



**MAREMIS**  
URBAN EMISSION REDUCTION

 **BERGMANN**  
CONSULTANTS & ADVISORS  
**MARINE**

 **DLR**

 **FleetMon**  
from KPLER

# MAREMIS

*Urban Emission Reduction*

## Schlussbericht



Gefördert durch das **BMBF** – Bundesministerium für Bildung und Forschung



## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
1 Kurzbericht.....	- 1 -
1.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung .....	- 1 -
1.2 Ablauf des Vorhabens .....	- 1 -
1.3 Wesentliche Ergebnisse .....	- 3 -
2 Eingehende Darstellung .....	- 4 -
2.1 Durchgeführte Arbeiten inkl. Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit .....	- 4 -
2.2 Untersuchungsgebiet und Untersuchungszeitraum.....	- 4 -
2.3 Szenarien.....	- 5 -
2.4 Vorgehen für die Emissionsmodellierung .....	- 7 -
2.5 Vorgehen für die Klima-Chemie-Modellierung .....	- 9 -
2.6 Ergebnisse .....	- 11 -
2.6.1 Ergebnisse der Emissionsmodellierung .....	- 11 -
2.6.2 Ergebnisse der Klima-Chemie-Modellierung .....	- 13 -
2.6.3 Demonstrator .....	- 15 -
2.7 Fortgeschriebener Verwertungsplan .....	- 16 -
2.8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen nach Nr. 5 der NKBF .....	- 16 -
Quellenverzeichnis.....	III



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eröffnung durch Dr. Phanthian Zuesongdham und Diego Piedra-Garcia in der Hamburg Port Authority .....	- 2-
Abbildung 2: Die CO2-Schiffsemissionen in Hamburg (links) und Singapur (rechts) .....	- 3-
Abbildung 3: Verschiedene Szenarien der Schiffsemissionen von CO2 in Hamburg (links) und Singapur (rechts).....	- 3-
Abbildung 4: Untersuchungsgebiete zur Berechnung von Schiffsemissionen in Hamburg (links) und Singapur (rechts).....	- 5-
Abbildung 5: Hafengebiete mit einer optionalen Landstromversorgung: Hamburg (links) und Singapur (rechts).....	- 6-
Abbildung 6: Einheimische Einsatzgebiete für den lokalen Schiffsverkehr festgelegt: Hamburg (links) und Singapur (rechts).....	- 7-
Abbildung 7: Verkehrsdichte innerhalb der Forschungsgebiete: Hamburg (links) und Singapur (rechts) .	- 11-
Abbildung 8: Räumliche Verteilung der maritimen Emissionen von CO2 innerhalb der Forschungsgebiete: Hamburg (links) und Singapur (rechts).....	- 11-
Abbildung 9: Menge des emittierten CO2 innerhalb der Forschungsgebiete mit Berücksichtigung von Szenarien: Hamburg (links) und Singapur (rechts) .....	- 12-
Abbildung 10: Emissionsminderung von CO2 nach Anwendung des besten Szenarios: Hamburg (links) und Singapur (rechts).....	- 12-
Abbildung 11: (links) Bodennahe Konzentration von reaktiven Stickstoffen (in $\mu\text{g}(\text{n})/\text{m}^3$ ). (rechts) relative Beiträge von anthropogenen Emissionen (oben) sowie von Schiffsemissionen (unten, jeweils in Prozent). Alle Werte sind gemittelt für den Zeitraum 11.02-17.02.2019 .....	- 13-
Abbildung 12: Relativer Beitrag von Schiffsemissionen zu bodennahem Ozon (in Prozent). Mittelwert für 11. 2- 17.2 .....	- 14-
Abbildung 13: Reduktion (Szenario minus Referenz) der bodennahen NOx- Mischungsverhältnisse (in nmol/mol) für die drei Szenarios mit verändertem Treibstoff. ....	- 14-
Abbildung 14: Reduktion (Szenario minus Referenz) der bodennahen NOx- Mischungsverhältnisse (in nmol/mol) für die Szenarien mit elektrischen Booten im Hafen (links) und Landstrom (rechts). .....	- 15-
Abbildung 15: Ansicht des Demonstrators in der Dashboard-Ansicht .....	- 16-



## 1 Kurzbericht

### 1.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Zum Verbundprojekt MAREMIS (Modellierung und Verifizierung des Seeverkehrs zur Reduzierung der Seeverkehrsemissionen) gehört unter anderen ein Teilvorhaben, das sich auf Berechnung von Schiffsemissionen und deren Einfluss auf regionale Luftqualität fokussiert. Es wurde ursprünglich geplant, auf Big-Data und maschinellem Lernen basierende Lösungen zur Messung, Verfolgung und Validierung des Seeverkehrs zu entwickeln, um Emissionen zu reduzieren und die lokale Luftqualität zu verbessern. Dazu sollte ein Schiffsemissionsmodell implementiert und einsetzt werden, das auf realen Schiffsbewegungen und Sensor-gestützten Emissionsdaten basiert. Das Schiffsemissionsmodell sollte verwendet werden, um die Luftverschmutzung durch den Seeverkehr in Häfen abzuschätzen. Es sollte die räumliche und zeitliche Emissionsdynamik widerspiegeln und die Verkehrsemissionen in Echtzeit verfolgen. Die Ergebnisse der Emissionsberechnung sollten danach helfen, die Auswirkungen auf die Luftqualität in Küstenstädten mithilfe eines Chemietransportmodells zu modellieren. Die Analyse soll gemeinsam mit Projektpartner aus Deutschland und Singapur in zwei großen Häfen: den Hafen von Singapur und einen großen deutschen Hafen, angewendet und bewertet werden. Außerdem sollten Ansätze entwickelt werden, um Emissionsminderungsstrategien durch Änderungen des Hafenbetriebs und des Seeverkehrsmanagements mithilfe von Big-Data-Analyse und Simulation zu optimieren.

Die Ergebnisse der Emissionsberechnung sollten in ein Demonstratorsystem angebunden werden, um den Hafenbetreibern zu helfen, das Schiffsemissionsdynamik zu verdeutlichen, indem das System auch die räumliche und zeitliche Dynamik von Schadstoffen und den Prozess ihrer Ausbreitung in städtische Gebiete erfasst. Das Demonstratorsystem soll Hafenbetreibern und politischen Entscheidungsträgern eine Entscheidungshilfe bieten, um die Schiffsemissionen aus Sicht des Hafenbetriebs und des Seeverkehrsmanagements zu verringern.

### 1.2 Ablauf des Vorhabens

Gemeinsam mit dem Partnerprojekt in Singapur wurde, basierend auf den Daten von Messnetzwerken der Luftgüte sowie weiteren meteorologischen Beobachtungsdaten, zwei Wochen in 2019 ausgewählt in welchen die Wetterlage möglichst stabil waren. Hierbei wurden für die Häfen Singapur und Hamburg verschiedene Wochen gewählt. In einem weiteren Schritt wurden gemeinsam mögliche Szenarien zur Minderung der Schiffsemissionen für die Häfen entwickelt. Diese Szenarien umfassen einerseits alternative Treibstoffe (LNG, Methanol) als auch Landstrom an bestimmten Terminals sowie Elektrifizierung von kleinen Schiffen innerhalb des Hafengebiets.

Auf Basis der Daten des automatischen Identifizierungssystems (AIS) sowie technischer Schiffsdaten wurden die Emissionen für betrachteten Zeiträume einmal für den Referenzfall sowie die betrachteten Szenarien berechnet. Zum Einsatz kam hierbei ein Algorithmus der Internationaler Maritimer Organisation (IMO) welcher auf dem STEAM Modell des Finnischem Meteorologischem Institut basierte. Da es bei der technischen Implementierung des Algorithmus viele Freiheitsgrade gibt, wurde von den MAREMIS Teams in Deutschland sowie in Singapur ein Benchmark entwickelt um die verschiedenen Implementierungen zu vergleichen.

Das DLR Institut für Kommunikation und Navigation trug zu dem Projekt bei, indem es die maritimen Emissionen in den Häfen von Hamburg und Singapur berechnete. Die Emissionsberechnung bezog



sich auf dem von Internationaler Maritimer Organisation (IMO) veröffentlichtem Algorithmus, das auf STEAM Modell von Finnischem Meteorologischem Institut basierte. Die Schiffsbewegungen wurden mit Hilfe von Daten aus dem automatischen Identifizierungssystem (AIS) erfasst. Für jeden Hafen wurden zwei repräsentative Wochen aus 2019 gewählt, um verschieden Wetter- und Klimamuster zu berücksichtigen. Zusätzlich zu Schiffsbewegungen wurden auch die technischen Schiffsdaten verwendet, um Antrieb und Treibstoff von den Schiffen zu bestimmen. Die Schiffsemissionen wurden in zwei Etappen berechnet. Erstens als eine Darstellung des realen Zustands in 2019, zweitens als optionale Szenarien, die mögliche Entwicklungen und deren Auswirkungen zeigen. Die Szenarien sollten sich hauptsächlich auf alternative Treibstoffe und Elektrifizierung im Häfen fokussieren. Auf Basis der Emissionen wurden Simulationen der Luftqualität mit dem globalen-regionalem Klima-Chemie Modell MECO(n) durchgeführt. Hierbei wurden Modellsetups für Norddeutschland sowie Singapur definiert und mit Beobachtungsdaten evaluiert. Der Fokus in dem Projekt lag dabei auf Simulationen der Luftqualität für Norddeutschland, wobei der Bereich um Hamburg mit 1 km räumlicher Auflösung aufgelöst wurde. Die Simulationen wurden für den Referenzfall sowie für die betrachteten Szenarien durchgeführt und die Ergebnisse mit Beobachtungsdaten evaluiert. Ein innovatives Markierungsverfahren in dem Modellsystem erlaubt es dabei die Reaktionswege der Spurenstoffe aus den unterschiedlichen Emissionssektoren nachzuverfolgen und Schadstoffkonzentrationen direkt den unterschiedlichen Emissionssektoren zuzuordnen. Die Modellergebnisse wurden schließlich in einen Demonstrator eingebunden. Im Juli 2023 fand schließlich ein Abschluss- und User Workshop zur Validierung des erarbeiteten Dashboards mit Teilnehmenden aus Singapur und Deutschland statt.



Abbildung 1: Eröffnung durch Dr. Phanthian Zuesongdham und Diego Piedra-Garcia in der Hamburg Port Authority

### 1.3 Wesentliche Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnung von Schiffsemisionen von CO2 sind in Abbildung 1 dargestellt.

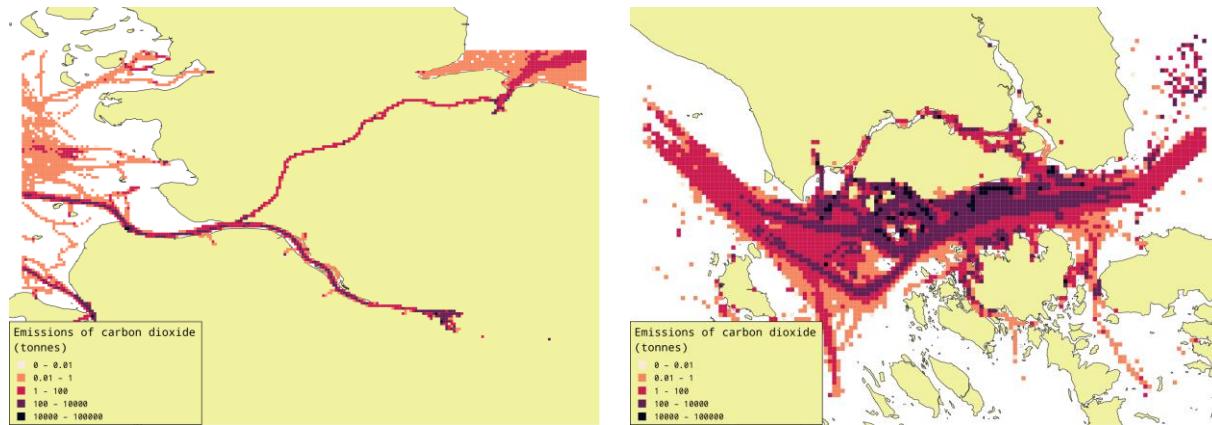


Abbildung 2: Die CO2-Schiffsemisionen in Hamburg (links) und Singapur (rechts)

Es fällt in der Abbildung 1 auf, dass Hamburg weiter von den Hochseeschifffahrtsrouten entfernt ist, als Singapur. Daher könnte der Einfluss des Hochseeschiffsverkehrs auf die allgemeine Luftqualität in Singapur stärker sein. Die Änderungen von Schiffsemisionen auf Beispiel von CO2 bei dem Einsatz von verschiedenen Szenarien ist in Abbildung 2 dargestellt.

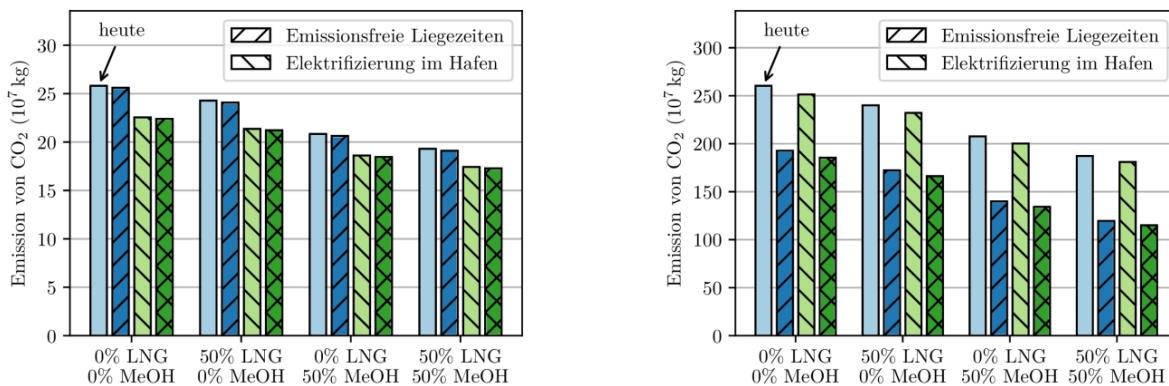


Abbildung 3: Verschiedene Szenarien der Schiffsemisionen von CO2 in Hamburg (links) und Singapur (rechts).

Die Diagramme zeigen einen allgemeinen Verbesserungspfad, wenn verschiedene Szenarien während der Berechnung aktiviert wurden. Erstens kann man bei der Betrachtung der vier Balkengruppen von links nach rechts erkennen, wie der Umstieg auf alternative Kraftstoffe zu einer Verringerung der Gesamtmasse der emittierten CO2-Emissionen führen könnte. Zweitens zeigt jede Balkengruppe, welchen Einfluss die Elektrifizierung des lokalen Seeverkehrs und die Versorgung der Schiffe am Liegeplatz mit elektrischer Energie von Land aus zusätzlich auf diese Emissionen haben könnte. Ein Vergleich der gesamten CO2-Emissionen in den beiden Untersuchungsgebieten zeigt einen ungefähr 10-fachen Unterschied in der Masse der emittierten CO2-Emissionen zwischen dem Gebiet von Hamburg und Singapur. Dies ist auf ein höheres Volumen des Seeverkehrs zurückzuführen, der Singapur passiert und chinesische und europäische Häfen miteinander verbindet.



## 2 Eingehende Darstellung

Das Verbundprojekt MAREMIS (Modellierung und Verifizierung des Seeverkehrs zur Reduzierung der Seeverkehrsemissionen) fokussiert sich auf Berechnung von Schiffsemissionen und deren Einfluss auf regionale Luftqualität. Zusammen mit Projektpartnern aus Deutschland und Singapur wurden zwei große Hafengebiete erforscht: Hamburg und Singapur. Die Lösungen sollten helfen, ein Verfahren zur Messung, Verfolgung und Validierung des Seeverkehrs zu entwickeln, um Emissionen zu reduzieren und die lokale Luftqualität zu verbessern. Die Ergebnisse der Emissionsberechnung sollten in ein Demonstratorsystem angebunden werden, um den Hafenbetreibern und politischen Entscheidungsträgern zu helfen, verschiedene Szenarien von Schiffsemissionsdynamik zu verdeutlichen. Das Demonstratorsystem kann die besten Möglichkeiten zur Reduzierung der Emissionen von Schadstoffen bei dem Prozess ihrer Ausbreitung in städtische Gebiete zeigen.

### 2.1 Durchgeführte Arbeiten inkl. Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit

Die Arbeiten bestanden aus drei Hauptetappen:

- 1.) Entwicklung von einem Schiffsemissionsmodell zur Berechnung von Schiffsemissionen
- 2.) Durchführung von Simulationen der Luftqualität mithilfe des globale-regionalen Klima-Chemie-Modells MECO(n) auf Basis der berechneten Schiffsemissionen
- 3.) Bereitstellung von einem Demonstratorsystem zur Visualisierung von Ergebnissen.

### 2.2 Untersuchungsgebiet und Untersuchungszeitraum

Gemeinsam mit dem MAREMIS Partner Konsortium in Singapur haben wir uns entschieden sowohl für den Hafen Hamburg als auch den Hafen Singapur großräumigere Gebiete zu untersuchen, wie sie in Abbildung 1 dargestellt sind. Diese Größe wurde aus zwei Gründen gewählt:

- Sie ermöglicht die Berücksichtigung des Ferntransports von Schadstoffen z.B. aus der Elbe oder der Straße von Singapur in die jeweiligen Hafengebiete
- Operationelle Maßnahmen oder alternative Kraftstoffe würden nicht nur die Hafengebiete, sondern auch das Umland betreffen. Trade-Offs und Co-Benefits solcher Maßnahmen für das Umland sollen mit betrachtet werden.



Abbildung 4: Untersuchungsgebiete zur Berechnung von Schiffsemissionen in Hamburg (links) und Singapur (rechts)

Auf Basis der Analyse von meteorologischen Beobachtungen sowie Messdaten der Luftqualität für Hamburg in AP320 wurden für Hamburg zwei Perioden mit möglichst austauscharmen Bedingungen für den Winter und Sommer ausgesucht. Diese sind:

- 8. - 17. Februar 2019
- 14. – 24. Juli 2019

Das Wetter in Singapur ist von zwei unterschiedlichen Monsun-Systemen geprägt, dem Nordost-Monsun von Dezember – März sowie dem Südwest Monsun von Juni-September. Auf Vorschlag des MAREMIS Konsortiums in Singapur haben wir uns daher für die beiden folgenden Zeiträume für Singapur entschieden:

- 31. Januar- 10. Februar 2019
- 1. – 11. August 2019

Diese Zeiträume wurden gewählt, da der Februar zu den trockensten Perioden während des Nord-Ost Monsuns zählt. Für die Periode während des Südost-Monsuns wurde zusätzlich sichergestellt, dass es zu diesem Zeitraum keine großen Biomassenbrände in Indonesien gab, welche die Luftqualität von Singapur massiv beeinflussen würden.

## 2.3 Szenarien

Neben den Emissionen für 2019 wurden von den Teams MAREMIS Deutschland und MAREMIS Singapur zusätzliche Szenarien definiert, die sich wie folgt gruppieren lassen:

- auf der Grundlage des Datensatzes zu den Schiffsbewegungen und der technischen Ausstattung an Bord, wie sie im Datensatz zu den Schiffsdaten angegeben ist,
- Szenarien, die sich auf mögliche technologische Verbesserungen bei den maritimen Antriebssystemen beziehen und zu einer Emissionsreduzierung führen,
- Szenarien im Zusammenhang mit Verwaltungsentscheidungen, die von den Behörden getroffen werden könnten, um die Emissionen zu reduzieren.

Alle Szenarien könnten unabhängig voneinander ausgelöst und entsprechend auf die Emissionsberechnung angewendet werden. Folgende Szenarien wurden definiert:

1. *Umstellung des Kraftstoffs auf LNG oder Methanol*
2. *Strom vom Festland*
3. *Emissionsfreier lokaler Schiffsverkehr*

Das **Szenario "Umstellung des Kraftstoffs auf LNG oder Methanol"** betraf nur Schiffe mit einer Bruttoraumzahl von mehr als 400. Es wurde davon ausgegangen, dass solche Schiffe von der Europäischen Union zu ihrem Kohlenstoffmarkt hinzugefügt werden könnten, wodurch die Eigner gezwungen wären, für ihre Treibhausgasemissionen zu zahlen und der Druck auf den maritimen Sektor erhöht würde, in umweltfreundlichere Technologien zu investieren.

Um dieses Szenario zu berechnen, wurden alle Schiffe, die größer als Bruttoraumzahl 400 sind und während des betrachteten Zeitraums und in den betrachteten Gebieten operieren, nach dem Zufallsprinzip in zwei gleich große Gruppen: A und B, aufgeteilt. Die Gruppe A erhielt die Möglichkeit, den Kraftstoff auf LNG umzustellen, während die Gruppe B optional und unabhängig den Kraftstoff auf Methanol umstellen konnte. Die folgenden Änderungen des Kraftstoffs wurden in Betracht gezogen:

- beide Gruppen A und B ändern ihren Treibstoff nicht (Status Quo),
- Gruppe A stellt den Treibstoff auf LNG um (ceteris paribus),
- Gruppe B stellt den Kraftstoff auf Methanol um (ceteris paribus),
- Gruppe A schaltet den Treibstoff auf LNG um und Gruppe B schaltet den Treibstoff auf Methanol um.

Das **Szenario "Strom vom Festland"** sah die Möglichkeit vor, Schiffe, die in den folgenden Hafengebieten liegen, mit Strom zu versorgen:

- in Hamburg: Altenwerder, Steinwerder, Burchardkai, Buss-Hansa Terminal, Tollerort Terminal,  
[7](#)
- in Singapur: Pasir Panjang Container Terminal, PSA Terminals.

Die für dieses Szenario ausgewählten Hafengebiete sind in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 5: Hafengebiete mit einer optionalen Landstromversorgung: Hamburg (links) und Singapur (rechts)

Es wurde davon ausgegangen, dass eine Landstromversorgung es den Schiffen an den Liegeplätzen ermöglichen würde, entweder die Hilfsmotoren oder die Hilfskessel abzuschalten und somit ihre Emissionen zu reduzieren. Der Status Quo dieses Szenarios ist ein Hafen ohne Landstromversorgung. Die Landstromversorgung könnte unabhängig für jeden Hafen aktiviert oder deaktiviert werden.

Der Zweck des **Szenarios "Emissionsfreier lokaler Schiffsverkehr"** war es, herauszufinden, wie der elektrische Antrieb zu einer Reduzierung der Emissionen im Seeverkehr beitragen könnte. Es wurden nur Schiffe einbezogen, die alle folgenden Bedingungen erfüllten:

- sie haben ihr Heimatgebiet während der entsprechenden Berechnungszeiträume nie verlassen und wurden so zu einem Vollzeit-Lokalverkehr entweder in Hamburg oder Singapur,
- ihre Bruttoraumzahl nicht mehr als 5.000 betrug.



Die für dieses Szenario gewählten Heimatgebiete sind in Abbildung 5 dargestellt.

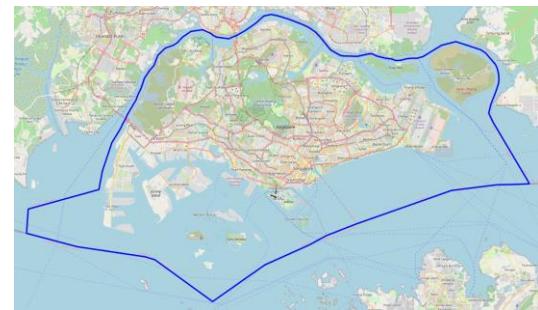


Abbildung 6: Einheimische Einsatzgebiete für den lokalen Schiffsverkehr festgelegt: Hamburg (links) und Singapur (rechts)

Die Tonnagebeschränkung folgte einer Forderung, dass Schiffe, die in den Werften gewartet und repariert werden, vom lokalen Seeverkehr ausgeschlossen werden sollten. Der Status Quo dieses Szenarios ist ein Hafen ohne lokalen Schiffsverkehr mit rein elektrischem Antrieb. Der elektrische Antrieb könnte für jedes einheimische Gebiet des lokalen Schiffsverkehrs unabhängig aktiviert oder deaktiviert werden.

## 2.4 Vorgehen für die Emissionsmodellierung

Das DLR Institut für Kommunikation und Navigation fokussierte sich auf die Arbeiten zur Entwicklung von einem auf das Projekt abgestimmtem Schiffsemissionsmodell und zur Berechnung von Schiffsemissionskataster. Das Schiffsemissionsmodell basierte auf dem von Internationaler Maritimer Organisation (IMO) veröffentlichtem Algorithmus, das auf renommiertem STEAM Modell von Finnischem Meteorologischem Institut beruhte. Die projektspezifischen Eingabedatensätze für die ausgewählten Regionen und Zeiträume enthielten die folgenden Elemente:

- ein Datensatz für Schiffsbewegungen extrahiert aus dem automatischen Identifizierungssystem (AIS),
- ein Datensatz mit technischen Angaben von berechneten Schiffen.
- Beide Datensätze wurden von dem Projektpartner FleetMon zur Verfügung gestellt und den folgenden Vorverarbeitungsschritten unterzogen:
- Konvertierung einer Sammlung von dynamischen und statischen AIS-Meldungen in ein proprietäres Ausgabeformat,
- Downsampling der ursprünglichen Sendeintervalle der Schiffspozitionsmeldungen auf eine konstante Rate von einer Positionsmeldung pro Minute für jedes Schiff,
- räumliche und zeitliche Filterung der Schiffspozitionsmeldungen, um nur Schiffe zu berücksichtigen, die innerhalb der Forschungsgebiete und während der Berechnungszeiträume operierten,
- Verkürzung der Schiffsangaben, um nur die technischen Daten der Flotte zu enthalten, die im Datensatz für die Schiffsbewegungen gespeichert sind.

Das Downsampling der Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Positionsmeldungen folgte der Regel, dass die erste AIS-Meldung, die während einer bestimmten UTC-Minute empfangen wurde, an die Trajektorie eines bestimmten Schiffes angehängt wurde und die anderen AIS-Meldungen, die von diesem Schiff während derselben UTC-Minute empfangen wurden, verworfen wurden. Die statischen und reisebezogenen Daten wurden nur verwendet, um den aktuellen Tiefgang eines Schiffes zu ermitteln. Der Datensatz für die Schiffsbewegungen umfasste die folgenden Datenfelder:



- Zeitstempel (UTC),
- verdeckte Schiffskennung (zu dem Schutz personenbezogener Daten),
- Länge und Breite des Schiffes,
- aktueller Tiefgang des Schiffes.

Der Datensatz mit den Schiffsdaten enthielt Text-verfasste Informationen über die Maschine, den Kraftstoff und die allgemeine Klassifizierung eines bestimmten Schiffes. Diese Parameter umfassten:

- verdeckte Schiffskennung,
- Bruttoraumzahl,
- Baujahr,
- Schiffstyp und Untertyp,
- Referenzleistung der Hauptmaschine,
- Angabe des Modells der Hauptmaschine, der Drehzahl pro Minute und der Motorbauart,
- Angabe der Kraftstoffart,
- Angabe der Ladekapazität,
- der maximale Tiefgang und die Höchstgeschwindigkeit.

Der Projektpartner FleetMon hat sichergestellt, dass beide Datensätze anonymisiert bleiben. Daher waren die Schiffskennungen in keiner Weise mit der tatsächlichen Identifizierung von Schiffen verbunden. Dennoch konnten die verdeckten Schiffskennungen als gemeinsames Schlüsseldatenfeld verwendet werden, um die Schiffsbewegungen mit den Schiffsdaten zu verknüpfen und so direkt alle verfügbaren Parameter in einer Datenbank zu nutzen.

Es gab 28.672.564 Positionsmeldungen, die über AIS von 12.086 eindeutigen Schiffen im Schiffsbewegungsdatensatz gesendet wurden. Der Datensatz mit den Schiffsdaten enthielt verwertbare Datensätze von 7.697 Schiffen. Die technischen Details der verbleibenden 4.389 Schiffe waren nicht bekannt und wurden einer Standardkonfiguration für den 2018 in Betrieb genommenen Schiffstyp zugewiesen, der mit langsam laufendem Diesel (SSD) ausgestattet ist und mit Marinedieselöl (MDO) betrieben wird, um ihre Emissionen zu schätzen.

Insgesamt konnte die Aktivität von nur 225 Schiffen (weniger als 2%) nicht verfolgt werden, da nur ein einziger Positionsbericht verfügbar war. Die Idee hinter dieser sorgfältigen Vorbereitung der Eingabedatensätze war eine mögliche Beschleunigung der Emissionsverarbeitung, da nur Daten ausgewertet werden mussten, die für den Projektumfang als wesentlich angesehen wurden.

Der Prozess der Emissionsberechnung für die Zwecke des Projekts lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Berechnung des aktuellen Leistungsbedarfs der Hauptmaschine,
- Zuordnung der Betriebsphase und Nachschlagen des entsprechenden Leistungsbedarfs von Hilfsmotor und Hilfskessel,
- Berechnung der Energie, die benötigt wird, um ein Schiff in einem bestimmten Zeitraum zwischen zwei Positionen zu bewegen,
- Nachschlagen des Basiskraftstoffverbrauchs in Bezug auf den Hauptmaschinentyp, den Kraftstofftyp und das Baujahr,
- Berechnung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs auf der Grundlage der aktuellen Maschinenlast,
- Berechnung der Emissionsfaktoren auf der Grundlage der Maschinen- und Kraftstoffparameter eines bestimmten Schiffes,
- Berechnung der Emissionsmassen der folgenden 8 Spezies: CO<sub>2</sub>, SOX, NOX, Feinstaub PM10 und PM2.5, CO, flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) und Ruß.

Im Rahmen des Projekts war es nicht möglich, Parameter wie den spezifischen Kraftstoffverbrauch oder den aktuellen Leistungsbedarf des Motors und der Antriebskomponenten direkt von den Bordsystemen der Schiffe zu erhalten. Daher mussten diese Parameter gemittelt und nach Schiffsklassen mit unterschiedlichen Eigenschaften gruppiert werden.



Die Wetterkorrekturfaktoren und die Bewuchs-Korrekturfaktoren für verschiedene Schiffstypen und -größen bezogen sich auf in dem IMO Algorithmus vorgeschlagenen Parameter. Sie berücksichtigen, wie die Wetterbedingungen und der Bewuchs des Schiffskörpers den aktuellen Energiebedarf eines bestimmten Schifffes erhöhen können.

Der Geschwindigkeits-Leistungs-Korrekturfaktor wurde auf Kreuzfahrtschiffe unabhängig von ihrer Größe und auf Containerschiffe mit einer Kapazität von mindestens 14.500 TEU (20-Fuß-Standardcontainer) angewendet. Die Analysen zeigen, dass diese Schiffsklassen in der Regel mit großen Motoren ausgestattet sind, aber nur selten mit ihrer Höchstgeschwindigkeit fahren und stattdessen eine wirtschaftliche Geschwindigkeit bei geringerer Motorlast bevorzugen. Außerdem tragen die Geschwindigkeits-Leistungs-Korrekturfaktoren dazu bei, eine Überschätzung des aktuellen Leistungsbedarfs dieser Schiffe zu vermeiden.

Für die Berechnung von Schiffsemissionen müssten die folgenden Betriebsphasen eines Schiffes in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit und Maschinenlast zugeordnet werden:

- am Liegeplatz,
- verankert,
- Manöver,
- Seereise.

Zum Zweck der chemischen Weitermodellierung von Schiffsemissionen und verschiedener Emissionszenarien wurden die Ergebnisse aller im Rahmen von MAREMIS durchgeführten Emissionsberechnungen im NetCDF-Format (Network Common Data Form) gespeichert. Das Format unterstützt die Erstellung, den Zugriff und die gemeinsame Nutzung von Matrizen-orientierten wissenschaftlichen Daten. Es stellt eine nützliche Schnittstelle zum Austausch von Daten in den Bereich der Klimaforschung bereit.<sup>27</sup>

Im Rahmen des MAREMIS-Projektes wurde vereinbart, dass:

- die räumliche Auflösung der Emissionsergebnisse  $0,01^\circ$  in Breiten- und Längengraden auf der Oberfläche des WGS-84 Referenzellipsoids betragen wird,
- die zeitliche Auflösung 1 Stunde betragen wird.

Diese Emissionen wurden als NetCDF-Datei an DLR-PA weitergegeben.

## 2.5 Vorgehen für die Klima-Chemie-Modellierung

Zur Analyse der Auswirkungen der Emissionen auf die Luftqualität wurden am Institut für Physik der Atmosphäre (PA) des DLRs Simulationen mit dem globalen-regionalen Klima-Chemie-Modell MECO(n) durchgeführt.

Im Gegensatz zur ursprünglichen Planung hat das MAREMIS Deutschland Team entschieden, kein statistisches Modell in AP510 auf Basis der Modellsimulationen zu erstellen welches in den Demonstrator eingebunden wird. Anstelle dessen entschieden wir uns, Simulationen für jedes das betrachtete Szenario explizit durchzuführen und, bei deutlich erhöhtem Ressourcenbedarf, die räumliche Auflösung der Simulationen von den ursprünglich geplanten  $\sim 10 - 20$  km auf  $\sim 1$  km erhöht. Ursächlich hierfür waren:

- Die explizite Durchführung von MECO(n) Simulationen ermöglichte es uns die stark nichtlinearen atmosphärenchemischen Prozesse und die resultierenden Änderungen der Luftqualität durch die Szenarien detaillierter zu analysieren.
- Die deutlich erhöhte räumliche Auflösung der Simulationen und die direkte Einbindung der Modelldaten in den Demonstrator ermöglicht eine bessere Darstellung der starken räumlich-zeitlichen Variabilität der Luftschaadstoffe



Ausgehend von den bestehenden MECO(n) Modellset-Ups beschrieben von Kumar et al., 2021 wurde ein MECO(n) Modellset-Up für Norddeutschland aufgebaut, bestehend aus folgenden Modellinstanzen:

- 01: EMAC als globales Modell in der Auflösung T106L90MA (~180 km horizontale Auflösung, 90 vertikale Level bis etwa 80 km Höhe)
- 02: COSMO/MESSy über Europa mit 0.44° räumlicher Auflösung (~50 km)
- 03: COSMO/MESSy über Zentral-Europa mit 0.0625° räumlicher Auflösung (~7 km)
- 04: COSMO/MESSy über dem Zielgebiet für Norddeutschland mit 0.01° räumlicher Auflösung (~ 2 km)

Basierend auf dem Modellset-Up beschrieben von Kilian, 2023 wurde eine MECO(n) Konfiguration über Singapur aufgebaut, bestehend aus diesen Modellinstanzen:

- 01: EMAC als globales Modell in der Auflösung T106L90MA (~180 km horizontale Auflösung, 90 vertikale Level bis etwa 80 km Höhe)
- 02: COSMO/MESSy über Asien mit 0.44° räumlicher Auflösung (~50 km)
- 03: COSMO/MESSy über Singapur/Indonesien/Malaysia mit 0.1° räumlicher Auflösung (12 km)

Es war zunächst geplant, auch im Bereich Singapur eine weitere Verfeinerung mit ~ 2 km horizontaler Auflösung zu implementieren. Sowohl dem deutschen Konsortium als auch dem Konsortium von MAREMIS Singapur war es jedoch nicht möglich, ausreichend hoch aufgelöste Emissionsdaten für die Region zu akquirieren.

In allen Modellinstanzen, bis auf die feinste Modellinstanz für Norddeutschland, wurden die CAMS-GLOB (v4.2) bzw. CAMS-SHIP (v 2.1) Emissionen genutzt, welche im AP310 akquiriert und für die Nutzung im Modell aufbereitet wurde. Für Deutschland wurden vom Umweltbundesamt (UBA) die Emissionsdaten für Deutschland, bekannt unter dem Namen GRETA, akquiriert. Diese haben eine räumliche Auflösung von 1 km. Für die Schiffsemissionen in den Gebieten Norddeutschland und Singapur wurden die durch DLR-KN berechneten Schiffsemissionen genutzt.

Die Meteorologie in EMAC wurde gegen ERA5 Reanalysedaten, welche in AP320 aufbereitet und akquiriert wurden, relaxiert um meteorologische Bedingungen zu simulieren welche dem betrachteten Zeitraum entsprechend. Zusätzlich wurde das Modell im sogenannten QCTM (Quasi Chemistry Transport Model) Modus (Deckert et al., 2011) betrieben, welche identische Meteorologie für unterschiedliche Emissionsszenarien ermöglicht. In allen Modellinstanzen wurde das Modell mit komplexer troposphärischer und stratosphärischer Chemie konfiguriert, wie von Jöckel et al., 2016 beschrieben. Zur Quellzuordnung von Ozon und Ozonvorläuferstoffen wurde eine innovative Markierungsmethode (Tagging, Grewe et al., 2017) genutzt. Diese Methode ermöglicht es die Reaktionswege der Spurenstoffe aus unterschiedlichen Emissionsquellen nachzuvollziehen.

Erste Simulationsergebnisse für Singapur wurden auf dem MAREMIS International Meeting im September 2022 besprochen. Aufgrund der stark eingeschränkten maximalen räumlichen Auflösung von 10 km für Singapur empfahl das MAREMIS Singapur Team die Simulationen über Singapur nicht weiter zu verfolgen. Diese wären für das Singapur Team nur sinnvoll, wenn sie höher (~ 1 km) aufgelöst sind. Für Folgeprojekte wäre es daher wichtig entsprechend hoch aufgelöste Emissionskataster für Singapur zu erstellen oder Kontakte zu Fachbehörden in Singapur herzustellen, welche solche Emissionen zur Verfügung stellen könnten.

Ebenso konnten durch Verzögerungen bei der Bereitstellung der Schiffsemissionen die Simulationen für die Sommerperiode nicht mehr durchgeführt werden, da die Modellsimulationen mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen eine Rechenzeit von mehreren Wochen benötigen. Für die Etablierung der Modellkette sowie dem Aufbau des Demonstrators ist das Fehlen dieser Modellergebnisse jedoch nicht problematisch.

Die Ergebnisse der Modellsimulationen wurden mithilfe von Messdaten bodengebundener Stationen evaluiert (AP410). Grundsätzlich war hierbei eine Unterschätzung der Stickoxidkonzentrationen sowie eine Überschätzung der Ozonkonzentrationen in den Ergebnissen des Modells im Vergleich mit den Beobachtungsdaten festzustellen. Diese Abweichungen liegen im Bereich vergleichbarer Modelle. Ursächlich hierfür ist beispielsweise, dass selbst mit der vergleichsweisen hohen räumlichen Auflösung von 1 km, viele lokale Prozesse, wie Emissionen starker NOx Quellen, noch über große Bereiche verteilt werden.

## 2.6 Ergebnisse

### 2.6.1 Ergebnisse der Emissionsmodellierung

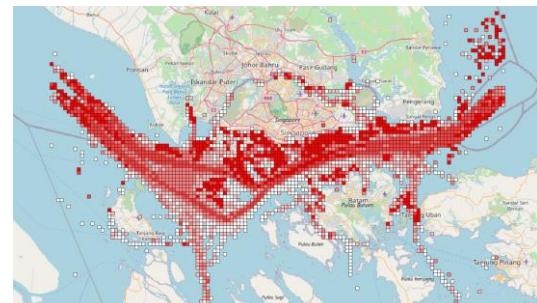


Abbildung 7: Verkehrsdichte innerhalb der Forschungsgebiete: Hamburg (links) und Singapur (rechts)

Die Verkehrsdichte innerhalb der Untersuchungsgebiete des Projekts als Darstellung der erreichten räumlichen Auflösung ist in 6 dargestellt. Ein Beispiel für die räumliche Verteilung der maritimen Emissionen von CO2 ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

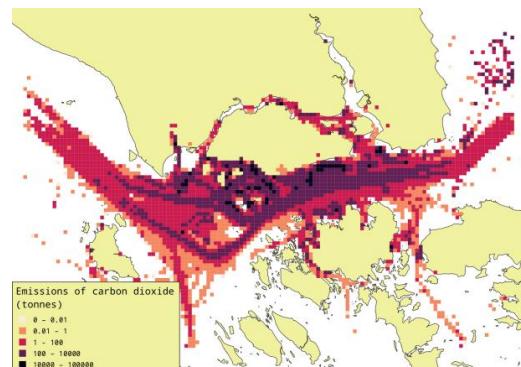
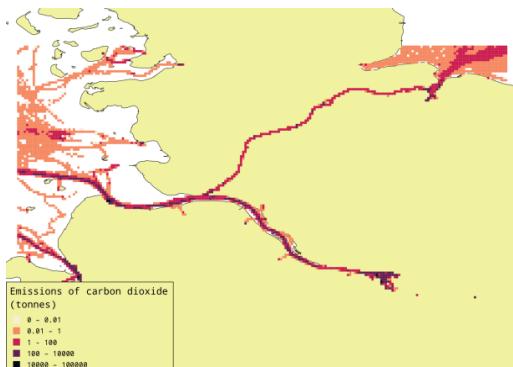


Abbildung 8: Räumliche Verteilung der maritimen Emissionen von CO2 innerhalb der Forschungsgebiete: Hamburg (links) und Singapur (rechts)

Im Laufe des Berechnungsprozesses wurden 8 Szenario-Permutationen in 2 Untersuchungsgebiete die Schiffsemissionen für 8 Spezies berechnet und als 128 (8x2x8) NetCDF-Matrizen gespeichert. Die Gesamtemissionsmassen von CO2 auf der Grundlage aller berechneten Szenarien sind in Abbildung 8 dargestellt.

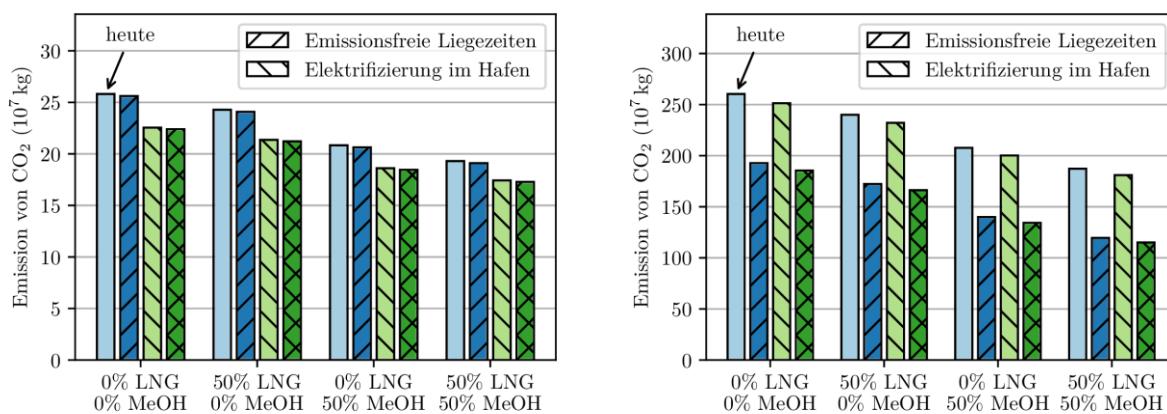


Abbildung 9: Menge des emittierten CO<sub>2</sub> innerhalb der Forschungsgebiete mit Berücksichtigung von Szenarien: Hamburg (links) und Singapur (rechts)

Die Abbildung 9 zeigt einen allgemeinen Pfad der Verbesserung, wenn verschiedene Szenarien während der Berechnung aktiviert wurden. Erstens kann man bei der Betrachtung der vier Balkengruppen von links nach rechts erkennen, wie der Umstieg auf alternative Kraftstoffe zu einer Verringerung der Gesamtmasse der emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen führen könnte. Zweitens zeigt jede Balkengruppe, welchen Einfluss die Elektrifizierung des lokalen Seeverkehrs und die Versorgung der Schiffe am Liegeplatz mit elektrischer Energie von Land aus zusätzlich auf diese Emissionen haben könnte. Ein Vergleich der Gesamtemissionen von CO<sub>2</sub> in beiden Untersuchungsgebieten zeigt einen etwa 10-fachen Unterschied in der Masse der emittierten CO<sub>2</sub> zwischen dem Gebiet von Hamburg und Singapur. Dies ist auf ein höheres Volumen des Seeverkehrs zurückzuführen, der Singapur passiert und chinesische und europäische Häfen miteinander verbindet.

Es ist auch zu bemerken, dass Hamburg weiter von den Hochseeschiffahrtsrouten entfernt ist als Singapur. Daher könnte der Einfluss des Hochseeschiffsverkehrs auf die allgemeine Luftqualität in Singapur stärker sein. Der absolute Rückgang der Emissionsmassen von CO<sub>2</sub> beim Wechsel vom Status Quo Szenario zum besten Szenario ist in Abbildung 10 dargestellt.

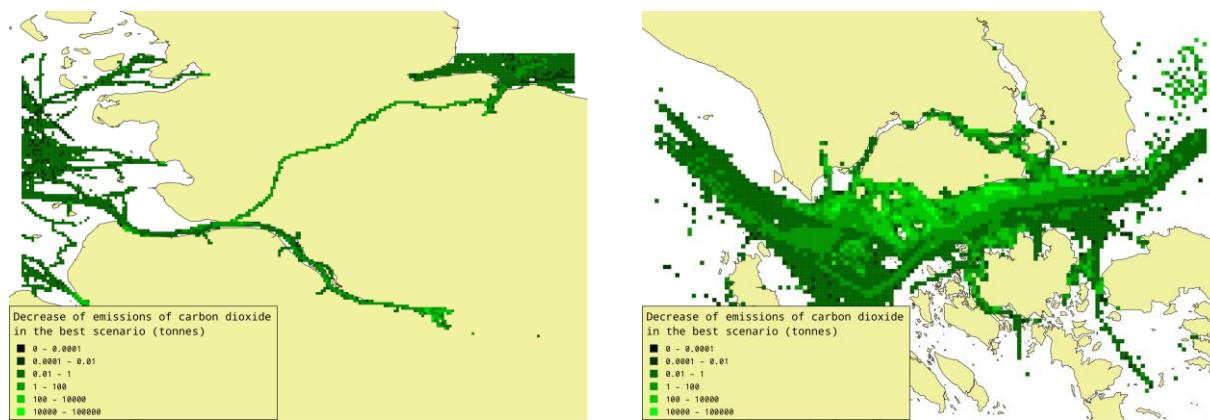


Abbildung 10: Emissionsminderung von CO<sub>2</sub> nach Anwendung des besten Szenarios: Hamburg (links) und Singapur (rechts)

Das beste Szenario könnte erreicht werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Gruppe A stellt den Kraftstoff auf LNG um und Gruppe B stellt den Kraftstoff auf Methanol um,
- die Schiffe werden am Liegeplatz mit Strom vom Land versorgt,
- der lokale Schiffsverkehr wird mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet.

Insbesondere im Fall von Singapur ist festzustellen, dass die Reduzierung der CO2-Emissionen durch die Aktivierung der Landstromversorgung und die Szenarien mit emissionsfreiem lokalem Schiffsverkehr stark beeinflusst wurde.

## 2.6.2 Ergebnisse der Klima-Chemie-Modellierung

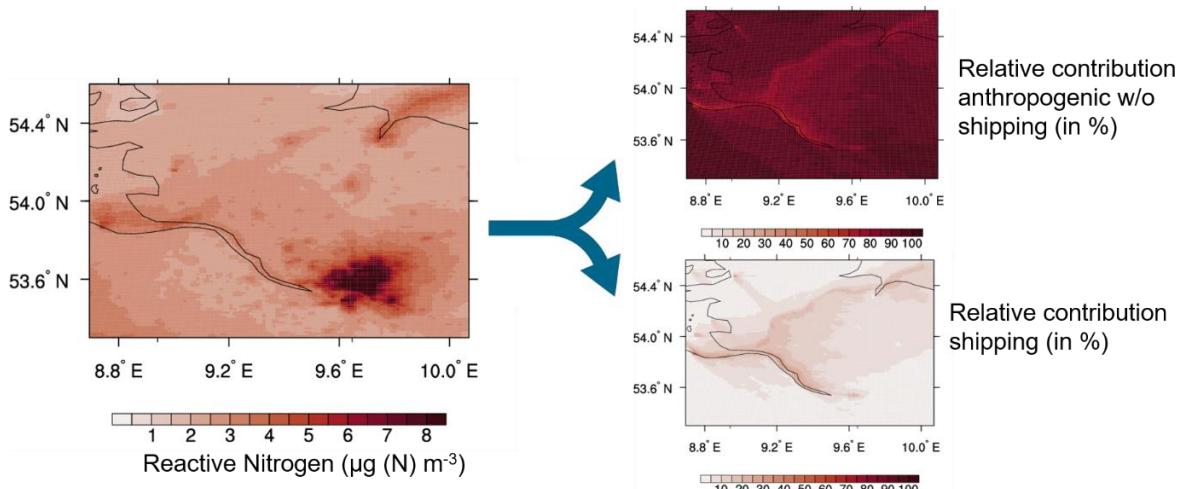


Abbildung 11: (links) Bodennahe Konzentration von reaktiven Stickstoffen (in  $\mu\text{g(n)}/\text{m}^3$ ). (rechts) relative Beiträge von anthropogenen Emissionen (oben) sowie von Schiffsemissionen (unten, jeweils in Prozent). Alle Werte sind gemittelt für den Zeitraum 11.02-17.02.2019

Mittels der Tagging-Methode zur Quellzuordnung konnte der Beitrag der Schiffsemissionen auf reaktive Stickoxide ( $\text{NO}_x$ , enthält neben Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ) und Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) auch andere reaktive Stickstoffverbindungen wie z.B. Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) für betrachteten Zeitraum quantifiziert werden. Wie in Abbildung 11 dargestellt trägt der Schiffsverkehr entlang der Hauptschiffs Routen, inkl. dem Gebiet des Hamburger Hafens, in Norddeutschland zwischen 30 – 40 % zum bodennahen reaktiven Stickoxid bei. Auch wenn der Schiffssektor nicht der Sektor mit dem größten Beitrag zum reaktiven Stickstoff ist, zeigt sich im Bereich der Hauptschiffahrtrouten dennoch ein großes Minderungspotential, gerade im Hinblick der stark verringerten Empfehlungen von Schadstoffkonzentrationen der Weltgesundheitsorganisation (WHO).

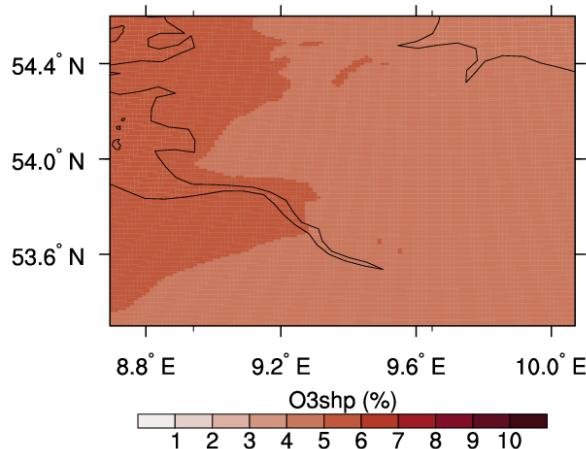


Abbildung 12: Relativer Beitrag von Schiffsemissionen zu bodennahem Ozon (in Prozent). Mittelwert für 11. 2 - 17.2.

Für bodennahes Ozon zeigt sich für die untersuchte Periode im Winter ein relativer Beitrag der Schiffsemissionen im Bereich von 5-6 % (siehe Abbildung 12). Dies liegt im erwarteten Bereich früherer Studien (Eyring et al. 2007, Hoor et al., 2009, Mertens et al., 2018). Im Vergleich zu Stickoxiden hat Ozon eine deutlich längere Lebenszeit von bis zu 30 Tagen, so dass Ferntransport von Ozon relevant ist. Zusätzlich findet im Winter über Europa nur wenige photochemische Produktion von Ozon statt (siehe auch Mertens et al., 2018).

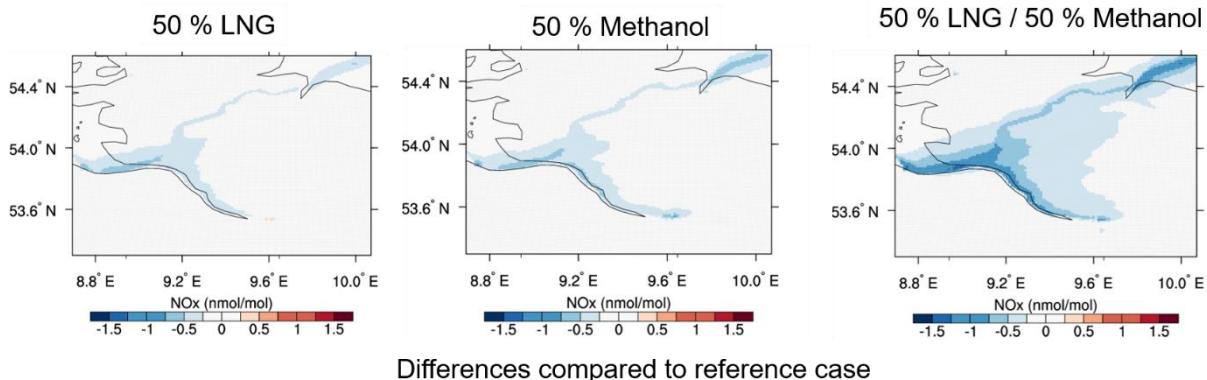


Abbildung 13: Reduktion (Szenario minus Referenz) der bodennahen NOx- Mischungsverhältnisse (in nmol/mol) für die drei Szenarios mit verändertem Treibstoff.

Der Einsatz alternative Kraftstoffe führt zu einer Reduktion von bodennahen Stickoxiden (Abbildung 13). Die Umstellung der Flotte auf 50 % LNG oder 50% Methanol führt zu einer Reduktion der bodennahen Mischungsverhältnisse im Bereich von 0,5 – 1 nmol/mol. Die Umstellung der gesamten Flotte auf Methanol und LNG hat eine Reduktion der bodennahen Stickoxid Mischungsverhältnisse von bis zu 1,5 nmol/mol zur Folge.

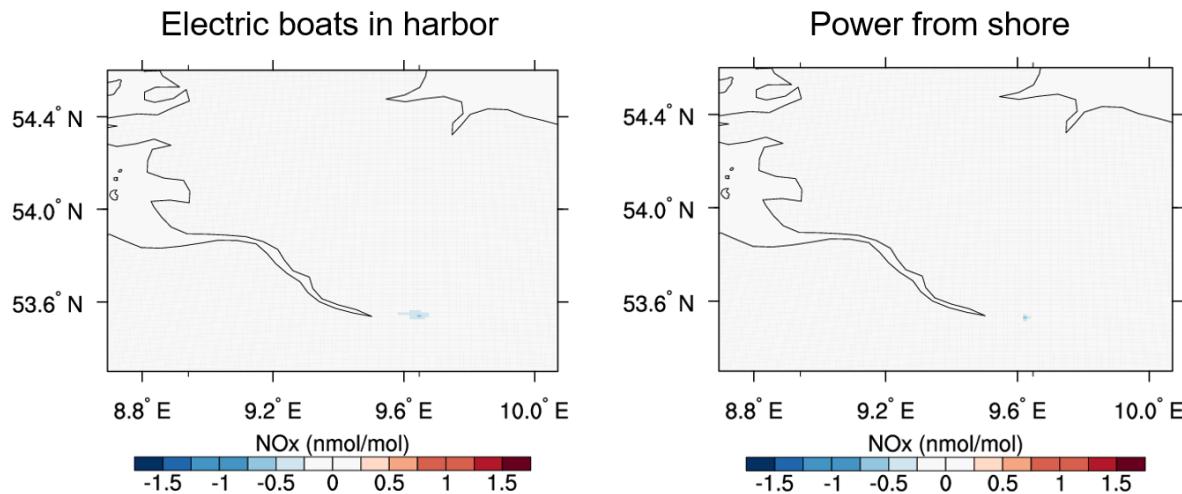


Abbildung 14: Reduktion (Szenario minus Referenz) der bodennahen NOx- Mischungsverhältnisse (in nmol/mol) für die Szenarien mit elektrischen Booten im Hafen (links) und Landstrom (rechts).

Die sehr lokalen Minderungsoptionen wie Landstrom sowie die Verwendung elektrischer Boote im Hafen führt zu leichten Reduktionen der bodennahen Stickoxid Mischungsverhältnisse von bis zu 0.5 nmol/mol (Abbildung 14). Verglichen mit der Verwendung alternativer Kraftstoffe sind diese lokalen Maßnahmen jedoch auch einfacher umzusetzen.

Die Änderungen der Ozonmischungsverhältnisse durch die Minderungsmaßnahmen sind sehr komplex und werden hier nicht im Detail gezeigt. Ursächlich für die komplexen Änderungen ist die starke Nicht Linearität der Ozonchemie. Diese Nicht-Linearität führt in den Szenarien in den meisten Fällen zu einer leichten Zunahme von Ozon im Bereich von bis zu 5 % entlang der Hauptschiffsrouten. Ursächlich für diese Zunahme ist die verringerte Titration von Ozon durch die niedrigeren NOx Emissionen. Da insbesondere im Winter in Europa nur wenige Ozon photochemisch produziert, sind Ozon Grenzwerte im Winter kein Problem. In Folgeprojekten müsste jedoch im Detail untersucht werden, wie sich die Minderungsoptionen auf Ozon im Sommer auswirken.

Festhalten lässt sich, dass alternative Kraftstoffe wie LNG und Methanol Potential zur Reduktion der negativen Auswirkungen der Schiffsemissionen auf die Luftqualität zur Folge haben. Lokale Maßnahmen, wie Landstrom oder elektrische Boote im Hafen, führen zu lokalen Reduktionen der Luftverschmutzung. Solche Reduktionen können lokal wichtige Beiträge zur Minderung von Luftverschmutzung sein. Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass die untersuchten Szenarien nur als Fallstudien für kleine Zeiträume untersucht wurden. Für eine umfassende Bewertung wäre die Durchführung and Analyse längerer Simulationszeiträume notwendig welche auch verschiedene Wetterphänomene abdeckt. Eine solche Bewertung geht weit über das hinaus, was im Rahmen dieses Projekts zu leisten ist.

### 2.6.3 Demonstrator

Das Konsortium entwickelte auf Big Data und maschinellem Lernen basierende Modelle und einen Demonstrator zur Messung, Verfolgung und Validierung emissionsbezogener Aspekte des Seeverkehrs, um die Emissionen (Abgase, kein Ballastwasser oder Abfall) von Schiffen zu reduzieren und die lokale Luftqualität zu verbessern.

Im entwickelten Demonstrator werden die drei zuvor beschriebenen Szenarien dargestellt und in einen Gesamtzusammenhang gebracht.

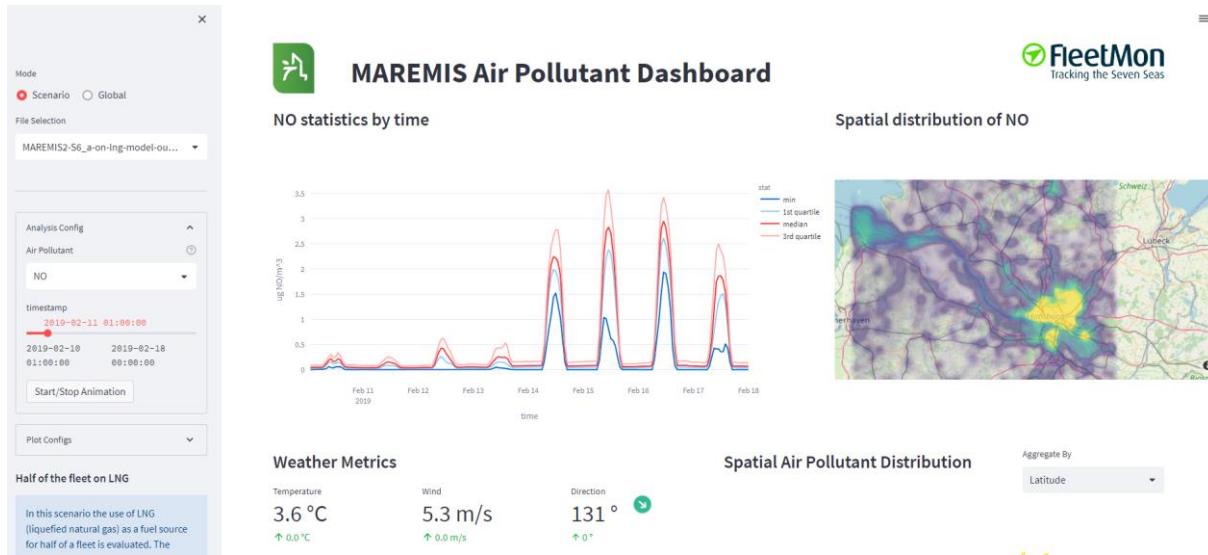


Abbildung 15: Ansicht des Demonstrators in der Dashboard-Ansicht

Durch den Demonstrator können die Überwachung und die Analyse der genauen Emissionen des einzelnen Schiffes unter verschiedenen Navigationsbedingungen getrackt werden und der Zusammenhang zwischen den Emissionen quantifiziert werden.

## 2.7 Fortgeschriebener Verwertungsplan

Bei DLR-PA sind die Ergebnisse und insbesondere das im Rahmen des Projekts [MECO\(n\)](#) entstandene Modellset-Up für Norddeutschland wichtige Voraussetzungen für das DLR interne Projekt ELK sowie für das BMBF finanzierte Projekt IMPAC<sup>2</sup>T (Fördernummer 01LN2207A/B).

## 2.8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen nach Nr. 5 der NKBF

Die Ergebnisse des Projekts wurden auf zwei wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt:

M. MERTENS ET AL., Impacts of shipping emissions on air quality in Hamburg and Singapore and possible mitigation options, Poster, ICARUS Konferenz beim DWD in Offenbach März 2023

M. MERTENS ET AL., Can mitigations options in the shipping sector help improve air quality in Northern Germany?, Poster, EMAC Symposium, Forschungszentrum Jülich, Mai 2023



## Quellenverzeichnis

- DECKERT, R., Jöckel, P., Grewe, V., Gottschaldt, K.-D., & Hoor, P.: A quasi chemistry-transport model mode for EMAC, *Geoscientific Model Development*, 4, 195–206, doi: 10.5194/gmd-4-195-2011, URL <http://www.geosci-model-dev.net/4/195/2011/> (2011)
- EYRING, V., Stevenson, D. S., Lauer, A., Dentener, F. J., Butler, T., Collins, W. J., Ellingsen, K., Gauss, M., Hauglustaine, D. A., Isaksen, I. S. A., Lawrence, M. G., Richter, A., Rodriguez, J. M., Sanderson, M., Strahan, S. E., Sudo, K., Szopa, S., van Noije, T. P. C., and Wild, O.: Multi-model simulations of the impact of international shipping on Atmospheric Chemistry and Climate in 2000 and 2030, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 757–780, <https://doi.org/10.5194/acp-7-757-2007>, 2007.
- GREWE, V., Tsati, E., Mertens, M., Frömming, C., & Jöckel, P.: Contribution of emissions to concentrations: the TAGGING 1.0 submodel based on the Modular Earth Submodel System (MESSy 2.52), *Geoscientific Model Development*, 10, 2615–2633, doi: 10.5194/gmd-10-2615-2017, URL <https://www.geosci-model-dev.net/10/2615/2017/> (2017c)
- HOOR, P., Borken-Kleefeld, J., Caro, D., Dessens, O., Endresen, O., Gauss, M., Grewe, V., Hauglustaine, D., Isaksen, I. S. A., Jöckel, P., Lelieveld, J., Myhre, G., Meijer, E., Olivie, D., Prather, M., Schnadt Poheraj, C., Shine, K. P., Staehelin, J., Tang, Q., van Aardenne, J., van Velthoven, P., and Sausen, R.: The impact of traffic emissions on atmospheric ozone and OH: results from QUANTIFY, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3113–3136, <https://doi.org/10.5194/acp-9-3113-2009>, 2009.
- JÖCKEL, P., Tost, H., Pozzer, A., Kunze, M., Kirner, O., Brenninkmeijer, C. A. M., Brinkop, S., Cai, D. S., Dyroff, C., Eckstein, J., Frank, F., Garny, H., Gottschaldt, K.-D., Graf, P., Grewe, V., Kerkweg, A., Kern, B., Matthes, S., Mertens, M., Meul, S., Neumaier, M., Nützel, M., Oberländer-Hayn, S., Ruhnke, R., Runde, T., Sander, R., Scharffe, D., & Zahn, A.: Earth System Chemistry integrated Modelling (ESCiMo) with the Modular Earth Submodel System (MESSy) version 2.51, *Geoscientific Model Development*, 9, 1153–1200, doi: 10.5194/gmd-9-1153-2016, URL <http://www.geosci-model-dev.net/9/1153/2016/> (2016)
- KILIAN, Markus, Sources of tropospheric ozone over Europe and East Asia, Dissertation LMU München, Volltext noch nicht online verfügbar, Oktober 2023
- KUMAR, V., Remmers, J., Beirle, S., Fallmann, J., Kerkweg, A., Lelieveld, J., Mertens, M., Pozzer, A., Steil, B., Barra, M., Tost, H., & Wagner, T.: Evaluation of the coupled high-resolution atmospheric chemistry model system MECO(n) using in situ and MAX-DOAS NO<sub>2</sub> measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 5241–5269, doi: 10.5194/amt-14-5241-2021, URL <https://amt.copernicus.org/articles/14/5241/2021/> (2021)
- MERTENS, M., Grewe, V., Rieger, V. S., and Jöckel, P.: Revisiting the contribution of land transport and shipping emissions to tropospheric ozone, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 5567–5588, <https://doi.org/10.5194/acp-18-5567-2018>, 2018.