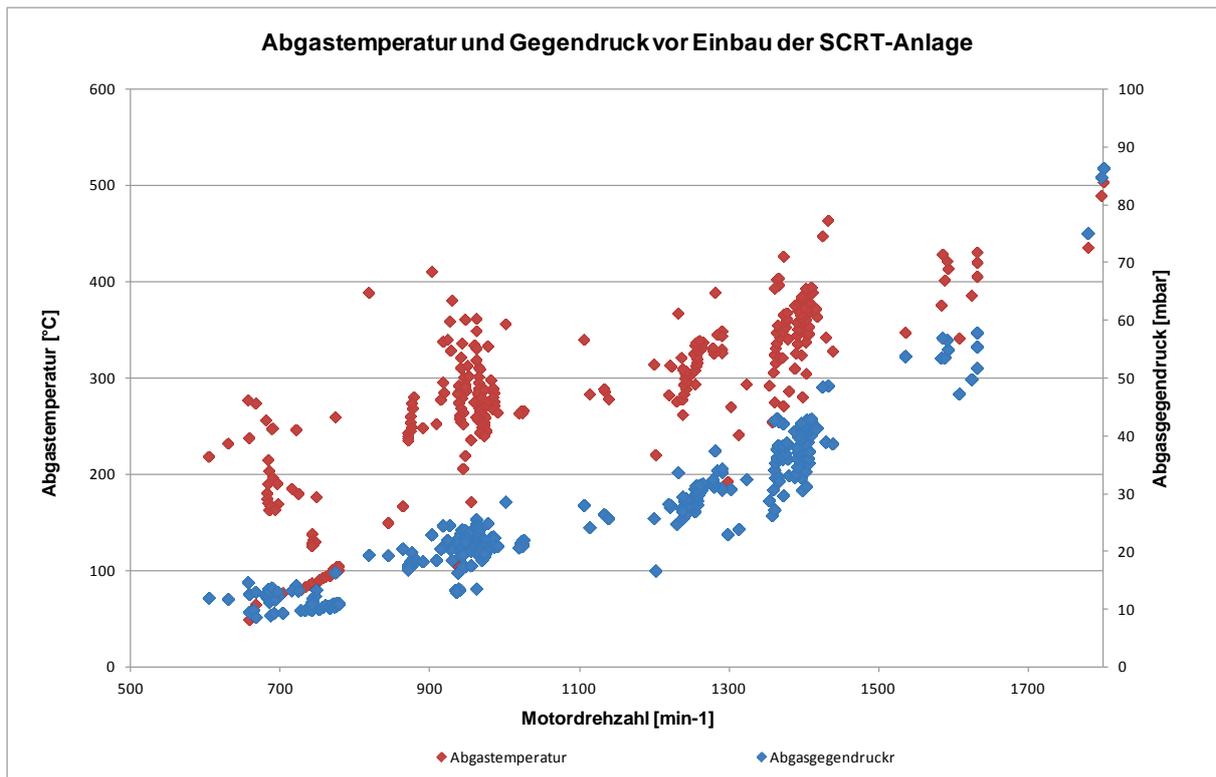


Abbildung 24: Abgastemperatur und Gegendruck vor Einbau der SCRT-Anlage

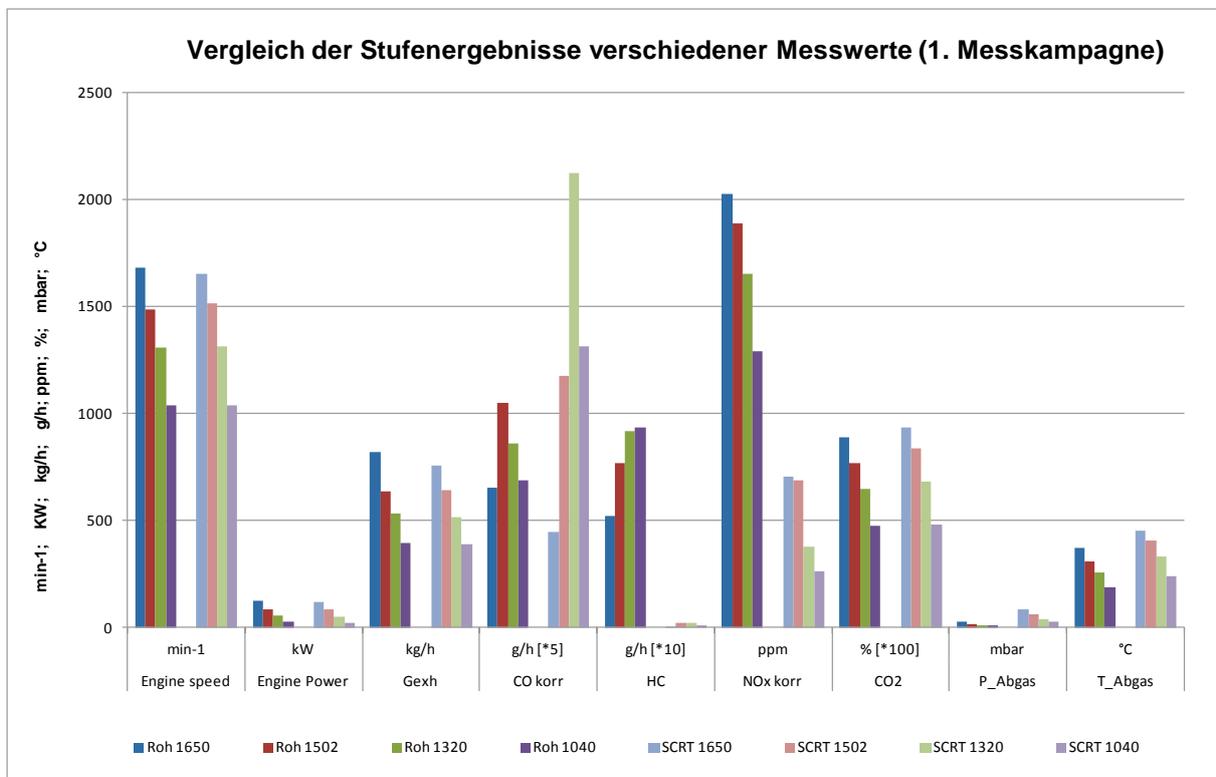


Abbildung 25: Vergleich der Messwerte mit / ohne SCRT-Anlage (1. Messkampagne)

Tabelle 26: Testergebnisse der Emissionsmessungen (1. Messkampagne), Rohemissionen oben, Emissionen mit SCRT-Anlage unten

TÜV-NORD Mobilität
IFM - Antrieb / Emissionen
Motoren / Nutzfahrzeuge

Manufacturer: DAF
Engine type: DK2 1160M
Test bench: Jan von Werth

Date: 01.10.2012
Location: Köln / Rhein
Order-No: LANUV

Instrument operator: Bourbon/Dreger
Engine operator: KD
Test number: 1. Messkampagne Rohemission

Nennleistung: kW
Grenzwertstufe: 0
Abgasnachbeh.: nein

Measuring point		1	2	3	4
	Unit	Rated Speed 100 % M(n)	Rated Speed 75 % M(n)	Rated Speed 50 % M(n)	Rated Speed 25% M(n)
Engnie speed	min ⁻¹	1680	1487	1310	1040
Torque measured	Nm	711,0	536,0	405,0	260,0
Engine Power	kW	125,1	83,5	55,6	28,3
G _{exh}	kg/h	819,51	636,12	533,98	394,57
CO _{korr}	ppm	248,5	342,6	334,2	362,5
HC	ppm	199,2	251,7	359,0	493,9
NO _{x korr}	ppm	2026,1	1887,4	1651,3	1290,1
CO _{mass} * Wfi	g/h	39,35	105,28	25,86	20,73
HC _{mass} * Wfi	g/h	15,64	38,35	13,77	14,00
NO _{x mass} * Wfi	g/h	527,01	952,68	209,91	121,18
P * Wfi	kW	25,02	41,73	8,33	4,25

Test result	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC + NO _x [g/kWh]	CO ₂ [g/kWh]	PT [g/kWh]	Weighted test power [kW]
Measured value	2,410	1,031	22,826	23,856	833,75	0,521	79,33

Manufacturer: DAF
Engine type: DK2 1160M
Test bench: Jan von Werth

Date: 02.10.2012
Location: Köln / Rhein
Order-No: LANUV

Instrument operator: Bourbon/Dreger
Engine operator: KD
Test number: 1. Messkampagne nach SCRT

Nennleistung: 41,5 kW
Grenzwertstufe: II
Abgasnachbeh.: ja

Measuring point		1	2	3	4
	Unit	Rated Speed 100 % M(n)	Rated Speed 75 % M(n)	Rated Speed 50 % M(n)	Rated Speed 25% M(n)
Engnie speed	min ⁻¹	1654	1514	1313	1037
Torque measured	Nm	679,9	554,7	395,0	233,6
Engine Power	kW	117,8	87,9	54,3	25,4
G _{exh}	kg/h	757,29	643,07	516,33	389,74
CO _{korr}	ppm	182,7	378,5	851,9	698,0
HC	ppm	0,5	7,0	8,6	6,6
NO _{x korr}	ppm	703,9	688,3	376,8	263,1
CO _{mass} * Wfi	g/h	26,73	117,57	63,74	39,42
HC _{mass} * Wfi	g/h	0,04	1,08	0,32	0,18
NO _{x mass} * Wfi	g/h	169,19	351,20	46,31	24,41
P * Wfi	kW	23,55	43,97	8,15	3,81

Test result	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC + NO _x [g/kWh]	CO ₂ [g/kWh]	PT [g/kWh]	Weighted test power [kW]
Measured value	3,114	0,020	7,438	7,458	862,20	0,034	79,48

6.4 Ergebnis der gravimetrischen Partikelmessung

In Abbildung 27 sind die Filterplättchen der einzelnen Testreihen gegenüber gestellt. Zur visuellen Darstellung der Beladungsunterschiede wurden sowohl die Sammelzeiten als auch die Probenentnahmeströme über alle Messstufen gleich gehalten.

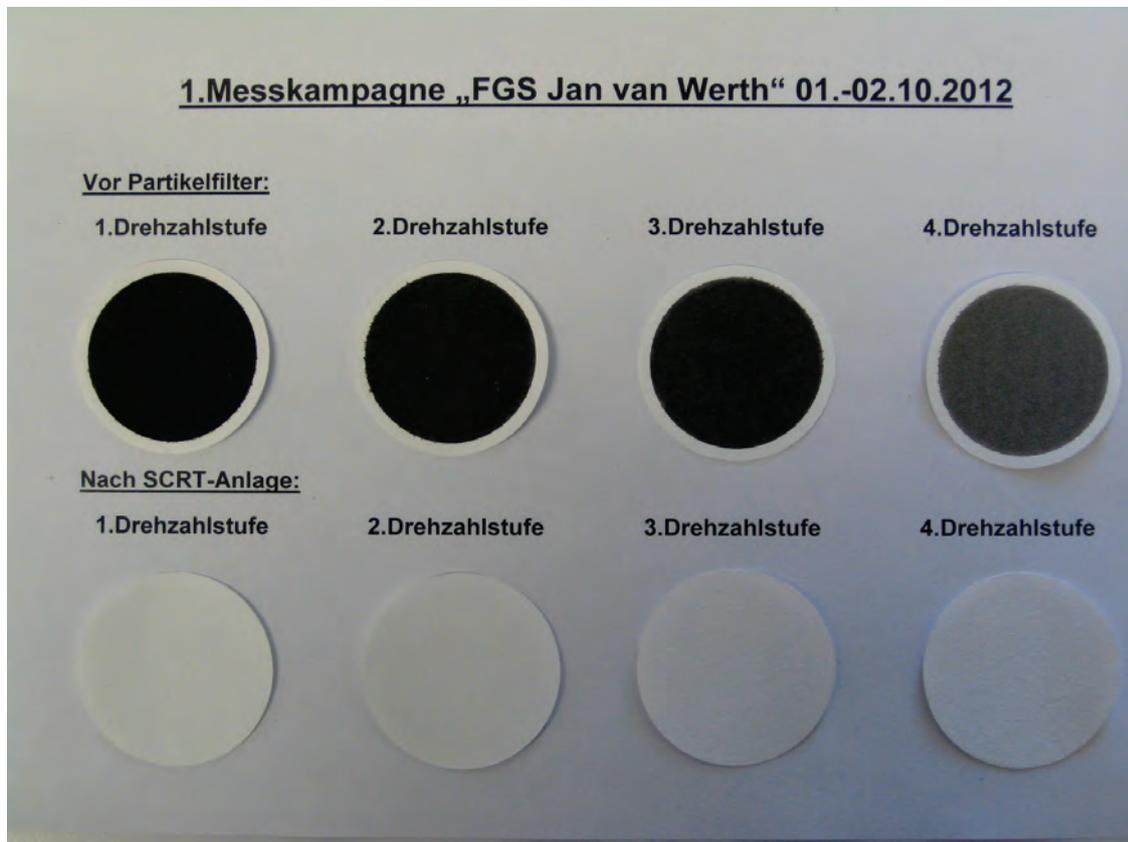


Abbildung 27: Partikelfiltervergleich mit/ohne DPF-Filtereinsatz (1. Messkampagne)

- Die Auswertung der gravimetrischen Partikelmessung ergibt für die Messungen der Rohemissionen eine Gesamtemission von 0,521 g/kWh und für die Messungen mit funktionsfähiger SCRT-Anlage eine Partikelmasse von 0,034 g/kWh. Die Reduktion der Anlage liegt somit bei 93,5%.

In Tabelle 28 sind die Messergebnisse und Sammelergebnisse der einzelnen Stufen aufgelistet. Hier finden sich auch die Konzentrationswerte für die Ruß (EC)-Messungen mit dem Soot-Sensor wieder. Eine Gegenüberstellung dieser Werte zeigt eine Verringerung der kohlenstoffhaltigen Rußkonzentration (EC) von 99%. Gleichzeitig sind die Partikelmassen je Messstufe in dieser Tabelle gegenübergestellt. Aufgrund gleicher Sammelzeit und Abgasdurchsatz über den Filtern sind sie unkorrigiert dargestellt und zeigen Abscheideraten von 89,8%- 94,3%.

Tabelle 28: Konvertierung der Rußkonzentration (EC) und Partikelmassen (PM) (1. Messkampagne)

Testergebnisse: elementarer Kohlenstoff (EC) [mg/m³]						
gravimetrische Partikelmassen PM [mg/nl]						
Drehzahl	1.Messk. EC		Konvertierungsgrad	1.Messk. PM		Konvertierungsgrad
	ohne DPF	mit DPF	[%]	ohne DPF	mit DPF	[%]
1. (1650min-1)	19,976	0,087	99,57	0,079	0,0046	94,20
2. (1502min-1)	17,789	0,069	99,61	0,088	0,0050	94,31
3. (1350min-1)	13,341	0,040	99,70	0,061	0,0061	89,93
4. (1040min-1)	4,961	0,038	99,24	0,054	0,0055	89,80

6.5 Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen

Im Anschluss an den Stufentests wurden jeweils mehreren Vollastbeschleunigungen im Drehzahlspektrum durchfahren. Diese Messungen wurden mit und ohne SCRT-Anlage durchgeführt und ermöglichen die Beurteilung von Durchblaseeffekten an Partikelfiltersystemen, die durch leichte Undichtigkeiten im Canning, bzw. bei zusammengesetzten Substraten durch Fehlstellen in der Abdichtung entstehen können (Abbildung 29 und Abbildung 30).

Rußkonz.(EC), NOx und Abgastemp. in den Beschleunigungstests (Rohemissionen 01.10.2012)

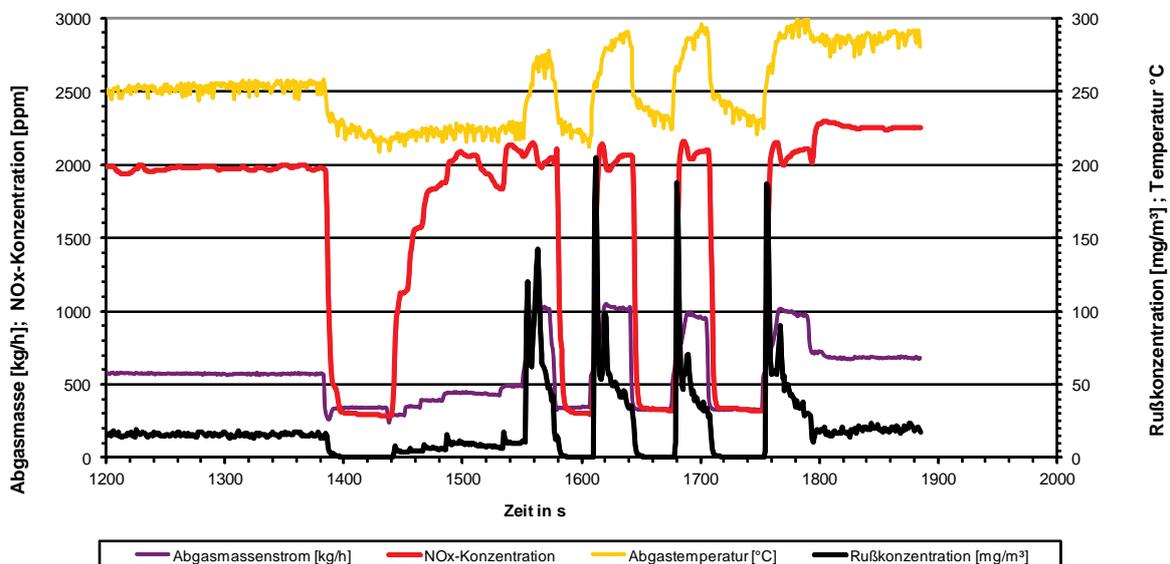


Abbildung 29: Messwertverlauf FGS „Jan von Werth“ (01.10.2012) ohne Abgasminde-
rungssystem

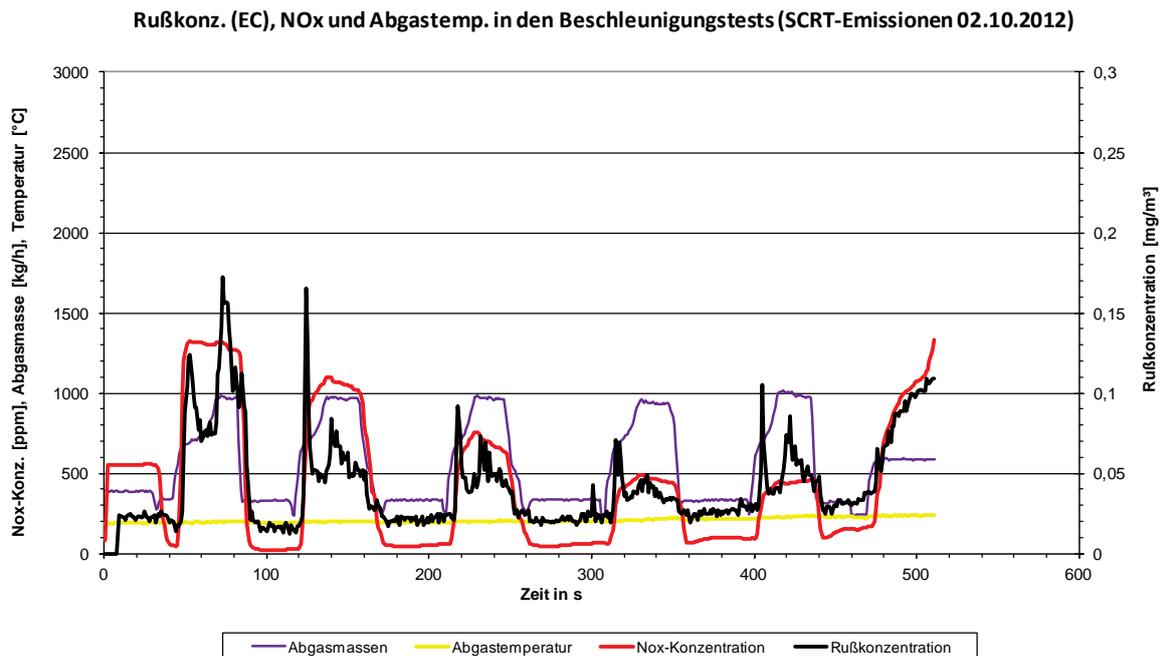


Abbildung 30: Messwerteverlauf FGS „Jan von Werth“ (02.10.2012) mit Abgasminderungssystem

- Bei den Beschleunigungstests ist zu beobachten, dass die elementaren Rußkonzentrationen (EC) der Rohemissionsmessung von 150-200 mg/m³ auf ca. 0,1 mg/m³ mit SCRT-Anlage abnehmen. Dies entspricht einer Reduktion mit / ohne Abgasminderungssystem von 99% (siehe auch Kapitel 6.4).
- Die Abgastemperatur bei der Beschleunigung mit DPF und SCR-Kat zeigen auf Grund der Speicherkapazität dieser Bauteile keine deutliche Erhöhung der Temperaturwerte während der Vollast (Abbildung 29 und 30, Achsformatierung beachten).

6.6 Ergebnisse der Vergleichsmessungen

Fahrzustände, bei denen auf Grund fehlender Abgastemperatur, wegen Harnstoffmangels oder durch Störung und Ausfall eines Bauteiles kein AdBlue® eingedüst wird, werden durch Vergleichsmessungen in den vier Drehzahlstufen untersucht. Abbildung 31 zeigt den Verlauf der NOX-, CO- und Ruß-Konzentrationen jeweils mit und ohne Harnstoffeindüsung in den Drehzahlstufen.

Vergleichsmessungen mit und ohne Harnstoffeindüsung

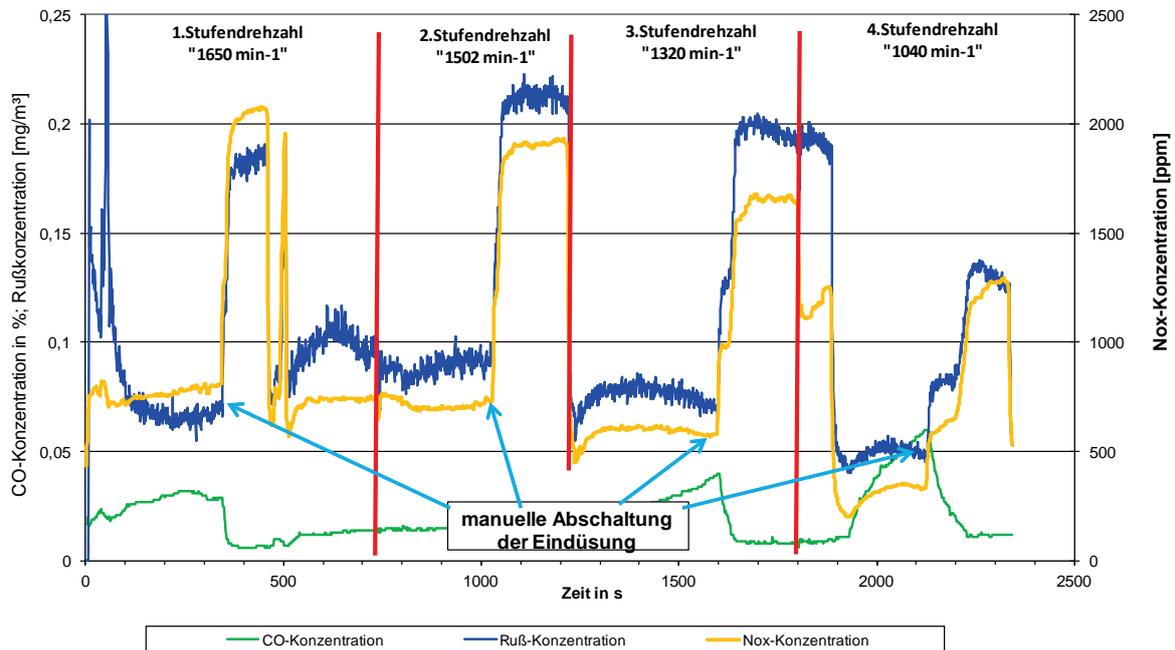


Abbildung 31: Verlauf der NO_x, CO- und Rußkonzentrationen während der Vergleichsfahrt

- Nach Abschaltung der Harnstoffeindüsung ist zu erkennen, dass neben dem Anstieg der Stickoxidkonzentrationen (NO_x) auch die elementaren Rußpartikelemissionen (EC) ansteigen. Gleichzeitig fallen die Messwerte der Kohlenmonoxidkonzentration (CO). Auf Grund der Anordnung der Eindüsung können diese Reaktionen nur dem mit Vanadium beschichteten Katalysator zugesprochen werden (Abbildung 31).

7 Ausblick für die 2. Messkampagne

Die Ergebnisse geben eine gute Basis für die geplante 2. Messkampagne wieder. Die im Rohabgas ermittelten Stickstoffoxidwerte sind mit ca. 23 g/kWh wesentlich höher als bei der Auslegung der Anlage erwartet. Als Vergleichsgröße sei hier erwähnt, dass der erste Grenzwert für Stickoxide von Nutzfahrzeugmotoren der ECE R49 in den 1980er Jahren bei 18 g/kWh lag. Eine Kontrolle in den Winterliegezeiten soll den Zustand des Antriebsmotors klären.

8 Ergebnisse der 2. Messkampagne

8.1 Allgemeines

Die Köln Düsseldorf Deutsche Rheinschiffahrt AG (KD) hat entsprechend den Vorjahresplänen in der Winterpause den linken Antriebsmotor einer umfangreichen Inspektion zur Beurteilung des Motorzustandes unterzogen. Im Rahmen dieser Inspektion wurden die Einspritzdüsen des Motors erneuert, sowie das Ventilspiel und die Einspritzpumpeneinstellung überarbeitet.

Zur Beurteilung unterschiedlicher Messkampagnen und Einstellungen des Motors oder des Abgasnachbehandlungssystems ist es wichtig, möglichst viele abgas- und auswertungsrelevante Eingangsgrößen zur 1. Messkampagne gleich zu halten. Bei den Messfahrten zu dem 4-Stufentest vor Ort waren dies ausschließlich die Motordrehzahl (Stufendrehzahlen 1640 min^{-1} , 1500 min^{-1} , 1320 min^{-1} , 1040 min^{-1}) und der Beladungszustand (nur Schiffsbesatzung und Messpersonal, ohne Fahrgäste) sowie die Fahrstrecke (Rheinaufwärts).

Entsprechend der 1. Messkampagne wurde der erste Messtag dazu genutzt, die Abgasanlage auf den ursprünglichen Messzustand „Rohemissionen“ umzubauen. Hierbei wurden die gleichen Messstellen und Probenahmeleitungen genutzt, wie sie zur 1. Messkampagne verwendet wurden. Abbildung 32 zeigt die Messanordnung zur 2. Messkampagne.

Nach Auswertung der Loggerdaten war die SCRT-Anlage zwischen ihrer Installation und der 1. Messkampagne 350 Motorlaufstunden und zwischen den beiden Messkampagnen 235 Motorlaufstunden in Betrieb (Winterzeit). Die 2. Messkampagne fand vom 25. bis 26.03.2013 statt.



Abbildung 32: Jan von Werth zur 2. Messkampagne

8.2 Auswertung des 4-Stufentests

Abbildung 33 stellt den Messfahrtverlauf zur Rohemissionsermittlung der 2. Messkampagne dar. Ein Vergleich zur 1. Messkampagne (siehe Kapitel 6.3 und Abbildung 22) zeigt, dass neben den Drehzahlen auch die Abgastemperaturen und Abgasgegendrücke in den Messstufen vergleichbar sind.

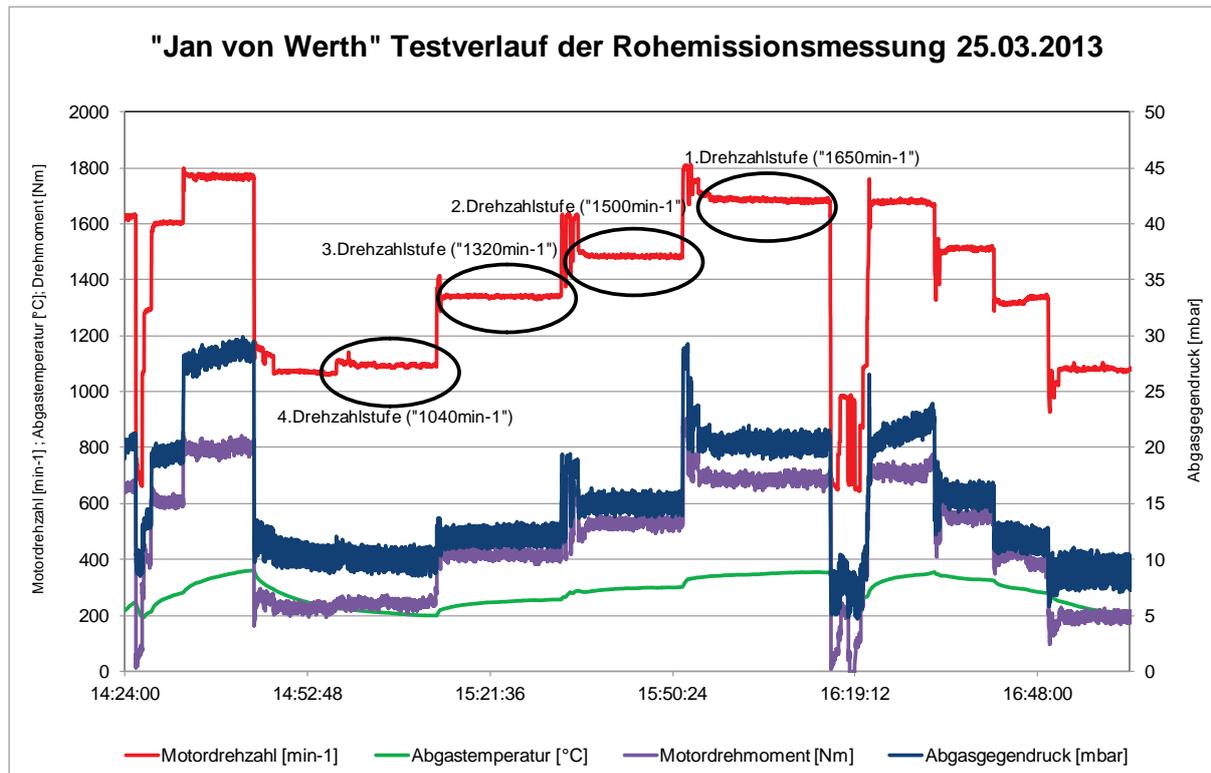


Abbildung 33: Messwerte verschiedener Parameter während der Rohemissionsmessung (2. Messkampagne)

Abbildung 34 zeigt den Verlauf der Testfahrt mit funktionsfähiger SCRT-Anlage. Dabei ist festzustellen, dass im Verlauf der Warmfahrt vor Messbeginn der Dieselpartikelfilter (DPF) mit Erreichen der notwendigen Abgastemperatur regeneriert. Der Abgasgegendruck fällt im Laufe der Konditionierung auf 145 mbar, bei einer Stufendrehzahl von 1650 min⁻¹, ab. Dieser Druck und die zugehörige Abgastemperatur liegen höher als zuvor in der 1. Messkampagne gemessen (Kapitel 6.3, Abbildung 23). Auf Grund der Messfühleranordnung für die Abgasdruck- und Temperaturbestimmung kann dies durch Ascheeinlagerungen im Partikelfilter und von Harnstoffeinlagerungen im Hydrolysekatalysator herrühren (Abbildung 36).

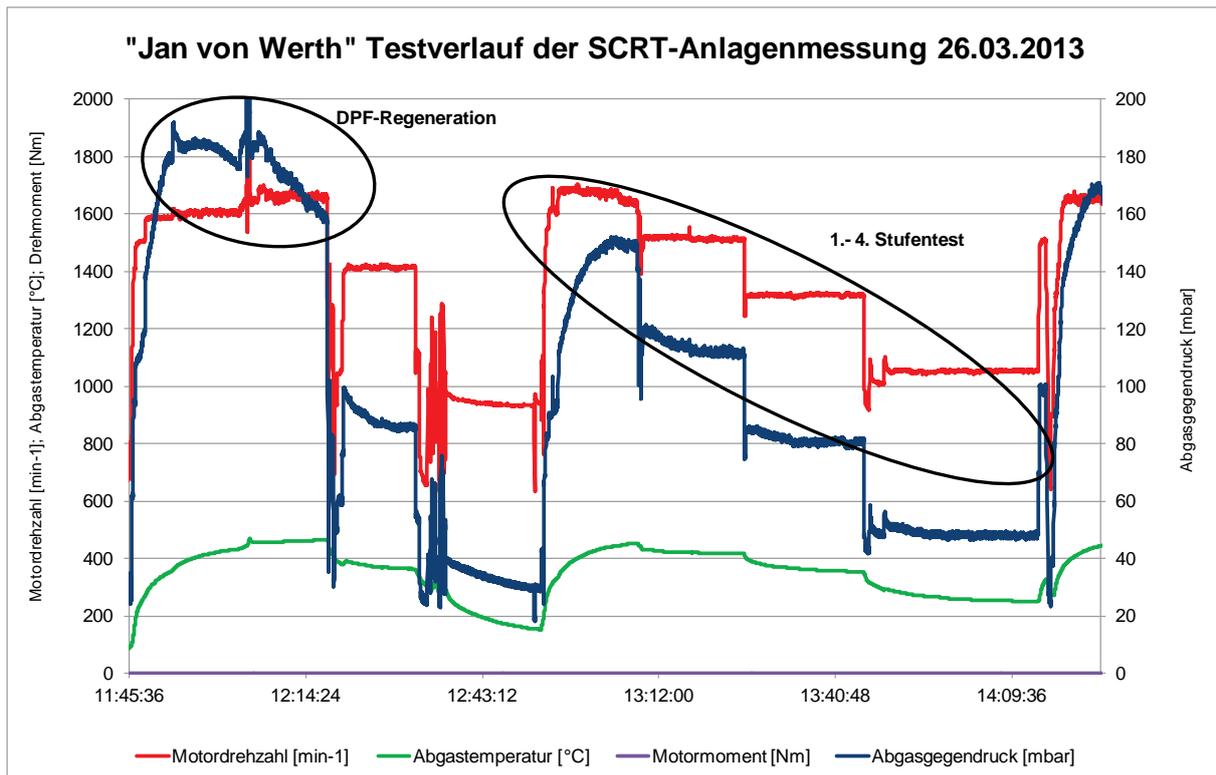


Abbildung 34: Messwerte verschiedener Parameter zur SCRT-Anlagenvermessung (2. Messkampagne)

Die analysierten Rohemissionen zeigen zur 2. Messkampagne deutlich gesunkene Messwerte in allen Messstufen (Abbildung 35). Dies kann zum einen mit der überarbeiteten Einstellung des Motors zusammen hängen, zum anderen mit den um 10°C-15°C jahreszeitlich bedingten geringeren Ansauglufttemperaturen.

- Der Messwertvergleich für die 2. Messkampagne zeigt, dass eine Stickoxidreduzierung (NOX) von 77,4% (2,828/12,507 g/kWh) über den gewichteten Test erreicht wurde. Dabei variieren die Stufenergebnisse zwischen 75% und 90%.
- Die Kohlenwasserstoffe (HC) sinken auf das gleich niedrige Niveau der 1. Messkampagne (> 90%).
- Die Kohlenmonoxidanteile (CO) weisen in den Prüfstufen Umsatzraten von 37% bis 87% auf.

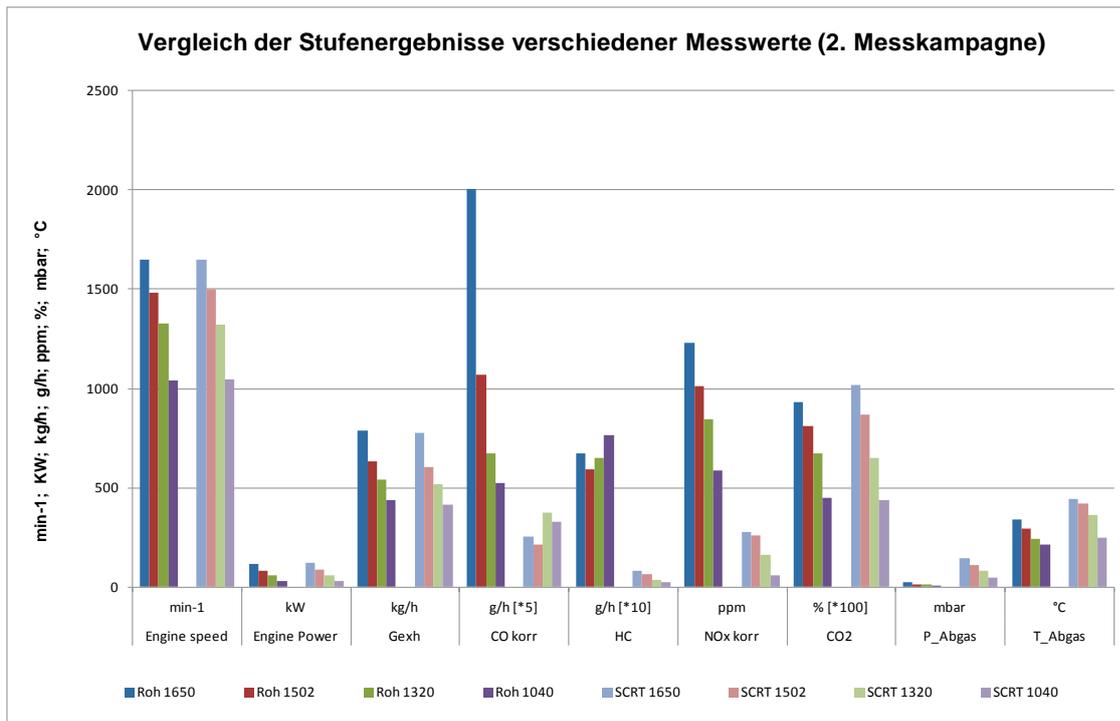


Abbildung 35: Vergleich der Messwerte mit/ohne SCRT-Anlage (2. Messkampagne)

Abbildung 36 zeichnet die unterschiedlichen Abgastemperaturbereiche und Gegendrücke über der Motordrehzahl, wie sie bei der 2. Messkampagne vorlagen, wieder.

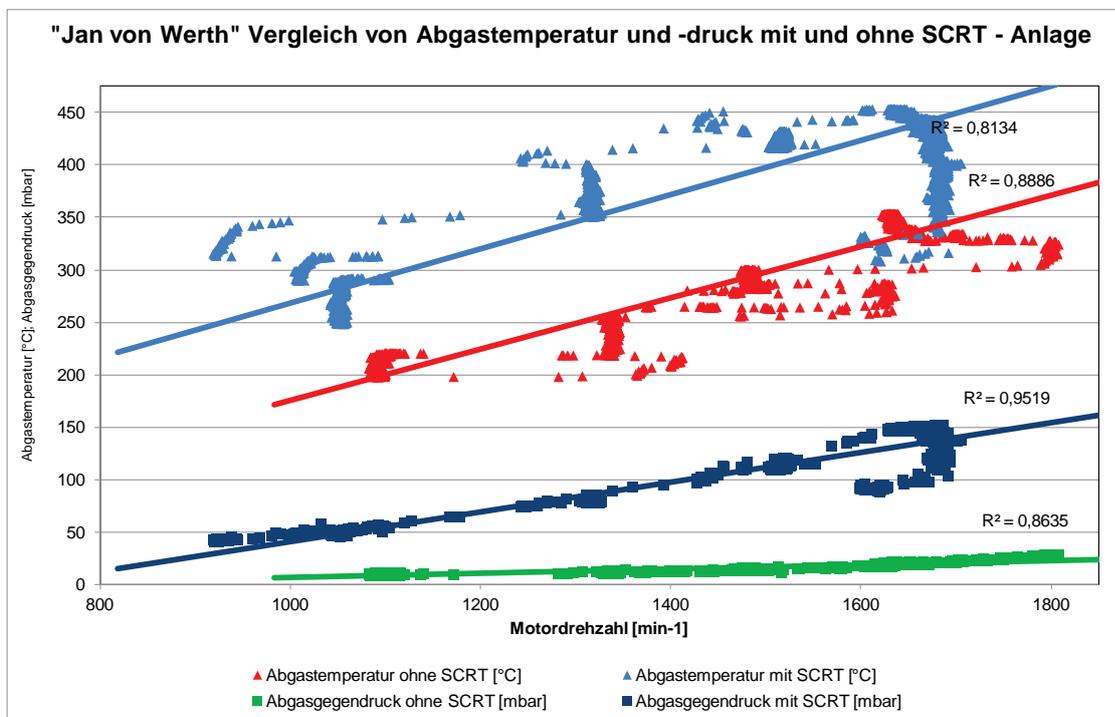


Abbildung 36: Vergleich von Abgastemperatur und -druck mit/ohne SCRT-Anlage (2. Messkampagne)

Tabelle 37: Testergebnisse der Emissionsmessung (2. Messkampagne), Rohemissionen oben, Emissionen mit SCRT-Anlage unten

Manufacturer: DAF
 Engine type: DK2 1160M
 Test bench: Jan von Werth

Date: 26.03.2013
 Location: Köln / Rhein
 Order-No.: LANUV

Instrument operator: Bourbon/Dreger
 Engine operator: KD
 Test number: 2.Messk. nach SCRT

Nennleistung: 41,5 kW
 Grenzwertstufe: II
 Abgasnachbeh.: ja

Measuring point	Unit	1	2	3	4
		Rated Speed 100 % M(n)	Rated Speed 75 % M(n)	Rated Speed 50 % M(n)	Rated Speed 25% M(n)
Engine speed	min ⁻¹	1650	1502	1320	1045
Torque measured	Nm	705,8	551,5	420,0	255,0
Engine Power	kW	122,0	86,7	58,1	27,9
G _{exh}	kg/h	775,86	606,85	517,01	414,06
CO _{korr}	ppm	67,2	73,0	150,8	164,5
HC	ppm	22,1	21,6	14,2	11,9
NO _{x korr}	ppm	238,3	276,7	211,8	102,6
CO _{mass} * Wfi	g/h	10,07	21,39	11,30	9,87
HC _{mass} * Wfi	g/h	1,64	3,15	0,53	0,35
NO _{x mass} * Wfi	g/h	58,68	133,23	26,07	10,11
P * Wfi	kW	24,39	43,37	8,71	4,19

Test result	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC + NO _x [g/kWh]	CO ₂ [g/kWh]	PM [g/kWh]	Weighted test power [kW]
Measured value	0,652	0,070	2,828	2,898	868,07	0,027	80,66

8.3 Ergebnis der Partikelmessung



Abbildung 38: Partikelfiltervergleich mit / ohne DPF-Filtereinsatz (2. Messkampagne)

Abbildung 38 zeigt eine Auswahl der Partikelfilterplättchen aus der 2. Messkampagne. Im Vergleich zur 1. Messkampagne zeigt die 1. Drehzahlstufe (1640 min⁻¹) der Rohemissionen eine leicht gräuliche Färbung. Auch liegen die gemessenen Rußkonzentrationen und der gravimetrisch ermittelte Massenwert deutlich über denen der 1. Messkampagne. Mögliche Erklärungen wären Sulfatbildung über Schwefel aus dem Schmieröl o.ä., müssten aber über genauere Analysen nachgewiesen werden.

Tabelle 39: Konvertierung der Rußkonzentration (EC) und Partikelmassen (PM) (2. Messkampagne)

Testergebnisse: elementarer Kohlenstoff (EC) [mg/m³]						
gravimetrische Partikelmassen PM [mg/nl]						
Drehzahl	2.Messk. EC		Konvertierungsgrad	2.Messk. PM		Konvertierungsgrad
	ohne DPF	mit DPF	[%]	ohne DPF	mit DPF	[%]
1. (1650min-1)	54,794	0,058	99,89	0,121	0,0056	95,37
2. (1502min-1)	22,779	0,056	99,76	0,066	0,0045	93,18
3. (1350min-1)	12,571	0,039	99,69	0,047	0,0041	91,28
4. (1040min-1)	4,556	0,030	99,35	0,039	0,0033	91,54

- Die Auswertung der gravimetrischen Partikelmassenbestimmung ergibt eine Gesamtkonvertierung von 94,8% über den gewichteten Test.
- In Tabelle 39 sind die Ergebnisse der einzelnen Stufen dargestellt. Wie bereits zur 1. Messkampagne werden die kohlenstoffhaltigen Rußpartikel zu 99% konvertiert. Die Gravimetrie zeigt einen Umsetzungsgrad von 91% bis 95% in den Drehzahlstufen. Die Umsetzungsgrade der beiden Messkampagnen liegen damit in gleicher, erwarteter Größenordnung.

9 Auswertung der Langzeitdaten

Die „Jan von Werth“ wurde zu Projektbeginn mit einer Langzeitdatenerfassung ausgerüstet, wie sie in Kapitel 4.2 beschrieben ist. Eine Auswertung der Daten ergibt, dass das Fahrgastschiff seit Einbau der Messtechnik (Anfang 2012) bis zum Einbau der SCRT-Anlage ca. 650 Motorbetriebsstunden zurückgelegt. In dieser Zeit wurden die Abgasgegendrücke, Abgastemperaturen und Motorleistung bestimmt, um die Anlage optimal zu konzeptionieren.

Nach dem Einbau der SCRT-Anlage (01.08.2012) bis zur 1. Messkampagne (01.-02.10.2012) wurden mit dem Fahrgastschiff „JvW“ ca. 350 Motorbetriebsstunden gefahren und weitere 250 Stunden bis zur 2. Messkampagne (25.-26.03.2013).

Eine Analyse der Motordrehzahlverteilung zeigt Abbildung 40 für planmäßige Rundfahrten (hier: Oktober 2012). Dabei ist festzustellen, dass bestimmte Drehzahlbereiche schwerpunktmäßig bedient werden. Diese liegen zwischen 800-1000 min⁻¹ bei den Talfahrten und 1200-1600 min⁻¹ bei den Bergfahrten.

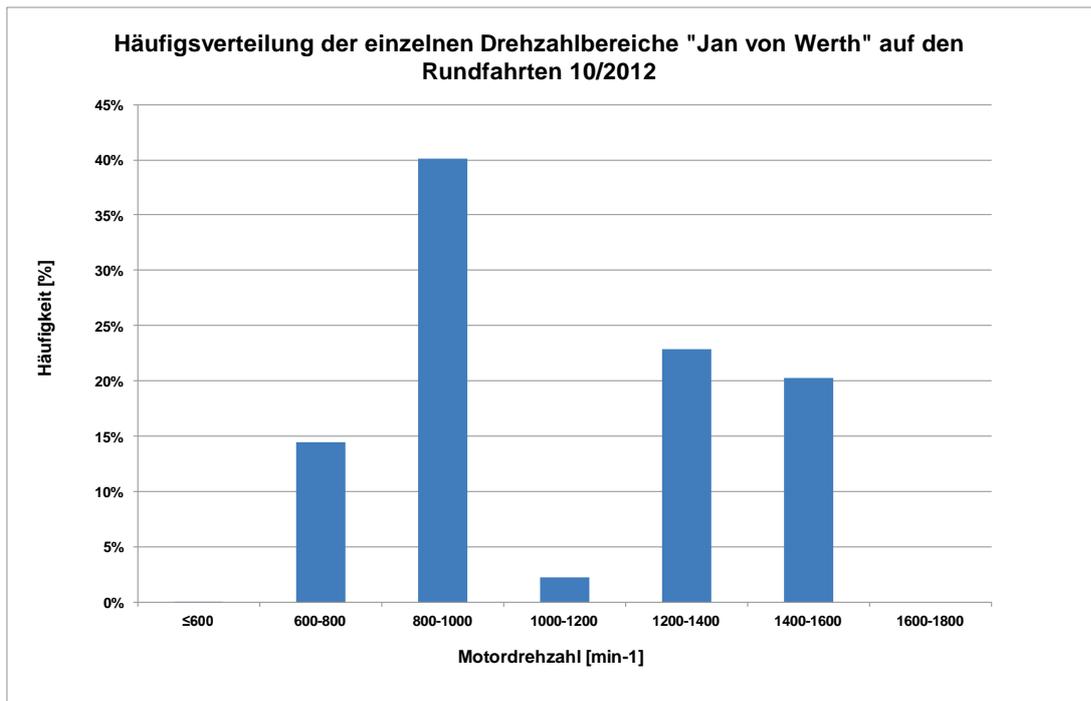


Abbildung 40: Verteilung der Motordrehzahlen bei planmäßigen Rundfahrten (10/2012)

In Abbildung 41 sind die Abgastemperaturbereiche zu den oben gewählten Rundfahrten dargestellt. Hieraus kann man ableiten, dass in ca. 80% der Motorlaufzeiten ein Temperaturbereich oberhalb von 200°C vorliegt, welcher für eine Eindüsung von Harnstoff erforderlich ist. Auch erreicht der DPF in über 50% der Motorlaufzeit die für den passiv regenerierenden Filter notwendige Temperatur von 230°C (siehe Anlagenbeschreibung im Anhang 11).

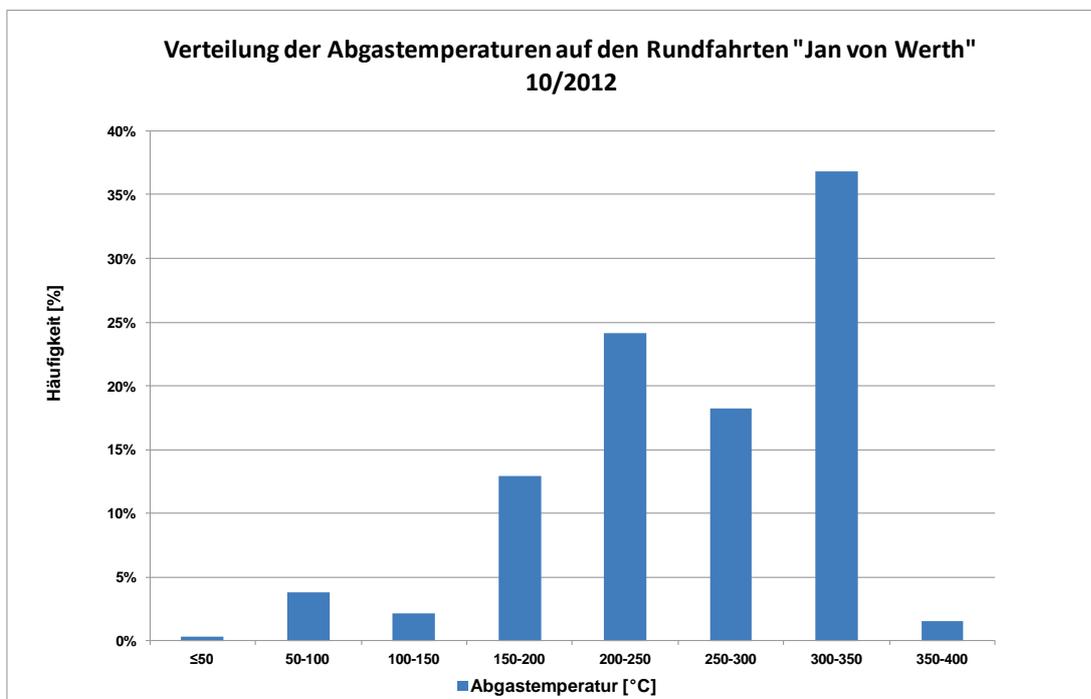
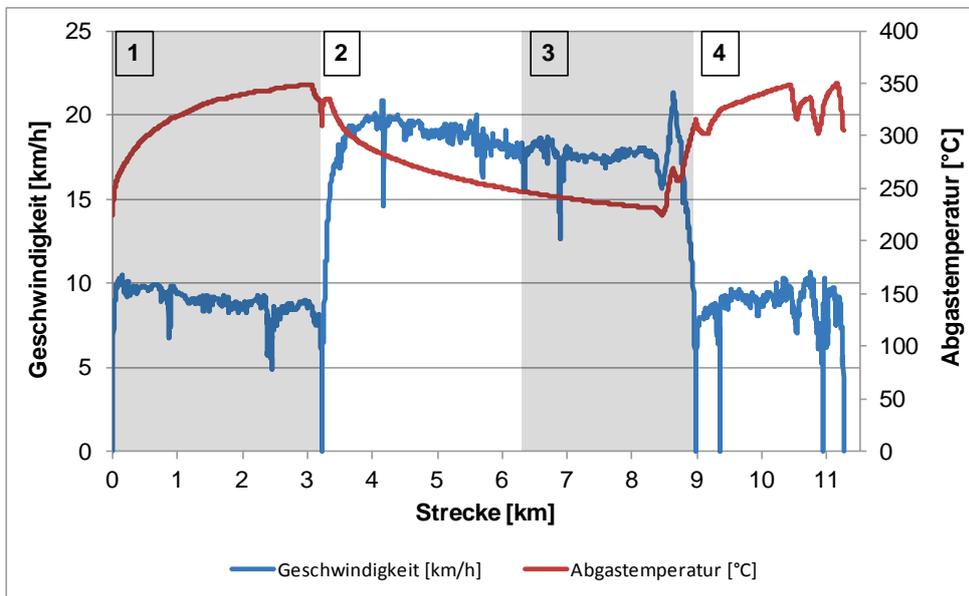


Abbildung 41: Verteilung der Abgastemperatur bei planmäßigen Rundfahrten (10/2012)

In Abbildung 42 ist der Streckenverlauf einer typischen Rundfahrt der „Jan von Werth“ dargestellt. Der Temperaturverlauf ist in der Grafik farblich dargestellt. Dabei liegen die Temperaturen bei 200°C (grün) bis zu 350°C (rot). Der Messwertverlauf über eine Fahrt-, sowie die sich daraus ergebenden mittleren Messwerte sind in Abbildung 43 aufgelistet.



Abbildung 42: Streckenverlauf einer Rundfahrt auf dem Rhein (10/2012) mit Angabe der Abgastemperatur [Quelle: Geobasisdaten des Landes NRW © Geobasis NRW 2013]



Fahrtrichtung	Norden	Süden
mittlere Geschwindigkeit	16,61 km/h	9,05 km/h
mittlere Drehzahl	939,05 min ⁻¹	1297,29 min ⁻¹
mittlere Temperatur	248,84 °C	303,58 °C
Fahrtzeit	0,85 h	1,98 h

Abbildung 43: Verlauf der Abgastemperatur und Geschwindigkeit während der Rundfahrt

10 Zusammenfassung und Schlussbemerkung

Die ermittelten gravimetrischen Abscheidegrade von 93,5% (1. Messkampagne) bzw. 94,8% (2. Messkampagne) bestätigen die wirkungsvolle Funktion des Dieselpartikelfilters. Die gleichzeitig durchgeführten Messungen des elementaren Kohlenstoffs (EC) mittels PASS-System untermauern die Ergebnisse und zeigen eine gute Korrelation in allen Messpunkten.

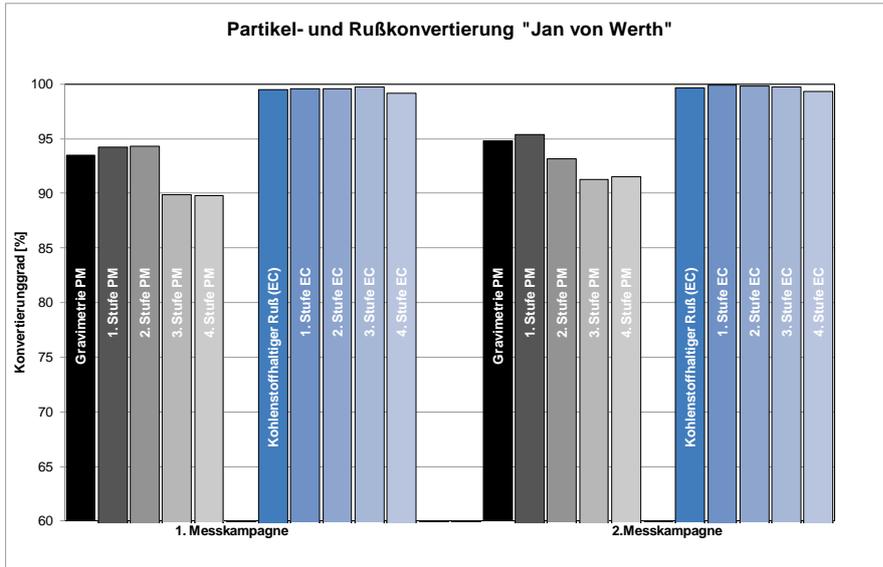


Abbildung 44: Partikel- und Rußreduzierung

In der 1. Messkampagne wird eine maximale Stickoxidreduktion (NO_x) von 77% ermittelt. Dabei werden allerdings NO_x-Rohemissionen von ca. 23 g/kWh gemessen. Diese Rohgasemission liegt über dem für diesen Motortyp zu erwartenden Emissionsniveau. Nach einer Inspektion des Motors werden deutlich niedrigere Rohemissionen ermittelt (12,5 g/kWh). In der 2. Messkampagne sind NO_x-Reduktionsraten von bis zu 90% erreicht worden.

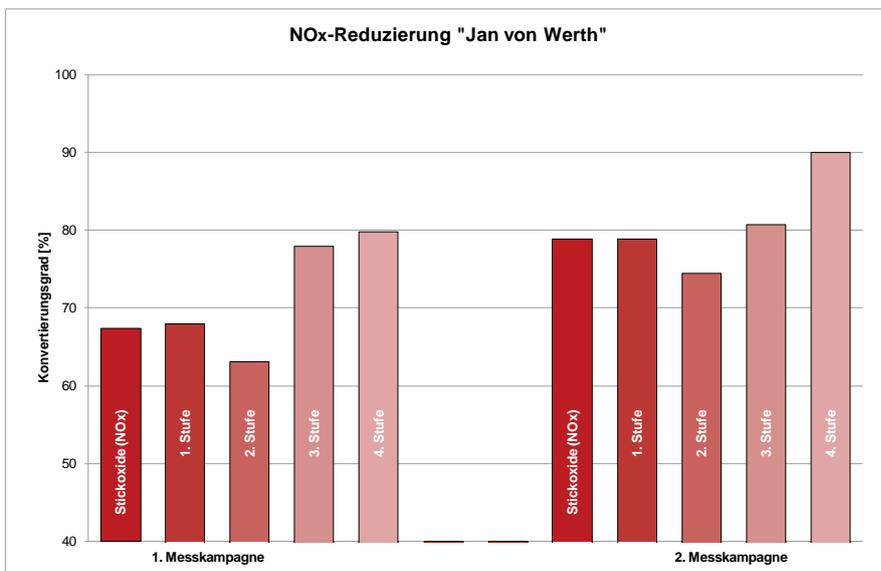


Abbildung 45: NO_x-Reduzierung „Jan von Werth“

Für eine ausreichende Regenerationsaktivität des Partikelfilters sowie für einen sicheren Betrieb des SCR Systems (Mindesttemperatur zur Eindüsung von Harnstoff) ist es notwendig, dass sich während des Fahrbetriebes über ausreichend lange Zeiten ein Temperaturniveau oberhalb der Mindesttemperatur einstellt. Das Fahrprofil des Fahrgastschiffes zeigt bei seinen typischen Rundfahrten Abgastemperaturen, die zu 80% über der zur Umsetzung benötigten Mindesttemperatur liegen.

Ausgehend von der 1. Messkampagne sind die Abgasgegendrücke in der Projektzeit leicht angestiegen, was unterschiedliche Ursachen haben kann. Zum einen führt eine Ascheeinlagerung im Partikelfilter zu einem langsamen aber kontinuierlichen Druckanstieg, der letztendlich das Reinigungsintervall für den Partikelfilter bestimmt. Zum anderen könnten Auskristallisierungen von Harnstoff in ungünstigen Betriebssituationen zu Druckanstiegen führen. Gewisse Schwankungen sind während des Betriebs durch unterschiedlich starke Regenerationsaktivitäten im Partikelfilter zu beobachten.

Nach Beurteilung der Messergebnisse der beiden Messkampagnen sowie durch die Beobachtungen des Betriebsverhaltens des Abgasnachbehandlungssystems und der Einsatzbedingungen im Fahrbetrieb der „Jan von Werth“ lassen sich die Erkenntnisse des Projektes wie folgt zusammenfassen:

- Für eine optimale Systemauslegung und –kalibrierung sollte der jeweilige Verbrennungsmotor vor der Nachrüstung auf seinen jeweiligen Istzustand hin kontrolliert und bei Bedarf überarbeitet werden. (Absenkung der Rohemissionen von 22,8 g/kWh NOX auf 12,5 g/kWh NOX zwischen den beiden Messkampagnen durch Wartung und Überarbeitung der Einspritztechnik).
- Um die Betriebssicherheit des Systems zu gewährleisten, sollte eine Überwachung des Differenzdrucks über das Abgasnachbehandlungssystem inkl. einer Warneinrichtung für den Schiffsführer vorhanden sein. Ein unzulässiger Anstieg des Abgasgegendrucks kann so detektiert und einem eventuellen Versagen des Antriebs vorgebeugt werden. Die Notwendigkeit zusätzlicher Maßnahmen gegen zu großen Leistungsverlust ist zu prüfen.
- Durch die Nachrüstung eines der beiden Antriebsmotoren der „Jan von Werth“ mit einem SCRT-System können die Partikel- und die NOX-Emissionen dieses Motors drastisch gesenkt werden. Partikelemissionen werden um mehr als 93% reduziert. Die Stickoxidemissionen werden nach Einbau des Abgasminderungssystems um 67,4% (1. Messkampagne) bzw. 78,8% (2. Messkampagne) verringert.
- Der elementare kohlenstoffhaltige Ruß wird bei einem Wirkungsgrad der Anlage von 99% nahezu vollständig umgesetzt.

11 Anhang

Anlagenbeschreibung Fahrgastschiff „Jan von Werth“

Der Backbord-Motor der „Jan von Werth“ wurde mit einer kombinierten Abgasreinigungsanlage aus CWF-Rußpartikelfiltern und einem t-blue NOX-Reduktionssystem (SCR) ausgerüstet. Für den Umbau der Abgasanlage wurde das Altsystem, bestehend aus Schalldämpfer und Verrohrung, weitestgehend demontiert. In den so geschaffenen Bauraum wurden die neuen Abgasreinigungskomponenten installiert.

Auf den Abgasaustritt am Turbolader wurde nach dem Kompensator der Altanlage zunächst ein 90°-Rohrbogen gesetzt, der axial in den Eingangssammler der Partikelfiltereinheit mündet. Diese besteht aus zwei Filterelementen des Typs CWF-900. Die Filtersubstrate haben jeweils eine Größe von 11,25 x 12 Zoll, sodass ein Filtervolumen von insgesamt 39 Litern verbaut ist. Die Filterelemente wurden mit einer katalytischen Beschichtung zur selbsttätigen Regeneration der Partikel versehen. Ab einer Abgastemperatur von ca. 230°C werden so die Rußpartikel durch einen Oxidationsprozess regeneriert.

Aus dem Ausgangssammler des Partikelfiltersystems wird zunächst ein gerades Rohrstück (ø 139,7 mm) waagrecht in Richtung des Hecks weiter geführt. Anschließend an dieses Rohr folgt die Mischstrecke, in welche auch der Injektor für die Harnstoffeindüsung integriert ist. Bis zum Eintritt in den SCR-Katalysator wird die Mischstrecke mit einem Rohrstück (ø 139,7 mm) weitergeführt. In der Eingangshaube des SCR-Katalysators mündet die Rohrleitung in eine Brause, die für eine gleichmäßige Verteilung des Abgas – Harnstoffgemisches auf der Katalysatoroberfläche sorgt. Der Katalysator selbst besteht aus 4 metallischen Trägern unterschiedlicher Struktur. Die drei größeren Elemente mit 101 mm wurden mit einer Reduktionsbeschichtung versehen, der vierte und letzte Träger mit 76,4 mm dient als Sperrkatalysator.

Nach dem SCR-Katalysator wurde die Abgasleitung mit dem Endrohr an der Aussenhaut des Schiffes verbunden. Das Endrohr, welches in einem S-Bogen zum Abgasaustritt führt, wurde von der Altanlage übernommen, da hier eine Flanschverbindung existiert, die als Schnittstelle definiert wurde.

Für die elektrischen Steuerungskomponenten und die Harnstoffpumpe wurde vor dem SCR-Katalysator ein Schaltkasten montiert, in welchem die entsprechenden Komponenten zusammen geführt wurden. Unter dem Schaltschrank wurde gut zugänglich auch der Harnstofftank mit einem Fassungsvermögen von 80 Litern positioniert, sodass die Leitungswege vom Tank zur Pumpe und zum Injektor in der Abgasleitung möglichst kurz gehalten wurden. Die gesamte Abgasreinigungsanlage wurde abschließend mit einer hoch effizienten thermischen Isolierung verpackt, sodass die Temperaturen im System gehalten werden und so eine optimale Regenerationsfähigkeit aller Komponenten gewährleistet ist.



TEHAG Deutschland GmbH
Gutenbergstraße 42, D-447443 Moers
www.tehag.com

SCR-System für kombinierte PM- und NOX-Minderung

Für die Einhaltung der Luftqualitätsziele sind heute neben den Partikeln auch die von Verbrennungsmotoren ausgestoßenen Stickoxide (NOX) weitgehend zu vermindern. Besonders bei Nutzfahrzeugen, mobilen Maschinen und auch Schiffen, die durch hohe Verbrennungseffizienz vergleichsweise mehr Stickoxid emittieren, sind effektive Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung gefragt. Als beste Möglichkeit zur Reduzierung der Stickoxide im Abgas von Dieselmotoren hat sich mit der Einführung der EU IV- und V-Grenzwerte für Nutzfahrzeuge das SCR-Verfahren erwiesen (Selective Catalytic Reduction). Dabei wird, geregelt zur Motorlast, eine geringe Menge von wässriger Harnstofflösung (AdBlue®) in das Abgas eingespritzt. Der Wasseranteil verdampft, während der Harnstoff zu Ammoniak umgewandelt wird und an einem speziellen Katalysator mit den Stickoxiden NOX reagiert. Es bleiben als Endprodukte nur noch Stickstoff (N₂) und Wasserdampf (H₂O), also neutrale Bestandteile der Umgebungsluft.

Bei neu entwickelten Motoren ermöglicht es das SCR-Verfahren, motorisch die Verbrennung des Kraftstoffs bestmöglich einzustellen, da die damit verbundene höhere Stickoxid-Rohemission in der nachgeschalteten Abgasreinigung wieder nahezu vollständig eliminiert wird. Damit besteht die Möglichkeit, Kraftstoff zu sparen und zugleich die Partikelemission zu senken. Man nennt das gegenläufige Verhalten von Stickoxiden zu Partikeln das „Dilemma des Diesels“, das in diesem Fall durch die SCR-Abgasreinigung freilich überwunden wird.

Existierende ältere Motoren, die, wie im Fall der Jan von Werth (Baujahr 1992) aus einer Zeit stammen, als Emissionsminderung noch nicht zu den wesentlichen Entwicklungszielen zählte, haben typischerweise recht hohe Emissionen an Stickoxiden (verbrauchsoptimale Einspritzeneinstellung). Dies trifft auch für die Jan von Werth zu, deren NOX-Emissionen im Sommer 2012 und im Frühjahr 2013 im Betrieb vom TÜV gemessen wurden. Bei den älteren Motoren treten gegenüber dem heutigen Stand auch noch vergleichsweise hohe Partikelemissionen („Dieselruß“) auf; diese werden bei der Jan von Werth in der ersten Stufe der nachgerüsteten Abgasreinigungsanlage durch einen passiv-regenerierenden Dieselrußfilter eliminiert. Für die Regeneration des abgeschiedenen Dieselrußes ist der Partikelfilter katalytisch beschichtet. Er reduziert gleichzeitig auch CO (Kohlenmonoxid) und HC (unverbrannte Kohlenwasserstoffe) nahezu vollständig, außerdem wird aus dem im Abgas vorhandenen Stickstoffmonoxid (NO) das Stickstoffdioxid (NO₂) gebildet, das für die Regeneration des im Partikelfilter abgeschiedenen Rußes benötigt wird.

Das SCR-System zur Stickoxidminderung ist dem Dieselrußfilter nachgeschaltet. Ein besonderer Nutzen dieser Anordnung ist, dass überschüssiges NO₂ durch die schnelle SCR-Reaktion wieder bevorzugt verbraucht wird. Damit werden nicht nur erhöhte Primäremissionen von NO₂ (wie bei passiven Filtersystemen allein meistens der Fall) vermieden, sondern es wird die NOX-Emission insgesamt deutlich herabgesetzt und damit ein wirkungsvoller Beitrag zur Verbesserung der Umgebungsluftqualität und Senkung der NO₂-Immissionsbelastung geleistet.

Durch die Nachrüstung mit dem hohen Wirkungsgrad für Partikel- und Stickoxidminderung konnte einer der beiden älteren Motoren auf ein Emissionsniveau heutiger Motoren mit Abgasreinigung (etwa wie Emissionsstand EU V für Nutzfahrzeuge bzw. EU Stufe IIIB für NRMM) gebracht werden.

Beschreibung der SCR-Anlage

Die SCR-Anlage vermindert die Stickoxidemissionen nach dem Prinzip der selektiven katalytischen Reduktion. Bei Abgas mit Restsauerstoff – wie bei Dieselmotoren – ist die Zugabe eines Reduktionsmittels erforderlich, mit dem die Stickoxide reagieren können. Dazu wird vorteilhaft wässrige Harnstofflösung verwendet. Diese wird präzise zu der in jedem Betriebspunkt erforderlichen Menge in das Abgas vor dem Katalysator eingedüst.

Das SCR-System besteht aus einer Harnstoffdosierung, zu der ein Injektor, eine entsprechende Pumpe, ein Tank sowie die entsprechende Steuerung und Sensorik gehören. Da das System in diesem Fall nachgerüstet wurde, standen die motorspezifischen Daten für die Errechnung der einzudüsenden Harnstoffmenge in bestimmten Lastpunkten nicht wie bei Neumotoren zur Verfügung. Das Abgasreinigungssystem beinhaltet die Sensorik, um allein aus den Messdaten die momentan erforderliche Menge an Reduktionsmittel AdBlue® präzise zu berechnen: einen Luftmassensensor in der Ansaugluftleitung des Motors, einen NOX - Sensor vor der Mischstrecke und einen NOX -Sensor nach dem SCR-Katalysator sowie Temperatursensoren zur Freigabe. Aus diesen Parametern errechnet die in der Dosierpumpe von Emitec integrierte elektronische Steuerung selbstständig exakt die benötigte Harnstoffmenge, fördert diese zum Einspritzventil, das einen feinen Sprühkegel von AdBlue®-Tropfen im Abgas erzeugt. Bei der Pumpe handelt es sich um eine Version für druckluftlose Zerstäubung des Reduktionsmittels. Die Dosierpumpe erzeugt einen Einspritzdruck von typisch 6-8 bar und hat eine maximale Fördermenge von 8 Litern in der Stunde.

Um eine optimale Vermischung und Verdampfung des Harnstoffes mit dem Abgas zu erreichen, ist in durch CFD-Rechnung optimierter Position hinter der Eindüsung ein Katalysatorelement mit der speziellen MX-Katalysatorstruktur und Hydrolysebeschichtung eingebaut. Dieser Katalysator sorgt für die vollständige Verdampfung der Harnstofflösung und die optimale Zersetzung des Harnstoffs in Ammoniak, auch bei schon bei niedrigen Abgastemperaturen, wie sie im Schiffsbetrieb vorkommen. Die Verdampfung und homogene Vermischung ist für die Funktion und hohe Umsatzleistung des nachfolgenden SCR-Reaktors wichtig.

Der SCR-Katalysator besteht bei dieser Anlage aus 4 einzelnen metallischen Trägern, die durch ihre besondere LS-Struktur für eine zusätzliche Vermischung des Abgas-Harnstoffgemisches ermöglichen. Die Katalysatoren sind mit katalytischer Beschichtung versehen, die die Umsetzung der Stickoxyde mit dem aus dem Harnstoff gebildeten Ammoniak beschleunigen.

Das letzte Katalysatorelement dient als „Sperrkat“, der mit einer speziellen Beschichtung einen eventuellen Durchbruch von unverbrauchtem Ammoniak (auch bei Lastsprüngen) eliminiert. Die Katalysatorelemente sind durch Flansche miteinander verbunden, so dass ein zusammenhängender Katalysator entsteht. Bei dem reaktiven Prozess im Katalysator entsteht aus den Stickoxyden (NO und NO₂) und dem Ammoniak (NH₃) Stickstoff (N₂) und Wasser (H₂O), also gänzlich unschädliche Stoffe. Die Katalysatereinheit wurde an der Position des Abgasgasschalldämpfers im Maschinenraum installiert (der etwa die gleiche Größe hatte); der Katalysator bewirkt die erforderliche Schalldämpfung simultan zur Abgasreinigungsfunktion mit.

Der installierte Vorratstank für die Harnstofflösung (AdBlue®), das Dosiermodul und eine Anzeige- und Bedieneinheit wurden im Maschinenraum des Fahrgastschiffes in einem Schaltschrank installiert.

Durch Messungen vom TÜV Nord wurden bei zwei Messkampagnen im Herbst 2012 und im Frühjahr 2013 die Funktion und die Stickoxid-Minderungsraten im Betrieb des Fahrgastschiffes dokumentiert. Die Ergebnisse sind an anderer Stelle des Abschlussberichtes enthalten.



Bild 1: SCR-Dosierpumpe (Emitec UDL, mit integriertem Steuergerät für Retrofit-Anwendung)



Bild 2: AdBlue®-Injektor (Emitec A2-8-Injektor, ohne Druckluftbedarf, flüssigkeitsgekühlt)



Bild 3: Hydrolyse- und Reduktionskatalysator



Bild 4: Metallträger-Katalysator



Bild 5: AdBlue®-Vorratstank



Emitec Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH
Hauptstraße 128, D-53797 Lohmar
www.emitec.com

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

www.lanuv.nrw.de

