



Emissionsmessungen auf dem Laborschiff „Max Prüss“ nach Ausrüstung mit einem SCRT-System

Ein Beitrag zum Projekt Clean Inland Shipping (CLINSH)

[LANUV-Fachbericht 102](#)

Emissionsmessungen auf dem Laborschiff „Max Prüss“ nach Ausrüstung mit einem SCRT-System

Ein Beitrag zum Projekt Clean Inland Shipping (CLINSH)

[LANUV-Fachbericht 102](#)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2020

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 |
| Bearbeiter | Dr. Dieter Busch, Dr. Andreas Brandt (LANUV) Martin Kleinebrahm, Sergej Dreger (TÜV-Nord) |

Dieser Bericht ist ein Teilbericht des CLINSH-Projektes LIFE15 ENV/NL/000217 „CLean INland SHipping (CLINSH)“. CLINSH ist ein LIFE+-Projekt der EG, das mit dem Beitrag des LIFE-Finanzierungsinstruments der Europäischen Gemeinschaft durchgeführt wird. Dieses Ergebnis ist Teil der Aktion B1, Technologien zur Emissionsminderung. Das Ziel von LIFE „CLINSH“ ist die Verbesserung der Luftqualität in städtischen Gebieten in der Nähe von Häfen und Binnenwasserstraßen durch beschleunigte Reduzierung der Emissionen der Binnenschifffahrt.

Projekt-Website: www.clinsh.eu



| | |
|---------------------|--|
| Titelbild | KNSYphotographie |
| 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 |
| 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.

Vorwort

Die EU-Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa legt für alle Mitgliedstaaten Luftqualitätsziele fest. Danach gelten seit 2010 für verschiedene Luftschadstoffe europaweit verbindliche Grenzwerte.

Für Stickstoffdioxid wurde der Grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ trotz Rückgang der Belastung im Jahr 2019 noch in acht Städten in NRW überschritten, darunter Düsseldorf und Köln am Rhein und mehrere Ruhrgebietsstädte, durch die schiffbare Kanäle führen.

Die möglichen Verursacher der Belastung werden öffentlich intensiv diskutiert. Um die Emissionen an den verschiedenen Quellen mindern zu können, muss bekannt sein, woher die Schadstoffe kommen und wieviel die einzelnen Quellen zur Belastung beitragen. In der Umgebung von Wasserstraßen sind die Dieselmotoren der Binnenschifffahrt eine relevante Quelle.

Das LANUV hat deshalb große Anstrengungen unternommen, um auch die Emissionen aus dem Schiffsverkehr näher zu untersuchen. Das Laborschiff „Max Prüss“ wurde mit einer kombinierten Abgasreinigung an Haupt- und Nebenaggregaten ausgerüstet, um sowohl Feinstaub als auch Stickoxide in den Abgasen zu reduzieren. Mit der Umrüstung seines Laborschiffes nimmt NRW eine Vorreiterrolle für die deutsche Rheinflotte ein.

Nordrhein-Westfalen nimmt mit der „Max Prüss“ als einziges deutsches Bundesland an dem internationalen EU-Life-Projekt „Clean Inland Shipping“ (CLINSH) teil. Zum Projekt gehören auch umfangreiche Monitoringprogramme zur Luftqualität in Binnenhäfen.

Das laufende, internationale EU-Life-Projekt „Clean Inland Shipping“ (CLINSH) verfolgt das Ziel einer sauberen Binnenschifffahrt und sucht in einem Projekt-Schwerpunkt nach den besten technischen Lösungen zur Verringerung der schiffsbedingten Luftverschmutzung.

Mit den Ergebnissen soll eine fachliche Datenbasis für zukünftige Entscheidungen der politischen Handlungsträger auf nationaler und EU-Ebene geschaffen werden, zu nachweislich realisierbaren Emissionsminderungen oder zur Ausgestaltung wirksamer Förderprogramme. Die meisten Binnenschiffe werden noch mit Dieselmotoren betrieben, die neben Stickoxiden weitere Luftschadstoffe und Feinstaub/Partikel emittieren.

Bei dem hier vorliegenden Fachbericht handelt es sich um einen Teilbeitrag zum „CLINSH“-Projekt aus NRW. Ich bedanke mich bei allen Beteiligten, die zur Erstellung dieser Studie mit ihrem Fachwissen beigetragen haben. Besonderer Dank gilt der Besatzung der „Max Prüss“, die die Messfahrten zum „CLINSH“-Projekt reibungslos in ihre Aufgaben bei der Überwachung der Gewässer in NRW integriert hat und damit die Erhebung belastbarer Emissionsdaten im realen Fahrbetrieb ermöglicht hat.



Dr. Thomas Delschen

Präsident des Landesamtes für Natur,

Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | Ausgangssituation | 9 |
| 2 | Einführung | 11 |
| 3 | Projektschiff | 12 |
| 3.1 | Motor und Antrieb | 14 |
| 3.2 | Abgasreinigungsanlagen auf der „Max Prüss“ | 16 |
| 4 | Vorgehensweise | 18 |
| 4.1 | Allgemeines | 18 |
| 4.2 | Abgasmessprogramm | 18 |
| 4.3 | Messverfahren | 19 |
| 5 | Eingesetzte Messtechnik | 21 |
| 5.1 | Messtechnik für gasförmige Emissionen vor AGN..... | 22 |
| 5.2 | Partikel- und Rußmesstechnik | 27 |
| 5.2.1 | Messtechnik zur Bestimmung der Rußkonzentration..... | 27 |
| 5.2.2 | Messtechnik für gravimetrische Partikelmessung..... | 29 |
| 5.3 | Messtechnik für gasförmige Emissionen nach AGN..... | 31 |
| 5.4 | Weitere Messverfahren | 37 |
| 5.4.1 | Temperaturmessung | 37 |
| 5.4.2 | Messung der Umgebungsdaten | 37 |
| 6 | Ergebnisse | 38 |
| 6.1 | Allgemeines | 38 |
| 6.2 | Leistungsermittlung..... | 38 |
| 6.3 | Betrachtung der einzelnen Messpunkte | 39 |
| 6.3.1 | Konzentrationsverläufe der gasförmigen Emissionen der einzelnen Messpunkte | 40 |
| 6.3.1.1 | Messpunkt 1.620 min ⁻¹ | 40 |
| 6.3.1.2 | Messpunkt 1.456 min ⁻¹ | 41 |
| 6.3.1.3 | Messpunkt 1.280 min ⁻¹ | 43 |
| 6.3.1.4 | Messpunkt 1.008 min ⁻¹ | 44 |
| 6.3.2 | Partikelemissionen..... | 46 |
| 6.3.3 | Rußemissionen..... | 48 |
| 6.3.4 | Reduktionsraten in den einzelnen Messpunkten | 49 |
| 6.4 | Auswertung in Anlehnung an ISO 8178 E3-Zyklus..... | 51 |
| 6.4.1 | Auswertung vor AGN | 51 |
| 6.4.2 | Auswertung nach AGN..... | 51 |
| 6.5 | Ergebnisse für NO ₂ -Emissionen..... | 52 |
| 7 | Diskussion der Ergebnisse | 53 |
| 7.1 | Bewertung der dargestellten Emissionsergebnisse | 53 |
| 7.2 | Ergebnisrelevanz für das “CLINSH“-Projekt..... | 56 |
| 8 | Zusammenfassung | 59 |
| 9 | Literatur | 61 |
| 10 | Partner in CLINSH | 62 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Laborschiff „Max Prüss“ | 12 |
| Abbildung 2: | Antriebsmotor steuerbordseitig MAN D2866 LXE43 | 14 |
| Abbildung 3: | Leistungsdiagramme MAN D2866 LXE43 | 15 |
| Abbildung 4: | Gesamtansicht der neuen Auspuffanlage (Backbordmotor)..... | 16 |
| Abbildung 5: | Datenlogger für Messdatenaufzeichnung | 19 |
| Abbildung 6: | Schematische Darstellung des Messaufbaus | 21 |
| Abbildung 7: | SEMTECH-DS-Messgerät und Systemaufbau | 22 |
| Abbildung 8: | Micro Soot Sensor Type 483 | 27 |
| Abbildung 9: | Funktion und Struktur einer photoakustischen Messzelle | 27 |
| Abbildung 10: | Gravimetrisches Partikelmessgerät Micro PSS..... | 29 |
| Abbildung 11: | Darstellung des Gasflusses im Micro PSS..... | 30 |
| Abbildung 12: | Messsystem Sensors EcoStar mit Flowmeter..... | 31 |
| Abbildung 13: | Messtechnikanordnung vor der AGN (gasförmig und Partikel/Ruß)..... | 36 |
| Abbildung 14: | Messtechnikanordnung bei Messung nach der AGN („End of pipe“ (Gase, Partikel/Ruß und Abgasmassenstrom)) | 36 |
| Abbildung 15: | Leistungskurven, Motordrehzahl..... | 39 |
| Abbildung 16: | CO-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.620 min ⁻¹) | 40 |
| Abbildung 17: | HC-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.620 min ⁻¹)..... | 40 |
| Abbildung 18: | NO _x -Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.620 min ⁻¹) | 41 |
| Abbildung 19: | CO-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.456 min ⁻¹) | 41 |
| Abbildung 20: | HC-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.456 min ⁻¹)..... | 42 |
| Abbildung 21: | NO _x -Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.456 min ⁻¹) | 42 |
| Abbildung 22: | CO-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.280 min ⁻¹) | 43 |
| Abbildung 23: | HC-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.280 min ⁻¹)..... | 43 |
| Abbildung 24: | NO _x -Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.280 min ⁻¹) | 44 |
| Abbildung 25: | CO-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.008 min ⁻¹) | 44 |
| Abbildung 26: | HC-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.008 min ⁻¹)..... | 45 |
| Abbildung 27: | NO _x -Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.008 min ⁻¹) | 45 |
| Abbildung 28: | Partikelprobenfilter vor und nach AGN | 46 |
| Abbildung 29: | Reduktionsraten in den einzelnen Messpunkten..... | 50 |
| Abbildung 30: | Details Messpunkt 1.008 min ⁻¹ | 55 |
| Abbildung 31: | NO _x -Sensor..... | 57 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabelle 1: | Technische Daten der „Max Prüss“ | 13 |
| Tabelle 2: | Technische Daten des Flammenionisationsdetektors (THC-FID) | 23 |
| Tabelle 3: | Spezifikationen der nicht-dispersiven Infrarot-Messbank | 24 |
| Tabelle 4: | Spezifikation der nicht-dispersiven Ultraviolett-Messbank (NDUV) | 25 |
| Tabelle 5: | Spezifikation des elektrochemischen O ₂ -Analysators | 26 |
| Tabelle 6: | Technische Daten des Mikrorußsensors AVL 483 | 28 |
| Tabelle 7: | Spezifizierungen: Sensors EcoStar, Teil 1 | 32 |
| Tabelle 7: | Spezifizierungen: Sensors EcoStar, Teil 2 | 33 |
| Tabelle 7: | Spezifizierungen: Sensors EcoStar, Teil 3 | 34 |
| Tabelle 8: | Spezifikationen des Durchflussmessers | 35 |
| Tabelle 9: | Ergebnisse der Partikelmessung vor AGN | 47 |
| Tabelle 10: | Ergebnisse der Partikelmessung nach AGN | 47 |
| Tabelle 11: | Ergebnisse der Rußmessung vor AGN | 48 |
| Tabelle 12: | Ergebnisse der Rußmessung nach AGN | 48 |
| Tabelle 13: | Reduktionsraten in den einzelnen Messpunkten, Teil 1 | 49 |
| Tabelle 13: | Reduktionsraten in den einzelnen Messpunkten, Teil 2 | 49 |
| Tabelle 14: | E3-Ergebnisse vor AGN | 51 |
| Tabelle 15: | E3-Ergebnisse nach AGN | 51 |
| Tabelle 16: | NO ₂ -Emissionen | 50 |
| Tabelle 17: | ZKR Grenzwerte der Stufe I ab 2002 | 53 |

1 Ausgangssituation

Mit der Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 21.08.2008 über die Luftqualität und saubere Luft für Europa (2008/50/EG) sowie den Richtlinien 2001/81/EG und 2004/107 EG werden EU-weit verbindliche Luftqualitätsziele zur Vermeidung oder Verringerung schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt festgelegt. Hierzu gehören auch verbindliche Zielvorgaben für die Konzentrationen von Luftschadstoffen in Wohngebieten (2008/50/EG), Verordnungen über die maximal zulässigen Emissionen in den einzelnen EU-Mitgliedstaaten (RL(EU) 2016/2284 vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG) und auch verbindliche Emissionsgrenzwerte z.B. für Stickstoffoxide und Partikel (PM₁₀) für Anlagen und Motoren. In der Verordnung (EU) 2016/1628 (NRMM-Verordnung) zu den überarbeiteten „Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte“ sind z.B. auch für die Hauptmotoren (IWP) und Hilfsaggregate (IWA) von Binnenschiffen (IWP) Emissionshöchstgrenzen festgelegt. Diese gelten spätestens ab dem 1.1.2020, allerdings nur für Neubauten oder beim Austausch von Maschinen in älteren Schiffen.

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. Insbesondere in Anrainerstädten zu Flüssen mit großem Schifffahrtsaufkommen ist es notwendig, die Emissionen der Schiffsantriebe näher zu untersuchen und Wege aufzuzeigen, wie die Emissionen der wichtigsten Schadstoffe PM und NO_x/NO₂ durch Verbesserungen an bestehenden Schiffen gesenkt werden können.

Gerade am Rhein mit seinem intensiven Schiffsverkehr spielen diese Emissionen eine wichtige Rolle bei der Luftreinhaltepolitik. Neben den Niederlanden und anderen Rheinanliegerstaaten/Bundesländern ist dieses Thema auch für NRW besonders relevant, da die Grenzwerte der EU-Luftqualitätsrichtlinie für NO₂ (40 µg/m³, Jahresmittelwert) an vielen Messstellen in diesen NRW-Städten überschritten werden.

Für das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) sind Emissionen von Binnenschiffen und deren Auswirkungen auf die Luftqualität seit vielen Jahren ein Thema. Das LANUV hat sich intensiv mit der Abgasnachbehandlung von Dieselmotoren auf Fracht- und Fahrgastschiffen beschäftigt. In einem Pilotprojekt wurde der Einbau eines SCRT-Katalysators und Partikelfilters auf dem Fahrgastschiff "Jan von Werth" durch das LANUV unterstützt. In einem zweiten Projekt wurde eine Öl-Wasser-Emulsionseinspritzung auf einem Frachtschiff installiert. Messkampagnen und technische Beratung wurden mit Unterstützung der "TÜV-Nord Mobilität GmbH & Co KG" durchgeführt. Einige der Ergebnisse sind bereits in technischen Berichten des LANUV veröffentlicht worden. (LANUV-Fachbericht 49 (2013) "Minderung der Feinstaub-, Ruß- und Stickstoffoxidemissionen auf dem Fahrgastschiff "Jan von Werth" durch Nachrüstung eines SCRT-Systems" und LANUV-Fachbericht 77 (2017) "Emissionen des Containerschiffs "MS Aarburg", Auswirkungen der Nachrüstung mit einer Diesel-Wasser-Emulsionsanlage").

Durch die zunehmende Diskussion über den Anteil der verschiedenen Emissionsquellen an der Umweltverschmutzung hat das Thema "Binnenschiffe" immer mehr an Bedeutung gewonnen. Das EU-Life-Projekt "Clean Inland Shipping" („CLINSH“) beschäftigt sich mit der Luftverschmutzung durch Binnenschiffe und technischen Lösungen zur Emissionsreduzierung.

Mit dem "CLINSH"-Projekt ergab sich die Möglichkeit, die Emissionen von Binnenschiffen intensiver zu untersuchen, wobei der Schwerpunkt auf der Suche nach den besten technischen Lösungen zur Verringerung der schiffsbedingten Luftverschmutzung lag. In der ersten Antragsphase von „CLINSH“ und im Rahmen des Erstantrags für das Projekt im Jahr 2015 war geplant, das zum LANUV gehörende Laborschiff „Max Prüss“ mit einer Abgasnachbehandlung (SCRT-Katalysator und Partikelfilter) auszurüsten und am anschließenden kontinuierlichen Messprogramm teilzunehmen.

Leider verzögerte sich der Projektstart, so dass sich das LANUV entschied, die „Max Prüss“ mit einem SCRT-System (Kombination aus einem Partikelfilter und einem nachgeschalteten SCR-Katalysator zur Stickoxidreduktion) von der „TEHAG Deutschland GmbH“ nachzurüsten. Dies geschah vor Beginn des EU-Projekts und wurde aus eigenen Mitteln des LANUV finanziert. Mit der Umrüstung seines Laborschiffes nimmt NRW eine Vorreiterrolle für die deutsche Rheinflotte ein.

Das LANUV beteiligt sich am Arbeitspaket B.3 "Emissionsinventar und Demo-Ergebnisse" mit der nachgerüsteten „Max Prüss“. Das Hauptthema des Projektes ist die Datenerfassung mittels Langzeitüberwachung der Emissionsdaten der Schiffe und die Wirkung der technischen Emissionsminderung, gemessen unter den realen Betriebsbedingungen von Schiffen.

In dem Arbeitspaket werden die Emissionen von insgesamt 41 Binnenschiffen, die mit verschiedenen Emissionsminderungstechnologien ausgerüstet sind, unter realen Betriebsbedingungen untersucht. Die so geschaffene Datenbank soll die Grundlage für die Bestimmung realer Emissionsfaktoren bilden und es den EU-Mitgliedstaaten so ermöglichen, die Auswirkungen verschiedener Maßnahmen zur Emissionsminderung auf die realen Schiffsbetriebs- (Fahr-) Emissionen (RDE, „Real drive Emissions“) der europäischen Flotte zu erkennen. Die für die kontinuierlichen Messungen und die Erfassung der NO_x-Konzentrationen notwendigen Abgassensoren in den Abgassystemen aller am „CLINSH“-Projekt teilnehmenden Schiffe wurden von der Firma "Multronic" installiert.

Die nach der Umrüstung der „Max Prüss“ geplanten Abgasmessungen des TÜV-Nord wurden in das „CLINSH“-Projekt integriert, um die installierte Überwachungstechnik zu validieren. Basierend auf den diskontinuierlichen Messungen des TÜV-Nord unter Verwendung des E3-Zyklus (normalerweise für die Typenzulassung von Schiffsmotoren verwendet) ist es möglich, Emissionsfaktoren für „Max Prüss“ mit und ohne Abgasnachrüstung zu bestimmen.

Am Ende des einjährigen, kontinuierlichen Überwachungszeitraums sollte es möglich sein, zu überprüfen, ob die „Real Drive Emissions“ eine bessere Beurteilung der tatsächlichen Schiffsemissionen erlauben. Ein Vergleich der Ergebnisse des kontinuierlichen Monitorings mit den Faktoren der diskontinuierlichen Messung der E3-Zyklen auf Basis der Ergebnisse von TÜV-Nord-Messungen ist möglich, sobald diese vorliegen.

2 Einführung

Im Oktober 2015 wurde die „Max Prüss“ mit einem SCRT-Abgasnachrüstsystem der "TEHAG Deutschland GmbH" an beiden Hauptmotoren nachgerüstet. Die SCRT-Systeme bestehen aus einem kontinuierlich regenerierenden Wall-Flow-Partikelfilter (2 Filterpatronen) und einem SCR-Katalysator mit einer regelbaren Dosiereinrichtung für die wässrige Harnstofflösung Ad-Blue® zur Reduzierung der NO_x-Emissionen (Beschreibung in Kap. 3.2).

Die Teilnahme der „Max Prüss“ bot die folgenden Vorteile für das „CLINSH“-Projekt: Auf den kommerziellen Fracht- und Tankschiffen, die am „CLINSH“-Projekt teilnehmen, ist es im Allgemeinen sehr schwierig, geeignete Termine für die Installation der richtigen Abgasbehandlungen, Messgeräte und eventuell notwendige technische Änderungen zu vereinbaren. Da das LANUV der Schiffseigner ist, kann es im Rahmen des „CLINSH“-Projekts schnell und einfach auf die „Max Prüss“ zugreifen. Auch die Planung und Durchführung von Installationen und Messkampagnen ist einfach. Das LANUV bot daher dem „CLINSH“-Projekt die Möglichkeit, die vorgesehene Messtechnik bereits im Vorfeld zu installieren und zu testen, bevor diese Technik auf allen anderen teilnehmenden Schiffen installiert werden sollte.

Die Hauptaufgabe des technischen Dienstes der "TÜV-Nord Mobilität GmbH & Co KG" im Projekt war die Überprüfung und Bewertung der Wirksamkeit des Abgasnachrüstsystems bei unbehandelten Abgasen und Auspuffendrohren durch

- Messungen von gasförmigen Schadstoffemissionen und
- Messungen von Ruß- und Partikelemissionen.

3 Projektschiff

Das Laborschiff „Max Prüss“ (Abbildung 1) des LANUV wird zur Überwachung des Zustandes der Fließgewässer in NRW eingesetzt und ist an durchschnittlich 220 Tagen im Jahr auf dem Rhein, den wichtigsten Nebenflüssen sowie den westdeutschen Schifffahrtskanälen unterwegs und legt dabei jährlich mehr als 16.000 Fahrtkilometer zurück. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Daten des Schiffes zusammengestellt.



Abbildung 1: Laborschiff „Max Prüss“. Foto: TÜV-Nord

Tabelle 1: Technische Daten der „Max Prüss“. Quelle: LANUV

| | |
|--|--|
| Eigentümer: | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW |
| Heimathafen: | Essen |
| Bauwerft: | Deutsche Binnenwerften GmbH, Werft Genthin; Bau NR. 152 |
| Kiellegung: | September 1998 |
| Stapellauf: | 07.04. 1999 |
| Ablieferung: | 07.05.1999 |
| Hauptabmessungen: | |
| Länge über Alles: | 33,00 Meter |
| Breite über Alles: | 7,57 Meter |
| Seitenhöhe: | 2,10 Meter |
| Tiefgang: | 1,10 Meter |
| Maschinenanlage: | |
| Antriebsleistung: | 2 x 250 kW (340 PS) |
| Antrieb: | konventionell |
| 2 Schiffs-Diesel-Motoren; MAN Typ D 2866 LXE 43 | |
| Zylinderzahl: | 6 |
| Drehzahl: | 1.800 min ⁻¹ |
| Kühlung: | Wasserkühlung |
| Anlassung: | elektrisch; 24 V, 2-polig |
| 2 Schiffs-Wendeuntersetzungsgetriebe | |
| Typ: | WAF 143L |
| Untersetzung: | 3,522 |
| 2 Propeller | |
| Durchmesser: | 1.000 mm |
| Geschwindigkeit: | 20 km/h |

3.1 Motor und Antrieb

Das Laborschiff „Max Prüss“ verfügt über zwei 6 Zylinder MAN D2866 LXE43 Antriebsmotoren, Baujahr 1998. Die Leistung wird mit je 250 kW/1.800 min⁻¹ auf dem Typenschild angegeben. Der Hubraum der Motoren beträgt 11.967 cm³. Die Motoren besitzen eine rein mechanische Lastregelung und Abgasturboaufladung mit Ladeluftkühlung. Abbildung 2 zeigt den Steuerbordmotor, Abbildung 3 die wichtigsten Leistungsdiagramme. Die Getriebe vom Typ WAF 143L stammen von der Firma Reintjes und untersetzen die Antriebsdrehzahl im Verhältnis 3,522 : 1.



Abbildung 2: Antriebsmotor steuerbordseitig MAN D2866 LXE43

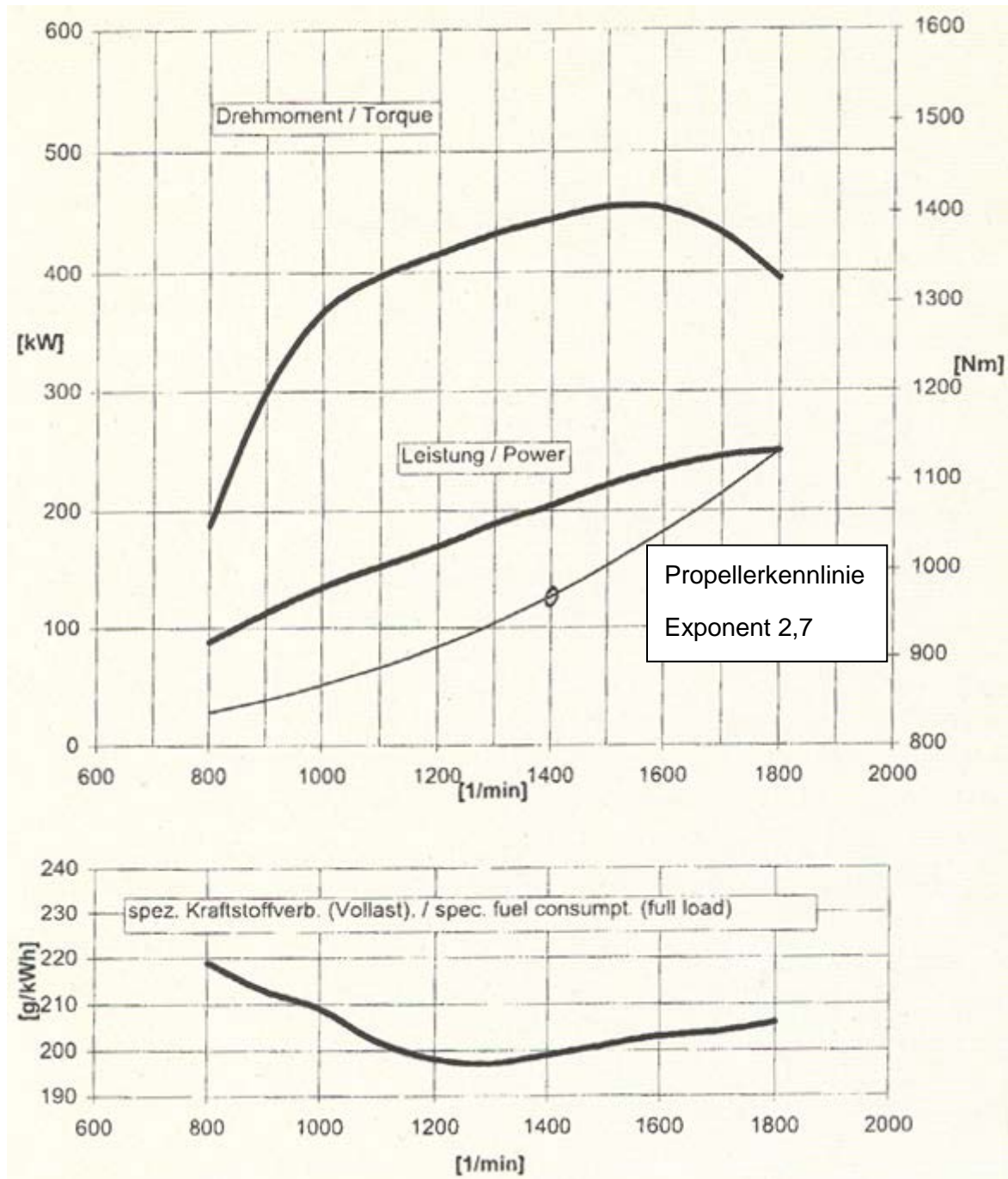


Abbildung 3: Leistungsdiagramme MAN D2866 LXE43

3.2 Abgasreinigungsanlagen auf der „Max Prüss“

Die „Max Prüss“-Motoren wurden mit einem Wall-flow Filter für Partikel und einem von der Firma "TEHAG" entwickelten SCRT-Katalysatorsystem nachgerüstet. Beide Antriebsmotoren der „Max Prüss“ sind mit einem kombinierten Abgasreinigungssystem, bestehend aus je einem CWF-Rußpartikelfilter und einem t-blue NO_x-Reduktionssystem (SCR) ausgestattet. Für den Umbau wurden die vorhandenen Abgasanlagen (Schalldämpfer, Funkenfänger und Rohrleitungen) komplett demontiert. In den so geschaffenen Bauraum wurden die neuen Abgasreinigungskomponenten eingebaut (Abbildung 4).

Der Umbau begann am vorhandenen Kompensator, der direkt hinter dem Turbo montiert ist. Von dort wurde die Rohrleitung an der Außenwand der Backbord- und Steuerbordseite des Maschinenraums verlegt. Die Rohre führen in die Abgaseintrittskollektoren der Rußpartikelfilteranlagen, die jeweils aus zwei Filtermodulen der Größe CWF 1700 bestehen. Alle Filtermodule sind mit einer Kollektorkonstruktion kombiniert und somit als eine Komponente in den jeweiligen Abgastrakt integriert. Die Filterelemente sind mit einer katalytischen Beschichtung zur automatischen Regeneration der gefilterten Partikel beschichtet. Ab einer Abgastemperatur von ca. 220 °C werden die Rußpartikel durch einen Oxidationsprozess regeneriert.

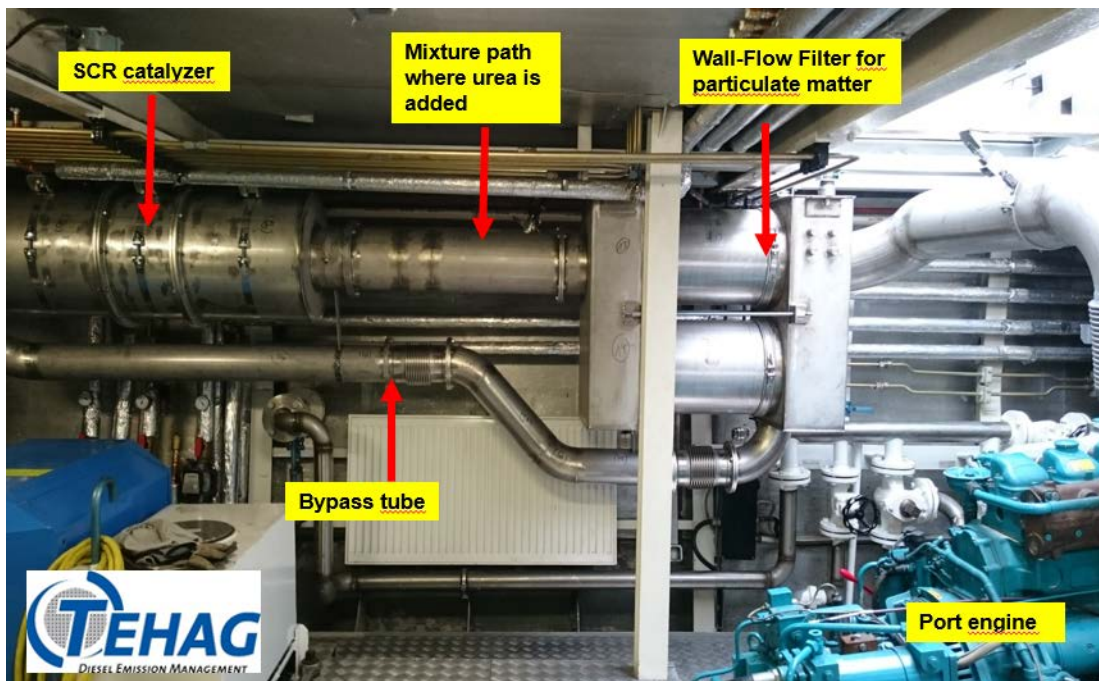


Abbildung 4: Gesamtansicht der neuen Auspuffanlage (Backbordmotor)

Für die Befestigung der Rußpartikelfiltereinheit wurden an der Decke des Motorraums neue Halterungen angebracht. Nach dem Auslasssammler der Rußfilter wurde eine Mischstrecke positioniert, in die der Injektor für die Harnstoffeinspritzung und ein statischer Mischer integriert sind. Der Katalysator selbst besteht aus drei metallischen Trägern, die mit einer Reduktionsbeschichtung versehen wurden. Die Positionen der ursprünglichen Schalldämpfer wurden für die Befestigung der SCR-Katalysatorsysteme verwendet. Nach den SCR-Katalysatorsystemen wurden die Abgasleitungen zum Heck des Schiffes geführt. Durch die Vergrößerung des Rohrdurchmessers auf 219 mm wurden auch die Auspufföffnungen am Heck vergrößert.

Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme wurden in beiden Systemen Bypässe unterhalb der Hauptabgasleitung installiert. Diese wurden an die Unterseite des Einlasskrümmers angeschlossen und mit einem Y-Rohr hinter den SCR-Katalysatoren wieder in das Abgassystem integriert. Der Bypass wird über eine elektrisch und manuell betätigte Klappe geöffnet. Steuerseitig ist es so integriert, dass sich der Bypass bei längerem Rückstau automatisch öffnet. Bei einem Stromausfall können die Klappen auch manuell geöffnet werden.

Die Steuerschränke beider Systeme wurden am Ende des Maschinenraums über dem Rudersystem montiert. Die Harnstoffpumpen und andere Regler wurden zwischen den Schaltschränken positioniert. Im Ruderraum wurde ein 450-Liter-Harnstofftank in einem vorhandenen Freiraum zwischen den Rahmen installiert. Außerdem wurde ein 1000-Liter-IBC-Tank an Deck aufgestellt. Dieser Tank kann als Liefercontainer ausgetauscht werden. Die Besatzung füllt regelmäßig den 450-Liter-Tank im Maschinenraum nach.

Ein Kompressor für die zusätzliche Luftversorgung hat seinen Platz vor der Tankeinheit im Motorraum gefunden. Alle Leitungen für die Strom-, Luft- und Harnstoffversorgung wurden möglichst an der Decke entlang vorhandener Kabelkanäle verlegt. Beide Abgasreinigungssysteme inklusive Bypässe wurden schließlich mit einer hocheffizienten Wärmedämmung verpackt, damit die Temperaturen im System erhalten bleiben und somit eine optimale Regenerationsfähigkeit aller Komponenten gewährleistet ist. Gleichzeitig reduziert die Isolierung die Strahlungswärme im Motorraum.

Alle Demontage- und Montagearbeiten wurden am Liegeplatz der „Max Prüss“ von „TEHAG“-Monteuren durchgeführt.

4 Vorgehensweise

4.1 Allgemeines

Im Vorfeld der Nachrüstung der „Max Prüss“ wurden Messtechnik zur Erfassung von Abgastemperatur und Abgasgegendruck sowie GPS-Messtechnik an einem Motor an Bord installiert und mit einem Datenlogger ausgestattet. Abbildung 5 zeigt das Datenlogger-System. Basierend auf den Ergebnissen dieser Messungen wurde die Abgasnachrüsttechnik von der „TEHAG Deutschland GmbH“ konzipiert, gebaut und an Bord der „Max Prüss“ installiert.

Die für eine Abgasmessung erforderlichen Probenahmestutzen und Messflansche wurden beim Einbau der SCRT-Anlage mit dem Anlagebauer TEHAG abgestimmt und für die Messkampagnen in die Abgasnachbehandlungsanlage integriert. Die Systeminstallation auf der „Max Prüss“ erfolgte im Oktober 2015.

Erhebliche Verzögerungen im „CLINSH“-Projekt führten dazu, dass erst im Jahr 2018 die Monitoring Technik zur Abgasdatensammlung auf der „Max Prüss“ durch die Firma Multronic installiert werden konnte. Die Abgasmessung zur Validierung der Monitoringergebnisse durch TÜV NORD sollte erst nach einer angemessenen Zeit nach Inbetriebnahme des kontinuierlichen Monitorings erfolgen und wurde im November 2018 durchgeführt.

4.2 Abgasmessprogramm

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, da diese sich über die Propellerkennlinie ergeben, 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 ergaben, dass bei den Maschinen der „Max Prüss“ bei Vollast eine Motordrehzahl von maximal 1.620 min^{-1} in den Betriebszuständen nicht überschritten wird. Basierend auf dieser Grundlage und der obigen ISO 8178 wurde folgendes Messprogramm durchgeführt.

Simultane Messungen der gasförmigen Emissionen wurden sowohl vor als auch nach der Abgasnachrüstung an vier verschiedenen Punkten auf der resultierenden Lastkurve durchgeführt:

1.008 min^{-1} , 1.280 min^{-1} , 1.456 min^{-1} und 1.620 min^{-1}

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

Es wurden parallele Reihenmessungen mit dem PAAS-System (Mikrorußsensor AVL 483) zur Erfassung der elementaren kohlenstoffhaltigen Partikelkonzentration sowie gravimetrische Partikelmessungen unter quasistationären Fahrbedingungen mit dem Particulate Sampling System Micro-PSS vor und nach der Abgasnachrüstung durchgeführt.



Abbildung 5: Datenlogger für Messdatenaufzeichnung

4.3 Messverfahren

Zur Ermittlung der Reduktionsraten der Abgasnachbehandlung (AGN) müssen die Rohemissionen des Motors zu den Emissionen im Endrohr der Abgasanlage (Tailpipe) ins Verhältnis gesetzt werden. Für die gasförmigen Emissionen erfolgte dies durch eine simultane Messung der Abgaskonzentrationen vor der AGN (Rohemissionen) und nach der AGN (Tailpipe Emissions) mit zwei Abgasmesssystemen. Für die Partikel- und Rußemissionen stand nur ein Gerät zur Verfügung. Daher konnten die Rohemissionen und die Emissionen am Auspuff nicht gleichzeitig, sondern nur nacheinander gemessen werden. Sie sind damit von der Wiederholgenauigkeit der Messpunkteinstellung abhängig. Es ist hierbei wichtig, am Motor eine genau gleiche Messpunkteinstellung herzustellen, damit die Messergebnisse vergleichbar sind.

Um absolute Emissionsmassen bestimmen zu können, muss der Abgasmassenstrom in den jeweiligen Messpunkten bekannt sein. Grundsätzlich sind drei unterschiedliche Verfahren möglich: 1. Direkte Messung des Abgasmassenstroms; 2. Berechnungen mit Kenntnis des

genauen Kraftstoffverbrauchs und 3. Berechnungen anhand der genauen angesaugten Luftmasse. In diesem Projekt wurde der Abgasmassenstrom direkt mit Hilfe eines Massenstrommessrohres (EFM) ermittelt.

Um leistungsbezogene Emissionsergebnisse ermitteln zu können, ist die Kenntnis der Motorleistung an den jeweiligen Messpunkten erforderlich. Auch hier steht eine Vielzahl von Methoden zur Bestimmung der Motorleistung zur Verfügung. Eine Methode zur Messung der Motorleistung wäre z.B. die Bestimmung des Drehmoments an der Antriebswelle mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen. Nachteile dieser Methode sind der hohe Aufwand für die Messstreifenapplikation auf der Propellerwelle, die Schwierigkeit der Kalibrierung und ein unbekannter Einflussfaktor aufgrund des Getriebewirkungsgrades. Für moderne, elektronisch gesteuerte Motoren besteht noch die Möglichkeit, die aktuelle Motorleistung aus den Steuergerätedaten (ECU-Daten) zu bestimmen. Dieses erfordert einen Zugriff auf das Steuergerät über eine bekannte Schnittstelle. Zudem muss sichergestellt werden, dass die Daten aus dem Steuergerät validiert sind.

Die Motoren der „Max Prüss“ sind rein mechanisch geregelt, so dass die Methode über die Motorsteuergerätedaten nicht anwendbar ist. Aus diesem Grunde wurde zur Bestimmung der Leistungsdaten auf ein drittes Verfahren zurückgegriffen. Wie bereits erwähnt, wird dem Motor der Lastzustand durch den Propeller aufgeprägt. Der Leistungsbedarf bei einer bestimmten Drehzahl kann aus der Leistungskurve des Propellers ermittelt werden (siehe Abbildung 3).

Unter realen Antriebsbedingungen wird dieser Leistungsbedarf noch von Faktoren wie Wasserstand, Strömung, Ruderlage usw. beeinflusst. Diese Ungenauigkeiten bei der Leistungsbestimmung sind für die Bestimmung der Umsatzraten des SCR-Katalysators irrelevant, da die gasförmigen Emissionen gleichzeitig für Roh- und Abgas bestimmt werden. Lediglich bei der Bestimmung der Partikelemissionen hat die Reproduzierbarkeit der Lasteinstellung einen Einfluss auf das Ergebnis. Auch die Angaben der leistungsbezogenen Abgasemissionen unterliegen der beschriebenen Unsicherheit.

Da der Motor der „Max Prüss“ über seine Reglereinstellungen an der Einspritzpumpe seine Nenndrehzahl von 1.800 min^{-1} nicht erreicht, kann nur eine Maximaldrehzahl von 1.620 min^{-1} realisiert werden. Daher wird der Abgastest auf die oben benannten vier Drehzahlen definiert. Über die Propellerkurve wird mit einem Exponenten von 2,7, wie in den Motorleistungsdaten dokumentiert, der Leistungsbedarf für die jeweilige Drehzahl ermittelt und für die Berechnung der leistungsbezogenen Ergebnisse verwendet.

5 Eingesetzte Messtechnik

Zur Erfassung der gasförmigen Emissionen wurden simultan vor dem Abgasnachbehandlungssystem und im Endrohr der Abgasanlage Messungen durchgeführt. Gleichzeitig wurde über ein Messsystem der Abgasmassenstrom während der Messung bestimmt. Über die simultane Messung der gasförmigen Emissionen kann neben der Bestimmung der absoluten Emissionsmassen vor und nach der Abgasnachbehandlung auch direkt die Konvertierungsrate des SCR-Katalysators bestimmt werden. Die Ermittlung der Partikel- und Rußemissionen erfolgte nicht simultan, da die entsprechende Messtechnik nicht doppelt verfügbar ist. Hier wurde eine zweifache Vermessung der entsprechenden Lastpunkte mit einer Messtechnik-ordnung jeweils vor und nach der Abgasnachbehandlung durchgeführt.

In den folgenden Kapiteln erfolgt eine detaillierte Beschreibung der für die einzelnen Parameter verwendeten Messtechnologien. Eine schematische Darstellung des Messaufbaus ist in Abbildung 6 dargestellt.

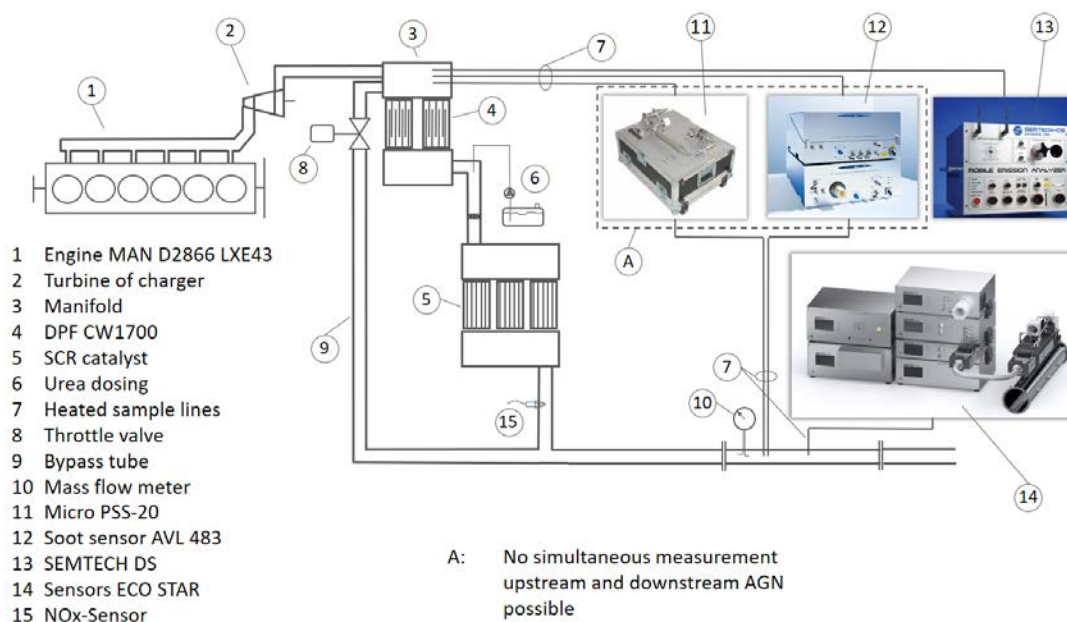


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Messaufbaus

5.1 Messtechnik für gasförmige Emissionen vor AGN

Für die Messung der gasförmigen Komponenten wurde das SEMTECH-DS der Firma Sensors benutzt. Mit Ausnahme des NO_x -Analyseurs 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 -Analyseur 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 (PC 104) 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. Die Tabelle 2 bis Tabelle 5 geben eine Übersicht über die Spezifikationsdaten der verwendeten Analyseuren. 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.

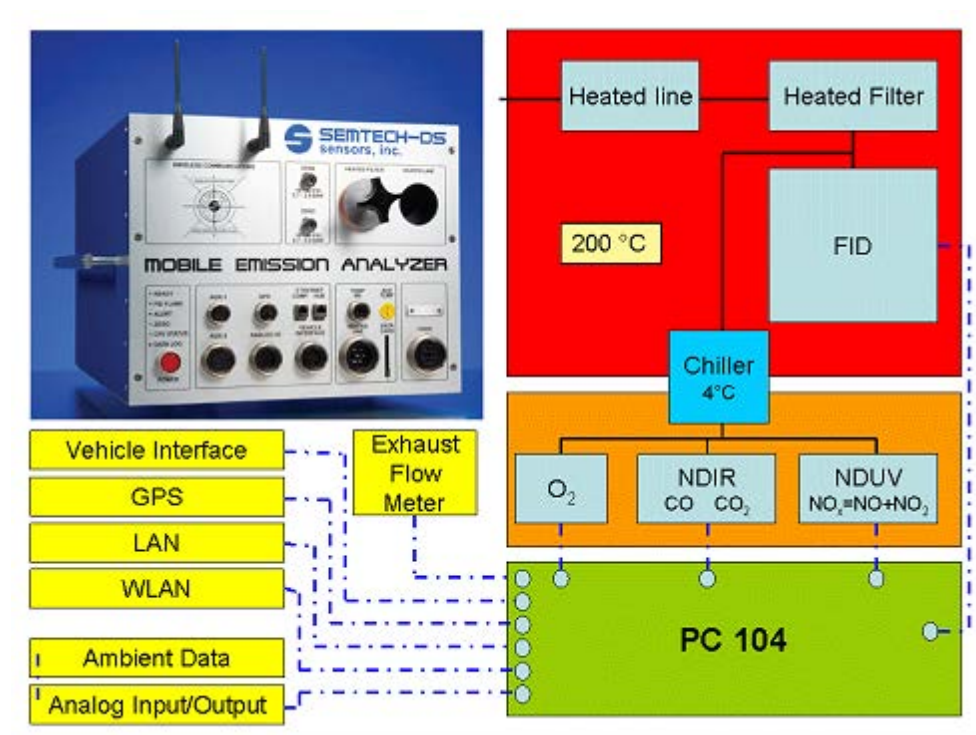


Abbildung 7: SEMTECH-DS-Messgerät und Systemaufbau. Quelle: Sensors

Die zum Betrieb des Messsystems notwendigen Gase wurden 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 Aufwärm- und Vorbereitungszeit zu rechnen. Am Ende dieser Vorbereitung steht die Kalibrierung des Systems an. Diese wurde vor und nach jeder Messung durchgeführt.

Tabelle 2: Technische Daten des Flammenionisationsdetektors (THC-FID)

| 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 |

Tabelle 3: Spezifikationen der nicht-dispersiven Infrarot-Messbank

| 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 | 0,001% | 0,01% |
| Linearity | ± 1,0 % of reading or 20 ppm whichever is greater | ± 1,0 % of reading or ± 0,01 % whichever is greater | ± 1,0 % of reading or ± 0,05 % whichever is greater |
| Repeatability | ± 1,0 % of reading or 20 ppm whichever is greater | ± 1,0 % of reading or ± 0,01 % whichever is greater | ± 1,0 % 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 8 hrs |
| 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 |

Tabelle 4: Spezifikation der nicht-dispersiven Ultraviolett-Messbank (NDUV)

| | 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 hrs |
| Warm up time | 45 minutes | 45 minutes |
| Response time | T90 ≤ 2 seconds | T90 ≤ 2 seconds |
| Flow rate | 3 LPM | 3 LPM |
| Data rate | Up to 2 Hz, configurable | Up to 2 Hz, configurable |
| Operating temperature | 5 to 50 °C | 5 to 50 °C |

Tabelle 5: Spezifikation des elektrochemischen O₂-Analysators

| | O ₂ |
|-----------------------|--|
| Range of Measurement | 0 to 25 % |
| Accuracy | ± 2 % of reading or ± % 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 |
| Response time | T90 ≤ 6 seconds |
| Flow rate | 0,5 to 3 LPM |
| Data rate | Up to 2 Hz, configurable |
| Operating temperature | 5 to 50 °C |

5.2 Partikel- und Rußmesstechnik

5.2.1 Messtechnik zur Bestimmung der Rußkonzentration

Zur Messung der Partikelemissionen (elementarer Kohlenstoff) vor und auch nach der AGN wurde der Micro Soot Sensor 483 der Firma AVL eingesetzt. Abbildung 8 zeigt das PAAS-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 6 sind die Spezifikationen des Messgerätes aufgeführt.



Abbildung 8: Micro Soot Sensor Type 483. Quelle: AVL

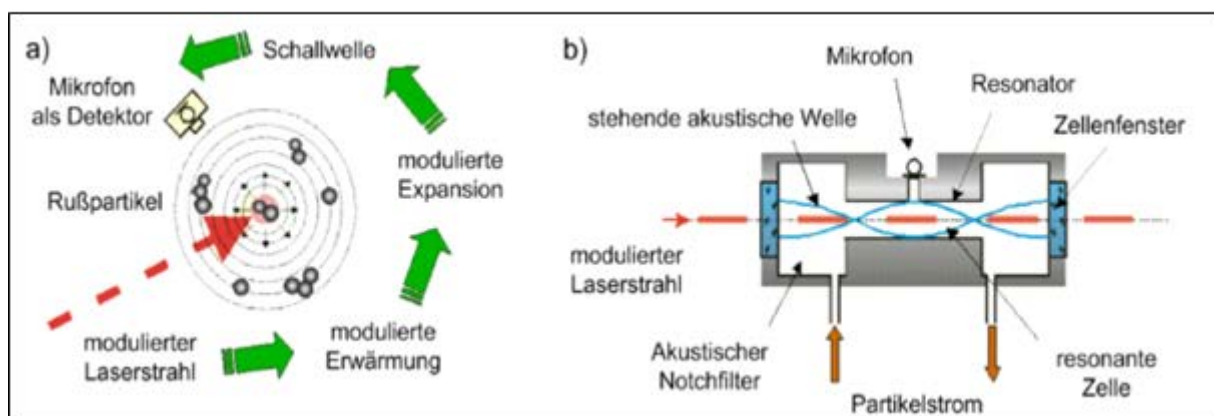


Abbildung 9: Funktion und Struktur einer photoakustischen Messzelle. Quelle: AVL

Tabelle 6: Technische Daten des Mikrorußsensors 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: | 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 |

5.2.2 Messtechnik für gravimetrische Partikelmessung

Die Gravimetrie ist das vom Verordnungsgeber vorgeschriebene Messverfahren für die Bestimmung der Partikelemission aus Dieselmotoren. Die emittierte Partikelmasse, die während eines definierten Testzyklus oder einer Prüfstufe auf einem Filterpapier abgeschieden wird, wird bestimmt. Dieses Messverfahren wurde bei Messungen vor und nach der AGN verwendet.

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



Abbildung 10: Gravimetrisches Partikelmessgerät Micro PSS. Quelle: Control Sistem

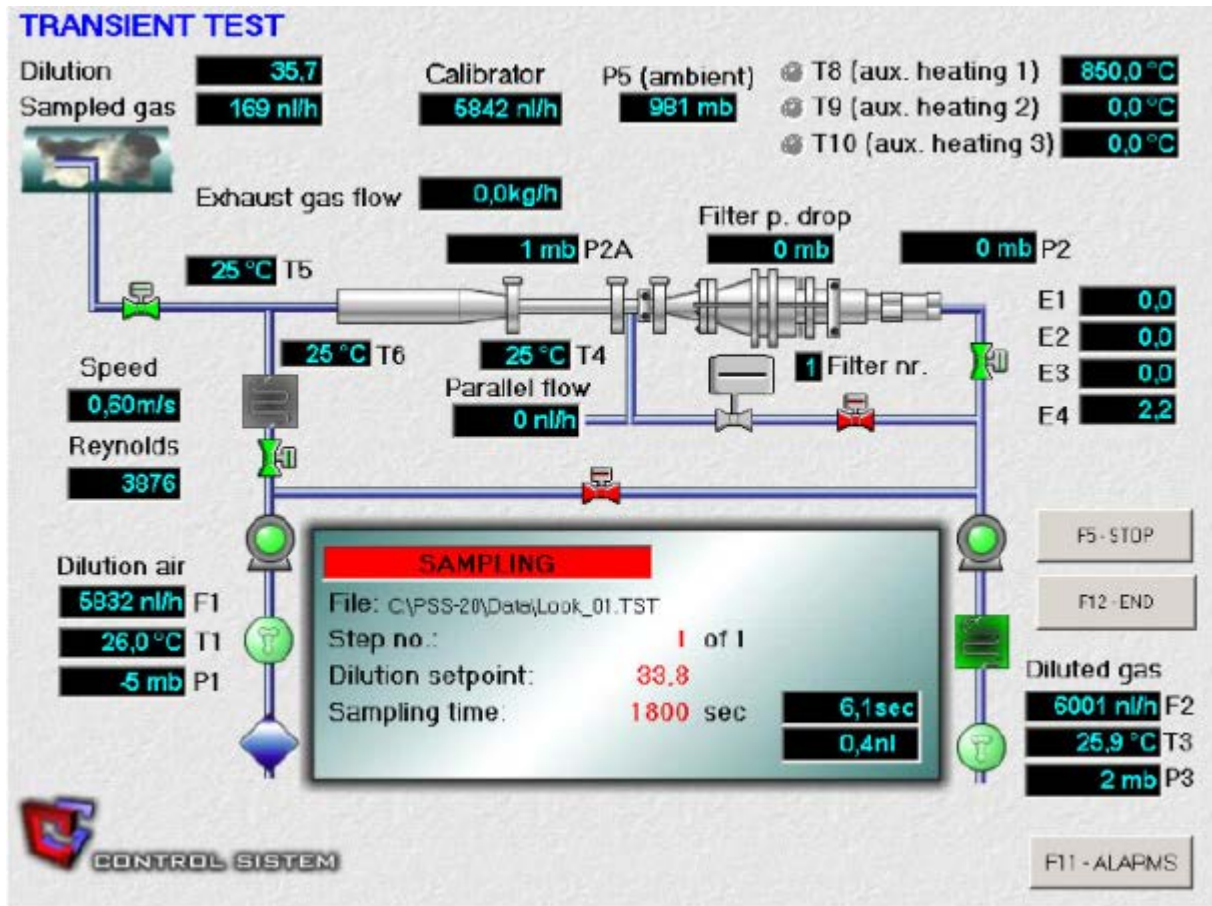


Abbildung 11: Darstellung des Gasflusses im Micro PSS. Quelle: Control System

5.3 Messtechnik für gasförmige Emissionen nach AGN

Zur Messung der gasförmigen Emissionen nach der AGN wurde das System EcoStar, welches ebenfalls von der Firma Sensors stammt, benutzt. Es verwendet die gleichen analytischen Prinzipien wie das SEMTECH-DS. Abbildung 12 zeigt das Messsystem und Tabelle 7 gibt Auskunft über die technischen Spezifikationen. Tabelle 8 zeigt die technischen Spezifikationen der unterschiedlichen Flowmetergrößen. Bei der Messung auf der „Max Prüss“ wurde ein 5“-Rohr verwendet. In den Abbildungen 13 und 14 ist die Anordnung der Messtechnik fotografisch dokumentiert.



Abbildung 12: Messsystem Sensors EcoStar mit Flowmeter. Quelle: Sensors

Tabelle 7: Spezifizierungen: Sensors EcoStar, Teil 1

| ANALYTICAL SPECIFICATIONS | | |
|--------------------------------|---|--|
| Parameter | CO | CO ₂ |
| Max Range (Full Scale) | 8% vol. | 18% vol. |
| Min. Span to meet Requirements | 0.5% | 6% |
| Resolution | 10 ppm | 0.01 % vol. CO ₂ |
| Linearity | $ x_{min} \times (a_1 - 1) + a_0 \leq 0.5\% \text{ of span}$ Slope a_1 between 0.99 and 1.01 Standard Error of Estimates (SEE) $\leq 1\% \text{ of span}$ Coefficient of Determination $r^2 \geq 0.998$ | |
| Accuracy | $\leq \pm 2\% \text{ of reading or } \leq \pm 0.3\% \text{ of full scale, whichever is larger}$ As low as $\pm 50 \text{ ppm}$ As low as $\pm 0.1\% \text{ vol. CO}_2$ | |
| Precision | $\leq 1\% \text{ of span}$ | |
| Repeatability | $\leq 2\% \text{ of point or } \leq \pm 1\% \text{ of span, whichever is greater}$ | |
| Noise | $\leq 2\% \text{ of span}$ | |
| Zero Drift (Over 1 hour) | $\leq \pm 50 \text{ ppm}$ | $\leq \pm 0.1\% \text{ vol.}$ |
| Span Drift (over 8 hrs) | $\leq \pm 2\% \text{ of span value or}$ $\leq \pm 20 \text{ ppm, whichever is greater}$ | $\leq \pm 2\% \text{ of span value or}$ $\leq \pm 0.1\% \text{ vol., whichever is greater}$ |

Tabelle 7: Spezifizierungen: Sensors EcoStar, Teil 2

| NOx ANALYTICAL SPECIFICATIONS | | |
|---|--|-----------------|
| Parameter | NO | NO ₂ |
| Max Range (Full Scale) | 0 to 3000 ppm | 0 to 1000 ppm |
| Min. span to meet requirements | 300 ppm | 300 ppm |
| Resolution | 0.1 ppm | 0.1 ppm |
| Linearity | $ x_{\min} \times (a_1 - 1) + a_0 \leq 0.5\% \text{ of span}$ Slope a_1 between 0.99 and 1.01 Standard Error of Estimates (SEE) $\leq 1\% \text{ of span}$ Coefficient of Determination $r^2 \geq 0.998$ | |
| Accuracy | $\leq \pm 2\% \text{ of reading or } \leq \pm 0.3\% \text{ of full scale, whichever is larger}$ | |
| Repeatability | $\leq 2\% \text{ of point or } \leq \pm 1\% \text{ of span, whichever is greater}$ | |
| Precision | $\leq 1\% \text{ span}$ | |
| Noise | $\leq 2\% \text{ of span}$ | |
| Zero Drift | $\leq 4 \text{ ppm / hour}$ with $\Delta t \leq 10^\circ\text{C}$ and using purified N ₂ as zero gas | |
| Span Drift | $\leq \pm 2\% \text{ of span value}$ with $\Delta t \leq 10^\circ\text{C}$ | |
| Rise Time (T ₁₀₋₉₀) | $\leq 2.5 \text{ seconds}$ | |
| System Response Time (T ₀₋₉₀) | $\leq 10 \text{ sec with rise time } \leq 2.5 \text{ seconds}$ | |
| Data Rate | 5 Hz | |
| Sample Flow rate | 1.5 l/min | |

Tabelle 7: Spezifizierungen: Sensors EcoStar, Teil 3

| Gas | THC |
|----------------------------|---|
| Measuring ranges | freely adjustable |
| Smallest measurement range | 0 - 90 ppm C ₁ |
| Largest measurement range | 0 - 30,000 ppm C ₁ |
| Accuracy | ± 1% of reading, or ±0.3% F.S. (± 1% F.S. for lowest measurement range) |
| Linearity | Intercept ≤ 0.5% of range (1% for lowest range) 0.990 ≤ Slope ≤ 1.010 SEE ≤ 1.0% of range R ² ≥ 0.998 |
| Repeatability | ± 1% of reading |
| Zero Drift | ± 1% F.S. in 24 hr |
| Analyzer Response Time | T ₉₀ < 2.5 second |
| System Response Time | T ₉₀ < 3.5 second |
| Gas Requirements | |
| Fuel | He/H ₂ |
| Fuel consumption | 150 ml/min |
| Span Gas | C ₃ H ₈ |
| Span Gas Consumption | 500 ml/min |
| Zero Gas | N ₂ or air |
| Zero Gas Consumption | 500 ml/min |

Tabelle 8: Spezifikationen des Durchflussmessers

| HTF MODULE SPECIFICATIONS | | | | | | | | | |
|---|---|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Exhaust temperature range | -5 to 700°C | | | | | | | | |
| Exhaust temperature accuracy | ± 1% of reading or ± 2°C, whichever is greater | | | | | | | | |
| Flow measurement linearity | $ x_{\min} \times (a_1 - 1) + a_0 \leq 1\% \text{ of max}$ Slope a_1 between 0.99 and 1.01 Standard Error of Estimates (SEE) ≤ 1% of max. Coefficient of Determination $r^2 \geq 0.990$ | | | | | | | | |
| 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 <small>(T₉₀ - T₁₀)</small> | ≤ 2.5 seconds; synchronized to match rise time of gaseous analyzers | | | | | | | | |
| Data acquisition rate | 5 Hz | | | | | | | | |
| Resolution | 0.1 kg/hr | | | | | | | | |
| Power requirements | 12 VDC | | | | | | | | |
| Communications | RS 232 | | | | | | | | |
| Control module dimensions W x D x H | 36 x 18 x 10 cm 14.2 x 7.0 x 4.0 in | | | | | | | | |
| Control module weight | 4kg (9 lbs) | | | | | | | | |
| Box dimensions W x D x H | 38.4 x 14.5 x 8.4 1 cm 15.1 x 5.3 x 3.3 Inches | | | | | | | | |
| Flow tube dimensions | OD X L (mm) | 25 x 521 | 38 x 521 | 51 x 521 | 64 x 648 | 76 x 648 | 102 x 648 | 127 x 762 | 152 x 914 |
| | OD X L (in) | 1.0 x 20.5 | 1.5 x 20.5 | 2.0 x 20.5 | 2.5 x 25.5 | 3.0 x 25.5 | 4.0 x 25.5 | 5.0 x 30 | 6.0 x 36 |
| Flow tube weight | Kg (lbs) | 4.4 (9.6) | 5.7 (12.6) | 8.0 (17.6) | 8.4 (18.6) | 8.9 (19.6) | 10.3 (22.6) | 11.6 (25.6) | 13.0 (28.6) |

| FLOW RATES | | | | |
|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Temp | 100°C | | 400°C | |
| | Min Flow (kg/hr) | Max Flow (kg/hr) | Min Flow (kg/hr) | Max Flow (kg/hr) |
| Nominal Tube Diameter (in.) | | | | |
| 1 | 6.9 | 85.0 | 10.4 | 64.0 |
| 1.5 | 10.9 | 276.0 | 16.4 | 208.0 |
| 2 | 15.8 | 535.0 | 23.9 | 402.0 |
| 2.5 | 18.9 | 890.0 | 28.4 | 670.0 |
| 3 | 22.5 | 1250.0 | 34.0 | 930.0 |
| 4 | 30.7 | 2080.0 | 46.3 | 1550.0 |
| 5 | 38.6 | 3115.0 | 58.2 | 2345.0 |
| 6 | 46.2 | 4005.0 | 69.6 | 3015.0 |



Abbildung 13: Messtechnikanordnung vor der AGN (gasförmig und Partikel/Ruß)



Abbildung 14: Messtechnikanordnung bei Messung nach der AGN („End of pipe“ (Gase, Partikel/Ruß und Abgasmassenstrom))

5.4 Weitere Messverfahren

5.4.1 Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung wurden ausschließlich 3 mm Einschraub-Thermoelemente NiCr-Ni des Typ K verwendet. Der Messbereich dieser Thermoelemente wird seitens des Thermoelementeherstellers von -90°C bis +1.370°C angegeben. Durch unterschiedliche Fühlerlängen können die notwendigen Positionierungen im Abgasstrom realisiert werden.

5.4.2 Messung der Umgebungsdaten

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

6 Ergebnisse

6.1 Allgemeines

Die Messungen der Emissionsdaten für den Steuerbordmotor der „Max Prüss“ wurden am 22.11.2018 und am 23.11.2018 durchgeführt. Aufgrund der Niedrigwassersituation auf dem Rhein konnte die Messfahrt nicht vom normalen Liegeplatz der „Max Prüss“ aus gestartet werden. Der Ersatzliegeplatz liegt unmittelbar an der Meidericher Schleuse des Duisburger Hafens. Am 22.11.2018 wurden erste Messungen im E3-Zyklus mit Partikel- und Rußentnahme vor der Abgasnachbehandlung durchgeführt. Am 23.11.2018 wurde eine zweite Messkampagne gefahren, bei der die Partikel- und Rußentnahme im Abgasendrohr platziert war. Für Teile der Messungen ist eine Bergfahrt auf dem Rhein zwingend notwendig, da die obersten Drehzahlpunkte bei einer Talfahrt zu überhöhten Geschwindigkeiten führen würden. Eine Vermessung im Binnenkanalnetz verbietet sich aus ähnlichen Gründen, da für die obersten Messdrehzahlen die erlaubte Geschwindigkeit überschritten wird.

6.2 Leistungsermittlung

Zur leistungsbezogenen Auswertung der Messergebnisse muss die abgegebene Leistung des Motors bestimmt werden. Die Ermittlung der Leistung erfolgt, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, über die bekannten Daten des Schiffspropellers. In Abbildung 15 sind die sich ergebenden unterschiedlichen Leistungskurven dargestellt. Die obere, blaue Kurve stellt die Volllastkurve des verwendeten Motors dar. Aus dessen Leistungsdaten ergibt sich eine Sollwertkurve für einen E3-Test gemäß der Norm ISO 8178, wie sie mit den quadratischen Markierungssymbolen dargestellt ist. Die Reglereinstellungen des Steuerbordmotors lassen nur eine Maximaldrehzahl von 1.620 min^{-1} zu, so dass dieser Punkt bei einer Realmessung als maximaler Drehzahl- und Lastpunkt anzusehen ist.

Bestimmt man für diesen Punkt mit den bekannten Propellerdaten die Leistung und ermittelt dann die Messpunkte für einen E3 Test gemäß ISO 8178, ergibt sich die graue, mit den Dreiecken gekennzeichnete Kurve. Die mit den kreisrunden Markierungssymbolen dargestellte Kurve zeigt die real gefahrenen Drehzahlen mit den aus der realen Propellerkurve bestimmten Leistungen. Die bis hierhin ermittelten Leistungen stellen den Leistungsbedarf am Propeller dar. Da zwischen Propellerwelle und Motor noch das Wendegetriebe verbaut ist, muss für eine näherungsweise Bestimmung der effektiven Motorleistung noch der Wirkungsgrad des Wendegetriebes abgeschätzt werden. Dieser wird mit 97% angenommen. Hieraus ergeben sich dann die für die Berechnung herangezogenen Motorleistungen.

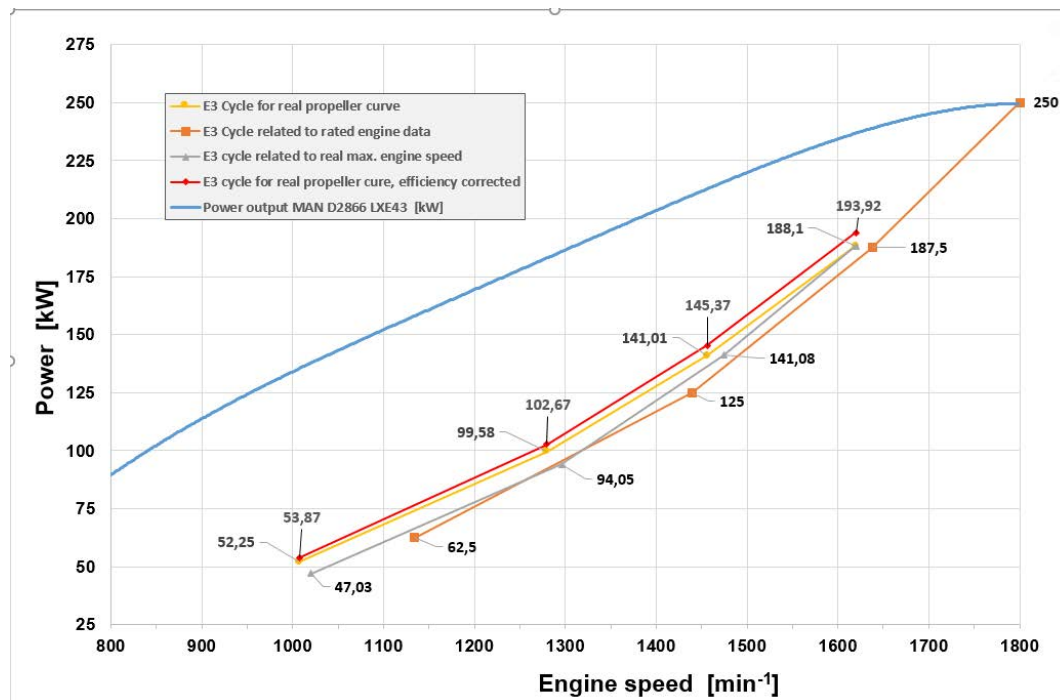


Abbildung 15: Leistungskurven, Motordrehzahl

6.3 Betrachtung der einzelnen Messpunkte

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 8178. Für die Partikelmessungen werden die Mittelwerte aus den Wiederholungsmessungen pro Messpunkt und Messsituation (vor und nach der AGN) zur Ermittlung des Gesamtergebnisses herangezogen.

6.3.1 Konzentrationsverläufe der gasförmigen Emissionen der einzelnen Messpunkte

6.3.1.1 Messpunkt 1.620 min⁻¹

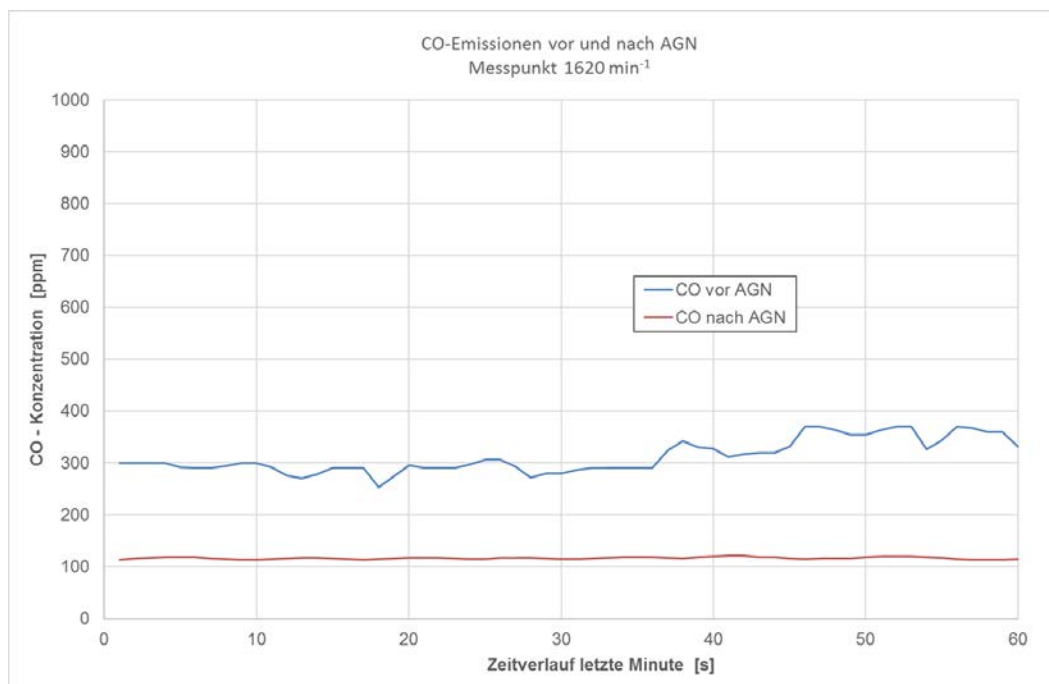


Abbildung 16: CO-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.620 min⁻¹)

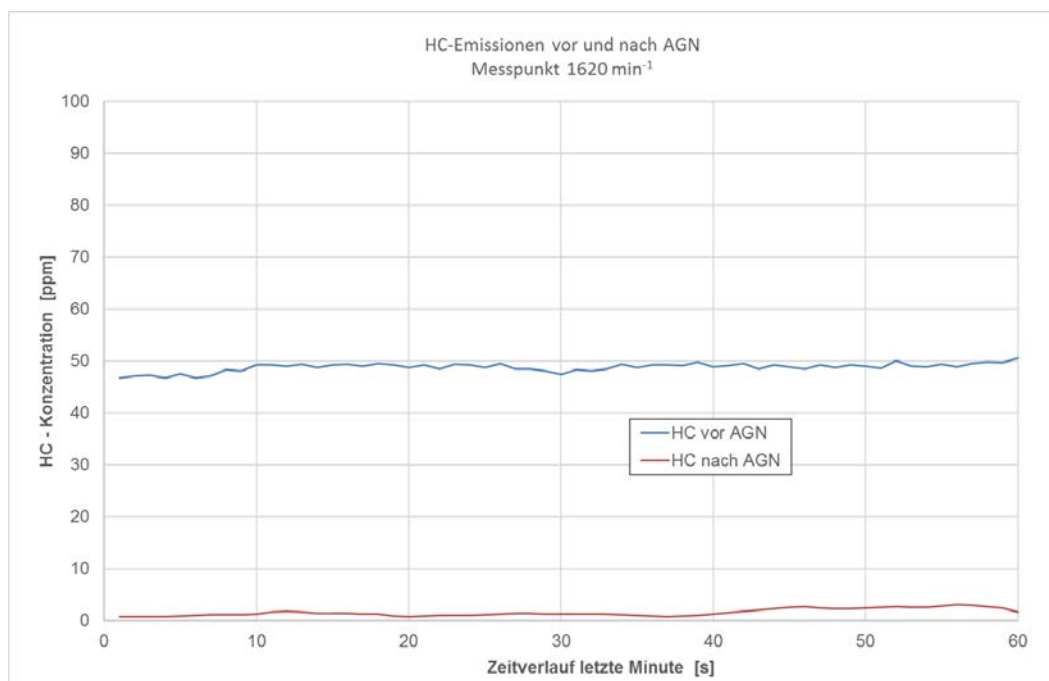


Abbildung 17: HC-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.620 min⁻¹)

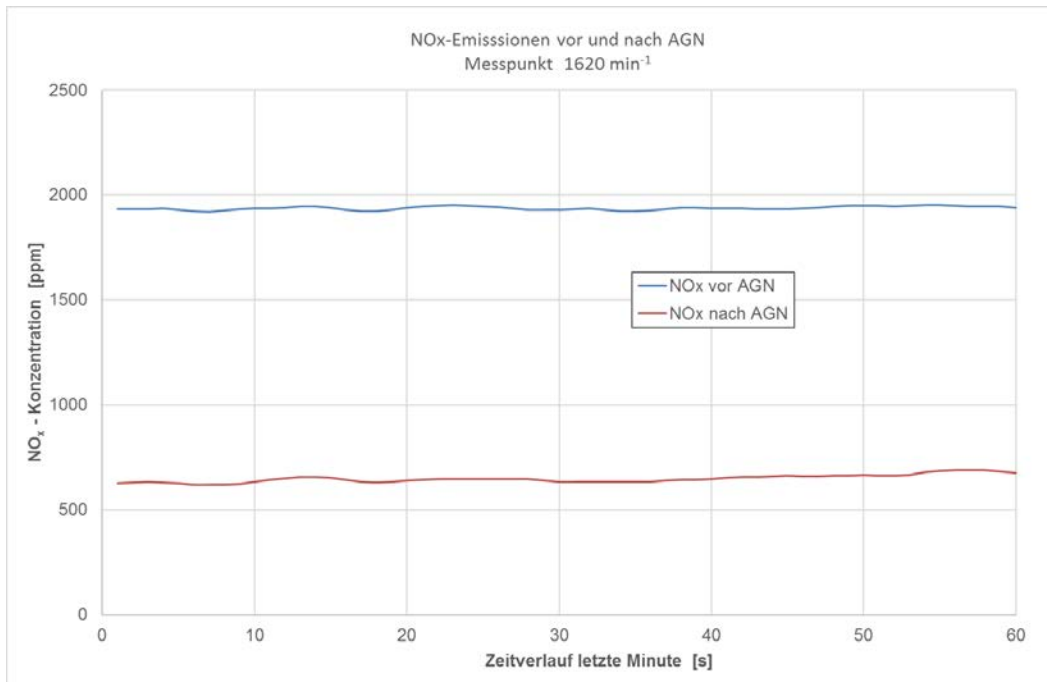


Abbildung 18: NO_x-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.620 min⁻¹)

6.3.1.2 Messpunkt 1.456 min⁻¹

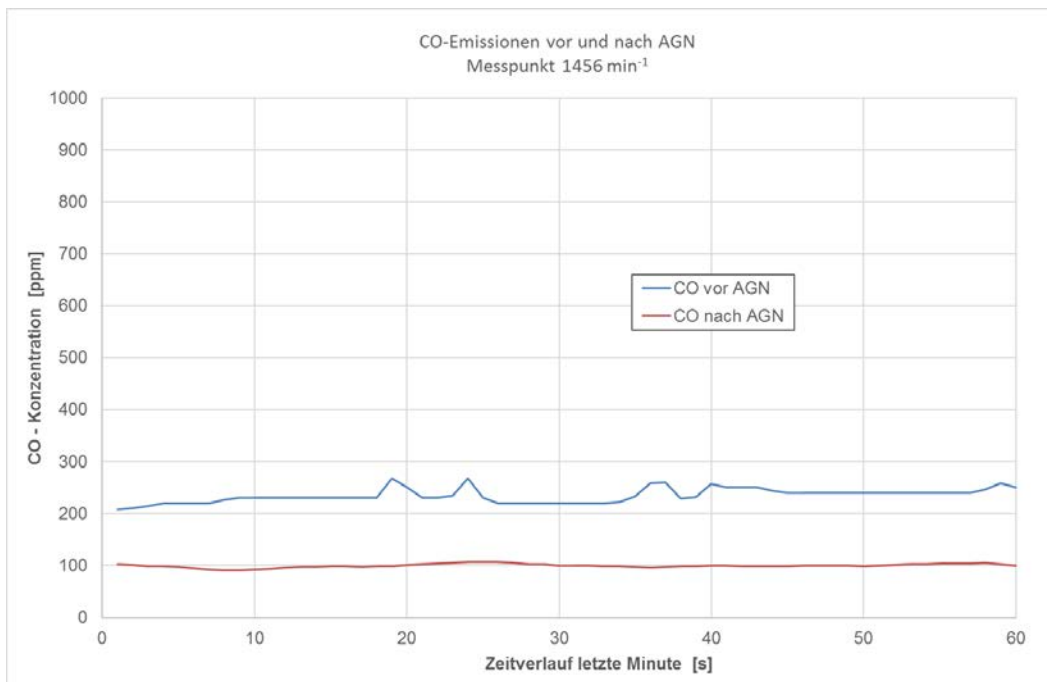


Abbildung 19: CO-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.456 min⁻¹)

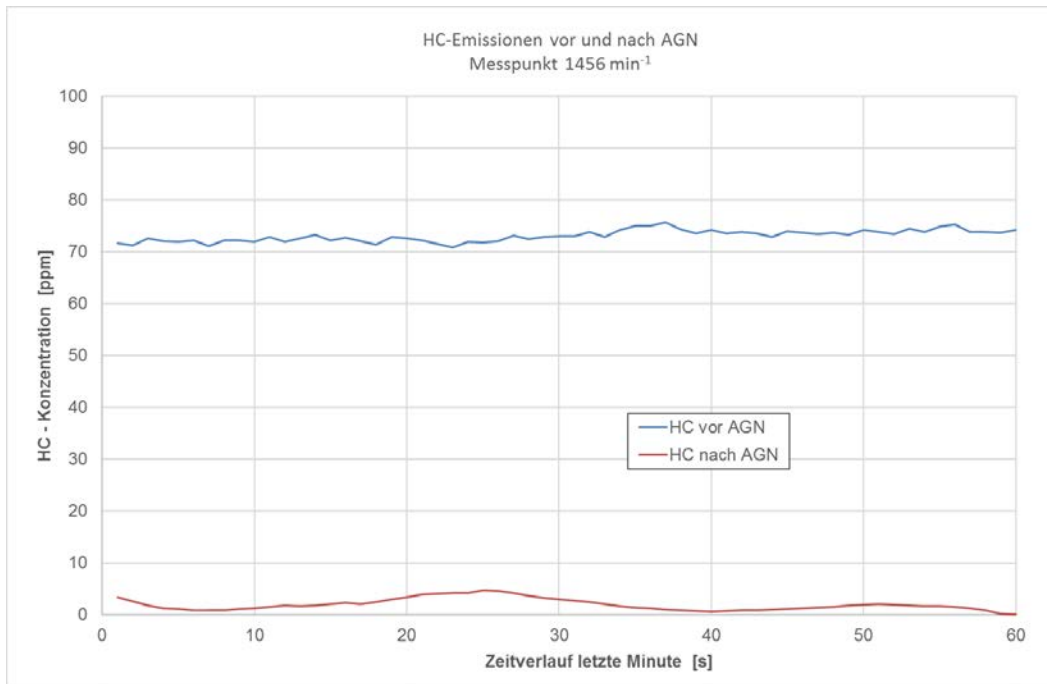


Abbildung 20: HC-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.456 min⁻¹)

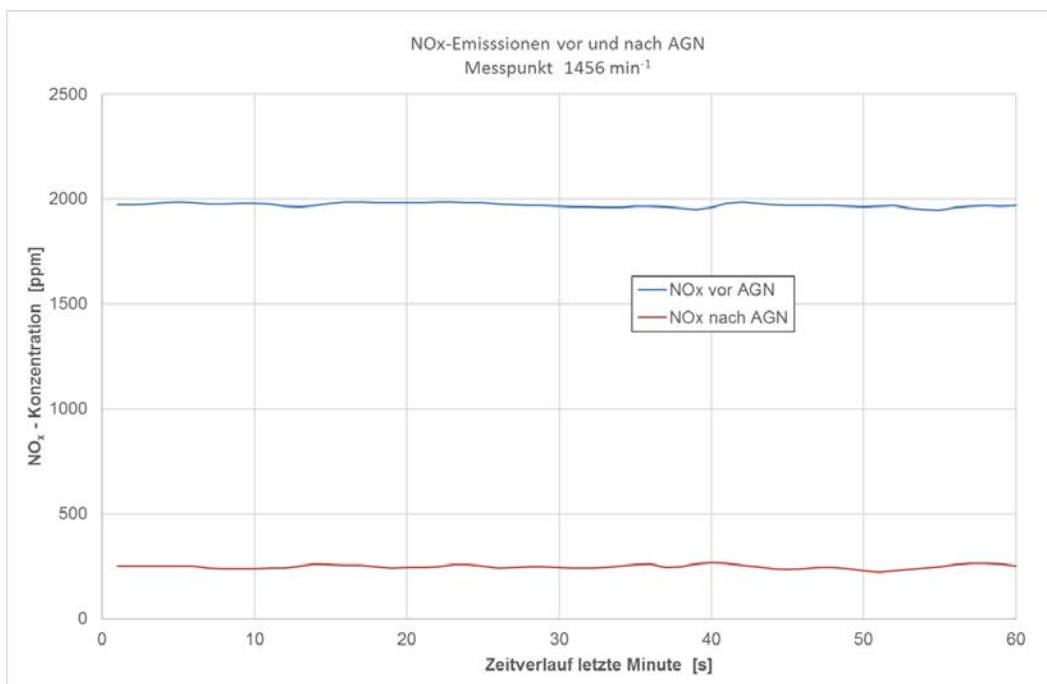


Abbildung 21: NO_x-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.456 min⁻¹)

6.3.1.3 Messpunkt 1.280 min⁻¹

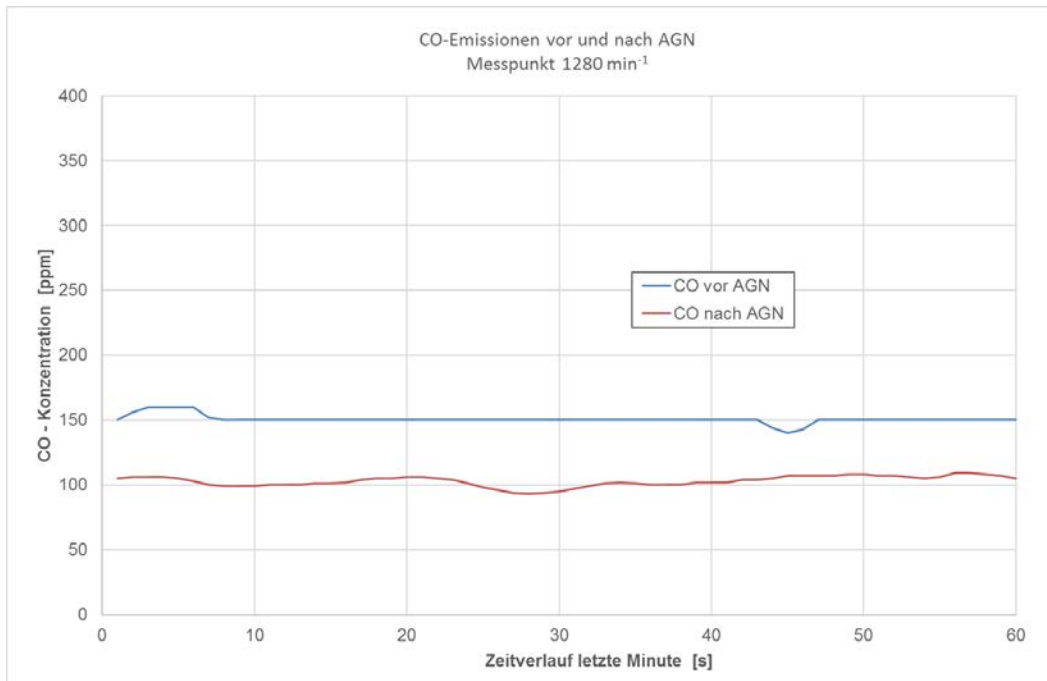


Abbildung 22: CO-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.280 min⁻¹)

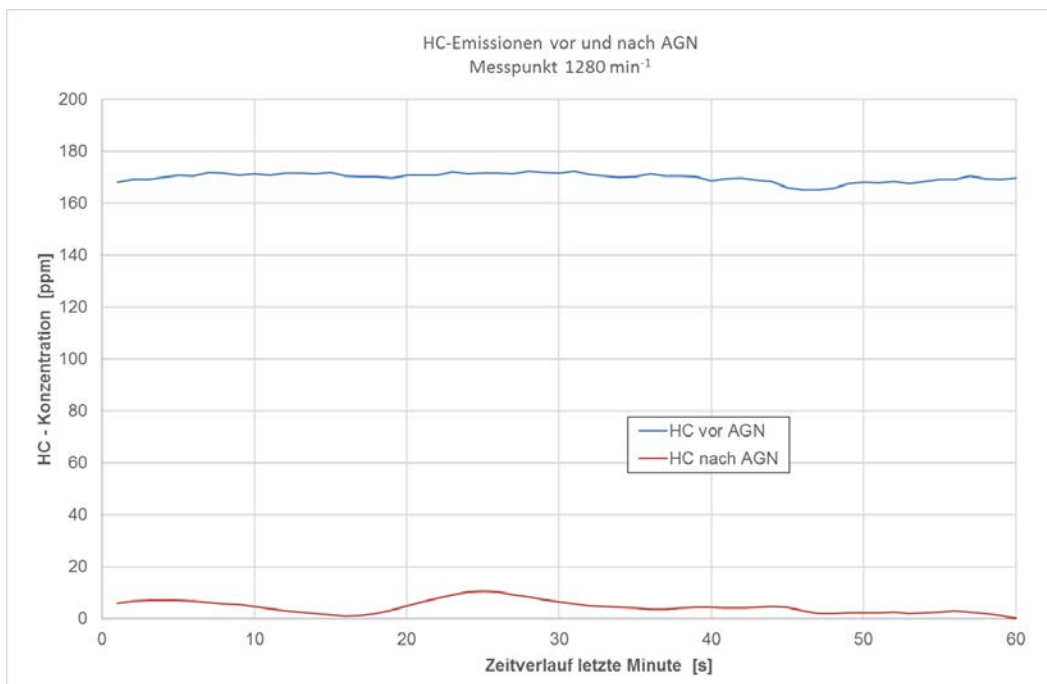


Abbildung 23: HC-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.280 min⁻¹)

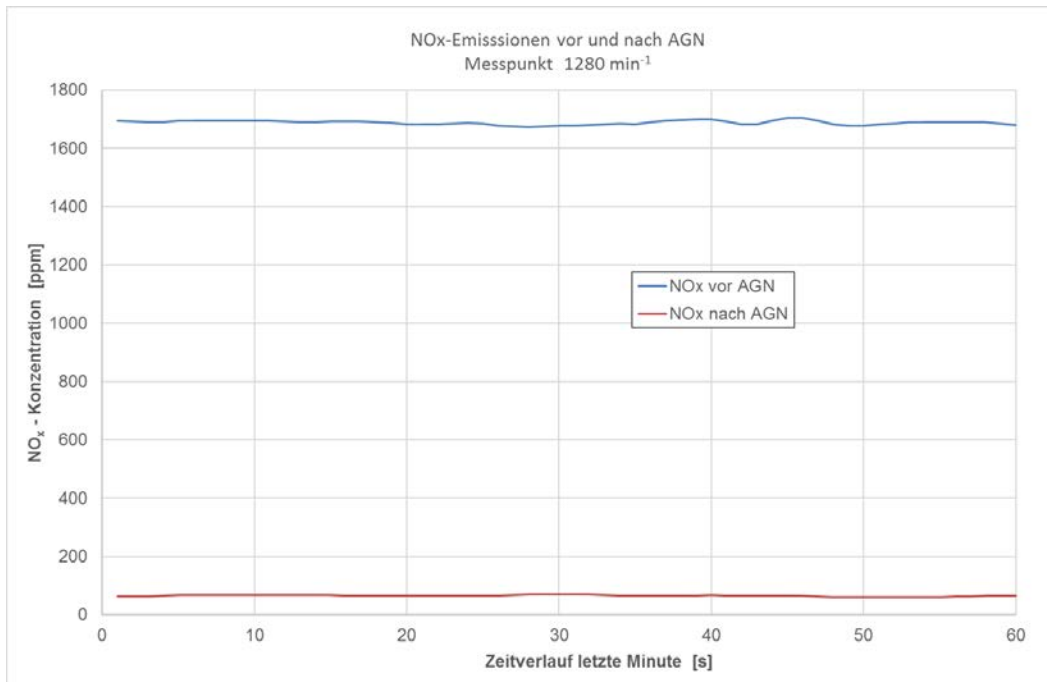


Abbildung 24: NO_x-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.280 min⁻¹)

6.3.1.4 Messpunkt 1.008 min⁻¹

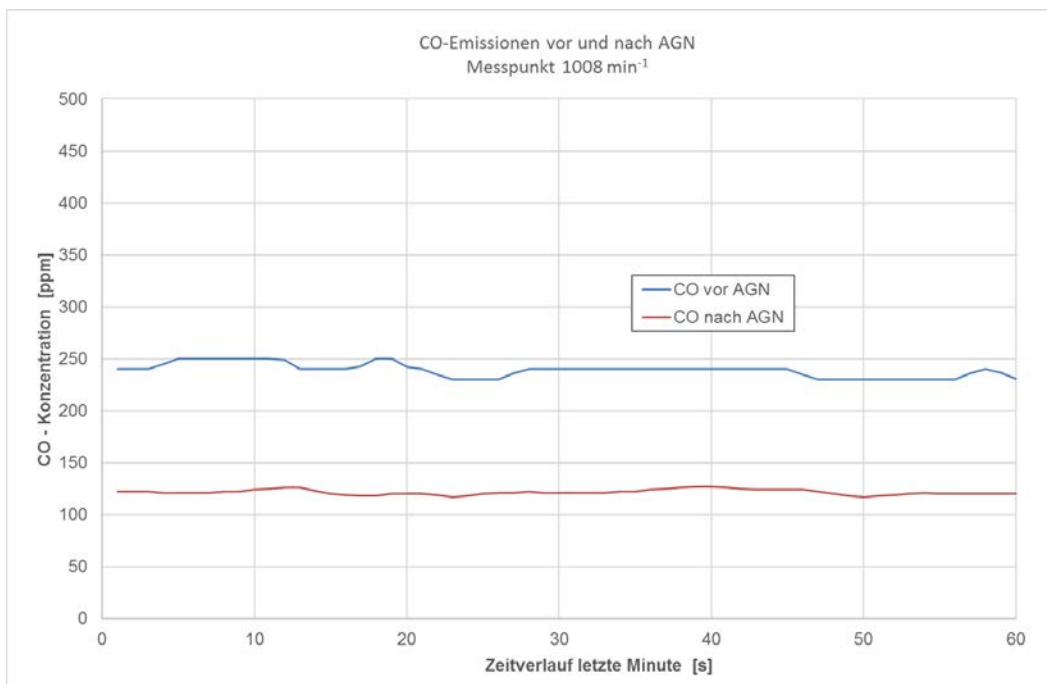


Abbildung 25: CO-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.008 min⁻¹)

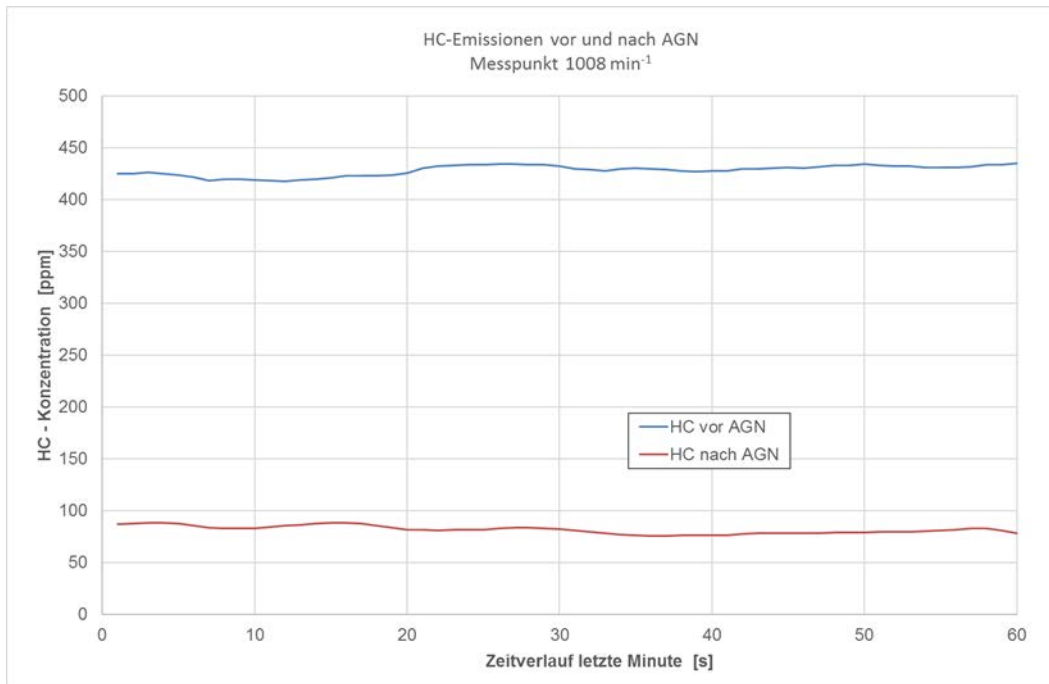


Abbildung 26: HC-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.008 min⁻¹)

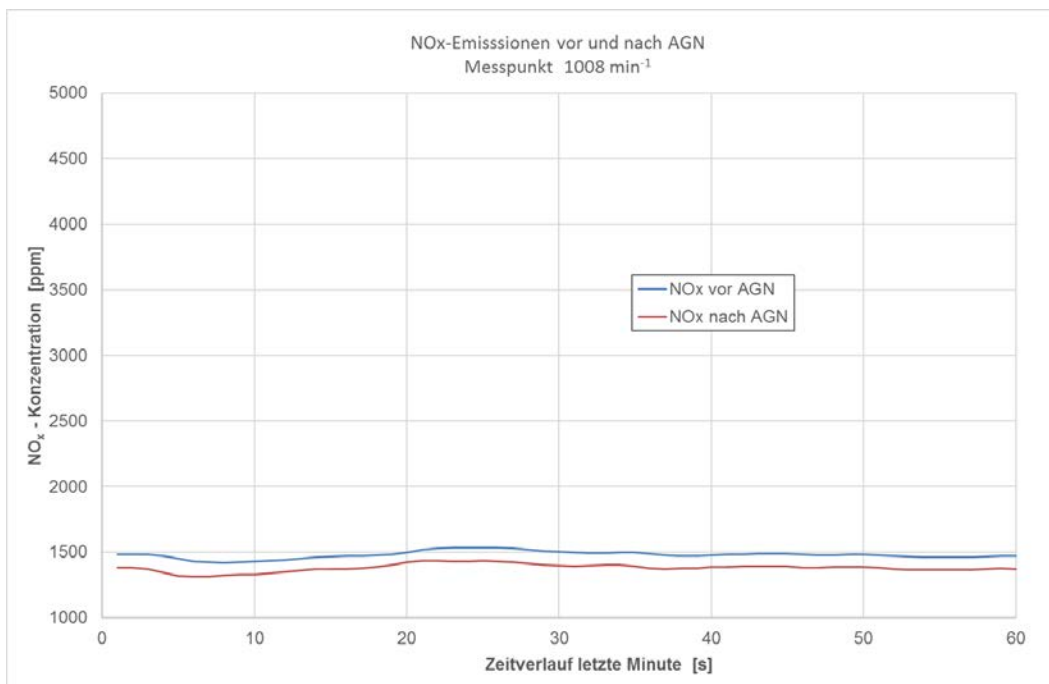


Abbildung 27: NO_x-Konzentrationsverlauf vor und nach AGN (1.008 min⁻¹)

6.3.2 Partikelemissionen

Für die gravimetrische Bestimmung der Partikelemission wurden in jedem Messpunkt vor und nach der Abgasnachbehandlung jeweils zwei Proben mit der in Kapitel 5.2.2. beschriebenen Messtechnik gezogen. Abbildung 28 zeigt exemplarisch im Test beladene Filterplättchen.

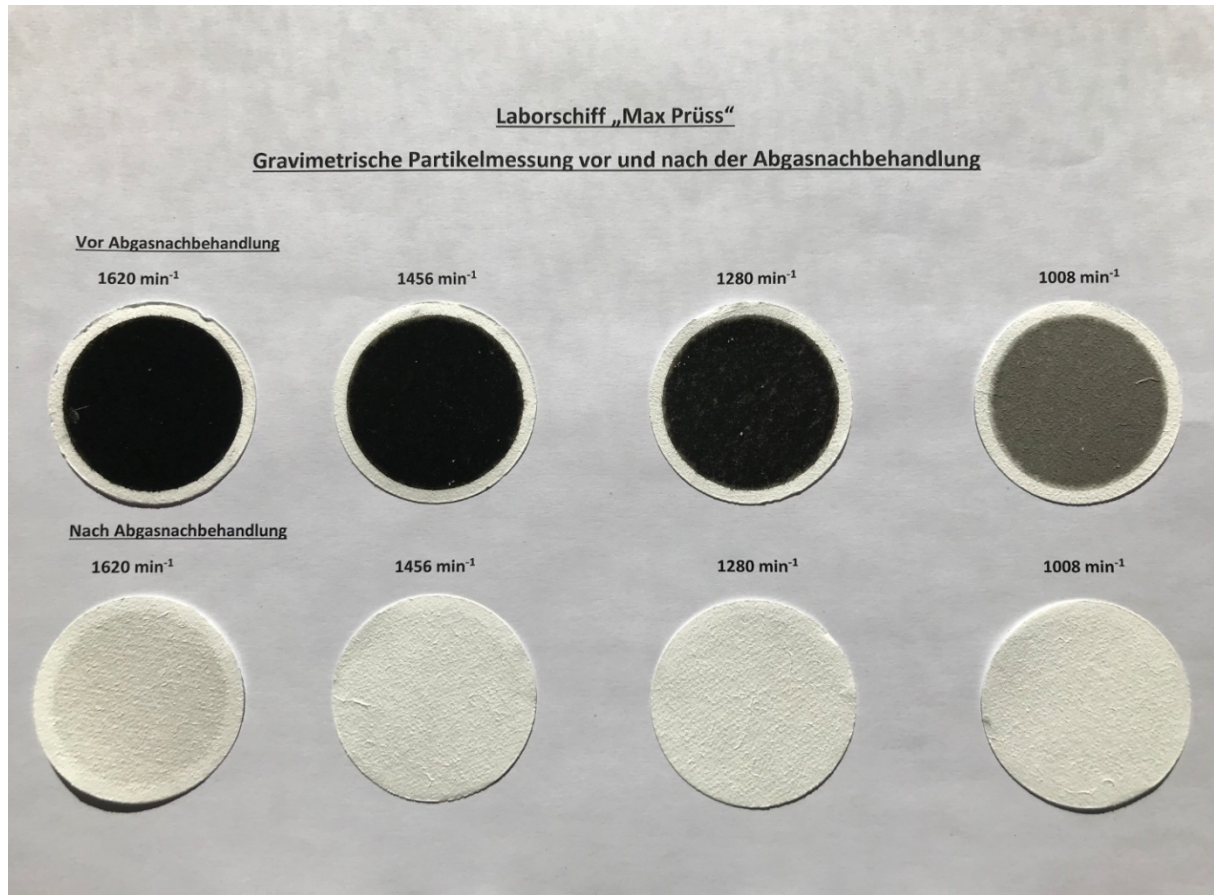


Abbildung 28: Partikelprobenfilter vor und nach AGN

Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen die Mittelwerte aus den zwei Messungen pro Messpunkt vor und nach der AGN.

Tabelle 9: Ergebnisse der Partikelmessung vor AGN

| Messpunkt | Drehzahl | Motorleistung | Filterbeladung | $G_{edf}^{*)}$ | Partikelfracht | spez. Partikelemission |
|-----------|----------|---------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| | min-1 | kW | mg | kg/h | g/h | g/kWh |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 1,0342 | 3.807,15 | 33,86 | 0,1746 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 0,6760 | 2.863,64 | 14,98 | 0,1030 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 0,6628 | 2.232,54 | 9,16 | 0,0892 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 0,7648 | 1.646,75 | 6,49 | 0,1206 |

*) äquivalenter Massendurchsatz des verdünnten Abgases

Tabelle 10: Ergebnisse der Partikelmessung nach AGN

| Messpunkt | Drehzahl | Motorleistung | Filterbeladung | $G_{edf}^{*)}$ | Partikelfracht | spez. Partikelemission |
|-----------|----------|---------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| | min-1 | kW | mg | kg/h | g/h | g/kWh |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 0,3825 | 3.807,15 | 7,51 | 0,0387 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 0,0692 | 2.863,64 | 0,82 | 0,0056 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 0,0515 | 2.232,54 | 0,39 | 0,0038 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 0,0449 | 1646,75 | 0,22 | 0,0040 |

*) äquivalenter Massendurchsatz des verdünnten Abgases

6.3.3 Rußemissionen

Für die Bestimmung der Rußemission wurde das in Kapitel 5.2.1 beschriebene Messverfahren benutzt. In Tabelle 11 und Tabelle 12 sind die Ergebnisse vor und nach der Abgasnachbehandlung dargestellt.

Tabelle 11: Ergebnisse der Rußmessung vor AGN

| Messpunkt | Drehzahl | Motorleistung | Rußkonzentration | $G_{\text{exh}}^*)$ | Rußfracht | spez. Rußemission |
|-----------|----------|---------------|------------------|---------------------|-----------|-------------------|
| | min-1 | kW | mg/kg | kg/h | g/h | g/kWh |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 24,3033 | 951,79 | 23,1317 | 0,1193 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 14,6337 | 715,91 | 10,4764 | 0,0721 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 10,3337 | 558,14 | 5,7676 | 0,0562 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 1,9366 | 411,69 | 0,7973 | 0,0148 |

*) Abgasmassenstrom

Tabelle 12: Ergebnisse der Rußmessung nach AGN

| Messpunkt | Drehzahl | Motorleistung | Rußkonzentration | $G_{\text{exh}}^*)$ | Rußfracht | spez. Rußemission |
|-----------|----------|---------------|------------------|---------------------|-----------|-------------------|
| | min-1 | kW | mg/kg | kg/h | g/h | g/kWh |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 0,0581 | 951,79 | 0,0553 | 0,0002853 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 0,0268 | 715,91 | 0,0192 | 0,0001320 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 0,0309 | 558,14 | 0,0172 | 0,0001679 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 0,0445 | 411,69 | 0,0183 | 0,0003403 |

*) Abgasmassenstrom

6.3.4 Reduktionsraten in den einzelnen Messpunkten

Für die in Kapitel 6.3.1 bis Kapitel 6.3.3 dargestellten Daten ergeben sich für die einzelnen Komponenten die in Tabelle 13 gezeigten Reduktionsraten. Abbildung 29 zeigt die Reduktionsraten in einer Grafik.

Tabelle 13: Reduktionsraten in den einzelnen Messpunkten, Teil 1

| CO | Drehzahl | Leistung | vor AGN | nach AGN | Reduktionsrate |
|-----------------|-------------------|----------|----------|----------|----------------|
| | min ⁻¹ | kW | g/h | g/h | % |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 260,00 | 97,57 | 62,47 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 148,60 | 63,28 | 57,42 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 75,79 | 51,86 | 31,57 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 90,33 | 45,97 | 49,11 |
| | | | | | |
| HC | Drehzahl | Leistung | vor AGN | nach AGN | Reduktionsrate |
| | min ⁻¹ | kW | g/h | g/h | % |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 66,70 | 2,15 | 96,78 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 75,11 | 2,01 | 97,32 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 136,22 | 3,64 | 97,33 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 253,19 | 48,29 | 80,93 |
| | | | | | |
| NO _x | Drehzahl | Leistung | vor AGN | nach AGN | Reduktionsrate |
| | min ⁻¹ | kW | g/h | g/h | % |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 2.385,96 | 800,74 | 66,44 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 1.846,63 | 231,84 | 87,45 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 1.258,97 | 48,88 | 96,12 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 824,22 | 770,07 | 6,57 |

Tabelle 13: Reduktionsraten in den einzelnen Messpunkten, Teil 2

| PM | Drehzahl | Leistung | vor AGN | nach AGN | Reduktionsrate |
|-----|-------------------|----------|---------|----------|----------------|
| | min ⁻¹ | kW | g/h | g/h | % |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 33,86 | 7,51 | 77,82 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 14,98 | 0,82 | 94,55 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 9,16 | 0,39 | 95,69 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 6,49 | 0,22 | 96,65 |
| | | | | | |
| Ruß | Drehzahl | Leistung | vor AGN | nach AGN | Reduktionsrate |
| | min ⁻¹ | kW | g/h | g/h | % |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 23,13 | 0,055 | 99,76 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 10,48 | 0,019 | 99,82 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 5,77 | 0,017 | 99,70 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 0,79 | 0,018 | 97,70 |

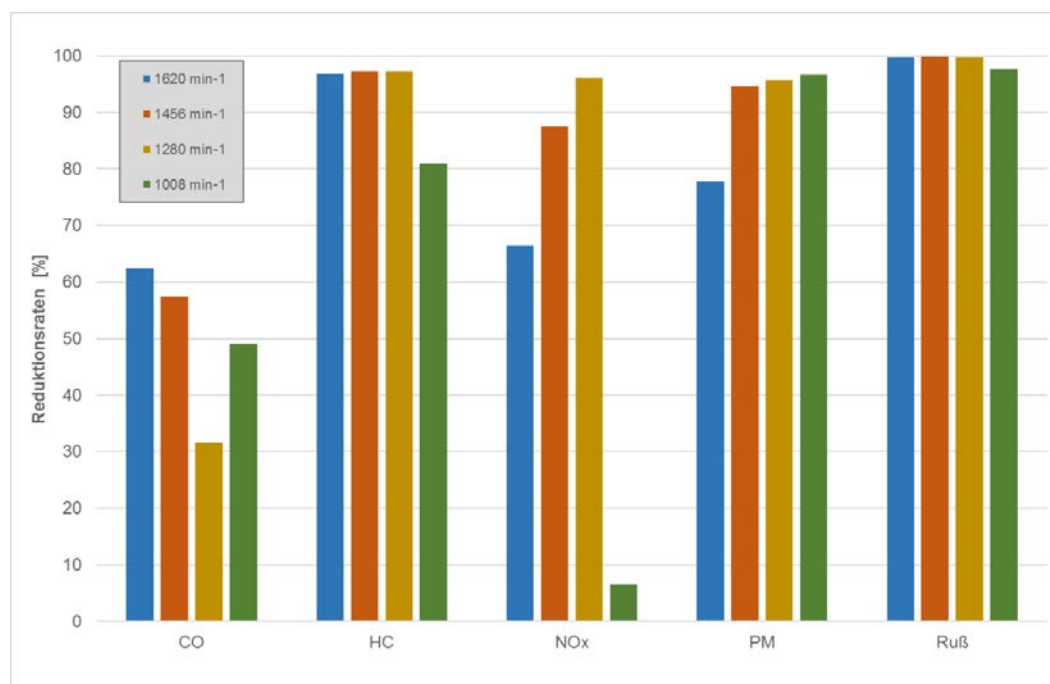


Abbildung 29: Reduktionsraten in den einzelnen Messpunkten

6.4 Auswertung in Anlehnung an ISO 8178 E3-Zyklus

Nutzt man die Messdaten der einzelnen Betriebspunkte für eine Auswertung in Anlehnung an ISO 8178 im E3 Zyklus, erreicht man unten dargestellte Ergebnisse. Die Ergebnisse für Ruß werden in dieser Betrachtung nicht herangezogen, da das verwendete Messverfahren nicht Bestandteil der ISO 8178 ist.

6.4.1 Auswertung vor AGN

Für eine E3 Auswertung mit den Abgaswerten, die vor der Abgasnachbehandlung gemessen wurden, sind die Ergebnisse in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: E3-Ergebnisse vor AGN

| E3 Wichtung nach ISO 8178 | | Vor AGN |
|---------------------------|-------|---------|
| CO | g/kWh | 1,121 |
| HC | g/kWh | 0,810 |
| NOx | g/kWh | 12,694 |
| PM | g/kWh | 0,134 |

6.4.2 Auswertung nach AGN

Für die im Auspuffrohr gemessenen Messdaten ergibt sich unter Verwendung der E3-Gewichtung (siehe Kapitel 4.2) das in Tabelle 15 dargestellte Ergebnis. Diese Ergebnisse ergeben die folgenden E3-gewichteten Reduktionsraten.

Tabelle 15: E3-Ergebnisse nach AGN

| E3 Wichtung nach ISO 8178 | Nach AGN | | Reduktionsraten | |
|---------------------------|----------|-------|-----------------|---|
| CO | 0,488 | g/kWh | 56,47 | % |
| HC | 0,068 | g/kWh | 91,56 | % |
| NOx | 2,956 | g/kWh | 76,71 | % |
| PM | 0,016 | g/kWh | 87,94 | % |

6.5 Ergebnisse für NO₂-Emissionen

Die Ergebnisse für die NO₂-Emissionen sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: NO₂-Emissionen

| NO ₂ | Drehzahl | Leistung | vor AGN | nach AGN | Reduktionsrate |
|-----------------|-------------------|----------|---------|----------|-----------------------|
| | min ⁻¹ | kW | g/h | g/h | % |
| 1 | 1.620 | 193,9 | 42,65 | 23,84 | 44,10 |
| 2 | 1.456 | 145,4 | 49,13 | 44,42 | 9,59 |
| 3 | 1.280 | 102,7 | 62,12 | 31,48 | 49,32 |
| 4 | 1.008 | 53,9 | 69,07 | 244,32 | -253,73 ^{*)} |

^{*)} Die negative Rate erklärt sich durch die Abschaltung der Adblue© Eindüsung (Kap. 7.1). Für die chemische Umsetzung des Adblue© zu Ammoniak sind Minimaltemperaturen in der Anlage von 220°C erforderlich. Systemseitig erfolgt eine Abschaltung der Adblue©-Einspritzung, wenn am SC-Kat niedrigere Temperaturen gemessen werden. Das kann bei längeren Betriebsperioden mit niedrigen Motorendrehzahlen oder am Fahrtbeginn mit kaltem Motor auftreten.

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Bewertung der dargestellten Emissionsergebnisse

Im Jahr 2002 führte die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) Grenzwerte für die Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln von Dieselmotoren ein. Die Motoren der „Max Prüss“ aus dem Baujahr 1998 stammen noch aus der Zeit vor Einführung dieser Grenzwerte. Die Maschinen sind noch in ihrem Originalzustand.

Für einen Motor, wie er in der „Max Prüss“ verbaut ist, galten ab 2002 die Grenzwerte der Tabelle 17 für Motoren mit $P_N \geq 130$ kW.

Tabelle 17: ZKR Grenzwerte der Stufe I ab 2002

| P_N [kW] | CO [g/kWh] | HC [g/kWh] | NO _x [g/kWh] | PM [g/kWh] |
|---------------------|---------------|---------------|--|---------------|
| $37 \leq P_N < 75$ | 6,5 | 1,3 | 9,2 | 0,85 |
| $75 \leq P_N < 130$ | 5,0 | 1,3 | 9,2 | 0,70 |
| $P_N \geq 130$ | 5,0 | 1,3 | $n \geq 2800 \text{ min}^{-1} = 9,2$ $500 \leq n < 2800 \text{ min}^{-1} = 45 \cdot n^{(-0,2)}$ | 0,54 |

Mit einer Nenndrehzahl von 1.800 min^{-1} und einer Leistung von 250 kW ergäbe sich somit ein NO_x-Grenzwert von 10,05 g/kWh.

Wie Tabelle 14 zeigt, liegt der Motor der „Max Prüss“ in allen Komponenten außer der NO_x-Emission unter den Grenzwerten der ZKR Stufe I. Hinweisen muss man in diesem Zusammenhang aber darauf, dass der geprüfte Motor seine Nenndrehzahl von 1.800 min^{-1} im realen Betrieb nicht erreicht und der geforderte E3-Test nur mit einer Drehzahl von 1.620 min^{-1} gefahren werden konnte.

Die NO_x-Emissionen des „Max Prüss“ Motors liegen mit 12,7 g/kWh auf einem dem Baujahr entsprechenden Niveau, stellen aber auch aus Sicht der Luftreinhaltung neben den Partikelemissionen die primäre Herausforderung für eine Abgasnachbehandlung dar.

Das für die „Max Prüss“ ausgewählte Abgasnachbehandlungssystem, die Kombination eines geschlossenen (wall flow) Partikelfilters mit einem nachgeschalteten SCR-Katalysator (Selective Catalytic Reduction), der als Reagens eine Harnstofflösung (AdBlue©) verwendet, ist grundsätzlich in der Lage, alle limitierten Abgaskomponenten herabzusetzen. Hierbei wird der dem Partikelfilter vorgeschaltete Oxidationskatalysator zur Oxidation von Kohlenwasserstoffverbindungen und Kohlenmonoxid genutzt. Gleichzeitig hat dieser Oxidationskatalysator aber auch die Aufgabe, den NO₂-Anteil im Rohabgas zu erhöhen, der im Diesel Rohabgas üblicherweise zwischen 3 und 10 Prozent liegt.

Dies ist notwendig, da der dem Oxidationskatalysator nachgeschaltete Partikelfilter ein passiv regenerierendes System darstellt. NO₂ begünstigt hierbei die Oxidation des gesammelten Rußes und erlaubt so, die erfolgreiche Regeneration des Partikelfilters schon bei geringeren Abgastemperaturen. Ein weiterer Grund zur Erhöhung des NO₂-Anteils im Abgasstrom liegt in der Funktionalität des SCR-Katalysators. Hierbei wird ein NO₂/NO_x Verhältnis von ca. 50%

angestrebt. Der in diesem Projekt benutzte Messaufbau sieht keine Messung der Emissionsdaten zwischen Partikelfilter und SCR-Katalysator vor, so dass hier keine Aussage über das reale NO_2/NO_x Verhältnis vor dem SCR-Katalysator gemacht werden kann.

Die in Kapitel 6.3 dargestellten Ergebnisse werden für die Bestimmung der Reduktionsraten für die verschiedenen Abgaskomponenten verwendet, wie in Abbildung 29 grafisch dargestellt. Betrachtet man die Rußemission, so ist zu erkennen, dass der elementare Kohlenstoff fast vollständig herausgefiltert wird. Dies ist ein erwartetes Verhalten für einen hochwertigen geschlossenen Partikelfilter. Dass diese Filtrationswerte, wie sie für den Ruß beobachtet werden, sich nicht vollständig in der gravimetrischen Partikelmessung wiederfinden, ist auf das Messverfahren zurückzuführen. Per Definition sind Partikel alle Substanzen, die sich bei Temperaturen unter 52°C auf dem Probenfilter niederschlagen. Neben Kohlenstoff können dies z.B. auch Kondensate verschiedener Verbindungen sein. Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen.

Die Ergebnisse für die Reduktionsraten bei der Stickstoffoxidemission variieren sehr stark in den einzelnen Lastpunkten, liegen für die ersten drei Lastpunkte aber in dem Rahmen, den man für SCR-Systeme erwartet (60% bis $>90\%$). Auffällig ist allerdings das Ergebnis für den letzten Messpunkt (niedrigste Drehzahl), der mit Reduktionsraten von deutlich unter 10% dokumentiert ist. Das ist folgendermaßen zu erklären: Für die chemische Umsetzung des Adblue[®] zu Ammoniak sind Minimaltemperaturen in der Anlage von 220°C erforderlich. Systemseitig erfolgt eine Abschaltung der Adblue[®]-Einspritzung, wenn am SC-Kat niedrigere Temperaturen gemessen werden. Das kann bei längeren Betriebsperioden mit niedrigen Motordrehzahlen oder am Fahrtbeginn mit kaltem Motor auftreten.

Abbildung 30 zeigt einen Ausschnitt des vierten Messpunktes des E3-Zyklus (1.008 min^{-1}). Dargestellt sind die NO_x -Konzentration nach der Abgasnachrüstung, die Abgastemperatur im Endrohr und der Abgasmassenstrom über einen zeitlichen Ausschnitt des Messpunktes. Deutlich zu erkennen ist die stetig fallende Abgastemperatur an diesem Messpunkt. Mit der sinkenden Abgastemperatur ist zu beobachten, dass die NO_x -Konzentration ansteigt. Die Konzentration steigt drastisch an, wenn eine Temperatur unter 220°C erreicht wird. An diesem Punkt wird die Harnstoffzufuhr (AdBlue[®]) gestoppt.

Die Drehzahlen der einzelnen Messpunkte werden solange gefahren, bis stationäre Zustände erreicht sind. Ist dieses der Fall, wird die letzte Minute des Messzeitraumes für die Auswertung herangezogen. Bei Drehzahlen von 1.008 min^{-1} können sich deutlich niedrigere Reduktionsraten als bei den anderen Messpunkten ergeben, da hier ggf. wegen der niedrigen Temperaturen keine Harnstoffeinspritzung mehr erfolgt.

Dieses Verhalten zeigt, dass die Reduktionsraten im realen Betrieb immer von der Belastungsgeschichte abhängig sind. Wenn z.B. nach einer Bergfahrt mit hoher Last ein Manöver gefahren wurde, das nur einen kurzen Zeitlastpunkt von z.B. 1.008 min^{-1} , wie hier dargestellt, erfordert, werden in dieser Zeit aufgrund der noch hohen Temperaturen im System hohe Reduktionsraten erreicht. Geht man jedoch von einem längeren Betrieb in einem so niedrigen Lastpunkt aus, so würden die Reduktionsraten schließlich auf den dokumentierten Wert fallen und dort verbleiben. Es ist zu beachten, dass ein E3-Test für diesen Motor mit 250 kW bei 1.800 min^{-1} einen niedrigsten Lastpunkt von 1.134 min^{-1} bei 62,5 kW Leistung hätte, im Gegensatz zu 1.008 min^{-1} und 53,9 kW im real gefahrenen Testlauf.

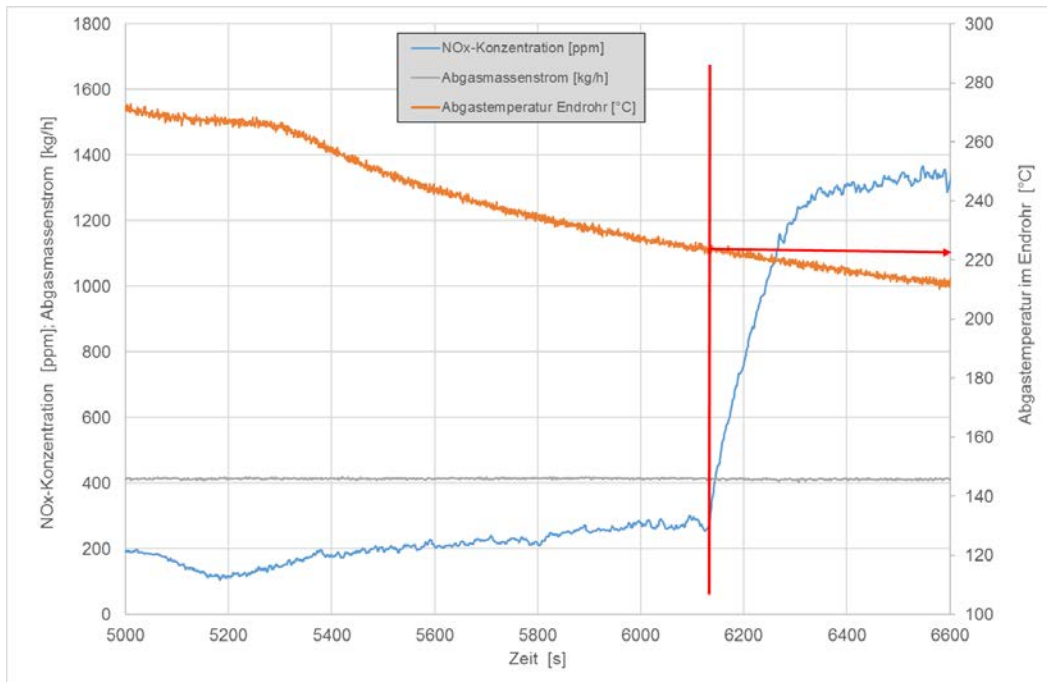


Abbildung 30: Details Messpunkt 1.008 min⁻¹

Die beschriebenen Effekte haben auch Einfluss auf die NO₂-Emissionen, wie sie in Kapitel 6.5 dargestellt sind. Die angegebenen Reduktionsraten liegen deutlich unter denen, die für NO_x ausgewiesen sind. Die Begründung hierfür liegt in den drei verschiedenen Reaktionswegen, die in einem SCR-Katalysator ablaufen und die direkt durch das NO₂/NO_x-Verhältnis im Katalysatoreintritt beeinflusst sind. Der auffällig hohe negative Wert im letzten Messpunkt erklärt sich aus dem oben beschriebenen Systemverhalten bei sinkender Abgastemperatur unter 220°C. Nach Abschaltung der Harnstoffeindüsung erfolgt kein weiterer Umsatz von Stickstoffoxiden, so dass die NO₂-Konzentration im Katalysatoreintritt annähernd auch im Katalysatoraustritt vorliegt. Da durch den, dem Partikelfilter vorgeschalteten, Oxidationskatalysator der NO₂-Gehalt gegenüber dem Motor-Rohabgas deutlich erhöht wird (siehe Erläuterungen oben), erfolgt in dem niedrigsten Lastpunkt eine deutliche Erhöhung des NO₂-Anteils an der insgesamt vorliegenden NO_x-Emission, was zu den dokumentierten negativen Reduktionsraten führt.

Das im SCR-Katalysator benötigte Reagens ist Ammoniak (NH₃). Ein wichtiger Parameter für das Funktionieren eines SCR-Katalysators ist die lastpunktabhängige, korrekte Dosiermenge des Reagens. Es sind viele Möglichkeiten denkbar, dem Katalysator die richtige Menge Ammoniak zuzuführen. Aus Gründen der Transport- und Lagersicherheit hat sich in der Praxis die Eindüsung einer wässrigen Harnstofflösung durchgesetzt. Hierbei wird die 32-prozentige Lösung in den Abgasstrom eingedüst und dort durch Thermolyse bzw. auch Hydrolyse zu Ammoniak aufbereitet. Eine zu hohe Dosierung des Reagens führt zu einem NH₃-Durchschlag (Schlupf) am Katalysator und somit zu NH₃-Emissionen, die auf jeden Fall zu vermeiden sind. Eine zu niedrige Dosiermenge führt zu Verlusten in den möglichen Reduktionsraten. Um einen NH₃-Durchschlag bei Überdosierung von vornherein zu vermeiden, können SCR-Systeme mit einem NH₃-Sperrkatalysator bestückt werden. Das auf der „Max Prüss“ installierte System verfügt über keinen NH₃-Sperrkatalysator. Aus diesem Grunde muss bei diesem System ein gewisser Sicherheitsabstand zu der maximal möglichen AdBlue©-Eindüsemenge eingehalten werden, um sicher unerwünschte NH₃-Emissionen zu verhindern.

Bei der vor der Messkampagne auf der „Max Prüss“ durchgeführten Wartung wurde die Adblue®-Einspritzung in das System auf eine optimale NO_x-Reduzierung für den „normalen“ Fahrtzustand (mittlere Drehzahlen) optimiert, wobei es zu einer Überdosierung des AdBlue® mit NH₃-Schlupf kam.

Zu Beginn der Messkampagne war am Abgasaustritt ein deutlicher NH₃-Geruch zu erfassen. Da keine geeignete Messtechnik zur Bestimmung von NH₃-Emissionen zur Verfügung stand, war eine Quantifizierung dieser Emissionen nicht möglich. Eine olfaktometrische Bestimmbarkeit lässt aber darauf schließen, dass die vorhandenen Emissionen deutlich über tolerierbaren Werten liegen. Auf der „Max Prüss“ wurde während der Messkampagne die Adblue®-Einspritzung so weit herunter geregelt, dass der Vergleich der Messwerte des TÜV NORD mit den Messwerten der Multronic-Sonde (Querempfindlichkeit gegenüber NH₃) keinen NH₃-Schlupf mehr anzeigten.

Mit dieser Neueinstellung wurde zudem sichergestellt, dass die NO_x-Messwerte der querempfindlichen Multronic-Sonde nicht durch den NH₃-Schlupf verfälscht werden. Auf allen am „CLINSH“ teilnehmenden Schiffen mit AdBlue® Einspritzung sollte daher sichergestellt werden, dass die kontinuierlichen NO_x-Messsignale nicht durch NH₃-Schlupf verfälscht werden.

Die Kohlenwasserstoffemissionen werden, wie erwartet, mit sehr hohen Reduktionsraten umgesetzt. Lediglich der letzte Betriebspunkt fällt hier ebenfalls in seinen Reduktionsraten ab. Auch hier ist die Erklärung das Auskühlen des Abgasnachbehandlungssystems mit folgender Abschaltung der AdBlue®-Einspritzung.

In einem früheren Projekt (s. LANUV-Fachbericht 49 (2013): *Minderung der Feinstaub-, Ruß- und Stickstoffoxidemissionen auf dem Fahrgastschiff „Jan von Werth“ durch Nachrüstung eines SCRT-Systems*), in dem ein Fahrgastschiff mit einer Abgasnachbehandlung auf einem älteren Entwicklungsstand des gleichen Herstellers ausgerüstet worden war, waren für die CO-Emissionen Anstiege der Emissionen nach AGN nachgewiesen worden. Im Falle der „Max Prüss“ werden auch für Kohlenmonoxid deutliche Reduktionsraten beobachtet, die jedoch zwischen den einzelnen Lastpunkten stark schwanken.

7.2 Ergebnisrelevanz für das „CLINSH“-Projekt

Im Rahmen des „CLINSH“-Projektes wird an 41 Schiffen, die mit unterschiedlichsten Emissionsminderungstechnologien ausgerüstet sind, ein kontinuierliches (permanentes) NO_x-Emissionsmonitoring wie auf der „Max Prüss“ durchgeführt. Anhand der kontinuierlichen Messdaten sollen im realen Fahrtbetrieb der Schiffe realitätsnahe Emissionsdaten („Real Drive Emissions“ RDE) erhoben und die Wirkung von technischen Maßnahmen zur Emissionsreduktion beurteilt werden.

Die in diesem Bericht beschriebene Emissionsmessung soll einerseits die Reduktionsraten der verbauten Abgasnachbehandlung belegen aber gleichzeitig auch als Werkzeug benutzt werden, die inzwischen an Bord installierte Technik für das Emissionsmonitoring zu validieren. Hauptaugenmerk wird hierbei auf die Stickstoffoxidemission gelegt.

Das kontinuierliche Emissionsmonitoring kann nicht mit Messtechniken durchgeführt werden, wie sie im hier beschriebenen Projekt von „TÜV NORD“ verwendet werden, da es sich hierbei

um eine sehr aufwendige Labormesstechnik handelt, wie sie auch bei Abgasmessungen im Zusammenhang mit Typ- und Serienzulassungen von Fahrzeugen bzw. Motoren eingesetzt wird. Für das permanente Monitoring wird deshalb auf Sensorik zurückgegriffen, wie sie z.B. in der Nutzfahrzeugtechnik als Großserienteil verbaut wird. Abbildung 31 zeigt exemplarisch einen derartigen NO_x-Sensor.



Abbildung 31: NO_x-Sensor. Quelle: TÜV-Nord

Dieser Sensor wird nach dem Abgasnachbehandlungssystem in das Abgasrohr eingeschraubt. Die Eignung solcher Sensorik zur langzeitstabilen Erfassung von Stickstoffoxid-Konzentrationen im Abgas ist unbestritten. Allerdings gibt es in der hier vorliegenden Anwendung Risikofaktoren für den sicheren Betrieb, von denen hier zwei benannt werden sollen. Vom sicheren Betrieb der Monitoring-Sensorik hängt direkt die Qualität der erfassten Daten und somit auch die Qualität der später bestimmten Emissionsfaktoren ab. Aus diesem Grund ist es dringend zu empfehlen, bei Systemen mit Reagens gestützter SCR-Katalyse eine Validierung der Sensordaten vorzunehmen.

Ein direkter Vergleich der Messergebnisse von TÜV NORD während der Messfahrt mit den Resultaten der kontinuierlichen Messung durch den Sensor der Firma Multronic ergab folgende Hinweise:

Das zum kontinuierlichen Monitoring verwendete Sensorprinzip weist eine deutliche Querempfindlichkeit gegenüber NH₃ auf. Tritt bei den Reagens gestützten SCRT-Systemen ein NH₃-Durchschlag bzw. Schlupf auf, führt dieser zu höheren Messsignalen und vermittelt dadurch den Eindruck höherer NO_x-Konzentrationen im Abgas. Die Wirkung der Abgasnachbehandlung würde unterschätzt. Zudem führen NH₃-Emissionen zusätzlich zu Umweltschäden, die unbedingt vermieden werden sollten. Eine Nachregulierung der Harnstoffeinspritzung während der Messfahrt erbrachte anschließend für beide Systeme vergleichbare Messresultate.

Es ist daher sicherzustellen, dass solche Sensoren, wenn sie auf der Rohabgasseite verbaut sind, vor der Zuführung des Reagens angeordnet werden. Wenn sie nach der Abgasnachbehandlung verbaut sind, muss eine Sicherheit gegenüber NH_3 -Schlupf bestehen. Wie bereits erwähnt, kann die Sicherheit gegenüber NH_3 -Schlupf in Abhängigkeit von der Systemarchitektur auf unterschiedliche Weise erreicht werden. Sollte ein System ohne NH_3 -Sperrkatalysator verbaut sein, muss durch die Applikation sichergestellt sein, dass in keinem Betriebspunkt eine Überdosierung des Reagens erfolgt.

Bei einem verbauten NH_3 -Sperrkatalysator kann die Reagenzdosierung näher an die Grenze zum NH_3 -Durchbruch appliziert werden, da geringer NH_3 -Schlupf durch den Sperrkatalysator beseitigt wird. Durch eine dieser beiden Maßnahmen muss der Systemhersteller die Sicherheit gegen NH_3 -Schlupf realisieren. Wie in Kapitel 7.1 beschrieben, schien in der ersten Messphase ein nicht tolerierbarer NH_3 -Schlupf vorzuliegen, so dass Messsignalverfälschungen durch die beschriebene Querempfindlichkeit zu erwarten sind.

Der zweite Risikofaktor, der hier erwähnt werden soll, ist nicht durch das Sensorprinzip bedingt, sondern besteht in strömungstechnischen Problemen, die zu Inhomogenitäten im Abgasrohr an der Stelle der Sensormontage führen können. Ein homogenes Abgasgemisch hinter dem SCR-Katalysator ist nur dann zu erwarten, wenn in allen Betriebspunkten eine gleichmäßige Beaufschlagung des Katalysatoreintritts mit Abgas und Reagens erreicht wird. Ist dies nicht der Fall, werden im Katalysatoraustritt „Abgasfahnen“ entstehen, die über den Rohrquerschnitt zu einer inhomogenen Konzentrationsverteilung führen werden.

Abhilfe kann hier nur über eine hinreichend lange Rohrstrecke mit turbulenten Strömungsverhältnissen geschaffen werden. Eingesetzte Mischkörper können hier hilfreich sein, können aber eine Erhöhung des Abgasgedrucks bedingen, was in grenzwertigen Auslegungen der Abgasnachbehandlungssysteme zu Problemen führen kann. Um Fehlmessungen aufgrund dieses zweiten Risikofaktors zu vermeiden, sind entsprechende Maßnahmen zwischen Systemhersteller und Verantwortlichem für das Monitoring abzustimmen.

Abschließend bleibt festzustellen, dass ein erfolgreiches Monitoring der Abgassituation unter realen Fahrtbedingungen nur dann durch die kontinuierlichen Messungen garantiert werden kann, wenn nach der Systeminstallation (AGN- und Monitoringsystem) eine Validierung der Messdaten im üblichen Betriebsbereich des Antriebsmotors erfolgt. Es muss sichergestellt werden, dass ein NH_3 -Schlupf unter allen Betriebsbedingungen vermieden werden kann. Nur so können Risikofaktoren für Fehlmessungen erkannt und beseitigt werden.

8 Zusammenfassung

Das LANUV (Landesamt für Umwelt, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen) hat als Eigner des Laborschiffes „Max Prüss“ das Schiff mit einer Abgasnachbehandlungsanlage ausgestattet, die insbesondere die Stickstoffoxidemissionen der Antriebsmotoren der „Max Prüss“ deutlich reduziert. Unter den unterschiedlichen Systemen wurde eine Kombination aus einem passiv regenerierenden Partikelfilter und einem nachgeschalteten SCR-Katalysator ausgewählt. Das Vorhaben wurde durch die Firma TEHAG realisiert. Die nachgerüstete „Max Prüss“ ist gleichzeitig eines der Projektschiffe des europäischen Projektes „CLINSH“ (Clean Inland Shipping) und wurde im Rahmen dieses Projektes mit Techniken ausgestattet, um ein kontinuierliches Langzeitmonitoring der Abgasemissionen zu ermöglichen.

Das Projekt soll die Wirksamkeit der Abgasnachbehandlungsanlage nachweisen und gleichzeitig die Möglichkeit bieten, das installierte Monitoringsystem zu validieren. Das Untersuchungskonzept sieht Messungen der Emissionen im Realbetrieb des Schiffes vor. Hierbei soll in dem Projekt durch die Messung in vier Lastpunkten ein Ergebnis vergleichbar zu einem E3-Test der ISO 8178, wie er für Binnenschiffsmotoren vorgeschrieben ist, erreicht werden. Der untersuchte Steuerbordmotor erreicht im Realbetrieb durch eine entsprechende Reglereinstellung eine Maximaldrehzahl von 1.620 min^{-1} . Ausgehend von dieser Drehzahl werden die weiteren Messpunkte auf der Propellerkurve des benutzten Propellers bestimmt.

Das Messkonzept sieht eine simultane Messung der gasförmigen Emissionen vor und nach der Abgasnachbehandlung vor. Außerdem werden gravimetrische Partikelmessungen und Rußmessungen mit einem photoakustischen Aerosolsensor durchgeführt. Diese Messungen erfolgen allerdings in zeitlich getrennten Messkampagnen vor und nach der Abgasnachbehandlung, da die Messtechnik nur einfach verfügbar war.

Die Ergebnisse zeigen in allen Messpunkten für alle limitierten Schadstoffe positive Reduktionsraten. Für die Leitkomponenten Stickstoffoxid liegen diese zwischen 66% und 96%, außer im niedrigsten Messpunkt. Hier wird aufgrund zu geringer Abgastemperaturen die Eindüsung des Reagens gestoppt. Die Reduktionsrate sinkt dann während der Messzeit auf 6,6% ab. Für Ruß ergeben sich Reduktionsraten von 97,7% bis 99,8%, die Partikelemissionen werden um 77,8% bis 96,7% reduziert. Für Kohlenwasserstoffverbindungen ergaben sich Reduktionswerte zwischen 81,0% und 97,3%. Für Kohlenmonoxid schwanken die Reduktionsraten zwischen 31,6% und 62,5%. Bei der Betrachtung der NO_2 -Direktemissionen sind in den ersten drei Lastpunkten Reduktionsraten von 9,6% bis 49,3% zu beobachten. Für den letzten Messpunkt (niedrigste Drehzahl) ergibt sich, bedingt durch die geringe Abgastemperatur und die damit gestoppte Reagenszufuhr, eine sehr deutliche Erhöhung des NO_2 -Anteils im Abgas.

Betrachtet man die nach ISO 8178 gewichteten Ergebnisse für einen E3-Zyklus, ergeben sich für die einzelnen Komponenten folgende Reduktionsraten: Kohlenmonoxid 56,5%, Kohlenwasserstoffe 91,6%, Stickstoffoxid 78,7% und Partikel 87,9%. Für die ermittelten Rußwerte ist keine E3-Wichtung vorgesehen. Für die Stickstoffoxidemissionen (NO_x) werden so die leistungsbezogenen Emissionen im E3-Zyklus von $12,69 \text{ g/kWh}$ auf $2,96 \text{ g/kWh}$ reduziert.

Bei der Validierung der Monitoring-Daten konnten zwei Messrisiken identifiziert werden. Zum einen konnte während der Messung ein offensichtlicher NH_3 -Durchschlag bzw. Schlupf des Abgassystems nachgewiesen werden, der aufgrund der prinzipbedingten Querempfindlichkei-

ten des für das kontinuierliche Monitoring verwendeten Monitoring-Sensors der Firma Multronic zu fehlerhaften Messsignalen führen kann. Der NH_3 -Schlupf konnte während der Messfahrt durch eine Nachregulierung des Systems minimiert werden. Zudem besteht eine Messunsicherheit durch Inhomogenitäten im Abgasstrom nach der Abgasnachbehandlung.

Die Ergebnisse zeigen, dass Maßnahmen ergriffen werden müssen, um diese beiden Messrisiken zu beseitigen. Hierbei liegt die Beseitigung des NH_3 -Schlupfes eindeutig in der Verantwortung des Systemherstellers der Abgasnachbehandlungsanlage. Für eine Verbesserung von Homogenitäten im Abgas und Bestimmung der optimalen Einbauposition des Stickstoffoxidsensors ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den Systemlieferanten der Abgasnachbehandlung und den Lieferanten des kontinuierlichen Monitoringsystems notwendig. Für eine hohe Qualität der kontinuierlichen Monitoring-Daten erscheint eine Validierung nach Systeminstallation mit Hilfe geeigneter Messtechnik zwingend erforderlich, um das Risiko von Fehlmessungen während des kontinuierlichen Monitorings zu minimieren.

9 Literatur

- Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, OJ L 152, 11.6.2008, p. 1–44
- Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants, OJ L 309, 27.11.2001, p. 22–30
- Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air OJ L 23, 26.1.2005, p. 3–16
- VERORDNUNG (EU) 2016/1628 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 14. September 2016 über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG ISO 8178 E3 Cycle, Part 1-11;
- LANUV (2013): Minderung der Feinstaub-, Ruß- und Stickstoffoxidemissionen auf dem Fahrgastschiff „Jan von Werth“ durch Nachrüstung eines SCRT-Systems. LANUV-Fachbericht 49, Eigenverlag LANUV, ISSN 1864-3930, https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte
- LANUV (2017): Emissionen des Containerschiffs „MS Aarburg“, Auswirkungen der Nachrüstung mit einer Diesel-Wasser-Emulsionsanlage. LANUV-Fachbericht 77, Eigenverlag LANUV, ISSN 1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte
- Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14. September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery, amending Regulations (EU) No 1024/2012 and (EU) No 167/2013, and amending and repealing Directive 97/68/EC (Text with EEA relevance) OJ L 252, 16.9.2016, p. 53–117
- ZKR (2002): Richtlinie der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), Stufe I, Gültig seit 2002.
- ZKR (2007): Richtlinie der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), Stufe II bzw. Richtlinie 2004/26/EG, Gültig seit 06/2007

10 Partner in CLINSH



Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de