

TEXTE

66/2024

Abschlussbericht

Luftschadstoffe in der Seeschifffahrt – Erstellung einer Maßnahmenmatrix der Minderungsoptionen sowie Durchführung und Analyse einer Black Carbon-Messkampagne in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität

von:

Peter Lauer
MAN Energy Solutions SE, Augsburg

Dr. Brigitte Behrends
Marena Ltd., Jever

Michael Hinz
WTZ Motorentechnik GmbH, Dessau-Roßlau

Stephan Eylmann
DNV GL SE, Hamburg

TEXTE 66/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3718 57 100 0
FB001281

Abschlussbericht

Luftschadstoffe in der Seeschifffahrt – Erstellung einer Maßnahmenmatrix der Minderungsoptionen sowie Durchführung und Analyse einer Black Carbon- Messkampagne in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität

von
Peter Lauer
MAN Energy Solutions SE, Augsburg

Dr. Brigitte Behrends
Marena Ltd., Jever

Michael Hinz
WTZ Motorenteknik GmbH, Dessau-Roßlau

Stephan Eylmann
DNV GL SE, Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

DNV GL SE
Brooktorkai 18
20457 Hamburg

Abschlussdatum:

Oktober 2023

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Katharina Koppe, Philipp Eichler

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Luftschadstoffe in der Seeschifffahrt – Erstellung einer Maßnahmenmatrix der Minderungsoptionen sowie Durchführung und Analyse einer Black Carbon-Messkampagne in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität

Die Seeschifffahrt emittiert große Mengen an Luftschadstoffen wie Schwefel- und Stickoxide (SO_x , NO_x) sowie klimarelevante Substanzen wie Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Black Carbon (BC). Während die Internationale Seeschifffahrts-Organisation (IMO) Grenzwerte für die Luftschadstoffe SO_x und NO_x implementiert hat, bestehen solche für BC oder Partikelemissionen (PM) derzeit nicht.

In dieser Studie werden Grundlagen zur Entwicklung von Grenzwerten für die BC-Emissionen der Seeschifffahrt erarbeitet. Dazu wird zunächst der Stand der technischen Möglichkeiten zur Verbesserung des Emissionsverhaltens von Antriebssystemen in der Seeschifffahrt zusammengestellt. Im zweiten Teil der Arbeit wird der Einfluss der Kraftstoffqualität auf die BC-Emissionen betrachtet. Hierbei liegt der Fokus auf dem Aromatengehalt der Kraftstoffe. Die Messung der BC-Emissionen bei Verwendung von Kraftstoffen unterschiedlichen Aromatengehalts erfolgt am Prüfstand unter verschiedenen Motorlasten. Als Ergebnis wird die Abhängigkeit der BC-Emissionen vom Aromatengehalt bei unterschiedlichen Motorlasten aufgezeigt. Ein Zusammenhang zwischen BC-Emission und Aromatengehalt im Kraftstoff ist nachweisbar. Im dritten Teil der Arbeit werden die Ergebnisse verschiedener Messkampagnen für BC-Emissionen zusammengetragen und ausgewertet. Die dargestellten Messkampagnen decken das gesamte in der Seeschifffahrt relevante Größen- und Leistungsspektrum ab sowie die Verwendung verschiedener Kraftstoffe vom Rückstandsöl (sogenanntes Schweröl, Heavy fuel oil HFO) über Marine Destillate, synthetisch erzeugtem GtL (Gas to Liquid) sowie LNG (Liquified Natural Gas, verflüssigtes Erdgas). Hierbei zeigt sich insbesondere die große Streubreite der BC-Emissionen über das Leistungsspektrum der Motoren einerseits, aber auch innerhalb von Motoren gleicher Leistung bis hin zu baugleichen Motoren.

Abschließend werden aus obigen Grundlagen, Möglichkeiten zur Einführung von Grenzwerten für BC-Emissionen sowie der damit verbundenen notwendigen geeigneten Messstandards und Überwachungsmethoden in der Bordpraxis erarbeitet. Geeignete Messmethoden sind im Rahmen der IMO-Arbeit identifiziert, es bedarf jedoch auf Grund der großen Streubreite der BC-Emissionswerte zusätzlich einer Festlegung von Kraftstoffqualitäten sowie Randbedingungen für zukünftige BC-Messungen, insbesondere wenn sie an Bord erfolgen. Beides ist derzeit nicht gegeben bzw. bedürfte weiterer Untersuchungen, so dass hier abschließend keine Empfehlung zu BC-Grenzwerten gegeben werden kann.

Abstract: Air pollutants in maritime navigation – Compilation of a matrix of reduction measures as well as execution and analysis of a Black Carbon measurement campaign considering the influence of fuel grades

Maritime shipping emits large amounts of air pollutants such as Sulphur or Nitrogen oxides (SO_x , NO_x) as well as further substances relevant to the climate like Carbon dioxide (CO_2) and Black Carbon (BC). While the International Maritime Organization (IMO) already implemented limits for the air pollutants SO_x and NO_x , none are defined yet for BC or Particulate Matter (PM).

In this study basic principles for the development of limit values for BC-emissions are elaborated. Firstly, current technological measures for the improvement of the emission of maritime propulsion systems are compiled. In the second part of this study the influence of fuel composition on the emission behavior is considered, focusing on the content of aromatic hydrocarbons. Measurements of BC-emissions using fuels of different aromatic hydrocarbon content were done on an engine test bed under different engine loads. As a result, the dependence of BC-emissions on the aromatic hydrocarbon content under different engine loads

is shown. A correlation between aromatic hydrogen content and BC-emissions could be shown. In the third part of the study the results of several BC-emission measurement campaigns are compiled and evaluated. The measurement campaigns cover the whole range of engine sizes and power as well as the use of different fuels like heavy fuel oil (HFO), marine distillate fuels, synthetic GtL (Gas to Liquid) and LNG (Liquefied Natural Gas) used in maritime navigation. Results show the large variation of BC-emissions over the wide power range, but also within engines of equal power and even engines of the same type.

Finally, possibilities for the introduction of limit values for BC-emissions are discussed considering the required measurement standards and control methods. Suitable measurement methods are identified within the framework of the IMO work, but due to the large variation of the BC-emission values a definition of fuel quality requirements and appropriate boundary conditions for measurements, especially when conducted on board ships, are required in addition. Both are currently not defined and require additional evaluations; thus, no final recommendations of BC-emission limits could be given.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungs- und Übersetzungsverzeichnis, Glossar	11
Zusammenfassung	16
Summary	20
1 Einleitung	23
2 Maßnahmen zur Beeinflussung von Luftschadstoff- und Black Carbon-Emissionen von Seeschiffen und deren Wirkung	25
2.1 Bewertung der Technologien zur Minderung von Luftschadstoffen	28
2.1.1 Einsatz alternativer Kraftstoffe	28
2.1.2 Einsatz innermotorischer Maßnahmen	31
2.1.3 Abgasnachbehandlung	32
2.1.4 Übersicht über die Maßnahmen zur Emissionsreduktion und ihre Kombination	34
3 Einfluss der Kraftstoffqualität auf die Black Carbon-Emissionen von Schiffsmotoren	37
3.1 Beschreibung der BC-Messkampagne	37
3.1.1 Versuchsmotor	37
3.1.2 Verwendete Kraftstoffe	38
3.1.3 Eingesetzte BC- und PM-Messverfahren	39
3.2 Ergebnisse der Messkampagne	39
3.2.1 Auswertung der BC-Emissionen	39
3.2.2 Vergleich der Messmethoden FSN und PAS	41
3.2.3 Ergebnisse der Analyse der gasförmigen organischen Bestandteile im Abgasstrom	41
3.2.4 Auswertung der Kraftstoffanalysen	47
3.2.5 Vertiefte Analyse der organischen Verbindungen mittels GC-GC-HRTOFMS	53
4 Mess- und Überwachungsmethoden von BC-Emissionen der internationalen Schifffahrt	56
4.1 Übersicht möglicher Messmethoden	56
4.1.1 Übersicht verschiedener Messkampagnen	56
4.1.2 Messgenauigkeit und Korrelation der verschiedenen Messinstrumente	57
4.1.3 Vergleich und Auswertung verschiedener Messkampagnen – Stand 2018 (Datenbasis zu Projektbeginn)	59
4.1.4 Diskussion und Interpretation der Messdaten zu Projektbeginn	60
4.1.5 Einflussparameter, abgeleitet aus den Eingangsdaten	62

4.1.6	Vergleich und Auswertung verschiedener Messkampagnen: Erweiterung der Datenbasis im Rahmen des Projektes	63
4.1.7	Diskussion und Interpretation der erweiterten Messdaten.....	64
4.1.8	Zusammenfassende Schlussfolgerungen anhand des erweiterten Datensatzes.....	66
4.1.9	Vergleich der BC-Datenauswertung dieser Studie mit der Auswertung von ICCT.....	68
4.1.10	Vergleich der gemessenen BC-Emissionen mit Emissionen anderer Verkehrssektoren.....	70
4.2	Kriterien zur Grenzwertentwicklung und mögliche Überwachungsmethoden	71
4.2.1	Bewertung der Messmethoden / -techniken im Hinblick auf eine Grenzwerteinführung.....	71
4.2.2	Bewertung der Messmethoden bezüglich ihres Einsatzes an Bord.....	76
4.2.3	Analyse der Rahmenbedingung bezüglich einer Grenzwertentwicklung.....	76
4.3	Weitere Optionen zur Minderung der BC-Emissionen und deren Überwachung	78
5	Ausblick	80
6	Quellenverzeichnis	81
A	Anhang	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: eBC-Emissionen für 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Motorlasten in Relation zum Aromatengehalt der Kraftstoffe. Die Legende für die PAS- und FSN-Werte befindet sich in der Grafik für 25 % Motorlast (PPR 7/8, 2019).....	40
Abbildung 2: Elementare Zusammensetzung der gasförmigen Komponenten im Abgas aus der Verbrennung von GtL und DMA bei A: 25 %, B: 50 %, C: 75 % und D: 100 % Motorenlast in Relation zur Anzahl der C-Atome.....	44
Abbildung 3: Chemische Zusammensetzung der gasförmigen Komponenten im Abgas aus der Verbrennung von GtL bei 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Motorenlast in Relation zur Anzahl der C-Atome.....	46
Abbildung 4: Prozentuale Gesamtzusammensetzung der gasförmigen Komponenten in den Abgasen von GtL und DMA bei 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Motorenlast (Eigene Ergebnisse)	47
Abbildung 5: H/C-Verhältnis in Relation zum Aromatengehalt und nach eigener Prüfung. Die Trendlinien sind mit und ohne HFO dargestellt (PPR 8/5/1).....	51
Abbildung 6: Kraftstoffunabhängige Korrelation zwischen FSN und PAS. Quelle: eigene Darstellung	59
Abbildung 7: BC-Emission von Marinemotoren als gewichtete Zykluswerte, Datenstand Ende 2018 mit 35 individuellen Datensätzen. Quelle: PPR 6/Inf.6, 2018.....	59
Abbildung 8: Aktueller Datenstand Anfang 2022 mit 75 individuellen Datensätzen nach Tabelle 14 im Anhang.....	63
Abbildung 9: Darstellung über Drehzahl und Datenvergleich mit ICCT (gelb unterlegt gestrichelt). Quellen: Olmer et al., 2017 und Comer et al., 2017	67
Abbildung 10: PM-Emission und -Zusammensetzung von zwei mittelschnelllaufenden 4-Takt Marinemotoren und einem schnelllaufenden Nfz-Motor der Stufe Euro-3, Quelle: MAN, 2018.....	70
Abbildung 11: Klassifizierung von Kohlenstoff und dessen Nomenklatur nach Licht-Absorption und thermischer Beständigkeit (Quelle: US-EPA, 2012).....	73
Abbildung 12: Abgaskomponenten und deren Klassifizierung nach Messmethoden, optischer Erscheinung und Definitionen, MAN eigene Darstellung (2017) in Anlehnung an ISO 8178-3.....	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Maßnahmen zur Minderung von Emissionen (Klepsch, 2020).....	35
Tabelle 2: Kombination der Maßnahmen zur Emissionsreduktion (Klepsch, 2020)	36
Tabelle 3: Motordaten lt. MAN	38
Tabelle 4: Lastpunkte entsprechend E2-Zyklus nach ISO 8178-4.....	38
Tabelle 5: Kraftstoffe der Messkampagne und ihr Schwefel- und Aromatengehalt lt. Herstellerangaben.....	38
Tabelle 6: Messverfahren für die Vermessung der Ruß- und Partikelemissionen (eigene Zusammenstellung).....	39
Tabelle 7: Arithmetische Mittelwerte für die BC-Emissionen der getesteten Kraftstoffe mit FSN und PAS im E2-Zyklus nach ISO 8178-4....	41
Tabelle 8: Elementaranalyse, Dichte, Asphalt- und Aromatengehalt der Kraftstoffproben	49
Tabelle 9: EPA PAK Konzentrationen in mg/kg in den diversen Kraftstoffen (Eigene Ergebnisse, Analysen durchgeführt von EUROFINS)	52
Tabelle 10: Prozentuale Verteilung der PAK (Eigene Ergebnisse, Analysen durchgeführt von EUROFINS).....	52
Tabelle 11: Konzentrationen der Naphthalin-Derivate in drei 0,50 % S Kraftstoffen (PPR 8/5/1, 2020).....	54
Tabelle 12: Statistik der Messkampagnen nach Tabelle 14 im Anhang.....	57
Tabelle 13: Relative Abweichungen in Prozent bezogen auf den Messwert aus Mehrfachmessungen aus der vorliegenden Messkampagne (Kapitel 3).....	58
Tabelle 14: Übersicht aller Datensätze der Messkampagnen (Quellen s. Spalte 3)86	
Tabelle 15: BC-Emissionswerte für alle Datensätze der Messkampagnen (Quellen s. Spalte 2).....	91

Abkürzungs- und Übersetzungsverzeichnis, Glossar

AGR	Abgasrückführung
AP	Arbeitspaket
aux.	Auxiliary - Hilfsmaschine
BC	Black Carbon – Schwarzer Kohlenstoff
BMCI	Bureau of Mines Correlation Index
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
Bh	Betriebsstunden
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection – Ausschuss für Umweltschutz in der Luftfahrt, Gremium der ICAO, vergleichbar dem MEPC der IMO
CAPS	Cloud Aerosol and Precipitation Spectrometer - Wolken- Aerosol- und Niederschlagsspektrometer, Kombination eines Laserspektrometers und einem optischen Streulichtmesser zur Detektion von Aerosol- und Wolkenpartikeln im Größenbereich zwischen ca. 0,5 und 1000 µm sowie einem Sensor zur Wassergehaltsbestimmung.
CAST	Combustion Aerosol Generator – Rauchgaserzeuger, er dient z.B. zur Kalibrierung von Partikelmessgeräten. Ein CAST-Generator erzeugt Rußpartikel mittels einer stabilen Diffusionsflamme. Durch Löschen des oberen Teils der Flamme werden Rußpartikel aus der Flamme gewonnen. Die Eigenschaften dieser Partikel, insbesondere ihre Größe, werden durch die Einstellung der Flamme festgelegt. Zugleich ist es möglich, die Partikelgröße in einem Bereich von 20 nm bis 200 nm beliebig zu variieren. Außerdem läßt sich mit einem Rauchgasverdünner die Partikelkonzentration einstellen. Im Gegensatz zu einem künstlichen Aerosol (z.B. Printex-U Farbpigmente oder Graphit-Funkenruß) arbeitet man beim CAST-Generator mit echten Rußpartikeln. Damit wird die Partikel-Emission von Verbrennungsmotoren und Feuerungen wirklichkeitsnah nachgebildet.
CCAI	Calculated Carbon Aromaticity Index – berechneter Kohlenstoffaromatizitätsindex, Index für die Zündqualität
CG	Correspondence Group – Arbeitsgruppe, die sich nur schriftlich untereinander austauscht
CH₄	Chemische Formel für Methan
CLD	Chemiluminiszenz – Messmethode für NO _x
CR	Common Rail – Gemeinsames Speicherrohr, Teil eines modernen Hochdruckkraftstoffeinspritzsystems
D2-Cycle	D2 Testzyklus für Hilfsantriebsmaschinen nach ISO 8178-4
DF	Dual Fuel – Zweistoffmotor, der mit einem flüssigen und einem gasförmigen Kraftstoff betrieben werden kann
DMA	Distillate Marine Gas Oil Grade A – normierte Schiffskraftstoffqualität, darf keine Rückstände enthalten
DMB	Distillate Marine Gas Oil Grade B – normierte Schiffskraftstoffqualität, etwas schwerer als DMA

DMS	Differential Mobility Spectrometer - differentielles Mobilitätsspektrometer der Firma Cambustion Ltd, mißt die Größenverteilung eines Aerosols in Abhängigkeit der elektrischen Mobilität der Partikel
DOC	Diesel Oxidation Catalyst – Diesel Oxidations Katalysator
DPF	Diesel Particulate Filter - Diesel Partikel Filter
E2-Cycle	E2 Testzyklus für Hauptantriebsmaschinen nach der Generatorkurve nach ISO 8178-4
E3-Cycle	E3 Testzyklus für Hauptantriebsmaschinen nach der Propellerkurve nach ISO 8178-4
EC	Elementarer Kohlenstoff
ECA	Emission Control Area – Gebiet mit Emissionsbegrenzung
EGCS	Exhaust Gas Cleaning System – Abgasreinigungssystem (in diesem Fall für Schwefeloxide)
EGR	Exhaust Gas Recirculation - Abgasrückführung
ESP	Electrostatic Precipitator – Elektrofilter, scheidet geladene Partikel aus einem Gas an einer Niederschlags Elektrode ab.
EU	Europäische Union
EURO-6	Grenzwertstufe 6 der Abgasgesetzgebung für Straßenfahrzeuge in Europa
EUROMOT	European Association of Internal Combustion Engine and Alternative Powertrain Manufacturers - Europäische Verband der Hersteller von Verbrennungsmotoren und alternativen Antrieben
EUSAAR	European Supersites for Atmospheric Aerosol Research – Protokoll zur OC/EC-Analyse von Umgebungsaerosolproben
f_a	Test condition parameter – Testbedingungsparameter nach IMO NTC
FSN	Filter Smoke Number - Filter Rauchzahl, früher auch Schwärzungszahl Bosch genannt.
g	Gramm
GC	Gaschromatograph
GHG	Greenhouse Gas - Treibhausgas
GtL	Gas to liquid – Verfahren zur Herstellung flüssiger synthetischer Kraftstoffe aus Erdgas.
GWP	Global Warming Potential - Treibhauspotential
HFO	Heavy Fuel Oil - Schweröl
HRTOFMS	Hochauflösender Flugzeit-Massenspektrometer (high-resolution time-of-flight mass spectrometry)
HSD	High Speed Diesel - Schnellläufermotor
ICAO	International Civil Aviation Organization, specialized agency of the United Nations – Internationale Zivilluftfahrtorganisation, vergleichbar der IMO
ICCT	The International Council for Clean Transportation (Forschungsinstitut)
IMO	Internationale Maritime Organisation – Organisation der UN
kg	Kilogramm
k_{HD}	Humidity correction factor for NO _x – Korrekturfaktor für die Stickoxidemission
kW	Kilowatt
LAC	Light Absorbing Carbon – Lichtabsorbierender Kohlenstoff
LCA	Life Cycle Assessment - Lebenszyklusanalyse

LII	Laser Induced Incandescence - Laserinduziertes Glühen ist eine In-situ-Methode zur Messung des Volumenanteils von Aerosolpartikeln
LNG	Liquefied Natural Gas – verflüssigtes Erdgas, im Wesentlichen bestehend aus Methan
LPG	Liquefied Petroleum Gas – Flüssiggas, im Wesentlichen bestehend aus Propan und Butan
MAAP	Multi Angle Absorption Photometer – Mehrwinkelabsorptionsphotometer misst die Lichtmenge bei einer Wellenlänge von 637 nm, die durch einen mit Partikeln beladenen Glasfaserfilter übertragen und von diesem zurückgestreut wird.
MAN-ES	MAN Energy Solutions SE ist ein Unternehmen aus dem Geschäftsfeld Power Engineering der MAN SE und seit 2011 eine Tochter der Volkswagen AG. MAN-ES mit Sitz in Augsburg ist Anbieter von Großdieselmotoren und Turbomaschinen für maritime und stationäre Anwendungen sowie von chemischen Reaktoren.
MCR	Maximum Continuous Rating – Maximale kontinuierliche Motorleistung
MDO	Marine Diesel Oil – siehe DMB
MEPC	Maritime Environmental Protection Committee - Umweltausschuss der IMO
MGO	Marine Gas Oil – siehe DMA
Miller Prozess	Kreisprozess nach Ralph Miller – durch Veränderung der Ventilsteuerzeiten hin zu frühem Einlassventilschließen vor dem unteren Totpunkt verringert sich die Füllung und somit auch die Spitzentemperatur während der Verbrennung. Dadurch reduziert sich die NO _x -Emission.
Mini-CAST	Version des CAST mit verringertem apparativem Aufwand durch Unterdruckregelung
MS	Massenspektrometer
MSD	Medium Speed Diesel - Mittelschnellläufermotor
MW	Megawatt
NECA	NO _x -Emission Control Area – Gebiet mit Stickstoffoxidemissionsbegrenzung
Nfz	Nutzfahrzeug
NH₃	Ammoniak
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health 5040 protocol – Protokoll zur OC/EC-Analyse von Umgebungsaerosolproben
nm	Nanometer
NMHC	Non-Methane Hydrocarbons – Nicht-Methan Kohlenwasserstoffe
NO_x	Stickstoffoxide, beinhaltet Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid
NRMM-V	Non Road Mobile Machinery – Grenzwertstufe 5 für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte
NTC	NO _x Technical Code, (2008) – Technische NO _x Vorschrift der IMO
nvPM	non-volatile Particulate Matter mass and number aircraft engine emission standard ICAO – Nicht-flüchtiger Massen- und Anzahl-basierter Emissionsstandard in der Luftfahrt.
OC	Organischer Kohlenstoff
OME	Polyoxymethyldimethylether – Strukturformel H ₃ C-O-(CH ₂ O) _n -CH ₃ – im OME-Kraftstoffmolekül sind keine direkten Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen vorhanden, was zu einer rußfreien Verbrennung führt.

PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PAS	Photo Acoustic Spectroscopy – photoakustisches Messverfahren für BC
PAX	Photoacoustic Extinctionmeter - Photoakustisches Extinktometer, misst gleichzeitig Lichtstreuung und -absorption.
Pd	Palladium
PM	Particulate Matter or Mass – Partikelmaterial oder -masse
PN	Particulate Number – Partikelanzahl
PPR	Pollution Prevention and Response – Unterausschuss der IMO
Pt	Platin
Pt-Pd-Katalysator	Platin/Palladium-Katalysator
PtG	Siehe PtX
PtL	Siehe PtX
PTR ToF MS	Proton Transfer Time of Flight Mass Spectroscopy – Protonentransfer Flugzeit Massenspektrometer
PtX	Power to X – Gasförmige („Power to Gas“ (PtG)) oder flüssige („Power to Liquid“ (PtL)) Kraftstoffe, die unter Verwendung elektrischer Energie erzeugt werden.
RM	Residual marine - Rückstandskraftstoff
rpm	revolutions per minute - Umdrehungen pro Minute
SCR	Selective Catalytic Reduction – Selektive katalytische Reduktion (in diesem Falle für Stickstoffoxide)
SECA	SO _x Emission Control Area – Gebiet mit Schwefeloxidemissionsbegrenzung
SO_x	Schwefeloxide, beinhaltet Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid
SSD	Slow (Low) Speed Diesel – Langsamläufermotor. Der Terminus „Slow“ wurde vom ICCT verwendet und ist nicht allgemein üblich.
TBM	Time Between Maintenance – Zeitintervall zwischen Wartungen
TBO	Time Between Overhaul – Zeitintervall zwischen Überholungen
TGA	Thermogravimetrische Analyse zur EC-Bestimmung
TOA	Thermo Optical Analysis – Thermooptische Analyse zur EC-Bestimmung
TS	two stage – 2-stufig
TWG	Technical Working Group – Technische Arbeitsgruppe
u. a.	unter anderem
UCR	University of California Riverside - Universität
ULSD	Ultra Low Sulfur Diesel – Destillat Marinekraftstoff mit einem Schwefelgehalt von < 0,1 Gewichts %
ULSFO	Ultra Low Sulfur Fuel Oil – Rückstands Marinekraftstoff mit einem Schwefelgehalt von < 0,1 Gewichts %
UN	United Nations – Vereinte Nationen
US-EPA	United States Environmental Protection Agency – Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten von Amerika.
VCG	Viscosity Gravity Constant – Viskositäts-Dichte-Konstante
VLSFO	Very Low Sulfur Fuel - Marinekraftstoff mit einem Schwefelgehalt von < 0,5 Gewichts %
vs.	Versus – im Vergleich zu

WHO	World Health Organization – Weltgesundheitsorganisation
WTZ	WTZ Roßlau gGmbH, das Wissenschaftlich-Technische Zentrum ist ein privates Forschungsunternehmen

Zusammenfassung

Die Seeschifffahrt emittiert große Mengen an Luftschadstoffen, z. B. Schwefeloxide (SO_x), Ruß und Stickstoffoxide (NO_x) sowie klimarelevante Substanzen, z. B. Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Black Carbon (BC). Während für SO_x und NO_x seitens der Internationalen Seeschifffahrts-Organisation (International Maritime Organization, IMO) bereits Grenzwerte implementiert sind, befindet sich die Einführung derartiger Grenzwerte für Black Carbon (BC)-Emissionen derzeit noch in der Diskussion. Ziel dieser Studie ist es, die Grundlagen zu möglichen Aktualisierungen bestehender Luftschadstoffgrenzwerte bzw. Einführung neuer BC-Grenzwerte zu legen.

Zur Erreichung dieses Zieles wurden im ersten Schritt in Kapitel 2 ausgewählte Möglichkeiten zur Emissionsbeeinflussung und deren Bewertung hinsichtlich Wirksamkeit, Verfügbarkeit, Kosten sowie Kombinierbarkeit zusammengestellt. Nach kurzer Diskussion der einzelnen Maßnahmen wurden die Ergebnisse in Form einer Übersichtstabelle sowie einer Matrix mit den Kombinationsmöglichkeiten zusammengefasst.

Im Zusammenhang mit der Kombination einzelnen Maßnahmen stellen sich Fragen nach dem Einfluss der Kraftstoffbeschaffenheit hinsichtlich der BC-Emissionen zum einen und der Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe im Abgas zum anderen. Als wesentliches Merkmal der Kraftstoffqualität wird die Konzentration von aromatischen Kohlenwasserstoffen angesehen, die durch ihr geringes H/C-Verhältnis die BC-Emissionen beeinflussen. Zur Untersuchung dieses Zusammenhangs wurde im Rahmen dieses Projekts eine BC-Messkampagne auf dem Prüfstand durchgeführt und die verwendeten Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, insbesondere ihres Aromatengehalts, analysiert. Die Prüfstandsmessungen fanden an vier Lastpunkten zwischen 25 und 100 % Last statt. Die BC-Emissionen wurden hierbei mittels zweier Messverfahren (Filter Smoke Number FSN sowie Photoacoustic Spectrometer PAS) bestimmt. Neben den BC-Emissionsmessungen wurden des Weiteren elementarer Kohlenstoff sowie die Partikelmassen bestimmt. Sechs Kraftstoffe wurden untersucht: ein sogenannter Gas to Liquid Kraftstoff (GtL) mit 0 % Aromatengehalt, mariner Diesel (DMA) mit 20 % Aromatengehalt, Schweröl (HFO) mit 50 % Aromatengehalt sowie drei Very Low Sulphur Fuel Oils (VLSFO) mit unterschiedlichen Aromatengehalten von 70 %, 80 % und 95 %. Die Untersuchungen zum Einfluss der Kraftstoffqualität sind in Kapitel 3 beschrieben.

Bezüglich der Messverfahren zur BC-Emissionsmessung konnte eine gute Vergleichbarkeit beider Messgeräte festgestellt werden. Insbesondere bei 50 % und 75 % Motorenlast wurde eine eindeutige Korrelation zwischen BC-Emission und Aromatengehalt festgestellt. Nur bei 100 % Motorenlast war der Trend nicht so eindeutig, da die BC Konzentrationen sehr gering waren. Die höchsten BC-Emissionen wurden für alle Kraftstoffe bei 25 % und 75 % Motorenlast gemessen, die niedrigsten bei 100 % Motorenlast. Die BC-Emissionen sind demnach sowohl von der Motorenlast als auch vom Aromatengehalt der Kraftstoffe abhängig. Die hocharomatischen VLSFO mit 70–95 % Aromaten erhöhten die BC-Emissionen um 10–85 % im Vergleich zu HFO und um 67–145 % im Vergleich zu DMA. Die Abhängigkeit der BC-Emissionen von der Kraftstoffqualität konnte deutlich gezeigt werden.

Die Ergebnisse der Messkampagne wurden bereits in zwei IMO Submissionen (PPR 7/8, 2019 und PPR 8/5/1, 2020) veröffentlicht. In den IMO-Submissionen wurde die MEPC-Kommission aufgefordert ISO um die Aufnahme des Aromatengehalts in Form vom H/C-Verhältnis in den ISO-Standard für die Spezifikation mariner Kraftstoffe zu bitten, um sie dem Gesetzgeber und dem Schiffsbetreiber zugänglich zu machen.

Die Frage nach der Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe im Abgas bei Verwendung unterschiedlicher Kraftstoffqualitäten wurde am Beispiel von GtL und DMA erörtert. Das Abgas vom GtL und DMA wurde mit einem Proton Transfer Time of Flight Mass Spectrometer (PTR ToF MS) auf die Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe untersucht. Die Masse an Kohlenwasserstoffen im Abgas war bei DMA deutlich höher als bei GtL. Die Abgase beider Kraftstoffe wurden dominiert von niedermolekularen aliphatischen Abgaskomponenten, deren Gehalt bei beiden Kraftstoffen mit steigender Motorenlast abnahm. Das Abgas von GtL enthielt kaum aromatische Verbindungen, da es aus Aliphaten besteht und bei der Verbrennung sich nur wenige Aromaten gebildet haben.

Bei der Verbrennung von DMA zeigte sich, dass die Gesamtkonzentrationen der gasförmigen Molekülmassen von 25 % bis 100 % Motorenlast zwar abnehmen, aber die relative Konzentration an monoaromatischen und polyaromatischen Kohlenwasserstoffen im Abgas zunehmen. Die aromatische Fraktion im Abgas von DMA ist ca. 2–3-mal so hoch wie im Abgas von GtL.

Die drei Marinekraftstoffe VLSFO mit sehr geringem Schwefelgehalt sowie 70 % bis 95 % Aromatengehalt (Herstellerangaben) wurden hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung mit diversen analytischen Methoden untersucht. Die Analyse mit hochauflösender Flugzeit Massenspektrometrie (high-resolution time-of-flight mass spectrometry; GC-GC-HRTOFMS) erfasste die meisten PAK und Aromaten. Der Anteil der PAKs in den Kraftstoffen mit 73 %, 83 % und 97 % Aromaten (Analyseangaben) betrug jeweils 50 %, 60 % und 76 %.

Zur Entwicklung von Kriterien für einen geeigneten Messstandard sowie einen potentiellen Grenzwert für BC wurden die Ergebnisse mehrere BC-Messkampagnen aus der Literatur zusammengetragen, s. Kapitel 4. Durch die Berücksichtigung von Schnellläufer-, Mittelschnellläufer sowie Langsamläufermotoren wird mit dem Datensatz eine Abdeckung des gesamten für die internationale Schifffahrt relevanten motorischen Leistungs- und Größenspektrums gewährleistet. Im weiteren Verlauf der Untersuchung werden die Ergebnisse unterschiedlicher BC-Messverfahren und -geräte miteinander verglichen. Insgesamt umfasst die Untersuchung 75 Datensätze aus verschiedenen Messkampagnen. Mit 57 Datensätzen wurden die meisten Messungen am Prüfstand und nur 18 Messkampagnen an Bord durchgeführt. An Kraftstoffen wurden verwendet: Rückstands- und Destillatkraftstoff, Tankstellendiesel nach EN-590, LNG sowie GtL. Mehrere Messverfahren werden berücksichtigt, die Wesentlichen sind die bereits genannten Verfahren Filter Smoke Number (FSN) und Photo Acoustic Spectroscopy (PAS) sowie Photoakustisches Extinktiometer (PAX), Laserinduziertes Glühen (LII) sowie Wolkenaerosolniederschlagsspektrometer (Cloud Aerosol and Precipitation Spectrometer (CAPS)).

Bezogen auf den Messwert aus den Mehrfachmessungen der Kampagnen zeigen die Messungen nach dem FSN- und dem PAS-Verfahren mittlere Abweichungen von 9,1 % bzw. 6,5 %. Verglichen mit Genauigkeitsangaben aus dem Automobilbereich zeigt sich somit ein sehr gutes Ergebnis, insbesondere, wenn man berücksichtigt, dass sich die BC-Emissionen von Marinemotoren bezogen auf ein Kilogramm Kraftstoff über drei Größenordnungen erstrecken, nämlich von 0,001 g/kg-fuel bis zu 1 g/kg-fuel. FSN und PAS liefern also vergleichbare bzw. übereinstimmende BC-Messwerte; dies deckt sich mit Aussagen verschiedener bei der IMO eingereichter Berichte (Submissions). Für Probstandsmessungen können beide Verfahren als geeignet angesehen werden, aufgrund der höheren Komplexität des PAS Messgeräts sollte für den Bordeinsatz eher dem FSN Verfahren der Vorzug gegeben werden.

In der vorliegenden Studie werden die BC-Emissionsdaten der einzelnen Messkampagnen in Diagrammen als gemessene BC-Emissionen über der Motorenleistung aufgetragen. Aufgrund der

großen Breite des in der Seeschifffahrt anzutreffenden Leistungsspektrums der Motoren sowie der sich ebenfalls über drei Größenordnungen erstreckenden BC-Emissionen erfolgt die Auftragung in doppelt logarithmischer Darstellung. Die Messdaten werden innerhalb der Diagramme entsprechend ihrer Leistungsklassen und der verwendeten Kraftstoffe zusammengefasst.

Die wichtigsten Aussagen bezüglich der BC-Emissionen die sich aus den Daten ableiten lassen sind:

- ▶ BC-Emissionen sinken mit der Zunahme der Motorengröße bzw. -leistung und mit sinkender Drehzahl.
- ▶ Innerhalb einer Leistungsklasse können Unterschiede in BC-Emission bis zu einem Faktor 10 auftreten.
- ▶ Bei baugleichen Motoren zeigt sich ein Streuband der BC-Emissionen von etwa Faktor 3.
- ▶ Ein geringerer Aromatengehalt im Kraftstoff führt zu niedrigerer BC-Emission, der Aromatengehalt bzw. die Kraftstoffqualität hat einen wesentlichen Einfluss auf die BC-Emission.
- ▶ Aus einer technologieoffenen Sichtweise können LNG- und Dieselbetrieb mit DPF als gleichwertig angesehen werden. Beide Technologien (LNG vs. DPF) führen zu BC-Emission auf gleichem Niveau.
- ▶ Die Vermeidung von erhöhtem CH₄-Schlupf bei Dual Fuel (DF) Mittelschnellläufer-motoren bei Teillast durch Umschalten auf Dieselbetrieb führt zu höheren BC-Emissionen.
- ▶ Ein Wechsel von HFO zu Destillat bei 2-Takt Langsamläufermotoren reduziert die BC-Emission im Schnitt um etwa 41 % bei einer Schwankungsbreite zwischen 78 % Reduktion und 36 % Erhöhung.
- ▶ Ein Wechsel von HFO zu Destillat bei 4-Takt Mittelschnellläufermotoren reduziert die BC-Emission im Schnitt um etwa 31 % bei einer Schwankungsbreite zwischen 74 % Reduktion und 37 % Erhöhung.
- ▶ SCR Betrieb scheint gegenüber EGR Betrieb Vorteile bei der BC-Emission zu bieten.

Ein weiteres Arbeitspaket dieser Studie ist die Entwicklung einer Definition eines potentiellen Grenzwertes für BC-Emissionen. Aufgrund des großen Streubereichs der BC-Emissionen von Motoren gleicher Motorleistung bedürfte es vor Einführung potentieller BC-Grenzwerte der Einigung auf eine Referenz-Kraftstoffqualität. Der Aromatengehalt im Kraftstoff machte in der Messkampagne, die im Rahmen diese Projekts durchgeführt wurde, bis zur Hälfte des Streubandes bezogen auf die gleiche Motorleistung aus. Der Aromatengehalt ist derzeit jedoch nicht in der ISO 8217 festgelegt. Darüber hinaus existiert kein einheitliches Analyseverfahren für alle Marinekraftstoffe. Aus diesen Gründen sind Marinekraftstoffe als Referenz für BC-Zertifizierungen zurzeit nicht geeignet.

Das Streuband (Faktor 3) der BC-Emissionen von baugleichen Motoren erfordert eine Festlegung von Umgebungsbedingungen und ggf. Korrekturfaktoren, vergleichbar mit den IMO Testbedingungen und Korrekturfaktoren für NO_x-Zertifizierungen. Der Einfluss solcher Umgebungsbedingungen ist derzeit jedoch, abgesehen von den Untersuchungen zum Aromatengehalt im Kraftstoff in dieser Studie, nicht hinreichend geklärt. Aufgrund dessen wird eine Grenzwertdefinition derzeit als nicht möglich angesehen.

Eine Alternative zu BC-Emissionsgrenzwerten bestünde in der Schaffung eines Grenzwerts für den Aromatengehalt im Kraftstoff, so dass „low BC-emission fuels“ definiert werden können.

In einem nächsten Schritt könnten Grenzwerte für die realen BC-Emissionen für verschiedene Motorklassen und vorerst für Schiffsneubauten folgen. Basis der Einstufungen der Motoren in Klassen und entsprechender Grenzwerte sollten nach Ansicht der Autor*innen der Studie Prüfstandsmessungen sein. Im Feld könnte eine Überwachung und Kontrolle dann wie oben gezeigt z.B. mit FSN an Bord erfolgen.

Summary

Maritime shipping emits large amounts of air pollutants like Sulphur or Nitrogen oxides (SO_x , NO_x), as well as further substances relevant to the climate like Carbon dioxide (CO_2) and Black Carbon (BC). While the International Maritime Organization (IMO) already implemented limits for the air pollutants SO_x and NO_x , the implementation of limit values for BC-emissions is still under discussion. The objective of this study is to provide the basis for updating existing air pollutant limits or to establish new limits for BC-emissions.

To reach the study's goal, in chapter 2 selected emission control measures are compiled and assessed in terms of their effectiveness, availability, costs and possibilities for combination. After brief discussion of each measure, the results are summarized in an overview table and a matrix showing the possible combinations.

The combination of measures leads to the question of the influence of fuel quality on the BC-emissions on the one hand and to the composition of hydrocarbons in the exhaust gas on the other hand. As the main attribute of fuel quality, the concentration of aromatic hydrocarbons is considered, as it influences the BC-emissions by its low H/C-ratio. The correlation between the H/C-ratio and the BC-Emissions was investigated within this project by a BC measurement campaign on an engine test bed and fuel analyses considering the fuel composition focusing on the content of aromatic hydrocarbons. The measurements on the test bed were conducted at four load points between 25 % and 100 % engine load. BC-emissions were determined using two measuring methods, namely the Filter Smoke Number (FSN) as well as the Photoacoustic Spectrometer (PAS). Besides the measurement of BC-emissions the content of elemental carbon and particle mass were determined. Six different marine fuels were investigated: A Gas to Liquid fuel (GtL) having 0 % aromatic hydrocarbon content, marine diesel fuel (DMA), 20 % aromatic hydrocarbon content), heavy fuel oil (HFO) with 50 % aromatic hydrocarbon content and three Very Low Sulphur Fuel Oils (VLSFO) with differing aromatic hydrocarbon contents (70 %, 80 % and 95 %). The investigations on the influence of fuel quality can be found in Chapter 3.

Both BC-emission measurement methods showed well matching values. Especially at 50 % and 75 % engine load a clear correlation between BC-emissions and aromatic hydrocarbon content in the fuel could be observed. At 100 % engine load the correlation was not so clear due to the low BC concentrations. The highest BC-emissions were measured at 25 % and 75 % engine load, the lowest at 100 %. BC-emissions are dependent on the engine load as well as on the aromatic hydrocarbon content of the fuel. The VLSFO with their high content of aromatic hydrocarbons increase the BC-emissions by 10 to 85 % compared to HFO and by 67 to 145 % in comparison to DMA. The dependency of the BC-emissions on the fuel quality could clearly be shown.

The results of the measurement campaign were already published in two IMO submissions (PPR 7/8, 2019 and PPR 8/5/1, 2020). Within the IMO submissions the MEPC-commission was requested to ask ISO to include the content of aromatic hydrocarbons into the ISO-standard 8217 for marine fuels.

The question of hydrocarbon composition in the exhaust gas when using different fuel qualities was discussed using the example of GtL and DMA. Measurements were done utilizing the Proton Transfer Time of Flight Mass Spectrometer (PTR ToF MS). The hydrocarbon mass in the exhaust gas of DMA was significantly higher than for GtL. The exhaust gases of both fuels were dominated by low-molecular aliphatic components, whose share decreased with increasing engine load. The exhaust gas of GtL contained nearly no aromatic compounds as GtL consists of aliphatic hydrocarbons and only a few aromatic compounds were formed during combustion.

Combustion of DMA showed a decrease of the total concentration of gaseous molecular masses from 25 % to 100 % engine load, while the relative concentration of mono- and polyaromatic hydrocarbons in the exhaust gas increased. The aromatic fraction in the exhaust gas of DMA is about two to three times higher than in the exhaust gas of GtL.

The three VLSFOs with very low Sulphur content and 70 to 95 % aromatic compounds (manufacturer's data) were analyzed regarding their chemical composition utilizing various analytical methods. The analysis using the high-resolution time-of-flight mass spectrometry (GC-GC-HRTOFMS) detected most of the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAK) and aromatic compounds. The fractions of PAK in the fuels with 73 %, 83 % and 97 % aromatic hydrocarbons (analytical data) represented 50 %, 60 % and 76 %.

In order to develop criteria for a suitable measurement standard and a potential limit value for BC, the results of several BC measurement campaigns were compiled from literature, see Chapter 4. By consideration of high speed, medium speed and low speed diesel engines the whole range of engine sizes and power relevant in maritime navigation is covered. In the further course of the study the results of different BC-measurement methods and equipment are compared. In total the study comprises 75 data sets from different measurement campaigns. Most measurements were conducted at test beds (57), 18 campaigns were conducted on board. The following fuels were used: HFO and distillates, road diesel fuel according to EN-590, LNG and GtL. Several measurement methods were applied, the most important are Filter Smoke Number (FSN), Photo Acoustic Spectroscopy (PAS), Photoacoustic Extinctionmeter (PAX), Laser Induced Incandescence (LII) and Cloud Aerosol and Precipitation Spectrometer (CAPS).

In relation to the measurement value from the measurement series of the campaigns the values from the FSN and PAS methods show mean deviations of 9.1 % or 6.5 % respectively. Compared to the accuracy known from automotive sector these are very good results, especially when considering the large range of BC-emissions of marine engines over three orders of magnitude for one kilogram of fuel, i.e., from 0.001 g/kg-fuel to 1 g/kg-fuel. FSN and PAS show comparable or coincident measured BC values, which complies with information from various IMO submissions. For test bed measurements both methods can be considered suitable, due to the higher complexity of the PAS equipment the FSN method seems to be more suitable for on-board measurements.

In this study the BC-emission data of the measurement campaigns are plotted in diagrams as measured BC-emissions against the engine power. Due to the wide range of engine power to be found in maritime shipping and the fact that BC-emissions also extend over three orders of magnitude, the data is plotted in double logarithmic scale. In the diagrams measurement data are grouped according to the engine power class and used fuel.

The main conclusions regarding BC-emissions from the evaluation of the measurement campaigns are:

- ▶ BC-emissions decrease with growing engine size or power respectively and with decreasing engine speed.
- ▶ Within a power class BC-emissions may vary up to a factor of ten.
- ▶ Within engines of the same design BC-emissions may vary up to a factor of three.
- ▶ A lower content of aromatic hydrocarbons results in lower BC-emissions, the content of aromatic hydrocarbons in the fuel, i.e., the fuel quality, has a significant influence on the BC-emission.

- ▶ From a technology neutral approach, the use of LNG as fuel can be considered as equivalent to diesel operation with DPF. Both technologies (LNG vs. DPF) result in similar BC-emissions. Avoiding of increased methane slip of Dual Fuel (DF) medium speed engines operating at partial load by switching to diesel operation leads to increased BC-emissions.
- ▶ Switching from HFO to distillate fuel in 2-stroke low speed diesel engines results in an average BC-emission reduction by 41 % with a range of variation between 78 % reduction and 37 % increase.
- ▶ Switching from HFO to distillate fuel in 4-stroke medium speed engines results in an average reduction of approximately 31 % varying between 74 % reduction and 37 % increase.
- ▶ SCR operations seems to be advantageous regarding BC-emissions compared to EGR operation.

A further task of this study concerns the definition of a potential limit value for BC-emissions. Due to the large range of BC-emissions of engines of similar power an agreement on a reference fuel quality would be required. In the measurement campaign carried out in this project the content of aromatic hydrocarbons in the fuel is responsible for up to half the variation range in BC-emissions. The content of aromatic hydrocarbons is currently not defined in ISO 8217. Therefore, marine fuels are currently not suitable to serve as a reference fuel for BC-certification.

The scatter band (factor 3) of BC-emissions for engines of the same design requires the definition of boundary conditions and if necessary, required correction factors, comparable to IMO test conditions and correction factors for NO_x certification. The influence of boundary conditions is currently not sufficiently investigated, except the investigations regarding the influence of the content of aromatic hydrocarbons in the fuel in this study. Due to the reasons above the definition of a limit value is currently not considered possible.

An alternative to BC-emission limits could be to define a limit for the aromatic content in the fuel, resulting in the definition of 'low BC-emission fuels'. Within the next step limit values for real BC-emissions for different engine classes could be defined, beginning with limit values for ship new buildings. In the opinion of the authors of this study the basis for different engine classes and limits respectively, should be test bed measurements. During service the monitoring and control could be done e.g. with FSN on board as shown above.

1 Einleitung

Die Seeschifffahrt emittiert große Mengen an Luftschadstoffen, z. B. Schwefeloxide (SO_x), Partikel und Stickstoffoxide (NO_x) sowie klimarelevante Substanzen, z. B. Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Black Carbon (BC). Die IMO hat in ihrem Umweltausschuss (Maritime Environment Protection Committee, MEPC) in der Anlage VI der MARPOL Konvention (International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships) lediglich Grenzwerte für die Luftschadstoffe NO_x (Regel 13) und SO_x (Regel 14) im Abgas implementiert. MARPOL enthält sowohl global als auch lokal in besonders regulierten Sondergebieten (Emission Control Areas, ECAs) gültige Grenzwerte. Alternativ können nach Annex VI Regel 4 alternative Verfahren, Methoden oder Kraftstoffe eingesetzt werden, um die jeweiligen Grenzwerte einzuhalten. Die Einführung von Emissions-Grenzwerten bzw. Minderungsmaßnahmen für BC wird seit 2011, also seit der 62-ten Sitzung (MEPC 62, 2011) international verhandelt. Dort einigten sich die Mitgliedstaaten auf einen Arbeitsplan, um den Einfluss der BC-Emissionen der internationalen Schifffahrt auf die Arktis zu prüfen und unterwies den Unterausschuss für flüssige und gasförmige Massengüter (BLG, Bulk Liquids and Gases, jetzt PPR, Pollution Prevention and Response) diese Arbeit in folgenden Schritten durchzuführen:

1. eine Definition für Black Carbon zu entwickeln,
2. die passendsten BC-Messmethoden für die internationale Schifffahrt zu identifizieren. Darunter fällt auch die Entwicklung eines „Measurement Reporting Protocols“.
3. sowie Untersuchung geeigneter Kontrollmechanismen zur Minderung der BC Wirkung auf die Arktis.

2015 wurden die Arbeiten zu Punkt 1 mit der Entscheidung, BC durch die Definition von Bond, T.C. et al., 2013 zu definieren, abgeschlossen.

Nach der Definition von Bond et al., 2013 ist BC ein kohlenstoffhaltiges Material, welches sich nur in Flammen bei der Verbrennung von Kohlenstoff-basierten Treibstoffen bildet. BC weist eine einmalige Kombination der folgenden physikalischen Eigenschaften auf:

1. BC absorbiert Licht bei einer Wellenlänge von 550 nm,
2. BC ist refraktär, mit einer Verdampfungstemperatur nahe 4000 K,
3. BC ist unlöslich in Wasser und organischen Lösemitteln,
4. BC besteht aus einem Aggregat von kleinen Kohlenstoffkugeln.

Dabei ist diese Entscheidung zu Gunsten einer messmethodenneutralen „politischen“ Definition im Gegensatz zu einer alternativen messmethodenspezifischen „technischen“ Definition bei einer Einführung von Grenzwerten hinderlich, siehe dazu auch die Ausführungen unter 4.2.1. Es konnte bei der IMO jedoch keine Einigung zugunsten einer einheitlichen technischen Definition erzielt werden. Bisher ist noch unklar, an welcher Stelle bzw. zu welchem Zeitpunkt die BC-Emissionen von Schiffen gemessen werden sollen. Die BC-Emissionen der Motoren können bei der Zulassung eines Schiffsmotors am Probestand, erstmalig im eingebauten Zustand zur Probefahrt auf See oder im laufenden Betrieb an Bord gemessen werden. Außerdem ist zu unterscheiden, ob die BC-Emission des individuellen Motors oder nach einer möglichen Abgasnachbehandlung oder auch andere BC-Emittenten wie z.B. Dampf- oder Heißwasserkessel an Bord betrachtet werden sollen. Analog zu anderen Luftschadstoffen stehen auch beim BC sowohl technische als auch operative Maßnahmen als Reduktionsmaßnahmen zur Diskussion. Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen zur Minderung von anderen Luftschadstoffen und denen zur Minderung von BC sind zu erwarten. Als Beispiel wird hier das seit 2020 geltende globale Schwefellimit von 0,5 % in Schiffstreibstoffen angeführt. Zur Erreichung dieses Grenzwertes werden z. B. die derzeit gängigen Schweröle (< 3,5 % Schwefelgehalt) mit

schwefelarmen Kraftstoffen gemischt. Einige Studien haben ergeben, dass die Verbrennung von Schweröl und dessen Gemischen besonders hohe BC-Emissionen zur Folge haben, ein Umstieg auf schwefelarme Destillatkraftstoffe jedoch eine signifikante Reduktion der BC-Emissionen bewirken kann.

Zur Minderung der Luftschadstoffemissionen bzw. zur Einhaltung bestehender Grenzwerte werden aktuell eine Vielzahl an Maßnahmen erwogen bzw. bereits eingesetzt. Dazu zählen insbesondere die Nutzung alternativer Kraftstoffe zum Schweröl (z.B. Erdgas, Diesel, Schiffsdiesel, Marinedieselöl, Wasserstoff), alternativer Antriebe und Motorenkonzepte sowie Abgasnachbehandlungssysteme. Die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten der Maßnahmen werden in ihrer Komplexität noch verstärkt, wenn z. B. Kraftstoffe auch kombiniert zum Einsatz kommen und diese jeweils eigene Anforderungen an Motor und Abgasnachbehandlungssystem stellen. Diese Studie soll dazu beitragen, die Kenntnisse über Einflüsse auf BC-Emissionen zu vergrößern sowie die Möglichkeit der Einführung von BC-Grenzwerten sowie deren Überwachung im Schiffsbetrieb darzulegen. Hierzu wird in ihrem ersten Teil (Kapitel 2) eine Bestandsaufnahme technischer Maßnahmen zur Beeinflussung von Emissionen zusammengetragen und es werden Übersichten über deren Wirksamkeit und Kombinationsmöglichkeiten gegeben und bewertet (siehe Tabelle 2 sowie deren extern herunterzuladende Version im xlsx-Format).

Einen wesentlichen Einflussfaktor auf die BC-Emissionen stellt nach Ansicht der Autor*innen die Qualität des verwendeten Kraftstoffs, insbesondere dessen Aromatengehalt, dar. Ein steigender Aromatengehalt geht einher mit einem abnehmenden Massenanteil von Wasserstoff im Verhältnis zum Kohlenstoff (H/C-Verhältnis) im Kraftstoff, wodurch ein Zusammenhang zwischen Aromatengehalt und BC-Emissionen zu erwarten ist. Daher wurde im Rahmen des Projektes eine Messkampagne auf einem Motorenprüfstand durchgeführt, bei der der Aromatengehalt des Kraftstoffs variiert und die BC-Emissionen an verschiedenen Lastpunkten gemessen wurden. Die Kampagnen und die Ergebnisse sind im zweiten Teil (Kapitel 3) der Studie dargestellt.

Im dritten Teil (Kapitel 4) der Studie werden die Ergebnisse verschiedener Messkampagnen aus der Literatur zusammengetragen, um ein umfassendes Bild über die BC-Emissionen aller im Schiffsbetrieb relevanter Größen- bzw. Leistungsklassen der Motoren zu erhalten.

Als Beitrag zur Klärung oben angesprochener Fragestellungen werden im Rahmen dieser Studie Ausgangspunkte zur Einführung von BC-Grenzwerten, deren Kontrollmechanismen und Minderungsmaßnahmen erarbeitet.

2 Maßnahmen zur Beeinflussung von Luftschadstoff- und Black Carbon-Emissionen von Seeschiffen und deren Wirkung

Für die Luftschadstoffe SO_x und NO_x liegen in der Gesetzgebung der internationalen Seeschifffahrtsorganisation IMO Grenzwerte (MARPOL Anlage VI, Regeln 13 und 14) vor, die gegebenenfalls entsprechend der Weiterentwicklung der technischen und operativen Möglichkeiten aktualisiert werden können, um Mensch und Umwelt vor den negativen Emissionen zu schützen. Im Gegensatz dazu gibt es für Black Carbon (BC)-Emissionen aus der internationalen Schifffahrt, trotz seiner Luftschadstoff- und Klimawirksamkeit, derzeit keine Grenzwerte.

Zur Initiierung eines Aktualisierungsprozesses der Grenzwerte für die Luftschadstoffe SO_x und NO_x sowie einer möglichen Definition von Grenzwerten für BC-Emissionen werden an dieser Stelle die derzeit verfügbaren technischen und operativen Maßnahmen aus den Bereichen des Einsatzes alternativer Kraftstoffe, alternativer Antriebs- und Motorenkonzepte sowie Abgasnachbehandlung dargestellt und hinsichtlich ihrer Kombinierbarkeit, ihrer Wirtschaftlichkeit, ihrer aktuellen und zukünftigen Umsetzbarkeit sowie ihrer umweltpolitischen Zukunftsfähigkeit systematisch untersucht und aufgeschlüsselt.

Die Arbeiten sind im Zuge einer durch DNV Mitarbeiter betreuten Masterarbeit erfolgt (Klepsch, 2020). In dieser wird zunächst ein Überblick über die Entstehung von Stickstoff- und Schwefeloxiden gegeben, ihre Relevanz in Bezug auf Gesundheit und Umwelt sowie den Stand der Technik hinsichtlich der Motorentechnik, verwendeter Kraftstoffe in der Seeschifffahrt und Anforderungen an Technologien zum maritimen Einsatz.

Im Anschluss werden die Emissionsminderungsverfahren vorgestellt und bezüglich der jeweiligen Reduktionspotentiale, technischen Einschränkungen und der Kosten bewertet. Alle Maßnahmen sind in der Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Im Wesentlichen lassen sich die Möglichkeiten zur Emissionsreduktion bei Verbrennungsmotoren in folgende drei Gruppen einteilen:

- ▶ Nutzung eines alternativen oder besseren Kraftstoffs. Einsparpotentiale beziehen sich im Rahmen dieser Studie stets auf die Verwendung von Schweröl als Basis.
- ▶ Veränderung des Verbrennungsprozesses durch motorische Maßnahmen
- ▶ Abgasnachbehandlung

Hinzu kommen weitere Möglichkeiten, für die sich eine Gruppierung aufgrund der geringen Anzahl der Einzelmaßnahmen nicht anbietet.

Die Übersicht über die Reduktionsmöglichkeiten von Schadstoffemissionen bezieht sich auf den Stand der Technik zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit im Januar 2020. Dieser wird sich natürlich mit der Zeit verändern, ebenso werden zukünftig weitere Reduktionspotentiale durch neu entwickelte Technologien hinzukommen, so dass sich auch die Schlüsse und Empfehlungen, die sich aus der Betrachtung der Schadstoffeinspartechnologien ergeben, ändern werden. Anhand der Tabelle 2 lässt sich die Vielzahl gegenseitiger Abhängigkeiten und Einflüsse erkennen, die mit zunehmenden Möglichkeiten weiter wachsen werden.

Generell lässt sich folgendes Aussagen:

- ▶ Alternative Kraftstoffe haben das größte Reduktionspotential für kraftstoffbedingte Luftschadstoffe, in Bezug auf Stickstoffoxide ist das Reduktionspotential allerdings begrenzt, da diese bei der Verbrennung entstehen. Über den Aspekt der Luftschadstoffe hinaus können alternative Kraftstoffe einen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten.
- ▶ Maßnahmen im Bereich Antriebs- und Motorentechnik sind anwendbar zur Reduktion von Stickstoffoxid- oder Partikelemissionen, insgesamt ist das Reduktionspotential ebenfalls begrenzt. Kurzfristig kommt insbesondere die Abgasrückführung zur Minderung von Stickstoffoxiden (NO_x) in Frage.
- ▶ Verschiedene Abgasnachbehandlungssysteme, insbesondere Dieselpartikelfilter und Oxidationskatalysatoren, reagieren empfindlich auf Schwefel. Durch weitere Verringerungen des Schwefelgehalts der Kraftstoffe kann hier zusätzliches Reduktionspotential erschlossen werden.
Die Verwendung von Scrubbern kann weitere Abgasnachbehandlung erschweren, da hiermit die Abgastemperaturen gesenkt werden. Darüber hinaus stehen Scrubber teils in der Kritik, da die Schadstoffproblematik von der Luft ins Meer verlagert wird.

Einsatz alternativer Kraftstoffe

Herkömmlich in der Seeschifffahrt verwendete Kraftstoffe sind im Wesentlichen Schweröl (HFO), Marine Gasöl (MGO) und Marine Dieselöl (MDO). Unter diesen hat HFO als Rückstandskraftstoff den höchsten Schwefelgehalt, gefolgt von MDO als Mischung von MGO und HFO. Den geringsten Schwefelanteil weist MGO als reiner Destillatkraftstoff auf. Allgemein variieren die Schwefelgehalte von HFO und MDO je nach Herkunft des Rohöls bzw. den jeweiligen Mischungsverhältnissen. Der Schwefelgehalt im Kraftstoff beeinflusst direkt die SO_x Emissionen im Abgas. Durch die Verwendung von schwefelärmeren Kraftstoffen, wie MGO, können zum Beispiel die SO_x Grenzwerte in den ECAs eingehalten werden. Zur Verwendung entschwefelter Schweröle liegen derzeit zu wenige Erfahrungen vor, um deren zukünftigen Einsatz beurteilen zu können. Die fossilen Kraftstoffe LNG oder LPG werden in der Regel als „alternative Kraftstoffe“ bezeichnet, da sie jedoch weiterhin fossilen Ursprungs sind, kann diese Bezeichnung irreführend sein.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der Einsatz folgender Kraftstoffe auf das Emissionsverhalten bewertet:

- ▶ Destillatkraftstoff (MGO)
- ▶ LNG
- ▶ LPG
- ▶ Biodiesel
- ▶ Methanol
- ▶ Wasserstoff
- ▶ Ammoniak
- ▶ Power to X
- ▶ Oxymethylenether (OME)

Nicht berücksichtigt wurden die Nutzung von Kernenergie aufgrund allgemeiner Sicherheitsbedenken sowie schwieriger genehmigungsrechtlicher Fragen und der Einsatz kolloidaler Katalysatoren, bei denen der erforderliche Einsatz gezielter Verunreinigungen des Kraftstoffs dem Ziel der Emissionsreduktion wahrscheinlich entgegenstehen werden.

Die oben aufgeführten Kraftstoffe sind in Bezug auf HFO schwefelärmer bzw. -frei, was die Einhaltung der SO_x-Grenzwerte (global als auch in den SECAs) ermöglicht. Ihr Einsatz kann jedoch mit Nachteilen verbunden sein wie:

- ▶ mögliche geringere Energiedichte als HFO, die bei der Anwendung auf Schiffen zu Herausforderungen hinsichtlich der verfügbaren Tankkapazitäten und -intervalle führen kann.
- ▶ eingeschränkte (globale) Verfügbarkeit, insbesondere bei Berücksichtigung des weltweiten Bedarfs, fehlende Bunkerinfrastruktur
- ▶ hoher Aufwand im Nachrüstungsfall: Kosten, technische Probleme wie andere Tankanforderungen, hohe Auflagen im Bereich von Sicherheit, insbesondere bei den gasförmigen Kraftstoffen Wasserstoff und LNG, die explosionsfähige Luftgemische bilden können.

Kurzfristig nutzbar sind fossiles LNG und LPG, beschränkt auch Biokraftstoffe. Das Potential zur Emissionsreduktion betrifft hauptsächlich SO_x, in Bezug auf NO_x ist das Reduktionspotential – ohne weitere Maßnahmen – gering.

Einsatz motorischer Maßnahmen

Die herkömmlich in der Seeschifffahrt eingesetzten Verbrennungsmotoren zur Erzeugung der Antriebsleistung sowie der elektrischen Energieversorgung arbeiten nach dem Diesel- oder Ottoprinzip, im Zwei- oder Viertaktverfahren sowie einem breiten Leistungsbereich.

Von besonderer Wichtigkeit in der Seeschifffahrt ist die Zuverlässigkeit dieser Systeme, da z.B. die Manövrierfähigkeit eines Schiffes stets gegeben sein muss. Dieses erfordert, dass die Emissionsreduktionsmaßnahmen die Zuverlässigkeit der Antriebsanlage nicht gefährden dürfen. Neben dem Aspekt der Anlagenverfügbarkeit und -sicherheit werden in dieser Studie Fragen des eingeschränkten Platzangebots an Bord von Schiffen, Faktoren wie Anlagengewicht, der Aufwand für die Systemimplementierung sowohl im Neubau als auch als Retrofitlösung sowie die Investitions- und Betriebsaufwände bewertet.

Im Rahmen dieser Studie wurde der Einsatz folgender motorischer Maßnahmen auf das Emissionsverhalten bewertet:

- ▶ Kraftstoff-Wasseremulsion
- ▶ Common Rail
- ▶ Slide-Valve
- ▶ Humid Air Motor

Nicht berücksichtigt wurden andere Maßnahmen zur Motorsteuerung. Diese werden exemplarisch am Beispiel Slide-Valve behandelt. Die motorischen Maßnahmen können zur Minderung von Stickstoffoxiden beitragen, weisen jedoch grundsätzlich ein geringes Potential auf.

Abgasnachbehandlung

Aus dem Bereich der Abgasnachbehandlung werden folgende Maßnahmen berücksichtigt:

- ▶ Scrubber
- ▶ Zyklonabscheider
- ▶ Elektrofilter
- ▶ Abgasrückführung
- ▶ SCR-Katalysator
- ▶ Dieselpartikelfilter
- ▶ Dieseloxidationskatalysator

Weitere Möglichkeiten zur Reduktion der Emission von Luftschadstoffen

Als weitere Möglichkeiten zur Reduktion von Luftschadstoffemissionen wurden betrachtet:

- ▶ Slow Steaming
- ▶ Batterie-Hybrid Antriebe

Reiner Batteriebetrieb wurde aufgrund der heute nutzbaren eingeschränkten Reichweiten nicht betrachtet, ebenso wie die Einsparmöglichkeiten durch Air Lubrication, Landstrom im Hafen sowie Windantrieb, da der Fokus auf Antriebstechnologien lag.

2.1 Bewertung der Technologien zur Minderung von Luftschadstoffen

2.1.1 Einsatz alternativer Kraftstoffe

Destillatkraftstoffe

Aufgrund der höheren Reinheit von Destillatkraftstoffen im Vergleich zu Schweröl, insbesondere durch ihren reduzierten Schwefelgehalt, kommt es zu verminderten SO_x-Emissionen. Die SO_x-Emissionen sind direkt abhängig vom Schwefelgehalt des verwendeten Kraftstoffs. Die 2020 erfolgte Reduzierung der Schwefelgrenzwerte von 3,5 % auf 0,5 % Schwefelanteil (MARPOL Anlage VI) führte zu einer Reduktion der Schwefeloxidemissionen von 85,7 %. NO_x-Reduktionen erfolgen durch den Einsatz von Destillatkraftstoffen statt Schweröl nicht (IMO, 2015), (Mundt, 2019). Die BC-Emissionen sinken um bis zu 80 % (IMO, 2015)

Motoren, die mit Schweröl betrieben werden, können grundsätzlich auch mit Destillatkraftstoffen betrieben werden, wobei dann auch die Aufwände zur Kraftstoffaufbereitung (Vorwärmung, Separation) an Bord entfallen. Dauerhafte Umstellung von Schweröl auf Destillatkraftstoffe kann ggf. Durch angepasste Einspritzdüsen, andere Kraftstoffpumpen und -filter sowie eine Kraftstoffkühlung optimiert werden. Die Treibstoffkosten sind höher als bei der Verwendung von Schweröl. Die Treibstoffkosten machen etwa die Hälfte der Gesamtkosten des Schiffsbetriebs aus, sie sind somit von besonderer Bedeutung.

LNG

Das Einsparpotential in Bezug auf SO_x beträgt 100 %, da LNG keinen Schwefel enthält. Allerdings ist eine geringe Menge Zündöl erforderlich in der Größenordnung 1 % bis 3 % (MAN Diesel & Turbo, 2014), welches abhängig von seinem Schwefelgehalt das Einsparpotential reduziert.

Wegen der niedrigeren Temperaturspitzen bei der Verbrennung kommt es daneben zu einer Reduktion der NO_x-Emissionen. Diese beträgt bei Dieselmotoren etwa 30 %, bei Ottomotoren ca. 75 % (Mundt, 2019). Die bis zu ca. 25 % verminderten CO₂-Emissionen (Lindstad et al., 2020) werden je nach Motortyp durch ggf. vorhandenen Methanschlupf aufgewogen bzw. sogar überkompensiert, da Methan ein erheblich größeres Treibhauspotential als CO₂ besitzt. Somit kommt es beim LNG-Einsatz nicht automatisch auch zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen.

Nachteilig bei der Verwendung von LNG im Vergleich zu Schweröl ist der erhöhte Platzbedarf für die Tanks bedingt durch die auf das Volumen bezogene etwa 43 % geringere Energiedichte sowie die noch nicht weltweit verfügbare Bunker-Infrastruktur. Als Kraftstoff mit niedrigem Flammpunkt sowie der mit der tiefkalten Lagerung im verflüssigten Zustand verbundenen Gefahren geht die Verwendung von LNG an Bord von Schiffen mit besonderen Maßnahmen hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen einher. LNG als Kraftstoff an Bord von Schiffen erfordert die Berücksichtigung des IGF-Codes der IMO und ist bereits in diesem geregelt, was den Genehmigungsprozess vereinfacht. Die Nutzung von LNG erfordert sehr hohe Investitionskosten, sowohl für Neubauten als auch im Retrofit.

LPG

LPG enthält keinen Schwefel, somit ist das Reduktionspotential für SO_x-Emissionen bezogen auf Schweröl 100 %. Allerdings wird bei der Verwendung von LPG eine gewisse Menge Dieselmotorkraftstoff benötigt, so dass das Einsparpotential insgesamt verringert ist auf etwa 90–97 % (Brinks und Chryssakis, 2017). Ebenso wie bei LNG verringern sich die NO_x-Emissionen bei Dieselmotoren um ca. 10–20 % (DNV GL, 2019b), bei Ottomotoren um ca. 70 % (Mundt, 2019), jeweils verglichen mit Schweröl. CO₂-Emissionen gehen um etwa 16 % zurück (DNV GL, 2019b).

LPG ist wie LNG ein Kraftstoff mit niedrigem Flammpunkt und unterliegt somit besonderen Anforderungen. Anders als LNG ist LPG derzeit nicht im IGF-Code berücksichtigt, so dass zurzeit ein erhöhter Aufwand bei der Genehmigung besteht. Die Kosten der Installation der zur Nutzung von LPG erforderlichen Systeme betragen etwa die Hälfte derjenigen einer LNG Installation, insbesondere, da die Anlagen nicht kältebeständig sein müssen. Das Tankvolumen für LPG beträgt ca. das dreifache des Tankvolumens für Ölkraftstoffe (Brinks und Chryssakis, 2017).

Biokraftstoffe / Biodiesel

Das Einsparpotential von Luftschadstoffen bei der Verwendung von Biokraftstoffen hängt von Art und Herstellungsverfahren des Kraftstoffs ab, eine Bewertung ist somit nicht allgemein möglich. Reiner Biodiesel ist praktisch schwefelfrei. Bezüglich der Emission von Stickstoffoxiden variieren die Angaben von gleichbleibend bis zu leicht steigend, insbesondere bei Nutzung von Biodiesel in Dieselmotoren.

Die Gesamtbilanz der Treibhausgase beim Einsatz von Biokraftstoffen kann problematisch sein, so z.B. bei Erzeugung von Biokraftstoffen auf Flächen, die zuvor anderer oder keiner landwirtschaftlichen Nutzung unterlagen. Ein positiver Einfluss auf die Emission von Treibhausgasen beim Einsatz von Biokraftstoffen kann nur erwartet werden, wenn dieser aus Alt- oder Reststoffen hergestellt wird.

Bezüglich des Flammpunkts liegt Biodiesel höher als herkömmlicher Diesel für den maritimen Gebrauch, besondere Sicherheitsmaßnahmen entfallen daher. Im Falle hoher Beimischungen von Biodiesel zu herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff können ggf. Anpassungskosten anfallen in der geschätzten Größenordnung von weniger als 5 % der Motorenkosten.

Methanol

Die Verwendung von Methanol in Verbrennungsmotoren führt zu keinen Schwefeloxidemissionen, da Methanol schwefelfrei ist. Die Stickstoffoxidemissionen sinken bei Dieselmotoren um ca. 30 %, bei Ottomotoren um bis zu 60 % (Mundt, 2019).

Methanol ist ein Kraftstoff mit niedrigem Flammpunkt, so dass auch hier für die Nutzung an Bord von Schiffen erhöhte Sicherheitsanforderungen zu beachten sind. Methanol ist wie LPG derzeit nicht durch den IGF-Code der IMO abgedeckt, so dass auch hier derzeit ein erhöhter Genehmigungsaufwand vorliegt.

Wasserstoff

Die Emissionen von Luftschadstoffen hängen von der Einsatzart des Wasserstoffs. Bei Erzeugung elektrischer Energie durch eine Brennstoffzelle ergeben sich keine lokalen Emissionen, beim Einsatz in einem Verbrennungsmotor werden zwar keine Schwefeloxide emittiert, jedoch werden Stickstoffoxide freigesetzt, allerdings in deutlich geringerem Maße als bei der Verbrennung von Schweröl. Die Reduktion bei Dieselmotoren beträgt etwa 30 %, bei Ottomotoren 70 % im Vergleich zu Schweröl. Die Emissionen von Treibhausgasen bei der Erzeugung des Wasserstoffs sind jedoch nur bei der Herstellung aus erneuerbaren Energien vernachlässigbar. Der globale Anteil des aktuell mittels erneuerbarer Energie erzeugten Wasserstoffs beträgt nur ca. 4 % (MariGreen, 2018).

Mit der Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff gehen verschiedene Schwierigkeiten einher: Aufwändige Lagerung, geringe Energiedichte führt zu großem Platzbedarf und Verluste durch Boil-Off-Gas. Derzeit steht keine Infrastruktur zur Nutzung als Schiffskraftstoff zur Verfügung. Hinzu kommt die Gefährdung durch potentielle Bildung explosiver Luftgemische. Aufgrund des niedrigen Flammpunktes unterliegt Wasserstoff dem IGF-Code, ist in diesem derzeit noch nicht berücksichtigt, so dass zurzeit ein individueller Genehmigungsaufwand für die Verwendung an Bord von Schiffen erforderlich ist.

Für den Einsatz an Bord von Schiffen geeignete Brennstoffzellen befinden sich derzeit noch in der Entwicklung. Erste Prototypen sind in Betrieb, jedoch mit im Vergleich zu Verbrennungsmotoren noch sehr hohen Kosten. Darüber hinaus sind hohe Kosten für die Lagerung an Bord und Sicherheitseinrichtungen anzusetzen.

Ammoniak

Das Potential zur Reduktion von Luftschadstoffemissionen ist sehr hoch. Bei Reformierung und Verwendung in Brennstoffzellen fallen keine lokalen Emissionen an. Wie bei Wasserstoff fallen bei der konventionellen Verbrennung nur NO_x- und ggf. Lachgas-Emissionen mit den damit verbundenen sehr hohem Global Warming Potential (GWP) von ca. 300 an (IPCC, 2021).

Ammoniak dient bereits heute als chemischer Träger von Wasserstoff, da Ammoniak deutlich einfacher zu transportieren und zu lagern ist. Verglichen mit Schweröl hat Ammoniak etwa den dreifachen Platzbedarf bei gleicher Energiemenge. Es ist sowohl eine Verwendung in Verbrennungsmotoren als auch nach Reformierung in Brennstoffzellen möglich. Derzeit sind jedoch keine geeigneten Motoren oder Brennstoffzellen für den Einsatz an Bord verfügbar. Ammoniak erfordert aufgrund seiner Gefährlichkeit für Umwelt und Gesundheit besondere Sicherheitsvorkehrungen an Bord, diese sind jedoch durch die Erfahrungen mit dem Transport von Ammoniak durch Schiffe bekannt. Da auch Ammoniak derzeit nicht im IGF-Code berücksichtigt ist, gibt es auch bei seiner Verwendung an Bord einen erhöhten Genehmigungsaufwand. Als Kostenfaktoren sind bei Einsatz von Ammoniak als Kraftstoff der erhöhte Platzbedarf, die Sicherheitsvorkehrungen, Brennstoffzellen und ggf. Verwendung ammoniakbeständiger kraftstoffführender Bauteile zu nennen.

Power-to-X (PtX)

Power-to-X bezeichnet durch Einsatz von Elektrizität hergestellte synthetische Kraftstoffe. Vorausgesetzt der hierzu benötigte Strom wird erneuerbar erzeugt und das ggf. benötigte CO₂ stammt aus der Atmosphäre, kann der erzeugte Kraftstoff insgesamt als klimaneutral bezeichnet werden. Diese Kraftstoffe sind schwefelfrei und erzeugen somit keine SO_x-Emissionen. Je nach Kraftstoff, bleiben jedoch mögliche lokale Luftschadstoffemissionen bestehen, z.B. NO_x. Die Menge an NO_x-Emissionen liegt auf dem Niveau derer vergleichbarer fossiler Brennstoffe. Je nach Zusammensetzung verbrennen die PtX-Kraftstoffe mit geringen, sehr geringen oder sogar ohne BC-Emissionen. Dies wird durch GtL als einem flüssigen Vertreter dieser PtX Kraftstoffe, jedoch im Projekt noch auf fossiler Basis aus Erdgas synthetisiert, nachgewiesen. Andere PtX Vertreter können z. B. e-Methan, e-Methanol, e-Wasserstoff, e-OME oder e-NH₃ auf Basis von erneuerbar erzeugtem Strom sein.

Je nach Kraftstoff kann bei der Verwendung synthetischer Kraftstoffe die Möglichkeit bestehen, vorhandene Kraftstoffe direkt zu ersetzen. Es bedarf dann keiner Anpassung an den Motoren, Tanks und der Versorgungsinfrastruktur. Auch anteilige Zumischungen (Blends) sind möglich. Als PtX im Seeverkehr sind derzeit in der Diskussion e-NH₃, e-MeOH sowie e-CH₄.

Aufgrund der geringen Effizienz der Erzeugungsprozesse erfordert die Herstellung der entsprechenden Kraftstoffe sehr große Mengen an Energie. Diese steht aktuell aus regenerativen Quellen bei Weitem nicht zur Verfügung, selbst wenn nur der Bedarf der Schifffahrt gedeckt werden soll. Derzeit ist die Verfügbarkeit von PtX-Kraftstoffen sehr gering, so dass zum heutigen Zeitpunkt eine Verwendung in der Seeschifffahrt nicht realistisch ist.

Oxymethylenether (OME)

OME sind ebenfalls synthetisch hergestellte Kraftstoffe, die chemisch jedoch vom Aufbau der oben beschriebenen PtX bzw. herkömmlichen Kraftstoffe abweichen. Dieser veränderte Aufbau führt zur Möglichkeit einen sehr sauber verbrennenden, CO₂-neutralen Kraftstoff zu erzeugen. Je nach Aufbau des OME sind sowohl hoher Flammpunkt und eine hohe Cetanzahl möglich. Es ist möglich durch innermotorische Maßnahmen gleichzeitig Partikelaustritt und NO_x-Emissionen zu optimieren. Die Umweltverträglichkeit und Toxizität sind unproblematisch.

Die Energiedichte liegt unter der Dichte konventioneller Kraftstoffe, so dass etwa das 1,7-fache Tankvolumen vorgesehen werden muss. Im Falle des Betriebs mit reinem OME ohne Dieseleanteil müssen gewisse Anpassungen am Motor, z.B. andere Einspritzdüsen und -pumpen, vorgenommen werden.

Die Produktion von OME befindet sich derzeit noch in der Entwicklung, ein zeitnahe Einsatz ist daher nicht möglich.

2.1.2 Einsatz innermotorischer Maßnahmen

Kraftstoff-Wasseremulsion

Mit der Kraftstoff-Wasseremulsion werden gleichzeitig NO_x- und Partikelemissionen reduziert. Der Einsatz kann zu NO_x-Reduktionen von bis zu 50 % führen, diese reichen jedoch nicht zur Einhaltung der Tier-III Werte. Gleichzeitig werden hohe BC-Emissionsreduktionen von bis zu 90 % erzielt.

Der Einbau bzw. die Nachrüstung derartiger Systeme kosten ca. 10–25€/kW für Neubauten und 30–65 €/kW für Nachrüstungen. Aufgrund möglicher Korrosionsprobleme ist nicht jeder Motor für Nachrüstungen geeignet.

Common Rail (Speichereinspritzung)

Durch Common Rail Einspritzsysteme können Zeitpunkt, Dauer und Anzahl der Kraftstoffeinspritzungen je Arbeitstakt flexibel gesteuert werden, wie es bei herkömmlichen Pumpe-Düse-Systemen nicht möglich ist. Die hohen Einspritzdrücke führen zu einer Verringerung der Partikelemissionen, die durch Nacheinspritzung weiter reduziert werden können. Bei PM beträgt das Einsparpotential 60–85 % (Buchholz et al., 2016), bei Black Carbon etwa 15 %. Die Reduktion der BC-Emissionen kann durch weitere Maßnahmen wie „Miller Timing“ und zweistufige Turboaufladung weiter gesteigert werden. (Wang et al., 2019) gibt ein Reduktionspotential von 21 % für NO_x an. Zu beachten ist, dass eine Reduktion der BC-Emissionen mit einer Erhöhung der NO_x-Emissionen einhergeht und umgekehrt. Die Common Rail Technik kann also nur zur Optimierung einer Art der Emission verwendet werden, da der andere dann steigt. Sie kann jedoch eingesetzt werden, um andere Technologien zu unterstützen. Beispielsweise kann durch Nacheinspritzung die Abgastemperatur im niedrigen Lastbereich für SCR-Katalysatoren, die eine hohe Abgastemperatur benötigen, erhöht werden.

Nachrüstungen von Common Rail Systemen sind möglich. Nachteilig ist der Verlust der Typenzulassung des Motors bei einem Retrofit, der eine Neuzertifizierung erfordert.

Slide-Valve

Durch Slide-Valves lässt sich die Verbrennung durch Verbesserung des Sprühbildes verbessern. Dies führt im Wesentlichen zu einer Verringerung der NO_x-Emissionen um bis zu 20 % (Andersson et al., 2016). Die Veränderungen der Partikelemissionen sind hierbei stark einzelfallabhängig, (Corbett et al., 2010) gibt für PM und BC Einsparpotentiale zwischen 10 % und 50 % an.

Nachrüstungen sind möglich und kostengünstig realisierbar, allerdings nur bei langsamlaufenden Zweitaktmotoren. Im Neubau sind Slide Valves seit dem Jahr 2000 Standard. Bei älteren Schiffen ist eine Nachrüstung ggf. Voraussetzung für Slow Steaming.

Humid Air Motor (Ansaugluftbefeuchtung)

Beim Humid Air Motor werden die NO_x-Emissionen reduziert, ähnlich wie bei der Kraftstoff-Wasser-Emulsion. Das Einsparpotential beträgt bis zu 40 %, bei zusätzlicher Erwärmung der Ansaugluft bis zu 65 %. Die Tier-III Anforderungen an den NO_x-Ausstoß lassen sich hiermit nicht erfüllen, so dass eine Anwendung selten sinnvoll erscheint. Anders als bei der Kraftstoff-Wasser-Emulsion wird das Wasser dem Verbrennungsprozess nicht über den Kraftstoff, sondern über die Verbrennungsluft zugeführt. Die Wirkung beruht auf einer Absenkung der Verbrennungstemperatur durch die hohe Wärmekapazität des Wassers. Die Verwendung verdunsteten Seewassers zur Befeuchtung der Verbrennungsluft kann zu Korrosionsproblemen führen. Die PM-Emissionen steigen zwischen 20 und 40 % an, je nach Wasseranteil (Koehler, o.J.).

Nachrüstungen sind bei vorhandenem Platz mit relativ hohen Investitionskosten möglich und wurden in Einzelfällen durchgeführt.

2.1.3 Abgasnachbehandlung

Scrubber (Abgaswäscher)

Scrubber werden zur Reduzierung von Schwefeloxiden aus dem Abgas eingesetzt. Das SO_x-Reduktionspotential beträgt bis zu 98 % (Fridell und Salo, 2014; Lloyd's Register, 2012). Das in der Schifffahrt hauptsächlich verwendete Waschverfahren basiert auf alkalischem Wasser (Wet-Scrubber). Hierbei werden die Schwefeloxide entweder durch Meerwasser neutralisiert und ins Meer eingeleitet (open loop Verfahren) oder durch Frischwasser mit Natriumhydroxid im

geschlossenen Kreislauf (closed loop Verfahren) ausgewaschen. Beim open loop Verfahren werden auch weitere Schadstoffe wie Schwermetalle und polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) in die Umwelt abgegeben, beim closed loop Verfahren wird das Waschwasser regelmäßig aufbereitet und Restabfälle werden entsorgt. Dennoch wird Abwasser, so genanntes Bleed-Off Wasser, das sogar stärker mit Schadstoffen belastet ist, als beim Open loop Verfahren, in die Meeresumwelt eingeleitet, wenn das Wasser nicht in Holdingtanks gesammelt und an Land abgegeben wird (Marin-Enriquez et al., 2021).

Zyklonabscheider

Im Zyklonabscheider werden Partikeln durch Verwirbelung des Abgases und die somit entstehenden Zentrifugalkräfte an den Wänden des Abscheidergehäuses gesammelt. Es können hohe Abscheideraten von über 90 % PM erreicht werden (Brinkmann et al., 2016). Es liegen Erfahrungen aus Anwendungen im stationären Bereich vor, jedoch nicht aus der Seeschifffahrt. Nachteilig ist, dass sehr feine Partikeln nicht entfernt werden, so dass der Zyklonabscheider mit weiteren Abgasreinigungstechnologien kombiniert werden sollte.

Elektrofilter (Electrostatic Precipitator, ESP)

Im Elektrofilter werden die Partikeln durch elektrische Anziehung gesammelt. Diese Technologie wird derzeit im stationären Bereich angewendet, selten in der Seeschifffahrt. Die zu erreichenden Abscheidemengen sind groß, bis zu 85 % PM sowie bis zu 80 % BC gelten als erreichbar (IMO, 2015), andere Quellen geben noch höhere Reduktionsraten für BC an, z.B. (Moon et al., 2019): >96 %.

Einsatzhindernd kann der relativ große Platzbedarf der Elektrofilter sein. Darüber hinaus sind Sicherheitsaspekte ungelöst, so dass die Anwendung an Bord von Schiffen in Frage gestellt werden kann. Die Kosten für Installationen in der Seeschifffahrt sind derzeit aufgrund der geringen Verbreitung nicht abzuschätzen.

Abgasrückführung (AGR)

Mittels der Abgasrückführung lassen sich NO_x-Emissionen um bis zu 80 % senken (Jørgensen, 2012), (Kyrtatos et al., 2016), bei ausreichendem Abgasanteil in der Verbrennungsluft können so NO_x-Tier-III Grenzwerte erreicht werden. Nachteilig sind ggf. Leistungsreduktion und mögliche Steigerungen der Partikel- und Rußemissionen.

Die AGR erfordert die Installation einer Abgasreinigungsanlage, um das wiederverwendete Abgas zu reinigen. Dies geschieht in erster Linie um der Gefahr der Kondensation saurer Anteile bei der Abgasrückführung in den Motor zu begegnen. Die Abgasreinigungsanlage wird zumeist als Scrubber ausgeführt. Nachträgliche Installationen sind prinzipiell möglich, erfordern jedoch eine Aktualisierung der Typenzulassung.

SCR-Katalysator (Selektive Katalytische Reduktion)

Ziel der Selektiven Katalytischen Reduktion ist die Verringerung von NO_x-Emissionen durch Zugabe von Ammoniak (NH₃) ins Abgas zur Umwandlung von NO und NO₂ zu elementarem Stickstoff und Wasser. Bis zu 95 % Reduktion sind hierbei möglich (Jørgensen, 2012; Yang et al., 2012), der Einfluss auf Partikelemissionen ist derzeit nicht klar, es gibt hierzu widersprüchliche Aussagen, die von einer Reduktion bis zu einer Erhöhung der Emissionen sprechen, z.B. bis zu 35 % BC-Reduktionspotential (IMO, 2015), jedoch -15 % laut (IMO, 2018). Die eigentliche Umwandlung findet in einem speziellen Katalysator statt. Dieser ist bei bestimmten Umgebungsbedingungen empfindlich gegenüber dem Einsatz schwefelhaltiger Kraftstoffe.

Die Verwendung von NH₃ an Bord von Schiffen führt zu Sicherheitsproblemen, deshalb wird zumeist eine ungefährliche Mischung aus Harnstoff und Wasser verwendet, die in den heißen

Abgasen zu Ammoniak reagiert. Die Dosierung muss gut abgestimmt sein, um einerseits eine hinreichende Umwandlung zu erzielen, andererseits kein Ammoniak in die Umwelt abzugeben, sogenannter Ammoniakschlupf.

Nachträgliche Installationen sind möglich, sofern ausreichend Platz für die Installation vorhanden ist.

Dieselpartikelfilter

Dieselpartikelfilter werden zur Verringerung der Partikelemissionen installiert. Hierbei können sehr hohe PM- und BC-Emissionsreduktionen von 70–90 % (Corbett et al., 2010) bis hin zu > 99 % (IMO, 2015) von PM und BC erreicht werden. Der Filter muss regelmäßig regeneriert, d.h. von Partikeln befreit werden, um ein Verstopfen des Filters zu vermeiden. Der normale Betrieb von Großmotoren mit Dieselpartikelfilter führt zu Mehrverbräuchen von bis zu 4 % aufgrund des höheren Abgasgedruckes. Ein Verstopfen des Filters mit dem damit einhergehenden weiter steigenden Abgasgedruck muss somit vermieden werden. Insgesamt erfordert der Einsatz von Dieselpartikelfiltern erhöhte Wartungs- und Betriebsaufwände. Die Verwendung von Schweröl ist aufgrund der damit verbundenen Mengen an Ruß- und Ascheemissionen nicht möglich. Die erforderliche Größe der Filteranlage beschränkt die Motorleistung auf etwa 3 MW. Dieselpartikelfilter stehen daher für die in der Seeschifffahrt erforderlichen Leistungsklassen derzeit nicht zur Verfügung.

Dieseloxidationskatalysator

Dieseloxidationskatalysatoren dienen der Reduktion von Kohlenstoffmonoxid und unverbrannter Kohlenwasserstoffe im Abgas. Infolge dessen kommt es zu geringerer sekundärer Partikelbildung im Abgas und somit zu einer Reduktion der Partikelemissionen.

Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Dieseloxidationskatalysatoren ist der Einsatz schwefelfreien Kraftstoffs. Die Installationskosten sind derzeit aufgrund der geringen Verbreitung in der Seeschifffahrt nicht zu beziffern. Der Katalysator muss nach 10.000 bis 20.000 Stunden Betrieb ausgetauscht werden.

2.1.4 Übersicht über die Maßnahmen zur Emissionsreduktion und ihre Kombination

In Tabelle 1 sind die unter obigen Abschnitten vorgestellten Maßnahmen hinsichtlich ihrer Reduktionspotentiale, Eignung für den Einsatz sowie Kosten als Übersicht zusammengestellt. In Tabelle 2 sind die einzelnen Maßnahmen zur Emissionsreduktion aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Kombinierbarkeit bewertet. Aufgrund ihrer Größe steht die Tabelle 2 als externe Datei im xlsx-Format zum download bereit.

Tabelle 1: Übersicht über die Maßnahmen zur Minderung von Emissionen

	Technologie	Reduktionspotential SOx	Reduktionspotential NOx	Reduktionspotential PM	technische Eignung	Technologie- und Marktreife	Investitionskosten	Betriebskosten	
Art- und Qualität von Kraftstoffen	Destillatkraftstoff	86-96 %	-	PM: 71-94%	sehr gut	weit verbreitet	sehr gering	~41 €/MWh	
	LNG	100%	30-75%	PM: 90%	neutral	verbreitet	508-2055 €/kW	~36 €/MWh	
	LPG	bis zu 100%	30-75%	PM: 90%	neutral	bedingt	250-1000 €/kW	16-65 €/MWh	
	Methanol	bis zu 100%	30-75%	PM: 95%	neutral	bedingt	350-700 €/kW	60 €/MWh (fossil)	
	PtX Kraftstoffe	100%	Einzelfallabhängig	38%-67%	sehr gut	kaum erhältlich	-	210-280 €/MWh (synth. Methan)	
	OME	100%	~ 30%	annähernd 100%	sehr gut	nicht erhältlich	unbekannt	86-103 €/MWh (fossil)	
	Biokraftstoffe	bis zu 100%	gering	PM 50-90%	gut	bedingt	gering	50-90 €/MWh	
	Wasserstoff	100%	bis zu 100%	100%	schlecht	kaum erhältlich	sehr hoch	41-177 €/MWh	
	Ammoniak	bis zu 100%	bis zu 100%	bis zu 100%	schlecht	kaum erhältlich	hoch	66 €/MWh	
Motortechnologie	Abgasrückführung	-	<80%	Tendenziell erhöht	gut	erhältlich	37-97 €/kW	1-10 €/kW	
	Wasseremulsion	-	<50%	20-63%	neutral	erhältlich	13-69 €/kW	2,1-4,2 €/kW	
	Common Rail Einspritzsystem	-	~ 21%	60-85%	gut	erhältlich	77 €/kW	-	
	Slide Valve	-	20%	10-50%	sehr gut	weit verbreitet	< 1,5 €/kW	-	
	Humid Air Motor	-	40-65%	-40%	neutral	erhältlich	90-130 €/kW	0,8 €/kW	
	Open Loop Wet Scrubber	70-95%	<8%	50-85%	neutral	weit verbreitet	65-327 €/kW	2-4 €/kW	
	Closed Loop Wet Scrubber	70-95%	<8%	50-85%	neutral	verbreitet	81-465 €/kW	4-8 €/kW	
	Hybrid Wet Scrubber	70-95%	<8%	50-85%	neutral	verbreitet	75-392 €/kW	2-8€/kW	
	Dry Scrubber	<99%	-	60%	neutral	erhältlich	127-314 €/kW	k.A.	
Abgasnachbehandlung	SCR-Katalysator	-	80-95%	Tendenziell sinkend	neutral	erhältlich	96 €/kW	hoch	
	Dieselpartikelfilter	-	-	70-95%	neutral	bedingt	~110 €/kW	3,4-18 €/kW	
	DOC	-	-	20-40%	neutral	bedingt	k.A.	k.A.	
	Elektrofilter	-	-	75-90%	gut	keine Verwendung	97-292 €/kW	k.A.	
	Zyklonabscheider	-	-	30-90%	neutral	keine Verwendung	9-10 €/kW	2 €/kW	
	weitere	Batterie-Hybrid Antrieb	Tendenziell sinkend	Einzelfallabhängig	Tendenziell sinkend	neutral	erhältlich	546 819 €/kWh	gering
		Slow Steaming	Tendenziell sinkend	Einzelfallabhängig	Einzelfallabhängig	gut	weit verbreitet	gering	keine Kosten
	Legende	sehr gut	gut	neutral	schlecht	sehr schlecht			

Quelle: Klepsch, 2020

Tabelle 2: Kombination der Maßnahmen zur Emissionsreduktion

Technologie	Art und Qualität von Kraftstoffen									Motortechnologie						Abgasnachbehandlung								andere Maßnahme		
	Destillatkraftstoff	LNG	LPG	Methanol	Power to X Kraftstoffe	Oxymethylenether	Biokraftstoffe	Wasserstoff	Ammoniak	Abgasrückführung	Wasseremulsion	Common Rail Einspritzsystem	Slide Valve	Humid Air Motor	Open Loop Wet Scrubber	Closed Loop Wet Scrubber	Hybrid Wet Scrubber	Dry Scrubber	SCR-Katalysator	Dieselpartikelfilter	DOC	Elektrofilter	Zyklonabscheider	Batterie-Hybrid Antrieb	Slow Steaming	
Destillatkraftstoff	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	+	+	+	+	#	#	#	#	+	+	+	+	+	+	+	+
LNG	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	-	/	-	+	#	#	#	#	+	+	0	+	+	+	+	+
LPG	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	-	/	-	+	#	#	#	#	+	+	0	+	+	+	+	+
Methanol	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	+	+	-	+	#	#	#	#	+	+	0	+	+	+	+	+
Power to X Kraftstoffe	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	+	0	0	+	#	#	#	#	+	+	+	+	+	+	+	+
Oxymethylenether	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	#	+	-	+	#	#	#	#	+	#	0	#	#	#	+	+
Biokraftstoffe	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	0	0	0	+	#	#	#	#	+	+	+	+	+	+	+	+
Wasserstoff	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	-	/	-	-	#	#	#	#	0	#	#	#	#	#	+	+
Ammoniak	/	/	/	/	/	/	/	/	/						#	#	#	#	+	+	0	#	#	#	+	+
Abgasrückführung	+	+	+	+	+	+	+	-		+	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wasseremulsion	+	-	-	+	+	#	0	-		+	0	+	#	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Common Rail Einspritzsystem	+	/	/	+	0	+	0	/	/	/	0		-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Slide Valve	+	-	-	-	0	-	0	-	-	+	+	-		0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Humid Air Motor	+	+	+	+	+	+	+	-		+	#	0	0		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Open Loop Wet Scrubber	#	#	#	#	#	#	#	#	#	+	+	+	+	+	#	-	-	-	0	0	+	+	+	+	+	+
Closed Loop Wet Scrubber	#	#	#	#	#	#	#	#	#	+	+	+	+	+	-	#	-	-	0	0	+	+	+	+	+	+
Hybrid Wet Scrubber	#	#	#	#	#	#	#	#	#	+	+	+	+	+	-	-	#	-	0	0	+	+	+	+	+	+
Dry Scrubber	#	#	#	#	#	#	#	#	#	+	+	+	+	+	-	-	-		+	+	+	+	+	+	+	+
SCR-Katalysator	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+		+	+	+	+	+	+	0
Dieselpartikelfilter	+	+	+	+	+	#	+	#	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+		+	+	+	+	+	0
DOC	+	0	0	0	+	0	+	#	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
Elektrofilter	+	+	+	+	+	#	+	#	#	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
Zyklonabscheider	+	+	+	+	+	#	+	#	#	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Batterie-Hybrid Antrieb	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
Slow Steaming	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	+	+	+	+	+	+

+ möglich
 0 möglich unter bestimmten Voraussetzungen
 # möglich, aber nicht sinnvoll
 - nicht möglich
 / unbekannt
 / unzutreffend

Quelle: Klepsch, 2020

3 Einfluss der Kraftstoffqualität auf die Black Carbon-Emissionen von Schiffsmotoren

Durch den zum 1. Januar 2020 in Kraft getretenen Grenzwert von 0,50 % für Schwefel kamen schwefelarme Kraftstoffe (Very Low Sulphur Fuel Oils; VLSFO) auf den Markt. Durch die unterschiedlichen Produktionspfade der VLSFO – entweder Entschwefelung der Kraftstoffe oder Beimischung schwefelarmer Produktströme – sind Kraftstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften entstanden. Die schwefelarmen Kraftstoffe können sehr hohe Konzentrationen an aromatischen Kohlenwasserstoffen aufweisen, welche durch ihr geringes H/C-Verhältnis einen Einfluss auf die BC-Emissionen haben. Um diesen Zusammenhang vertieft zu untersuchen, wurde im Rahmen dieses Projektes eine Messkampagne durchgeführt und die verwendeten Kraftstoffe hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung analysiert.

Der Schwerpunkt der Messkampagne lag auf der Bestimmung des Einflusses der Kraftstoffqualität, insbesondere der Aromatengehalt, der VLSFO im Vergleich zu Marinem Diesel (DMA), und Schweröl (HFO) auf die BC-Emissionen. Als sauberster schwefelfreier Kraftstoff wurde GtL (Gas to Liquid, fossilen Ursprungs), als Vertreter eines zukünftigen auch synthetisch aus erneuerbaren Quellen herstellbaren Kraftstoffs, eingesetzt. Die sechs verschiedenen Kraftstoffe (GtL, DMA, HFO und drei VLSFO mit unterschiedlichem Aromatengehalt) wurden auf dem Prüfstand beim WTZ in Dessau Roßlau hinsichtlich ihrer BC-Emissionen untersucht (s. Kapitel 3.2).

Ein weiteres Ziel dieser Studie war, die BC-Messmethoden FSN und PAS zu vergleichen (siehe Kapitel 3.2.2). Des Weiteren wurden die Abgase der Kraftstoffe GtL und DMA mit einem Proton Transfer Time of Flight Mass Spectrometer (CHARON PTR ToF MS) hinsichtlich der gasförmigen organischen Komponenten untersucht (Kapitel 3.2.3).

3.1 Beschreibung der BC-Messkampagne

3.1.1 Versuchsmotor

Die Messkampagne wurde an einem Motorenprüfstand bei der WTZ Roßlau durchgeführt. Als Versuchsmotor kam ein fremdaufgeladenes Einzylinder-Aggregat 1L32/44CR-TS zum Einsatz, der in seiner Betriebsweise auf einen MAN 12-Zylinder Vollmotor 12V32/44CR-TS mit einem Common-Rail Einspritzsystem und 2-stufiger Aufladung abgestimmt ist. Weitere Daten des Motors sind in Tabelle 3 aufgeführt. Es handelt sich dabei um einen mittelschnelllaufenden Marine-Dieselmotor mit einem Hubraum von >30 Litern pro Zylinder, welcher nach US-EPA einem Kategorie 3 (C3) Motor entspricht. Das Common-Rail Einspritzsystem und die 2-stufige Aufladung entsprechen dabei modernster Motorentechnologie. Der Motor wurde in der Standardeinstellung entsprechend einer NO_x-Emission nach IMO Tier-II innermotorisch betrieben. Als Lastpunkte wurden die in Tabelle 4 aufgeführten Punkte gefahren.

Tabelle 3: Motordaten

Bezeichnung	Wert
Versuchsmotor	1L32/44CR-TS
Bohrung	32 cm
Hub	44 cm
Nenn Drehzahl	750 1/min (50 Hz)
Nennleistung	640 kW

Quelle: MAN ES

Tabelle 4: Lastpunkte entsprechend E2-Zyklus

Last [%]	Drehzahl [1/min]
100	750
75	750
50	750
25	750

Quelle: MAN ES, E2-Zyklus nach ISO 8178-4

3.1.2 Verwendete Kraftstoffe

Der Schwerpunkt der Messkampagne lag auf der Bestimmung des Einflusses der Kraftstoffqualität der neuen schwefelarmen Kraftstoffe (VLSFO) im Vergleich zu marinem Diesel und Schweröl (HFO) auf die BC-Emissionen. Daher wurde eine große Bandbreite an Kraftstoffen mit variierenden Schwefel- und Aromatengehalten ausgewählt und vermessen (Tabelle 5). Als sauberster schwefelfreier Kraftstoff wurde GtL, als Vertreter eines zukünftigen auch synthetisch aus erneuerbaren Quellen herstellbaren Kraftstoffs, eingesetzt.

Tabelle 5: Kraftstoffe der Messkampagne und ihr Schwefel- und Aromatengehalt

Kraftstoff	Schwefelgehalt [%]	Aromatengehalt [%]
GtL	0	0
DMA Referenz	0,10	20
HFO Referenz	2,50	50
VLSFO (70)	0,50	70
VLSFO (80)	0,50	80
VLSFO (95)	0,50	95

Quellen: Eigene Zusammenstellung von Herstellerangaben, Marena

Die Tabelle enthält die bestellten Aromatengehalte, die gelieferten unterschieden sich geringfügig davon (vgl. 3.4.2).

3.1.3 Eingesetzte BC- und PM-Messverfahren

Die BC-Emissionen der verschiedenen Kraftstoffe wurden bei den in Tabelle 4 angegebenen Lastpunkten und Drehzahlen mit Filterschwärzung (Filter Smoke Number; FSN) und dem photoakustischen Spektrometer (PAS), beide Messgeräte von dem Hersteller AVL, gemessen. Des Weiteren wurde der elementare Kohlenstoff mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) und die Partikelmassen gravimetrisch bestimmt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Messverfahren für die Vermessung der Ruß- und Partikelemissionen

Messfahren	Beschreibung
AVL FSN 415-S	Ein Filter Smoke Meter arbeitet nach der Methode der Filterpapierschwärzung definiert nach ISO 10054 und ermittelt die Rußkonzentration im Abgas sowie einen Index, der auf einer Skala arbiträr zwischen 0 und 10 festgelegt wurde.
AVL 483 MSS ^{plus} Micro Soot Sensor	Photoakustisches Spektrometer (PAS)
PM gravimetrisch mit Verdünnungstunnel bei 47+/- 5°C	Partikelmessung nach ISO 8178
TGA	Thermogravimetrische Analyse des EC-Anteiles vom den gravimetrischen PM-Proben nach ISO 8178 in Anlehnung an VDI-2465-1

Quelle: Eigene Zusammenstellung, MAN ES

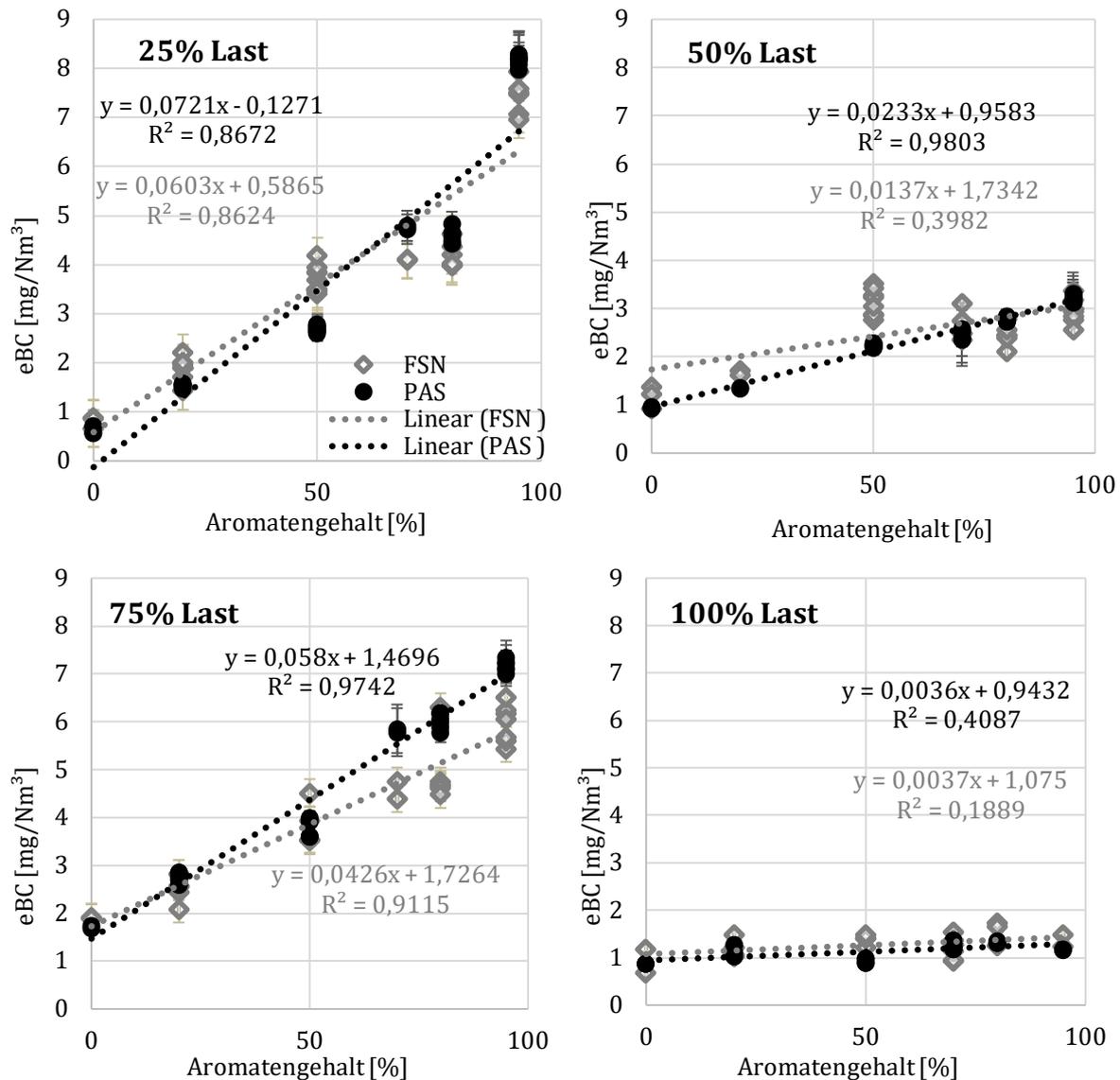
3.2 Ergebnisse der Messkampagne

Die detaillierten Ergebnisse wurden bereits in zwei IMO-Submissionen PPR 7/8 und PPR 8/5/1 veröffentlicht (Anlagen 1 und 2). Im Rahmen dieses Berichts werden die Erkenntnisse kurz zusammengefasst. Da sich aufgrund von technischen Problemen mit einigen Messgeräten der Versuchsablauf im Jahr 2019 verzögerte, konnten die vollständigen Versuchsauswertungen nicht in die Submission für PPR 7 einfließen. Die umfangreichen Auswertungen (thermographische Analysen der Partikelmasse, die detaillierten Auswertungen mit Berücksichtigung von Förderbeginn- und Raildruck-Variationen und die Auswertung der Partikelanzahlverteilung wurden im Sommer 2020 fertiggestellt und durch die weitere Submission zu PPR 8 veröffentlicht.

3.2.1 Auswertung der BC-Emissionen

Insgesamt variierten die BC-Messwerte von 0,56 bis 8,3 mg/Nm³ (Abbildung 1). Die niedrigsten BC-Emissionen wurden bei 100 % Motorenlast für alle Kraftstoffe gemessen und die höchsten bei 75 % und 25 % Motorenlast. Deutlich ist der generelle Trend von zunehmenden BC-Emissionen mit zunehmendem Aromatengehalt zu erkennen. Die Korrelationskoeffizienten der PAS-Messungen sind mit 0,86, 0,98 und 0,97 für 25 %, 50 % und 75 % Motorenlast sehr hoch. Nur bei 100 % Motorenlast konnte kein klarer Trend festgestellt werden, da die BC-Emissionen mit <2 mg/Nm³ sehr niedrig waren. Die Streuung der Messdaten ist bei 25 % und 75 % am höchsten. Die BC-Emissionen sind demnach sowohl von der Motorenlast als auch vom Aromatengehalt der Kraftstoffe abhängig. Die hocharomatischen VLSFO mit 70–95 % Aromaten erhöhten die BC-Emissionen um 10–85 % im Vergleich zu HFO und um 67–145 % im Vergleich zu DMA.

Abbildung 1: eBC-Emissionen für 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Motorlasten in Relation zum Aromatengehalt der Kraftstoffe. Die Legende für die PAS- und FSN-Werte befindet sich in der Grafik für 25 % Motorlast



Quelle: PPR 7/8, 2019

Der eindeutige Zusammenhang des Aromatengehaltes im Kraftstoff mit den BC-Emissionen hat das Konsortium dazu veranlasst, im Rahmen einer finnisch-deutschen Submission (PPR 7/8, 2019) dem IMO-Gremium vorzuschlagen, dass Information über den Aromatengehalt (z.B. durch Aufnahme des H/C Verhältnisses des Kraftstoffes) in der ISO-Norm 8217 für Schifffahrtskraftstoffe mit aufgenommen werden sollte. So könnten diese Informationen dem Gesetzgeber und auch dem Schiffsbetreiber zur Verfügung stehen und so für BC-Minderungsmaßnahmen hilfreich sein. Der Zusammenhang von Rußbildung und Aromatengehalt ist auch aus anderen Transportsektoren -wie z.B. Aviation- bekannt (Brem, B.T. et al., 2015). Aromatische Kohlenwasserstoffe, insbesondere die polyaromatischen, bilden wegen ihrer planaren Struktur eine Vorstufe zur BC- oder Rußbildung, der durch Kondensationsreaktionen entsteht. Bei MEPC 77 wurde das ISO-Gremium (ISO WG6) von der MEPC-Kommission aufgefordert in die ISO-Norm 8217 einen Parameter für die Bestimmung des Aromatengehaltes wie z.B. das H/C Verhältnis mit aufzunehmen.

Der hohe Anteil von PAK in Schiffskraftstoffen fördert nicht nur die BC-Emissionen, sondern besitzt ein hohes Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt im Falle von Verdunstung, unvollständiger Verbrennung oder sonstiger Verbreitung bspw. bei Havarien mit Austritt in die Meeresumwelt. Einige PAKs gelten als krebserregend und haben mutagene Eigenschaften. PAK gehören wegen ihrer umweltgefährdenden Potentiale, Toxizität, Persistenz und Anreicherung in der Nahrungskette zu den schädlichsten Stoffen (e.g. Andersson und Achten, 2015, Geier et al., 2018). Die PAK konnten auch im Abgas von GtL und DMA gemessen werden (vergleiche Kapitel 3.3).

3.2.2 Vergleich der Messmethoden FSN und PAS

Eine sehr gute Vergleichbarkeit der beiden Messmethoden FSN und PAS konnte vor allem für die Kraftstoffe mit niedrigem Aromatengehalt festgestellt werden. Das liegt vermutlich an der werkseitigen Kalibration beider Geräte mit einem Dieselkraftstoff mit maximal 8 % Aromatengehalt (EN 590). Bei den höheren BC-Emissionen der VLSFO zeigt das PAS-Messgerät geringfügig höhere Konzentrationen an (Tabelle 7). Insgesamt wurde eine gute Vergleichbarkeit der zwei BC-Messinstrumente festgestellt.

Tabelle 7: Arithmetische Mittelwerte für die BC-Emissionen der getesteten Kraftstoffe mit FSN und PAS im E2-Zyklus nach ISO 8178-4

Kraftstoff (Aromatengehalt [%])	FSN [mg/Nm ³]	PAS [mg/Nm ³]
GtL (0)	1,49	1,33
DMA (20)	2,02	2,06
HFO 2,5 % S (50)	3,06	2,73
VLSFO 0,5 % S (70)	3,37	4,06
VLSFO 0,5 % S (80)	3,63	4,22
VLSFO 0,5 % S (95)	4,37	5,05

Quelle: Eigene Darstellung, MAN ES

3.2.3 Ergebnisse der Analyse der gasförmigen organischen Bestandteile im Abgasstrom

Während der BC-Messkampagne wurden die Abgase zweier Kraftstoffe (GtL und DMA) mit einem Proton Transfer Time of Flight Mass Spectrometer (PTR ToF MS, PTR-ToF 6000 der Firma Ionicon Analytik Ges.m.b.H) hinsichtlich der gasförmigen organischen Komponenten untersucht. Ursprünglich sollte Abgas von allen Kraftstoffen mit dem PTR ToF MS gemessen werden, dem standen technische Probleme am Motorprüfstand und eine zeitlich begrenzte Verfügbarkeit des Messgeräts entgegen. Da lediglich DMA und GtL gemessen werden konnten, ergibt sich mit den diesbezüglich verfügbaren Ergebnissen keine Verwertbarkeit in der finalen IMO-Submission.

Für die Messung wurde ein geringer Teil des heißen Abgases kontinuierlich entnommen (bis zu 200 Standardkubikzentimeter, abhängig von der Verdünnung). Hierfür wurde das Abgas entgegen der Strömungsrichtung aus dem Hauptabgasstrom mittels einer passivierten Edelstahlleitung (Aufenthaltszeit im Probenahmesystem unter einer Sekunde) angesaugt und temperaturstabilisiert (bei 180 °C) verdünnt (gereinigte Außenluft mittels Pt-Pd-Katalysator) in das Massenspektrometer überführt. Die Messdaten wurden mit einer Zeitauflösung von 0,1 Hz aufgezeichnet. Kalibrationen wurden sowohl für die Massenachse des Massenspektrometers (kontinuierlich) als auch für die Empfindlichkeit des Gerätes (drei Dreipunktkalibrationen vor, während und nach den Messungen) durchgeführt.

Die Messdaten des PTR ToF MS wurden vom UBA in Zusammenarbeit mit dem Gerätehersteller rudimentär ausgewertet. Eine detaillierte Auswertung auf Ebene einzelner spezifischer chemischer Verbindungen wurde nicht durchgeführt. Die Auswertung umfasste die Quantifizierung der zeitaufgelösten Signale der Massenspektren und deren exaktes Masse-über-Ladungsverhältnis ($m/z = 200$, bis $m/z = 500$). Die Auflösung des Massenspektrometers erlaubte mit der Beschränkung auf die Elemente C, H, O, N und S die Zuweisung einer eindeutigen elementaren Zusammensetzung. In Bereichen höherer Molekülmassen ($m > 200$) wurden homologe Reihen von Kohlenwasserstoffen genutzt, die unterhalb von $m = 200$ beginnen, um elementare Zusammensetzungen mit hoher Wahrscheinlichkeit zuzuweisen. Unter Beachtung von Verdünnungsfaktor, der zusammensetzungsabhängigen Reaktionsrate der Moleküle während der Ionisierung, der Transmission im Massenspektrometer und weiterer Faktoren wurden für jede organische Verbindung die Konzentration im Abgas für jeden der beiden Kraftstoffe in Abhängigkeit vom Lastpunkt bestimmt.

Aus der elementaren Zusammensetzung konnten die Anzahl der Kohlenstoffatome und – in einer ersten Näherung nach (Yassine et al., 2014) – alle gemessenen Signale nach Aliphaten, Aromaten und Polyaromaten klassifiziert werden.

Die heteroatomhaltigen Kohlenwasserstoffe könnten somit in Aldehyde, Ketone, Ester, Carbonsäuren oder weitere Kohlenwasserstoffe unterschieden werden, die Stickstoff oder Sauerstoff enthalten.

Die erste chemische Analyse besteht in der Kumulation aller Signale der gasförmigen organischen Komponenten im Abgas von GtL und DMA bei unterschiedlichen Motorenlasten in Abhängigkeit der enthaltenen chemischen Elemente und der Anzahl der enthaltenen Kohlenstoffatome (Abbildung 2).

Aufgrund des Messprinzips können keine Alkane mit weniger als acht Kohlenstoffatomen detektiert werden. Aber, sowohl reine Kohlenwasserstoffe, als auch solche mit Heteroatomen fragmentieren auf die Signale von Alkanen mit weniger als acht Kohlenstoffatomen. Es wurde daher Abstand davon genommen, aliphatische Verbindungen in dieser Untersuchung näher zu identifizieren und abseits davon wurden diese lediglich als Summenparameter quantifiziert. Der Fokus lag auf der Quantifizierung von heteroatomhaltigen Kohlenwasserstoffen und aromatischen Verbindungen.

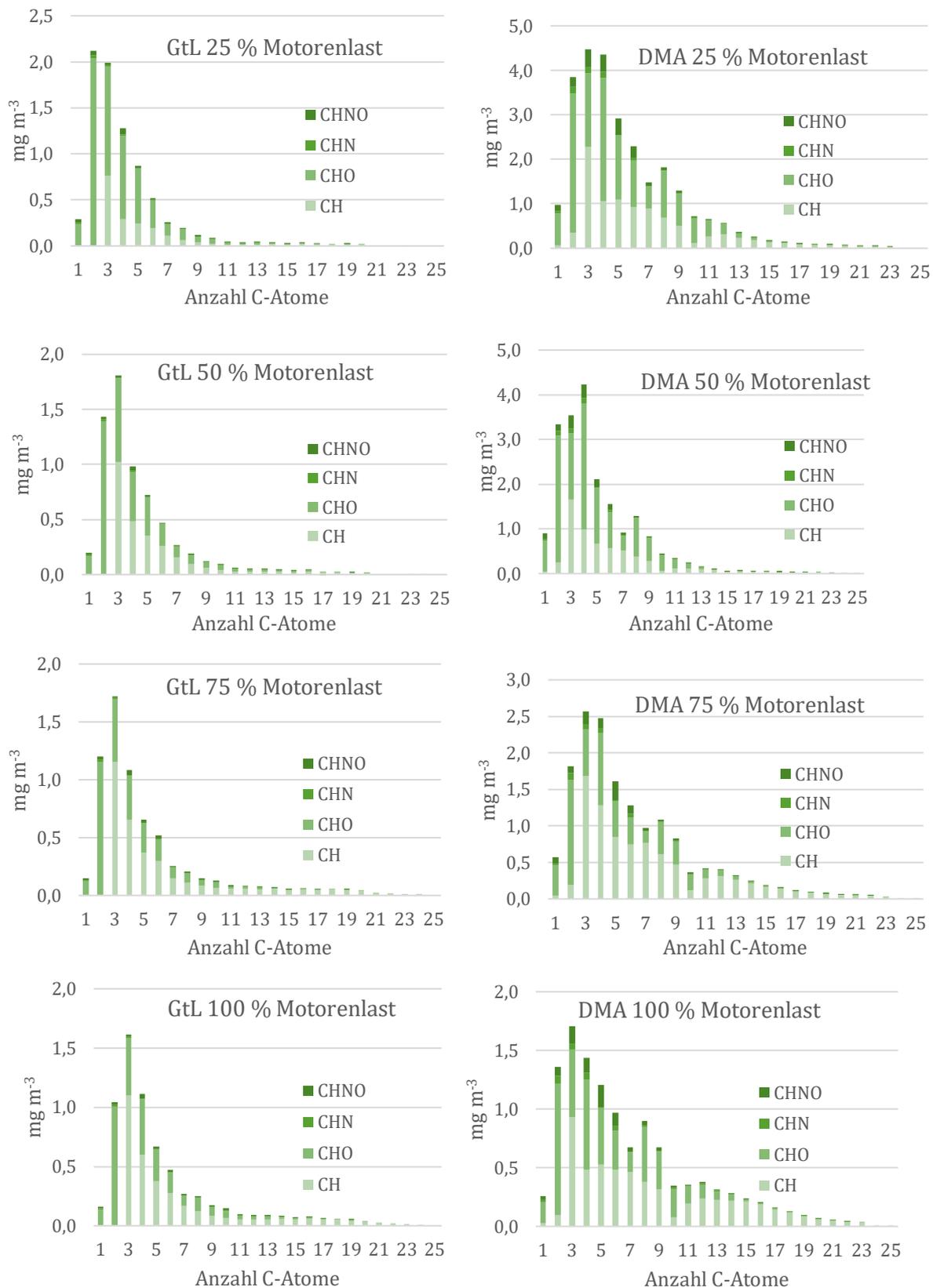
Die chemische Zusammensetzung der organischen Verbindungen im Abgas von GtL bei 25 % und 50 % Motorenlast wird dominiert von sauerstoffhaltigen Kohlenwasserstoffen (CHO; Abbildung 2). Die Summen (und Prozente) aller CHO enthaltenden Kohlenwasserstoffe ergibt in Summe $5,7 \text{ mg m}^{-3}$ (71 %) bei 25 % Motorenlast im Vergleich zu $3,7 \text{ mg m}^{-3}$ bei 50 % Motorenlast. Die häufigste Fraktion besteht aus zwei C-Atomen, und darunter zum überwiegenden Teil Acetaldehyd, welches eine mutagene Wirkung hat (Rajendram et al., 2016). Stickstoffhaltige Komponenten kommen im GtL-Abgas bei 25 % und 50 % Motorenlast kaum vor (1-2 %).

Bei 25 % Motorenlast sind die Molekülmassen bei DMA ca. doppelt so hoch. Die molekularen Zusammensetzungen und Konzentrationen der reinen Kohlenwasserstoffe (CH) und der sauerstoffhaltigen Fraktionen sind bei 75 % und 100 % Motorenlasten im Abgas von GtL und DMA sehr ähnlich.

Die chemische Zusammensetzung des DMA-Abgases unterscheidet sich deutlich von der des GtL-Abgases und alle betrachteten Konzentrationen sind deutlich höher (Abbildung 2). Bei 25 % Motorenlast beträgt die Summe der CH-Verbindungen $9,6 \text{ mg m}^{-3}$ und die Summe der sauerstoffhaltigen Moleküle $14,4 \text{ mg m}^{-3}$. Mit zunehmender Motorenlast nehmen die

Konzentrationen, vermutlich wegen der besseren Verbrennung, ab. Im Vergleich zu allen anderen Motorenlasten, stellen die reinen Kohlenwasserstoffe bei 75 % Motorenlast mit 54 % die häufigste Fraktion dar. Während im Abgas von GtL keine CHNO-Komponenten vorkamen, kamen im Abgas von DMA ca. 7 % bei allen Motorenlasten vor.

Abbildung 2: Elementare Zusammensetzung der gasförmigen Komponenten im Abgas aus der Verbrennung von GtL und DMA bei A: 25 %, B: 50 %, C: 75 % und D: 100 % Motorenlast in Relation zur Anzahl der C-Atome



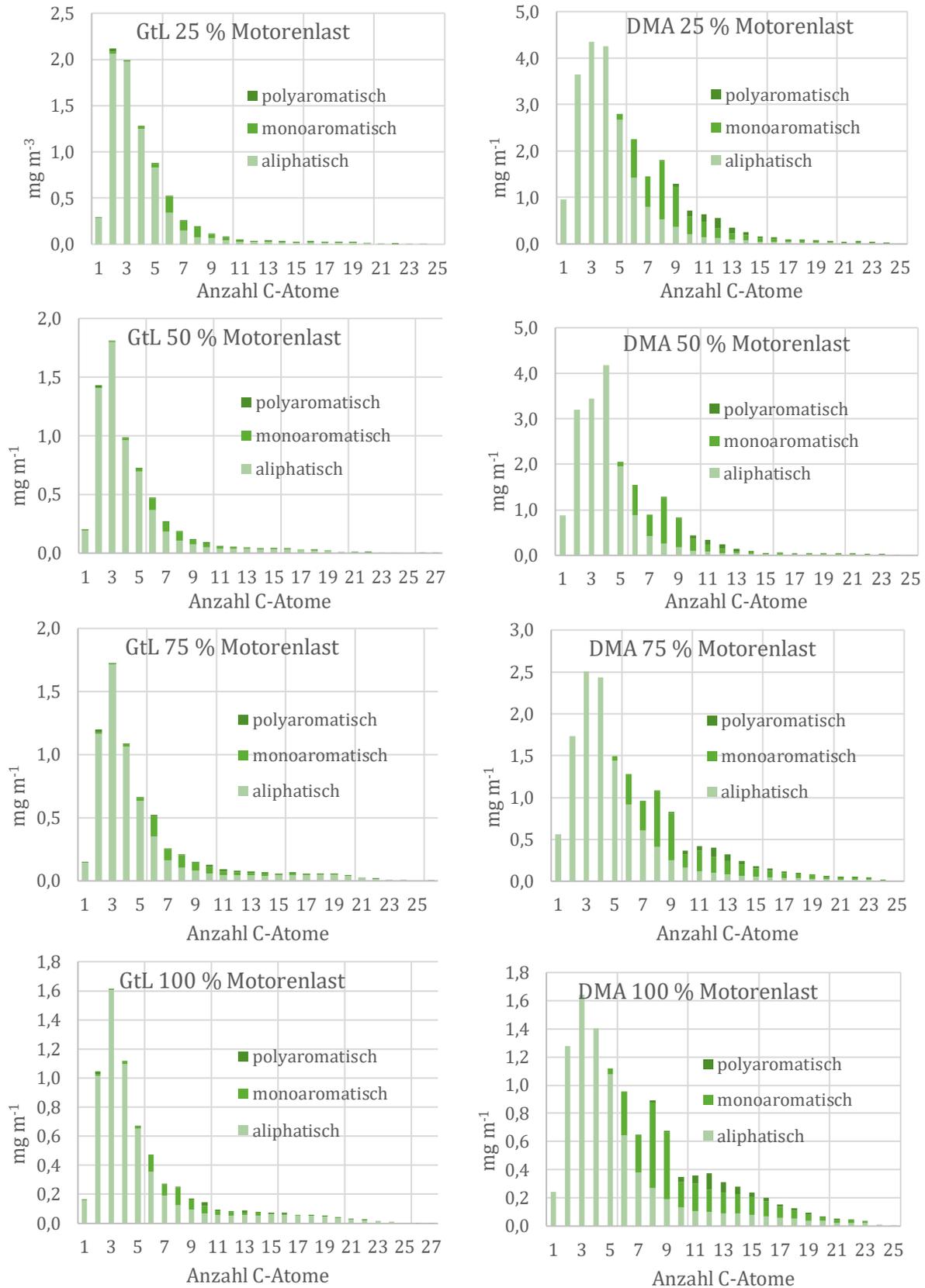
Quelle: Eigene Messungen, Marena

Die Zusammensetzung der gasförmigen Kohlenwasserstoffe im Abgas von GtL hinsichtlich ihrer chemischen Struktur wird von Aliphaten dominiert (Abbildung 3). Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAK) kommen nur in geringen Konzentrationen (7,3 % bei 25 % Motorenlast) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) nur in sehr geringen Konzentrationen (1,3 % bei 25 % Motorenlast) vor. Bei allen anderen Motorenlasten sind die Anteile sehr ähnlich. Die maximale Konzentration an MAK war 9 % und 2 % PAK bei 75 % Motorenlast. Da der Peak bei C6 ist, handelt es sich vermutlich um Benzol oder Phenol. Die Konzentrationen lagen bei allen Motorenlasten bei 6,7 mg m⁻³, bis auf 25 % Motorenlast, wo 8 mg m⁻³ gemessen wurden.

Die Konzentrationen der Abgaskomponenten bei der Verbrennung von DMA nehmen sukzessive von 25 %–100 % Motorenlast von insgesamt 20 mg m⁻³ auf gesamt 8,1 mg m⁻³ ab. Hingegen nimmt der prozentuale Anteil der Aromaten zu (Abbildung 3 und Abbildung 4). Im Vergleich zu GtL wurden im Abgas von DMA deutlich mehr Aromaten gefunden. Bei 25 % Motorenlast beträgt die Summe aller Aliphaten 76 %, 20,1 % sind MAK und 3,7 % PAK. Die aromatische Fraktion ist ca. 2–3-mal so hoch wie im Abgas von GtL. Bei den MAK liegt der Peak bei C8, was Xylen oder Ethylbenzol darstellt. Die Abgaszusammensetzungen von DMA liegen bei 50 % und 75 % Motorenlast im gleichen Bereich mit jeweils 18,3 % MAK und 2,2 % PAK sowie 20,9 % MAK und 2,9 % PAK. Nur bei 100 % Motorenlast steigt der Anteil der MAK auf 26 % (8,1 mg m⁻³) und 4,1 % PAK (3 mg m⁻³). Die höchste Konzentration bei den PAK liegt bei C12, welches Dimethylnaphthalin entspricht. Die hohen Konzentrationen der aromatischen Verbindungen im Abgas von DMA stellen ein Gesundheitsrisiko dar, da sie cancerogene und mutagene Eigenschaften haben (z.B. Pashin und Bakhitova, 1979).

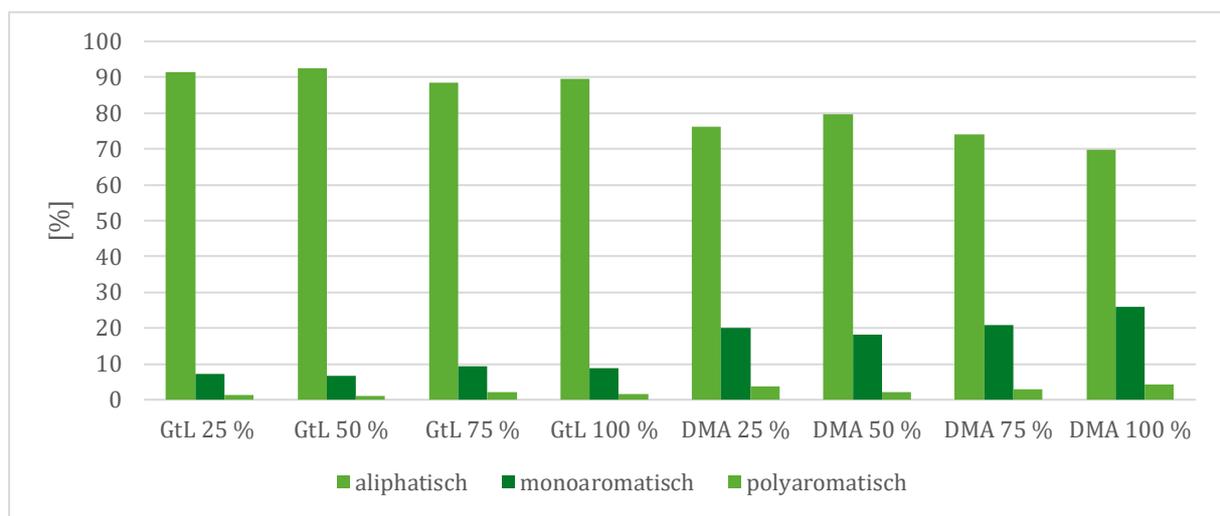
Während die Interpretation der aliphatischen Verbindungen durch die Fragmentierung der Moleküle schwierig ist, ist die Interpretation der aromatischen Verbindungen durch ihre hohe chemische Stabilität sicherer. Lediglich aliphatische Seitenketten der alkylierten Aromaten können fragmentiert werden, sodass deren Konzentrationen im niedrigen zweistelligen Prozentbereich unterschätzt werden könnte und damit eher eine untere Angabe für die Anteile darstellt.

Abbildung 3: Chemische Zusammensetzung der gasförmigen Komponenten im Abgas aus der Verbrennung von GtL bei 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Motorenlast in Relation zur Anzahl der C-Atome



Quelle: Eigene Messungen, Marena

Abbildung 4: Prozentuale Gesamtzusammensetzung der gasförmigen Komponenten in den Abgasen von GtL und DMA bei 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Motorenlast



Quelle: Eigene Messungen, Marena

3.2.4 Auswertung der Kraftstoffanalysen

Die Kraftstoffanalysen wurden bei der Firma ASG durchgeführt. Zusätzlich hat MAN ES tiefgehende Analysen der schwefelarmen Kraftstoffe (VLSFO) zur Verfügung gestellt, mit denen die Aromatengehalte nach Herstellerangaben (Lieferantenangaben) weitgehend bestätigt werden konnten. Außerdem liegen Ergebnisse zu PAK-Konzentrationen und -Zusammensetzung vor. Diese tiefgehenden Analysen sind teilweise in der IMO-Submission zu PPR 8 (PPR 8/5/1, 2020) aufgenommen worden.

Die Kraftstoffproben und eine Motorölprobe vom ASG-Labor der BC-Messkampagne wurden hinsichtlich folgender Parameter untersucht:

Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Sauerstoff-, Stickstoff- und Schwefelgehalt (CHNOS, Elementaranalyse), Dichte (30°C), Asphaltengehalt, Aromaten (mono-, di- und triaromatische Kohlenwasserstoffe), sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (16 EPA PAK) und Metalle (Aluminium, Barium, Beryllium, Bismut, Blei, Bor, Cadmium, Calcium, Chrom, Cobalt, Eisen, Kalium, Kupfer, Lithium, Magnesium, Mangan, Molybdän, Natrium, Nickel, Quecksilber, Silber, Strontium, Tellur, Titan, Vanadium, Zink, Zinn).

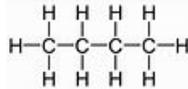
Die Elementaranalysen der Kraftstoffproben zeigen, dass GtL einen nachweislich minimalen Gehalt an Schwefel aufweist, DMA mit 0,051 % einen sehr geringen und die Schwerölprobe mit 1,48 % S den höchsten Schwefelgehalt aufweist (Tabelle 8). Die 0,50 % S Kraftstoffe weisen Schwefelgehalte von 0,308–0,396 % auf und sind damit innerhalb ihrer Spezifikation. Der Kohlenstoffgehalt variiert zwischen 84,6 (GtL) und 87,3 % (0,50 % S mit 73 % Aromaten). Der Wasserstoffgehalt zeigt, mit einer geringen Ausnahme für die Schwerölprobe, einen eindeutig abnehmenden Trend von GtL (15,2 %) bis zum 0,50 % S (97 % Aromaten) Kraftstoff mit 9,79 %. Der Stickstoff- und Sauerstoffgehalt liegt bei allen Proben unterhalb der Nachweisgrenze von 0,5 %.

Die Dichte bei 30°C ist bei GtL mit 767 kg/m³ am niedrigsten, während die Dichten vom Schweröl und 0,50 % S (97 % Aromaten) Kraftstoff mit jeweils 982 und 984,3 kg/m³ am höchsten sind. Die GtL- und DMA-Proben enthielten keine Asphaltene, die Schwerölprobe hat mit 5,7 % den höchsten Asphaltengehalt und die 0,50 % S Kraftstoffe enthielten 2,6–3,7 %.

Der Aromatengehalt trägt zur Dichte des Kraftstoffes bei, aber die Relation zur Viskosität hat sich durch Vermischung verschiedenen Fraktionen verändert. Bisher galt der „Calculated Carbon Aromaticity Index“ (CCAI) als ein Indikator für den Aromatengehalt. Auch dient der CCAI als Indikator für die Zündfähigkeit eines Kraftstoffes. Jedoch gilt dieser Zusammenhang für die neueren VLSFO und ULSFO nicht mehr (CIMAC, 2011). Aus diesem Grund hatten Deutschland und Finnland in ihrer Submission PPR 8/5/1 die Aufnahme des H/C-Verhältnisses in den ISO-Standard 8217 vorgeschlagen. ISO hingegen plant die Aufnahme zweier sehr veralteter Indikatoren - den 'Viscosity Gravity Constant' (VGC) und/oder des 'Bureau of Mines Correlation Index' (BMCI) (PPR 9/21/Add.1 Annex 16). Da diese beiden Indikatoren wiederum auf Dichte und Viskositäten basieren, werden sie ebenfalls als ungeeignet für die Bemessung der aromatischen und paraffinischen Bestandteile angesehen.

3.2.4.1 Hauptkomponenten der organischen Bestandteile in den Kraftstoffen

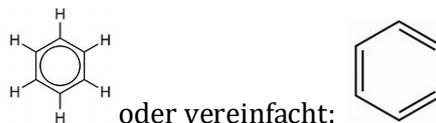
Alkane (Aliphaten oder auch Paraffine genannt) bestehen aus langen Kohlenstoffketten:



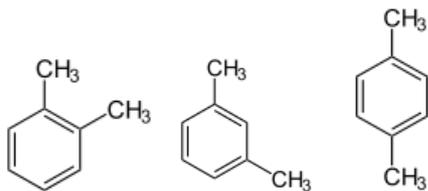
Beispiel Butan (C₄H₁₀)

Diese können aber auch Verzweigungen oder Seitenketten (iso-Alkane) und Doppelbindungen (Olefine) haben. Der Massenanteil an Wasserstoff im Vergleich zu Kohlenstoff ist bei den Aliphaten am höchsten (hohes H/C-Verhältnis).

Aromaten basieren alle auf der einfachsten Struktur von Benzol:



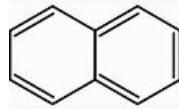
Aromaten sind gekennzeichnet durch Sechsringe mit konjugierten Doppelbindungen, die die Ringstruktur besonders stabil machen. An jeder Ecke befindet sich ein Kohlenstoffatom verbunden mit einem Wasserstoffatom (in der Vereinfachung nicht dargestellt). Durch die Doppelbindungen reduziert sich der Massenanteil vom Wasserstoff im Vergleich zum Kohlenstoff (niedriges H/C-Verhältnis). Der Wasserstoff kann durch diverse funktionelle Gruppen oder Alkyl-Seitenketten ausgetauscht werden, aber es bleibt immer ein Monoaromat. Das einfachste Derivat wäre Toluol, mit einer Methylgruppe (CH₃-). Bei einer weiteren Methylgruppe (Dimethylbenzol oder genauer gesagt Xylol) ergeben sich auch noch 3 Isomere, da die Methylgruppen nebeneinander (ortho-Position), mit einem C-Atom Abstand (meta-Position) und gegenüber (para-Position) stehen können:



Ortho-Xylol Meta-Xylol Para-Xylol

Diese Isomere können chromatografisch meist nicht aufgetrennt werden, da sie die gleiche Masse und meist vergleichbare Siedepunkte haben.

Polyzyklische Aromaten beginnen mit dem einfachsten Diaromaten Naphthalin:



Auch bei Naphthalin gibt es unzählige Derivate, hauptsächlich alkylierte Naphthaline. Alle Polyaromaten, die größer sind als Benzol, also inklusive Naphthalin, zählen zu den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). US-EPA hat die wichtigsten 16 PAK basierend auf ihren Toxizitäten festgelegt, allerdings immer nur die Grundstrukturen und nicht deren Derivate, die nachweislich aber oft häufiger (Sippula et al., 2014) und toxischer sind (Anderssen und Achten, 2015). Auf den Anteil der Naphthalin-Derivate wird weiter unten noch näher eingegangen.

Tabelle 8: Elementaranalyse, Dichte, Asphalt- und Aromatengehalt der Kraftstoffproben

Prüfparameter	Einheit	GtL (0 %)	DMA (20 %)	HFO (50 %)	0,50 % S (73 %)	0,50 % S (83 %)	0,50 % S (97 %)
Schwefelgehalt	% (m/m)	0,00035	0,051	1,48	0,396	0,318	0,308
Kohlenstoffgehalt	% (m/m)	84,6	86,5	86,9	87,8	87,3	86,7
Wasserstoffgehalt	% (m/m)	15,2	13,5	10,5	10,3	10,6	9,79
Stickstoffgehalt	% (m/m)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Sauerstoffgehalt	% (m/m)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Dichte (30 °C)	kg/m ³	767,2	833,7	982,0	973,2	953,5	984,3
Asphaltengehalt	% (m/m)	0	0	5,7	3,5	2,6	3,7
Aromaten							
Monoaromatische KW	% (m/m)	1,9	18,5	15,2	12,6	13,2	12,7
Diaromatische KW	% (m/m)	0,5	2,7	16,9	22,4	20,6	27,7
Triaromatische KW	% (m/m)	<0,1	0,3	7,5	6,5	6,9	6,2
Polyaromatische KW	% (m/m)	0,5	3	24,4	28,9	27,5	33,9
Gesamtaromaten im ASG Prüfbericht	% (m/m)	2,4	21,5	39,6	41,5	40,7	46,6

Quelle: Eigene Darstellung, Marena

3.2.4.2 Aromaten

Es gibt folgende Angaben zu den Aromaten, der in der Messkampagne verwendeten Kraftstoffe:

1. Herstellerangaben: Gesamtaromaten. Analysenmethode wahrscheinlich Gaschromatographie gekoppelt mit einem Massenspektrometer (GC-MS).
2. Aromatengehalt der Mischkomponenten (ebenfalls Hersteller): mono-, di-, und polyaromatischen Kohlenwasserstoffe. Die Daten sind unbrauchbar, da die Mischungsverhältnisse unbekannt sind. Außerdem steht in der Fußnote: „Siedende im GC nicht erreicht, da frühzeitiges Verkoken der Säule. Der tatsächliche Aromatengehalt liegt höher. Alternativ HPLC geht ebenfalls nicht.“
3. Kraftstoffanalyse von ASG: mono-, di-, triaromatische Kohlenwasserstoffe. Polyaromatische KW sind in den triaromatischen enthalten. Analysenmethode: HPLC (DIN EN 12916 :2019). Daten sind ebenfalls unbrauchbar, weil sich bei den HFO Proben, inklusive der 0,50 % S Proben, nicht das gesamte Material gelöst hat.
4. EUROFINS im Unterauftrag von ASG: 16 US-EPA PAK. Analysenmethode: GC/MS (DIN EN 15527: 2008-09). Laut Laborleitung gab es keine Probleme mit der Löslichkeit der Proben. Lösemittel Aceton und Hexan, daher werden sie in diesem Bericht analysiert.
5. Die Analyse der 0,50 % S Kraftstoffe von MAN mittels zweier gekoppelter Gaschromatographen (GC - GC) mit hochauflösender Flugzeit Massenspektrometrie (high-resolution time-of-flight mass spectrometry; GC-GC-HRTOFMS) lieferte noch detailliertere Ergebnisse als die EUROFINS-Analyse.

Die Überprüfung der Herstellerangaben durch Analyse der mono-, di-, tri- und polyaromatischen Kohlenwasserstoffe beim ASG Labor ergab enttäuschende Ergebnisse, da die im Prüfbericht enthaltenen Gesamtaromaten stark von den Angaben der Treibstofflieferanten abwichen (siehe Tabelle 4). Nach Rücksprache mit dem ASG Labor kam heraus, dass sich die Schwerölproben (dazu zählen auch die 0,50 % S Kraftstoffe) nicht vollständig in dem verwendeten Extraktionsmittel lösen ließen. Die Ursache ist in dem Asphaltengehalt und der Unlöslichkeit größerer PAK zu sehen. Durch diesen Umstand musste das Projektteam sich zuerst auf die Herstellerangaben verlassen. Aufgrund dieser Problematik hat MAN die drei 0,50 % S Kraftstoffe mittels GC-GC-HRTOFMS analysieren lassen, wodurch erstmals eine Massenbilanz erstellt werden konnte. Die analysierten Aromatengehalte wichen leicht von den Herstellerangaben ab: 73,7 % statt 70 %, 83,1 % statt 80 % und 97,3 % statt 95 %.

Obwohl GtL eigentlich frei von Aromaten sein sollte (Shell, 2022), wurden 2,4 % Aromaten im GtL nachgewiesen. GtL wird mit dem Fischer-Tropsch-Verfahren aus Synthesegas (CO und H₂) mit Hilfe von Katalysatoren bei hohem Druck und bei einer Temperatur von ca. 300 °C hergestellt. Dabei entstehen hauptsächlich langkettige aliphatische Kohlenwasserstoffe, jedoch schließt (Shell, 2022) die Bildung von Aromaten nicht aus: „GtL Fuel hat einen niedrigeren Gehalt an Aromaten, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), Olefinen, Schwefel und Stickstoff als herkömmlicher Dieseldieselkraftstoff.“

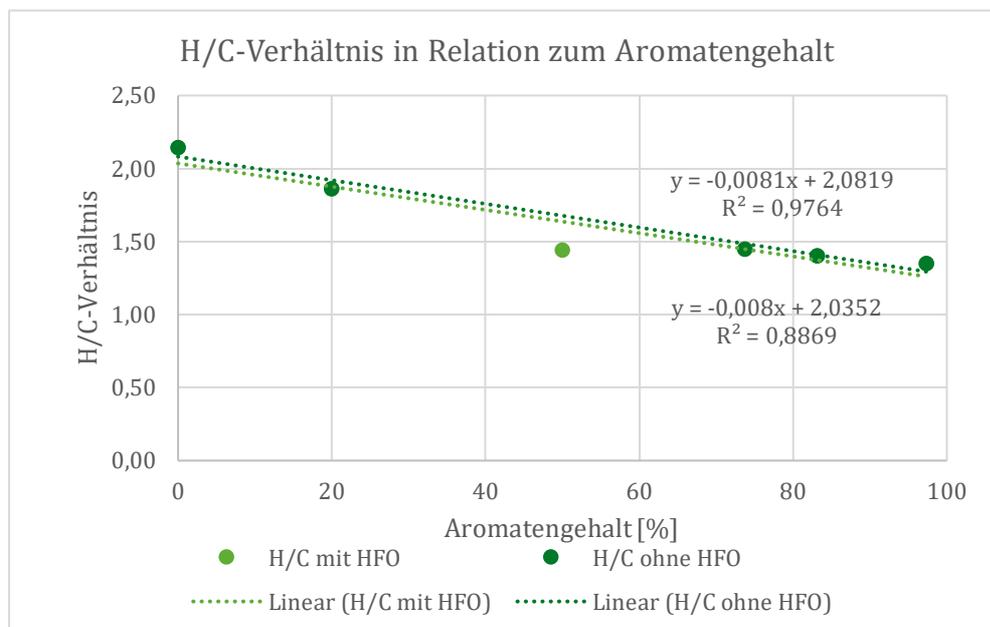
3.2.4.3 H/C-Verhältnis des Kraftstoffs

Das H/C-Verhältnis gibt Aufschluss über den Aromatengehalt einer Kraftstoffprobe, welches mit zunehmendem Aromatengehalt kleiner wird. Die Ursache ist die zunehmende Anzahl an Doppelbindungen und Kondensation der Aromatenringe. Das H/C-Verhältnis berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$H/C = \frac{\frac{\text{Massenanteil H [\%]}}{\text{Atommasse H } \left[\frac{\text{g}}{\text{Mol}}\right] (1.008)}}{\frac{\text{Massenanteil C [\%]}}{\text{Atommasse C } \left[\frac{\text{g}}{\text{Mol}}\right] (12.011)}}$$

In Abbildung 5 ist die Relation des H/C-Verhältnisses zum Aromatengehalt dargestellt. GtL hat mit 2,14 das höchste H/C-Verhältnis. Ursache ist die geringe Konzentration an Aromaten, die eine niedrigeres H/C-Verhältnis aufweisen. Der 0,50 % S Kraftstoff mit 97,3 % Aromaten weist mit 1,35 das geringste H/C-Verhältnis auf, da der Wasserstoffgehalt mit 9,79 % am geringsten ist. Die H/C-Verhältnisse in Relation zu den Gesamtaromaten ergeben eine Korrelation von $R^2 = 0,8877$. Die höchste Abweichung von der Trendlinie zeigte die Schwerölprobe, vermutlich wegen des hohen Asphaltgehaltes (5,7 %). Ohne die Schwerölprobe erhöht sich der Korrelationskoeffizient auf 0,976.

Abbildung 5: H/C-Verhältnis in Relation zum Aromatengehalt nach eigener Prüfung. Die Trendlinien sind mit und ohne HFO dargestellt



Quelle: PPR 8/5/1

3.2.4.4 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Die 16 EPA PAK wurden von EUROFINS (im Auftrag von ASG) analysiert (Tabelle 9). Die prozentuale Verteilung ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 9: EPA PAK Konzentrationen in mg/kg in den diversen Kraftstoffen

	Einheit	GtL	DMA	HFO	0,5 % S (73 %)	0,5 % S (83 %)	0,5 % S (97 %)
Naphthalene	mg/kg	57	180	5500	22000	21000	28000
Acenaphtylene	mg/kg	6,2	3,6	74	280	310	410
Acenaphthene	mg/kg	23	21	340	1100	1100	1500
Fluorene	mg/kg	22	66	450	1500	1700	2300
Phenanthrene	mg/kg	4,2	48	1300	3500	3800	4900
Anthracene	mg/kg	0,7	1,2	100	230	240	300
Fluoranthene	mg/kg	< 0,5	12	96	280	290	390
Pyrene	mg/kg	2	39	240	630	680	890
Benz(a)anthracene	mg/kg	< 0,5	1	35	85	89	110
Chrysene	mg/kg	< 0,5	2,5	54	82	90	110
Benzo(b)fluoranthene	mg/kg	< 0,5	< 0,5	25	35	37	53
Benzo(k)fluoranthene	mg/kg	< 0,5	< 0,5	5,2	7,6	7,9	11
Benzo(a)pyrene	mg/kg	< 0,5	< 0,5	39	45	51	69
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	mg/kg	< 0,5	< 0,5	5,8	6,9	7,2	10
Dibenzo(a,h)anthracene	mg/kg	< 0,5	< 0,5	11	6,3	8,1	9,4
Benzo(g,h,i)perylene	mg/kg	< 0,5	< 0,5	34	7	13	12
Summe 16 EPA-PAK	mg/kg	115	374	8310	29800	29400	39100

Quelle: Eigene Ergebnisse, Analysen durch EUROFINS

Tabelle 10: Prozentuale Verteilung der PAK

%	GtL	DMA	HFO	0,5 % S (73 %)	0,5 % S (83 %)	0,5 % S (97 %)
Naphthalene	49,6	48,1	66,2	71,4	73,8	71,6
Acenaphtylene	5,4	1,0	0,9	1,1	0,9	1,0
Acenaphthene	20,0	5,6	4,1	3,7	3,7	3,8
Fluorene	19,1	17,6	5,4	5,8	5,0	5,9
Phenanthrene	3,7	12,8	15,6	12,9	11,7	12,5
Anthracene	0,6	0,3	1,2	0,8	0,8	0,8

%	GtL	DMA	HFO	0,5 % S (73 %)	0,5 % S (83 %)	0,5 % S (97 %)
Fluoranthene	0,0	3,2	1,2	1,0	0,9	1,0
Pyrene	1,7	10,4	2,9	2,3	2,1	2,3
Benz(a)anthracene	0,0	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
Chrysene	0,0	0,7	0,6	0,3	0,3	0,3
Benzo(b)fluoranthene	0,0	0,0	0,3	0,1	0,1	0,1
Benzo(k)fluoranthene	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Benzo(a)pyrene	0,0	0,0	0,5	0,2	0,2	0,2
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Dibenz(a,h)anthracene	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Benzo(g,h,i)perylene	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0

Quelle: Eigene Ergebnisse, Analysen durch EUROFINS

Naphthalin ist mit bis zu 28 g/kg im 0,5 % S (97 %) Kraftstoff und ca. 48 % - 74 % der häufigste PAK in allen Kraftstoffproben, gefolgt von Phenanthren. Phenanthren gehört zu den triaromatischen PAK und hat mit 15,6 % die höchste Konzentration im HFO. Auch die schweren PAK wurden hauptsächlich im HFO nachgewiesen, was auf unterschiedliche Herstellungspfade von HFO und den 0,50 % S Kraftstoffen hinweist. Bei den 0,50 % S Kraftstoffen sind die Gesamtkonzentrationen der PAK des 73 % und des 83 % Aromaten haltigen Kraftstoffe vergleichbar und sind mit 39.100 mg/kg beim 97 %igen Kraftstoff am höchsten, aber deren prozentuale Verteilung ist fast identisch. Hier wurden wahrscheinlich die gleichen Produktströme aus der Raffinerie zur Herstellung genutzt und mit schwefelärmeren Kraftstoffen gemischt, um auf den Schwefelgrenzwert zu kommen.

Ein Vergleich der EUROFINS PAK-Analyse mit der GC-GC-HRTOFMS Analyse zeigt, dass bei weitem nicht alle PAKs bei EUROFINS erfasst wurden. Im 97 % Aromaten Kraftstoff wurden 28 g/kg Naphthalin nachgewiesen, während die GC-GC-HRTOFMS Analyse 18,22 % (182,22 g/kg), also einen ca. 6-fachen Wert nachgewiesen hat. Aus diesem Grund ist die simple PAK-Analyse (DIN EN 15527:2008-09) von Schwerölen mit Vorsicht zu betrachten. Das gleiche zeigte sich bei Phenanthren, mit 4,9 g/kg in der PAK-Analyse von EUROFINS und 2 % (20 g/kg) in der GC-GC-HRTOFMS Analyse, also einen 5-fachen Wert. D. h., dass selbst die relativen (prozentualen) PAK Konzentrationen unterschiedlich sind oder dass vor der Analyse durch EUROFINS Naphthalin als relativ volatile Substanz verdampft ist.

3.2.5 Vertiefte Analyse der organischen Verbindungen mittels GC-GC-HRTOFMS

Die Analyse der drei 0,50 % S Kraftstoffe erfolgte mittels zwei gekoppelter Gaschromatographen (GC × GC) mit hochauflösender Flugzeit Massenspektrometrie (high-resolution time-of-flight mass spectrometry; GC-GC-HRTOFMS). Durch die Kopplung zweier GCs ist eine zweidimensionale Analyse möglich (Käfer et al., 2019). Die ansonsten wegen ähnlicher Retentionszeiten auf einer GC-Säule gleichzeitig austretenden Isomere können durch die zweite GC-Säule getrennt werden. Basierend auf der GC-GC-HRTOFMS Methode konnten eine Vielzahl der aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffe in den VLSFO Kraftstoffen identifiziert werden.

Die Hauptkomponente aller drei Kraftstoffe ist die Gruppe der Naphthaline, dessen Verteilung hier exemplarisch dargestellt wird. Die relativen Konzentrationen der Naphthalin-Derivate und die Anzahl der C-Atome sind in Tabelle 11 dargestellt. Die Gesamtkonzentrationen betragen ca. 25,5 %, 40,8 % und 54,6 % in den Kraftstoffen mit 73 %, 83 % und 97 % Gesamtaromaten. D.h. dass mehr als die Hälfte der Aromaten im 97 % Aromaten Kraftstoff aus Naphthalin und seinen Derivaten besteht.

C10 ist das ursprüngliche Naphthalin ohne jegliche Seitenketten. C11 ist ausschließlich Methylnaphthalin, während C12 Dimethylnaphthalin oder Ethylnaphthalin sein könnte. Je höher die C-Atom-Anzahl, desto mehr sind die Naphthaline alkyliert und desto mehr Derivate sind möglich. Die alkylierten Naphthaline sind toxischer als das Ursprungsmolekül.

Beim 97 % Aromaten-Kraftstoff stellt das ursprüngliche Naphthalin (C10) die größte Fraktion dar. In Tabelle 11 sind die relativen Naphthalin-Konzentrationen der diversen Derivate in Abhängigkeit der Anzahl ihrer C-Atome dargestellt. Abgesehen von der Naphthalin-Konzentration (C10), ist die Zusammensetzung des 80 % Aromaten haltigen Kraftstoffes dem 97 %igen sehr ähnlich. Die Vermutung liegt nahe, dass beim 97 % Aromaten haltigen Kraftstoff reines Naphthalin beigemischt wurde. Die Zusammensetzung des 73 % Aromaten Kraftstoffs unterscheidet sich deutlich von den anderen Kraftstoffen mit Dimethylnaphthalin (C12) als häufigste Komponente und eher geringer Naphthalin- (C10) und Methylnaphthalin-Konzentration (C11). Auch fällt bei diesem Kraftstoff auf, dass die schwereren Derivate (C12-C16) in höheren Konzentrationen vorkommen. Hier wurde vermutlich ein anderes Produkt aus der Raffinerie als Basis genutzt.

Tabelle 11: Konzentrationen der Naphthalin-Derivate in drei 0,50 % S Kraftstoffen

Anzahl C-Atome	VLSFO (73 %)	VLSFO (83 %)	VLSFO (97 %)
C10	3,33 %	10,13 %	18,22 %
C11	2,10 %	9,79 %	12,85 %
C12	7,95 %	11,10 %	12,75 %
C13	7,00 %	6,67 %	7,55 %
C14	3,62 %	2,62 %	2,74 %
C15	1,10 %	0,47 %	0,54 %
C16	0,29 %	0,03 %	0,00 %
C17	0,10 %	0,00 %	0,00 %
C18	0,02 %	0,00 %	0,00 %
Summe	25,51 %	40,81 %	54,65 %

Quelle: PPR 8/5/1, 2020

In den Abbildungen 6–8 im Annex zu PPR 8/5/1 sind alle Hauptkomponenten der drei 0,50 % VLSFO als 3D-Darstellungen dargestellt. Das VLSFO mit 73 % Aromaten enthält ein Gemisch aus Aliphaten und Aromaten mit der höchsten Vielfalt an chemischen Komponenten. Im Gegensatz zu den anderen beiden VLSFO sind hier auch Olefine (ungesättigte Kohlenwasserstoffe) und Naphthene vorhanden. Die stärkste Fraktion stellen aber mit ca. 25 % aromatische Naphthaline

dar. Hier wurde eindeutig ein Destillat beigemischt. Der 0,50 % Kraftstoff mit 83 % Aromaten ähnelt eher dem 0,50 % Kraftstoff mit 97 % Aromaten, dem Aliphaten (Alkane) beigemischt wurden, jedoch keine Olefine und Naphthene. Ausserdem nimmt die Vielfalt der chemischen Komponenten vom 73 %igen zum 97 %igen Aromaten haltigen Kraftstoff deutlich ab, was ein Zeichen dafür sein kann, dass weniger Produkte aus den diversen Raffinerieströmen verwendet wurden.

Der Anteil der PAK in den Kraftstoffen mit 73 %, 83 % und 97 % Aromaten betrug jeweils 50 %, 60 % und 76 %. Im Vergleich dazu sind die PAK in Diesel für PKW auf 8 % limitiert (Directive 2009/30/EC, 2009). Dieser hohe Anteil von PAK in Schiffskraftstoffen besitzt ein hohes Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt im Falle von Verdunstung, unvollständiger Verbrennung oder sonstiger Verbreitung. Einige PAK gelten als krebserregend und haben mutagene Eigenschaften. PAK gehören wegen ihrer umweltgefährdenden Potentiale, Toxizitäten, Persistenz und Anreicherung in der Nahrungskette zu den schädlichsten Stoffen (e.g. Andersson und Achten, 2015; Geier et al., 2018). Für marine Kraftstoffe gibt es jedoch bisher keinen Grenzwert für PAK. Es scheint, dass die Reduktion des Schwefelgehaltes – zumindest in den in dieser Messkampagne verwendeten Kraftstoffen – durch die Beimischung anderer Raffinerieströmen zu Kraftstoffen mit hohen PAK-Gehalten – im Vergleich zu HFO geführt hat.

4 Mess- und Überwachungsmethoden von BC-Emissionen der internationalen Schifffahrt

4.1 Übersicht möglicher Messmethoden

In diesem Kapitel sollen die Kriterien für einen geeigneten Messstandard und für einen potentiellen Grenzwert für BC erarbeitet werden. Dazu werden BC-Messungen verschiedener Messkampagnen zusammengetragen. Durch die umfassende Zusammenstellung der Ergebnisse aus mehreren Kampagnen wird eine Abdeckung des gesamten relevanten Größen- und Leistungsspektrums der internationalen Schifffahrt gewährleistet. Darüber hinaus werden die Ergebnisse unterschiedlicher Messverfahren und -geräte gegenübergestellt und verglichen.

4.1.1 Übersicht verschiedener Messkampagnen

Als Basis für einen geeigneten Messstandard sowie zur Auswahl eines potentiellen Grenzwertes zu BC wurde die Datenbasis zu BC Messungen, basierend auf der Submission PPR 4/9, (2016) bzw. PPR 6/Inf.6 (2018) bestehend aus 35 Datensätzen mit weiteren Daten aus folgenden Messkampagnen ergänzt: PPR 6/Inf.12 (2018), PPR 6/Inf.13 (2018), PPR 6/Inf.14 (2018), (Corbin et al., 2020), UCR (2018), UCR (2019), PPR 7/8 (2019), PPR 8/5/1 (2020), MEPC-76/Inf.43 (2021), MEPC-76/Inf.44 (2021), MEPC-76/Inf.45 (2021). Damit ergeben sich in Summe 75 Datensätze. Von diesen 75 Datensätzen wurden 57 am Probestand und 18 an Bord durchgeführt. Neben RM- (Rückstandskraftstoff) und DM- (Destillatkraftstoff) nach ISO 8217 kam auch Tankstellendiesel nach EN 590, LNG nach ISO 23306 sowie GtL nach DIN EN 15940 zum Einsatz. Bei den Messkampagnen wurde 70-mal ein Filter-Smoke-Number (FSN) Messgerät eingesetzt, weiterhin 15-mal ein photoakustisches Messverfahren (PAS), 17-mal ein Laserinduziertes Messverfahren (LII) und 27-mal eine elementare Kohlenstoff (EC)-Analyse. In einzelnen Messkampagnen wurden zum Vergleich weitere Instrumente, wie Wolken-, Aerosol- und Niederschlagsspektrometer (CAPS), Photoakustisches Extinktometer (PAX), oder Mehrwinkelabsorptionsphotometer (MAAP) eingesetzt. Rückstandskraftstoffe kamen 25-mal, Destillatkraftstoffe 35-mal und LNG 6-mal zum Einsatz. Tankstellendiesel wurde 8-mal und GtL einmal verwendet. Bei 60 Messkampagnen war der Motor bereits eingefahren, bei 15 noch nicht. Es liegen nach IMO Unterteilung der Motortypen nach Drehzahl entsprechend der NO_x-Grenzwertkurve nunmehr 2 Datensätze von High-Speed, 47 von Medium-Speed und 26 von Low-Speed Motoren vor. In Tabelle 12 sind die Datensätze und die zugehörigen Parameter zusammengestellt.

Tabelle 12: Statistik der Messkampagnen nach Tabelle 14 im Anhang

Ort der Messung	Anzahl
Am Probestand	57
An Bord	18
Messmethode	
FSN	70
PAS	15
LII	17
EC, andere	27
Kraftstofftyp	
RM-grade	25
DM-grade	35
LNG	6
EN 590	8
GtL	1
Motorzustand	
Motor eingefahren	60
Nicht eingefahren	15
Motortyp	
High-Speed	2
Medium-Speed	47
Low-Speed	26
Datensätze in Summe	75

Quelle: Eigene Zusammenstellung, MAN ES

4.1.2 Messgenauigkeit und Korrelation der verschiedenen Messinstrumente

Abweichungen zwischen den Instrumenten oder Genauigkeiten eines Instrumentes lassen sich aus den o.g. Berichten aufgrund von fehlender oder nicht ausreichender Hintergrundinformationen oder Einzelmessungen anstelle von Mehrfachmessungen nicht oder nur unzureichend extrahieren. Dennoch konnten folgende Informationen zusammengestellt werden:

Aus PPR 4/9 (2016) kann, wenn angegeben, eine Genauigkeit des FSN bezogen auf den Messwert von +/- 6 % abgeleitet werden. Aus PPR 6/Inf.12 (2018) kann zwischen den verwendeten Messgeräten FSN, PAS, PAX, LII, CAPS eine Abweichung von +/- 20 % abgeleitet werden. Laut Aussage der Autor*innen von PPR 6/Inf.12 (2018) ist diese Übereinstimmung besonders gut, da nur zwei der fünf Instrumente vor Ort kalibriert wurden und die Messungen auf drei verschiedenen physikalischen Eigenschaften von BC basierten. In PPR 6/Inf.13 (2018) wird eine mittlere Abweichung der verwendeten drei Messmethoden FSN, LII, EC (TOA) von 19,4 % bezogen auf den Messwert angegeben. In UCR (2019) zeigt sich eine systematische Abweichung von im Mittel +64 % bei der Hauptmaschine und -21 % bei der Hilfsmaschine zwischen EC (NIOSH) und PAS. Diese systematischen Abweichungen können mit einem Quereinfluss in der NIOSH Methode erklärt werden. Das deutlich unterschiedliche Niveau des organischen PM-Anteiles der beiden Motoren hat einen Einfluss auf die Position des sogenannten Cut-Points zwischen organischem und elementarem Kohlenstoffanteil. Die Autor*innen in UCR (2019) geben demzufolge auch keine Empfehlung für die Verwendung der NIOSH Methode zur BC Messungen von Marinemotoren ab. Für die hier vorliegende Auswertung wurden daher nur die PAS Daten aus UCR (2019) herangezogen. Für die Ergebnisse der Messkampagne im Rahmen dieses Projektes lassen sich aufgrund der Vielzahl von Messungen folgende relative Abweichungen nach Tabelle 13 angeben. Diese beziehen sich auf den Messwert aus den Mehrfachmessungen für die beiden in dieser Messkampagne verwendeten Instrumente FSN und PAS.

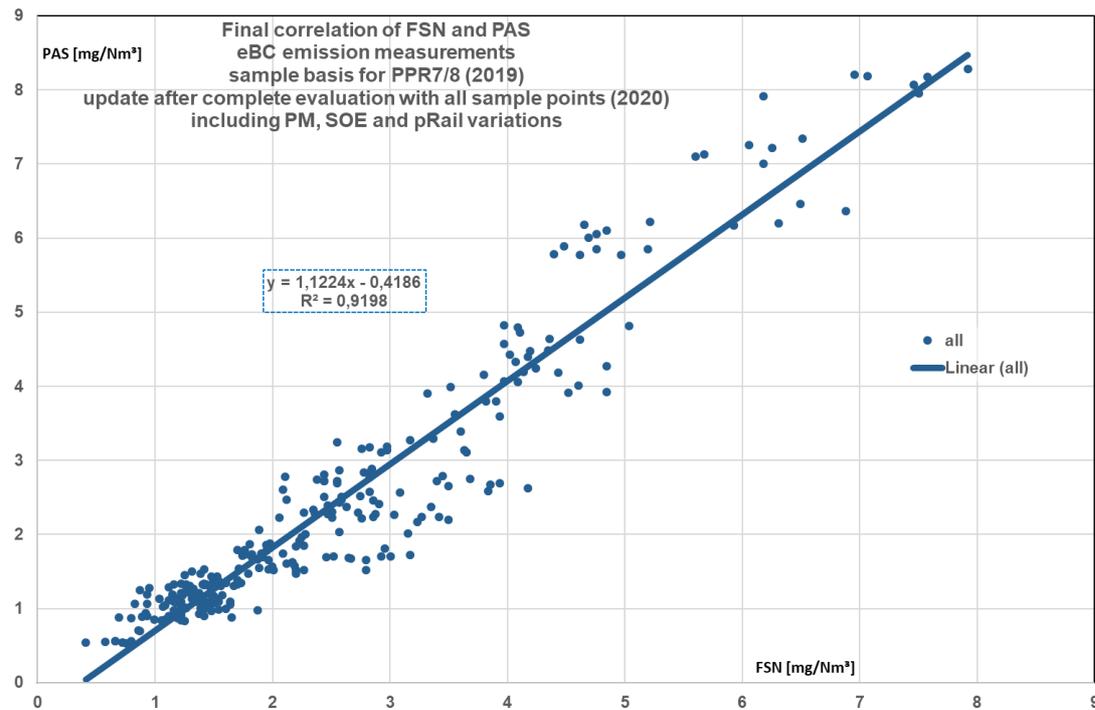
Tabelle 13: Relative Abweichungen in Prozent bezogen auf den Messwert aus Mehrfachmessungen aus der vorliegenden Messkampagne (Kapitel 3)

	FSN	PAS
Mittlere Abweichung	9,1 %	6,5 %
Minimale Abweichung	0,2 %	3,2 %
Maximale Abweichung	26,0 %	18,8 %
Median der Abweichung	8,3 %	5,9 %

Quelle: Eigene Auswertungen, MAN ES

Im Vergleich zu Genauigkeitsangaben zur Partikelanzahlmessung aus dem Automobilbereich von +/- 20 %, (FVV, 2013), ist das in der Tabelle 13 dargestellte Ergebnis als sehr gut zu bewerten. Vor dem Hintergrund, dass sich die gemessenen BC-Emissionen von Marinemotoren über drei Größenordnungen (Faktor 1.000) erstrecken, sind die in diesem Projekt gefundenen Abweichungen als gering oder sogar als vernachlässigbar zu betrachten. Die Korrelationen zwischen PAS und FSN für die individuellen Kraftstoffe finden sich in PPR 8/5/1 (2020) in Figure 1. Die Gesamt-Korrelation zwischen FSN und PAS mit $y = 1,1224x - 0,4186$ und einem Bestimmtheitsgrad von 0,92 über alle Kraftstoffe ist in Abbildung 6 dargestellt. Auch diese Korrelation zweier unterschiedlicher physikalischer Messverfahren ist als gut zu bewerten.

Abbildung 6: Kraftstoffunabhängige Korrelation zwischen FSN und PAS. Quelle: eigene Darstellung

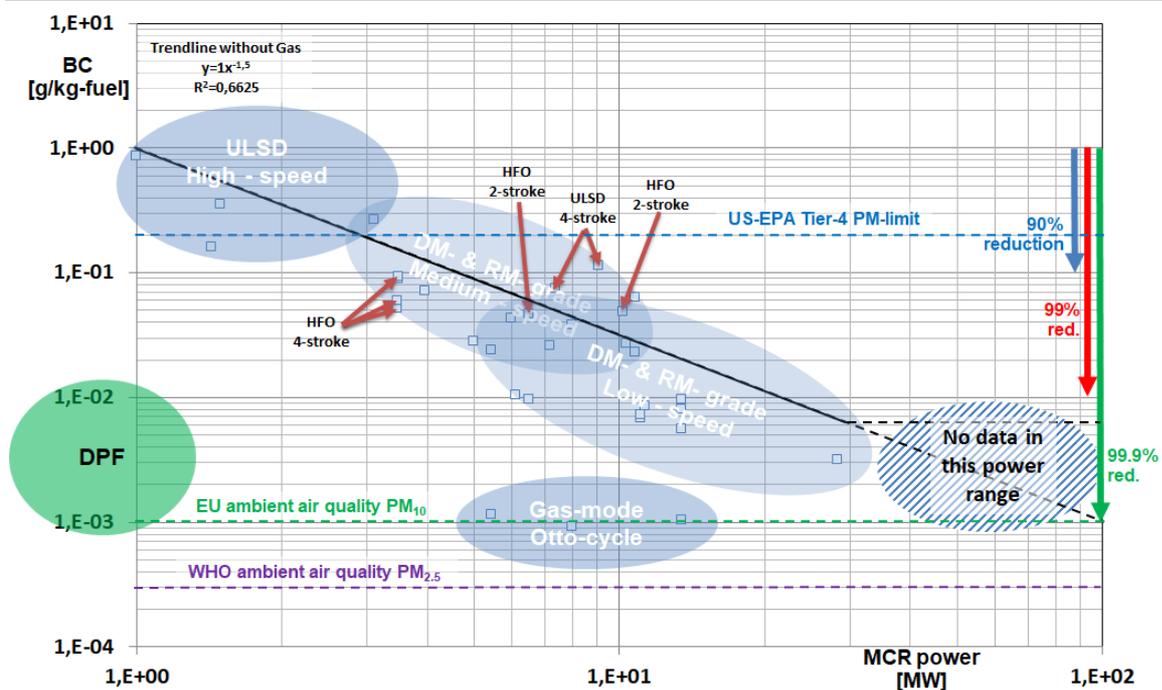


Quelle: Eigene Darstellung, MAN ES

4.1.3 Vergleich und Auswertung verschiedener Messkampagnen – Stand 2018 (Datenbasis zu Projektbeginn)

Die Ausgangslage der BC Datenbasis stellte sich zu Projektbeginn wie in Abbildung 7 dar:

Abbildung 7: BC-Emission von Marinemotoren als gewichtete Zykluswerte, Datenstand Ende 2018 mit 35 individuellen Datensätzen.



Quelle: PPR 6/Inf.6, 2018

Abbildung 7 zeigt in doppelt logarithmischer Darstellung die BC-Emission in g pro kg-Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der MCR Motorleistung für unterschiedlichste Marinemotoren bei Projektbeginn zum Stand am 16.11.2018. Die Abbildung 7 ist auch in PPR 6/Inf.6 (2018) im Annex 1 auf Seite 86 enthalten. Die Darstellung beruht auf der Datensammlung der EUROMOT, die per PPR 4/9 (2016) bei der IMO eingereicht wurde. PPR 6/Inf.6 (2018) ist somit die grafische Darstellung der Daten aus PPR 4/9 (2016) mit jeweils gleichem Datenstand. Zwischen 2016 und 2018 wurden keine neuen Studien veröffentlicht. Abbildung 7 beinhaltet Prüfstandsdaten von 15 Langsamläufermotoren, 18 Mittelschnellläufermotoren und 2 Schnellläufermotoren. Es entfallen 4 Datensätze auf Gas (LNG) Betrieb, 6 Datensätze auf ultra-low-sulfur-diesel (ULSD), 5 Datensätze auf Schweröl (HFO) und 20 auf Dieselöl oder Gasöl (MDO/MGO). Die BC-Emission erstreckt sich dabei über 3 Größenordnungen von 1 g/kg-fuel bis 0,001 g/kg-fuel, wobei 4-Takt Schnellläufer- (High-Speed-) Motoren die höchsten und 2-Takt Langsamläufer- (Low-Speed-) Motoren die niedrigsten BC-Emissionen aufweisen. Die BC-Emission der 4-Takt mittelschnelllaufenden- (Medium-Speed-) Motoren finden sich dazwischen. Dual-fuel (DF) Motoren im Gasbetrieb weisen die mit Abstand (ein bis zwei Größenordnungen) geringsten BC-Emission auf. Um die Gruppen der High-, Medium- und Low-Speed sowie DF-Motoren im Gas-Mode im Diagramm optisch voneinander unterscheiden zu können, sind diese in Abbildung 7 durch einhüllende blaue Ellipsen markiert. Dabei ist zu beachten, dass sich aufgrund der logarithmischen Darstellung die Mehrzahl der Datenpunkte in der unteren Hälfte der Ellipsen befinden. Für große Low-Speed Motoren >30MW (schraffierte Ellipse) lagen noch keine BC Messdaten vor. Die Ellipsen zeigen den Erwartungsbereich der BC-Emission von Marinemotoren auf Basis der bisher vorliegenden Daten. Zum Vergleich und zur Einordnung der BC-Emissionen sind als gestrichelte Linien in Abbildung 7 der US-EPA Tier-4 PM Grenzwert von 0,04 g/kWh (in blau gestrichelt) sowie die beiden Konzentrationen der Umgebungsluft Qualitätsstandards bzw. Schwellwerte der EU von 35 µg/m³ für PM₁₀ (in grün gestrichelt) und der WHO von 10 µg/m³ für PM_{2,5} (in lila gestrichelt) jeweils entsprechend umgerechnet in eine Emission in g/kg-fuel dargestellt. Die BC-Emission der Motoren im LNG-Betrieb liegen auf dem Niveau des EU Schwellwertes. Die durchgezogene schwarze Trendlinie ergibt sich aus der linearen Regression aller Datensätze im Diesel-Mode. Dabei ist wieder zu beachten, dass sich aufgrund der logarithmischen Darstellung die Mehrzahl der Datenpunkte unterhalb der Trendlinie befinden. Die insgesamt 35 vorliegenden Datensätze in PPR 4/9 (2016) bestehen jeweils aus vollständigen Testzyklen aus denen der entsprechend der jeweiligen Anwendung vorgesehene gewichtete BC Zykluswert E2, D2 oder E3 nach ISO-8178-4 bestimmt wurde. Stationäre Testzyklen werden als Liste diskreter Modi (Arbeitspunkte) angegeben, wobei jeder Arbeitspunkt einen Drehzahlwert und einen Drehmomentwert hat. Die Abgasemissionsmessung und -bewertung muss mit dem geeigneten Prüfzyklus für die jeweilige Anwendung des Motors durchgeführt werden. Die entsprechenden Prüfzyklen und Wichtungsfaktoren sind in der o.g. ISO festgelegt. Hinter dem dargestellten Diagramm in Abbildung 7 verbergen sich somit mehr als 420 Einzelmessungen. Das FSN Messgerät macht standardmäßig 3 Einzelmessungen, die einen Mittelwert ergeben und ein Zyklus besteht aus mindestens 4 Modepunkten.

4.1.4 Diskussion und Interpretation der Messdaten zu Projektbeginn

Gegenüber der BC-Emission von 1 g/kg-fuel eines High-Speed Motors mit 1 MW MCR (ganz links in Abbildung 7) ist die BC-Emission eines Medium-Speed Motors von 0,1 g/kg-fuel mit etwa 4-5 MW MCR um ca. 90 % (blauer Pfeil, eine Größenordnung) und die BC-Emission eines Low-Speed Motors von 0,01 g/kg-fuel mit 20 MW MCR um ca. 99 % (roter Pfeil zwei Größenordnungen) geringer. Die BC-Emission der DF Motoren mit ottomotorischer Verbrennung von 0,001 g/kg-

fuel ist gegenüber dem 1 MW High-Speed Motor um 99,9 % (grüner Pfeil, drei Größenordnungen) geringer.

Die grüne Ellipse repräsentiert die BC-Emission von kleinen High-Speed Motoren <1MW mit Partikelfilter (DPF) aus dem Automobil- und Baumaschinenbereich nach Messdaten von (Johnson und Miller, 2015). Die BC-Emission dieser Motoren liegt mit DPF auf bzw. bis zu einer Größenordnung oberhalb des Niveaus des EU Schwellwertes.

Aus der Abbildung 7 lässt sich eine eindeutige Tendenz fallender BC-Emissionen mit zunehmender MCR Leistung feststellen. Die Trendlinie in schwarz gibt mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,66 die BC-Emission in Abhängigkeit der MCR Motorleistung nach der linearen Regression von $y = x^{-1,5}$ für den Dieselbetrieb wieder. Dabei ist zu beachten, dass für Leistungen >30 MW keine Validierung vorlag und die Linie daher nach Ansicht der Autor*innen zu hohen MCR gestrichelt ausläuft oder auch abknicken kann. Die Bestätigung dieser Annahme aus 2018 findet sich in Abbildung 8 zugunsten des Abknickens.

Es ist auch zu erkennen, dass innerhalb der Ellipsen Motoren mit gleicher MCR Leistung in der BC-Emission um bis zu einer Größenordnung bzw. den Faktor 10 auseinander liegen können. Zu beachten ist, dass der Datenbasis lediglich zwei Datensätze zu 2-Takt Motoren (mit 6,5 und 10 MW) und lediglich 3 Datensätze zu 4-Takt Motoren (mit je 3,5 MW) im HFO Betrieb zu Grunde liegen. Diese sind in Abbildung 7 jeweils mit roten Pfeilen markiert. Beide Motortypen mit HFO entsprechen jeweils einer geringen MCR Leistungsgröße bezogen auf die Gesamtheit der jeweiligen Motorleistungsspektren bzw. der dazugehörigen Ellipsen. Für die Medium-Speed Motorenkategorie sind zur Verdeutlichung zwei weitere Motoren (mit 7 und 9 MW) mit roten Pfeilen gekennzeichnet, deren BC-Emission im Destillatbetrieb mit ULSD auf dem gleichen oder einem etwas höheren BC Niveau liegen, wie mit HFO. Außerdem haben sie im Destillatbetrieb eine höhere BC-Emission als die beiden Low-Speed Motoren mit HFO bei vergleichbarer Motorleistung. Ein direkter Vergleich von Rückstand- zu Destillatkraftstoff am selben Motor liegt im bisherigen Datenbestand nicht vor. Ein Einfluss der Kraftstoffqualität auf die BC-Emission liegt zwar nahe, kann aus der bisherigen Datenbasis jedoch nicht direkt abgeleitet werden, da er durch den Motorgrößeneinfluss überdeckt wird. Ein Vergleich der Kraftstoffqualitäten lässt sich wissenschaftlich valide nur bei dessen Verwendung an demselben Motor erschließen.

Eine mögliche Tendenz, die jedoch aufgrund der zu geringen Datenbasis nicht validiert werden kann, ergibt sich aus den unterschiedlichen Laufzeiten von vermessenen Motoren gleichen Typs aus der Datenbasis einmal am Prüfstand im Neuzustand und später an Bord nach 15.000 Betriebsstunden (Bh). Die BC-Emission im Neuzustand auf dem Prüfstand erscheint höher als im eingelaufenen Zustand an Bord. Verwiesen sei hier auf die MAN Präsentation beim 4th ICCT BC Workshop (Lauer, 2017). Das Verbesserungspotential während des Motoreinlaufs liegt jedoch wiederum innerhalb der Bandbreite der BC-Emission desselben Motortyps, gemessen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und auf unterschiedlichen Probeständen respektive Umgebungsbedingungen. Das Einlaufverhalten kann nach Ansicht der Motorenhersteller nach etwa 100 Bh als abgeschlossen angesehen werden. Das anschließende Verschleißverhalten der Einspritzkomponenten ist wiederum extrem abhängig von den Betriebsbedingungen und der Kraftstoffqualität. Zwischen den Wartungsintervallen wird von einer sogenannten „Badewannenkurve“ (Wikipedia) im BC-Emissionsverlauf ausgegangen. In Phase 1 passen sich die Einspritzbauteile aneinander an, Unterschiede zwischen einzelnen Zylindern gleichen sich aus, die BC-Emission sinkt und stabilisiert sich. In Phase 2 ist die Emission stabil. In Phase 3 steigt die BC-Emission an, da zunehmende Spaltmaße und Toleranzen zu schlechterer Einspritzqualität führen. Idealerweise findet eine Wartung zu einem Zeitpunkt statt, wenn die Kurve den Neuzustand wieder übersteigt.

Angemerkt werden muss in diesem Zusammenhang jedoch auch, dass der Einfluss des Aromatengehaltes im Kraftstoff auf die BC-Emission von Marinemotoren zum Zeitpunkt der Erstellung der Abbildung 7 (2018) nicht nachgewiesen war. Die hier vorliegende Untersuchung hat diesen Nachweis für Marinemotoren erstmalig erbracht. Außerdem werden die Aromatengehalte der Kraftstoffe mangels einer für alle verwendeten Kraftstoffe validen Methode bisher in der Regel nicht bestimmt. Das Einlaufverhalten ist daher zusätzlich mit Kraftstoffeinflüssen überlagert. Von den 35 Datensätzen der Ausgangsbasis war bei 22 Messkampagnen der Motor bereits eingefahren, bei 13 noch nicht.

4.1.5 Einflussparameter, abgeleitet aus den Eingangsdaten

Die Abhängigkeiten und Einflussgrößen der BC-Emission sind somit bei Projektbeginn wie folgt:

- ▶ Je größer bzw. leistungsstärker der Motor und umso geringer die Drehzahl, desto niedrigere BC-Emission treten auf.
- ▶ Niedrigere relative Motorlasten führen zu höheren BC-Emissionen.
- ▶ Neuere Motorenttechnologie führt zu niedrigeren BC-Emissionen.
- ▶ Die BC-Emission von Marinemotoren deckt 3 Größenordnungen ab.
- ▶ Die BC-Emission streut um etwa eine Größenordnung bezogen auf gleiche Motorleistung.
- ▶ Der Kraftstofftyp kann einen Einfluss auf die BC-Emission haben.
- ▶ FSN und PAS zeigen eine gute Korrelation.

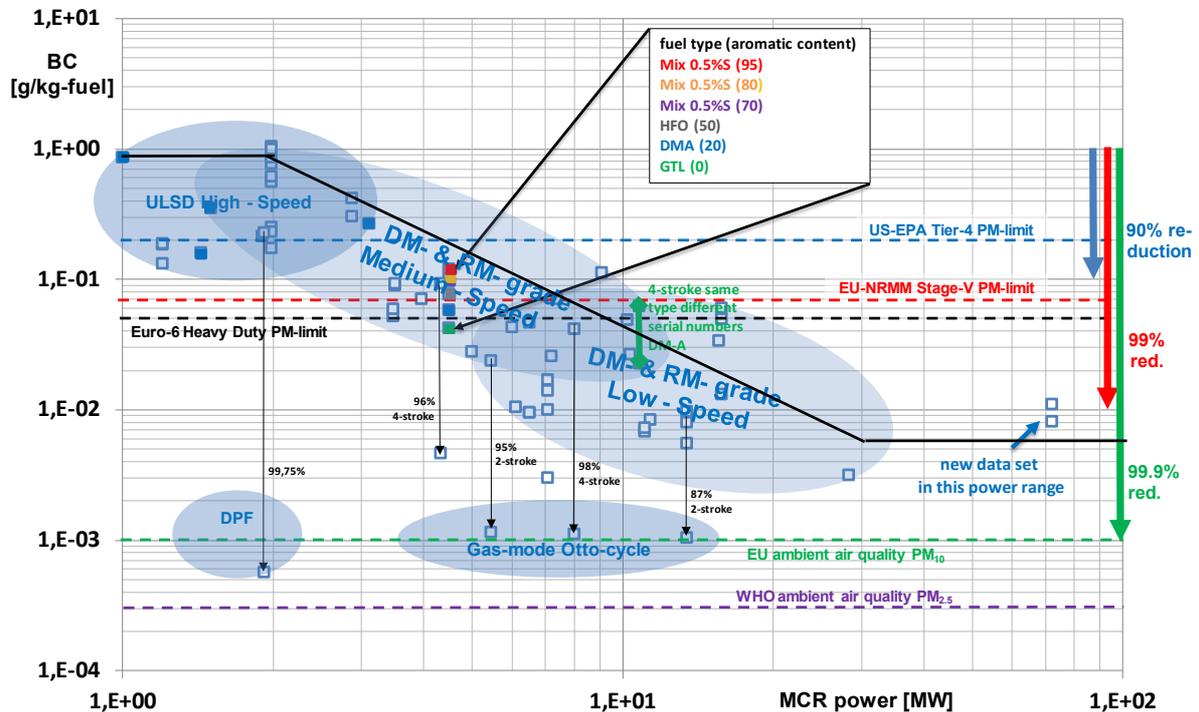
Bezogen auf einen potentiellen Grenzwert ergeben sich demnach folgende Feststellungen:

- ▶ Ein potentieller Grenzwert sollte nach Motorgröße und/oder Drehzahl gestaffelt werden.
- ▶ Ein potentieller Grenzwert sollte neben der Motorgröße bzw. Drehzahl auch nach Motorentyp (2-Takt vs. 4-Takt) unterschieden werden.
- ▶ Das Motorlastprofil sollte über einen entsprechenden Zykluswert abgebildet werden.
- ▶ Eine Upgrade- oder Retrofit-Strategie von bestehenden Motoren zu neuerer Motorenttechnologie oder eine Flottenerneuerung kann zur Senkung der BC beitragen.
- ▶ Das zu verwendende BC Messgerät muss einen weiten Konzentrationsbereich abdecken können.
- ▶ Die Kraftstoffqualität ist bei einer Grenzwertfestlegung zu berücksichtigen.

4.1.6 Vergleich und Auswertung verschiedener Messkampagnen: Erweiterung der Datenbasis im Rahmen des Projektes

Im Rahmen des Projektes wurden neuere Messkampagnen ausgewertet und Abbildung 7 damit sukzessive ergänzt. Abbildung 8 zeigt diese Ergänzungen.

Abbildung 8: Aktueller Datenstand Anfang 2022 mit 75 individuellen Datensätzen nach Tabelle 14 im Anhang



Quelle: Eigene Zusammenstellung, MAN ES

Neben den auf PPR 4/9 (2016) nachfolgenden IMO Submissionen PPR 6/Inf.12 (2018), PPR-6/Inf.13 (2018), PPR 6/Inf.14 (2018), PPR 7/8 (2019), PPR 8/5/1 (2020), MEPC-76/Inf.43 (2021), MEPC-76/Inf.44 (2012), MEPC-76/Inf.45 (2021) wurden auch Daten aus zwei Messkampagnen UCR (2018) und UCR (2019) aufgenommen. Weiterhin wurden Daten aus (Corbin et al., 2020) und aus einer aktuellen MAN internen Untersuchung (unveröffentlicht, 2021) mit einem DPF aufgenommen. Die Daten wurden analog zu den EUROMOT Daten aus PPR 4/9 (2016) behandelt und ausgewertet und ins Diagramm eingefügt. Bei fehlenden Mode-Punkten wurden die Cycle-Werte nach IMO Vorgaben berechnet oder anhand vergleichbarer Motorgrößen und -typen inter- oder extrapoliert. Dadurch stieg der Datenstand von 35 auf nun 75 Datensätze an. Neben dem US-EPA PM Grenzwert wurden der Euro-6 Nzf (Heavy Duty) Grenzwert von 0,01 g/kWh (schwarz gestrichelte Linie) sowie der EU-NRMM PM Grenzwert der Stufe 5 von 0,015 g/kWh (rot gestrichelte Linie) als Referenzwerte aufgenommen. Die Ergebnisse der Messkampagne PPR 8/5/1 (2020) im Rahmen dieses Projektes bezüglich des Aromatengehaltes im Kraftstoff sind in Abbildung 8 durch die Legende mit Angabe des Aromatengehaltes (Wert in Klammern in %) im Kraftstoff hervorgehoben. Der Einzylinder Versuchsmotor mit 0,64 MW und 750 rpm aus dem Vorhaben entspricht einem Serienmotor, der im Leistungsbereich von etwa 3,6–6 MW angeboten wird (6–10 Zylinder Reihenmotor). Die mittlere Leistung über alle verkauften Zylinderzahlen liegt bei etwa 4,5 MW MCR, weshalb die Versuchsergebnisse bei dieser Leistung im Diagramm eingetragen sind.

4.1.7 Diskussion und Interpretation der erweiterten Messdaten

Die Daten von UCR ergänzen den Leistungsbereich um einen 72 MW Low-Speed Motor. Das BC-Emissionsniveau dieses Motors indiziert ein Abflachen der Trendlinie bei 2-Takt Low-Speed Motoren zu sehr großen Motorleistungen bzw. niedrigen Drehzahlen hin. Ein entsprechendes Abflachen mit einem Überlappungsbereich kann nach Ansicht der Autor*innen der hier vorliegenden Studie auch zu kleinen Motorleistungen bzw. zu hohen Drehzahlen hin erwartet werden, da es sich dann ausschließlich um mit Destillatkraftstoff betriebene 4-Takt High-Speed Motoren handelt.

Die Spannweite der BC-Emission zwischen einem aromatenfreien Kraftstoff, wie z.B. GtL, und einem „reinen“ Aromatenkraftstoff, im Projekt näherungsweise durch GtL und den Kraftstoff mit 95% Aromatengehalt nach Herstellerangabe bzw. 97% nach Analyse, abgebildet, liegt nach den Ergebnissen dieses Vorhabens bei Faktor 2,9 (FSN) bzw. 3,8 (PAS). GtL bietet gegenüber einem reinen Aromatenkraftstoff somit ein Reduktionspotential von etwa 66 % (FSN) bzw. 74 % (PAS) im E2-Cycle. Das BC-Reduktionspotential des verwendeten DMA gegenüber dem verwendeten HFO im Vorhaben, der sogenannte Kraftstoffwechsel („fuel-switch“) von Rückstandskraftstoff (HFO) zu Destillatkraftstoff, beträgt 34 % (FSN) bzw. 25 % (PAS) im E2-Cycle.

Mit schwarzen Pfeilen dargestellt ist das mögliche BC-Reduktionspotential durch LNG und DPF. Das Reduktionspotential von LNG im Vergleich zum Dieselbetrieb bei DF Motoren erreicht im Mittel 94 %. Das Reduktionspotential des DPF von 99,8 % ist eine Indikation dessen, was ein DPF im Neuzustand am Probestand nach internen Messungen (MAN, 2021) mit schwefelfreiem Tankstellendiesel nach EN 590 erreichen kann. Diese Angabe ist jedoch statistisch nicht belastbar, da es sich um den bisher einzigen Datensatz eines mit einem DPF ausgerüsteten Marinemotors mit 1,9 MW Leistung handelt. Das erreichte Niveau ist jedoch vergleichbar zum Niveau der kleinen High-Speed Motoren <1MW mit DPF aus dem Automobil- und Baumaschinenbereich aus Abbildung 7. Die Indikation ist somit valide wenn auch nicht statistisch abgesichert. In Anlehnung an Abbildung 7 und der DPF Daten aus (Johnson und Miller, 2015) ist daher ebenfalls eine Ellipse als Erwartungsbereich der BC-Emission bei DPF Anwendung markiert. Zum DF Motor mit 4,3 MW MCR ist anzumerken, dass der E2-Cycle nicht im reinen Gasbetrieb gefahren wurde. Damit sollte ein erhöhter Methan (CH₄)-Schlupf des Motors zur Teillast hin vermieden werden, was aber wiederum zu höheren BC-Emissionen führt. Weitere Ausführungen dazu finden sich in (Corbin et al., 2020), der auch auf das Global Warming Potential (GWP) eingeht. Ein Umschalten von LNG auf Diesel bzw. eine Erhöhung des Pilotkraftstoffanteiles im Gasbetrieb erhöht die BC-Emission, senkt jedoch den zur Teillast erhöhten CH₄-Schlupf. Welche Variante letztendlich vorteilhafter ist, hängt neben dem GWP unter Umständen auch von den lokalen Gegebenheiten wie z. B. der Immissionsituation im Hafen ab. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf.

Zusätzlich sind in Abbildung 8 die Datensätze von zwei Motoren, die bereits in Abbildung 7 vorhanden sind, grün markiert. Es handelt sich dabei um zwei baugleiche Motoren einer Serie, die mit gleichem Kraftstofftyp aber zu unterschiedlichen Jahreszeiten auf unterschiedlichen Prüfständen gemessen wurden. Es zeigt sich dabei ein Unterschied von Faktor 2,7 bzw. 64 % in der BC-Emission. Die Ursachen für diesen Unterschied sowie ein potentieller Einfluss von Umgebungsbedingungen ist bisher nicht geklärt. Analog zur NO_x-Korrektur aufgrund von unterschiedlichen Umgebungsbedingungen könnte auch eine Korrektur der BC-Emission notwendig sein. Hierzu besteht ebenfalls weiterer Forschungsbedarf.

In Abbildung 9 sind alle 75 Datensätze aus Abbildung 8 anstelle über der MCR Leistung über der Nenndrehzahl aufgetragen. In Tabelle 14 im Anhang findet sich eine Übersicht aller Datensätze der Abbildung 8 und Abbildung 9. Erkennbar ist in Abbildung 9 eine deutliche Clusterbildung

der drei Motor Kategorien High-Speed um 2000 (von 2500 bis 1800) rpm, Medium-Speed um 750 (1500–514) rpm und Low-Speed um 90 (123–64) rpm. Hier ist anzumerken, dass nach IMO-Unterteilung, die Grenze zwischen High- und Medium-Speed bei 2000 rpm gezogen wird, wohingegen dieser Übergang nach Ansicht der Autor*innen der hier vorliegenden Studie eher unterhalb von 1800 rpm zu ziehen wäre. Die Ellipsen, die in ihrer Höhe einen Bereich von etwa einer Größenordnung in Abbildung 7 und Abbildung 8 abgedeckt haben, gehen jetzt in Kreise über, die nun jedoch annähernd 2 Größenordnungen in der Höhe bei Medium- und Slow-Speed abdecken. Der zuvor in Abbildung 7 und Abbildung 8 sichtbare Einfluss der Motorleistung geht in Abbildung 9 über der Drehzahl verloren. Das bestätigt sich auch an der Trendlinie. Die Trendlinie in schwarz in Abbildung 9 gibt die BC-Emission in Abhängigkeit der Drehzahl nach der linearen Regression von $y = 0,0001 x^1$ für den Dieselbetrieb wieder. Das Bestimmtheitsmaß R^2 sinkt gegenüber der Trendlinie in Abbildung 7 von 0,66 auf nur noch 0,38 ab. Das bedeutet, dass die BC-Emission weniger gut mit der Motordrehzahl korreliert als mit der MCR Leistung.

Zusätzlich ist in der Legende in Abbildung 9 für jeden Datensatz die jeweilige Anwendung des Motors als Hauptantriebsmaschine nach Generator (E2) bzw. Propeller (E3) oder als Hilfsmaschine (D2) im jeweiligen Zyklus angegeben. Man erkennt, dass Low-Speed Motoren hauptsächlich als E3 und Medium-Speed als E2 oder D2 Anwendung finden. Bei High-Speed Motoren existiert keine bevorzugte Anwendung, was jedoch an der sehr geringen Datenbasis liegen kann. Der geringe Datenstand zu High-Speed Motoren nach IMO Unterteilung ist insofern kritisch zu bewerten, da diese Motoren besonders zahlreich im lokalen Verkehr – auch innerhalb der Arktis – eingesetzt werden und ihr BC-Emissionsbeitrag lediglich auf der Basis von 2 Datensätzen abgeschätzt wird.

In der hier vorliegenden Auswertung können anhand der Angaben aus MEPC-76/Inf.43 (2021), PPR 6/Inf.14 (2018) und UCR (2019) detaillierte Vergleichswerte zum Kraftstoffwechsel bei identischem Low-Speed Motor angegeben werden. In MEPC-76/Inf.43 (2021) verringert sich die BC-Emission im Falle des Wechsels von RME-180 (Schweröl nach ISO 8217 Viskositätsklasse E) auf MGO um 74 % von 0,05 auf 0,013 g/kg-fuel und im Falle des Wechsels von RMG-380 (Schweröl nach ISO 8217 Viskositätsklasse G) auf MGO um 78 % von 0,06 auf 0,013 g/kg-fuel. In PPR 6/Inf.14 (2018) verringert sich die BC-Emission beim Wechsel von HFO auf MDO unter Tier-II Betrieb ohne Abgasrückführung (EGR) um 70 % von 0,01 auf 0,003 g/kg-fuel und um 18 % von 0,017 auf 0,014 g/kg-fuel unter Tier-III Betrieb mit EGR. In UCR (2019) erhöht sich jedoch die BC-Emission bei einem Wechsel von ULSFO (HFO) zu MGO um 36 % von 0,008 auf 0,011 g/kg-fuel. Auf Basis dieser fünf Vergleiche kann trotzdem von einer Reduktion der BC-Emission für Low-Speed Motoren bei einem Wechsel von HFO auf Destillat von im Mittel 41 % ausgegangen werden, wobei eine Schwankungsbreite zwischen 78 % Reduktion und 36 % Erhöhung vorliegt. Dabei muss auf die große Bandbreite der Daten und den unbekanntem Aromatengehalt der jeweils verwendeten Kraftstoffe hingewiesen werden. In PPR 8/5/2, 2021 zeigt sich nach der Einführung des weltweiten 0,50 % S Grenzwertes eine Verringerung des Mittelwertes des CCAI von 848 für HFO in 2018 auf 813 für VLSFO in 2020. Die Bandbreite des CCAI hat sich jedoch von 778–881 für HFO in 2018 auf 763–891 für VLSFO in 2020 erhöht. Es ist daher im Mittel eine Abnahme der BC-Emission durch die neuen Kraftstoffe seit 2020 zu erwarten. Die Bandbreite der möglichen BC-Emissionen hat jedoch insgesamt zugenommen. Nach Ansicht der Motorenhersteller besitzt der veraltete CCAI Wert für moderne VLSFO Kraftstoffmischungen jedoch keine Aussagekraft mehr.

In der hier vorliegenden Auswertung können anhand der Angaben aus (MEPC 76/Inf.43, 2021), PPR 6/Inf.13 (2018) und UCR (2019) ebenfalls detaillierte Vergleichswerte bei identischem Medium-Speed Motor angegeben werden. In (MEPC 76/Inf.43, 2021) verringert sich die BC-Emission im Falle des Wechsels von RME-180 auf MGO um 30 % von 0,186 auf 0,131 g/kg-fuel

und im Falle des Wechsels von RMG-380 auf MGO um 31 % von 0,188 auf 0,131 g/kg-fuel. In PPR 6/Inf.13 (2018) verringert sich die BC-Emission beim Wechsel von HFO auf MGO unter Tier-II Betrieb ohne SCR um 67 % von 0,76 auf 0,25 g/kg-fuel und um 74 % von 0,86 auf 0,23 g/kg-fuel unter Tier-III Betrieb mit SCR. Im Gegensatz dazu erhöht sich die BC-Emission beim Wechsel von HFO auf einen 0,5 % S Kraftstoff-Mix unter Tier-II Betrieb ohne SCR um 37 % von 0,76 auf 1,04 g/kg-fuel und um 16 % von 0,86 auf 1,0 g/kg-fuel unter Tier-III Betrieb mit SCR. Dabei betonen die Autor*innen von PPR 6/Inf.13 (2018), dass es sich beim 0,5 % S Mix nicht um einen kommerziellen Kraftstoff handelte. In UCR (2019) erhöht sich die BC-Emission auch bei der Medium-Speed Hilfsmaschine bei einem Wechsel von ULSFO (HFO) zu MGO um 38 % von 0,30 auf 0,42 g/kg-fuel. Auf Basis dieser fünf Vergleiche (der 0,5 % S-Mix ausgenommen) kann eine Reduktion der BC-Emission für Medium-Speed Motoren bei einem Wechsel von HFO auf Destillat von im Mittel 31 % angegeben werden bei einer Schwankungsbreite zwischen 74 % Reduktion und 37 % Erhöhung. Dabei muss jedoch wiederum auf die große Bandbreite der Daten und den unbekanntem Aromatengehalt der jeweils verwendeten Kraftstoffe hingewiesen werden. Die Reduktion der BC-Emission am Versuchsmotor im Rahmen dieses Projektes beim Wechsel von HFO auf DMA betrug 25 % gemessen mit PAS bzw. 34 % gemessen mit FSN PPR 8/5/1 (2020).

Beim Vergleich der Reduktionsraten zwischen medium- und low-speed fällt auf, dass die Option EGR bei 2-Takt unter Tier III Anforderungen beim Kraftstoffwechsel geringere BC Reduktionsraten zeigt als die Option SCR bei 4-Takt. Inwiefern sich dieser Unterschied allein durch die EGR Technologie erklären lässt, kann nicht abschließend geklärt werden, da zu einer Variante Tier III mit SCR bei low-speed keine Daten vorliegen. Es ist aber aus Automotive und NRMM bekannt, dass EGR die BC-Emission erhöht. Zum Vergleich von SCR und EGR besteht diesbezüglich bei Marinemotoren weiterer Forschungsbedarf.

In der hier aktuell vorliegenden Datenbasis wurden viele Messungen von in Betrieb befindlichen Motoren an Bord aufgenommen. Diese zeigen keine signifikant erhöhten BC-Emissionen gegenüber Messungen am Probestand und bezogen auf die Streubreite aller Messungen. Der Einfluss des Aromatengehaltes wurde im Rahmen des hier vorliegenden Projektes, veröffentlicht in PPR 8/5/1 (2020) explizit untersucht. Er liegt ebenfalls innerhalb des Streubandes aller Messungen.

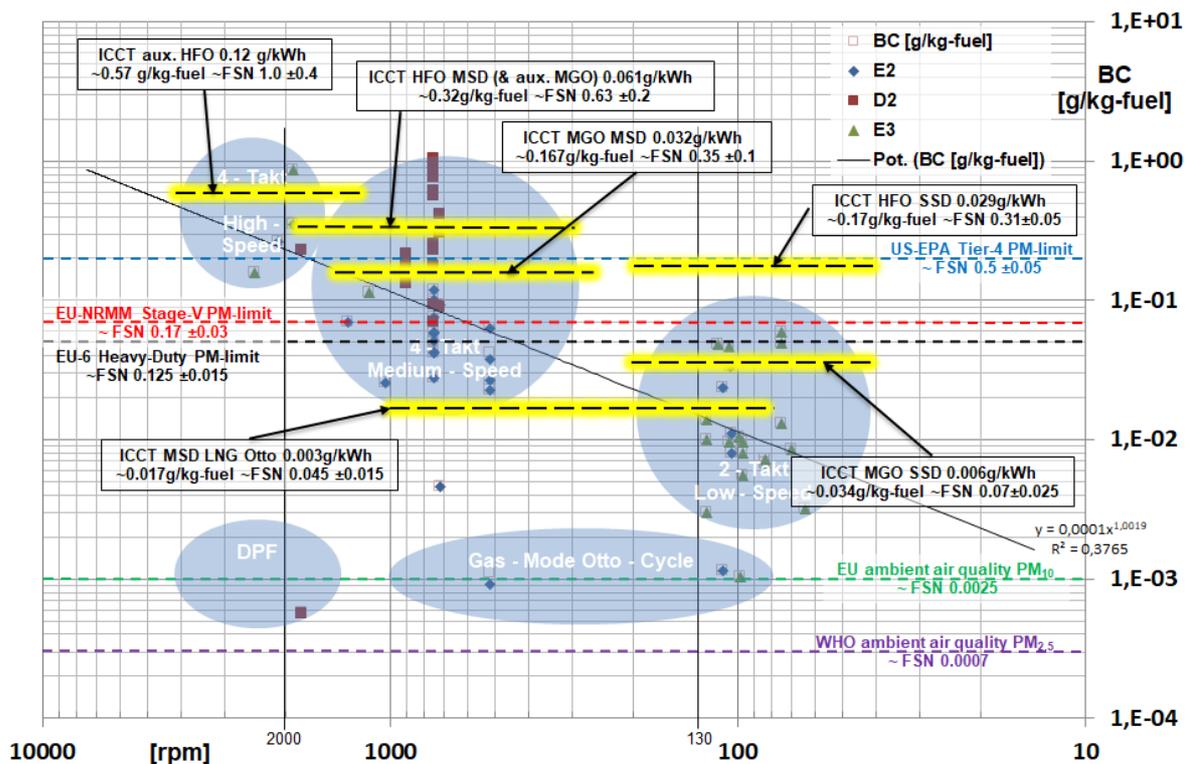
4.1.8 Zusammenfassende Schlussfolgerungen anhand des erweiterten Datensatzes

Bezogen auf die Entwicklung eines potentiellen BC-Grenzwertes ergeben sich nach der Auswertung des erweiterten Datensatzes folgende zusätzliche Feststellungen:

- ▶ Ein Abflachen der Trendlinie bei großen 2-Takt Langsamläufermotoren ist aufgrund der Daten des 72 MW Motors anzunehmen. Ein konstanter BC Grenzwert für Low-Speed Motoren analog der IMO NO_x-Grenzwertkurve <130 rpm erscheint plausibel.
- ▶ Ein Abflachen der Trendlinie bei kleinen 4-Takt Schnellläufermotoren ist aufgrund der gleichen Motortechnologie dieser Kategorie (4-Takt, High-Speed) und gleichen Kraftstofftyps (Destillatkraftstoff) anzunehmen. Ein konstanter BC-Grenzwert für Schnellläufermotoren analog der IMO NO_x-Grenzwertkurve >=2000 rpm erscheint plausibel.
- ▶ Ein geringerer Aromatengehalt im Kraftstoff führt zu niedrigerer BC-Emission, der Aromatengehalt bzw. die Kraftstoffqualität hat einen wesentlichen Einfluss auf die BC-Emission und sollte bei einer Grenzwertfestlegung berücksichtigt werden.

- ▶ LNG Betrieb ist hinsichtlich BC als gleichwertig zum Dieseltreibstoff mit DPF zu sehen. Unterschiedliche Technologien (LNG vs. DPF) können zu BC-Emission auf gleichem Niveau führen.
- ▶ Die Vermeidung von erhöhtem CH₄-Schlupf bei DF Mittelschnellläufermotoren bei Teillast durch Umschalten auf Dieseltreibstoff führt zu höheren BC-Emissionen.
- ▶ Bei baugleichen Motoren zeigt sich ein Streuband der BC-Emission von etwa Faktor 3.
- ▶ Die BC-Emission korreliert besser mit der MCR Leistung ($R^2 = 0,66$) als mit der Nenndrehzahl des Motors ($R^2 = 0,38$).
- ▶ Der aktuelle Datenstand zu Schnellläufermotoren ist im Verhältnis zu Mittelschnell- und Langsamläufermotoren sehr gering.
- ▶ Ein Wechsel von HFO zu Destillat bei 2-Takt Langsamläufermotoren reduziert die BC-Emission im Schnitt um etwa 41 % bei einer Schwankungsbreite zwischen 78 % Reduktion und 36 % Erhöhung.
- ▶ Ein Wechsel von HFO zu Destillat bei 4-Takt Mittelschnellläufermotoren reduziert die BC-Emission im Schnitt um etwa 31 % bei einer Schwankungsbreite zwischen 74 % Reduktion und 37 % Erhöhung.
- ▶ SCR Betrieb scheint gegenüber EGR Betrieb Vorteile bei der BC-Emission zu bieten.

Abbildung 9: Darstellung über Drehzahl und Datenvergleich mit ICCT (gelb unterlegt gestrichelt).



Quelle: Eigene Zusammenstellung, Olmer et al., 2017; Comer et al., 2017

4.1.9 Vergleich der BC-Datenauswertung dieser Studie mit der Auswertung von ICCT

In Abbildung 9 sind gelb unterlegt gestrichelt die BC-Emissionsangaben der ICCT-Berichte (Olmer et al., 2017 und Comer et al., 2017) gemittelt dargestellt. Diese Veröffentlichungen von ICCT werden im Folgenden vertiefend analysiert, da sie als Basisdaten u. a. in die vierte IMO Greenhouse Gas Study (IMO, 2020) eingeflossen sind, die oft als Grundlage in IMO-Diskussionen zur Treibhausgasminde rung herangezogen wird. Die Veröffentlichungen von ICCT sind die einzig bekannte Meta-Studie zu BC, in der eine Vielzahl von Studien kombiniert werden und sie basiert im Wesentlichen auf denselben EUROMOT Daten aus PPR 4/9 (2016), die auch dieser Studie zu Projektbeginn zugrunde lagen. Für die verschiedenen Motortypen werden von ICCT (Olmer et al., 2017 und Comer et al., 2017) pauschalierte Werte wie folgt angegeben: Hilfsdiesel (aux.)(4-Takt) HFO 0,12 g/kWh, Mittelschnellläufer (MSD) (4-Takt) Diesel MGO/HFO 0,032 bzw. 0,061 g/kWh, Mittelschnellläufer (4-Takt) Otto LNG 0,003 g/kWh und Langsamläufer (SSD) (2-Takt) Diesel MGO/HFO 0,006 bzw. 0,029 g/kWh. Die ICCT Angaben wurden jeweils wieder analog zur bisherigen Auswertung von g/kWh in g/kg-fuel und zurück in FSN umgerechnet und in den Legenden dargestellt.

Es ist festzustellen, dass in der hier vorliegenden Auswertung von veröffentlichten BC-Emissionen für den Otto-LNG Betrieb von im Mittel 0,001 g/kg-fuel gegenüber den ICCT Angaben von 0,017 g/kg-fuel die BC-Emission um etwa Faktor 17 niedriger ausfallen.

Bei Langsamläufermotoren geht ICCT von einer pauschalen BC Reduktion von 80 % bei einem Wechsel von HFO (0,17 g/kg-fuel) zu Destillat (0,034 g/kg-fuel) aus. Auf Basis der hier vorliegenden Auswertung kann im Mittel eine Reduktion der BC-Emission für Langsamläufermotoren bei einem Wechsel von HFO auf Destillat von 41 % angegeben werden. Insgesamt betrachtet liegen die ICCT Angaben für Low-Speed für HFO um etwa Faktor 8,5 bzw. für Destillat um etwa Faktor 1,7 über dem Mittelwert der hier vorliegenden Auswertung von etwa 0,02 g/kg-fuel.

Bei Mittelschnellläufermotoren geht ICCT von einer pauschalen Reduktion von 48 % bei einem Wechsel von HFO (0,32 g/kg-fuel) zu Destillat (0,167 g/kg-fuel) aus. Auf Basis der hier vorliegenden Auswertung kann im Mittel eine Reduktion der BC-Emission für Mittelschnellläufermotoren bei einem Wechsel von HFO auf Destillat von 31 % angegeben werden. Insgesamt betrachtet liegen die ICCT Abgaben für Medium-Speed für HFO um etwa Faktor 2 bzw. für Destillat um 11 % über dem Mittelwert dieser Auswertung von etwa 0,15 g/kg-fuel.

Bei Schnellläufermotoren macht ICCT keine Angaben. ICCT gibt jedoch einen Wert von etwa 0,57 g/kg-fuel für Hilfsmaschinen (auxiliary) mit HFO an. Dieser Wert liegt auf vergleichbarem Niveau für den Mittelwert von etwa 0,5 g/kg-fuel der hier vorliegenden Auswertung, jedoch für High-Speed Motoren im ausschließlichen Destillatbetrieb.

Der Unterschied in der Datenauswertung der hier vorliegenden Studie im Vergleich zur Datenauswertung von ICCT erklärt sich aus zwei Gründen. Der erste Grund ist, dass ICCT in ihrer Datenauswertung den Größeneinfluss der Motoren innerhalb der jeweiligen Motorkategorien Low-Speed und Medium-Speed nicht berücksichtigt. ICCT vergleicht einen leistungsmäßig kleinen Motor mit HFO mit deutlich größeren Motoren mit MGO, sowohl bei Low- als auch bei Medium-Speed Motoren. Das führt bei ICCT zur Annahme eines größeren Unterschiedes der BC-Emission bei einem Wechsel von HFO zu Destillatkraftstoff als er nach Datenlage der anderen ausgewerteten Studien bei gleichem Motor auftritt.

Der zweite Grund sind verschiedene Faktoren, die ICCT in ihrer Auswertung auf die gemessenen BC-Emissionen aufschlägt. Diese Aufschläge werden von ICCT mit folgenden Annahmen begründet:

- ▶ Getestet wurden BC-Emissionen von neuen, gut gewarteten Motoren. Bei BC-Emissionen von älteren in Betrieb befindlichen Motoren, die möglicherweise nicht so gut gewartet werden, rechnet ICCT mit höheren Werten. Der Großteil der Flotte besteht aus Tier-0 oder Tier-I Motoren. Die an neuen, gut gewarteten Tier-II und Tier-III Motoren gemessenen BC-Emissionen sind wahrscheinlich niedriger als die von Motoren in der globalen Flotte.
- ▶ Schwankungen in der Kraftstoffqualität können die BC-Emissionen beeinflussen. Im Allgemeinen emittieren minderwertige Kraftstoffe mehr BC als höherwertige Kraftstoffe. Die verwendeten Kraftstoffe der Messungen in Europa und Nordamerika können qualitativ hochwertiger sein als Kraftstoffe aus anderen Regionen.
- ▶ ICCT nimmt weiterhin an, dass eine Verdoppelung der unteren Grenze der Schätzung einen angemessenen Unsicherheitsbereich (2 x Standardabweichung) bei den tatsächlichen BC-Emissionen bietet. Ihre beste Schätzung der BC-Emission ist somit das Mittel zwischen einer unteren und einer oberen Grenze. Dabei nehmen sie aus den beiden vorangestellten Gründen als untere Grenze die bereits mit einem Faktor beaufschlagte Rohdatenbasis an.

Insgesamt geht ICCT somit von einem „worst case Scenario“ aus, was zur Erreichung eines maximalen Schutzes sicherlich sinnvoll ist, den tatsächlichen BC-Emissionsbeitrag der Schifffahrt jedoch vermutlich überschätzt. In der hier vorliegenden Auswertung von 18 Messkampagnen von in Betrieb befindlichen Motoren an Bord und von 42 Messkampagnen von bereits eingelaufenen Motoren am Probestand zeigen sich keine signifikant erhöhten BC-Emissionen gegenüber den 15 Messkampagnen von noch nicht eingefahrenen Motoren. Einzelmessungen zeigen, dass die BC-Emission von gelaufenen Motoren an Bord sogar etwas geringer ausfällt als im Neuzustand am Probestand.

Der Einfluss des Aromatengehaltes wurde in diesem Vorhaben explizit untersucht. Dabei wurde eine mögliche Bandbreite von 0 bis 97 % Aromatengehalt untersucht. Die Untersuchung deckt somit den gesamten möglichen Bereich ab. Die Schwankungsbreite der BC-Emission liegt dabei innerhalb des Streubandes für eine Motorleistung, wobei das Streuband der Messungen nach Abbildung 8 bei einer Größenordnung bzw. Faktor 10 für gleiche MCR Leistungen liegt. Somit kann kein regionaler Unterschied in der Kraftstoffqualität unterstellt werden, da der maximal mögliche Schwankungsbereich in der hier vorliegenden Auswertung bereits abgedeckt ist. Der Ort einer Messung sagt nichts darüber aus, wo der verwendete Kraftstoff ursprünglich gebunkert bzw. eingekauft wurde. Insbesondere bei den Messungen an Bord lässt der Ort der Messung keine Rückschlüsse auf die Herkunft des an Bord befindlichen gebunkerten Kraftstoffes zu. In der IMO Submission (MEPC 79/5, 2022) wird ferner dargelegt, dass bei Kraftstofflieferungen in Europa und an der Ostküste der USA im Gegensatz zum Rest der Welt überdurchschnittlich häufig ein Überschreiten der zulässigen Schwefelgehalte festgestellt wurde. Das Argument einer „besseren“ Kraftstoffqualität bei Messungen in Europa und Nordamerika kann daher nicht bestätigt werden.

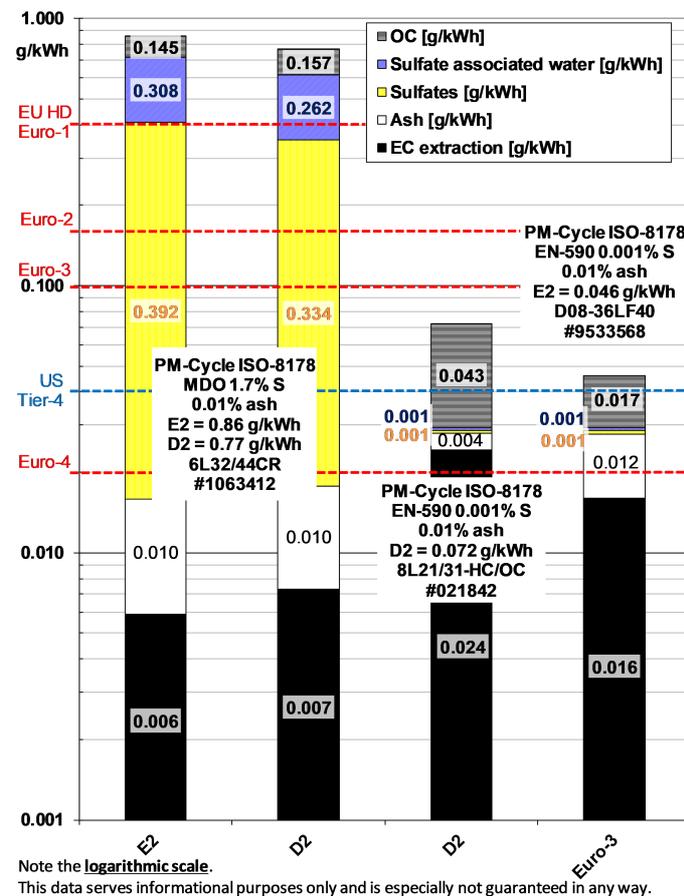
In der hier vorliegenden Auswertung bestätigt sich, dass es keine Messungen von alten Tier-0 Motoren vor Baujahr 2000 aus dem Feld gibt. Angaben zum Anteil der Tier-Stufen in der weltweiten Flotte finden sich in Olmer et al., 2017 und Comer et al., 2017. Demnach bestehen zum Zeitpunkt Mitte 2016 noch 54 % der Flotte aus Tier-0 Schiffen. Es ist anzunehmen, dass insbesondere die Einführung von Common-Rail (CR) Einspritztechnologie und eine Steigerung der Turboladerwirkungsgrade mit höheren Ladedrücken zu einer Verringerung der BC-

Emission insbesondere im niedrigen Lastbereich neuerer Motoren beiträgt. Mangels verfügbarer Daten, lässt sich der mögliche Unterschied jedoch nicht näher quantifizieren. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf. Das ICCT Argument zur Flottenzusammensetzung kann somit bestätigt werden.

4.1.10 Vergleich der gemessenen BC-Emissionen mit Emissionen anderer Verkehrssektoren

In Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9 sind zum Vergleich relevante PM Grenzwerte aus dem Fahrzeug- und Baumaschinenbereich eingetragen. Eine Gegenüberstellung der PM Grenzwerte aus dem Fahrzeug- und Baumaschinenbereich mit der BC-Emission von Schiffsdieseln ist insofern gerechtfertigt, da die PM Emissionen mit schwefelfreiem Tankstellendiesel zum überwiegenden Teil aus elementarem Kohlenstoff (EC) bzw. BC bestehen. In Abbildung 10 ist beispielhaft ein Vergleich dargestellt, der die Zusammensetzung der Partikelmasse von 2 Marinemotoren und einem Nutzfahrzeugmotor zeigt, (MAN, 2018).

Abbildung 10: PM-Emission und -Zusammensetzung von zwei mittelschnelllaufenden 4-Takt Marinemotoren und einem schnelllaufenden Nfz-Motor der Stufe Euro-3



Quelle: MAN, 2018

Abbildung 10 zeigt als Balkendiagramm die PM-Emission und Zusammensetzung zweier Mittelschnellläufer 4-Takt Marinemotoren (6L32/40 und 8L21/31) mit MDO mit 1,7 % Schwefel im E2 Zyklus (erster Balken von links) und im D2 Zyklus (zweiter Balken von links) und mit EN 590 Tankstellendiesel im D2 Zyklus (dritter Balken von links) in g/kWh in logarithmischer Darstellung. Gegenübergestellt ist ein Nfz-Motor nach Euro-3, aber ohne Abgasnachbehandlung,

d. h. ohne Oxidationskatalysator (vierter Balken von links) im E2 Zyklus. Der bei Euro-3 normalerweise verwendete Oxikat würde unter der Voraussetzung eines schwefelfreien Kraftstoffes den organischen Kohlenstoff (OC)-Anteil (schraffierter Bereich) der PM weitgehend eliminieren.

Die BC-Emission (schwarzer Bereich) des Nfz Motors (206 kW, 2300 rpm) liegt mit 16 mg/kWh am unteren Ende der High-Speed Motoren aus Abbildung 9. Der 8L21/31 (1,76 MW, 900 rpm) mit 24 mg/kWh BC liegt im mittleren Bereich der Medium-Speed Motoren aus Abbildung 9 und damit vergleichbar zum Nfz Motor. Die BC-Emission des 6L32/44 (3 MW, 750 rpm) mit 7 bzw. 6 mg/kWh liegt im unteren Viertel der Medium-Speed Motoren in Abbildung 9 und damit deutlich niedriger als der Nfz Motor. Aus Abbildung 10 geht außerdem hervor, dass bei Marinemotoren mit schwefelhaltigen Kraftstoffen der Anteil aus Sulfat und sulfatgebundenem Wasser den größten Beitrag der PM-Emission ausmacht, gefolgt von OC. Bei Verwendung von schwefelfreiem Kraftstoff macht der OC-Anteil den größten PM-Anteil aus. BC macht neben Aschebestandteilen bei Marinekraftstoffen den geringsten Anteil aus.

Eine BC-Limitierung auf einem vergleichbaren Niveau einer PM-Limitierung aus dem Fahrzeug- oder Baumaschinenbereich noch ohne zwingende Abgasnachbehandlung (vor Euro 3) wäre somit für Marinemotoren naheliegend. Eine solche Grenzwertfindung resultierend aus einem High-speed Motorensektor mit schwefelfreiem und aromatenarmem Kraftstoff wird jedoch der großen Bandbreite der BC-Emissionen bedingt durch die unterschiedlichen Technologien zwischen High-, Medium- und Low-Speed Motoren und vor allem der Bandbreite an unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten im Marinesektor nicht gerecht. Bereits zu Beginn der BC Diskussion in der IMO bei BLG-17/10 (2012) wurden Messmethoden, darunter auch PM die nicht spezifisch für BC sind, aus der weiteren Diskussion ausgeschlossen. Eine PM-Limitierung anstelle der BC-Limitierung für Marinemotoren macht jedoch erst bei schwefelfreien Marinekraftstoffen mit einem Schwefelgehalt < 0,001 % analog dem Straßenverkehrssektor nach Ansicht der Autor*innen Sinn.

4.2 Kriterien zur Grenzwertentwicklung und mögliche Überwachungsmethoden

In diesem Kapitel werden Kriterien zur Grenzwertfindung dargestellt und diese in Abhängigkeit möglicher Messverfahren und Methoden zur Überwachung an Bord betrachtet.

Überwachungsmethoden bzw. Kontrollverfahren sind sowohl technisch als auch regulatorisch zu definieren. Dazu müssen Grenzwerte festgelegt werden. Die Kontrollinstanzen, wie beispielsweise Klassifikationsgesellschaften oder Hafenstaatskontrolle (Port State Control) und deren Zuständigkeiten sowie die Verantwortung der Schiffsbetreiber sind festzulegen. Hierzu kann zum Teil auf bestehende Erfahrungen analog MARPOL Anlage VI zurückgegriffen werden. Dennoch stellt das Emissionsverhalten bei BC eine besondere Herausforderung durch seine komplexen Abhängigkeiten von Motorentypen, Kraftstoffqualitäten und weiteren Einflüssen dar.

4.2.1 Bewertung der Messmethoden / -techniken im Hinblick auf eine Grenzwerteinführung

Die diversen Submissionen bei der IMO zeigen, sofern Vergleichsmessungen durchgeführt wurden, dass FSN und PAS vergleichbare bzw. übereinstimmende Daten zu BC liefern. Für eine Messung am Probestand könnten daher beide Geräte zum Einsatz kommen. Aufgrund der höheren Komplexität des PAS Messgerätes mit zusätzlicher Verdünnungsluft als Betriebsmedium und daher möglicher Fehlerquelle des Verdünnungsverhältnisses ist von einem Einsatz des PAS an Bord eher abzuraten. Das FSN Messgerät ist deutlich robuster und weniger

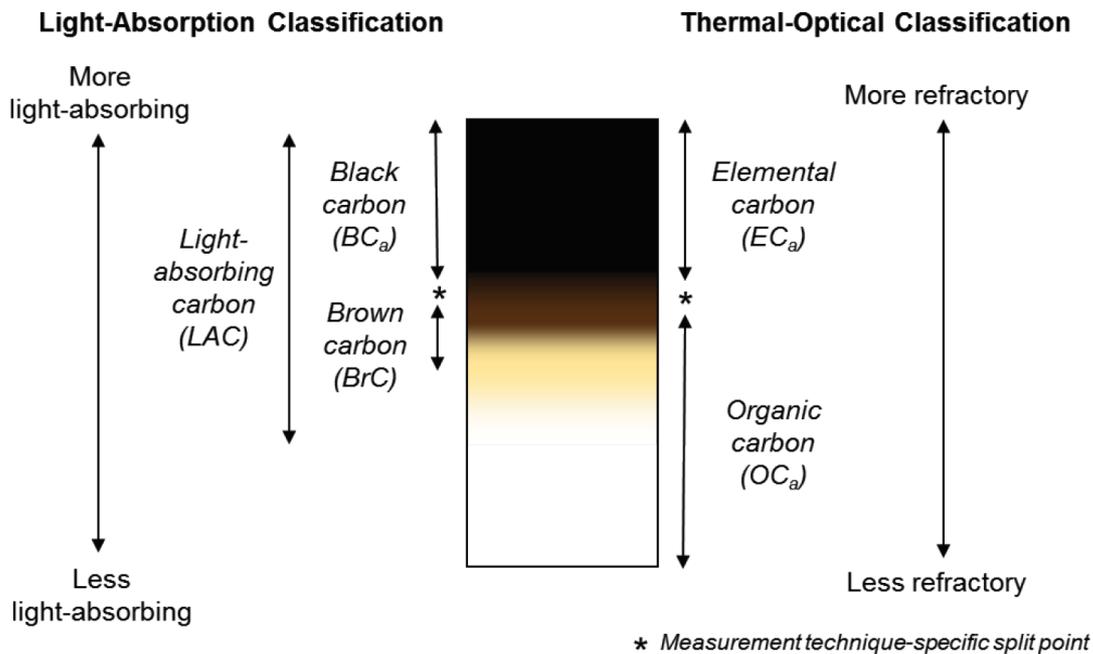
fehleranfällig und könnte daher auch an Bord eingesetzt werden. Das LII wurde bisher ausschließlich in Messkampagnen unter der Beteiligung des National Research Council Canada von deren eigenem Personal eingesetzt. Eine unabhängige Bewertung des LII Messverfahrens ist daher nach Ansicht der Autor*innen der hier vorliegenden Studie nicht möglich. LII Messgeräte kommen nach Kenntnis der Autor*innen dieser Studie bei den Motorherstellern bisher nicht zum Einsatz. Andere Messverfahren (PAX, EC/TOA, CAPS, MAAP), wie sie zur Überwachung der Umgebungsluftqualität eingesetzt werden, zeigten deutlich höhere Abweichungen bzw. beinhalten deutlichen Mehraufwand hinsichtlich Probennahme und/oder nachgeschalteter Analysenverfahren, um zu vergleichbaren Ergebnissen zu kommen. Dies liegt daran, dass diese Verfahren zur Überwachung der Umgebungsluftqualität angewendet werden und nicht auf die deutlich höheren Emissionen im Abgasstrom ausgelegt sind.

Messverfahren für PM und PN, die im landgebundenen Verkehrssektor verwendet werden, oder Verfahren zur Staub-, Streulicht- oder Opazitätsmessung, die bei stationären Anlagen an Land eingesetzt werden, sind entweder nicht sensitiv für BC oder müssen betriebspunktabhängig für eine bestimmte Abgasgeschwindigkeit, Druck und Temperatur eingestellt werden und könnten so im maritimen Bereich lediglich als qualitativer Indikator für einen ordnungsgemäßen Betrieb eingesetzt werden. Sie sind somit nicht für eine quantitative Überprüfung geeignet und wurden daher in der Diskussion bei der IMO bereits ausgeschlossen. In den Verhandlungen sind die drei Messverfahren FSN, PAS und LII verblieben PPR 5/24 (2018). Es ist äußerst unwahrscheinlich, dass neben den bekannten Messverfahren in absehbarer Zukunft physikalisch neue Verfahren gefunden oder entwickelt werden.

Analog zu den Anforderungen des IMO NO_x Technical Codes (NTC), (2008), NO_x mit dem Chemilumineszenz-Messverfahren (CLD), CO und CO₂ mit nicht-dispersivem Infrarot, HC mit Flammenionisation und O₂ paramagnetisch zu messen, sollte eine weitere Reduzierung der drei verbliebenen BC Messverfahren FSN, PAS, LII auf ebenfalls nur noch eine Methode für BC erfolgen. Bei der Einführung von Grenzwerten muss in den entsprechenden Regelwerken auch ein zu verwendendes Messverfahren festgelegt werden. Aufgrund der Einfachheit und Robustheit sowie der bereits erfolgten Standardisierung (Messverfahren: ISO 10054, Anwendung: ISO 8178-3) bietet sich aus Sicht der Autor*innen FSN im Gegensatz zu PAS und LII als einfachste Methode an, die dennoch verlässliche Ergebnisse liefert. In der laufenden Korrespondenzgruppe zu PPR 10/6 (2023) spricht sich eine Mehrheit für die FSN als die primäre Messmethode aus. In Anlehnung an Absatz 5.4.2 des NTC könnten auch bei BC andere Messverfahren verwendet werden, wenn sie gleichwertige Ergebnisse liefern. Da die vorliegende BC Datenbasis im Wesentlichen mit FSN Daten (in 70 von 75 Messkampagnen wurde FSN verwendet) erstellt wurde, stellt die FSN Messmethode folgerichtig auch die Referenz für etwaige aus dieser Datenbasis abgeleitete Grenzwerte dar.

Unabhängig vom Messverfahren gibt es darüber hinaus bisher keinen wissenschaftlich erklärten einheitlichen BC-Referenzstandard zur Kalibrierung. Stattdessen behilft man sich quasi als Konvention mit synthetisch erzeugtem Ruß. Als de-facto Standard hat sich dazu der Rauchgaserzeuger (CAST) bzw. mini-CAST als Quelle für die Kalibrierung von den, jedoch für den maritimen Bereich bereits ausgeschlossenen PN-Messgeräten in der Automobilindustrie etabliert. Schwierigkeiten bereitet dabei zudem die klare Abgrenzung von organischem (teilweise flüchtig) zu elementarem (nicht flüchtig) Kohlenstoff und dessen Übergangsbereich, dem sogenannten braunen (schwerflüchtig) Kohlenstoff, s. Abbildung 11.

Abbildung 11: Klassifizierung von Kohlenstoff und dessen Nomenklatur nach Licht-Absorption und thermischer Beständigkeit (Quelle: US-EPA, 2012)



Quelle: US-EPA, 2012

Abbildung 11 zeigt als Balkendiagramm die Klassifizierung unterschiedlicher Kohlenstoffarten nach Licht-Absorption und thermischer Beständigkeit jeweils als gleitende Übergänge. Sie zeigt deutlich den nicht exakt zu definierenden bzw. unscharfen Übergangsbereich beim Versuch einer Abgrenzung und Zuordnung der identifizierten Kohlenstoffarten „schwarz“ und „braun“ zu „elementar“ und „organisch“ und einer Klassifizierung zu bestimmten Eigenschaften wie „lichtabsorbierend“ und „hitzebeständig“.

Diese Schwierigkeit der exakten Abgrenzung oder Zuordnung zeigt sich auch in der Definition von (Bond et al., 2013) „...with a mass absorption cross section of **at least 5 m²/g at a wavelength of 550 nm;**“ mit der diese Abgrenzung „at least“ durch die Zuordnung „von mindestens“ einem Massenabsorptionsquerschnitt von 5 m²/g bei einer Wellenlänge von 550 nm versucht wird. In dieser Definition wird auf die Wellenlängenabhängigkeit der Absorption von Wärmestrahlung bei unterschiedlichen Kohlenstoffarten Bezug genommen. Diese BC Definition wurde nach langwieriger Diskussion von der IMO mit (MEPC-68/21, 2015) angenommen mit der Begründung, dass die Definition von Bond messmethodenneutral ist, nicht alle Definitionskriterien von einem Messgerät gleichzeitig erfüllt werden müssen, und sie von der wissenschaftlichen Gemeinschaft anerkannt wird. Laut Aussage von (Petzold, 2013) ist jedoch trotz der enormen Anstrengungen auf dem Forschungsgebiet der kohlenstoffhaltigen Partikel in der Atmosphäre die Forschungsgemeinschaft immer noch nicht und möglicherweise auch nie in der Lage, eindeutige Umrechnungsbeziehungen zwischen BC-Daten verschiedener Methoden und verschiedener Aerosoltypen anzubieten. Die bei der IMO politisch gewünschte messmethodenneutrale Definition steht daher einer Grenzwertfindung, zu der eine messmethodenspezifische technische Definition notwendig, ist entgegen.

Eine ähnliche Unterteilung wie in US-EPA (2012) nach elementarem und organischem Kohlenstoff aber mit Zuordnung der Messverfahren wurde 2019 in der ISO 8178-3 vorgenommen, siehe Abbildung 12.

Abbildung 12: Abgaskomponenten und deren Klassifizierung nach Messmethoden, optischer Erscheinung und Definitionen

Definitions		Components		Smoke Types	Measurement Methods				
		sulfate associated water **)	semi - volatile	blue smoke	PM gravimetric ISO-8178	! **)		! **)	
		sulfates [SO ₄] **)				! **)	! **)		! **)
		organic carbon							
BrC	LAC ¹⁾	elemental carbon (EC)	non - volatile	black smoke	PM gravimetric ISO-8178	!	! **)	!	
eBC		ash fuel oil **)		red-brown smoke		Dust gravimetric VDI-2066, ISO-9096, EPA method-17	FSN ISO-10054	PAS	Opacity ISO-11614
rBC	ash lube oil **)	! **)							
EC	abrasion/ wear	! **)							
		NO ₂						!	!
		NO							
		SO ₃ **)	volatile	blue smoke			! **)		
		SO ₂ **)					! **)		
		H ₂ O		white smoke			!	!	
		O ₂							
		N ₂							

Black Carbon (BC) according to Bond et al. (2013) to be reported as eBC, rBC, EC recommended by Petzold (2013)

¹⁾ LAC does not distinguish between high (eBC) or low (BrC) absorption

! Contribution verified

**) Contribution can be minimized or even eliminated by use of appropriate reference fuel and lube oil

The terms soot, black carbon (BC) and elemental carbon (EC) are used interchangeably in much of the scientific literature, although soot, BC and EC commonly have operational and source-based definitions, respectively, notwithstanding that reliable reference samples and an aerosol standards do not exist for either one.

Quelle: MAN-eigene Darstellung (2017) in Anlehnung an ISO 8178-3

Abbildung 12 stellt als Balkendiagramm die verschiedenen Abgaskomponenten (flüchtig, nicht flüchtig, halb-flüchtig) und deren Einordnung nach jeweiliger BC-Definition (brauner, äquivalenter, hitzebeständiger und elementarer sowie lichtabsorbierender Kohlenstoff) und optischer Erscheinung (weißer, blauer, rot-brauner und schwarzer Rauch) dar und stellt diese den verschiedenen Messverfahren nach ISO 8178 (PM gravimetrisch), ISO 9096 (Staub gravimetrisch), ISO 10054 (FSN), ISO 11614 (Opazität) gegenüber, mit denen die jeweiligen Abgaskomponenten mehr oder weniger exakt erfasst werden können. Es zeigt sich, dass jedes Messverfahren gewissen Querempfindlichkeiten unterliegt, die zumindest teilweise durch geeignete Auswahl der Kraftstoffe und Schmieröle verringert werden können.

Trotz eines fehlenden allgemein anerkannten Kalibrierstandards, des nicht eindeutigen Übergangsbereiches zwischen schwarzem und anderem Kohlenstoff und des Einflusses unterschiedlicher Morphologie von realen Rußteilchen im Gegensatz zu synthetischen Rußteilchen auf unterschiedliche Messmethoden, gibt nach Ansicht der Autor*innen der hier vorliegenden Studie die Datenbasis nach Abbildung 8 bzw. Abbildung 9 den Erwartungsbereich der tatsächlichen BC-Emission von Marinemotoren nach derzeitigem Kenntnisstand umfassend wieder.

Vor dem Hintergrund des Streubandes der BC-Emissionen bei gleicher Motorleistung von etwa einer Größenordnung bzw. Faktor 10 muss vor der Einführung eines potentiellen BC-Grenzwertes eine Einigung auf eine Referenz-Kraftstoffqualität, unter Einbeziehung des Aromatengehaltes, erfolgen. Ebenso müssen vor dem Hintergrund des Streubandes der BC-Emissionen bei baugleichen Motoren von etwa Faktor 3 vor der Einführung eines BC-Grenzwertes möglicherweise Korrekturfaktoren für Umgebungsreferenzbedingungen definiert werden. Die unterschiedlichen Aromatengehalte im Kraftstoff machen in der hier vorliegenden Studie etwa die Hälfte des Streubandes bezogen auf eine gleiche MCR Leistung aus. Die Parameter für Marinekraftstoffe nach gegenwärtiger ISO 8217 legen jedoch keinen Aromatengehalt fest. Zudem existiert bislang kein allgemein anerkanntes Analyseverfahren, insbesondere für polyzyklische Aromaten, dass für alle Marinekraftstofftypen gleichermaßen anwendbar wäre. Genormte Verfahren sind lediglich eingeschränkt für bestimmte Kraftstoffarten anwendbar. Insofern sind Marinekraftstoffe als Referenz für BC Zertifizierungen derzeit ungeeignet. Darüber hinaus ist der Effekt von unterschiedlichen Umgebungsbedingungen auf die BC-Emission derzeit nicht bekannt. Für NO_x Zertifizierungen hat IMO entsprechende Testbedingungen (f_a) und Korrekturfaktoren (k_{HD}) festgelegt. Im nächsten Schritt müsste dann eine Korrektur für mögliche Kraftstoff- und Umgebungseinflüsse sowie eine Toleranz für mögliche Verschleißeffekte festgelegt werden. Für Verschleißeffekte hat sich die Einführung von sogenannten Verschlechterungsfaktoren etabliert. Der Begriff „Verschlechterungsfaktor“ bezieht sich auf das Verhältnis der Emissionen eines Motors während seiner mittleren Lebensdauer dividiert durch seine Emissionen im Neuzustand. Der Einfluss von Verschleiß auf die BC-Emission wurde jedoch bisher nicht gezielt untersucht. Bislang haben alle Messkampagnen nur einzelne Aspekte untersucht, in dem z. B. nur der Aromatengehalt variiert wurde. Für eine Auswertung mit statistischen Methoden, um mögliche Umgebungseinflüsse zu identifizieren, ist die vorhandene Datenbasis noch viel zu klein. Eine Grenzwertfindung ohne Referenzkraftstoff und ohne Referenzbedingungen erscheint den Autor*innen der vorliegenden Studie jedoch nicht möglich. Ungeachtet dessen können, unter Angabe des verwendeten Kraftstoffes, insbesondere dessen Aromatengehalt, und der Umgebungsbedingungen, BC Messungen auch ohne Grenzwert am Probestand mit FSN oder PAS durchgeführt und zertifiziert werden.

4.2.2 Bewertung der Messmethoden bezüglich ihres Einsatzes an Bord

Für eine Überprüfung der BC-Emission im späteren Betrieb des Motors an Bord ist ein Vorgehen analog zu NO_x durch eine Parameter-Check Methode, wie sie nach NTC (2008) vorgesehen ist, alleine nicht ausreichend. Die Parameter-Check Methode beinhaltet das Überprüfen ordnungsgemäß verbauter Teile und Einstellungsparameter an Bord. Dies kann für BC übernommen werden, damit sichergestellt werden kann, dass am Motor keine Veränderungen gegenüber dem Ursprungszustand außerhalb erlaubter Bereiche vorgenommen wurden. Da NO_x Emissionen aufgrund von Verschleiß nicht ansteigen, sondern abnehmen, ist diese Methode zur Überprüfung der NO_x-Emission des Motors, sofern keine Abgasnachbehandlungssysteme notwendig sind, ausreichend. Für BC ist jedoch, abgesehen vom Einlaufverhalten, langfristig mit einer Zunahme der Emissionen zu rechnen. Daher müsste die Parameter-Check Methode nach Ansicht der Autor*innen der hier vorliegenden Studie durch weitere Messungen an Bord ergänzt werden. Hier könnte sich eine Art Stichprobenmessung (Spot-Check) analog zur IMO Richtlinie für SCR-Anlagen anbieten. Für eine Überprüfung an Bord ist ein möglichst einfaches und ohne Spezialkenntnisse zu bedienendes Messgerät empfehlenswert. Darüber hinaus sollte es möglichst robust und wenig stör anfällig sein. Von allen Messgeräten kommt diesen Anforderungen bisher nur das FSN am nächsten. Im vorliegenden Projekt, das nur aus Prüfstandsmessungen bestand, hat das FSN Messgerät ohne jegliche Störung durchgehend funktioniert, während das PAS Messgerät mehrmals überprüft und Fehlermeldungen abgestellt werden mussten. Nach Ansicht der Autor*innen könnte mit einem FSN Messgerät anhand des Spot-Checks innerhalb einer großen Streubreite, je nach vorhandener Kraftstoffqualität und Umgebungsbedingungen an Bord nachgewiesen werden, dass sich die BC-Emission auf einem vergleichbaren Niveau wie bei der Zertifizierung am Probestand befindet.

Dennoch wäre eine Überwachung der Grenzwerte im Betrieb mit erheblichem technischem Aufwand verbunden, da die erforderlichen Messungen durch Anfahren verschiedener Betriebspunkte durchgeführt werden müssen und dies im laufenden Betrieb schwierig umzusetzen sein wird.

4.2.3 Analyse der Rahmenbedingung bezüglich einer Grenzwertentwicklung

Ein potentieller BC-Grenzwert muss sich am gegenwärtigen Stand der verfügbaren Technik orientieren, zumindest bei einer vergleichsweise kurzfristigen Einführung. In einem ersten Schritt könnten mit einem BC-Grenzwert sogenannte „high-emitter“, die besonders hohe BC-Emissionen aufweisen, identifiziert und bestenfalls von einem Befahren der besonders sensiblen Gebiete in/nahe der Arktis ausgeschlossen werden. Die oben angesprochenen Punkte zu Referenzkraftstoff, Testbedingungen, Korrekturfaktoren und Verschleißfaktoren müssten zudem vorab geklärt werden. In Analogie zum Prozess der Festlegungen von NO_x-Grenzwerten in der IMO oder der nicht flüchtigen Partikelgrenzwerte (nvPM) der ICAO ist nach Ansicht der Autor*innen von einem Zeithorizont von ca. 10 Jahren bis zur Festlegung von BC-Grenzwerten auszugehen. Eine BC-Grenzwertfestlegung würde dem Technologiestand der Motoren nachfolgen. Es kann daher allein von einer Grenzwertfestlegung nicht erwartet werden, dass sie an und für sich zu einer Verringerung der BC-Emission führt. Dies wird auch in PPR 9/8/3 (2022) so festgestellt. Um die BC-Emissionen in und mit Wirkung auf die Arktis kurzfristig zu reduzieren, sind somit weitere Maßnahmen notwendig.

Für in Betrieb befindliche Motoren würden Grenzwerte bedeuten, dass Überschreitungen auf einem Niveau deutlich oberhalb des Grenzwertes anhand der Spot-Check identifiziert werden könnten. Dadurch können die BC-Emissionen im Betrieb auf einem bestimmten Niveau gehalten werden, aber auch dadurch wird an und für sich keine Reduzierung der BC-Emission erreicht.

Nach der technischen Entwicklung einer Definition, Festlegung von Mess- und Kontrollmethode/n (Arbeitsauftrag von MEPC 62, 2011) sollte die IMO Grenzwerte definieren (für Bestandschiffe sowie neue Schiffe/ Motoren) und den entsprechenden Rechtsrahmen bspw. durch Erweiterung von MARPOL Anlage VI schaffen. Hier sind auch Konsequenzen, wie Sanktionen bei Nichteinhaltung für eine individuelles Schiff oder dessen Motor zu definieren.

Bezogen auf die wissenschaftliche / technische Entwicklung eines BC-Grenzwerts ergeben sich demnach folgende zusätzliche Feststellungen:

- ▶ Ein BC-Grenzwert ist an festzulegende Randbedingungen hinsichtlich Umgebungsbedingungen, Kraftstoffqualität und Messverfahren zu knüpfen.
- ▶ Der Aromatengehalt ist relevant für die BC-Emissionen; die Kraftstoffnorm ISO 8217 für Marinekraftstoff enthält bislang keine Angaben zum Aromatengehalt. Der CCAI gilt als veraltet.
- ▶ Der Aromatengehalt kann über die Angabe des H/C-Verhältnis im Kraftstoff bestimmt werden; dieser Parameter sollte deshalb in einem ersten Schritt in die ISO 8217 aufgenommen werden.
- ▶ Ein allgemein anerkanntes und für alle Marinekraftstofftypen gleichermaßen anwendbares Analyseverfahren zur Bestimmung des Aromatengehaltes existiert nicht.
- ▶ Alle Messverfahren unterliegen unterschiedlichen Quereinflüssen, wobei die exakte Abgrenzung des elementaren bzw. schwarzen Kohlenstoffs zu anderen Kohlenstoffarten das Hauptproblem darstellt.
- ▶ Das FSN Messverfahren ist bisher als einziges standardisiert.
- ▶ Unabhängig vom Messverfahren existiert kein allgemein anerkanntes Kalibrierverfahren für BC.
- ▶ Eine Zertifizierung der BC-Emission eines Motors unter gegebenen Randbedingungen mit einem Referenzkraftstoff am Probestand erscheint möglich.
- ▶ Eine stichprobenartige Überprüfung der BC-Emission an Bord ist technisch möglich, aber mit Unsicherheiten durch z.B. Umgebungseinflüsse verbunden, die bisher nicht quantifiziert sind.
- ▶ Für zukünftige Messungen an Bord, aber auch am Probestand im Rahmen einer Grenzwertgesetzgebung erscheint ein einfaches, handhabbares Verfahren, wie FSN zielführend.
- ▶ Der Prozess zur Festlegung von potentiellen BC Grenzwerten wird langwierig werden.

Aufgrund der vorhanden Streubreite, den bisher nicht geklärten Einflussgrößen, dem fehlenden Kraftstoffstandard und der fehlenden Analysemethode zum Aromatengehalt und dem aufgezeigten Zeithorizont ist die Sinnhaftigkeit von BC-Grenzwerten und deren Überwachung nach Ansicht der Autor*innen der vorliegenden Studie insgesamt zu hinterfragen. Um dennoch die BC-Emissionen insbesondere mit Wirkung auf die polaren Gebiete zeitnah zu reduzieren, müssen anderen Maßnahmen, die auch kurzfristig umgesetzt werden können und Wirkung zeigen, zeitnah initiiert werden.

4.3 Weitere Optionen zur Minderung der BC-Emissionen und deren Überwachung

Das ursprüngliche Ziel mit Hilfe der im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse einen oder mehrere Grenzwerte für BC-Emissionen abzuleiten, stellte sich aufgrund der großen Bandbreite der analysierten und ermittelten Messdaten der BC-Emissionen sowie der verschiedenen Einflussparameter zum jetzigen Zeitpunkt als nicht praktikabel heraus. Eine Festlegung von Grenzwerten ist zudem stets mit Fragen der Überwachung der Einhaltung sowie mit den damit zusammenhängenden Verantwortlichkeiten und Sanktionierung verbunden.

Aus Klimaschutzgründen ist es jedoch dringend erforderlich, zeitnah eine Reduktion der BC-Emissionen aus der Seeschifffahrt mit Wirkung auf die Arktis umzusetzen. Deshalb wurden im Rahmen des Projektes weitere Maßnahmen analysiert, die ggf. eine schnellere Einführung versprechen. Die 2021 bei MEPC 77 beschlossene freiwillige Maßnahme, Destillate statt HFO zu nutzen (Resolution MEPC.342(77), 2021) reicht nach Ansicht der Autor*innen nicht aus, die BC-Emissionen zu senken. Deutschland hat sich deshalb im Rahmen der Arbeitsgruppe (Correspondance Group) von PPR 9 für einen verpflichtenden Wechsel zu Destillatkraftstoff als erste kurzfristig einzuführende Maßnahmen eingesetzt (PPR 10/6). PPR 10/6 enthält eine Übersicht der Maßnahmen, die weiterhin im Rahmen der IMO diskutiert werden:

1. Wechsel auf Destillatkraftstoff
2. Kraftstoffstandard basierend auf Aromatengehalt
3. BC ECA (Emissionskontrollgebiet)
4. Motorzertifizierung
5. Weiterentwicklung der Resolution MEPC.342(77); freiwilliger Einsatz von Destillatkraftstoff
6. Verbindlicher Einsatz von BC Minderungstechnologien, wie Dieselpartikelfilter

Alle bis auf Maßnahme 1 der oben genannten Maßnahmen sind erst mittel- bis langfristig umsetzbar und würden entsprechend spät ihre Wirkung zeigen. Nach Ansicht der Autor*innen dieser Studie ist der Weg über die Kraftstoffqualität bezüglich des Aromatengehaltes einer der vielversprechendsten. Ein erster Schritt, um diese Maßnahme umzusetzen, konnte bereits durch die Forderung in der Einreichung/Submission (PPR 8/5/1) und mit der Bitte der IMO an ISO, einen Parameter bezüglich des Aromatengehaltes (z. B. H/C-Verhältnis) in die Norm aufzunehmen, begonnen werden. Leider ist ISO nicht auf den deutschen Vorschlag des H/C-Verhältnisses eingegangen, sondern plant eine Aufnahme der 'Viscosity Gravity Constant' (VGC) und/oder des 'Bureau of Mines Correlation Index' (BMCI) (PPR 9/21, PPR 9/21/Add.1 Annex 16). Nach Ansicht der Autor*innen sind diese Parameter jedoch nicht zielführend, um Kraftstoff nach dem Anteil aromatischer / paraffinischer Bestandteile zu untergliedern. Darüber hinaus ist weitere Forschung notwendig, um anhand der Kraftstoffcharakterisierung die Kraftstoffe zu identifizieren, deren BC-Emissionen als „zu hoch“ eingeschätzt werden. Es müssten entsprechende niedrig emittierende BC-Kraftstoffe („Low BC emission fuels“; vgl. PPR 9/8/3) definiert und in einem Folgeschritt alle anderen Kraftstoffe für den Einsatz in / in einem Gebiet „mit Wirkung auf die Arktis“ ausgeschlossen werden. Auch dies bedarf Verhandlungen in der IMO. Die Einhaltung der Kraftstoffqualitätsvorgaben könnte dann über die regulären Hafenstaatkontrolle (Port State Control), ähnlich dem SECA-Kontrollsystem erfolgen. Neben der Bunker Fuel Delivery Note (BDN) ist ggf. die Einhaltung in den zu definierenden arktischen Seegebieten über das Maschinentagebuch nachzuweisen.

Parallel arbeiten die Europäische Union und die IMO an Maßnahmen, die die Treibhausgasintensität des Kraftstoffs reduzieren sollen (z. B. Fuel EU Maritime, GHG Fuel Standard; ISWG-GHG 12/3/3), um so die klimaschädigende Wirkung des Seeverkehrs zu reduzieren und den Sektor zu dekarbonisieren. Die Vorschläge zielen darauf ab, die CO_{2e}-

Emissionen pro Kraftstoffmenge zu begrenzen und so den Umstieg auf weniger treibhausgasintensive Kraftstoffe, langfristig aus erneuerbarem Strom erzeugt, zu forcieren. Bislang sind in den Bewertungskriterien dieser Kraftstoffe die damit verbundenen BC-Emissionen nicht enthalten. Es ist aber absehbar, dass strombasierte, synthetische Kraftstoffe (PtX), wie eMethanol, eAmmoniak oder auch eWasserstoff deutlich geringere BC-Emissionen ausstoßen. Ob diese Diskussionen und die folgende Implementierung von Maßnahmen ausreichend schnell verlaufen, um die oben beschriebenen BC-Diskussionen in der IMO überflüssig zu machen, kann durch die Autor*innen nicht eingeschätzt werden.

Dennoch können auch Teilprozesse, die im Rahmen der Dekarbonisierungsverhandlungen erfolgen, wie die Diskussion zu Lebenszyklusanalyse (Live Cycle Assessment, LCA) von Marinekraftstoffen für die BC-Minderung hilfreich sein. Der Bunkerlieferant erhält durch den Ansatz, dass die Treibhausgasintensität des Kraftstoffs reduziert werden muss, eine viel größere Integration in die schiffsspezifischen Maßnahmen und muss mehr Parameter seines Kraftstoffs angeben; die zusätzlich für die BC-Minderung notwendigen Angaben des H/C-Verhältnisses könnten so mit geringerem Aufwand einbezogen werden.

5 Ausblick

Wie beschrieben stellt der Wechsel zu marinen Destillaten, eine auch sofort für die existierende Flotte umsetzbare Maßnahme zur Emissionsminderung sowohl für den Luftschadstoff SO_x als auch für Black Carbon dar. Große Hoffnung wird auch auf die synthetischen strombasierten Kraftstoffe gesetzt, bei denen zusätzlich zur Treibhausgasreduzierung auch eine sehr deutliche Minderung der Luftschadstoffemissionen erwartet werden kann.

Bezüglich der BC-Minderung sollte als erster Schritt ein verbindliches Destillat-Gebot für die Arktis und Umgebung umgesetzt werden und in einem weiteren Schritt der Kraftstoff anhand seines Aromatengehalts auf seine BC-Emissionswirkung hin differenziert werden (low BC-emission fuels / „Arctic Fuel“). Anhand dieser neu aufzubauenden Klassifikation, kann dann der Einsatz / Verbot von bestimmten Kraftstoffen rechtlich umgesetzt werden. Als Referenz für den Kraftstoff bietet sich das H/C-Verhältnis an. Bei der Ausgestaltung der Kraftstoffklassen kann sich an den Grenzwerten für Aromatengehalt und PAK-Gehalt in anderen Bereichen orientiert werden: Straßenkraftstoffe: maximal 35 % Aromaten in Benzin und maximal 8 % PAK in Dieselöl; Flugbenzin: maximal 25 % Aromatengehalt.

Im Zuge der langfristigen Flottenerneuerung der Seeschiffe können dann zusätzlich technische Maßnahmen, wie die Installation von Partikelfiltern umgesetzt werden, ob dies verbindlich durch eine IMO-Gesetzgebung zu fordern ist, muss noch diskutiert werden. Wegen der großen Bandbreite an BC-Emissionen und der Schwierigkeiten durch praktikable, einfache Messverfahren an Bord mögliche Grenzwerte zu überwachen, schätzen die Autor*innen die Entwicklung von abgasseitigen BC-Emissionsgrenzwerten als wenig zielführend ein.

Um die o. g. Option zur Entwicklung von kraftstoffbasierten BC-Grenzwerten voranzubringen, sehen die Autor*innen Forschungsbedarf bei der Fragestellung, ob der gleiche Zusammenhang zwischen Aromatengehalt im Kraftstoff und BC-Emissionen auch für Langsamläufer (2-Takt)-Motoren besteht. Nur auf Basis einer detaillierteren Datenlage können zukünftige Grenzwerte ermittelt werden.

Ein weiteres Feld für zukünftigen Forschungsbedarf stellt die Auswirkung der Einführung der Common-Rail Einspritztechnologie in Verbindung mit dem Einsatz höherer Ladedrücke dar. Hier lässt sich eine Verringerung der BC-Emissionen erwarten, jedoch mangels vorhandener Messdaten nicht größtmäßig darstellen.

6 Quellenverzeichnis

Andersson, K., Brynolf, S., Fredrik Lindgren, J., Wilewska-Bien, M. (2016). Shipping and the Environment, 1. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin-Heidelberg.

Andersson, J.T. und Achten, C. (2015). Time to Say Goodbye to the 16 EPA PAHs? Toward an Up-to-Date Use of PACs for Environmental Purposes. Polycyclic Aromatic Compounds, 35:2-4.
<https://doi.org/10.1080/10406638.2014.991042>

Badewannenkurve: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ausfallverteilung>. Abgerufen am 28.03.2023

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Bernsten, T., DeAngelo B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Karcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S. (2013). Bounding the role of BC in the climate system: A scientific assessment, Journal of geophysical research: Atmospheres, Vol. 118, 5380–5552, doi:10.1002/jgrd.50171, 2013

Brem, B.T., Durdina, L., Siegerist, F., Beyerle, P., Bruderer, K., Rindlisbacher, T. Rocci-Denis, S., Andac, M.G., Zelina, J. and Penanhoat, O., Wang, J. (2015). Effects of Fuel Aromatic Content on Nonvolatile Particulate Emissions of an In-Production Aircraft Gas Turbine

Brinkmann, T., Giner-Santonja, G., Roudier, S., Yükseler, H. (2016). Best Available Techniques (BAT) Reference: Document for Common Wastewater and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control, Publications Office of the European Union, Luxemburg, 2016

Brinks, H. W. und Chryssakis, C., (2017). LPG as a marine fuel, DNV GL. Høvik

Buchholz, B. et al. (2016). Detailed analysis of PM emissions from a medium speed diesel engine as a precondition for successful application of DPF, In: CIMAC Congress 2016, Helsinki, 06-10. June, Paper 221

CIMAC (2011). Fuel Quality Guide – Ignition and Combustion, 2011.
https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/WG_Publications/CIMAC_WG07_2011_Guideline_Fuel_Quality_Ignition_Combustion.pdf. Abgerufen am 05.04.2023.

Comer, B., Olmer, N., Mao, X., Roy, B. and Rutherford, D. (2017). Black carbon emissions and fuel use in global shipping 2015. ICCT report December 2017. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Global-Marine-BC-Inventory-2015_ICCT-Report_15122017_vF.pdf Abgerufen am 29.03.2023

Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H. (2010). An assessment of Technologies for reducing regional short-lived climate forcers emitted by ships with implications for Arctic shipping, In: Carbon Management, 2010, Band 1, Ausgabe 2, Seite 207-225

Corbin, J.C., Peng, W., Yang, J., Sommer, D.E., Trivanovic, U., Kirchen, P., Miller, J.W., Rogak, S., Cocker, D.R., Smallwood, G.J., Lobo, P., Gagné, S. (2020). Characterization of particulate matter emitted by a marine engine operated with liquified natural gas and diesel fuels. Abstract:
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117030>. Abgerufen am 28.03.2023

DIN EN 12916:2019. Petroleum products - Determination of aromatic hydrocarbon types in middle distillates- High performance liquid chromatography method with refractive index detection

DIN EN 15527:2008. Characterization of waste - Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in waste using gas chromatography mass spectrometry (GC/MS)

DIN EN 15940:2019-10. Fuels- Paraffinic diesel fuel from synthesis or hydrogenation process-Requirements and test methods

Directive 2009/30/EC (2009). Amending Directive 98/70/EC as regards the specification of petrol, diesel, and gas-oil and introducing a mechanism to monitor and reduce greenhouse gas emissions and amending Council Directive 1999/32/EC as regards the specification of fuel used by inland waterway vessels and repealing.

DNV GL (2019b). Assessment of Selected Alternative Fuels and Technologies. DNV GL, Høvik.

EN 590. Fuels - Diesel fuel - Requirements and test methods

Fridell, E.; Salo, K. (2014). Measurements of abatement of particles and exhaust gases in a marine gas scrubber. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 230(1): 154–162

Sustainable maritime fuels - 'Fit for 55' package: the Fuel EU Maritime proposal. Fuel EU Maritime, GHG Fuel Standard; ISWG-GHG 12/3/3

FVV (2013). Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Abschlussbericht, Untersuchung und Bewertung verschiedener Methoden der Partikelanzahl-Messung.

Geier, M.C., Chlebowski, A.C., Truong, I., Massey Simonich, S.L., Anderson, K.A. and Tanguay, R.L. (2018). Comparative developmental toxicity of a comprehensive suite of polycyclic aromatic hydrocarbons. Arch Toxicol (2018) 92:571–586. Abstract: <https://doi.org/10.1007/s00204-017-2068-9>. Abgerufen am 29.03.2023

IMO NTC (2008). IMO NOx Technical Code 2008

IMO (2015). Investigation of appropriate control measures (abatement technologies) to reduce Black Carbon emissions from international shipping, International Maritime Organization (Hrsg.), London

IMO (2018). Evaluation of the effect of SCR, EGC and Sulphur limit solutions on Black Carbon emissions from ships using three Black Carbon measurement methods, International Maritime Organization Sub-Committee on Pollution Prevention and Response, 6th Session, Agenda Item 7, PPR6/INF.13

IMO (2020). Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>. Abgerufen am 29.03.2023

IPCC (2021). Intergovernmental Panel on Climate Change: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report_smaller.pdf. Abgerufen am 29.03.2023

ISO 10054 (1998). Internal combustion compression-ignition engines-Measurement apparatus for smoke from engines operating under steady-state conditions-Filter-type smoke meter

ISO 23306 (2020). Specification of liquefied natural gas as fuel for marine application

ISO 8178-3 (2019). Reciprocating internal combustion engines-Exhaust emission measurement-Part 3: Test procedures for measurement of exhaust gas smoke emissions from compression ignition engines using a filter type smoke meter

ISO 8178-4 (2020). Reciprocating internal combustion engines-Exhaust emission measurement-Part 4: Steady-state and transient test cycles for different engines applications

ISO 8217 (2017). Petroleum products-Fuels (Class F)-Specifications of marine fuels

- Johnson, K., Miller, W. (2015). 2nd ICCT BC Workshop: Marine Black Carbon (BC) Emission Factors. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2015/09/4-Marine-Black-Carbon-Emission-Factors-Kent-Johnson.pdf>. Abgerufen am 29.03.2023
- Jørgensen, J. (2012). Reducing Air Pollution from Ships - a cost benefit analysis and feasibility study on possible means for further reduction of emissions, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen
- Käfer, U., Gröger, T., Rohbogner, C.J., Struckmeier, D., Saraji-Bozorgzad, M.R., Wilharm, T. and Zimmerman, R. (2019). Detailed Chemical Characterization of Bunker Fuels by High-Resolution Time-of-Flight Mass Spectrometry Hyphenated to GC × GC and Thermal Analysis. *Energy Fuels* 2019, 33, 11, 10745-10755.
- Klepsch (2020). Bewertung von Technologien zur Minderung von Luftschadstoffen in der Seeschifffahrt. Master Thesis, Europa-Universität Flensburg.
- Koehler, H. (o.J.). Field experience with considerably reduced NO_x and Smoke Emissions, MAN B&W Diesel
- Kyrtatos, P., Herrmann, K., Hoyer, K., Boulouchos, K. (2016). Combination of EGR and Fuel-Water Emulsions for Simultaneous NO_x and Soot Reduction in a Medium Speed Diesel Engine, In: CIMAC Congress 2016, Helsinki, 06-10. June, Paper 248
- Lauer (2017). 4th ICCT Workshop on Black Carbon; Black Carbon Emission of Marine Diesel Engines
- Lindstad, E., Eskeland, G.S., Rialland, A. and Valland, A. (2020). Decarbonizing Maritime Transport: The Importance of Engine Technology and Regulations for LNG to Serve as a Transition Fuel. *Sustainability* 2020, 12, 8793.
- Lloyd's Register (2012). Understanding exhaust gas treatment systems – Guidance for shipowners and operators. https://www.rtu.lv/writable/public_files/RTU_understanding_exhaust_gas_treatment_systems.pdf. Abgerufen am 29.03.2023
- MAN Diesel & Turbo (2014). Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow Application on MAN B&W Two-stroke Marine Diesel Engines. [online] <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/exhaust-gas-emission-control-today-and-tomorrow.pdf> [Zugriff 14.08.2019]
- MAN (2018). MAN internes White paper on Particulate Matter
- MAN (2021). DPF Messungen MAN intern am 12V175D-MEL mit Nauticlean System von HUG engineering.
- MariGreen (2018). Perspectives for the Use of Hydrogen as Fuel in Inland Shipping A Feasibility Study, MARIKO, FME, RWTH Aachen University.
- Marin-Enriquez, O.; Krutwa, A.; Ewert, K.; Behrends, B. (2021). Environmental Impacts of Exhaust Gas Cleaning Systems for Reduction of SO_x on Ships – Analysis of status quo. UBA Texte. Dessau-Roßlau
- MEPC.342(77). (2021). Protecting the Arctic from shipping Black Carbon emissions. Adopted on 26 November 2021.
- MEPC-62. (2011). IMO Committee on Marine Environment Protection, 62nd session, agenda item 24
- MEPC-68/21 (2015). IMO committee on Marine Environment Protection, 68th session report, agenda item 3, Impact on the Arctic of emissions of BC from international shipping.
- MEPC-76/Inf.43 (2021). IMO committee on Marine Environment Protection, 76th session, agenda item 9, BC emissions from ships using various fuels and with and without SCR, China.
- MEPC-76/Inf.44 (2021). IMO committee on Marine Environment Protection, 76th session, agenda item 9, Research on factors affecting BC emissions from marine engines, China.

MEPC-76/Inf.45(2021). IMO committee on Marine Environment Protection, 76th session, agenda item 9, Effect of fuel properties and engine types on the emission characteristics of BC from ships, China.

MEPC-77. (2021). IMO Committee on Marine Environment Protection, 77th session report, agenda item 16

MEPC-79. (2022). IMO Committee on Marine Environment Protection, 79th session, agenda item 5, Amending MARPOL Annex VI to Reduce the Impact on the Arctic of Emissions of Black Carbon

Moon, G., Im, D., Nam, Y., Chun, K. (2019). Experimental Studies on Black Carbon Emission Characteristics of Marine Engines, CIMAC Congress 2019, Vancouver, 10.-14. June, Paper 082

Mundt, T. (2019). Alternative Fuels and Technologies, In: CIMAC Congress 2019, Vancouver, 10.-14. June, Paper 461

Olmer, N., Comer, B., Roy, B., Mao, X. and Rutherford, D. (2017). Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013–2015. Detailed methodology. ICCT report October 2017. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Global-Marine-BC-Inventory-2015_ICCT-Report_15122017_vF.pdf (Abgerufen am 29.03.2023)

Pashin Y.V., Bakhitova, L.M. (1979). Mutagenic and carcinogenic properties of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Health Perspectives*, 30:185-189.

Petzold,A; Ogren,A.; Fiebig,M.; Laj,P; Li,S. -M.; Baltensperger,U.; Holzer-Poop,T.; Kinne,S.; Pappalardo,G.; Sugimoto,N.; Wehrli,C.; Wiedensohler,A.; Zhang, X.-Y. (2013). Recommendations for reporting “black carbon” measurements, ACP – Peer review – Recommendations for reporting “black carbon” measurements (copernicus.org)

PPR 4/9 (2016). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 4th session, agenda item 9, Measurement data derived from the application of the draft BC measurement reporting protocol – Summary, EUROMOT.

PPR 5/24 (2018). Report to the Marine Environment Protection Committee, 5th session, agenda item 7, Identification of the most appropriate method for measuring BC emissions from international shipping.

PPR 6/Inf.6 (2018). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 6th session, agenda item 7, Comments received disposition and working documents of the Correspondence Group on Investigation of Appropriate Control Measures to Reduce the Impact on the Arctic of BC Emissions from International Shipping, Canada.

PPR 6/Inf.12 (2018). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 6th session, agenda item 7, Emissions of an in-use, natural-gas-powered dual-fuel commercial ferry operated in Vancouver, Canada, 2018

PPR 6/Inf.13 (2018). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 6th session, agenda item 7, Evaluation of the effect of SCR, EGC and Sulphur limit solutions on BC emissions from ships using three BC measurement methods, Canada and Denmark.

PPR 6/Inf.14 (2018). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 6th session, agenda item 7, Evaluation of the effect of EGR on BC emissions from ships and the effect of sampling conditions on two BC measurement methods, Canada and Denmark.

PPR 7/8 (2019). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 7th session, agenda item 8, Initial results of a Black Carbon measurement campaign with emphasis on the impact of the fuel oil quality on Black Carbon emissions, Finland and Germany.

PPR 8/5/1 (2020). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 8th session, agenda item 5, Final results of a Black Carbon measurement campaign with emphasis on the impact of the fuel oil quality on Black Carbon emissions, Finland and Canada.

PPR 9/8/3 (2022). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 9th session, agenda item 9, Fuels are key to urgent Black Carbon emission reductions, FOEI, WWF, Pacific Environment and CSC.

PPR 9/21 (2022). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 9th session, agenda item 21, Report to the Marine Environment Protection Agency, Secretariat.

PPR 10/6 (2023). IMO Sub-committee on Pollution Prevention and Response, 10th session, Reduction of the Impact on the Arctic of Black Carbon Emissions from International Shipping.

Rajendram, R. and Preedy, V.R. (2016). Acetaldehyde (ethanal) is an aldehyde that is highly reactive and toxic. In V. Preedy(ed.), Neuropathology of Drug Addictions and Substance Misuse. Volume 1: Foundations of Understanding, Tobacco, Alcohol, Cannabinoids and Opioids, Ed. Preedy, V.R.

Shell (2022). GtL Fuel: Technische Details Version 2.0. <https://www.bremer-mineraloel.de/wp-content/uploads/2018/06/Shell-GtL-Fuel-techn.-Details.pdf> (23.02.2022)

Sippula, S., Stengel, B., Sklorz, M. and Zimmermann, R. (2014). Particle Emissions from a Marine Engine: Chemical Composition and Aromatic Emission Profiles under Various Operating Conditions. Environmental Science and Technology 48(19). US-EPA (2012): Report to Congress on Black Carbon <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>

UCR (2018). Evaluation of a Modern Tier 2 Ocean Going Vessel Equipped with a Scrubber, draft report for CARB appendix only

UCR (2019). Evaluation of a Modern Tier 2 Ocean Going Vessel on Two Fuels, draft report for CARB appendix only

US-EPA (2012). Report to Congress on Black Carbon <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf> (Abgerufen am 29.03.2023)

Wang, H. et al. (2019). Numerical Study on the Technical Routines to Meet Tier III Regulation of a Low-Speed Marine Diesel Engine, In: CIMAC Congress 2019, Vancouver, 10.-14. June, Paper 143

Yang, Z.L.; Zhang, D.; Caglayan, O.; Jenkinson, I.D.; Bonsall, S.; Wang, J.; Huang, M.; Yan, X.P. (2012). Selection of techniques for reducing shipping NO_x and Sox emissions, In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Band 17, Ausgabe 6, Seite 478-486

Yassine, M.M., Harir, M., Dabek-Zlotorzynska, E., Schmitt-Kopplin, P. (2014). Structural characterization of organic aerosol using Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry: aromaticity equivalent approach. Rapid Commun.Mass Spectrom., 28 (22) (2014), pp. 2445-2454, 10.1002/rcm.7038

A Anhang

Tabelle 14: Übersicht aller Datensätze der Messkampagnen

Nr.	Hinweis	Quelle	Baujahr	Ort	Bh	Motor Einlauf	Motor Kategorie	rpm	Motortyp (sofern bekannt)	Kraftstofftyp	Pilot Kraftstoff	BC Messmethode
1		PPR-4/9	2007	Testbed	3915	finished	2-stroke	106		DM-A		FSN
2		PPR-4/9	2016	Testbed	75	finished	2-stroke	97		LNG	DM-X	FSN
3	Same as #2	PPR-4/9	2016	Testbed	75	finished	2-stroke	97		DM-X		FSN
4	Same as #1	PPR-4/9	2007	Testbed	3915	finished	2-stroke	106		DM-A		FSN
5		PPR-4/9	2016	Testbed	100	finished	2-stroke	98		LNG	DM-X	FSN
6	Same as #5	PPR-4/9	2016	Testbed	100	finished	2-stroke	97		DM-X		FSN
7		PPR-4/9	2015	Testbed	100	finished	2-stroke	110		LNG	DM-A	FSN
8	Same as #7	PPR-4/9	2015	Testbed	100	finished	2-stroke	110		DM-A		FSN
9		PPR-4/9	2007	Testbed	3665	finished	2-stroke	106		RM-G		FSN
10		PPR-4/9	2015	Testbed	100	finished	2-stroke	70		DM-B		FSN
11		PPR-4/9	2015	Testbed	100	finished	2-stroke	64		DM-A		FSN
12		PPR-4/9	2014	Testbed	100	finished	2-stroke	99		DM-A		FSN
13		PPR-4/9	2014	Testbed		finished	2-stroke	83		DM-B		FSN
14	Same as #13	PPR-4/9	2014	Testbed		finished	2-stroke	83		DM-B		FSN
15		PPR-4/9	2007	Testbed	2888	finished	2-stroke	114		RM-G		FSN
16		PPR-4/9	2016	Testbed	237	finished	4-stroke	1032		DM-A		FSN
17		PPR-4/9	2015	Testbed	23	not finished	4-stroke	514		DM-A		FSN
18		PPR-4/9	2015	Testbed	45	not finished	4-stroke	514		DM-A		FSN
19		PPR-4/9	2014	Testbed	18	not finished	4-stroke	514		DM-A		FSN
20		PPR-4/9	2013	Testbed	<100	not finished	4-stroke	750		DM-A		FSN
21		PPR-4/9	2014	Testbed	91	not finished	4-stroke	750		DM-A		FSN
22		PPR-4/9	2012	Testbed	1370	finished	4-stroke	720		HFO		FSN
23	Same as #22	PPR-4/9	2012	Testbed	1370	finished	4-stroke	750		HFO		FSN
24		PPR-4/9	2016	Testbed	50	not finished	4-stroke	563		DM-A		FSN

TEXTE Luftschadstoffe in der Seeschifffahrt – Erstellung einer Maßnahmenmatrix der Minderungsoptionen sowie Durchführung und Analyse einer Black Carbon-Messkampagne in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität – Abschlussbericht

Nr.	Hinweis	Quelle	Bau-jahr	Ort	Bh	Motor Einlauf	Motor Kategorie	rpm	Motortyp (sofern bekannt)	Kraftstofftyp	Pilot Kraftstoff	BC Mess-methode
25	Same as #24	PPR-4/9	2016	Test-bed	50	not finished	4-stroke	750		DM-A		FSN
26		PPR-4/9	2016	Test-bed	69	not finished	4-stroke	514		LNG	DM-A	FSN
27	Same as #26	PPR-4/9	2016	Test-bed	74	not finished	4-stroke	514		DM-A		FSN
28		PPR-4/9	2009	Test-bed	6492	finished	4-stroke	750		RM-E		PAS
29	Same as #28	PPR-4/9	2009	Test-bed	6492	finished	4-stroke	750		RM-E		FSN
30		PPR-4/9	2010	Test-bed		finished	4-stroke	1151		EN 590		FSN
31		PPR-4/9	2014	Test-bed		finished	4-stroke	1325		EN 590		FSN
32		PPR-4/9	2014	Test-bed		not finished	4-stroke	1899		EN 590		FSN
33		PPR-4/9	2013	Test-bed		not finished	4-stroke	1899		EN 590		FSN
34		PPR-4/9	2010	Test-bed		not finished	4-stroke	2100		EN 590		FSN
35		PPR-4/9	2015	Test-bed		not finished	4-stroke	2450		EN 590		FSN
36		Canada PPR 6/INF.14		Test-bed		finished	2-stroke	123	4T50ME-X	DM-B		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
37	Same as #36	Canada PPR 6/INF.14		Test-bed		finished	2-stroke	123	4T50ME-X	DM-B		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
38	Same as #36	Canada PPR 6/INF.14		Test-bed		finished	2-stroke	123	4T50ME-X	HFO		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
39	Same as #36	Canada PPR 6/INF.14		Test-bed		finished	2-stroke	123	4T50ME-X	HFO		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
40		Canada PPR 6/INF.13		Test-bed		finished	4-stroke	750	9L28/32H	HFO		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
41	Same as #40	Canada PPR 6/INF.13		Test-bed		finished	4-stroke	750	9L28/32H	HFO		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
42	Same as #40	Canada PPR 6/INF.13		Test-bed		finished	4-stroke	750	9L28/32H	HFO		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
43	Same as #40	Canada PPR 6/INF.13		Test-bed		finished	4-stroke	750	9L28/32H	0.5 % MIX		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
44	Same as #40	Canada PPR 6/INF.13		Test-bed		finished	4-stroke	750	9L28/32H	0.5 % MIX		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
45	Same as #40	Canada PPR 6/INF.13		Test-bed		finished	4-stroke	750	9L28/32H	0.5 % MIX		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
46	Same as #40	Canada PPR 6/INF.13		Test-bed		finished	4-stroke	750	9L28/32H	MGO		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)

TEXTE Luftschadstoffe in der Seeschifffahrt – Erstellung einer Maßnahmenmatrix der Minderungsoptionen sowie Durchführung und Analyse einer Black Carbon-Messkampagne in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität – Abschlussbericht

Nr.	Hinweis	Quelle	Bau-jahr	Ort	Bh	Motor Einlauf	Motor Kategorie	rpm	Motortyp (sofern bekannt)	Kraftstofftyp	Pilot Kraftstoff	BC Messmethode
47	Same as #40	Canada PPR 6/INF.13		Test-bed		finished	4-stroke	750	9L28/32H	MGO		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
48	Same as #40	Canada PPR 6/INF.13		Test-bed		finished	4-stroke	750	9L28/32H	MGO		FSN zusätzlich LII, EC (TOA)
49		Canada PPR 6/INF.12		on board		finished	4-stroke	720	9L34/40DF Achtung: Fehler in Einheiten-Umrechnung!	ULSD		FSN 415 SE (560nm) zusätzlich PAS (808nm), LII, EC (TOA EUSAAR2), CAPS (660nm), PAX (870nm)
50	Same as #49	Canada PPR 6/INF.12		on board		finished	4-stroke	720	9L34/40DF Achtung: Fehler in Einheiten-Umrechnung!	LNG	ULSD	FSN 415 SE (560nm) zusätzlich PAS (808nm), LII, EC (TOA EUSAAR2), CAPS (660nm), PAX (870nm)
51		Corbin et al 2019		on board		finished	4-stroke	720	gleich PPR 6/Inf.12 aber ohne Fehler!	ULSD		FSN 415 SE (560nm) zusätzlich PAS (808nm), LII, EC (TOA EUSAAR2), CAPS (660nm), PAX (870nm)
52	Same as #51	Corbin et al 2019		on board		finished	4-stroke	720	gleich PPR 6/Inf.12 aber ohne Fehler!	LNG	ULSD	FSN 415 SE (560nm) zusätzlich PAS (808nm), LII, EC (TOA EUSAAR2), CAPS (660nm), PAX (870nm)
53		UCR 201902	2012	on board	14387	finished	2-stroke	104	12K98ME-C7	ULSFO (RM-A/B)		PAS (zusätzlich PM-EC NIOSH)
54	Same as #53	UCR 201902	2012	on board	14387	finished	2-stroke	104	12K98ME-C7	DM-A		PAS (zusätzlich PM-EC NIOSH)
55		UCR 201902	2011	on board	2559	finished	4-stroke	720	6H32/40	ULSFO (RM-A/B)		PAS (zusätzlich PM-EC NIOSH)
56	Same as #55	UCR 201902	2011	on board	2559	finished	4-stroke	720	6H32/40	DM-A		PAS (zusätzlich PM-EC NIOSH)
57		UCR 201807		on board		finished	2-stroke	105	8S60ME-C8.2	HFO		FSN
58		UCR 201807		on board		finished	4-stroke	900	7H25/33	HFO		FSN
59	typisch 7/8L Prop. 600 kW/Zyl	Germany PPR 7/8		Test-bed		finished	4-stroke	750	1L32/44CR-TS	GtL (0)		FSN zusätzlich PAS + EC
60	Same as #59	Germany PPR 7/8		Test-bed		finished	4-stroke	750	1L32/44CR-TS	DMA (20)		FSN zusätzlich PAS + EC
61	Same as #59	Germany PPR 7/8		Test-bed		finished	4-stroke	750	1L32/44CR-TS	HFO (50)		FSN zusätzlich PAS + EC

TEXTE Luftschadstoffe in der Seeschifffahrt – Erstellung einer Maßnahmenmatrix der Minderungsoptionen sowie Durchführung und Analyse einer Black Carbon-Messkampagne in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität – Abschlussbericht

Nr.	Hinweis	Quelle	Bau-jahr	Ort	Bh	Motor Einlauf	Motor Kategorie	rpm	Motortyp (sofern bekannt)	Kraftstofftyp	Pilot Kraftstoff	BC Mess-methode
62	Same as #59	Germany PPR 7/8		Test-bed		finished	4-stroke	750	1L32/44CR-TS	0.5 %S (70)		FSN zusätzlich PAS + EC
63	Same as #59	Germany PPR 7/8		Test-bed		finished	4-stroke	750	1L32/44CR-TS	0.5 %S (80)		FSN zusätzlich PAS + EC
64	Same as #59	Germany PPR 7/8		Test-bed		finished	4-stroke	750	1L32/44CR-TS	0.5 %S (95)		FSN zusätzlich PAS + EC
65		China MEPC-76/INF.4 3		on board		finished	2-stroke	75	6G70ME-C9.5	MGO		FSN
66	Same as #65	China MEPC-76/INF.4 3		on board		finished	2-stroke	75	6G70ME-C9.5	RME 180		FSN
67	Same as #65	China MEPC-76/INF.4 3		on board		finished	2-stroke	75	6G70ME-C9.5	RMG 380		FSN
68		China MEPC-76/INF.4 3		on board		finished	4-stroke	900	6L21/31 aux	MGO		FSN
69	Same as #68	China MEPC-76/INF.4 3		on board		finished	4-stroke	900	6L21/31 aux	RME 180		FSN
70	Same as #68	China MEPC-76/INF.4 3		on board		finished	4-stroke	900	6L21/31 aux	RMG 380		FSN
71		China MEPC-76/INF.4 4		Test-bed		finished	4-stroke	1500	not a turbocharged engine	DM 0.05 0.5 2.6 %S		FSN & PAS
72		China MEPC-76/INF.4 5		on board		finished	2-stroke	75	6G70ME-C9.5	RM/ MGO		EC
73		China MEPC-76/INF.4 5		on board		finished	4-stroke	900	8L20/30 aux.	RM/ MGO		EC
74		MAN-ES internal	2021	Test-bed		not finished	4-stroke	1800	175D	MGO 0,05 %S		FSN
75	Same as #74	MAN-ES internal	2021	Test-bed		not finished	4-stroke	1800	175D	MGO 0,05 %S		FSN
			57	Test-bed							68	FSN
			18	on board							16	PAS
					60	Eingefahren					17	LII
					15	Nicht eingefahren					29	EC, others

TEXTE Luftschadstoffe in der Seeschifffahrt – Erstellung einer Maßnahmenmatrix der Minderungsoptionen sowie Durchführung und Analyse einer Black Carbon-Messkampagne in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität – Abschlussbericht

Nr.	Hinweis	Quelle	Bau-jahr	Ort	Bh	Motor Einlauf	Motor Kategorie	rpm	Motortyp (sofern bekannt)	Kraftstofftyp	Pilot Kraftstoff	BC Messmethode
								2	High		25	HFO
								47	Medium		35	DM
								26	Low		6	LNG
											8	EN 590
											1	GtL

Quellen: s. Spalte 3

Tabelle 15: BC-Emissionswerte für alle Datensätze der Messkampagnen (Quellen s. Spalte 2)

source	emission limit	test cycle	after treatment	eBC in mg/kWh engine load %											Cycle				eBC [g/kg-fuel]		
				110	100	90	85	75	60	50	35	25	20	15	10	E2 [g/kWh]	D2 [g/kWh]	E3 [g/kWh]		SFOC [g/kWh]	
1	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	SCR	1,3		1,2	2,1		1,4	2,3							0,0018	190	0,0095	
2	PPR-4/9	IMO Tier-III	E3	none	1,8			0,4		0,2	5,1							0,0011	190	0,0056	
3	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	1,4			1,9		1,7	3,2							0,0018	190	0,0096	
4	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	SCR	1,3		1,2	2,1		1,4	2,3							0,0018	190	0,0095	
5	PPR-4/9	IMO Tier-III	E3	none	0,2			0,2		0,2	0,2							0,0002	190	0,0010	
6	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	1,3	1,0		1,5		1,6	2,2							0,0015	190	0,0079	
7	PPR-4/9	IMO Tier-III	E3	none	0,3			0,2		0,3			23,5			0,0002			190	0,0011	
8	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	3,1			4,3		11,4			20,9			0,0045			190	0,0238	
9	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	7,4			9,2		8,9	11,7							0,0088	190	0,0461	
10	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	1,7		1,7	1,6		1,5	1,6							0,0016	190	0,0084	
11	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	0,7		0,4	0,5		0,6	0,9							0,0006	190	0,0032	
12	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	2,4		1,2	2,0		1,4	1,0							0,0020	190	0,0104	
13	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	1,7		0,9	1,1		1,0	1,9							0,0013	190	0,0068	
14	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	2,2		1,1	1,0		1,0	1,9							0,0014	190	0,0073	
15	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	8,5		8,9	9,4		8,5	12,5			15,9				0,0092	190	0,0485	
16	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	4,7	3,4		3,6	5,0	10,1						0,0049			190	0,0256	
17	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	3,7		2,9	4,5		4,3	5,7					0,0043			190	0,0227	
18	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	6,0		3,6	15,1		12,8	8,7					0,0118			190	0,0623	
19	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	2,4		2,6	4,8		7,2	17,2					0,0051			190	0,0266	
20	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	2,9			5,7		10,2	13,5					0,0058			210	0,0277	
21	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	4,0		4,1	10,9		11,7	11,2					0,0090			210	0,0429	
22	PPR-4/9	IMO Tier-II	D2	none	10,6			12,2		18,6	31,8			85,8			0,0187			210	0,0892
23	PPR-4/9	IMO Tier-II	D2	none	10,2			12,4		20,9	31,0			89,6			0,0195			210	0,0926
24	PPR-4/9	IMO Tier-II	C1	none	13,5			27,1		40,3				320,3					210		
25	PPR-4/9	IMO Tier-II	D2	none	4,0			9,4		22,0			171,6				0,0148			210	0,0703
26	PPR-4/9	IMO Tier-III	E2	none	0,3			0,1		0,1	0,2					0,0002			175	0,0011	
27	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	4,3			7,0		16,0	20,3					0,0079			190	0,0416	
28	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	8,7			9,1		10,0	41,9			249,2		0,0109			210	0,0517	
29	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	10,5			10,9		11,8	37,6			226,9		0,0124			210	0,0589	
30	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	23,4			24,4		25,5	15,6							0,0237	210	0,1131	
31	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	9,2			14,6		23,3	29,3					0,0148			210	0,0703	
32	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	108,4			170,4		420,0	191,6							0,1807	210	0,8606	
33	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	75,9			70,1		63,6	119,6					0,0738			210	0,3514	
34	PPR-4/9	IMO Tier-II	E2	none	39,4			57,4		68,8	99,8					0,0557			210	0,2653	
35	PPR-4/9	IMO Tier-II	E3	none	44,1			30,7		23,6	22,2							0,0334	210	0,1589	
36	PPR 6/INF.14	IMO Tier-II		none						3,3									170	0,0176	extrapoliert
37	PPR 6/INF.14	IMO Tier-III		EGR						13,7									170	0,0824	extrapoliert
38	PPR 6/INF.14	IMO Tier-II		none						10,4									170	0,0588	extrapoliert
39	PPR 6/INF.14	IMO Tier-III		EGR						16,9									170	0,1000	extrapoliert
40	PPR 6/INF.13	IMO Tier-II	D2	none	42,9	42,9		202,9		184,2	91,8			91,8			0,1601		210	0,7622	
41	PPR 6/INF.13	IMO Tier-III	D2	SCR	73,9	73,9		228,6		204,0	96,7			96,7			0,1807		210	0,8605	
42	PPR 6/INF.13	IMO Tier-III	D2	SCR+Scrubber	28,2	28,2		141,2		155,8	52,5			52,5			0,1179		210	0,5616	
43	PPR 6/INF.13	IMO Tier-II	D2	none	28,2	28,2		37,6		386,6	435,7			435,7			0,2190		210	1,0429	
44	PPR 6/INF.13	IMO Tier-III	D2	SCR	42,2	42,2		44,9		334,2	451,6			451,6			0,2096		210	0,9981	
45	PPR 6/INF.13	IMO Tier-III	D2	SCR+Scrubber	14,7	14,7		32,3		202,5	278,3			278,3			0,1287		210	0,6130	
46	PPR 6/INF.13	IMO Tier-II	D2	none	24,4			24,4		90,2	65,8			65,8			0,0527		210	0,2511	
47	PPR 6/INF.13	IMO Tier-III	D2	SCR	22,1			22,1		82,9	60,8			60,8			0,0484		210	0,2303	
48	PPR 6/INF.13	IMO Tier-III	D2	SCR+Scrubber	15,5			15,5		63,3	47,8			47,8			0,0365		210	0,1737	
49	PPR 6/INF.12	IMO Tier-II	E2	none																	ref Corbin
50	PPR 6/INF.12	IMO Tier-III	E2	none																	ref Corbin
51	Corbin et al 2019	IMO Tier-II	E2	none	11			17,0		27,0	40,1			17,5	0,0176				190	0,0928	
52	Corbin et al 2019	IMO Tier-III	E2	none	0,6			0,9		0,8	1,0			0,8	0,0008				175	0,0046	
53	UCR 201902	IMO Tier-II	E3	none	1,3			1,3		1,3	2,7	4,8	7,0	3,6				0,0015	190	0,0080	extrapoliert
54	UCR 201902	IMO Tier-II	E3	none	1,9			1,9		1,9	3,4	5,6	7,7	5,3				0,0021	190	0,0110	extrapoliert
55	UCR 201902	IMO Tier-II	D2	none	31,1			31,1	31,1	40,3	194,6			194,6			0,0634		210	0,3020	extrapoliert
56	UCR 201902	IMO Tier-II	D2	none	53,4			53,4	53,4	71,6	209,4			209,4			0,0872		210	0,4153	extrapoliert
57	UCR 201807	IMO Tier-II	E3	none	5,7		5,7	6,0		8,0	10,3						0,0064		190	0,0335	extrapoliert
58	UCR 201807	IMO Tier-II	D2	none	15,1			15,1		35,0	145,2			145,2			0,0448		210	0,2134	extrapoliert
59	PPR 7/8	IMO Tier-II	E2	none																0,0420	
60	PPR 7/8	IMO Tier-II	E2	none																0,0580	
61	PPR 7/8	IMO Tier-II	E2	none																0,0760	
62	PPR 7/8	IMO Tier-II	E2	none																0,0960	
63	PPR 7/8	IMO Tier-II	E2	none																0,1000	
64	PPR 7/8	IMO Tier-II	E2	none																0,1190	
65	MEPC-76/INF.43	II / III	E3	HP-SCR	3,8			1,7		0,9	1,4						0,0022	167,162	0,0131		
66	MEPC-76/INF.43	II / III	E3	HP-SCR	7,5			8,2		10,6	9,4						0,0083	167,162	0,0497		
67	MEPC-76/INF.43	II / III	E3	HP-SCR	10,5			9,6		10,4	10,5						0,0100	167,162	0,0598		
68	MEPC-76/INF.43	IMO Tier-II	D2	none	22,8			24,0		29,1	32,0			57,3			0,0275		210	0,1308	
69	MEPC-76/INF.43	IMO Tier-II	D2	none	36,7			38,6		47,1	24,4			43,7			0,0390		210	0,1855	
70	MEPC-76/INF.43	IMO Tier-II	D2	none	28,2			29,7		48,1	48,3			86,5			0,0395		210	0,1882	
71	MEPC-76/INF.44		D2																		Parameterstudie
72	MEPC-76/INF.45																				nur % Werte
73	MEPC-76/INF.45																				nur % Werte
74	MAN-ES internal		D2	none	17,0			32,1		44,2	100,9			140,8			0,0476		210	0,2266	
75	MAN-ES internal		D2	DPF	0,1			0,1		0,2	0,1			0,1			0,0001		210	0,0006	

Quellen: s. Spalte 2