

Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München
Department für Geographie
Lehrstuhl für Geographie und Geographische Fernerkundung

Diplomarbeit
im Studiengang Geographie

**Aufbau eines globalen
Bottom-up-Schiffsemissionskatasters
unter Berücksichtigung
zukünftiger polarer Schiffsrouten**

vorgelegt von
Andreas Paxian

Betreuer: Prof. Dr. Wolfram Mauser

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen
Institut für Physik der Atmosphäre

März 2008

Kurzfassung

Zur exakten Erfassung von Schiffsemissionen entwickelt die vorliegende Studie ein globales Bottom-up-Emissionskataster der internationalen Schifffahrt, das einen besseren räumlichen Bezug als globale Top-down-Berechnungen und im Gegensatz zu existierenden regionalen Bottom-up-Ansätzen erstmals eine globale Abdeckung aufweist. Als Eingangsdatensatz dienen individuelle Schiffsbewegungen und -eigenschaften einer Lloyds-Schiffsstatistik von 2006. Der in dieser Studie erarbeitete verbesserte Dijkstra-Algorithmus findet für jede Kombination aus Start- und Zielhäfen einer Schiffsbewegung die kürzeste Route im $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter unter Berücksichtigung von Land, Meereis und Schifffahrtskanälen und mit Großkreis-Annäherung über offenem Ozean. Zurückweichendes Meereis ermöglicht in zwei Zukunftsszenarien des Jahres 2050 im Gegensatz zu einem gegenwärtigen Basisszenario von 2006 die Öffnung polarer Schiffsrouten. Zur Entwicklung des globalen Bottom-up-Emissionskatasters wird auf allen Gitterboxen jeder Schiffsroute aus der berechneten Distanz und gemittelten Motorangaben der Treibstoffverbrauch und die Emissionen von NO_x , CO_2 , SO_x , CO , Hydrocarbonen und Partikeln ermittelt. Die resultierende gegenwärtige Schiffsverteilung stimmt mit Beobachtungsdaten gut überein und der gegenwärtige globale Treibstoffverbrauch von 268 Mt für das Jahr 2006 liegt im Bereich bisheriger globaler Top-down-Berechnungen und regionaler Bottom-up-Ansätze. Die zukünftige Schiffsverteilung zeigt aufgrund der gegenwärtigen Schifffahrts-Logistik in der vorliegenden Lloyds-Schiffsstatik eine geringere Schiffsaktivität auf den Nordpolarrouten als bisherige Abschätzungen. Dennoch zeigt die regionale Schiffsaktivität bzw. der Treibstoffverbrauch auf der Nordost-Passage bis 2050 einen Anstieg um die Faktoren 450-600 bzw. 900-1.500 in den beiden Zukunftsszenarien. Die Nordwest-Passage weist sogar noch höhere Wachstumsfaktoren von 1.600-2.100 bzw. 1.300-2.300 auf. Der errechnete globale Treibstoffverbrauch von 352-626 Mt für das Jahr 2050 ist konsistent mit bisherigen Studien. Dabei zeigt sich auch, dass adäquate Reduktionsmaßnahmen einen zukünftigen Anstieg der Emissionen im Zuge des prognostizierten Weltwirtschaftswachstums verhindern können.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Motivation	1
2. Grundlagen und Stand des Wissens	4
2.1 Emissionskataster der internationalen Schifffahrt	4
2.1.1 Grundlegende Ansätze der Emissionsberechnung	4
2.1.2 Globale Schiffsverkehrsdichten	7
2.1.3 Gegenwärtige Emissionskataster	9
2.1.4 Zukünftige Emissionskataster	13
2.2 Meereis und Schiffsrouten im Nordpolarraum	15
2.2.1 Gegenwärtige und zukünftige arktische Meereis-Ausdehnung	16
2.2.2 Bisherige Emissionskataster mit Nordpolarrouten	18
3. Methodik	21
3.1 Lloyds-Schiffsstatistik als Eingangsdatensatz	21
3.2 Verschiedene Methodiken zur Routenfindung	23
3.2.1 Großkreis-Methodik	24
3.2.2 Routennetz-Methodik	27
3.2.3 Wellenausbreitungs-Methodik	30
3.3 Methodik zum Aufbau globaler Schiffsverkehrsdichten	37
3.3.1 Das $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter der Routenfindung	38
3.3.2 Verarbeitung der Lloyds-Schiffsstatistik	43
3.3.3 Erstellung globaler Schiffsverkehrsdichten	51
3.4 Methodik zur Berechnung globaler Emissionskataster	53
3.4.1 Berechnung des globalen Treibstoffverbrauches	53
3.4.2 Ermittlung globaler Emissionskataster	56

4. Ergebnisse	58
4.1 Ergebnisse des gegenwärtigen Szenarios	58
4.1.1 Gegenwärtige Schiffsverkehrsdichte	58
4.1.2 Gegenwärtige Emissionskataster	63
4.2 Ergebnisse des zukünftigen Szenarios	68
4.2.1 Zukünftige Schiffsverkehrsdichte	68
4.2.2 Zukünftige Emissionskataster	73
5. Zusammenfassung und Ausblick	77
Literaturverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Danksagung	VIII
Eidesstattliche Erklärung	IX

1. Einleitung und Motivation

Die aktuelle Diskussion über den anthropogenen Treibhauseffekt bedarf gesicherter Aussagen über den weltweiten Ausstoß von Treibhausgasen. Im Transportbereich wurden bisher vor allem Emissionen aus Straßen- und Luftverkehr betrachtet, wohingegen Emissionen der internationalen Schifffahrt erst in jüngster Zeit an Aufmerksamkeit gewannen. Nach neuesten Studien (EYRING et al. 2005a) werden 16% des Treibstoffverbrauchs und 15% der Kohlendioxid (CO_2)-Emissionen der drei Transportsektoren durch die internationale Schifffahrt verursacht. Die Emissionsanteile für Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2) und Partikel fallen bedeutend höher aus. Denn einerseits arbeiten Schiffsmotoren bei hoher Temperatur und hohem Druck und bisher ohne effektive NO_x -Reduktionstechniken, andererseits weist das verwendete Schweröl im Mittel einen hohen Schwefelgehalt auf (EYRING et al. 2005b). Schiffsemissionen stellen daher einen Anteil von 2-2,7%, 15% bzw. 4-9% aller globalen anthropogenen CO_2 -, NO_x - und SO_2 -Emissionen (CORBETT und KÖHLER 2003, ENDRESEN et al. 2003, 2007, EYRING et al. 2005a). Aufgrund der wachsenden Erkenntnis wurden in den letzten Jahren nationale und internationale Regelungen für Schiffsemissionen verschärft. Beispielsweise führte die IMO (International Maritime Organisation) NO_x -Emissionsbeschränkungen und SECA-Zonen (Sulphur Emission Control Areas) zur Schwefelreduktion ein (IMO 1998).

Die Betrachtung von Schiffsemissionen ist bedeutend, weil diese lokale und regionale Auswirkungen auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und die Luftqualität haben und auf globaler Skala das Klima beeinflussen. Dabei finden verschiedene chemische Umwandlungsprozesse statt. Ozonvorläufer-Substanzen wie NO_x führen unter Sonnenlicht zur Bildung von troposphärischem Ozon (O_3) und zu einer Erhöhung des troposphärischen Oxidationsmittels Hydroxid (OH), welches die Lebensdauer von Methan (CH_4) verringert. Die Oxidation von gasförmigem bzw. in Wolkentröpfchen gelöstem SO_2 durch OH bzw. O_3 erzeugt das dominante Schiffsaerosol Sulfat (EYRING 2007b). Eine erhöhte Aerosol-Konzentration führt zu verstärkter Streuung und Absorption einkommender Sonnenstrahlung (direkter Aerosol-Effekt). Weiterhin wirken Aerosole als zusätzliche Wolken-Kondensationskerne und ziehen somit eine erhöhte Wolkentröpfchen-Konzentration und eine verstärkte Wolkenreflektivität nach sich (indirekter Aerosol-Effekt) (LAUER et al. 2007). Auf Satellitenbildern können in Regionen hohen Schiffsverkehrs lang gestreckte, tief liegende Wolken, sogenannte „ship tracks“, als Folge von Schiffsemissionen beobachtet werden (SCHREIER et al. 2006). Insgesamt erwartet man durch die NO_x - und CO_2 -Emissionen der internationalen Schifffahrt und die resultierende Bildung von troposphärischem O_3 einen positiven Strahlungsantrieb, durch die Verringerung der Lebensdauer

von CH₄ und insbesondere durch die Emission von SO₂ und anderen Aerosolvorläufer-Substanzen einen negativen. Dabei überwiegt der negative Beitrag, so dass der heutige Schiffsverkehr in Summe einen negativen Strahlungsantrieb hervorruft, was einer Kühlung der Atmosphäre entspricht (LAUER et al. 2007). Da 70% der Schiffsemissionen in nur 400 km Entfernung von Land ausgestoßen (CORBETT et al. 1999) und über mehrere 100 km transportiert werden, führt das Einbringen von hohen SO₂-Emissionen in die Atmosphäre allerdings auch zu einer regionalen Verminderung der Luftqualität insbesondere in Küstennähe und großen Hafenstädten und kann zu Herz-Lungen-Krankheiten und Entstehung von Lungenkrebs beitragen (CORBETT et al. 2007). Nitrat- und Sulfat-Ablagerungen können als saurer Regen eine Eutrophierung oder Versauerung von Ökosystemen nach sich ziehen (DALSSØREN et al. 2007). Atmosphären-Modelle quantifizieren diese Auswirkungen ausgehend von globalen Emissionskatastern, welche die Freisetzung von Schiffsemissionen im räumlichen Kontext beschreiben, beispielsweise pro Gitterbox eines Modellgitters. EYRING et al. (2007a) stellen dabei fest, dass die Unsicherheiten verschiedener Emissionskataster signifikant größer sind als diejenigen unterschiedlicher Atmosphären-Modelle, was die Notwendigkeit genauerer Emissionskataster für die Berechnung der Auswirkungen von Schiffsemissionen unterstreicht.

Im Zuge der globalen Erwärmung ergeben sich jedoch Veränderungen in der globalen Schiffsaktivität. Der IPCC-Report von 2007 zeigt Beobachtungen einer zunehmenden Reduktion des arktischen Meereises (IPCC 2007, Kapitel 4) und Zukunfts-Prognosen, die weitere Rückgänge vorhersagen. Ein im Sommer eisfreier, arktischer Ozean wird für Mitte bis Ende des 21. Jahrhunderts prognostiziert (IPCC 2007, Kapitel 10, 11), wohingegen andere Projektionen einen noch schnelleren Rückgang vorhersagen (AMOS 2007, HOLLAND et al. 2006, STROEVE et al. 2007). Diese Entwicklungen öffnen den arktischen Ozean für zukünftige Schiffsaktivität. Denn für Schiffsrouten von Europa nach Ostasien bietet die Nordost-Passage nördlich von Russland eine Weegeinsparung von circa 7.000 km (GRANIER et al. 2006) und die Nordwest-Passage nördlich von Kanada sogar von circa 9.000 km (STEINBERGER 2007). Weiterhin planen nordische Industrienationen die Ausschöpfung arktischer Ressourcen wie Erdöl, Erdgas und Fischvorkommen (STEINBERGER 2007). Da die Arktis eine sehr sensitive Komponente des Klimasystems darstellt, sind die Auswirkungen solcher Entwicklungen nur sehr schwer abzuschätzen. Daher ist eine genaue Kenntnis der Intensität und Verortung zukünftiger Schiffsemissionen im Nordpolarraum von Bedeutung.

Bisherige globale Top-down-Ansätze der Emissionsberechnung ermitteln Schiffsemissionen aus Schiffsstatistiken der gesamten Weltflotte ohne geographischen Bezug einzelner Schiffsbewegungen (siehe Kapitel 2.1.1). Aufgrund zahlreicher Unsicherheiten zeigen deren Ergebnisse große Unterschiede (CORBETT und KÖHLER 2003, ENDRESEN et al. 2003, EYRING et al. 2005a). Bottom-up-Ansätze der Emissionsberechnung berechnen Schiffsemissionen dagegen direkt auf einzelnen Schiffsrouten unter Berücksichtigung des räumlichen Bezuges und zeigen daher eine höhere Genauigkeit (siehe Kapitel 2.1.1). Allerdings wurden diese Ansätze bisher nur auf regionaler Ebene angewandt (EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED

2005, WANG et al. 2007a). Zur Ermittlung der weltweiten Auswirkungen von Schiffsemissionen wird aber sowohl die geographische Verteilung als auch die Menge der global durch internationalen Schiffsverkehr freigesetzten Emissionen benötigt. Die räumliche Verteilung ist besonders bei der Betrachtung zukünftiger Nordpolarrouten von Bedeutung, weil zur Routenwahl ein Distanzvergleich zwischen heutigen Hauptschiffsrouten und den neu entstehenden Nordpolarrouten erfolgen muss. Diese beiden Voraussetzungen können durch den Aufbau eines globalen Bottom-up-Emissionskatasters erreicht werden.

Um politische und industrielle Entscheidungsträger von der Bedeutung internationaler Schiffsemissionen und der Notwendigkeit von Emissions-Reduktionen zu überzeugen, müssen exakte Abschätzungen der gegenwärtigen und zukünftigen Auswirkungen von Schiffsemissionen vorliegen. Als Eingangsdatensätze für Atmosphären-Modelle werden dabei globale, räumlich aufgelöste Schiffsemissionskataster benötigt. Ziel dieser Diplomarbeit ist es, das erste gegenwärtige globale Bottom-up-Emissionskataster der internationalen Schifffahrt zu entwickeln, dieses mit Beobachtungsdaten zu validieren und mit bisherigen globalen Top-down-Ansätzen und regionalen Bottom-up-Ansätzen zu vergleichen. Die entwickelte Methodik wird weiterhin zur Erstellung von globalen Bottom-up-Emissionskatastern zweier unterschiedlicher Zukunftsszenarien angewendet, die neben zukünftigen Wachstumsprognosen auch mögliche Nordpolarrouten aufgrund einer abnehmenden arktischen Meereis-Ausbreitung berücksichtigen.

Im Folgenden führt Kapitel 2 in die Grundlagen der Erstellung von Schiffsemissionskatastern ein und betrachtet Meereis-Entwicklungen und bisherige Abschätzungen zu Schiffsrouten im Nordpolarraum. Kapitel 3 stellt den Eingangsdatensatz und die Methodik dieser Studie zur Erstellung von globalen Bottom-up-Emissionskatastern mit Berücksichtigung von Nordpolarrouten vor. Kapitel 4 präsentiert die Ergebnisse der gegenwärtigen und zukünftigen Szenarien und vergleicht diese mit Beobachtungsdaten und bisherigen Arbeiten. Die Diplomarbeit wird abgeschlossen durch eine Zusammenfassung und einen weiterführenden Ausblick in Kapitel 5.

2. Grundlagen und Stand des Wissens

Das Ziel dieser Studie ist, ein gegenwärtiges globales Bottom-up-Emissionskataster der internationalen Schifffahrt aufzubauen und die dazu entwickelte Methodik zum Aufbau von zwei entsprechenden Emissionskatastern unterschiedlicher Zukunftsszenarien anzuwenden, die mögliche Nordpolarrouten und zukünftige Wachstumsraten berücksichtigen. Dieses Kapitel gibt eine grundlegende, theoretische Einführung in die Thematik der Erstellung von Schiffsemissionskatastern. Kapitel 2.1 beschreibt die beiden grundsätzlichen Ansätze der Emissionsberechnung und stellt bisherige gegenwärtige und zukünftige Schiffsemissionskataster und deren Ergebnisse vergleichend vor. Kapitel 2.2 geht auf den Nordpolarraum und dessen aktuelle und zukünftige Meereis-Ausbreitung ein und präsentiert bisherige Studien der Ermittlung von Emissionen und Umweltwirkungen arktischer Schiffsrouten.

2.1 Emissionskataster der internationalen Schifffahrt

Dieses Kapitel stellt bisherige Methodiken und Ergebnisse der Entwicklung von Schiffsemissionskatastern vor und führt in den Bottom-up-Ansatz der Emissionsberechnung ein, der in dieser Diplomarbeit erstmals auf globaler Skala angewendet wird. Die beiden grundlegenden Ansätze der Emissionsberechnung werden in Kapitel 2.1.1 verglichen. Kapitel 2.1.2 beschreibt die in diese Berechnungen eingehenden, globalen Schiffsverkehrsdichten. Kapitel 2.1.3 fasst existierende, gegenwärtige Schiffsemissionskataster vergleichend zusammen, während Kapitel 2.1.4 auf die Erstellung zukünftiger Schiffsemissionskataster eingeht.

2.1.1 Grundlegende Ansätze der Emissionsberechnung

Zur Erstellung räumlich aufgelöster Schiffsemissionskataster werden zwei grundsätzlich unterschiedliche Methodiken (Top-down und Bottom-up) verwendet. Diese werden im Folgenden dargestellt und miteinander verglichen.

Top-down-Ansatz

Im Top-down-Ansatz werden die Gesamtemissionen der globalen Schiffsflotte zuerst ohne geographischen Bezug aus dem gesamten Treibstoffverbrauch und Emissionsfaktoren berechnet und anschließend anhand Proxies der räumlichen Schiffsverteilung global verteilt (siehe Kapitel 2.1.3) (CORBETT und KÖHLER 2003, ENDRESEN et al. 2003, EYRING et al. 2007a). Generell ist

er weniger aufwändig als der im Anschluss beschriebene Bottom-up-Ansatz der Emissionsberechnung (WANG et al. 2007a, SI).

Im Top-down-Ansatz dienen zur Ermittlung des gesamten Treibstoffverbrauches im ersten Schritt zwei verschiedene Verfahren. Einerseits können internationale oder nationale Treibstoffverkaufs-Statistiken zur Abschätzung des länderspezifischen, tatsächlichen Verbrauches herangezogen werden (ENDRESEN et al. 2003). Dabei bereiten jedoch unterschiedliche Berechnungs- und Einteilungsverfahren große Probleme (CORBETT und KÖHLER 2003, EYRING et al. 2007a). Andererseits kann der gesamte Treibstoffverbrauch auch „aktivitätsbasiert“ direkt aus der tatsächlichen Schiffsbewegung geschätzt werden, wobei Angaben zu installierter Motorenenergie P_i [MW], Motorauslastung F_i [%], Motorlaufzeit τ_i [h] und spezifischer Treibstoff-Öl-Verbrauchsrate $SFOC_i$ [kg/kWh] aus globalen Schiffsstatistiken und Industriemessungen einbezogen werden. Diese nach Schiffs- bzw. Motortypen i gemittelten Eingangswerte ergeben den jeweiligen Treibstoffverbrauch FC_i dieser Klassen und deren Summe den gesamten Treibstoffverbrauch FC [t] nach Gleichung (2.1) (CORBETT und KÖHLER 2003, EYRING et al. 2005a). Unsicherheiten bestehen dabei aufgrund der lediglich nach unterschiedlichen Schiffstypen gemittelten Eingangsparameter:

$$FC = \sum_i FC_i = \sum_i P_i \cdot F_i \cdot \tau_i \cdot SFOC_i \quad (2.1)$$

Zur Ermittlung der Gesamtemissionen E_x [kg] einer bestimmten Spezies x werden im zweiten Schritt nach Gleichung (2.2) die Emissionen $E_{x,i}$ der einzelnen Schiffs- bzw. Motortypen i aus den ermittelten Treibstoffverbrauchs-Werten FC_i [t] und spezifischen Emissionsfaktoren $EI_{x,i}$ [kg/t Treibstoff] berechnet und anschließend aufsummiert. Letztere sind aus industriellen Motor-testmessungen oder flugzeuggestützten Feldmessungen in Rauchfahnen von Schiffen bekannt (CORBETT und KÖHLER 2003, ENDRESEN et al. 2003, EYRING et al. 2007a):

$$E_x = \sum_i E_{x,i} = \sum_i FC_i \cdot EI_{x,i} \quad (2.2)$$

Um ein räumlich aufgelöstes, globales Emissionskataster zu erhalten, werden die ermittelten Gesamtemissionen im dritten Schritt anhand einer globalen Schiffsverkehrsdichte, einem Proxy der räumlichen Verteilung der Schiffsaktivität (siehe Kapitel 2.1.2), geographisch verteilt. Es wird davon ausgegangen wird, dass Gebiete mit starker Schiffsaktivität auch hohe Emissionen aufweisen. Daher wird der Emissionswert $E_{x,j}$ [kg] einer bestimmten Spezies x einer Gitterbox j aus den Gesamtemissionen E_x [kg] dieser Spezies, der Schiffsverkehrsdichte S_j dieser Gitterbox und der gesamten Schiffsverkehrsdichte S aller Gitterboxen des Modellgitters nach Gleichung (2.3) ermittelt. Die Genauigkeit und Repräsentativität der Schiffsverkehrsdichte bestimmen dabei die Qualität des resultierenden Emissionskatasters (WANG et al. 2007b):

$$E_{x,j} = E_x \cdot \frac{S_j}{S} \quad (2.3)$$

Bottom-up-Ansatz

Im Bottom-up-Ansatz werden die Emissionen ebenfalls aus Treibstoffverbrauch und spezifischen Emissionsfaktoren berechnet, allerdings nicht zuerst auf globaler Skala, sondern direkt im entsprechenden geographischen Bezug von räumlich aufgelösten Schiffsrouten (WANG et al. 2007b). Bisher wurde dieser präzise Ansatz aufgrund des erhöhten Aufwands zur Ermittlung exakter Schiffsrouten jedoch lediglich auf regionaler Ebene vollzogen. Beispiele stellen der ENTEC-Report für Europa (EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED 2005) und das STEEM-Modell für Nordamerika (WANG et al. 2007a) dar, wobei Letzteres eine globale Abdeckung anstrebt (siehe Kapitel 2.1.3).

Als Eingangsdaten für die Berechnung des Treibstoffverbrauches werden neben den Motorangaben des Top-down-Ansatzes auch detaillierte Informationen zu Schiffsbewegungen in Form von angelaufenen Häfen pro Schiff und Schiffsgeschwindigkeiten aus weltweiten Schiffsstatistiken herangezogen. Meist muss der zugehörige exakte Routenverlauf allerdings abgeschätzt werden. Der Treibstoffverbrauch FC_j [t] eines bestimmten Gebietes oder einer Gitterbox j des Modellgitters wird pro Schiff oder Schiffstyp i nach Gleichung (2.4) bestimmt und addiert. Dabei wird die benötigte Motorlaufzeit $\tau_{i,j}$ [h] aus der mittleren Geschwindigkeit v_i [km/h] und der im Gebiet oder in der Gitterbox j zurückgelegten Distanz $D_{i,j}$ [km] ermittelt (EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED 2005):

$$FC_j = \sum_i FC_{i,j} = \sum_i P_i \cdot F_i \cdot \left(\frac{D_{i,j}}{v_i} \right) \cdot SFOC_i \quad (2.4)$$

Die zugehörigen Emissionen E_j eines Gebiets oder einer Gitterbox j des Modellgitters ergeben sich wie zuvor nach Gleichung (2.2) aus dem ermittelten Treibstoffverbrauch und den spezifischen Emissionsfaktoren, so dass ein globales, räumlich verteiltes Emissionskataster resultiert. Wie beim Top-down-Ansatz hängt auch hier die Genauigkeit der Emissionsberechnung stark von der Qualität der räumlich aufgelösten Schiffsverteilung ab (WANG et al. 2007b). Die Extrapolation von für einzelne Monate vorliegenden Schiffsbewegungen auf ganze Jahre und die Schätzung unbekannter Routenverbindungen zwischen zwei Häfen, beispielsweise als einfache Geraden, stellen dabei entscheidende Fehlerquellen dar (WANG et al. 2007a, SI).

Zur Ermittlung der Emissionen möglicher Nordpolarrouten ist eine Abschätzung der zukünftigen, globalen Schiffsverteilung unter Berücksichtigung dieser polaren Schiffsrouten grundlegend. Wie sich im folgenden Kapitel 2.1.2 zeigen wird, kann eine solche jedoch lediglich aus räumlich aufgelösten Schiffsbewegungen und nicht aus beobachteten Schiffsverkehrsdichten abgeleitet werden. Daher kann eine Berücksichtigung der Nordpolarrouten lediglich bei Anwendung des Bottom-up-Ansatzes zur Emissionsberechnung erfolgen.

2.1.2 Globale Schiffsverkehrsdichten

Schiffsverkehrsdichten beschreiben die räumliche Verteilung der globalen Schiffsaktivität als Häufigkeit pro Gitterbox des Modellgitters und können aus den Beobachtungen globaler Schiffsreportsysteme abgeschätzt werden. Die Schiffsreporte hängen neben der Schiffsanzahl auch von den Reportintervallen eines Schiffes und dessen Fahrtzeit auf hoher See ab. Im Idealfall ist die berichtende Schiffsflotte repräsentativ für die gesamte Weltflotte in der Verteilung von Schiffstypen und -größen und ihre globale Schiffsverkehrsdichte kann als räumlicher Proxy zur geographischen Verteilung der Gesamtemissionen in Top-down-Ansätzen dienen. Dazu wird die berichtete Schiffsverkehrsdichte normiert und die Ergebniswerte als SEAF-Werte (Ship Emission Allocation Factor) [Millionstel der globalen Gesamtsumme] bezeichnet, die dem Faktor S_j/S zur Emissionsverteilung in Gleichung (2.3) entsprechen (WANG et al. 2007b). Dieses Kapitel stellt nun die beiden Schiffsreportsysteme von ICOADS und AMVER vergleichend vor und bewertet anschließend, ob gegenwärtige Schiffsverkehrsdichten eine Abschätzung der zukünftigen, globalen Schiffsaktivität unter Berücksichtigung von Nordpolarrouten ermöglichen.

ICOADS-Schiffsverkehrsdichte

Die ICOADS-Schiffsreporte (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) des NCAR (National Centre of Atmospheric Research) und NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) stellen den weltgrößten Datensatz für globale Meeresoberflächen-Beobachtungen durch freiwillige Beobachtungsschiffe und stationäre oder driftende Bojen dar. Im Jahr 2003 berichteten täglich 4.000 Schiffe, also 4,4% der Weltflotte, zu den synoptischen Stunden über meteorologische Beobachtungen, Position und Geschwindigkeit, wobei viele Schiffe deutlich von den Vorgaben dieser Reportintervalle abwichen. Die Daten bieten lange Zeitreihen und sind öffentlich zugänglich. Da weiterhin auch Angaben zu Schiffsidentitäten bestehen, können Informationen zu Schiffstyp, -größe und -motorkraft aus Schiffsstatistiken integriert werden. Obwohl der Datensatz viele verschiedene Schiffsgrößen und -typen abdeckt, beinhaltet er im Vergleich zur Zusammensetzung der Weltflotte aus Lloyds-Schiffsstatistiken zu viele Containerschiffe und zu wenig Stückgut-Frachter, Tanker und küstennahen Schiffsverkehr. Denn Letztere sind weniger auf ICOADS-Wetterangaben angewiesen, da entweder keine strikten Linienszeitpläne eingehalten werden müssen oder Vorhersagen von Küsten-Wetterstationen genügen (WANG et al. 2007b).

WANG et al. (2007b) wenden verschiedene Verfahren an, um solche statistischen Fehler zu verringern. Der Ausschluss von Schiffen mit deutlich überhöhter Reportzahl aufgrund zu kurzer Reportintervalle und die Vergrößerung des Datensatzes durch Nutzung mehrjähriger Daten (2000-2002) führen zu einer Erhöhung der statistischen Zuverlässigkeit und Repräsentativität. Weiterhin ermöglicht eine Gewichtung der Schiffsverkehrsdichte mit der installierten Motorkraft der Schiffe eine verstärkte Emissionszuweisung zu Schiffen mit höherer Motorkraft, welche die Schiffsaktivität in Küstennähe verringert und auf Hauptschiffsrouten verstärkt. Abb. 2.1 (links) zeigt die zur geographischen Emissionsverteilung verwendeten SEAF-Werte des normierten,

verbesserten ICOADS-Datensatzes von 2000-2002 für diejenigen 2.500 Schiffe, für die Angaben zur Motorkraft aus Schiffsstatistiken vorlagen:

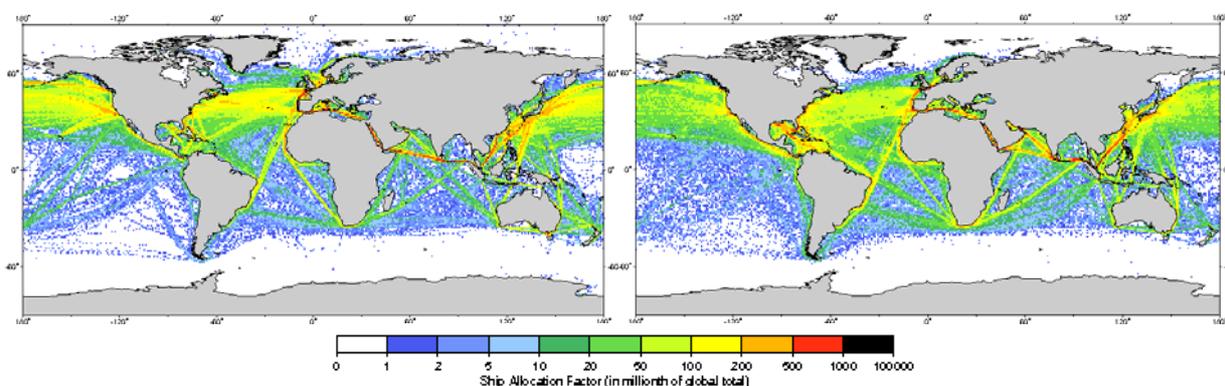


Abb. 2.1: SEAF-Werte der verbesserten ICOADS-Schiffsverkehrsdichte von 2000-2002 (links) und der nach Motorenergie gewichteten AMVER-Schiffsverkehrsdichte von 2005 (rechts) [Millionstel der globalen Gesamtsumme], Quelle: Verändert nach WANG et al. 2007b.

AMVER-Schiffsverkehrsdichte

Das globale Schiffsreportsystem AMVER (Automated Mutual-assistance Vessel Rescue System) des USCG (United States Coast Guard) wird hingegen weltweit von Such- und Rettungsdiensten verwendet. Die Teilnahme ist freiwillig und kostenlos, historisch jedoch auf Schiffe einer Größe von mindestens 1.000 Bruttoregistertonnen und einer Reisezeit von mindestens 24 Stunden beschränkt. Diese Teilnahmebedingungen wurden später auch auf Kreuzfahrt-, Forschungsschiffe und Fischer ausgeweitet. Im Jahr 2004 übermittelten 8.600 Schiffe, also 9,5% der Weltflotte, regelmäßig alle 48 Stunden oder bei Kursänderungen ihre Position (WANG et al. 2007b), wobei insgesamt etwa 33% Überlappung zu der in ICOADS registrierten Flotte besteht. Für die über 100.000 jährlich verfolgten Schiffsbewegungen werden allerdings keine individuellen Schiffsidentitäten, sondern lediglich zusammenfassende Informationen pro Schiffstyp angegeben, weil die detaillierten Reiseberichte streng vertraulich sind (ENDRESEN et al. 2003). Aufgrund der beschriebenen Teilnahmebedingungen umfasst der AMVER-Datensatz im Vergleich zur Weltflotte aus Lloyds-Schiffsstatistiken zu viele Containerschiffe, Massengut-Frachter und Tanker und zu wenige Stückgut-Frachter und küstennahen Schiffsverkehr (WANG et al. 2007b).

Da weder mehrjährige Daten noch Schiffsidentitäten vorliegen, können nur wenige Verbesserungen der AMVER-Schiffsverkehrsdichte durchgeführt werden. Zur Verbesserung der Emissionszuweisung vollziehen ENDRESEN et al. (2003) eine Gewichtung der Schiffsverkehrsdichte mit vorliegender Schiffsgröße [Bruttoregistertonnen] und WANG et al. (2007b) mit der Motorkraft, welche aus einer allgemeinen, statistischen Beziehung zur gegebenen Schiffsgröße ermittelt wird. Die aus der abschließenden Normierung resultierenden SEAF-Werte des nach Motorkraft gewichteten AMVER-Datensatzes von 2005 sind in Abb. 2.1 (rechts) abgebildet.

Vergleich und Bewertung

In der Gegenüberstellung der beiden globalen Schiffsverkehrsdichten zeigt sich, dass beide eine verstärkte Schiffsaktivität auf der Nordhemisphäre verzeichnen. Dabei weist ICOADS höhere Werte im Nordatlantik und –pazifik und AMVER im Südatlantik und Indischen Ozean mit stark befahrenen Tankerrouten im Golf von Mexiko und Persischen Golf auf. Beim Vergleich mit regionalen Bottom-up-Emissionskatastern wird weiterhin bestätigt, dass der küstennahe Schiffsverkehr aufgrund einer geringeren Reportzahl auf kürzeren Strecken in beiden Schiffsverkehrsdichten stark unterschätzt wird. Diese Tatsachen weisen darauf hin, dass auch die verbesserten Schiffsverkehrsdichten nicht ihrer statistischen Fehler behoben sind und somit keine der beiden eine ideale Repräsentation der Weltflotte darstellt. Ihre systematischen Fehler bleiben auch in den aus ihnen erstellten Emissionskatastern erhalten (WANG et al. 2007b).

Eine für den Fokus dieser Studie nötige Abschätzung der zukünftigen Schiffsaktivität unter Berücksichtigung möglicher Nordpolarrouten kann anhand einer gegenwärtigen Schiffsverkehrsdichte nur durch Umlegung konventioneller Hauptschiffsrouten auf die Nordost- oder Nordwestpassage nach genauem Distanzvergleich erfolgen. Auch wenn solche Hauptschiffsrouten in den vorliegenden Schiffsverkehrsdichten ersichtlich werden, wie z.B. von Europa nach Ostasien, besteht für die Schiffsaktivität einer bestimmten Gitterbox keine genaue Routeninformation über deren Start- oder Zielhäfen. Beispielsweise kann nicht abgeschätzt werden, ob eine gemeldete Aktivität im Roten Meer von einer Schiffsbewegung von Suez nach Singapur oder von Rotterdam nach Tokio stammt, und daher auch keine entsprechende Routendistanz bestimmt werden. Die Schiffsaktivität zukünftiger Nordpolarrouten kann mit gegenwärtigen Schiffsverkehrsdichten somit nicht abgeschätzt werden. Dennoch dienen sie zur Validierung der aus dem Bottom-up-Ansatz dieser Studie resultierenden, gegenwärtigen Schiffsverteilung (siehe Kapitel 4.1.1).

Schiffsstatistiken beinhalten dagegen für jede individuelle Schiffsbewegung Angaben über deren angelaufene Häfen. So kann für jede Bewegung von Start- zu Zielhafen ein Distanzvergleich zwischen der heutigen, konventionellen Schiffsroute und einer Fahrt über die Nordpolarrouten und im Fall einer Wegeinsparung eine Umlegung erfolgen (siehe Kapitel 3.2). Folglich kann eine Abschätzung der zukünftigen Schiffsaktivität unter Berücksichtigung möglicher Nordpolarrouten anhand von Angaben zu räumlich aufgelösten Schiffsbewegungen aus Schiffsstatistiken ermittelt werden. Da diese weiterhin als Eingangsdatensätze für Bottom-up-Ansätze der Emissionsberechnung dienen, werden sie auch in dieser Studie verwendet und in Kapitel 3.1 im Hauptteil dieser Arbeit näher beschrieben.

2.1.3 Gegenwärtige Emissionskataster

Um einen generellen Überblick zu schaffen, werden im Folgenden gegenwärtige globale Top-down- und regionale Bottom-up-Emissionskataster der internationalen Schifffahrt aus bisherigen Studien vergleichend vorgestellt. Im Kapitel 4.1.2 dienen deren Ergebnisse zur Einordnung und Bewertung des in dieser Studie entwickelten, globalen Bottom-up-Emissionskatasters.

Globale Top-down-Emissionskataster

ENDRESEN et al. (2003) ermitteln die Emissionen von 45.000 internationalen Fracht- und Passagierschiffen einer Größe von mindestens 100 Bruttoregistertonnen ohne Berücksichtigung von Hilfsmotoren oder Hafenaktivitäten für das Jahr 2000 anhand eines Top-down-Ansatzes. Die Emissionsberechnung erfolgt aktivitätsbasiert unter Anwendung der Gleichungen (2.1) und (2.2). Dabei werden die nach Schiffstypen, -größenklassen oder Motortypen gemittelten Eingangsgrößen aus Schiffsstatistiken herangezogen und die installierte Hauptmotorkraft aus einer statistischen Korrelation zur bekannten Schiffsgröße ermittelt. Der resultierende, gesamte Treibstoffverbrauch von 144 Mt wird mit den Treibstoffverkaufs-Statistiken der internationalen Schifffahrt von 147 Mt des Jahres 2000 (IEA 2003) verglichen und gerechtfertigt. Unter Berücksichtigung von Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten wird der Treibstoffverbrauch um 15% auf 166 Mt erhöht. Die resultierenden Gesamtemissionen zeigt Tab. 2.1. Zur Erstellung eines globalen Emissionskatasters werden die Gesamtemissionen abschließend anhand der mit der Schiffsgröße gewichteten AMVER-Schiffsverkehrsdichte von 2001 nach Gleichung (2.3) geographisch verteilt (ENDRESEN et al. 2003).

Tab. 2.1: Vergleich des gesamten Treibstoffverbrauches und der Gesamtemissionen der vorgestellten Top-down-Emissionskataster, wobei die unterschiedlichen Bezugsjahre beachtet werden müssen und PM₁₀ 10 µm-Partikel darstellt, Quelle: Verändert nach EYRING et al. 2005a.

	ENDRESEN et al. 2003 (Jahr 2000)	CORBETT und KÖHLER 2003 (Jahr 2001)	EYRING et al. 2005a (Jahr 2001)
Treibstoff [Mt]	166	289	280
NO _x [Tg NO ₂]	11,92	22,57	21,38
CO ₂ [Tg]	557,32	912,37	812,63
SO _x [Tg SO ₂]	6,82	12,98	12,03
CO [Tg]	1,12	---	1,31
Partikel [Tg PM ₁₀]	0,912	1,64	1,67
Hydrocarbone [Tg]	0,405	0,769	1,96

Der Top-down-Ansatz von CORBETT und KÖHLER (2003) berechnet die Emissionen der internationalen Flotte einer Größe von mindestens 100 Bruttoregistertonnen für das Jahr 2001 unter Berücksichtigung von Hilfsmotoren. Dabei werden 108.306 Schiffe inklusive Militärschiffe erfasst. Die Gesamtemissionen werden aktivitätsbasiert nach den Gleichungen (2.1) und (2.2) mit nach Schiffs- oder Motortypen gemittelten Eingangsparametern aus Schiffsstatistiken, industriellen Testmessungen oder Angaben von Herstellern und Betreibern bestimmt. Die installierte Motorkraft kann hier allerdings direkt aus Schiffsstatistiken entnommen werden. Die Motorauslastung und Motorlaufzeit werden pro Schiffs- oder Motortyp aus jährlichen Motorbetriebszyklen auf hoher See und in Küstennähe gemittelt. Der gesamte Treibstoffverbrauch ergibt 289 Mt und die resultierenden Gesamtemissionen sind in Tab. 2.1 dargestellt. EYRING et al. (2005a) verwenden die gleiche Methodik für eine Schiffsstatistik von 90.363 Schiffen einer Größe von min-

destens 100 Bruttoregistertonnen für das Jahr 2001 und erhalten einen gesamten Treibstoffverbrauch von 280 Mt und die Gesamtemissionen aus Tab. 2.1. Dabei kommen im Unterschied zu CORBETT und KÖHLER (2003) neuere Emissionsfaktoren zur Anwendung. Ebenso wird eine Zerlegung von Partikeln in Ruß, organischen Kohlenstoff, Sulfat und Asche und von Hydrocarbonen in Methan und 25 flüchtige, organische Verbindungen berücksichtigt. Zur Erzeugung eines globalen Emissionskatasters werden die Gesamtemissionen schließlich anhand der AMVER-Schiffsverkehrsdichte von 2000 geographisch verteilt (EYRING 2005a).

Vergleich und Diskussion der globalen Top-down-Emissionskataster

Der berechnete Treibstoffverbrauch und die Gesamtemissionen von CORBETT und KÖHLER (2003) und EYRING et al. (2005a) liegen deutlich höher als diejenigen von ENDRESEN et al. (2003). Dies ist hauptsächlich in unterschiedlichen Schiffszahlen und Motorlaufzeiten begründet. So erfassen CORBETT und KÖHLER (2003) und EYRING et al. (2005a) über 90.000 Schiffe der internationalen Flotte inklusive Militärschiffe, wohingegen ENDRESEN et al. (2003) lediglich 45.000 Fracht- und Passagierschiffe zur Berechnung heranziehen. Weiterhin verwenden CORBETT und KÖHLER (2003) und EYRING et al. (2005a) deutlich höhere Werte der jährlichen Motorlaufzeit als ENDRESEN et al. (2003), weil sie neben den Motorlaufzeiten auf hoher See mit höchster Motorauslastung auch solche in Küstennähe mit reduzierter Auslastung berücksichtigen. ENDRESEN et al. (2004) kritisieren jedoch diese sehr hohen Motorlaufzeiten.

Nach EYRING et al. (2005a) kann der niedrige Treibstoffverbrauch aus ENDRESEN et al. (2003) nicht anhand von Treibstoff-Verkaufsstatistiken der internationalen Schifffahrt gerechtfertigt werden. Denn diese eignen sich grundsätzlich nicht zum Vergleich mit berechneten Verbrauchswerten, weil inkonsistente Zuweisungs- und Berechnungsfehler entstehen, wenn international registrierte Schiffe in nationalen Gewässern tanken (CORBETT und KÖHLER 2003) und Treibstoffe aus landwirtschaftlichen Quellen verwenden oder Tanker ihre Ladung auf hoher See an andere Schiffe verkaufen (EYRING et al. 2005a).

In allen drei Studien bestehen generelle Ungenauigkeiten aufgrund der lediglich grob nach unterschiedlichen Schiffstypen gemittelten Eingangsparameter. So variieren vor allem die Motorauslastung, die Motorlaufzeit und die spezifische Treibstoff-Öl-Verbrauchsrate stark mit Schiffstyp, -größe, -alter, Treibstofftyp und Marktsituation (WANG et al. 2007a, SI). In einer Sensitivitätsstudie stellen auch CORBETT und KÖHLER (2003) heraus, dass die gemittelte Motorauslastung und die jährliche Motorlaufzeit, aber ebenso manche Emissionsfaktoren wie derjenige für Partikel mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Daher kritisiert EYRING et al. (2005a), dass die installierte Hauptmotorkraft in ENDRESEN et al. (2003) aus einer indirekten, statistischen Beziehung pro Schiffstyp ermittelt und nicht direkt aus Schiffsstatistiken entnommen wird. ENDRESEN et al. (2004) bewertet die Hauptmotorkraft-Werte der beiden anderen Studien dagegen als zu hoch.

Regionale Bottom-up-Emissionskataster

Der Report vom European Commission Directorate General Environment und Entec UK Limited schätzt die regionalen Schiffsemissionen der 29 EU-Mitglieds- und Kandidaten-Staaten für das Jahr 2000 ab. Mit dem Ziel, die Emissionen des internationalen Schiffsverkehrs in der National Emission Ceilings Directive des EU-Emissionshandels einzubinden, versucht der Bericht weiterhin, die ermittelten Emissionen einzelnen Ländern zuzuweisen. Für die Emissionsberechnung und die anschließende Zuweisung werden dabei mehrere, unterschiedliche Methoden miteinander verglichen (EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED 2005).

In der Top-down-Emissionsberechnung dieser Studie werden länderspezifische Statistiken des Treibstoffverkaufes und des -verbrauches angewendet, weil diese eine einfache Zuweisung ermöglichen. Gerechtere Zuweisungen lassen sich allerdings anhand der räumlich aufgelösten Bottom-up-Emissionsberechnung vollziehen, beispielsweise die gleichmäßige Verteilung der Emissionen einer Schiffsbewegung auf die Länder des Abfahrts- und Ankunftshafens oder die Zuordnung von Schiffsemissionen zu demjenigen EU-Staat, in dessen 200-Seemeilen-Zone sie ausgestoßen wurden. Denn diese exklusive ökonomische Zone entspricht einer juristischen Landesgrenze. Dabei werden die Emissionen jeder Schiffsbewegung von 31.000 kommerziellen Schiffen einer Größe von mindestens 500 Bruttoregistertonnen unter Berücksichtigung von Hilfsmotoren und Emissionen in Häfen und Binnengewässern nach den Gleichungen (2.4) und (2.2) bestimmt. Die Eingangsparameter werden direkt aus Schiffsstatistiken herangezogen, auch die installierte Motorkraft. Für die Emissionsberechnung auf hoher See wird die Motorlaufzeit aus der nach Schiffstypen gemittelten Geschwindigkeit und der gefahrenen Routendistanz berechnet, welche teilweise nur durch grobe Entfernungen der bekannten Start- und Zielhäfen abgeschätzt wird. Für die Emissionsberechnung im Hafen werden dagegen eine nach Schiffstypen gemittelte Hafenaufenthaltszeit als Motorlaufzeit pro Schiffsroute, eine geringere Motorauslastung und höhere Emissionsfaktoren verwendet. Die Emissionen der Binnenschifffahrt werden einer anderen Top-down-Studie entnommen. In Summe ergeben sich die Gesamtemissionen des Jahres 2000, die in der 200-Seemeilen-Zone von 29 EU-Staaten ausgestoßen wurden, zu 121 Tg CO₂, 2,8 Tg NO_x, 1,9 Tg SO₂ und 0,2 Tg Partikel. Der gesamte Treibstoffverbrauch wurde dabei nicht ermittelt (EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED 2005).

Die exakte Berechnung der Motorlaufzeit aus gefahrener Distanz und mittlerer Geschwindigkeit ergibt genauere Ergebnisse als die pro Schiffstyp gemittelten, jährlichen Motorlaufzeiten der zuvor beschriebenen Top-down-Ansätze. Dennoch stellen geschätzte Routendistanzen zwischen Start- und Zielhäfen große Unsicherheiten in der Emissionsberechnung dar.

Ein weiteres Bottom-up-Emissionskataster stellt das Waterway Network Ship Traffic, Energy and Environment Model (STEEM) dar, ein Routennetzwerk mit vordefinierten Schiffsrouten-Segmenten für Nordamerika, das eine globale Abdeckung anstrebt (WANG et al. 2007a). Zur Konstruktion eines Wasserwege-Netzwerkes mit 9.000 Segmenten und zahlreichen Hafen- und Kreuzungspunkten werden typische Schiffsrouten aus Schiffsverkehrsdichten der Jahre

1983-2002 von ICOADS und AMVER verwendet. Dabei werden manche Routensegmente nur für bestimmte Jahreszeiten, Wetterzustände, Schiffstypen oder –größen als befahrbar ausgewiesen, wie z.B. die Kanalstrecken von Panama oder Suez. Für eine bestimmte Kombination aus Start- und Zielhafen findet GIS-Technologie die kürzeste Segment-Verbindung inklusive Routendistanz im vorgegebenen Vektor-Netzwerk. Die Bottom-up-Emissionsberechnung erfolgt nach den Gleichungen (2.4) und (2.2) direkt auf den Routensegmenten und wird anschließend in ein $4 \times 4 \text{ km}^2$ -Rastergitter überführt. Als Eingangsparameter dienen 172.000 Schiffsbewegungen zwischen über 2.000 Häfen und individuelle Schiffsattribute aus Schiffsstatistiken. Die installierte Hilfsmotorkraft und fehlende Werte der installierten Hauptmotorkraft werden pro Schiffstyp aus Korrelationen zur Schiffsgröße ermittelt. Die Motorauslastung wird ab einer Hafennähe von 20 km reduziert und die Motorlaufzeit aus Routendistanz und Schiffsgeschwindigkeit ermittelt, wobei fehlende Schiffsgeschwindigkeiten aus pro Schiffstyp gemittelten Werten herangezogen werden. Der gesamte Treibstoffverbrauch aller Schiffsbewegungen nordamerikanischer Häfen des Jahres 2002 ergibt sich zu 47 Mt und die SO_2 -Gesamtemissionen zu 2,4 Mt unter Berücksichtigung von 2-6% Hafenemissionen (WANG et al. 2007a).

Insgesamt zeigt das STEEM-Modell aufgrund exakt berechneter Motorlaufzeiten und eines detaillierten Routennetzes eine höhere Genauigkeit und räumliche Auflösung als die unrepräsentativen Schiffsverkehrsdichten von Top-down-Ansätzen und geschätzte Schiffsrouten anderer Bottom-up-Ansätze (WANG et al. 2007a). In vordefinierten Routennetzen entstehen jedoch Umwege und Unsicherheiten, wenn zu wenige Verbindungssegmente für einen adäquaten Routenverlauf vorhanden sind und Start- oder Zielhäfen einer Schiffsroute als Knotenpunkte im Routennetz fehlen. Weiterhin sollten auch die Hafenemissionen gesondert berechnet werden.

2.1.4 Zukünftige Emissionskataster

Dieses Kapitel geht auf die Erstellung zukünftiger, globaler Emissionskataster ein, für die unterschiedliche Zukunftsszenarien entwickelt werden, welche die Spannweite möglicher Entwicklungen und Veränderungen relevanter Variablen aufzeigen. Als solche werden in erster Linie das Weltwirtschaftswachstum und die damit einhergehenden Größen Weltseehandel und Schiffszahl, aber auch die installierte Motorenenergie pro Schiff und die globale Schiffsverteilung betrachtet. Weiterhin wird der zukünftige Einsatz von Emissions-Reduktionstechniken für Dieselmotoren (Fuel Water Emulsification, Humid Air Motor, Common Rail Injection, Selective Catalytic Reduction), alternativen Treibstoffen und Energiequellen (Bio-Öl, Bio-Diesel, Hydrogen-Diesel, Treibstoff-Zellen, Windturbinen, Windsegel, Solarzellen) oder Schiffsmodifikationen (Propeller, Ruder, Hülle) abgeschätzt (EYRING et al. 2005b). Schließlich muss auch die zukünftige Entwicklung von nationalen und internationalen Regelungen für Schiffsemissionen berücksichtigt werden. So zielen NO_x -Emissions-Beschränkungen der MARPOL 73/78 Annex VI-Regulation der IMO (International Maritime Organisation) seit 2005 auf eine 30%-Reduktion der NO_x -Emissionen der internationalen Schifffahrt. Zur Beschränkung der SO_x -Emissionen wurde gleichzeitig eine globale Schwefelgehalt-Grenze des Schweröls von 4,5% errichtet, in SECA-

Zonen (Sulphur Emission Control Areas) der Ostsee, Nordsee und des Ärmelkanals von lediglich 1,5%. Für Hafenregionen und die Binnenschifffahrt der EU schreibt die Directive 2005/33/EC ab 2010 einen SO_x -Grenzwert von 0,1% vor (IMO 1998). Bisher sind Schiffsemissionen aber noch kein Bestandteil der Emissionsziele des Kyoto-Protokolls, weil unklar ist, wie Emissionen der internationalen Schifffahrt individuellen Ländern zugewiesen werden können. Daher diskutiert die EU momentan, diese in den EU-Emissionshandel aufzunehmen. Eine Reduktion der Schiffsemissionen wird insbesondere gebraucht, um zukünftige Wachstumsprognosen zu kompensieren (EYRING 2007b). Im Folgenden wird ein zukünftiges Emissionskataster vorgestellt, das viele dieser Entwicklungen abschätzt und als Vorlage für die beiden zukünftigen Bottom-up-Emissionskataster dieser Diplomarbeit dient.

Aufbauend auf die Vorgängerstudie der Top-down-Berechnung von Treibstoffverbrauch und Emissionen der internationalen Schifffahrt im Jahr 2001 (EYRING et al. 2005a) entwickeln EYRING et al. (2005b) eine mittel- und eine langfristige Zukunftsprognose für die Jahre 2020 und 2050. Für jede der beiden Prognosen werden 16 mögliche Zukunftsszenarien betrachtet, die sich aus der Kombination von vier Schiffsverkehrs-Nachfrage-Szenarien (DS 1-4) und vier Technologie-Szenarien (TS 1-4) ergeben. Erstere folgen den Prognosen zum Weltwirtschaftswachstum der vier IPCC SRES-Szenarien und ermitteln zukünftige Schiffszahlen aus der linearen Extrapolation gegenwärtiger Korrelationen zum Weltseehandel und Bruttoinlandsprodukt. Die zukünftige, installierte Motorenenergie pro Schiff ergibt sich ebenfalls aus der linearen Extrapolation gegenwärtiger Trends. Letztere beschreiben dagegen Abschätzungen zum zukünftigen Technologie-Einsatz und der Entwicklung von Regelungen zu Schiffsemissionen. Daher werden unterschiedlich hohe Reduktionen der heutigen Emissionsfaktoren für NO_x , CO, Hydrocarbone und Partikel bzw. SO_x je nach technischer Verbesserung bzw. Treibstoff-Qualität des jeweiligen Szenarios angenommen. Der CO_2 -Emissionsfaktor wird dagegen als nahezu konstant geschätzt, weil er stark korreliert mit dem Treibstoffverbrauch und neue Emissions-Reduktionsmethoden weniger effizient arbeiten als konventionelle Dieselmotoren, die auf Treibstoffverbrauch optimiert sind. Manche Szenarien gehen ab 2050 von einer Treibstoff-Einsparung um 25% durch verstärkten Einsatz alternativer Energiequellen aus (EYRING et al. 2005b).

Für bestimmte Zukunftsszenarien DS und TS wird der zukünftige, gesamte Treibstoffverbrauch $FC_{2020, DS}$ bzw. $FC_{2050, DS, TS}$ aus dem Treibstoffverbrauch FC_{2001} des Ausgangsjahres der Vorgängerstudie und dem Verhältnis der aufsummierten Motorkraft der Gesamtflotte $P_{tot, 2020, DS}$ bzw. $P_{tot, 2050, DS}$ zu $P_{tot, 2001}$ nach Gleichung (2.5) bzw. (2.6) bestimmt. Für die langfristige Prognose wird dabei ein Treibstoff-Reduktionsfaktor ρ_{TS} eingesetzt, der in manchen Szenarien eine Treibstoff-Einsparung von 25% durch alternative Energien bringt (EYRING et al. 2005b):

$$FC_{2020, DS} = FC_{2001} \cdot P_{tot, 2020, DS} / P_{tot, 2001} \quad (2.5)$$

$$FC_{2050, DS, TS} = (1 - \rho_{TS}) \cdot FC_{2001} \cdot P_{tot, 2050, DS} / P_{tot, 2001} \quad (2.6)$$

Dann werden für beide Zukunftsjahre f und die jeweiligen Zukunftsszenarien DS und TS die Gesamtemissionen $E_{x, f, DS, TS}$ einer bestimmten Spezies x aus dem bereits ermittelten Treibstoff-

verbrauch $FC_{f, DS, TS}$, den gegenwärtigen Emissionsfaktoren $EI_{x, 2001}$ und den zukünftigen Emissions-Reduktionsfaktoren $R_{x,f, TS}$ nach Gleichung (2.7) ermittelt (EYRING et al. 2005b):

$$E_{x,f, DS, TS} = FC_{f, DS, TS} \cdot EI_{x, 2001} \cdot R_{x,f, TS} \quad (2.7)$$

Für den zukünftigen, gesamten Treibstoffverbrauch im Jahr 2020 bzw. 2050 ergeben sich 382-409 bzw. 402-725 Mt in der Spannweite der verschiedenen Szenarien, für die CO₂-, NO_x- und SO_x-Gesamtemissionen entsprechend 1.110-1.188 bzw. 1.109-2.001 Tg (CO₂), 8,8-25,0 bzw. 3,1-38,8 Tg (NO₂) und 6,9-14,6 bzw. 3,6-25,9 Tg (SO₂). Zukünftige NO_x- und SO_x-Emissionen können somit durch entsprechende Emissions-Regulationen trotz eines Wachstums der Schiffsanzahl und der Hauptmotorkraft pro Schiff unter die Werte von 2001 reduziert werden, wohingegen die CO₂-Emissionen bestenfalls konstant bleiben. Zur Erstellung eines zukünftigen, globalen Emissionskatasters werden die Gesamtemissionen schließlich analog zur Vorgängerstudie anhand einer Schiffsverkehrsdichte von AMVER geographisch verteilt (EYRING et al. 2005b).

Die Vorgehensweise aus EYRING et al. (2005b) dient als Vorlage zur Erstellung der zukünftigen Bottom-up-Emissionskataster in dieser Studie. Zur Abschätzung der gesamten Spannweite zukünftiger Entwicklungen werden die zwei extremsten Zukunftsszenarien DS1-TS1 und DS4-TS4 zur Emissionsberechnung übernommen und in dieser Diplomarbeit als CLE-Szenario (clean) und BAU-Szenario (business-as-usual) bezeichnet (siehe Kapitel 3.3).

2.2 Meereis und Schiffsrouten im Nordpolarraum

Die rund 6.000 km lange Nordost-Passage von Archangelsk bis zur Beringstraße wurde das erste Mal 1878/79 von Nordenskjöld auf dem Dampfer Vega durchfahren und ist seit 1967 für den internationalen Schiffsverkehr freigegeben (BROCKHAUS 1991, S.677). Dagegen gelang die Durchfahrt der Nordwest-Passage von der Beaufortsee bis zur Beringstraße erst Amundsen auf dem Fischerboot Gjøa mit mehreren Überwinterungen von 1903-06 (BROCKHAUS 1991, S.691). Seitdem wurde diese auch erst von circa 100 weiteren Schiffen befahren. Obwohl Kanada die Nordwest-Passage als ihr Hoheitsgebiet betrachtet, fordern die USA und Europa deren internationale Schiffbarkeit (STEINBERGER 2007), besonders jetzt, da sie sich im September 2007 komplett öffnete (CALONEGO 2007). Denn auch wenn Schiffe für die Durchfahrt der Nordpolarrouten spezielle Geräte zum Schutz gegen Eisberge benötigen, bietet die Nordost-Passage für Schiffsrouten von Europa nach Ostasien eine Wegeinsparung von 7.000 km (GRANIER et al. 2006) und die Nordwest-Passage sogar von 9.000 km (STEINBERGER 2007).

Das Abschmelzen des arktischen Meereises öffnet weiterhin den Zugang zu bisher ungenutzten, natürlichen Ressourcen wie Erdöl, Erdgas, Mineralien und Fischvorkommen. Aufgrund der hohen Energiepreise versuchen die nordischen Anrainer-Staaten möglichst schnell ihre Territorien abzustecken. Nach der UN-Seerechtskonvention von 1982 kann ein Staat die 200-Seemeilen-Zone vor seiner Küste als exklusive Wirtschaftszone nutzen, weiterhin die Ausdehnung seines unterseeischen Kontinentalsockels. Dem untermeerischen Lomonossow-Rücken folgend setzte

ein russisches U-Boot daher die Nationalflagge auf den Meeresboden am Nordpol und Dänemark erhob Anspruch auf die Insel Hans im kanadischen Archipel. Andere Grenzstreitigkeiten bestehen im Beringmeer zwischen Russland und den USA (STEINBERGER 2007) und in der Barentssee zwischen Norwegen und Russland. Um weitere negative Einflüsse auf die arktische Umwelt durch Übernutzung zu verringern, erscheint eine Arktische Charta in Anlehnung an internationale Abkommen zur Nutzung der Antarktis sinnvoll (HERRMANN 2007).

Da diese Diplomarbeit globale Bottom-up-Emissionskataster erstellt, die ebenfalls zukünftige Nordpolarrouten berücksichtigen, führt Kapitel 2.2.1 nun in gegenwärtige Beobachtungen und zukünftige Prognosen der arktischen Meereis-Ausdehnung ein. Demgegenüber stellt Kapitel 2.2.2 bisherige Emissionskataster vor, die zukünftige Nordpolarrouten und deren Umweltwirkungen betrachten und somit zum Vergleich und zur Bewertung der Ergebnisse dieser Studie dienen.

2.2.1 Gegenwärtige und zukünftige arktische Meereis-Ausdehnung

Das Meereis der polaren Ozeane stellt aufgrund der bedeutenden Eis-Albedo-Rückkopplung und der Isolationseigenschaften eine wichtige und sehr sensitive Komponente des globalen Klimasystems dar und reagiert dementsprechend stark auf die globale Erwärmung. Um die Möglichkeit und Wahrscheinlichkeit zukünftiger Nordpolarrouten abzuschätzen, geht dieses Kapitel nun auf gegenwärtige Beobachtungen und zukünftige Prognosen der arktischen Meereis-Bedeckung ein.

Gegenwärtige Beobachtungen

Nach IPCC 2007 (Kapitel 4) wird der Anteil der Meereis-Bedeckung an der Ozeanfläche als Meereis-Konzentration [%] bezeichnet und die Meereis-Fläche innerhalb des Eisrandes mit einer Meereis-Konzentration von mindestens 15% als Meereis-Ausdehnung [km²]. Letztere erreicht in der Arktis gegenwärtig eine maximale winterliche Ausbreitung von bis zu 15 Mio. km² und geht im Sommer auf 7 Mio. km² zurück. Die Beobachtung dieser Ausdehnung konnte ab 1979 im Vergleich zu früheren Flugzeug- oder Schiffsreporten erheblich durch passive Mikrowellen-Daten von Satelliten verbessert werden. So zeigt eine Beobachtungs-Zeitreihe von 1979-2005 einen Trend der mittleren jährlichen arktischen Meereis-Ausdehnung von $-33 \pm 7,4 \cdot 10^3 \text{ km}^2/\text{a}$ ($2,7 \pm 0,6\%/ \text{Dekade}$). Für die minimale jährliche arktische Meereis-Ausdehnung im Sommer wurde ein noch stärkerer Trend von $-60 \pm 20 \cdot 10^3 \text{ km}^2/\text{a}$ ($7,4 \pm 2,4\%/ \text{Dekade}$) gefunden. Ältere Zeitreihen weisen starke Heterogenitäten auf, zeigen jedoch ähnliche Trends, beispielsweise die HadlSST-Beobachtungsdaten (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature Data Set) für den Zeitraum 1953-2006 (STROEVE et al. 2006). Neben der Ausdehnung des arktischen Meereises ist auch die Eisdicke von Bedeutung für die Schifffahrt. Für diese zeigen U-Boot-Sonardaten und Modell-Rekonstruktionen von 1987-1997 eine sehr wahrscheinliche Abnahme um bis zu 1 m in der zentralen Arktis und um 0,6-0,9 m gemittelt über die gesamte Arktis. Verlässlichere Satellitendaten der Radar- oder Laser-Altimetrie liegen erst seit kurzem vor. Für die Eisbewegung durch Wind und Ozeanströmungen wurde dagegen kein signifikanter Trend nachgewiesen (IPCC 2007, Kapitel 4).

Der für die beobachteten Trends verantwortliche Temperaturanstieg der Arktis war in den letzten 100 Jahren durchschnittlich doppelt so stark wie die mittlere globale Erwärmung (IPCC 2007, Kapitel 11). Denn in polaren Breiten wird dieser Temperaturanstieg stark durch die positive Eis-Albedo-Rückkopplung verstärkt, welche durch zurückweichendes Eis eine erhöhte Absorption der kurzwelligen Sonnenstrahlung ermöglicht (HOLLAND et al. 2006). Ferner wird dieser Prozess durch Ruß-Ablagerung aus Schiffsemissionen auf Meereis intensiviert (FLANNER et al. 2007). Ebenso verstärkend auf die Reduktion der Meereis-Ausdehnung wirken eine gleichzeitige Ausdünnung des Meereises und ein erhöhter, ozeanischer Wärmetransport. Letzterer stellt ebenfalls eine positive Rückkopplung dar, weil aufgrund der geringen Isolation einer dünnen Meereis-Schicht eine erhöhte, winterliche Meereis-Produktion stattfindet, die verstärkt Meersalz abgibt und somit warme, atlantische Strömungen heranführt (HOLLAND et al. 2006). Den beobachtenden Trends überlagert zeigt die Meereis-Ausdehnung eine natürliche, interannuelle und interdekadische Variabilität, angeregt durch niedrig-frequente, großräumige Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation (IPCC 2007, Kapitel 4). So ist die geringe Meereis-Bedeckung des Jahres 2007 unter anderem in veränderten Windmustern der NAM (Northern Annular Mode) begründet (STROEVE et al. 2006).

Zukünftige Prognosen

Für Zukunftsprognosen werden die Ergebnisse von Klimamodellen herangezogen, welche mit vorindustriellen Werten um 1870 initialisiert und bis 2000 durch atmosphärische Beobachtungen und für das 21. Jahrhundert mit den geschätzten Entwicklungen unterschiedlicher Zukunftsszenarien angetrieben werden. Nach den Projektionen des IPCC 2007 (Kapitel 11) steigt die arktische Temperatur sehr wahrscheinlich auch im 21. Jahrhundert stärker als die mittlere globale Erwärmung. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts könnte die gesamte Arktis im Vergleich zu gegenwärtigen Bedingungen eine mittlere Erwärmung um 5°C aufweisen, der zentrale arktische Ozean sogar um bis zu 7°C. Die Ausdehnung und Dicke des arktischen Meereises zeigen sehr wahrscheinlich ein weiterer Rückgang. Eine verstärkte Reduktion des sommerlichen Meereises könnte dabei zu einer saisonalen Meereis-Bedeckung führen, weil in manchen Projektionen das arktische Spätsommer-Meereis gegen Ende des 21. Jahrhunderts sogar komplett verschwindet (IPCC 2007, Kapitel 10). Beispielsweise zeigt die mittlere sommerliche arktische Meereis-Ausdehnung [%] der Periode 2050-2060, welche vom gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Zirkulations-Modell ECHAM5/MPI-OM im Rahmen des IPCC 2007 für das moderate SRES-A1B-Szenario berechnet wurde (siehe Abb. 2.2, rechts), im Vergleich zu 2001-2005 (siehe Abb. 2.2, links) einen signifikanten Meereis-Rückgang bei gleichzeitiger Öffnung der Nordpolarrouten (GRANIER et al. 2006).

Die Verlässlichkeit dieser zukünftigen Modellsimulationen untersucht STROEVE et al. (2007) durch Vergleich gegenwärtiger Modellergebnisse mit Beobachtungsdaten. So ergibt das Ensemble-Mittel gegenwärtiger IPCC-Modellsimulationen mit $-2,5 \pm 0,2\%$ für die Perioden 1953-2006 bzw. $-4,3 \pm 0,3\%$ für 1979-2006 viel geringere September-Trends als die zuvor vorgestellten Beobachtungen. Die beobachteten Meereis-Trends werden in ihrer Intensität von den Simulatio-

nen des IPCC 2007 somit noch stark unterschätzt. Beispielsweise lies sich im Sommer 2007 eine Meereis-Ausdehnung beobachten, die nach dem berechneten Modell-Ensemble-Mittel erst 30 Jahre später auftreten sollte. Es wäre deshalb möglich, dass eine sehr geringe, arktische Meereis-Ausbreitung von nur 1 Mio. km² viel früher eintritt als im von IPCC-Simulationen berechneten Zeitraum 2050 bis 2100 (STROEVE et al. 2007). Weiterhin findet HOLLAND et al. (2006) ab dem Jahr 2015 starke, abrupte Rückgänge der arktischen September-Meereis-Ausdehnung in den CCSM3-Klimamodell-Projektionen (Community Climate System Model, Version 3) und manchen anderen IPCC-Modellsimulationen des Szenarios A1B. In einer mittleren Periode von fünf Jahren zeigt sich ein durchschnittlicher Rückgang von -0,4 Mio. km²/a, also eine höhere Intensität als gegenwärtig beobachtete Reduktionsraten, so dass fast-eisfreie September-Bedingungen schon in den Jahren 2040-2060 erreicht werden könnten. Angesichts der September-Meereis-Ausbreitung des Jahres 2007 von nur 4,13 Mio. km², der geringsten Ausdehnung der modernen Zeit, gehen neueste Schätzungen hoch aufgelöster, regionaler Modelle von einem saisonal eisfreien arktischen Ozean ab 2030 aus, manche sogar schon ab 2013 (AMOS 2007).

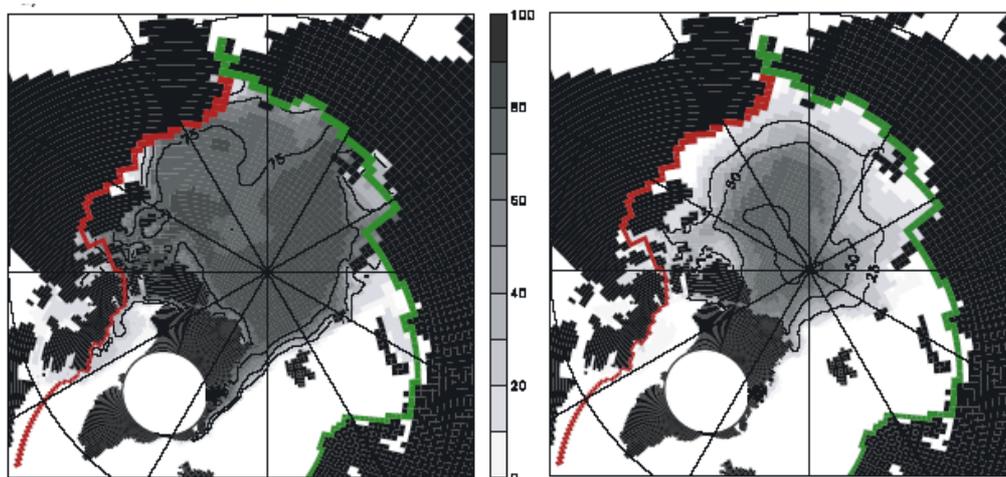


Abb. 2.2: Sommerliche (Juni bis Oktober), arktische Meereis-Bedeckung [%], berechnet von ECHAM5/MPI-OM aus Beobachtungsdaten und dem SRES-A1B-Szenario für 2001-2005 (links) und 2050-2060 (rechts) mit Kennzeichnung der Nordwest (rot) und Nordost-Passage (grün), Quelle: GRANIER et al. 2006, Abb. 1.

2.2.2 Bisherige Emissionskataster mit Nordpolarrouten

Eine reduzierte Dicke und Ausdehnung des arktischen Meereises ermöglicht die zukünftige Befahrbarkeit der Nordpolarrouten, deren mögliche Auswirkungen über Schiffsemissionskataster abgeschätzt werden. Zum Überblick über bisherige Arbeiten werden nun zwei Schiffsemissionskataster vorgestellt, die Nordpolarrouten für die Jahre 2015 und 2050 entwickeln und als Vergleich für die beiden in dieser Studie erstellten, zukünftigen Emissionskataster dienen.

Aufbauend auf das Emissionskataster der internationalen Schifffahrt des Jahres 2000 aus ENDRESEN et al. (2003) entwickeln DALSSØREN et al. (2007) ein Schiffsemissionskataster des Jahres 2015 unter Berücksichtigung der norwegischen Küstenschifffahrt, neuer Gaskraftwerke an

der norwegischen Küste und mancher arktischer Schiffsrouten. Als solche werden arktische Öl- und Gastransportrouten von Norwegen und Nordwest-Russland nach Europa und Nordamerika sowie die Nordost-Passage von Europa nach Ostasien betrachtet. Für die zukünftige Entwicklung wird ein niedriges, jährliches Wachstum des Seehandels von 2% aus FEARNLEYS (2007) angenommen. Zukünftige Emissionsfaktoren für NO_x und SO_x werden den internationalen Regulationen entsprechend reduziert, alternative Treibstoffe bis 2015 jedoch nicht berücksichtigt.

Für die arktischen Öl- und Gastransportrouten werden lineare Verbindungen von Murmansk bzw. Nord-Norwegen nach Rotterdam und New York mit Großkreis-Annäherung über offenem Ozean konstruiert (siehe Abb. 2.3). Aus geschätzten 150 Mt Öl-Exporten im Jahr 2015 ergibt sich bei entsprechender Schiffsgröße eine Anzahl von 1.500 russischen Tankerfahrten und weitere 400 für den nordnorwegischen Öl- und Gasexport. Über die Routenlänge und die mittlere Schiffsgeschwindigkeit wird die genaue Motorlaufzeit ermittelt. Für die Nordost-Passage wird eine ähnliche Verbindung zwischen Nowaja Semlja und der Bering-Straße konstruiert (siehe Abb. 2.3). Das gegenwärtig transportierte Frachtvolumen entspricht 0,1-0,2 Mt/a für 1990-1995 und 1,5-2,0 Mt/a für 1996-1999. Der zukünftige Transport im Jahr 2015 hängt von vielen Einflussfaktoren wie Politik, Energie-Bedarf, Infrastruktur oder Meereis-Bedeckung ab, wird jedoch in ost- bzw. westwärtiger Richtung auf 2-8 Mt/a bzw. 1-4 Mt/a geschätzt, welches circa 200 jährlichen Fahrten von Stückgut-Frachtern entspricht. Bei einer Reisezeit von 25 Tagen werden ungefähr 20 t Treibstoff pro Tag und Schiff verbraucht. Der gesamte Treibstoffverbrauch der Öltransportrouten und der Nordost-Passage im Jahr 2015 ergibt sich somit zu 1,24 Mt und 0,1 Mt. Dies stellt im Vergleich zu 1,7 Mt Treibstoffverbrauch der gesamten, arktischen Flotte im Jahr 1998 einen starken Anstieg dar. Die entsprechenden Gesamtemissionen ergeben sich zu 108 und 7,4 kt/a NO_x , 4.900 und 320 kt/a CO_2 , 76 und 5,4 kt/a SO_2 , 11 und 0,7 kt/a CO, 10 und 0,8 kt/a Partikel und 3,0 und 0,2 kt/a Hydrocarbone. Die arktischen Schiffsaktivitäten stellen dabei circa 0,4 – 0,5% der globalen Schiffsemissionen des Jahres 2015 dar (DALSSØREN et al. 2007).

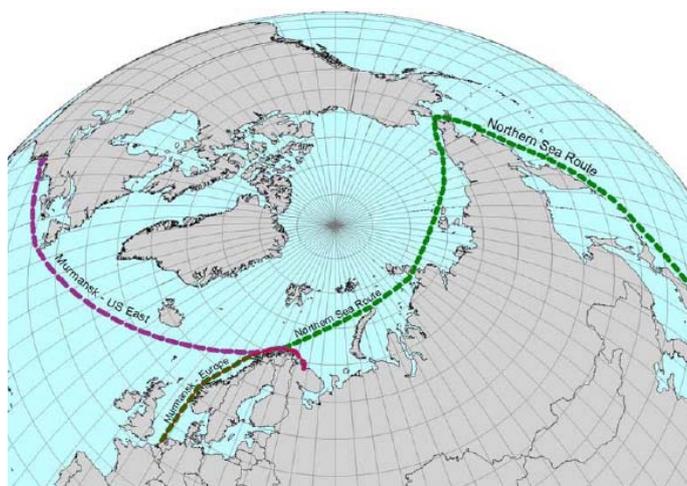


Abb. 2.3: Darstellung der in DALSSØREN et al. 2007 verwendeten Nordost-Passage und arktischen Öl- und Gastransportrouten, Quelle: DALSSØREN et al. 2007, Abb. 3.

Das globale Chemie-Transport-Modell OsloCTM2 berechnet signifikante regionale Auswirkungen dieser arktischen Emissionen auf Klima und Atmosphäre, besonders auf Küstengebiete mit geringer Hintergrund-Verschmutzung. Auf den nordatlantischen Öltransportrouten und in Nord-Norwegen erfolgt ein starker NO_2 -Anstieg von bis zu 25%, begleitet von einem O_3 -Anstieg von 4%. Ein Wachstum der nassen Sulfat- und Nitrat-Ablagerung von 4% bringt verstärkten, sauren Regen in die Nickel-Passvik-Region an der norwegisch-russischen Grenze, eine Region, deren Vegetation, Gewässer und Böden bereits stark durch hohe Schwefel-Belastungen regionaler, industrieller Aktivitäten versauert sind. Das erhöhte Sulfat und ein Wachstum organischer Kohlenstoff-Partikel um 15% zeigen schließlich einen verstärkten Beitrag zur Bildung arktischen Nebels, der sich bei großen Mengen natürlicher oder anthropogener Aerosole formt und die Sichtbarkeit und das regionale Klima beeinflusst (DALSØREN et al. 2007).

Das zukünftige Emissionskataster von GRANIER et al. (2006) berechnet dagegen die Einflüsse der Nordpolarrouten für das Jahr 2050. Dazu wird in einer einfachen Abschätzung angenommen, dass jährlich 11% der NO_x - und CO-Gesamtemissionen des business-as-usual Szenarios DS4 aus EYRING et al. (2005b) durch Schiffe auf den Nordpolarrouten verursacht werden. Diese 1,3 Tg N und 0,14 Tg CO werden in der Periode Juni bis Oktober 2050 gleichermaßen auf die in Abb. 2.2 dargestellten Nordost- und Nordwest-Passagen verteilt. Alle weiteren zukünftigen Emissionen werden dagegen aus EYRING et al. (2005b) übernommen. Schließlich werden die Auswirkungen dieser Emissionen anhand des globalen Chemie-Transport-Modells MOZART4 berechnet. Im Basisszenario ohne Nordpolarrouten zeigt die Arktis sommerliche Konzentrationen bodennahen Ozons von 10-15 ppbv allein durch großräumigen Transport mit Maximalwerten von 25-30 ppbv über Skandinavien und Grönland. Die beschriebenen arktischen Schiffsemissionen verursachen ein Wachstum von bodennahem NO_x um 2-10 ppbv auf den Nordpolarrouten selbst. Aufgrund des niedrigen arktischen Hintergrund-Niveaus resultiert ein starker sommerlicher Ozon-Anstieg von 5-20 ppbv, in Nordalaska sogar um 45 ppbv, welcher mit Sommerwerten von Industrieregionen vergleichbar ist. Im Gegensatz zur NO_x -Verteilung zeigt sich diese Ozon-Verdopplung bis Verdreifachung jedoch im gesamten arktischen Raum (GRANIER et al. 2006).

Das Ziel dieser Studie stellt dar, diese existierenden, vereinfachten Abschätzungen zukünftiger Nordpolarrouten durch den Aufbau von globalen Bottom-up-Emissionskatastern zweier unterschiedlicher Zukunftsszenarien zu verbessern, welche eine reduzierte Meereis-Ausdehnung und verschiedene Wachstums-Prognosen berücksichtigen.

3. Methodik

Im vorherigen Kapitel wurde in die Grundlagen der Erstellung von Emissionskatastern der internationalen Schifffahrt für gegenwärtige und zukünftige Bedingungen eingeführt und zukünftige Meereis-Prognosen und bisherige Abschätzungen zu Schiffsrouten im Nordpolarraum betrachtet. Das folgende Kapitel stellt nun die in dieser Studie verwendete Methodik zur Berechnung gegenwärtiger und zukünftiger Bottom-up-Emissionskataster mit Berücksichtigung von Nordpolarrouten vor. Ausgehend von einer Lloyds-Schiffsstatistik des Jahres 2006 werden für das Gegenwarts- und die in dieser Studie verwendeten CLE- und BAU-Zukunftsszenarien jeweils eine globale Schiffsverkehrsdichte und anschließend ein globales Emissionskataster erstellt. Hierzu wurde eine Routenfindungs-Methodik entwickelt, die aus den Angaben zu Start- und Zielhäfen jeder Schiffsbewegung der eingehenden Schiffsstatistik adäquate Routenverläufe auf dem in dieser Studie verwendeten $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter berechnet. Kapitel 3.1 geht auf den Eingangsdatensatz der Lloyds-Schiffsstatistik des Jahres 2006 ein, wohingegen Kapitel 3.2 drei in dieser Studie entwickelte und erprobte Methodiken zur Routenfindung vergleichend vorstellt. Kapitel 3.3 beschreibt die Verarbeitung der Lloyds-Schiffsstatistik zur Erstellung globaler Schiffsverkehrsdichten anhand der zuvor ausgewählten Routenfindungs-Methodik. Kapitel 3.4 legt schließlich dar, wie aus den Ergebnissen der Routenfindung in Anlehnung an bisherige Bottom-up-Ansätze ein globales, gegenwärtiges Basis-Emissionskataster der internationalen Schifffahrt und zwei zukünftige Emissionskataster unter Berücksichtigung möglicher Nordpolarrouten aufgebaut werden.

3.1 Lloyds-Schiffsstatistik als Eingangsdatensatz

Schiffsstatistiken mit räumlich aufgelösten Schiffsbewegungen dienen als Eingangsdatensätze für den Bottom-up-Ansatz der Emissionsberechnung, der in dieser Studie auf globaler Ebene angewendet wird. Wie bereits in Kapitel 2.1.2 dargelegt, kann eine für den Fokus dieser Studie wichtige Abschätzung der zukünftigen Schiffsaktivität unter Berücksichtigung möglicher Nordpolarrouten ebenfalls nur anhand von räumlich aufgelösten Schiffsbewegungen erfolgen. Daher wurde für die Emissionsberechnung dieser Studie eine solche Schiffsstatistik von Lloyds erworben.

Der Anbieter maritimer Informationen LMIU (Lloyd's Maritime Intelligence Unit) nahm seinen Ursprung in Edward Lloyd's London Coffee Shop im 18. Jahrhundert, einem weltweiten Zentrum der marinen Versicherung (LLOYD'S LIST 2008). In Form von Büchern, Magazinen oder als Website bietet der LMIU-Datenservice heute aktuelle, detaillierte Informationen über circa

100.000 Schiffe und deren Eigenschaften, Besitzer, Bewegungen, Unfälle oder Verspätungen (LMIU 2008a), 2.800 kommerzielle Häfen und 20.000 Hafenanlagen (LMIU 2008b). Als Informationsquellen für Schiffseigenschaften dienen dabei führende Registrierungs- und Klassifikations-Gesellschaften und Schiffsbesitzer, für Schiffsbewegungen dagegen Berichte von 700 exklusiven Agenten und Tausenden weltweiten Korrespondenten in Hafenbehörden und Küstenwachen (LMIU 2008a). Weiterhin betreibt LMIU eines der global größten AIS-Netzwerke (Automatic Identification System) mit 450 landgestützten Empfangsstationen, die in Küstennähe regelmäßige, individuelle Positionsmeldungen von schiffsgestützten Sendern aufzeichnen (LMIU 2008c). Zur Vermeidung von Schiffskollisionen werden solche AIS-Reporte von der IMO seit 2004 von allen Schiffen einer Größe von mindestens 300 Bruttoregistertonnen auf internationalen Reisen gefordert. Zur Verbesserung der Reichweite auf globale Abdeckung soll ab 2008 das satellitengestützte LRIT-System (Long Range Identification and Tracking) zur Beobachtung des internationalen Schiffsverkehrs eingesetzt werden.

Der erworbene LMIU-Datensatz beinhaltet alle Schiffsbewegungen der internationalen Handelsflotte einer Größe von mindestens 100 Bruttoregistertonnen, die in den Monaten Februar, April, Juni, August, Oktober oder Dezember des Jahres 2006 den Starthafen verließen, ungeachtet des entsprechenden Ankunftsdatums am Zielhafen. Da der Datensatz für das gesamte Jahr 2006 aus finanziellen Gründen nicht erworben werden konnte, werden diese ausgewählten Schiffsbewegungen als repräsentativ für die Schiffsaktivität des gesamten Jahres angenommen und auf diesen Zeitabschnitt extrapoliert. Für die exakte Emissionsberechnung stellt dies allerdings eine Unsicherheit dar (WANG et al. 2007b). Der Datensatz besteht aus drei unterschiedlichen ASCII-Datenbanken mit Angaben zu Schiffsbewegungen, -eigenschaften und Häfen (siehe Tab. 3.1). Die Bewegungsdatenbank umfasst 1.001.123 Schiffsbewegungen der vorliegenden sechs Monate zwischen bestimmten Start- und Zielhäfen, die zunächst nach der individuellen LMIU-Nummer jedes Schiffes und anschließend nach der Bewegungs-ID sortiert wurden. Somit liegen alle Bewegungen eines Schiffes in chronologischer Reihenfolge untereinander vor. Die Schiffsdatenbank beinhaltet die Schiffseigenschaften von 90.840 Schiffen und ist über das Feld „LMIU-Nummer“ mit der Bewegungsdatenbank verlinkt. Motoreigenschaften der unterschiedlichen Schiffe, wie Angaben zu Anzahl, Typ, Motorkraft und Auslast der installierten Haupt- und Hilfsmotoren, standen nicht zur Verfügung, so dass zur Emissionsberechnung nach Schiffstypen gemittelte Motorwerte verwendet werden. Die Hafendatenbank umfasst schließlich Angaben zu 8.541 Häfen und ist über das Attribut „Hafen-ID“ mit der Bewegungsdatenbank verknüpft.

Tab. 3.1: Unterschiedliche Attribute der LMIU-Bewegungs-, Schiffs- und Hafendatenbanken und deren Verlinkung in Farbe.

Bewegungsdatenbank (1.001.123 Einträge)	Schiffsdatenbank (90.840 Einträge)	Hafendatenbank (8.541 Einträge)
LMIU-Nummer	LMIU-Nummer	Hafen-ID
Bewegungs-ID ¹	Name	Name
Typ ²	Flagge	Land
Starthafen-ID	Baujahr	Region ⁵
Ankunftsdatum (Starthafen)	Bruttoreumgehalt [t]	Typ ⁶
Schätzung ³	Länge [m]	geograph. Breite (Richtung) ⁷
Abfahrtsdatum (Starthafen)	Breite [m]	geograph. Breite [°]
Schätzung ³	Tiefgang [m]	geograph. Breite [']
Zielhafen-ID	Typ ⁴	geograph. Breite ["]
Ankunftsdatum (Zielhafen)	Untertyp ⁴	geograph. Länge (Richtung) ⁸
Schätzung ³		geograph. Länge [°]
Abfahrtsdatum (Zielhafen)		geograph. Länge [']
Schätzung ³		geograph. Länge ["]

¹ ID aller Bewegungen eines Schiffes in chronologischer Reihenfolge

² Bewegungstyp, z.B. Ankern, Fahrt, Manöver

³ Angabe, ob Ankunfts- oder Abfahrtsdatum geschätzt wurde

⁴ Schiffstyp, -untertyp, z.B. Tanker, Container, Stückgutfrachter, Massengutfrachter

⁵ 25 verschiedene Lloyds-Hafenregionen, z.B. Nordeuropa, Zentralamerika, China

⁶ Hafentyp, z.B. Hafen, Ankerplatz, Land (wenn keine näheren Angaben)

⁷ Richtung der geograph. Breite: N oder S

⁸ Richtung der geograph. Länge: E oder W

3.2 Verschiedene Methodiken zur Routenfindung

Die gegebene Lloyds-Schiffsstatistik beinhaltet in chronologischer Reihenfolge die in sechs Monaten des Jahres 2006 von einem bestimmten Schiff angelaufenen Häfen mit Angabe der geographischen Koordinaten, jedoch ohne Informationen zum genauen Routenverlauf (siehe Kapitel 3.1). Um aus diesem Datensatz eine globale Schiffsverkehrsdichte zu erzeugen, bedarf es eines Algorithmus zur Routenfindung, welcher zwei vorgegebene Punkte auf dem in dieser Studie verwendeten, geographischen $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter auf dem kürzesten Weg miteinander verbindet, ohne dabei Hindernisse wie Land oder Meeres zu überqueren. Zur Lösung dieser Aufgabenstellung wurden drei verschiedene Routenfindungs-Methodiken entwickelt und erprobt, die sich der unterschiedlichen Ansätze Großkreis, Routennetz und Wellenausbreitung bedienen und in den nun folgenden Kapiteln 3.2.1 bis 3.2.3 vergleichend vorgestellt werden. Obwohl die ersten beiden Methodiken in ihrer aktuellen Ausprägung noch Verbesserungspotential aufweisen, wurde ihre

weitere Veränderung mit der Entwicklung des dritten Ansatzes abgebrochen, weil dieser exaktere und sicherere Lösungen erstellt und entscheidende Probleme der ersten beiden Verfahren generell nicht gelöst werden konnten.

3.2.1 Großkreis-Methodik

Der Großkreis oder die Orthodrome stellt die kürzeste Verbindung zweier Punkte auf einer Kugel dar und eignet sich somit grundsätzlich zur Bestimmung der kürzesten Route zwischen zwei Hafepunkten auf der Erdkugel. Daher wurden zwei Ansätze erarbeitet, einen Großkreis durch zwei vorgegebene Punkte des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters zu konstruieren, der Laufalgorithmus und die Kreisformel im dreidimensionalen Raum, auf die nun im Folgenden eingegangen wird.

Laufalgorithmus

Im ersten Ansatz wird die kürzeste Verbindung zwischen zwei Häfen durch einen Laufalgorithmus gefunden, der die gesuchte Route ausgehend vom Starthafen schrittweise zum Zielhafen aufbaut. Für eine aktuell ausgewählte Routen-Gitterbox des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters wird für jede noch nicht befahrene Gitterbox der direkten 8-Gitterbox-Nachbarschaft das Distanzmaß DM nach Gleichung (3.1) ermittelt und diejenige Gitterbox mit dem kleinsten Distanzmaß als nächste Routen-Gitterbox ausgewiesen:

$$DM = D(\text{aktueller Routenpunkt}, \text{Nachbar-Gitterbox}) + D(\text{Nachbar-Gitterbox}, \text{Zielhafen}) \quad (3.1)$$

Als Distanz D wird hierbei der direkte Großkreis-Abstand zwischen zwei Punkten auf der Erdkugel verwendet, der durch den Seitenkosinussatz aus der sphärischen Trigonometrie ermittelt werden kann (LOTHER 2007). Er ergibt sich aus den geographischen Längen $\varphi_{1,2}$ und Breiten $\lambda_{1,2}$ der beiden Gitterbox-Mittelpunkte im Bogenmaß und dem mittleren Erdradius $r = 6378,137$ km nach Gleichung (3.2):

$$D = r \cdot \arccos[\sin(\varphi_1) \cdot \sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1)] \quad (3.2)$$

Zur exakten Berechnung der zunehmend kleiner werdenden Distanzen in Polnähe muss dabei die Genauigkeit der eingehenden Variablen von vier auf acht Nachkommastellen erhöht werden. Aufgrund der idealisierten Kugeldarstellung der Erde stellt diese Distanzberechnung allerdings nur eine Annäherung an die tatsächliche Großkreis-Distanz dar. Eine weitere Verbesserung könnte durch die Berücksichtigung der Erdabplattung eines Referenz-Ellipsoids erreicht werden. Die Annäherung aus (3.2) soll hier jedoch genügen.

Der Routenverlauf, der sich aus der Verwendung des Distanzmaßes DM aus Gleichung (3.1) ergibt, weicht aufgrund eines deutlichen Routenknicke entscheidend von der idealen Großkreis-Form ab. Eine mögliche Erklärung hierfür wird in Kapitel 3.2.3 gegeben. Eine bessere Darstellung der angestrebten Großkreis-Form zeigt sich beim Einsatz des Distanzmaßes DM aus Gleichung (3.3), weil dieses die niedrigsten Werte genau auf dem anzunähernden Großkreis aufweist:

$$DM = D(\text{Starthafen}, \text{Nachbar-Gitterbox}) + D(\text{Nachbar-Gitterbox}, \text{Zielhafen}) \quad (3.3)$$

Das Distanzmaß wächst jedoch mit Entfernung vom idealen Großkreis stark an. Sobald also eine Landmasse die direkte Großkreis-Verbindung blockiert, zeigt die ermittelte Route eine Umkehr um 180° und läuft parallel zum zuvor befahrenen Großkreis in die Ursprungsrichtung zurück. Eine Landumrundung kann mit diesem Distanzmaß somit nicht erfolgen.

Als Alternative zur Großkreis-Distanz kann in das Distanzmaß auch der Kurswinkel des gesuchten Großkreises zum Nordpol nach Gleichung (3.4) eingehen, wobei der Kurswinkel an der aktuell ausgewählten Routen-Gitterbox durch den linearen Übergang des Starthafen-Kurswinkels zu demjenigen des Zielhafens ermittelt werden kann. Jedoch ergeben sich auch hier dieselben Probleme der Routenkicks und der Landumrundung wie zuvor:

$$DM = \text{Kurswinkel(aktuelle Gitterbox)} - \text{Winkel(Nordpol, aktuelle Gitterbox, Nachbar-Gitterbox)} \quad (3.4)$$

Kreisformel im dreidimensionalen Raum

Eine bessere Konstruktion des Großkreises zwischen zwei beliebigen Punkten des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters ermöglicht die Formel zur Darstellung einer Kreislinie im dreidimensionalen Raum (HOCHSCHULE NIEDERRHEIN 2008), deren Anwendung nun vorgestellt werden soll. Allerdings wird auch hier zur Vereinfachung die Erde als Kugel angenommen.

Zunächst werden die Kugelkoordinaten Radius r , Azimutalwinkel φ und Polarwinkel θ des Start- und Zielhafens, hier gegeben durch den konstanten Erdradius und die geographischen Koordinaten der Hafenpunkte, durch Koordinatentransformation in die kartesischen Koordinaten x , y und z überführt, deren Koordinatenursprung der Mittelpunkt der Erdkugel darstellt. Somit ist die Ebene E , in welcher der gesuchte Großkreis liegt, eindeutig festgelegt durch die Koordinaten der drei Punkte Starthafen ($x_s / y_s / z_s$), Zielhafen ($x_e / y_e / z_e$), und Kugelmittelpunkt M ($0 / 0 / 0$) bzw. durch die beiden Ortsvektoren des Starthafens $\vec{v}_s = (x_s, y_s, z_s)$ und Zielhafens $\vec{v}_e = (x_e, y_e, z_e)$. Aus \vec{v}_s und \vec{v}_e wird durch zwei Kreuzprodukte der Vektor $\vec{v}_{90} = \vec{v}_s \times (\vec{v}_s \times \vec{v}_e)$ ermittelt, der zu \vec{v}_s orthogonal ist und mit diesem zusammen die Großkreis-Ebene E aufspannt. Durch Anwendung der Formel zur Darstellung eines Kreises im dreidimensionalen Raum (3.5) können alle weiteren Punkte X ($x / y / z$) des gesuchten Großkreises zwischen den beiden, gegebenen Start- und Zielhafepunkten bestimmt werden (HOCHSCHULE NIEDERRHEIN 2008):

$$X = M + r \cdot \vec{v}_s \cdot \cos(t) + r \cdot \vec{v}_{90} \cdot \sin(t) \quad (3.5)$$

Indem t für einen Kreisdurchgang von 0 bis 360° bzw. 2π im Bogenmaß läuft und für jedes t ein bestimmter Großkreis-Punkt X ermittelt wird, wird der gesamte Großkreis erzeugt. Lücken im Großkreis-Verlauf auf dem $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter konnten ab einer t -Schrittweite von $1/10^\circ$ behoben werden. Die ermittelten, kartesischen Großkreis-Punkte X werden abschließend in Kugel- und dann in geographische Koordinaten zurück transformiert und die dazugehörigen Gitterboxen im vorgegebenen $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter markiert.

Von den berechneten Großkreis-Gitterboxen werden nun diejenigen als nicht befahrbar ausgewiesen, die durch Landmassen des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters blockiert werden. Zur Landumrundung

wird alternativ ein befahrbares Küstenroutennetz konstruiert, das genau diejenigen Meeres-Gitterboxen beinhaltet, die in direkter Nachbarschaft von Land-Gitterboxen liegen. Zur Routenfindung zwischen Start- und Zielhafen stehen somit die befahrbaren Abschnitte des ermittelten Großkreises über offenem Ozean und das Küstenroutennetz zur Landumrundung zur Verfügung. Die kürzeste Route wird durch den zuvor beschriebenen Laufalgorithmus gefunden. Als Distanzmaß wird dabei jenes aus Gleichung (3.1) verwendet, weil das Problem des Routenknicks durch die vorgegebene Großkreis-Form bereits gelöst wurde, das Problem der 180°-Routenumkehr in Landnähe beim Distanzmaß aus Gleichung (3.3) jedoch weiterhin besteht. Für die spätere Umlegung auf Polarrouten wird dabei auch die Gesamtdistanz der gefundenen Route als Summe der Großkreis-Distanzen der einzelnen Routen-Gitterboxen nach Gleichung (3.2) ermittelt.

Die Großkreis-Methodik findet generell eine sichere und exakte Lösung über offenem Ozean, zeigt aber mehrere kaum oder nur sehr aufwändig lösbare Unsicherheiten in Landnähe. In Abb. 3.1 (links) zeigt sich ein deutlicher Routenknick beim Übergang vom Großkreis über offenem Ozean zum Küstenroutennetz in Landnähe. Dieser kann vermieden werden, wenn in einem zweiten Routenfindungs-Durchlauf mehrere Großkreis-Abschnitte berechnet werden, die sich jeweils über offenem Ozean erstrecken und Start- und Zielhafenpunkte mit den Landspitzen von größeren, dazwischen liegenden Kontinenten verbinden. Diese Landspitzen-Gitterboxen werden im ersten Routenfindungs-Lauf bei der Durchfahrt markiert. Im vorliegenden Beispiel kann die kürzeste Route gefunden werden durch Aneinanderreihung der getrennt berechneten Großkreis-Abschnitte vom Startpunkt zum Panama-Kanal, von diesem nach Gibraltar und von dort schließlich zum Zielpunkt. Weiterhin bleibt der Laufalgorithmus in Buchten hängen, wenn die letzte Routen-Gitterbox ausschließlich von Land oder bereits befahrenen Gitterboxen eingeschlossen wird, und findet somit überhaupt keine Route zum Zielhafen (siehe Abb. 3.1, rechts). Auch dieses Problem kann behoben werden, indem manuell alle Einbuchtungen im Küstenroutennetz entfernt werden.

Die entscheidende Unsicherheit zeigt sich jedoch, wenn der Laufalgorithmus zwar den Zielhafen erreicht, aber den falschen, längeren Weg zur Umrundung einer Landmasse wählt (siehe Abb. 3.1, unten). Der Laufalgorithmus weist einerseits keine Möglichkeit auf, seine Laufrichtung gezielt zu steuern und somit beide Umrundungswege zu durchfahren und miteinander zu vergleichen, andererseits basiert er lediglich auf der Betrachtung der direkten 8-Gitterbox-Nachbarschaft. Daher findet er generell keinen Weg, die Ausdehnung einer bevorstehenden Landmasse abzuschätzen und die kürzeste Landumrundung zu finden. Diese Problematik konnte auch mit größeren Gitterbox-Nachbarschaften nicht sicher gelöst werden, so dass die Großkreis-Methodik in dieser Studie nicht zur Erstellung globaler Schiffsverkehrsdichten verwendet werden konnte.

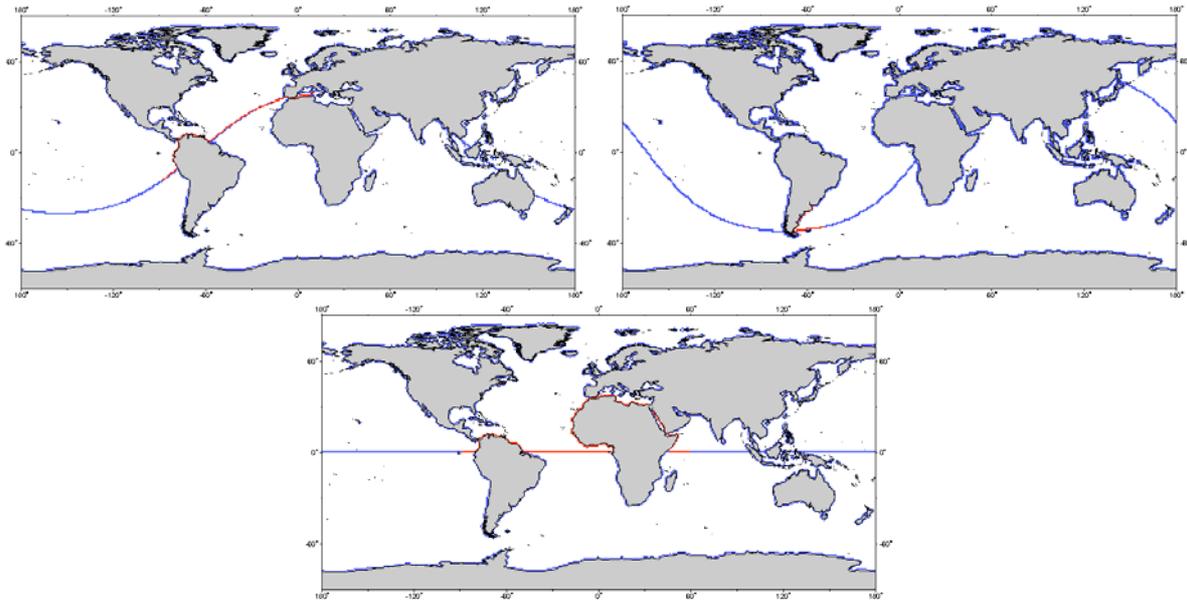


Abb. 3.1: Probleme bei der Routenfindung (rot) auf Großkreis und Küstenroutennetz (blau) der Großkreis-Methodik: Routenknick beim Übergang zum Küstenroutennetz (links), Hängenbleiben in Buchten (rechts), Umrunden von Landmassen auf dem falschen, längeren Weg (unten).

3.2.2 Routennetz-Methodik

Aus der Betrachtung der globalen Schiffsverkehrsdichten in Kapitel 2.1.2 könnte der Schluss gezogen werden, dass der größte Anteil des Weltseehandels über wenige, bestimmte Hauptschiffsrouten zwischen den wichtigsten Welthäfen wie Rotterdam, New York oder Tokio verläuft. Auf der Südhalbkugel heben sich diese linienförmigen Verbindungsrouten sehr deutlich hervor, wohingegen sie im Nordatlantik und -pazifik aufgrund der höheren Schiffsaktivität stärker streuen. Folglich kann eine vereinfachte Schiffsverkehrsdichte erreicht werden, indem ein Netzwerk aus vorgefertigten Schiffsrouten aufgebaut wird, die nur stark frequentierte Welthäfen miteinander verbinden, aber dennoch den größten Anteil der Weltschiffsaktivität abdecken. Von solchen Routennetzen wurden in dieser Studie zwei unterschiedliche entwickelt, auf die im Folgenden eingegangen werden soll: das EDGAR-Routennetz und das Großkreis-Routennetz.

EDGAR-Routennetz

Im ersten in dieser Diplomarbeit entwickelten und daher sehr einfachen Ansatz zur Routenfindung werden als wichtigste Hauptschiffsrouten diejenigen des EDGAR-Datensatzes (Environmental Database for Global Atmospheric Research), eines der ersten Top-down-Schiffsemissionskataster, herangezogen. Dieser erstellte zur räumlichen Emissionsverteilung eine einfache Schiffsverkehrsdichte, die nur aus einigen wenigen, globalen Hauptschiffsrouten und deren zugehörigen Intensitäten besteht (OLIVIER et al. 1999). Zum Aufbau eines Routennetzes werden diese gegebenen Schiffsrouten in einzelne Verbindungssegmente mit unterschiedlichen Routennummern eingeteilt. Weiterhin werden vier Segmente ergänzt, von denen zwei der Nordwest- und Nordostpassage aus GRANIER et al. (2006) nachempfunden sind (siehe Abb. 2.2) und

zwei weitere Anknüpfungen dieser Polarrouten an das EDGAR-Routennetz im Beringmeer darstellen (siehe Abb. 3.2), welche je nach Gegenwarts- oder Zukunftsszenario aus- oder eingeschaltet werden können. Insgesamt ergeben sich somit 52 Verbindungssegmente und 41 dazwischen liegende Knotenpunkte. Für die Berechnung der Gesamtdistanzen der Segmente wird auch hier die Summe der Großkreis-Distanzen der einzelnen Routen-Gitterboxen nach Gleichung (3.2) herangezogen, wobei teilweise Lücken im EDGAR-Routenverlauf geschlossen werden müssen.

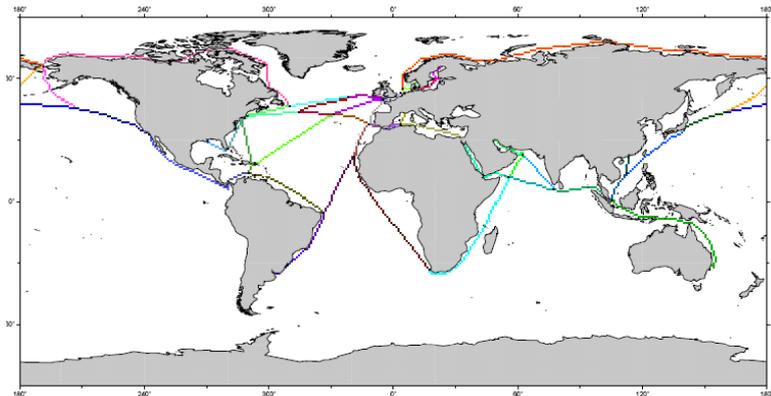


Abb. 3.2: Einfaches EDGAR-Routennetz mit ergänzten Nordpolarrouten und farblicher Darstellung einzelner Routensegmente, Quelle: Verändert nach OLIVIER et al. 1999.

Nun kann die kürzeste Verbindung zwischen beliebigen Start- und Zielhäfen gefunden werden, indem ein Suchalgorithmus ausgehend vom Start-Knotenpunkt alle abgehenden Verbindungssegmente systematisch unter Aufsummierung der aneinander gereihten Streckenlängen durchtestet bis die kürzeste Kette an Verbindungssegmenten zum Ziel-Knotenpunkt gefunden ist. Somit stellt dieser Suchalgorithmus eine einfache, aber weniger effiziente Variante des im folgenden Kapitel 3.2.3 angewendeten, schnelleren Wellenausbreitungs-Algorithmus dar. Werden in der Routenfindung Start- oder Zielhäfen betrachtet, die nicht als Knotenpunkte im Routennetz vorliegen, wird der nach der euklidischen Distanz $D = \sqrt{(\Delta\lambda)^2 + (\Delta\varphi)^2}$ der geographischen Koordinaten λ und φ jeweils nächstgelegene Knotenpunkt verwendet. Dieser „Rundungsfehler“ spielt beim EDGAR-Routennetz aufgrund der geringen Knotenzahl eine sehr bedeutende Rolle. Um diesen zu reduzieren, wird im Folgenden ein weiteres Routennetz mit weitaus höherer Knotenzahl entwickelt, in dem nur noch kleine, sehr selten frequentierte Häfen als Knotenpunkte fehlen.

Großkreis-Routennetz

In einem verbesserten Ansatz werden die am häufigsten angelaufenen Welthäfen aus einer statistischen Auswertung der Lloyds-Schiffsstatistik von 2006 ermittelt (siehe Kapitel 3.3.2) und gemeinsam mit zentral gelegenen Landzungen, wie z.B. Kap Hoorn oder Kap der Guten Hoffnung, und regional wichtigen Häfen als Knotenpunkte eines umfassenderen Routennetzes ausgewiesen. Die wichtigsten Verbindungssegmente werden im Vergleich mit Schiffsverkehrsdichten und dem EDGAR-Datensatz ausgewählt und unter Anwendung der Großkreis-Methodik aus Kapitel 3.2.1 auf das $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter gebracht. Das Problem der mangelhaften Landumrundung kommt

hierbei nicht zum Tragen, weil bei der Auswahl der Knotenpunkte darauf geachtet wird, dass deren Verbindungssegmente als direkte Großkreis-Routen über den offenen Ozean ohne Landkontakt aufgebaut werden können. Kleinere Inseln werden dabei vom Laufalgorithmus sicher umfahren. Das Routennetz wird nach einzelnen Meeresgebieten getrennt aufgebaut und anschließend miteinander verbunden. Zwei Teilbereiche dieses Routennetzes zeigt Abb. 3.3: den Südatlantik mit 23 Knotenpunkten und 60 Verbindungssegmenten und den Golf von Mexiko/Karibik mit 14 Knotenpunkten und 31 Verbindungssegmenten. Um die Gesamtknotenzahl nicht unnötig zu erhöhen, werden im Gegensatz zum EDGAR-Routennetz die Schnittpunkte zwischen verschiedenen Verbindungssegmenten über dem offenen Ozean nicht als neue Knotenpunkte ausgewiesen. Die Berechnung der Gesamtdistanzen der einzelnen Verbindungssegmente erfolgt schließlich analog zum EDGAR-Routennetz, ebenso die Routenfindung zwischen Start- und Zielhafen mittels Suchalgorithmus, wobei der „Rundungsfehler“ hier aufgrund der hohen Knotendichte erheblich minimiert wurde.

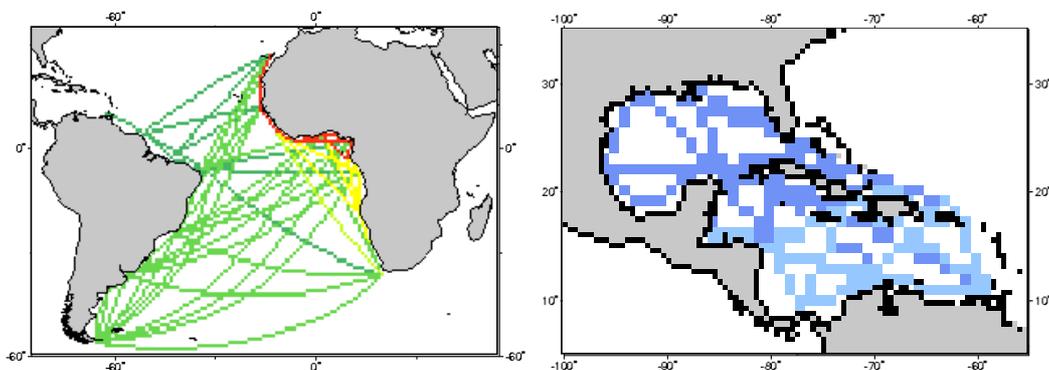


Abb. 3.3: Großkreis-Routennetz für den Südatlantik (links) und den Golf von Mexiko/Karibik (rechts) durch Verbindung wichtiger Lloyds-Häfen über Großkreise.

Die Routennetz-Methodik besitzt im Vergleich zur Großkreis-Methodik den großen Vorteil, dass in jedem Fall eine Verbindungsrouten vom Start- zum Zielhafen gefunden wird. Dabei werden Landmassen auch großräumig und ohne Routenkicks umfahren, weil die Verbindungssegmente des Routennetzes im Gegensatz zum Laufalgorithmus der Großkreis-Methodik die Ausmaße der vorliegenden Landmassen „kennen“. Dennoch bleibt das bereits angesprochene Rundungsproblem. Die 8.431 verschiedenen Häfen des Lloyds-Datensatzes oder 2.556 unterschiedlichen Hafen-Gitterboxen im $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter werden nur ungenügend durch ein Routennetz von 200-300 Knotenpunkten repräsentiert. Somit ergeben sich Fehler bei der Wahl der Start- und Zielknoten und Umwege aufgrund ungenügend vieler Verbindungssegmente. Die Großkreis-Methodik oder das Küstenroutennetz aus Kapitel 3.2.1 könnten fehlende Routenstücke von gegebenen Häfen zu nächstgelegenen Knotenpunkten erstellen. Dennoch legt eine Route, die an einem nicht als Knotenpunkt vorliegenden Hafen beginnt, einen unrealistischen Umweg zurück, wenn sie erst am nächstgelegenen Knotenpunkt ins Routennetz einsteigt. So zeigt auch die Routennetz-Methodik ein nur sehr zeitaufwändig unter Eingliederung aller Lloyds-Hafen-Gitterboxen ins Routennetz lösbares Problem. Daher kann auch diese Routenfindungs-Methodik in dieser Diplomarbeit keine Anwendung finden. Ein ähnliches Routennetz wurde im STEEM-

Modell für Nordamerika aufgebaut und strebt in den nächsten Jahren erst eine globale Abdeckung an (siehe Kapitel 2.1.3) (WANG et al. 2007a).

3.2.3 Wellenausbreitungs-Methodik

Die letzte hier erarbeitete Routenfindungs-Methodik, eine abgewandelte Form des Dijkstra-Algorithmus (CORMEN et al. 2001, Kapitel 24), erweist sich als die sicherste und exakteste und wird auch im Kapitel 3.3 zur Berechnung globaler Schiffsverkehrsdichten herangezogen.

Der ursprüngliche Dijkstra-Algorithmus entstammt der mathematischen Graphentheorie und sucht den kürzesten Pfad in einem Graphen, einem Netzwerk aus Knoten und verbindenden Kanten, das beispielsweise eine Straßenkarte mit Kreuzungspunkten und Straßensegmenten repräsentiert, die mit ihren Streckenlängen gewichtet sind. Die Vorgehensweise des Algorithmus beruht dabei auf der Tatsache, dass jeder Unterpfad eines kürzesten Pfades zwischen zwei Knoten eines Graphen ebenfalls den kürzesten Pfad darstellt (CORMEN et al. 2001, Kapitel 24). Eine Weiterentwicklung für die Routenfindung auf einem gleichförmigen Rastergitter mit unpassierbaren Hindernissen bietet der Maze Routing-Algorithmus, der verspricht, die kürzeste Verbindung zweier Gitterboxen zu finden, sofern diese existiert. Sein Vorgehen kann mit einer Welle verglichen werden, die sich vom Startpunkt gleichmäßig in alle Richtungen ausbreitet, alle Hindernisse des Punktrasters umrundet und den kürzesten Weg zum Zielpunkt findet. Der Algorithmus findet zahlreiche Anwendungen in der Navigation, beispielsweise auch bei der Ermittlung der optimalen Realzeit-Schiffsrouten zur Vermeidung von Kollisionen mit anderen Schiffen (CHANG et al. 2003).

Das in dieser Studie verwendete geographische $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter ist jedoch keineswegs gleichförmig, weil die Abstände der Gitterboxen zum Pol abnehmen. Folglich verläuft auch die Wellenausbreitung nicht gleichmäßig, sondern in Polnähe beschleunigt. Zum Aufbau einer passenden Routenfindungs-Methodik wird die allgemeine Vorgehensweise des Dijkstra-Algorithmus hier aus CORMEN et al. (2001, Kapitel 24) entnommen, der zugehörige Graph allerdings in Anlehnung an CHANG et al. (2003) als geographisches Rastergitter aufgebaut.

Wellenausbreitungs-Methodik auf geographischem Rastergitter

Im Weiteren soll nun der Ablauf des Dijkstra-Algorithmus auf geographischem Rastergitter erläutert werden. Dabei sind die folgenden drei Wertefelder von zentraler Bedeutung. Die Feldgrößen der letzten beiden werden zu 64.800 ($360^\circ \times 180^\circ$) gewählt, so dass sie Werte für alle Gitterboxen des Modellgitters aufnehmen können, deren geographischen Längen *lon* und Breiten *lat* durch die Umformung aus Gleichung (3.6) in Indexwerte zwischen 1 und 64.800 übergehen:

$$index = (lon + 181) + (lat + 90) \cdot 360 \quad (3.6)$$

- Die Wellenfront-Liste umfasst die Indizes aller Gitterboxen auf der sich ausbreitenden Wellenfront. Die anfangs leere Wellenfront-Liste nimmt mit der sich ausbreitenden Welle immer mehr Indizes auf und so wächst ihre Feldgröße dynamisch an.

- Das Vorgänger-Feld beinhaltet für jeden Index der Wellenfront-Liste den Indexwert derjenigen Gitterbox, von der ausgehend die voranschreitende Welle die dem Wellenfront-Index entsprechende Gitterbox erreicht hat. Initialisiert werden die Indexwerte des gesamten Modellgitters mit dem Startwert -1, weil sie aufgrund der anfangs leeren Wellenfront-Liste noch keine Vorgänger aufweisen.
- Das Distanz-Feld speichert für jede bereits von der Welle erreichte Gitterbox die zurückgelegte Distanz zum Startpunkt ab, wobei solche direkt auf der Wellenfront zeitweise ein negatives, solche hinter der Wellenfront dann ein positives Vorzeichen erhalten. Als Initialwert beinhaltet es für alle Gitterboxen des Modellgitters den Wert 0.

Zur Initialisierung des Startpunktes wird dessen Indexwert in die Wellenfront-Liste aufgenommen. Weiterhin erhält er den Vorgängerwert 0, der keinem Vorgänger entspricht, und einen beliebigen, negativen Start-Distanzwert nahe 0. Dieser Wert dient ausschließlich zur Markierung, dass der Startpunkt anfangs direkt auf der Wellenfront liegt, und wird nach Ablauf des Dijkstra-Algorithmus wieder auf die exakte Distanz des Startpunkts zu sich selbst von 0 korrigiert. Ausgehend vom Startpunkt breitet sich nun die Welle aus. In einer Endlosschleife werden folgende Schritte in der vorgegebenen Reihenfolge vollzogen:

- Der Schleifendurchlauf wird abgebrochen, wenn die Wellenfront-Liste leer ist, also keine Indexwerte mehr beinhaltet. Die Welle hat das Ende ihrer Ausbreitung auf dem gegebenen Rastergitter erreicht, ohne eine Route vom Start- zum Zielpunkt gefunden zu haben.
- In der Wellenfront-Liste wird derjenige Indexwert gesucht, der den betragsmäßig kleinsten, negativen Distanzwert zum Startpunkt aufweist, und für die weitere Bearbeitung dessen geographische Koordinaten aus der Inversion von Gleichung (3.6) ermittelt:

$$lon = \text{mod}(\text{index}/360) - 181 \quad (3.7)$$

$$lat = \text{int}(\text{index}/360) - 90 \quad (3.8)$$

Dabei ermittelt die `mod()`-Funktion den ganzzahligen Divisionsrest und die `int()`-Funktion das abgerundete Divisionsergebnis. Jedoch muss eine Doppeldeutigkeit am *lon*-Modellgitterrand behoben werden, indem ein falsch berechnetes, nicht existierendes Ergebnis der Form $(-181/lat)$ in das richtige Resultat $(179/lat-1)$ umgeformt wird.

- Der Schleifendurchlauf wird beendet, wenn der aktuell aus der Wellenfront-Liste ausgewählte Indexwert demjenigen des Zielpunktes entspricht. Sein Distanzwert erhält ein positives Vorzeichen, so dass er nun hinter der Wellenfront liegt. Nach CORMEN et al. (2001) weist jeder Knoten hinter der Wellenfront in seinem Distanzfeld die kürzeste Entfernung zum Startpunkt auf. Daher wurde die kürzeste Route vom Start- zum Zielpunkt gefunden, wobei die Gesamtroutendistanz der Differenz zwischen dem Distanzwert des Zielpunktes zum Startpunkt und dem Pseudo-Distanzwert des Startpunktes selbst entspricht, der wie oben bereits angesprochen nahe 0 liegt.

- Ausgehend von der aktuell ausgewählten Gitterbox werden nun systematisch alle Gitterboxen der direkten 8-Gitterbox-Nachbarschaft bearbeitet. Falls die Nachbar-Gitterbox weder durch ein Hindernis wie Land versperrt wird, noch schon bearbeitet wurde, also bereits hinter der Wellenfront liegt, wird deren Großkreis-Distanz zur aktuell ausgewählten Gitterbox nach Gleichung (3.2) ermittelt. Für jede Nachbar-Gitterbox mit diesen Voraussetzungen ergeben sich nun zwei Möglichkeiten:
 - Liegt die Nachbar-Gitterbox noch vor der Wellenfront, wird sie nun in die Wellenfront-Liste aufgenommen mit dem Indexwert der aktuell ausgewählten Gitterbox als Vorgängerwert. Als negativen Distanzwert erhält sie die Summe aus dem Distanz-Wert der aktuell ausgewählten Gitterbox und der berechneten Großkreis-Distanz von dieser zur Nachbar-Gitterbox.
 - Liegt die Nachbar-Gitterbox jedoch auf der Wellenfront, weist sie bereits einen negativen Wert im Distanz-Feld auf. In einem als Relaxation bezeichneten Schritt wird nun getestet, ob der Distanz-Wert dieser Nachbar-Gitterbox betragsmäßig größer ist als die Summe aus dem Distanz-Wert der aktuell ausgewählten Gitterbox und der berechneten Großkreis-Distanz von dieser zur Nachbar-Gitterbox. Falls dies nicht der Fall ist, bleibt der vorhandene Distanzwert der Nachbar-Gitterbox erhalten, falls doch, wird dieser durch den neuen, kleineren Distanzwert ersetzt und der Vorgängerwert der Nachbar-Gitterbox entsprechend auf die aktuell ausgewählte Gitterbox aktualisiert. Folglich wurde für diese Nachbar-Gitterbox ein kürzerer Weg zum Startpunkt als der bisherige gefunden.
- Nach der Bearbeitung wird der Index der aktuell ausgewählten Gitterbox aus der Wellenfront-Liste gelöscht und deren Distanzwert erhält ein positives Vorzeichen. Damit wird sie als bereits bearbeitet ausgewiesen und liegt nun hinter der Wellenfront.

Falls die Endlosschleife durch das Erreichen des Zielpunktes beendet wird, liegen nun für alle von der Wellenausbreitung erreichte Gitterboxen Vorgänger- und Distanzwerte ungleich 0 vor. So kann nun wiederum eine Schleife aufgebaut werden, die ausgehend vom Index des Zielpunktes den jeweils zugehörigen Vorgänger-Indexwert ermittelt bis der Index des Startpunktes erreicht und somit nach CORMEN et al. (2001) die kürzeste Verbindung gefunden wurde. Die gesamte Vorgehensweise des Dijkstra-Algorithmus zeigt Abb. 3.4 anhand eines Beispiels.

Die Routenfindung schlägt nur dann fehl, wenn aufgrund der Lage der Hindernisse im Rastergitter keine direkte Verbindungsrouten zwischen Start- und Zielhafen-Gitterboxen existiert, weil diese beispielsweise aufgrund der Rundungsfehler der $1^\circ \times 1^\circ$ -Land-Wasser-Maske auf meeresnahe Land-Gitterboxen fallen (siehe Kapitel 3.3.1). Damit auch in diesen Fällen eine Routenfindung möglich ist, werden die jeweiligen Gitterboxen nur für die folgende Wellenausbreitung als Wasser ausgewiesen und dann wieder zurückgesetzt. Diese kurzzeitige Korrektur der Land-Wasser-Maske wird nicht vollzogen für durch Meereis blockierte Häfen oder für Binnenhäfen, die sich in keiner direkten Nachbarschaft von Meeres-Gitterboxen befinden (siehe Kapitel 3.3.2).

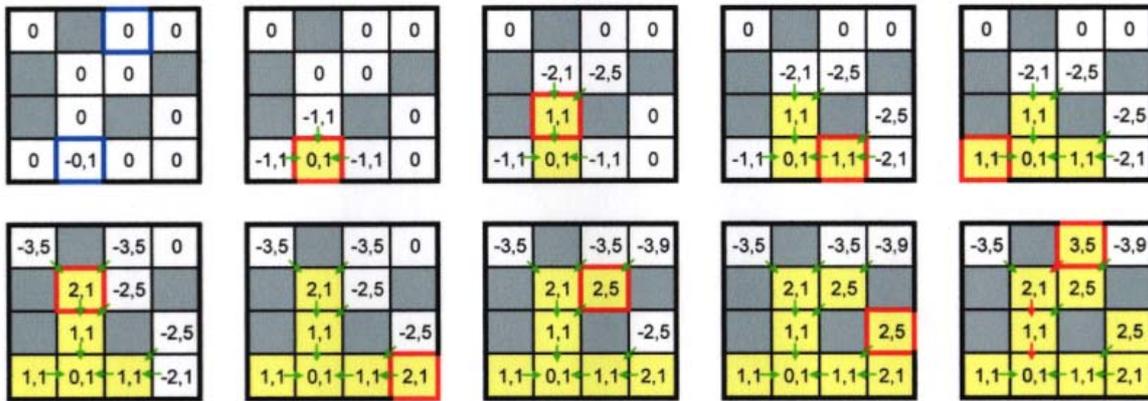


Abb. 3.4: Beispiel einer Routenfindung auf gleichförmigem Modellgitter anhand des Dijkstra-Algorithmus: Abgebildet ist das Distanz-Feld, wobei Hindernisse grau eingefärbt und Start- und Zielpunkte anfangs blau umrandet sind. Ausgehend vom Startpunkt breitet sich die Welle aus. Die aktuell ausgewählte Gitterbox wird rot umrandet und alle bereits erreichten Gitterboxen gelb eingefärbt. Die grünen Pfeile symbolisieren das Vorgänger-Feld. Bei Erreichen des Zielpunktes zeigen die roten Pfeile den gefundenen, kürzesten Pfad zum Startpunkt.

Der bisher beschriebene Dijkstra-Algorithmus ermittelt sicher die kürzeste Route zwischen gegebenen Start- und Zielhäfen. Allerdings weist der berechnete Pfad einen deutlichen Routenknick auf (siehe Abb. 3.5), weil die kürzeste Verbindung immer ausgehend von der Start-Gitterbox diagonal bis zur gleichen geographischen Länge bzw. Breite wie derjenigen der Zielhafen-Gitterbox und dann geradeaus weiter auf dem Meridian bzw. Breitenkreis bis zum Zielhafen oder umgekehrt erfolgt. Dabei verläuft die Route möglichst lange in polaren Breiten aufgrund der in Breitenkreis-Richtung um $\cos \varphi$ verkürzten Gitterboxen. Dieser Routenverlauf ergibt sich im Dijkstra-Algorithmus wie auch im Laufalgorithmus aus Kapitel 3.2.1 durch die Einschränkung der Betrachtung auf die direkte 8-Gitterbox-Nachbarschaft des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters. Dadurch resultieren für eine bestimmte Gitterbox zur Auswahl ihrer Nachbarn nur die acht 45° -Richtungswinkel im Bereich von 0° bis 360° (siehe Abb. 3.6, oben). Eine Annäherung an die gesuchte Großkreis-Form über offenem Ozean ist mit dieser eingeschränkten Auswahl an Richtungswinkeln kaum möglich.

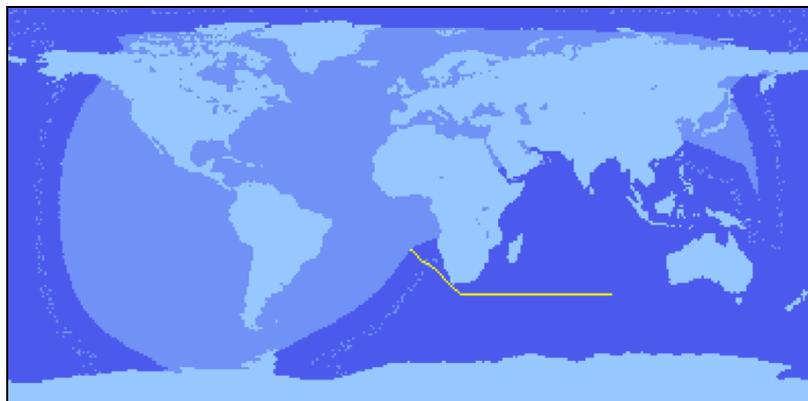


Abb. 3.5: Dijkstra-Algorithmus mit Problematik des Routenknicks und Markierung der Wellenausbreitung (erreichte/ nicht erreichte Gitterboxen in dunkel-/ hellblau).

Verbesserte Wellenausbreitungs-Methodik auf geographischem Rastergitter

Um eine bessere Großkreis-Annäherung erreichen zu können, wird der aus CORMEN et al. (2001) entnommene und auf geographischem Rastergitter angewendete Dijkstra-Algorithmus ein weiteres Mal in Anlehnung an CHANG et al. (2003) verändert. Durch Vergrößerung der Gitterbox-Umgebung von bisher eine auf fünf Gitterboxen wird nun eine Einbeziehung der 120-Gitterbox-Nachbarschaft ermöglicht. Dadurch steigt die Anzahl der möglichen Richtungswinkel der betrachteten Gitterbox-Nachbarschaft von zuvor acht auf achtzig, weil auf den Waagrechten, Senkrechten und Diagonalen des Gitterbox-Fensters auch identische Richtungswinkel auftreten (siehe Abb. 3.6, unten). Allerdings wird dadurch ebenso die Rechenzeit erhöht. Im Folgenden wird erläutert, welche Veränderungen in der Wellenausbreitung und dem rückwärtigen Routenaufbau des Dijkstra-Algorithmus auf geographischem Rastergitter vollzogen wurden, um eine bessere Großkreis-Annäherung durch Einbeziehung der 120-Gitterbox-Nachbarschaft zu erreichen.

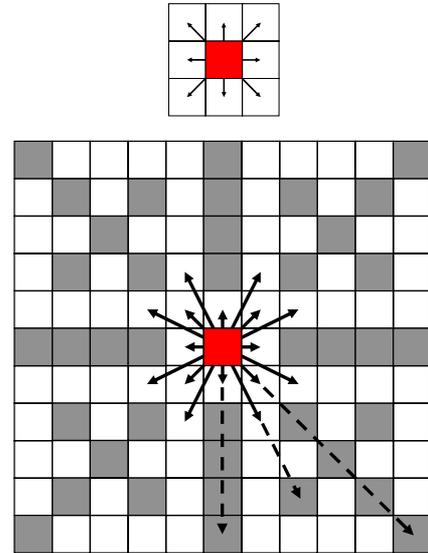


Abb. 3.6: Mögliche Richtungswinkel der 8-Gitterbox-Nachbarschaft (oben), Auszug der möglichen Richtungswinkel der 120-Gitterbox-Nachbarschaft mit Markierung von identischen Richtungswinkeln als graue Felder/ gestrichelte Pfeile (unten).

In der Endlosschleife der Wellenausbreitung wird ausgehend von der aktuell ausgewählten Gitterbox die gesamte 120-Gitterbox-Nachbarschaft betrachtet. Da nun aber für die Erreichbarkeit der weiter entfernten Nachbar-Gitterboxen auch die Zwischen-Gitterboxen bis zur aktuell ausgewählten auf Land getestet werden müssen, wird die gesamte Gitterbox-Nachbarschaft nicht mehr reihen- und spaltenweise wie bisher durch zwei *lon-*, *lat*-Schleifen, sondern oktandenweise abgetastet. So werden die Nachbar-Gitterboxen in jedem der acht Oktanten ausgehend von der aktuell ausgewählten Gitterbox schrittweise auf der waagrechten bzw. senkrechten Hauptachse

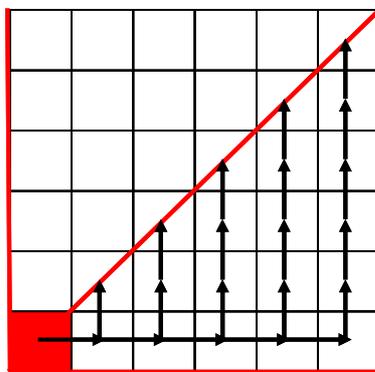


Abb. 3.7: Schema der oktandenweisen Abtastung der 120-Gitterbox-Nachbarschaft.

bearbeitet und bei jedem Hauptachsen-Schritt nacheinander auch die Gitterboxen auf der dazugehörigen senkrechten bzw. waagrechten Nebenachse bis zur Diagonalen betrachtet (siehe Abb. 3.7). Dabei werden beim Durchlauf der oktandenweisen Abtastung des 120-Gitterbox-Fensters die Diagonalen jeweils doppelt auf Land getestet, weil sie gleichzeitig in zwei verschiedenen Oktanten liegen. Falls eine bestimmte Oktanten-Gitterbox auf einer Landmasse liegt, wird die Betrachtung der jeweiligen Nebenachsen-Gitterboxen noch beendet und anschließend der Rest des Oktanten als unerreichbar für die aktuell ausgewählte Gitterbox ausgewiesen.

Für eine noch gezieltere Landdetektion können alle Gitterboxen der Verbindungsgeraden von der aktuell ausgewählten Gitterbox zu jeder Nachbar-Gitterbox der 120-Gitterbox-Umgebung auf Land getestet werden. Der zur Erstellung dieser Verbindungsgerade verwendete Bresenham-Algorithmus läuft schrittweise in die längere *lon*- oder *lat*-Richtung der Gerade und prüft bei jedem Schritt anhand der Geradengleichung, ob ein weiterer Schritt in die kürzere *lat*- oder *lon*-Richtung senkrecht dazu nötig ist, um die Abweichung von der idealen Gerade zu minimieren. Allerdings ergeben sich bei dieser geradenweisen Landdetektion weitaus mehr doppelt auf Land geprüfte Nachbar-Gitterboxen als bei der oktandenweisen Abtastung. Da die Rechenzeit dadurch bedeutend verlängert wird, wird die geradenweise Landdetektion hier nicht verwendet.

Als Ergebnis des verbesserten Dijkstra-Algorithmus zeigt sich eine gute Annäherung an den idealen Großkreis über offenem Ozean (siehe Abb. 3.8). Allerdings müssen für einen stetigen Routenverlauf noch die einzelnen, teilweise bis zu 5 Gitterboxen voneinander entfernten Routenpunkte miteinander verbunden werden. Dazu werden im rückwärtigen Routenaufbau diejenigen Nachbar-Gitterboxen ausgewählt und bearbeitet, deren Abstand in *lon*- oder *lat*-Richtung (Δlon bzw. Δlat) sich zu größer als eins ergibt. Die Verbindungsgerade der Mittelpunkte der beiden Gitterboxen wird ausgehend von der ersten Gitterbox (lon_1/lat_1) für jeden Punkt dieser Geraden (lon/lat) bestimmt aus Gleichung (3.9):

$$lat = lat_1 + (lon - lon_1) \cdot \Delta lat / \Delta lon \quad (3.9)$$



Abb. 3.8: Verbesserter Dijkstra-Algorithmus mit unstetigem Routenverlauf (gelb), aber guter Annäherung an die Großkreis-Methodik (grün) und Markierung der Wellenausbreitung (erreichte/ nicht erreichte Gitterboxen in dunkel-/ hellblau).

In einer Schleife werden nun alle Schnittpunkte dieser Verbindungsgeraden mit den Meridianen des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters ermittelt. Dazu vollzieht der *lon*-Wert ausgehend vom Mittelpunkt der ersten Routen-Gitterbox zuerst einen $0,5^\circ$ -Schritt zum nächsten Meridian des Modellgitters in Laufrichtung der Verbindungsgeraden, anschließend läuft er in 1° -Schritten bis zum letzten Meridian vor der zweiten Routen-Gitterbox und schließlich führt er den letzten $0,5^\circ$ -Schritt zu deren Mittelpunkt aus. Dabei wird in jedem Schritt der entsprechende *lat*-Wert durch Anwendung von Gleichung (3.9) ermittelt. Werden bei einem *lon*-Schritt gleichfalls ein oder mehrere Breitenkreise des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters überschritten, erfolgt die Ermittlung der Schnittpunkte der Verbindungs-

gerade mit diesen Breitenkreisen durch die Ermittlung der zugehörigen *lon*-Werte aus den bekannten *lat*-Werten der Breitenkreise und der Inversion von Gleichung (3.9). Dabei muss beachtet werden, dass auch der erste und letzte *lat*-Schritt von den Mittelpunkten der beiden Routen-Gitterboxen zum Modellgitter nur $0,5^\circ$ statt 1° beträgt und ein gleichzeitiger Schnittpunkt der

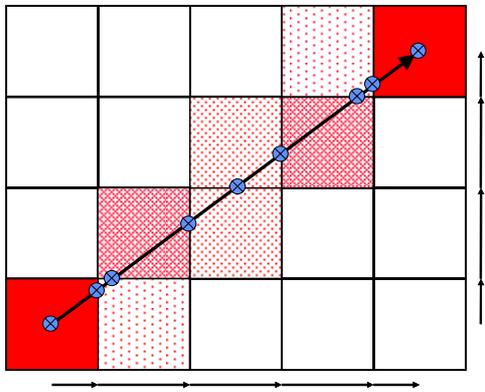


Abb. 3.9: Schema der Ermittlung der Schnittpunkte der Verbindungsgerade der beiden Routen-Gitterboxen mit den Meridianen und Breitenkreisen des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters.

Verbindungsgerade mit Meridian und Breitenkreis nicht doppelt gezählt wird (siehe Abb. 3.9). Anschließend werden die Großkreis-Distanzen aller Streckenabschnitte zwischen den Mittelpunkten der vorliegenden Routen-Gitterboxen und den ermittelten Schnittpunkten nach Gleichung (3.2) berechnet und den jeweiligen Gitterboxen des Modellgitters in einem neuen Routenfeld der Feldgröße 64.800 ($360^\circ \times 180^\circ$) zugeordnet. Der Indexwert der zu einem Streckenabschnitt gehörenden Gitterbox ergibt sich dabei nach Gleichung (3.6) aus dem in geographischer Länge und Breite abgerundeten Mittelwert der beiden jeweiligen Schnitt- bzw. Routenpunkte.

Durch diese Vorgehensweise beinhaltet jenes Routenfeld nun diejenige Strecke [km], die von einem Schiff innerhalb einer Gitterbox tatsächlich gefahren wird. Da diese Information für die spätere Emissionsberechnung viel bedeutender ist als die reine Auskunft darüber, welche Gitterboxen überhaupt befahren werden, wird diese Größe auch für die direkt benachbarten Routen-Gitterboxen ermittelt. Dazu werden die Distanzwerte zweier aneinander angrenzender Nachbar-Gitterboxen voneinander subtrahiert, um deren direkte Entfernung zueinander zu erhalten, und dieser Distanzwert gleichmäßig auf die Routenfelder beider Routen-Gitterboxen verteilt. Auf diese Weise wird also für eine bestimmte Route die bereits erwähnte Gesamtroutendistanz vollständig auf die berechneten Routenfeldwerte der einzelnen Routen-Gitterboxen aufgeteilt.

Beim Vergleich der Routenfindung von Start- zu Zielhafen zum rückwärtigen Durchlauf vom Ziel- zum Startpunkt können geringe Unterschiede bei der Gesamtroutendistanz und beim Routenverlauf auftreten, weil bei der oktandenweisen Landabtastung der Gitterbox-Nachbarschaft aufgrund der verschiedenen Laufrichtung auf dem Hin- und Rückweg unterschiedliche Oktanden bearbeitet werden. So können sich die bei Landkontakt gesperrten Oktanden voneinander unterscheiden und somit auch die beim Hin- und Rückweg gefundenen Routen. Um die Übereinstimmung von Hin- und Rückroute zu gewährleisten, werden für jede Kombination aus Start- und Zielhafen in zwei Routenfindungs-Durchläufen die Pfade beider Richtungen berechnet und derjenige mit geringerer Gesamtroutendistanz für beide Fälle als kürzeste Route verwendet.

Die Wellenausbreitungs-Methodik des Dijkstra-Algorithmus auf geographischem Rastergitter wurde also insofern verbessert, dass ein Routenknicke vermieden und die angestrebte Großkreis-Form durch Aneinanderreihung einzelner Streckenabschnitte stetig angenähert werden kann (siehe Abb. 3.10). Gleichzeitig findet die Wellenausbreitungs-Methodik für jede Kombination aus

Start- und Zielpunkt eine sichere und exakte Lösung, weil die adäquate Landumrundung als das Hauptproblem der Großkreis-Methodik aus Kapitel 3.2.1 durch eine sich in alle Richtungen ausbreitende Welle gelöst wird. Dabei muss das $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter auch nicht auf eine vereinfachte Hauptrouten-Ausprägung wie in der Routennetz-Methodik aus Kapitel 3.2.2 reduziert werden. Somit stellt der verbesserte Dijkstra-Algorithmus auf geographischem Rastergitter diejenige Routenfindungs-Methodik dar, die in Kapitel 3.3 zur Erzeugung globaler Schiffsverkehrsdichten aus der gegebenen Lloyds-Schiffsstatistik von 2006 verwendet wird.

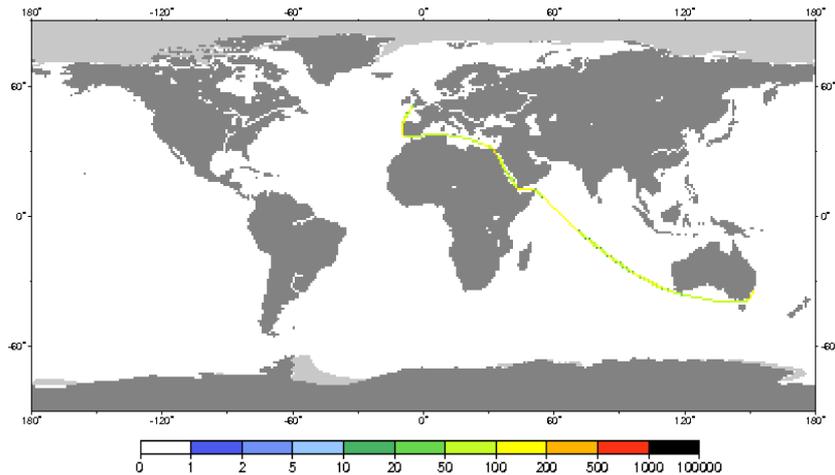


Abb. 3.10: Beispiel-Ergebnis des verbesserten Dijkstra-Algorithmus auf geographischem Rastergitter mit Angabe der tatsächlich gefahrenen Strecke [km] pro Gitterbox und stetiger Großkreis-Annäherung.

Die Effizienz des Dijkstra-Algorithmus liegt allgemein darin, dass durch die systematische Abtastung der Gitterboxen nach deren Priorität in der Wellenfront-Liste bis zum Erreichen des Zielpunkts die Rechenzeit stark reduziert wird, beispielsweise im Vergleich zum Suchalgorithmus aus Kapitel 3.2.2, der alle vorliegenden Möglichkeiten unsystematisch durchtestet. Dabei kann die Optimierung des Dijkstra-Algorithmus auch nach anderen Parametern erfolgen, so dass nicht die Schiffsrouten der kürzesten Entfernung, sondern diejenigen der geringsten Kosten, der kürzesten Zeit oder des geringsten CO_2 -Ausstoßes gesucht werden. Dabei muss lediglich die Gewichtung der Verbindungskanten des Modellgitters, welche momentan als Großkreis-Distanz zweier Gitterboxen nach Gleichung (3.2) bestimmt wird, entsprechend definiert werden.

3.3 Methodik zum Aufbau globaler Schiffsverkehrsdichten

Im vorigen Kapitel wurde der Wellenausbreitungs-Algorithmus als geeignete Methodik zur Routenfindung zwischen zwei gegebenen Start- und Zielhäfen ausgewählt. Dieses Kapitel stellt dar, wie dieser Algorithmus nun angewendet wird, um eine globale, gegenwärtige Basis-Schiffsverkehrsdichte von 2006 und zwei zukünftige Schiffsverkehrsdichten des Jahres 2050 unter Berücksichtigung möglicher Nordpolarrouten zu erstellen. Zur Abschätzung der gesamten Spannweite zukünftiger Entwicklungen werden dabei die zwei extremsten Zukunftsszenarien aus

EYRING et al. (2005b) übernommen und im Folgenden als CLE-Szenario (clean) und BAU-Szenario (business-as-usual) bezeichnet (siehe Kapitel 2.1.4). Das CLE-Zukunftsszenario folgt dem SRES-Szenario A2 des IPCC-Berichtes von 2007 und weist das niedrigste, jährliche Weltwirtschaftswachstum von 2,3% auf. Weiterhin geht es von sehr niedrigen Schwefelgehalten im Treibstoff von 0,5%, einer Treibstoff-Einsparung um 25% durch verstärkten Einsatz alternativer Energiequellen und einer aggressiven NO_x-Reduktion durch intensive Anwendung vorhandener Reduktionstechniken aus. Das BAU-Zukunftsszenario stellt dagegen das SRES-Szenario A1 mit dem höchsten, jährlichen Weltwirtschaftswachstum von 3,6% dar. Außerdem zeigt es sehr hohe Schwefelgehalte im Treibstoff von 2%, Emissionsreduktionen, die nicht über aktuelle IMO-Regulationen hinausgehen, und eine Dieselflotte ohne Anwendung alternativer Energien oder Treibstoffe. In der Routenfindung wird für jede Schiffsroute gleichzeitig die gefahrene Distanz [km] pro Gitterbox des 1°x1°-Modellgitters ermittelt, welche als Eingangsgröße zur Bottom-up-Emissionsberechnung pro Gitterbox im Kapitel 3.4 dient. Daher beschreibt Kapitel 3.3.1 das verwendete 1°x1°-Modellgitter des Wellenausbreitungs-Algorithmus und zusätzliche Randbedingungen wie Meereis, Schifffahrtskanäle und antarktischer Seegang, die diesem hinzugefügt werden, um dessen Routenfindung möglichst realistisch zu gestalten und in den Zukunftsszenarien Nordpolarrouten durch rückschreitende Meereis-Bedeckung zu ermöglichen. Kapitel 3.3.2 geht auf nötige Verarbeitungsschritte für die Vorbereitung der Lloyds-Schiffsstatistik von 2006 auf die Routenfindung und anschließende Emissionsberechnung ein. Im Kapitel 3.3.3 wird schließlich dargelegt, wie der Wellenausbreitungs-Algorithmus die Routenfindung für alle Schiffsbewegungen des Eingangsdatensatzes auf verschiedenen, gegenwärtigen und zukünftigen Modellgittern vollzieht und somit drei globale Schiffsverkehrsdichten erzeugt, ein Basis-Gegenwartsszenario ohne und zwei verschiedene Zukunftsszenarien mit Nordpolarrouten.

3.3.1 Das 1°x1°-Modellgitter der Routenfindung

Bevor der Wellenausbreitungs-Algorithmus für die Routenfindung durchgeführt wird, wird in diesem Kapitel das verwendete 1°x1°-Modellgitter beschrieben. Damit die Routenfindung zwischen Start- und Zielhafen möglichst realistisch erfolgt, wird es bezüglich der bestehenden Landausprägung korrigiert und um weitere Randbedingungen wie Meereis, Schifffahrtskanäle und antarktischen Seegang erweitert. Die zurückgewichene Meereis-Bedeckung der Zukunftsszenarien ermöglicht im Vergleich zum gegenwärtigen Basisszenario die Befahrbarkeit der Nordpolarrouten. Das Modellnetz und die vollzogenen Veränderungen werden im Folgenden vorgestellt.

Ränder des Modellnetzes

Das 1°x1°-Modellnetz erstreckt sich über die geographischen Längen -180° bis +180° und die geographischen Breiten -90° bis +90° und weist somit eine Feldgröße von 64.800 (360°x180°) Gitterboxen auf. Bei der im vorigen Kapitel beschriebenen Index-Berechnung des Wellenausbreitungs-Algorithmus werden die Gitterboxen dabei über deren linke, untere Ecke definiert, bei der Großkreisdistanz-Berechnung nach Gleichung (3.2) dagegen die tatsächlichen Boxmittelpunkte verwendet. Aus der Form der Erdkugel ergibt sich, dass der Übergang über die Datumsgrenze

des 180°-Meridians jederzeit möglich ist und daher im Modellgitter berücksichtigt werden muss. Der direkte Übergang über die beiden Polpunkte, die in den meist zylindrischen Abbildungen dieser Studie als 90°-Breitenkreis erscheinen, kann jedoch nicht erlaubt werden, weil die sehr kleinen Distanzunterschiede in Polnähe Probleme bei der Großkreis-Annäherung der Routenfindung verursachen. Diese Restriktion erweist sich jedoch als nicht einschränkend, weil eine exakte Überfahrt über die Polpunkte sowohl im Gegenwarts- als auch in den Zukunftsszenarien durch Meereis oder Land unterbunden ist und auch ungeachtet dessen nur selten auftreten würde.

Landmassen

Die genaue Verteilung der Landmassen im Modellgitter ergibt sich aus einer 1°x1°-Land-Wasser-Maske, die definiert, welche Gitterboxen als Land und welche als Wasser ausgewiesen werden, wobei letztere sowohl Meere als auch Binnenseen darstellen. Die Land-Wasser-Maske wurde bereits im vorherigen Kapitel verwendet. Hier wird sie allerdings noch manuell korrigiert, weil sie aus der Rundung einer höher aufgelösten 0,1°x0,1°-Maske hervorgeht und sich somit Rundungsfehler ergeben, die zur Schließung enger Meeresstraßen und Zerteilung schmaler Halbinseln oder Inseln führen. Daher werden z.B. das Kattegat, der Nord-Ostsee-Kanal, die Straße von Gibraltar, die Dardanellen, der Suez-Kanal, die Straße von Malacca, die Belle-Isle-Straße vor Neufundland und zwei Nordwest-Passagen durch das kanadische Archipel als Wasserstraßen geöffnet und somit überhaupt erst die Verbindung mancher zuvor isolierter Randmeere zum Weltozean ermöglicht. Weiterhin werden auch nicht existente Seewege durch Korrektur der Ausmaße schmaler Landbrücken oder Inseln wie Italien, Sewernaja Semlja, Thailand, Celebes, Philippinen, Niederkalifornien und Kuba wieder geschlossen.

Aufgrund der Rundung der Land-Wasser-Maske fallen aber auch viele der Häfen der Lloyds-Schiffsstatistik auf Land-Gitterboxen. Diejenigen in direkter Nachbarschaft von Meeres-Gitterboxen können durch die in Kapitel 3.2.3 beschriebene Methodik der kurzzeitigen Korrektur der Land-Wasser-Maske in der Wellenausbreitung zur Routenfindung miteinbezogen werden, die weiter von Meeres-Gitterboxen entfernten Binnenhäfen jedoch nicht. Um wenigstens die stark frequentierten Binnenhäfen in die Routenfindung integrieren zu können (siehe Kapitel 3.3.2), werden einige für den Welthandel wichtige Flusssysteme wie Rhein, Donau, Wolga (über den Don-Kanal zum Schwarzen Meer), Jangtsekiang, St. Lorenz-Strom aus den Großen Seen, Mississippi/Ohio, Amazonas und Parana als Wasserstraßen im Modellgitter geöffnet. Aber auch manche wichtige Binnenhäfen, die nicht an diesen Flusssystemen liegen, wie z.B. Baltimore oder Akaba, werden vereinzelt an den Weltozean angebunden. Diese korrigierte 1°x1°-Land-Wasser-Maske stellt somit das Basis-Modellgitter für den Wellenausbreitungs-Algorithmus dar, das im Folgenden durch zusätzliche Randbedingungen erweitert wird (siehe Abb. 3.11).

Meereis

Eine weitere Randbedingung der Routenfindung im 1°x1°-Modellgitter stellt das Meereis der Polarregionen dar. Dessen gegenwärtige und zukünftige räumliche Ausbreitung wird der Variable Meereis-Konzentration eines IPCC 2007-Modelllaufs aus dem PCMDI-Archiv (Program for

Climate Model Diagnosis and Intercomparison) entnommen, welche den Anteil der Meereis-Bedeckung einer Meeres-Gitterbox [%] beschreibt (PCMDI 2008). Für das Gegenwartsszenario werden dazu die monatlichen Ensemble-Mittelwerte aus drei Simulationsläufen unterschiedlicher Anfangsbedingungen des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Zirkulations-Modells ECHAM5/MPI unter dem moderaten Szenario SRES-A1B für den Zeitraum 2001-2010 gebildet. Die Wahl des Zeitraums für die beiden Zukunftsszenarien erweist sich dagegen als schwierig, weil für die Erstellung von angemessenen zukünftigen globalen Emissionskatastern mit möglichen Nordpolarrouten mindestens eine dreimonatige Befahrbarkeit der polaren Schiffsrouten gegeben sein sollte. Gleichzeitig stellt sich auch die Festlegung des Grenzwertes der Meereis-Konzentration zur Befahrbarkeit einer mit Meereis bedeckten Gitterbox als problematisch heraus, da hierzu jegliche Erfahrungswerte fehlen.

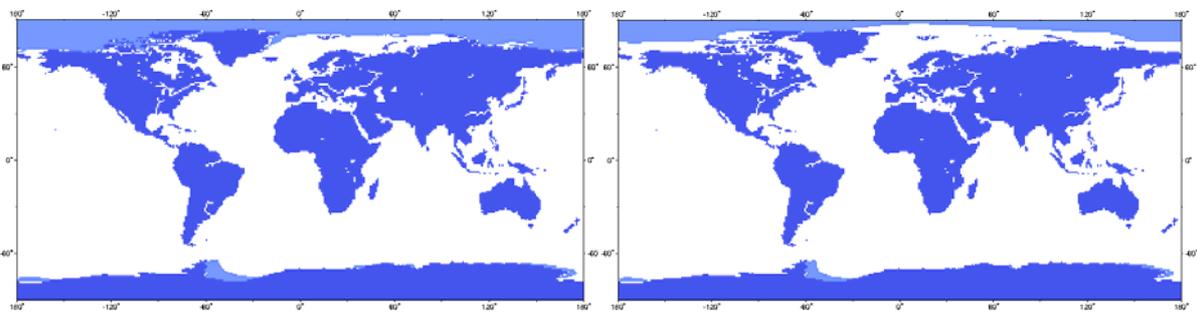


Abb. 3.11: $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter mit manuell korrigierten Landmassen (dunkelblau), einzelnen, geöffneten Flusssysteme und gemittelter Meereis-Ausbreitung einer Meereis-Konzentration von mindestens 50% des Monats Oktober (hellblau) für das gegenwärtige Szenario (links) und für die beiden zukünftigen Szenarien mit Öffnung der Nordost- und Nordwest-Passagen (rechts).

Ein Vergleich des ICOADS-Beobachtungsdatensatzes von 2000-2002 mit der minimalen September-Meereisausbreitung des Ensemble-Mittelwertes für den Zeitraum 2001-2002 zeigt, dass arktische Schiffsbewegungen gegenwärtig nur in Gebieten mit Meereis-Konzentrationen von höchstens 20% auftreten. Für einen solchen Grenzwert öffnen sich die Nordpolarrouten für drei Sommermonate im vorliegenden Modelllauf allerdings frühestens in der Dekade 2081-2090, welche sich im Vergleich zu neuesten Meereis-Prognosen als deutlich zu spät erweist (IPCC 2007, HOLLAND et al. 2006, STROEVE et al. 2007). Für die Dekade 2051-2060 hingegen, die auch von GRANIER et al. (2006) betrachtet wird (siehe Kapitel 2.2.2), erweisen sich die Nordpolarrouten für die drei Sommermonate August, September und Oktober erst ab einem Schwellwert der Meereis-Konzentration von 50% als befahrbar. Damit in Hinblick auf den Zeitraum der Öffnung der Nordpolarrouten der Bezug zur aktuellen Literatur gewahrt bleibt, soll hier die zuletzt angesprochene Dekade 2051-2060 mit dem sich daraus ergebenden Schwellwert der Meereis-Konzentration von 50% verwendet werden. Denn generell kann ein gegenwärtiger Schwellwert wie derjenige der ICOADS-Beobachtungsdaten nur schwer auf zukünftige Bedingungen übertragen werden, weil zukünftige Schifffahrts-Technologien, -Logistiken oder sich entwickelnde Nordpolarhäfen wie Point Barrow (USA), Resolute Bay (CAN) oder Murmansk (RUS) die routinemäßige Schiffbarkeit der sich öffnenden Nordpolarrouten möglicherweise erleichtern werden.

Beim Einlesen der monatlichen Meereis-Masken der verschiedenen Szenarien muss allerdings berücksichtigt werden, dass das vorliegende PCMDI-Gitter mit Giterrändern bei geographischen Längen von $+0^\circ$ und -0° und in der exakten Landmassenverteilung vom verwendeten Modellgitter abweicht und daher entsprechende Konvertierungen vorgenommen werden müssen. Im Wellenausbreitungs-Algorithmus wird das verwendete Modellgitter dann für jede Routenfindung mit der vom Reisemonat der Schiffsroute und dem verwendeten Szenario abhängigen Meereis-Maske aktualisiert und jede Meeres-Gitterbox mit einer Meereis-Konzentration von mindestens 50% als nicht befahrbare Meereis-Gitterbox ausgewiesen (siehe Abb. 3.11).

Schiffahrtskanäle

Im $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter werden weiterhin drei Gitterboxen definiert, welche die künstlichen Schiffahrtskanäle Panama-Kanal ($-80/+9$), Suez-Kanal ($+32/+30$) und Nord-Ostsee-Kanal ($+9/+54$) repräsentieren. Aufgrund der Ausmaße ihrer Wasserstraßen und Schleusenanlagen können sie nur bestimmten Schiffsgrößenklassen die Durchfahrt erlauben (siehe Tab. 3.2), welche auch als Panamax oder Suezmax bezeichnet werden. Für Schiffe, welche diese Abmessungen überschreiten, wird die jeweilige Kanal-Gitterbox als nicht befahrbare Land-Gitterbox ausgewiesen und dient somit als Hindernis in der Routenfindung. Geplante zukünftige Kanal-Ausbauten führen dabei zu unterschiedlichen Schiffsgrößen-Grenzwerten für das Gegenwarts- und die Zukunftsszenarien. Auf Beschränkungen des St. Lorenz-Seeweges wird hier nicht eingegangen, weil im Vergleich zu den anderen Kanal-Gitterboxen keine alternative Route existiert und somit alle Schiffe, die Häfen der Großen Seen anlaufen, dessen Beschränkungen in jedem Fall erfüllen.

Tab. 3.2: Gegenwärtige Eigenschaften und Beschränkungen der Schiffahrtskanäle im $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter und geplante zukünftige Ausbauten. Für den Suez- und Nord-Ostsee-Kanal sind zwei mögliche Schiffsgrößenklassen gegeben (getrennt durch Schrägstrich), Quellen: ¹ ACP 2008a, ² ACP 2008b, ³ ACP 2006, ⁴ SIS 2005a, ⁵ SIS 2005b, ⁶ LETHSUEZ 2001, ⁷ LETHSUEZ 2002, ⁸ WSD NORD 2008, ⁹ WSD NORD 2001.

	Panama-Kanal		Suez-Kanal		Nord-Ostsee-Kanal
	2007	2014/15	2007	2010	2007
Kanallänge	80 km ¹		163 km ⁴		98,6 km ⁸
mittl. Fahrtzeit	9 h ¹		13,5 h ⁵		keine Angabe
mittl. Fahrtgeschw.	8,9 km/h		12,1 km/h		13,5 km/h ⁹
Verlängerungsfaktor	72,4 km		86,9 km		42,0 km
max. Schiffslänge	294,13 m ²	366 m ³	keine Beschränkung ⁵		160/ 235 m ⁹
max. Schiffsbreite	32,31 m ²	49 m ³	50/ 74,7 m ^{6,7}		20/ 32,5 m ⁹
max. Schiffstiefgang	12,04 m ²	15 m ³	18,9/ 12,5 m ^{6,7}	22 m ⁵	9,5/ 7,0 m ⁹

Für die zugelassenen Schiffe wirken Schiffahrtskanäle weiterhin als Verzögerungsbereiche, weil deren Durchfahrtsgeschwindigkeit begrenzt und damit geringer ist als auf offenem Ozean. Aufgrund mangelnder Daten kann auf nötige Wartezeiten vor der Durchfahrt nicht eingegangen

werden. Die durchschnittliche Schiffsgeschwindigkeit auf einer beliebigen Meeres-Gitterbox v_s wird dabei dem Report von EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED (2005, Tabelle B.1) folgend auf 25 km/h gesetzt. Diejenige auf einer Kanal-Gitterbox v_k wird für den Panama- und Suez-Kanal aus der Division der Kanallänge durch die mittlere Kanal-Durchfahrtszeit aus Tab. 3.2 ermittelt, für den Nord-Ostsee-Kanal kann sie dagegen direkt der Literatur entnommen werden. Um nun der Verzögerung im Routenverlauf Rechnung zu tragen, muss die Geschwindigkeit der Wellenausbreitung auf den Kanal-Gitterboxen reduziert werden, indem die Ausdehnung dieser Gitterboxen im $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter um einen entsprechenden Vergrößerungsfaktor F [km] verlängert wird. Dessen exakte Anwendung im Wellenausbreitungs-Algorithmus wird in Kapitel 3.3.3 näher erläutert. Die vergrößerte Gitterbox-Länge L_x ergibt sich aus der Summe der unveränderten Gitterbox-Länge L_0 der Kanal-Gitterbox und des Verlängerungsfaktors F , der für jeden Schifffahrtskanal aus dessen Länge L_k und den beiden bereits zuvor ermittelten Schiffsgeschwindigkeiten nach Gleichung (3.10) ermittelt wird:

$$L_x = L_0 + F = L_0 + L_k \cdot \left(\frac{v_s}{v_k} - 1 \right) \quad (3.10)$$

Antarktische Seegangs-Schwelle

Im Vergleich mit Schiffsverkehrsdichten aus Schiffsreportsystemen zeigt sich, dass im jährlichen Mittel nur wenig Schiffsaktivität in den Gewässern südlich von $50-60^\circ$ S nahe der Antarktis zu verzeichnen ist, weil diese aufgrund hohen Seegangs und teilweise wegen abkalbender Eisberge gemieden werden (siehe Abb. 2.1). Der Wellenausbreitungs-Algorithmus dieser Studie findet hingegen stets die kürzeste Route und verbindet somit Häfen in Südamerika mit jenen in Südostasien über Großkreise, die sich bis auf wenige Gitterboxen dem antarktischen Kontinent nähern. Die dortige Meereis-Ausbreitung reicht nicht soweit nördlich, um solche Routen zu verhindern. So wird eine antarktische Seegangs-Schwelle bei 55° S eingeführt, die alle südlicher gelegenen Gitterboxen als permanent unbefahrbares Meereis ausweist. Im Vergleich mit den beobachteten Schiffsverkehrsdichten werden dieser Geraden eine trapezförmige Ausbuchtung bis 45° S im Südatlantik und Indischen Ozean und eine Einbuchtung bis 60° S am Kap Hoorn zur Ermöglichung der Umrundung von Südamerika eingefügt, wie Abb. 3.12 zeigt. Für die wenigen Schiffsbewegungen, deren Start- oder Zielhäfen doch in der Antarktis liegen, wie Forschungsstationen, wird die antarktische Seegangs-Schwelle aufgehoben.

Generell könnten Gebiete starken Seegangs aus satellitengestützten Radardaten als weitere Verzögerungsbereiche in das $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter aufgenommen werden. Allerdings erweist sich der Zusammenhang zwischen Wellenhöhe bzw. -richtung und der entsprechenden Verlangsamung der Schiffsgeschwindigkeit als sehr schwierig, weshalb in dieser Studie keine Berücksichtigung des globalen Seegangs erfolgt.

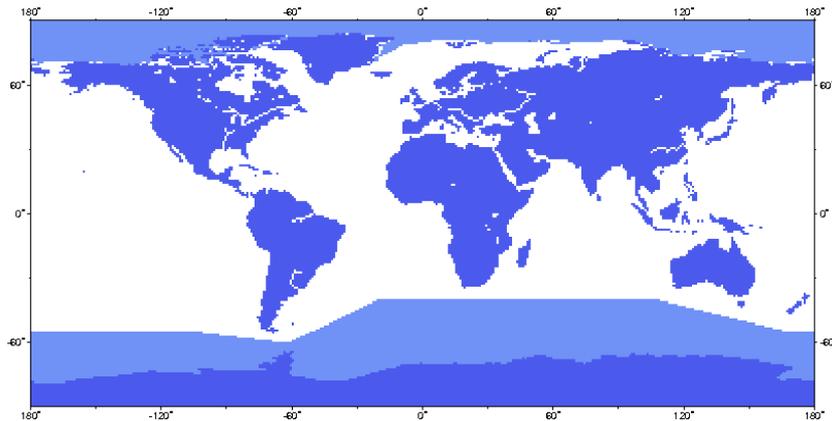


Abb. 3.12: Antarktische Seegangs-Schwelle als permanentes Meereis (hellblau) zur Vermeidung von Schiffsrouten in den südlichen Ozeanen.

3.3.2 Verarbeitung der Lloyds-Schiffsstatistik

In diesem Kapitel wird auf diejenigen Arbeitsschritte eingegangen, die zur Verknüpfung, Korrektur und Verarbeitung der drei Lloyds-Datenbanken aus Kapitel 3.1 erforderlich sind, um für das Gegenwartsszenario und die beiden Zukunftsszenarien jeweils einen adäquaten Eingangsdatensatz für den Wellenausbreitungs-Algorithmus zur Routenfindung zu erzeugen. Dieser soll für jede Route Informationen beinhalten über die Start- und Zielhäfen, die zugelassenen Schifffahrtskanäle, den zugehörigen Reisemonat zur Bestimmung der Meereis-Ausbreitung des entsprechenden Szenarios und die Anzahl der Schiffe, die diese Route unter den gegebenen Umständen befahren. Für die weitere Emissionsberechnung werden auch Angaben zur installierten Hauptmotorenenergie und Schiffsanzahl pro Schiffstyp einer Route angehängt. Alle diese Verarbeitungsschritte der Lloyds-Schiffsstatistik von 2006 werden im Folgenden vorgestellt.

Verknüpfung der Lloyds-Datenbanken

Im ersten Schritt werden die Bewegungs-, Schiffs- und Hafendatenbanken aus Kapitel 3.1 über die individuelle LMIU-Nummer jedes Schiffes und die Start- und Zielhafen-ID jeder Route, die in jeweils zwei der drei Lloyds-Datenbanken vorliegen, miteinander verknüpft. Diese kombinierte Bewegungsdatenbank umfasst nun alle zum Aufbau einer Schiffsroute nötigen Informationen über LMIU-Nummer, Name, Länge, Breite, Tiefgang, Gewicht, Typ und Untertyp des Schiffes, Name, Land, Region, geographische Länge und Breite des Start- und Zielhafens und Ankunfts- und Abfahrtsdatum in einer Zeile. Wie sich aber im Weiteren zeigt, sind aufgrund fehlender Angaben nicht alle dieser 1.001.123 Schiffsbewegungen tatsächlich zur Routenfindung geeignet.

Statistische Auswertung der angelaufenen Häfen und Regionen

Nach der Verknüpfung der drei Lloyds-Datenbanken kann eine erste, statistische Auswertung der kombinierten Bewegungsdatenbank erfolgen. So können die Häfen und Regionen der vorliegenden Hafendatenbank nach der Anzahl von Schiffsbewegungen sortiert werden, die diese in den vorliegenden sechs Monaten des Jahres 2006 anlief, wie Tab. 3.3 und Tab. 3.4 zeigen. Tab. 3.5 beschreibt dagegen die Anzahl der Schiffsbewegungen zwischen verschiedenen Lloyds-Regionen.

Tab. 3.3: Stark frequentierte Häfen des kombinierten Lloyds-Bewegungsdatensatzes mit Gesamtanzahl der Schiffsbewegungen in den vorliegenden sechs Monaten des Jahres 2006.

	Hafen	Schiffe		Hafen	Schiffe
1.	Singapur (SGP)	32.716	14.	Antwerpen (BEL)	7.875
2.	Ärmelkanal (GBR/ FRA)	25.092	15.	Hamburg (GER)	7.313
3.	Gibraltar (GBR)	22.610	16.	Port Said (EGY)	6.801
4.	Dardanellen (TUR)	22.431	17.	Yokohama (JPN)	6.732
5.	Istanbul (TUR)	22.033	18.	Panama-Kanal (PAN)	6.687
6.	Hong Kong (CHI)	16.143	19.	Port Klang (MAL)	5.557
7.	Brunsbüttel (GER)	14.596	20.	Nagoya (JPN)	5.060
8.	Rotterdam (NLD)	14.484	21.	Suez (EGY)	5.003
9.	Kap Finisterre (ESP)	11.955	22.	Incheon (SKR)	4.926
10.	Busan (KOR)	11.896	23.	Barcelona (ESP)	4.679
11.	Skagen (DNK)	11.270	24.	Keelung (TWN)	4.399
12.	Shanghai (CHI)	8.371	25.	Kobe (JPN)	4.273
13.	Kaohsiung (TWN)	8.054			

Tab. 3.4: Lloyds-Regionen, sortiert nach der Gesamtanzahl der Schiffsbewegungen des kombinierten Lloyds-Bewegungsdatensatzes in den vorliegenden sechs Monaten des Jahres 2006.

	Region	Schiffe		Region	Schiffe
1.	China (CHI)	120.327	14.	Nordamerika Pazifik (USP)	21.340
2.	Südeuropa (SEU)	107.500	15.	Australien (AUS)	21.082
3.	Skandinavien (SCN)	101.038	16.	Karibik (CAR)	20.115
4.	Südostasien (SEA)	85.191	17.	USA Atlantikküste (USA)	18.364
5.	Nordeuropa (NEU)	84.132	18.	Indien (IND)	18.059
6.	Britische Inseln (UKE)	82.239	19.	östliches Mittelmeer (EMD)	17.451
7.	Balkanregion (BLK)	73.610	20.	USA Golfküste (USG)	13.974
8.	Japan (JPN)	55.528	21.	Westafrika (WAF)	13.079
9.	Iberische Halbinsel (IBE)	40.216	22.	Ostafrika (EAF)	10.242
10.	Südamerika Atlantik (SAA)	31.962	23.	Südamerika Pazifik (SAP)	9.188
11.	Nordafrika (NAF)	31.410	24.	Rotes Meer (RED)	8.095
12.	Arabien (ARA)	25.063	25.	Kanada (CAN)	7.833
13.	Zentralamerika (CAM)	21.577			

Dabei fällt auf, dass die meisten Schiffsbewegungen in Häfen und Lloyds-Regionen aus Ostasien (Singapur, Hong Kong, Shanghai, CHI, JPN, SEA) und Europa (Rotterdam, Hamburg, Istanbul, SEU, NEU, SCN) zu verzeichnen sind. Weiterhin weisen auch Schifffahrtskanäle (Panama-Kanal, Suez-Kanal bei Suez/Port Said, Nord-Ostsee-Kanal bei Brunsbüttel) und Meeresengen

(Ärmelkanal, Gibraltar, Dardanellen) hohe Schiffsbewegungen auf. Bei den Schiffsbewegungen zwischen Regionen zeigen sich die größten Werte für Routen innerhalb derselben Lloyds-Region, wiederum vor allem in Ostasien und Europa. Anhand dieser statistischen Auswertung der vorliegenden Schiffsbewegungen kann eine erste Abschätzung der Häufigkeit von Nordpolarrouten getroffen werden. Wenn davon ausgegangen wird, dass alle Schiffsrouten von Nordeuropa (NEU, SCN, UKE) und der nordamerikanischen Atlantikküste (CAN, USA) nach Ostasien (CHI, JPN), von Nordeuropa (NEU, SCN, UKE) zur nordamerikanischen Pazifikküste (USP) und von der Iberischen Halbinsel (IBE) nach Japan (JPN) auf zukünftige Nordpolarrouten ausweichen, ergeben sich lediglich 116 umlegbare Schiffsrouten. Dieser Wert erfasst jedoch nicht alle umlegbaren Routen, weil viele dieser Schiffsbewegungen im Routenverlauf Zwischenhäfen wie Gibraltar, den Suez- oder Panama-Kanal anlaufen. Für eine bessere Abschätzung möglicher Nordpolarrouten müssten diese Zwischenhäfen übersprungen werden (siehe weiter unten).

Tab. 3.5: Häufigste Schiffsbewegungen des kombinierten Lloyds-Bewegungsdatensatzes in den vorliegenden sechs Monaten des Jahres 2006 zwischen zwei Lloyds-Regionen, wobei die Richtung der Schiffsbewegung unerheblich ist.

	Region 1	Region 2	Schiffe		Region 1	Region 2	Schiffe
1.	CHI	CHI	79.944	6.	SEA	SEA	56.926
2.	SCN	SCN	76.447	7.	CHI	JPN	36.705
3.	SEU	SEU	71.810	8.	UKE	UKE	35.832
4.	BLK	BLK	59.806	9.	NEU	NEU	33.988
5.	NEU	UKE	57.027	10.	JPN	JPN	28.430

Fehlwert-Häfen

Zur besseren Verarbeitung im Algorithmus werden die gegebenen geographischen Hafenkoordinaten in Grad, Bogenminuten und -sekunden mit Angabe der Himmelsrichtung (siehe Tab. 3.1) umgewandelt in eine Fließkomma-Darstellung in Grad mit negativer Süd- und West-Richtung. Anschließend werden die ermittelten Hafenkoordinaten auf die linke, untere Gitterbox-Ecke des 1°x1°-Modellgitters abgerundet. So wird z.B. aus S 59° 20' 00" zuerst -59,33 und schließlich -60°. Dabei fehlt jedoch für 1.323 der insgesamt 8.541 Häfen der Lloyds-Hafendatenbank der geographische Koordinatenbezug. Beim Einlesen werden diese mit dem Fehlwert 999 belegt und können für die weitere Verarbeitung somit nicht mehr verwendet werden. Dieser Mangel ist in ungenauen Schiffsmeldungen begründet, wie beispielsweise der bloßen Angabe eines Ziellandes, aus denen der exakte Hafenpunkt der Schiffsroute nicht bestimmt werden kann (persönliche Korrespondenz David Long, LMIU).

Für die Korrektur wird angestrebt, zumindest für diejenigen 53 Fehlwert-Häfen, die in obiger statistischer Auswertung von mehr als 100 Schiffsbewegungen angelaufen werden, die exakten geographischen Koordinaten näherungsweise zu ermitteln. So können für viele dieser am stärksten frequentierten Fehlwert-Häfen die gerundeten geographischen Koordinaten von Häfen

der Hafendatenbank übernommen werden, die auf der gleichen Gitterbox des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters liegen. Als solche können Ankerplätze in der Nähe von größeren Häfen, wie z.B. Vancouver Anchorage, oder Häfen kleinflächiger Länder, wie z.B. Kuwait oder Inselstaaten wie Malta, Barbados und Bermuda, deren Staatsfläche selbst oft nur die Größe einer Gitterbox aufweist, korrigiert werden. Dagegen lassen sich Fehlwert-Häfen aus größeren Staaten wie z.B. China, Indonesien oder Mexiko nicht überarbeiten. Andere Fehlwert-Häfen stellen stark frequentierte Meeresstraßen dar, wie z.B. den Ärmelkanal, die Dardanellen, den Panama-Kanal, die Straße von Messina oder die Bab el Mandeb-Straße im Roten Meer. Als geographische Koordinaten dieser Fehlwert-Häfen können die gerundeten Mittelwerte zweier Hafepunkte beiderseits der Meeresenge herangezogen werden, beispielsweise Dover und Calais für den Ärmelkanal. Somit können 32 der wichtigsten 53 Fehlwert-Häfen korrigiert werden.

Binnenhäfen

Im Vergleich der Hafendatenbank mit der verwendeten Land-Wasser-Maske zeigt sich, dass nur 3.279 der 7.250 Fehlwert-korrigierten Häfen direkt auf einer Wasser-Gitterbox liegen. Weitere 3.478 liegen in direkter Nachbarschaft zum Meer und können somit durch die in Kapitel 3.2.3 beschriebene Methodik der kurzzeitigen Korrektur der Land-Wasser-Maske in der Wellenausbreitung zur Routenfindung berücksichtigt werden. Die restlichen 493 Binnenhäfen fallen allerdings aufgrund der vorliegenden Rundung der Land-Wasser-Maske auf Land-Gitterboxen ohne Meereskontakt in der direkten Gitterbox-Nachbarschaft (siehe Abb. 3.13, links). Durch die bereits im Kapitel 3.3.1 erläuterte Öffnung einiger für den Welthandel wichtiger Flusssysteme als Wasserstraßen im Modellgitter können 268 dieser Binnenhäfen an den Weltozean angebunden werden. Weitere 52 Binnenhäfen, darunter alle, die in obiger statistischer Auswertung von mehr als 100 Schiffsbewegungen angelaufen werden (siehe Tab. 3.3), können durch vereinzelt, manuelle Korrekturen des Modellgitters für die Routenfindung erreichbar gemacht werden. Die restlichen 173 Binnenhäfen bleiben ohne Meereskontakt und damit in der Routenfindung unberücksichtigt. Abb. 3.13 (rechts) zeigt die Anzahl der Lloyds-Schiffsbewegungen pro Hafen-Gitterbox des Modellgitters. Dabei wird wiederum die größte Aktivität in Europa und Ostasien ersichtlich.

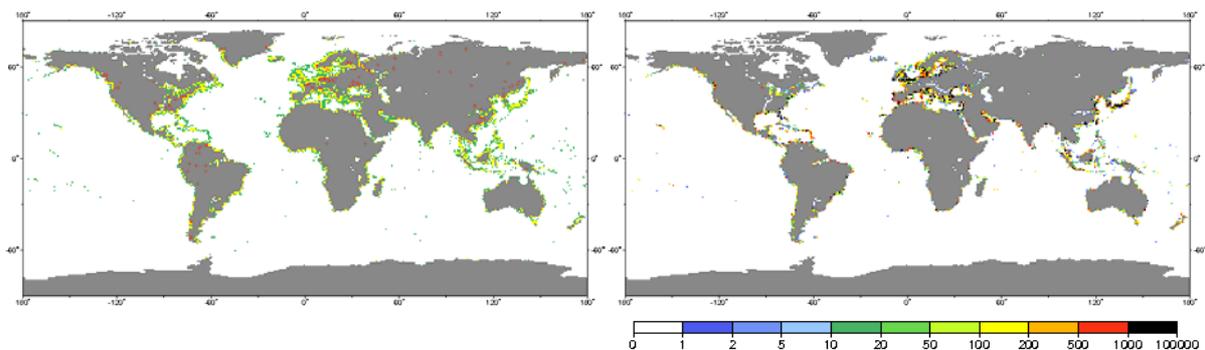


Abb. 3.13: Lage und Schiffsbewegungen der Lloyds-Häfen: Links: Seehäfen auf Wasser-Gitterbox (grün), Seehäfen auf Land-Gitterbox (gelb) und Binnenhäfen ohne Meereskontakt im $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter (rot). Rechts: Anzahl der Lloyds-Schiffsbewegungen pro Hafen-Gitterbox.

Routen mit identischem Start- und Zielhafen

76.197 der 1.001.123 vorliegenden Schiffsbewegungen weisen denselben Start- und Zielhafen auf. Während die Bewegungen der meisten Schiffstypen circa 10% dieser „Schleifen-Routen“ beinhalten, bestehen diejenigen von Passagierschiffen bzw. Fischern zu 49% bzw. 42% aus solchen Routen. Für diese Schiffsbewegungen kann der Wellenausbreitungs-Algorithmus keine Routen berechnen und die Gesamttroutendistanz wird als Null angegeben. Daher werden alle Routen mit identischem Start- und Zielhafen in der weiteren Bearbeitung nicht mehr berücksichtigt. Für diejenigen 43.137 Schiffsbewegungen, deren Start- und Zielhäfen zwar nicht identisch sind, aber auf derselben Gitterbox liegen, besteht das gleiche Problem. Hier wird die unbekannte Gesamttroutendistanz über die mittlere Länge der Hafen-Gitterbox abgeschätzt, wie Kapitel 3.3.3 noch zeigt.

Schiffahrtskanäle

Da die in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Schiffahrtskanäle des Modellgitters Panama, Suez- und Nord-Ostsee-Kanal nur bestimmten Schiffgrößen die Durchfahrt erlauben, werden nun die Angaben zu Schiffslänge, -breite und -tiefgang der kombinierten Bewegungsdatenbank mit den in Tab. 3.2 beschriebenen Schiffgrößen-Beschränkungen zur Kanaldurchfahrt verglichen. Dazu wird für jedes Schiff der Schiffsdatenbank eine Variable namens „Kanaltyp“ errichtet und mit dem Wert eins initialisiert. Sobald ein Schiff die Größenbeschränkungen des Nord-Ostsee-, Panama- oder Suez-Kanals erfüllt, wird der vorhandene Kanaltyp mit dem Faktor zwei, drei oder fünf multipliziert. Somit beschreibt der Kanaltyp mit einem Wertebereich von 0 bis 30, welche Schiffahrtskanäle für ein bestimmtes Schiff und damit auch für alle dessen Schiffsbewegungen befahrbar sind. Da jedoch auch hier für 820 Schiffsbewegungen fehlerhafte oder fehlende Angaben in der Lloyds-Schiffsstatistik auftauchen, werden alle Schiffe, die in der Bewegungsdatenbank einen Schiffahrtskanal direkt anfahren, als für die Durchfahrt geeignet ausgewiesen, auch wenn ihre angegebenen Schiffgrößen die Kanalgrenzwerte übersteigen oder entsprechende Vergleichsinformationen fehlen. Dabei muss beachtet werden, dass sich die Größenbeschränkungen der Schiffahrtskanäle im Gegenwartsszenario und in den beiden Zukunftsszenarien unterscheiden.

Reisemonat

Weiterhin wird der mittlere Reisemonat einer Schiffsbewegung benötigt, um die passende monatliche Meereis-Ausbreitung des entsprechenden Szenarios für eine realistische Routenfindung auf dem vorliegenden Modellgitter auszuwählen. Dazu werden aus dem in der Form „03/07/2006“ gegebenen Abfahrts- und Ankunftsdatum am Start- bzw. Zielhafen einer bestimmten Schiffsrouten der kombinierten Bewegungsdatenbank die jeweiligen Werte für Tag, Monat und Jahr extrahiert. Daraufhin wird der exakte Abfahrts- und Ankunftstag im Jahr seit dem 01.01.2006 als Tag 1 ermittelt. Der Monat des Mittelwertes zwischen Abfahrts- und Ankunftstag im Jahr ergibt den mittleren Reisemonat und deren Differenz die Reisezeit in Tagen. Sobald eine Datumsangabe fehlt oder Probleme in der Zeitberechnung wie negative Reisezeiten aufgrund von geschätzten oder fehlerhaften Datumsangaben in der Schiffsstatistik auftreten, wird die jeweilige Schiffsbewegung als nicht geeignet für die Routenfindung ausgewiesen.

Hauptmotorkraft

Da die Lloyds-Schiffsstatistik keine Angaben zu Motorkraft, -auslastung oder -laufzeit beinhaltet, müssen hierfür andere Quellen dienen, hauptsächlich gemittelte Angaben pro Schiffstyp (siehe Kapitel 3.4). Für die auf einem Schiff installierte Hauptmotorkraft besteht jedoch die Möglichkeit einer individuellen Bestimmung pro Schiff. WANG et al. (2007a, Tab. SI1) bieten eine Korrelation zwischen dem Bruttoreumgehalt [t] und der Hauptmotorkraft [kW] eines Schiffes, abgeleitet aus anderen Schiffsstatistiken (siehe Tab. 3.6). Diese zeigt hohe Werte des Bestimmtheitsmaßes von 0,69 bis 0,95, lediglich für die Schiffsklasse der restlichen Schiffe fällt es niedriger aus. Auch wenn die Korrelation nach Schiffstypen gemittelt vorliegt, erfolgt die Berechnung mit dem individuellen Bruttoreumgehalt eines Schiffes aus der Lloyds-Schiffsstatistik. Für alle Schiffe, für die dieser Wert im Datensatz fehlt, wird die mittlere Hauptmotorkraft des jeweiligen Schiffstyps dieser Diplomarbeit eingesetzt. Die Einteilung in die neun, in WANG et al. (2007a, Tab. SI1) verwendeten Schiffstypen erfolgt nach den detaillierten Angaben der Lloyds-Schiffsstatistik zu Schiffstypen und -untertypen. Für beide Zukunftsszenarien wird ein Wachstum der Hauptmotorkraft um 33,0% pro Schiff angenommen. Dieser Wert resultiert aus der Skalierung des in EYRING et al. (2005b, Tab. 3) berechneten Anstiegs von 36,8% von 2001 bis 2050 auf den hier vorliegenden Zeitraum von 2006 bis 2050.

Tab. 3.6: Anzahl der aktiven Schiffe und Schiffsbewegungen der kombinierten Bewegungsdatenbank und Korrelation zwischen Bruttoreumgehalt GT [t] und Hauptmotorkraft P [kW] eines Schiffes mit Angabe des Bestimmtheitsmaßes, sortiert nach neun Schiffstypen, Quelle: Verändert nach WANG et al. 2007a, Tab. SI1.

Schiffstyp	Schiffsanzahl	Schiffsbewegungen	Korrelation (x = GT, y = P)	R ²
Stückgut-Frachter	8.812	225.836	$y = 5,3799 x^{0,7633}$	0,86
Tanker	7.630	168.602	$y = 18,189 x^{0,6093}$	0,92
Massengut-Frachter ¹	6.192	92.419	$y = 66,728 x^{0,4826}$	0,74
Containerschiffe ²	4.730	204.981	$y = 2,5008 x^{0,8801}$	0,92
Fischer	1.912	3.197	$y = 19,266 x^{0,6658}$	0,69
Roll-on-Roll-off ³	1.455	65.379	$y = 692,09 x^{0,2863}$	0,83
Passagierschiffe	1.137	53.429	$y = 0,6379 x + 1411,5$	0,95
Tiefkühl-Frachter	1.064	18.086	$y = 1,2462 x^{0,9783}$	0,91
restliche Schiffe ⁴	5.280	26.536	$y = 77,806 x^{0,5283}$	0,51
Summe	38.212	858.465		

¹ auch Kombination von Zement, Erz, Holz mit Öl

² Stückgut-, Massengut-Frachter, Roll-on-Roll-off mit Containerkapazität

³ Fahrzeuge wie PKWs, LKWs, Züge

⁴ Schlepper, Bagger, Versorgungsschiffe, Forschungsschiffe, Yachten

Überspringen von Zwischenhäfen

Wie bereits in der statistischen Auswertung vermutet, zeigten sich in ersten Ergebnissen zukünftiger Schiffsverkehrsdichten trotz der offenen Meeresspassagen und der kürzeren Entfernung nur wenige Nordpolarrouten, weil Schiffe auf längeren Schiffsreisen nicht einfach von Start- zu Zielhafen fahren, sondern unterwegs auch weitere Zwischenhäfen anlaufen. So kann eine Schiffsbewegung von Rotterdam nach Tokio nicht auf eine Nordpolarroute umgelegt werden, wenn unterwegs Suez oder Singapur angelaufen wird. Um daher die Anzahl möglicher Nordpolarrouten zu erhöhen, sollen in den Schiffsbewegungen die wichtigsten Zwischenstationen Ärmelkanal, Gibraltar, Suez/ Port Said und Panama Kanal übersprungen werden, weil diese keine Handelshäfen wie Singapur, sondern lediglich Wegmarkierungen einer längeren Schiffsreise darstellen.

Der Zielhafen einer Schiffsbewegung der Lloyds-Schiffsstatistik wird übersprungen, wenn einer der fünf obigen Zwischenhäfen vorliegt und die Bewegung der nächsten Zeile die gleiche Schiffsnummer und keine Hafen-Fehlwerte aufweist. Weiterhin darf ein Zwischenhafen nur ausgelassen werden, wenn das Schiff nach dem Anlegen tatsächlich in die gleiche Richtung weiterfährt, wenn sich also der Starthafen und der neue Zielhafen der nächsten Zeile in unterschiedlichen Lloyds-Regionen beiderseits des Zwischenhafens befinden (siehe Tab. 3.7).

Tab. 3.7: Die zum Übersprung der fünf Zwischenhäfen geforderten, unterschiedlichen Lloyds-Regionen für die jeweiligen Start- und Zielhäfen einer Schiffsbewegung (Abkürzungserklärung siehe Tab. 3.4).

Zwischenhafen	Region 1	Region 2
Dover-Straße (UKE)	SCN, UKE, NEU	IBE, SEU, BLK, EMD, NAF, RED, ARA, IND, SEA, CHI, JPN, CAN, USA; USG, CAR, CAM; USP
Gibraltar (SEU)	SCN, UKE, NEU, IBE	SEU, BLK, EMD, NAF, RED, ARA, IND, SEA, CHI, JPN
Suez/ Port Said (NAF)	SCN, UKE, NEU, IBE, SEU, BLK, EMD, NAF	RED, ARA, IND, SEA, CHI, JPN
Panama-Kanal (CAM)	USP, SEA, CHI, JPN, AUS	SCN, UKE, NEU, IBE, SEU, BLK, NAF, EMD, CAN, USA, USG, CAR

Dabei können leichte Unsicherheiten entstehen, weil der Ärmelkanal und der Panama-Kanal nicht wie die anderen Zwischenhäfen genau die Grenze zweier Lloyds-Regionen darstellen, sondern mitten in UKE bzw. CAM liegen. Sobald ein Hafen übersprungen werden kann, wird die Schiffsroute vom Starthafen zum neuen Zielhafen der nächsten Zeile mit neuen geographischen Koordinaten und Ankunftsdatum gebildet. Dann kann bis zu vier weitere Male getestet werden, ob der nächste Zielhafen ebenfalls ausgelassen werden kann, bis die Ergebnisroute feststeht. Insgesamt ergeben sich durch diese Zusammenfassung weniger Schiffsbewegungen als zuvor. Durch das Überspringen von Zwischenhäfen ergeben sich teilweise auch neue Schiffsrouten, wenn die durch den Wellenausbreitungs-Algorithmus gefundene Route kürzer ist als die tatsächlich gefahrene mit Zwischenhafen. Beispielsweise führt das Überspringen des Ärmelkanals bei Schiffsbe-

wegungen von Norwegen nach Neufundland zu kürzeren, idealen Schiffsrouten nördlich von Großbritannien, welche in Realität eventuell wegen hohen Seegangs vermieden werden.

Resultierender Eingangsdatsatz für die Routenfindung

Nach der Aussortierung aller Schiffsbewegungen mit fehlendem Hafen- oder geographischen Koordinatenbezug, identischen Start- und Zielhäfen und geschätzten oder fehlerhaften Datumsangaben können 858.465 Schiffsbewegungen der vorhandenen 1.001.123 in der Routenfindung aller Szenarien berücksichtigt werden. Dabei sind 38.212 Schiffe der insgesamt 90.840 der Schiffsdatenbank aktiv. Tab. 3.6 zeigt die Anzahl dieser aktiven Schiffe und Schiffsbewegungen, sortiert nach den neun unterschiedlichen Schiffstypen aus WANG et al. (2007a, Tab. SI1), die auch in der weiteren Emissionsberechnung als Einteilung dienen.

Im letzten Verarbeitungsschritt werden die vorliegenden Schiffsbewegungen schließlich neu sortiert und alle Schiffsbewegungen mit gleichen Eigenschaften zusammengefasst, so dass für jedes Szenario ein passender Eingangsdatsatz für die Wellenausbreitungs-Methodik entsteht. Dieser umfasst für jede Schiffsroute die auf das $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter gerundeten geographischen Koordinaten des Start- und Zielhafens, den Kanaltyp zur Angabe der für die jeweilige Schiffsgröße zugelassenen Schifffahrtskanäle, den Reisemonat der Route zur Ermittlung der entsprechenden Meereis-Ausbreitung, die Gesamtzahl der Schiffe, die die beschriebene Route unter den angegebenen Bedingungen befahren und zuletzt die entsprechende Schiffszahl aller neun Schiffstypen und deren jeweils aufsummierte Hauptmotorkraft. Bei der Routensortierung wird dabei nicht unterschieden, ob das Schiff vom Start- zum Zielhafen oder in Gegenrichtung fährt. Weiterhin dient für die Zukunftsszenarien zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Schiffszahlen wiederum EYRING et al. (2005b, Tab. 3) als Vorlage. Die dort berechneten Wachstumsprognosen von 2001 bis 2050 werden auf den hier betrachteten Zeitraum 2006 bis 2050 skaliert. Dabei ergeben sich für das CLE- und BAU-Zukunftsszenario aufgrund unterschiedlicher Annahmen in der Entwicklung des Weltseehandels verschiedene Wachstumsprognosen von 36,2% und 81,5%, welche auf die Schiffszahlen jeder Schiffsbewegung angewandt werden.

Somit ergibt sich jeweils ein Datensatz mit 198.241 bzw. 186.612 sortierten Schiffsrouten gleicher Eigenschaften und Bedingungen für den Wellenausbreitungs-Algorithmus der Routenfindung des Gegenwartsszenarios bzw. der beiden Zukunftsszenarien. Deren Unterschiede äußern sich dabei in verschiedenen Kanaltypen, Schiffszahlen und Hauptmotorkraft-Werten. Die unterschiedlichen Meereis-Masken werden erst im Wellenausbreitungs-Algorithmus eingelesen.

Spezielle Eingangsdatsätze für Validierung und Vergleich der Ergebnisse

Für Validierung und Vergleich der Ergebnisse der gegenwärtigen, globalen Routenfindung und Emissionsberechnung mit der Schiffsverkehrsdichte des AMVER-Schiffsreportsystems (siehe Kapitel 2.1.2) und dem Bottom-up-Emissionskataster des STEEM-Modells (siehe Kapitel 2.1.3) muss eine adäquate Einschränkung der sortierten Routen vorgenommen werden. Für die Validierung mit AMVER werden nur solche Schiffsbewegungen berücksichtigt, die dessen Aufnahmebedingungen erfüllen, also solche von Schiffen einer Größe von mindestens 100 Bruttoregister-

tonnen und einer Reisezeit von mehr als einem Tag oder Schiffsbewegungen von Kreuzfahrtschiffen, Forschungsschiffen oder Fischern. Für den Vergleich mit dem STEEM-Modell werden lediglich Schiffsbewegungen betrachtet, deren Start- oder Zielhäfen in den nordamerikanischen Lloyds-Regionen USP, USG, USA; CAM, CAR oder CAN liegen (siehe Tab. 3.4 zur Abkürzungserklärung). Aus 571.063 und 102.261 ausgewählten Schiffsbewegungen ergeben sich 151.324 und 36.033 sortierte Routen für die AMVER-Validierung und den STEEM-Vergleich.

3.3.3 Erstellung globaler Schiffsverkehrsdichten

Als Eingangsdatensätze für den Wellenausbreitungs-Algorithmus zur Routenfindung dienen somit die korrigierte Land-Wasser-Maske und die monatlichen Meereis-Masken gegenwärtiger und zukünftiger Bedingungen für das $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter sowie die im vorigen Kapitel entwickelten Eingangsdatensätze mit 198.241 und 186.612 sortierten Schiffsrouten gleicher Eigenschaften und Bedingungen für das Gegenwartsszenario und die beiden Zukunftsszenarien. Dieses Kapitel soll nun darlegen, wie der Wellenausbreitungs-Algorithmus des Kapitels 3.2.3 aus diesen Eingangsdaten globale gegenwärtige und zukünftige Schiffsverkehrsdichten ohne und mit Nordpolarrouten erstellt und wie diese anschließend für die Validierung mit Schiffsverkehrsdichten aus Schiffsreportsystemen gewichtet und normiert werden.

Anwendung des Wellenausbreitungs-Algorithmus zum Aufbau globaler Schiffsverkehrsdichten

Für jede sortierte Schiffsroute des Eingangsdatensatzes wird in einem Durchlauf der Wellenausbreitung die Routenfindung vom Start- zum Zielhafen vollzogen. Dabei weisen Kanaltyp und Reisemonat einer Schiffsroute und das jeweilige Szenario darauf hin, mit welchen Schifffahrtskanälen und welcher monatlichen Meereis-Maske das Modellgitter für diese Routenfindung aktualisiert werden soll. Dazu werden die Gitterboxen der gesperrten Schifffahrtskanäle als Land ausgewiesen und alle Meeres-Gitterboxen mit einer Meereis-Konzentration von mindestens 50% als Meereis (siehe Kapitel 3.3.1). Bei der Betrachtung der Befahrbarkeit der Nachbar-Gitterboxen in der Wellenausbreitung muss dann sowohl auf Land als auch auf Meereis geprüft werden. Für eine Schiffsroute finden sich die Unterschiede zwischen dem Gegenwartsszenario und den beiden Zukunftsszenarien somit in unterschiedlichen Schifffahrtskanälen und Meereis-Ausdehnungen des Modellgitters, aber auch in verschiedenen Schiffszahlen und Hauptmotorkraft-Werten der Schiffsrouten. Auf den Kanal-Gitterboxen findet die Wellenausbreitung weiterhin verzögert statt (siehe Kapitel 3.3.1). Denn die nach Gleichung (3.2) berechnete Großkreis-Distanz einer Gitterbox zu deren Nachbar-Gitterbox wird um die Hälfte des jeweiligen Verlängerungsfaktors erhöht, wenn die Welle von einer beliebigen Gitterbox ausgehend eine Kanal-Gitterbox erreicht und auch wenn sie sich anschließend von dieser zur nächsten Gitterbox weiter bewegt. Durch die Lage der Kanal-Gitterboxen in der Land-Wasser-Maske ist dabei sichergestellt, dass sie in der Wellenausbreitung nicht durch größere Schrittweiten übersprungen werden können.

Nachdem der Zielhafen von der Welle erreicht wurde, wird der genaue Routenverlauf rückwärts bis zum Starthafen aufgebaut und für jede Routen-Gitterbox das Produkt der gefahrenen Distanz

[km] in dieser Gitterbox mit der aktiven Schiffszahl dieser Route bestimmt, wobei in den beiden Zukunftsszenarien die gewachsenen Schiffszahlen eingehen. Weiterhin wird der gesamte Verlängerungsfaktor [km] eines Kanals zur gefahrenen Distanz der Kanal-Gitterbox selbst addiert und dessen Anteile von den Nachbar-Gitterboxen entfernt. Auch wenn alle Routen mit identischen Start- und Zielhäfen in der Vorbearbeitung aussortiert wurden, verbleiben 43.137 Routen mit identischen Start- und Zielhafen-Gitterboxen, aber unterschiedlichen Häfen. Für diese ergibt die Gesamtroutendistanz ebenfalls den Wert Null. Allerdings kann hier davon ausgegangen werden, dass die wahre Routenlänge innerhalb dieser Hafen-Gitterbox liegt. So wird die Gesamtroutendistanz D [km] angenähert durch das Mittel der halben Länge der Hafen-Gitterbox in Richtung der geographischen Länge und Breite φ in Bogenmaß nach Gleichung (3.11).

$$D = 0,5 \cdot (0,5 \cdot 111 + 0,5 \cdot 111 \cdot \cos \varphi) \quad (3.11)$$

Ein Distanzfeld wird mit der korrigierten $1^\circ \times 1^\circ$ -Land-Wasser-Maske mit Schifffahrtskanälen und den permanenten Meereis-Gitterboxen initialisiert, die alle 12 Monate des entsprechenden Szenarios als Meereis ausgewiesen sind. Dieses fängt die berechneten Distanzwerte der Routen-Gitterboxen aller gefundenen Routen des Eingangsdatensatzes auf. Ein gleichermaßen initialisiertes Schiffsverkehrsdichte-Feld addiert dagegen die Schiffszahlen der Routen-Gitterboxen aller gefundenen Routen. Dabei muss beachtet werden, dass bei der Hälfte aller ermittelten Routen die Start- oder Zielhäfen auf Land-Gitterboxen liegen und daher die in Kapitel 3.2.3 beschriebene kurzzeitige Korrektur der Land-Wasser-Maske in der Wellenausbreitung zur Routenfindung angewendet wird. Da diese kurzzeitig korrigierten Land-Gitterboxen folglich ebenfalls Distanzwerte und aktive Schiffszahlen enthalten, werden sie in den Ergebnisfeldern im Folgenden als Meeres-Gitterboxen ausgewiesen. In den einzelnen Durchläufen der Wellenausbreitung zur Routenfindung bleiben sie aber weiterhin als Land-Gitterboxen erhalten. Mit den speziellen Eingangsdatensätzen für die Validierung mit AMVER und den Vergleich mit STEEM wird der Wellenausbreitungs-Algorithmus analog vollzogen. Die resultierenden globalen Distanzfelder der gefahrenen Strecken [km] pro Gitterbox für das Gegenwartsszenario, die beiden speziellen Eingangsdatensätze und die beiden Zukunftsszenarien werden in Abb. 4.1, 4.2, 4.4 und 4.7 der Kapitel 4.1.1 und 4.2.1 dargestellt, in denen die Ergebnisse dieser Diplomarbeit diskutiert werden.

Gewichtung und Normierung der Schiffsverkehrsdichten

Zur Validierung sollen die resultierenden gegenwärtigen Schiffsverkehrsdichten in Kapitel 4.1.1 mit denjenigen der ICOADS- und AMVER-Schiffsreportsysteme verglichen werden. Für den ICOADS-Vergleich werden dabei die Ergebnisse des gesamten Eingangsdatensatzes herangezogen, weil hier alle Schiffsgrößen und -typen gleichermaßen repräsentiert werden. Dagegen wird für den AMVER-Vergleich zur Berücksichtigung der bestehenden Teilnahmebedingungen das Ergebnis des speziellen Eingangsdatensatzes verwendet. Für einen adäquaten Vergleich mit den verbesserten Schiffsverkehrsdichten aus WANG et al. (2007b) werden die Ergebnisse des Wellenausbreitungs-Algorithmus zuerst mit der installierten Hauptmotorkraft gewichtet und anschließend normiert. Dazu werden im Schiffsverkehrsdichte-Feld für jede gefundene Route nun

nicht mehr die Schiffszahlen aller Schiffstypen pro Gitterbox aufgefangen, sondern deren aufsummierte Hauptmotorkraft des Eingangsdatensatzes. Anschließend wird diese gewichtete Schiffsverkehrsdichte normiert, so dass die Ergebniswerte [Millionstel der globalen Gesamtsumme] mit den SEAF-Werten der ICOADS- und AMVER-Schiffsverkehrsdichten aus WANG et al. (2007b) vergleichbar sind (siehe Kapitel 2.1.2). Die Schiffsverkehrsdichte für den STEEM-Vergleich und diejenigen der beiden Zukunftsszenarien werden zur Gegenüberstellung der verschiedenen Ergebnisse dieser Diplomarbeit analog bearbeitet. Die resultierenden normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten sind in Abb. 4.1, 4.2, 4.4 und 4.7 der Kapitel 4.1.1 und 4.2.1 dargestellt.

3.4 Methodik zur Berechnung globaler Emissionskataster

Nachdem nun der Wellenausbreitungs-Algorithmus für alle sortierten Routen der Lloyds-Schiffsstatistik eine passende Routenfindung für das Gegenwartsszenario und die beiden Zukunftsszenarien vollzogen hat, beinhalten deren Distanzfelder die gefahrenen Strecken [km] aller Schiffsbewegungen pro Gitterbox. Diese Größe ist für die nun folgende Treibstoff- und Emissionsberechnung nach dem Bottom-up-Ansatz entscheidend, weil sie mithilfe der Schiffsgeschwindigkeit eine weitaus bessere Bestimmung der Motorlaufzeit ermöglicht als die nach Schiffstypen gemittelten Schätzungen bisheriger Top-down-Ansätze. Das Kapitel 3.4.1 geht im Folgenden auf die Berechnung des weltweiten Treibstoffverbrauches aller drei Szenarien ein und bedient sich zur Durchführung des Bottom-up-Ansatzes der im Kapitel 2.1 dargelegten Konzepte und Motorangaben anderer Studien. Anschließend beschreibt Kapitel 3.4.2 die Erstellung globaler Emissionskataster für NO_x , CO_2 , SO_x , CO , Partikel und Hydrocarbone für das Gegenwartsszenario und die beiden Zukunftsszenarien unter Berücksichtigung der Nordpolarrouten, die sich in der Routenfindung ergaben.

3.4.1 Berechnung des globalen Treibstoffverbrauches:

Dieses Kapitel stellt im Folgenden vor, wie aus den Ergebnissen des Wellenausbreitungs-Algorithmus und gemittelten Motorangaben der weltweite Treibstoffverbrauch für das gegenwärtige und die beiden zukünftigen Szenarien pro Gitterbox des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters berechnet wird.

Die Ermittlung des Treibstoffverbrauches wird nach dem Bottom-up-Ansatz adäquat zu Gleichung (2.4) vollzogen, wobei die Berechnung nach Haupt- und Hilfsmotoren getrennt erfolgt. Für die Zielhafen-Gitterbox jeder Route werden weiterhin auch die Werte für den Treibstoffverbrauch bei der Hafeneinfahrt und dem Be- und Entladen im Hafen ermittelt. Hier treten im Vergleich zur Fahrt auf hoher See größere Werte der Hilfsmotor-Auslastung und der spezifischen Treibstoff-Öl-Verbrauchsrate bei geringerer Hauptmotor-Auslastung auf. Die entsprechenden Anteile des Treibstoffverbrauches durch Hauptmotoren, Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten $FC_{M,p}$, $FC_{A,j}$ und $FC_{H,j}$ [kg] pro Gitterbox j des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters ergeben sich während des

Wellenausbreitungs-Algorithmus durch Aufsummierung der Werte aller Schiffstypen i und aller Routen k nach Gleichung (3.12), (3.13) und (3.14):

$$FC_{M,j} = \sum_{i,k} FC_{M,i,j,k} = \sum_{i,k} P_{M,i,k} \cdot F_{M,i} \cdot \left(\frac{D_{j,k}}{v_i} \right) \cdot SFOC_{M,i} \quad (3.12)$$

$$FC_{A,j} = \sum_{i,k} FC_{A,i,j,k} = \sum_{i,k} P_{A,i,k} \cdot F_{A,i} \cdot \left(\frac{D_{j,k}}{v_i} \right) \cdot SFOC_A \quad (3.13)$$

$$FC_{H,j} = \sum_{i,k} FC_{H,i,j,k} = \sum_{i,k} (P_{M,i,k} \cdot F_{HM} + P_{A,i,k} \cdot F_{HA}) \cdot \tau_{H,i} \cdot SFOC_{H,i} \quad (3.14)$$

Da die vorliegende Lloyds-Schiffsstatistik keine Motorangaben beinhaltet, werden die meisten Eingangsparameter der Treibstoff-Berechnung nach Schiffstypen gemittelt aus anderen Studien übernommen (siehe Tab. 3.8). Die einzige, individuell für jedes Schiff vorliegende Motorgröße ist die installierte Hauptmotorkraft $P_{M,i,k}$ [kW], die für alle Schiffe eines Schiffstyps i und einer bestimmten Route k aufsummiert aus den sortierten Routen entnommen werden kann. Denn sie wurde für jedes Schiff aus dem individuellen Bruttoreumgehalt [t] der Lloyds-Schiffsstatistik und einer schiffstyp-abhängigen Korrelation nach WANG et al. (2007a, Tab. SI3) gewonnen. Die installierte Hilfsmotorkraft $P_{A,i,k}$ [kW] aller Schiffe eines Schiffstyps i und einer bestimmten Route k ergibt sich dagegen aus der mittleren installierten Hilfsmotorkraft pro Schiff $\bar{P}_{A,i}$ [kW] aus WANG et al. (2007a, Tab. SI3) und der Schiffsanzahl $N_{i,k}$ eines Schiffstyps i auf der Route k aus den sortierten Routen. Die pro Schiffstyp gemittelten Werte der Hauptmotor-Auslastung $F_{M,i}$ [%] und Hilfsmotor-Auslastung $F_{A,i}$ [%] sind ebenfalls WANG et al. (2007a, Tab. SI3) entnommen, wohingegen die entsprechenden Hafenwerte F_{HM} [%] und F_{HA} [%] für alle Schiffe aus EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED (2005, Tab. B.2) stammen.

Die im Wellenausbreitungs-Algorithmus ermittelte Distanz $D_{j,k}$ [km], die von allen Schiffen einer Route k auf einer bestimmten Gitterbox j zurückgelegt wird, ermöglicht zusammen mit der mittleren Schiffsgeschwindigkeit v_i [km/h] aus WANG et al. (2007a, Tab. SI2) eine weitaus bessere Abschätzung der Motorlaufzeit $\tau_{i,j,k}$ [h] als die gemittelten Werte bisheriger Top-down-Ansätze (ENDRESEN et al. 2003, CORBETT und KÖHLER 2003, EYRING et al. 2005a). Die groben Angaben der Lloyds-Schiffsstatistik zum Abfahrts- und Ankunftstag am Start- bzw. Zielhafen ohne exakte Uhrzeit und mit vielen Schätzungsfehlern reichen für eine noch genauere Bestimmung der Motorlaufzeit jeder Schiffsroute nicht aus. Für die Hafenaufenthaltszeit $\tau_{H,i}$ [h] werden wieder nach Schiffstypen gemittelte Werte aus EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED (2005, Tab. 2-10) herangezogen, welche die Summen aus Manövrierzeit bei der Hafeneinfahrt und Be- und Entladezeit im Hafen darstellen. Die mittlere spezifische Treibstoff-Öl-Verbrauchsrate für Hauptmotoren $SFOC_{M,i}$ [kg/kWh] wird EYRING et al. (2005a, Tab. 1) entnommen, ebenso wie der für alle Schiffe gemittelte Wert der Hilfsmotoren $SFOC_A$ [kg/kWh]. In dieser Studie werden jedoch nur fünf statt neun Schiffstypen wie in WANG et al. (2007a) unterschieden, so dass der dortige Wert für Stückgut-Frachter auch für Tiefkühl-Frachter gilt und der Wert für restliche Schiffe ebenfalls für Fischer, Passagierschiffe und Roll-on-Roll-off. Die ent-

sprechenden gemittelten Hafenverte $SFOC_{H,i}$ [kg/kWh] für Haupt- und Hilfsmotoren entstammen schließlich EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED (2005, Tab. B.4).

Tab. 3.8: Eingangsdaten für die Treibstoff- und Emissions-Berechnung der Hauptmotoren, Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten nach dem Bottom-up-Ansatz, sortiert nach neun Schiffstypen. Dabei steht HC für Hydrocarbone, PM für Partikel und die letzte Spalte für schiffstyp-unabhängige Werte von Hilfsmotoren oder Hafenaktivitäten, Quelle: Verändert nach EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED 2005, Tab. 2-10, B.2, B.3 und B.4, WANG et al. 2007a, Tab. SI2 und SI3 und EYRING et al. 2005a, Tab. 1.

	SF ¹	T	MF	C	F	P	TF	RR	R	
$\bar{P}_{A,i}$ [kW]	1.777	1.985	1.169	5.746	1.680	39.563	1.300	2.156	1.680	---
$F_{M,i}$ [%]	80	75	75	80	70	55	80	80	70	20 (F_{HM})
$F_{A,i}$ [%]	17	13	17	13	17	25	20	15	17	40 (F_{HA})
v_i [km/h]	22,8	24,4	26,1	36,9	21,7	41,5	30,4	31,3	23,5	---
$\tau_{H,i}$ [h]	40	42	65	27	95	23	55	19	51	---
$SFOC_{M,i}$ [kg/kWh]	0,215	0,210	0,197	0,208	0,224	0,224	0,215	0,224	0,224	0,235 ($SFOC_A$)
$SFOC_{H,i}$ [kg/kWh]	0,228	0,235	0,227	0,226	0,228	0,228	0,226	0,228	0,228	---
$EI_{M,NOx,i}$ [g/kg]	72	70	74	83	50	50	72	50	50	48 ($EI_{A,NOx}$)
$EI_{M,CO_2,i}$ [g/kg]	3.195	3.338	3.305	3.053	3.125	3.112	2.839	3.000	3.027	2.950 (EI_{A,CO_2})
$EI_{M,SOx,i}$ [g/kg]	44,7	44,7	44,7	44,7	40,2	40,2	44,7	40,2	40,2	40,2 ($EI_{A,SOx}$)
$EI_{M,HC,i}$ [g/kg]	6,6	6,6	6,6	6,6	8,0	8,0	6,6	8,0	8,0	8,5 ($EI_{A,HC}$)
$EI_{M,PM,i}$ [g/kg]	6,1	5,9	6,1	5,9	6,6	6,6	6,1	6,6	6,6	5,7 ($EI_{A,PM}$)
$EI_{M,CO,i}$ [g/kg]	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72 ($EI_{A,CO}$)
$EI_{H,NOx,i}$ [g/kWh]	13,3	12,3	13,4	13,5	13,3	13,2	13,4	13,3	13,1	---
$EI_{H,CO_2,i}$ [g/kWh]	725	746	721	720	725	725	720	724	724	---
$EI_{H,SO_2,i}$ [g/kWh]	12,3	12,4	12,2	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,1	---
$EI_{H,HC,i}$ [g/kWh]	0,5	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	---
$EI_{H,PM,i}$ [g/kWh]	0,9	1,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	---

¹ Verwendete Abkürzung der verschiedenen Schiffstypen: Stückgut-Frachter (SF), Tanker (T), Massengut-Frachter (MF), Containerschiffe (C), Fischer (F), Passagierschiffe (P), Tiefkühl-Frachter (TF), Roll-on-Roll-off (RR), restliche Schiffe (R)

Für die Berechnung des zukünftigen Treibstoffverbrauchs von Hauptmotoren, Hilfsmotoren und im Hafen wird sich des Treibstoff-Reduktionsfaktors ρ_S eines Zukunftsszenarios S aus EYRING et al. (2005b, Tab. 2) bedient, der bestimmt, welcher Anteil des Treibstoffverbrauchs durch alternative Energien und Treibstoffe eingespart wird. Im CLE-Zukunftsszenario wird dieser auf 25% geschätzt, für das BAU-Szenario wird dagegen angenommen, dass die gesamte Weltflotte weiterhin lediglich Diesel-Treibstoff benutzt und daher keine Reduktion stattfindet. Das Wachstum der zukünftigen Hauptmotorkraft pro Schiff aus EYRING et al. (2005b, Tab. 3) wurde bereits in der Ermittlung der sortierten Routen berücksichtigt (siehe Kapitel 3.3.2). Ein zukünftiger Anstieg für Hilfsmotoren oder die spezifische Treibstoff-Verbrauchsrate wird nicht angenommen.

Der gesamte Treibstoffverbrauch FC ergibt sich aus der Addition der Werte für Haupt- und Hilfsmotoren aller Gitterboxen j des Modellgitters und der Hafenwerte der Zielhafen-Gitterboxen aller Routen. Der Anteil der Nordpolarrouten wird schließlich aus allen Gitterboxen einer geographischen Breite von mindestens 66° N ermittelt. Eine weitere Einteilung erfolgt in die Nordwest-Passage zwischen den Meridianen 50° W an der Westküste Grönlands und 170° W in der Bering-Straße, die Nordost-Passage zwischen 50° O westlich von Nowaja Semlja und ebenfalls dem 170° W-Meridian und in die Grönland-See zwischen 50° W und 50° O, welche in dieser Diplomarbeit aufgrund der bereits gegenwärtig hohen Schiffsaktivität getrennt betrachtet wird. Die resultierenden Werte des gesamten Treibstoffverbrauches und die Anteile der Nordpolarrouten der verschiedenen Szenarien werden in den Kapiteln 4.1.2 und 4.2.2 diskutiert.

3.4.2 Ermittlung globaler Emissionskataster

Unter Verwendung der zuvor berechneten Treibstoffverbrauchs-Werte werden in diesem Kapitel schließlich globale Bottom-up-Emissionskataster für NO_x , CO_2 , SO_x , CO, Partikel und Hydrocarbone des gegenwärtigen Szenarios und der beiden zukünftigen Szenarien mit Berücksichtigung möglicher Nordpolarrouten erstellt, welche den Fokus dieser Studie darstellen.

Die Emissionsberechnung wird ebenfalls nach dem Bottom-up-Ansatz adäquat zu Gleichung (2.2) und getrennt nach Haupt-, Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten durchgeführt. Der Emissionswert $E_{x,j}$ [g] einer bestimmten Spezies x pro Gitterbox j des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters wird aus der Addition der Hauptmotoren- und Hafenaktivitäts-Anteile pro Schiffstyp i und des schiffstyp-unabhängigen Hilfsmotor-Anteils für alle Routen k nach Gleichung (3.15) ermittelt:

$$E_{x,j} = \sum_{i,k} E_{x,i,j,k} = \sum_k \left[\sum_i \left(FC_{M,i,j,k} \cdot EI_{M,x,i} + FC_{H,i,j,k} \cdot \frac{EI_{H,x,i}}{SFOC_{H,i}} \right) + FC_{A,j,k} \cdot EI_{A,x} \right] \quad (3.15)$$

In die Berechnung gehen die folgenden, meist nach Schiffstypen gemittelten Eingangsparameter ein, die ebenso in Tab. 3.8 dargestellt sind. Der Treibstoffverbrauch der Hauptmotoren $FC_{M,i,j,k}$ [kg] und derjenige für Hafenaktivitäten $FC_{H,i,j,k}$ [kg] aller Schiffe eines Schiffstyps i und der Treibstoffverbrauch der Hilfsmotoren $FC_{A,j,k}$ [kg] aller Schiffe ergeben sich für jede Gitterbox j jeder Route k aus der Berechnung des Kapitel 3.4.1. Die Emissionsfaktoren für Hauptmo-

toren $EI_{M, x, i}$ [g/kg Treibstoff] einer bestimmten Spezies x werden pro Schiffstyp i EYRING et al. (2005a, Tab. 1) entnommen, wobei dieselbe Umverteilung von fünf zu neun Schiffstypen wie bei der Treibstoff-Berechnung erfolgt. Lediglich die CO_2 -Werte werden aus EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED (2005, Tab. B.3) herangezogen, wohingegen die Emissionsfaktoren für Hilfsmotoren $EI_{A, x}$ [g/kg Treibstoff] einer bestimmten Spezies x wiederum aus EYRING et al. (2005a, Tab. 1) stammen. Schließlich müssen die energiebezogenen Hafen-Emissionsfaktoren $E_{H, x, i}$ [g/kWh] aus EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED (2005, Tab. B.4) zur Umwandlung in die benötigten Treibstoff-bezogenen Emissionsfaktoren [g/kg Treibstoff] durch die spezifischen Treibstoff-Öl-Verbrauchsrate im Hafen $SFOC_{H, i}$ [kg/kWh] dividiert werden. Diese Hafen-Emissionsfaktoren gelten für Haupt- und Hilfsmotoren und sind nur für SO_2 statt SO_x und nicht für CO verfügbar.

In der zukünftigen Emissions-Berechnung wird von einer Reduktion der heutigen Emissionsfaktoren ausgegangen. Die entsprechenden Emissions-Reduktions-Faktoren $R_{x, 2050, S}$ einer bestimmten Spezies x der beiden Zukunftsszenarien S werden EYRING et al. (2005b, Tab. 2) entnommen und mit dem Emissionswert $E_{x, j}$ jeder Gitterbox j multipliziert. Aufgrund unterschiedlicher Schwefelgehalte im Treibstoff und verschiedenen Einsatzes vorhandener Emissionsreduktions-Techniken ergeben sich für das CLE- und BAU-Zukunftsszenario dieser Studie somit Emissions-Reduktions-Faktoren von 0,1/ 0,7 für NO_x , 0,95/ 0,95 für CO_2 , 0,21/ 0,83 für SO_x , 0,8/ 1,0 für CO, 0,6/ 0,9 für Hydrocarbone und 0,6/ 0,9 für Partikel.

Die Gesamtemissionen E_x einer bestimmten Spezies x ergeben sich aus der Addition der Werte aller Gitterboxen j des Modellgitters, wobei für CO aufgrund mangelnder Hafen-Emissionsfaktoren kein Hafen-Anteil berechnet werden konnte. Die Anteile der Nordpolarrouten werden analog zur Treibstoff-Berechnung bestimmt. In den Kapiteln 4.1.2 und 4.2.2 werden die Ergebnisse beider Zukunftsszenarien vorgestellt und mit anderen Studien verglichen.

4. Ergebnisse

Das vorige Kapitel stellte den verwendeten Eingangsdatensatz und die Methodik dieser Studie zur Erstellung von globalen Bottom-up-Emissionskatastern eines gegenwärtigen und zweier zukünftiger Szenarien mit Berücksichtigung von Nordpolarrouten vor. Zur Routenfindung für alle Schiffsbewegungen der Lloyds-Schiffsstatistik von 2006 wurde dabei ein verbesserter Dijkstra-Algorithmus auf geographischem $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter unter Berücksichtigung von Landmassen, Meereis, Schifffahrtskanälen und antarktischem Seegang angewendet. Das resultierende Distanzfeld der gefahrenen Strecken aller Schiffsbewegungen pro Gitterbox diente neben gemittelten Motorangaben zur Treibstoff- und Emissions-Berechnung nach dem Bottom-up-Ansatz. Dieses Kapitel präsentiert die Ergebnisse der Diplomarbeit und vergleicht sie mit bisherigen Studien. Kapitel 4.1 zeigt die resultierenden, globalen Schiffsverkehrsdichten und Emissionskataster des Gegenwartsszenarios, validiert diese mit gegenwärtigen Beobachtungsdaten und führt einen Vergleich mit existierenden Emissionskatastern durch. Kapitel 4.2 stellt die Ergebnisse der beiden Zukunftsszenarien vor, vergleicht diese mit bisherigen, zukünftigen Emissionskatastern und geht insbesondere auf zukünftige Entwicklungen im Nordpolarraum ein.

4.1 Ergebnisse des gegenwärtigen Szenarios

Dieses Kapitel präsentiert die Ergebnisse des Gegenwartsszenarios dieser Studie. Kapitel 4.1.1 zeigt die resultierende gegenwärtige Schiffsverkehrsdichte und validiert sie mit den Schiffsreportsystemen von ICOADS und AMVER (siehe Kapitel 2.1.2). Kapitel 4.1.2 stellt die ermittelten Emissionskataster des Gegenwartsszenarios vor und vergleicht die Ergebnisse mit bisherigen globalen Top-down-Berechnungen und einem regionalen Bottom-up-Ansatz (siehe Kapitel 2.1.3).

4.1.1 Gegenwärtige Schiffsverkehrsdichte

Im Folgenden wird die in dieser Studie erstellte globale Schiffsverkehrsdichte des Gegenwartsszenarios vorgestellt und mit den Beobachtungsdaten von AMVER und ICOADS validiert.

Schiffsverkehrsdichte des gegenwärtigen Szenarios

Die zur Routenfindung geeigneten 858.465 Schiffsbewegungen der vorliegenden Lloyds-Schiffsstatistik von sechs Monaten (Feb., Apr., Jun., Aug., Okt., Dez.) des Jahres 2006 wurden nach gleichen Eigenschaften und Bedingungen zu 198.241 sortierten Routen zusammengefasst

(siehe Kapitel 3.3.2). Anschließend ermittelte der im Rahmen dieser Studie entwickelte Wellenausbreitungs-Algorithmus für alle diese Kombinationen aus Start- und Zielhafen die kürzeste Verbindung auf dem $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter des Gegenwartsszenarios (siehe Kapitel 3.3.3). Für 2.856 sortierte Routen oder entsprechend 10.836 Schiffsbewegungen konnte in der Routenfindung keine direkte Verbindungsrouten gefunden werden, weil Start- oder Zielhäfen Binnenhäfen ohne direkten Meereskontakt darstellen oder von Meereis blockiert wurden (siehe Kapitel 3.3.1). Zur späteren Validierung anhand der Schiffsverkehrsdichten von AMVER und ICOADS aus WANG et al. (2007b) wurde die gegenwärtige Schiffsverkehrsdichte dieser Studie weiterhin mit der Hauptmotorkraft der Schiffe gewichtet und normiert (siehe Kapitel 3.3.3). Abb. 4.1 zeigt das resultierende globale Distanzfeld und die normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichte pro Gitterbox für das Gegenwartsszenario.

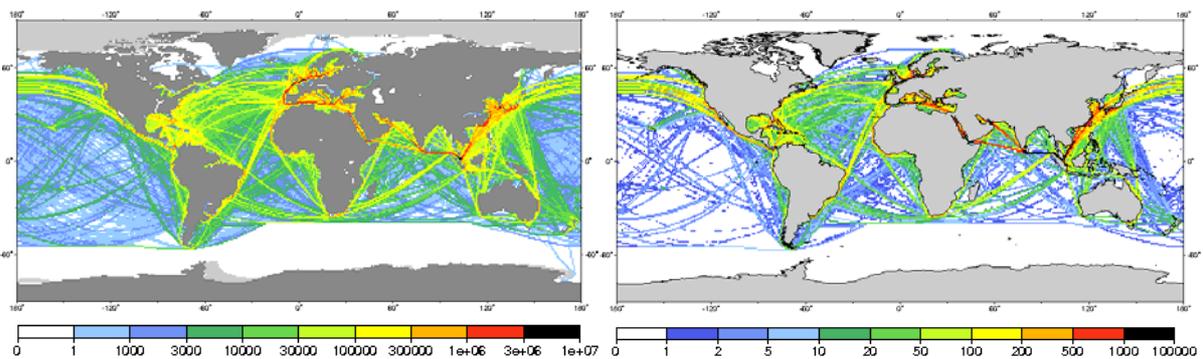


Abb. 4.1: Globales Distanzfeld der gefahrenen Strecken [km] (links) und normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichte mit SEAF-Werten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] pro Gitterbox (rechts) für das Gegenwartsszenario (sechs Monate von 2006).

Generell zeigt das Distanzfeld des gegenwärtigen Szenarios eine gute Abdeckung der globalen Schiffsaktivität (siehe Abb. 4.1, links). Der gesamte Ozeanbereich ist von Schiffsrouten bedeckt, mit Ausnahme der Polargebiete, welche durch Meereis und die antarktische Seegangs-Schwelle blockiert sind. Eindeutig sind stark befahrene Hauptschifffahrtsrouten zu erkennen, welche die wichtigsten Welthäfen miteinander verbinden, beispielsweise diejenige von Rotterdam nach Tokio. Weitere Gebiete hoher Schiffsaktivität stellen die Küstenbereiche von Europa, Ostasien und dem Golf von Mexiko sowie der Nordatlantik und die Philippinen-See dar. Die Gitterbox mit der höchsten Schiffsaktivität liegt im Ärmelkanal (+1/+51) und weist eine befahrene Gesamtdistanz von 5.483.678 km mit entsprechender Schiffszahl von 68.991 im unnormierten Schiffsverkehrsdichte-Feld auf. Diese Schiffsverkehrsdichte zeigt grundsätzlich dieselbe Verteilung wie das Distanzfeld und wird hier daher nicht abgebildet. Dagegen zeigt Abb. 4.1 (rechts) die normierte, mit der Hauptmotorkraft gewichtete Schiffsverkehrsdichte des Gegenwartsszenarios. Durch die Gewichtung werden die langen Hauptschifffahrtsrouten großer Schiffe verstärkt, wie beispielsweise im östlichen Mittelmeer und im südchinesischen Meer. Gleichzeitig wird die küstennahe Aktivität kleiner Schiffe und das Hintergrundrauschen wenig befahrener Schiffsrouten im Pazifik oder Indischen Ozean abgeschwächt und einzelne, polare Schiffsrouten nach Spitzbergen, in die Hudson Bay und in die Antarktis verschwinden.

Validierung mit ICOADS- und AMVER-Beobachtungsdaten

Zur Validierung der Ergebnisse des Wellenausbreitungs-Algorithmus werden die normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten des Gegenwartsszenarios mit den Beobachtungsdaten von ICOADS und AMVER aus WANG et al. (2007b) verglichen (siehe Kapitel 2.1.2). Die Normierung ermöglicht dabei eine grundsätzliche Vergleichbarkeit der Schiffsverkehrsdichte dieser Diplomarbeit, in der nur Schiffsbewegungen von sechs Monaten des Jahres 2006 berücksichtigt wurden, mit den Jahresmitteln von AMVER und ICOADS.

Für den Vergleich mit AMVER wurde die Lloyds-Schiffsstatistik auf diejenigen 571.063 Schiffsbewegungen reduziert, die den Aufnahmebedingungen des AMVER-Schiffsreportsystems entsprechen (siehe Kapitel 3.3.2). Das Distanzfeld und die normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichte wurden analog zum Gegenwartsszenario erzeugt, wobei für 2.055 der 151.324 sortierten Routen keine Verbindung in der Routenfindung ermittelt werden konnte. Die Ergebnisse dieser reduzierten Lloyds-Schiffsstatistik in Abb. 4.2 weisen generell dieselben Muster wie diejenigen des Gegenwartsszenarios auf (siehe Abb. 4.1). Dass aufgrund der Aufnahmebedingungen von AMVER circa 40% weniger Schiffsbewegungen berechnet wurden, zeigt sich deutlich im ostasiatischen Küstengebiet und teilweise im Mittelmeer und in der Karibik. Als Erklärung kann dienen, dass in AMVER besonders kurze Schiffsrouten kleiner Küstenschiffe nicht erfasst werden.

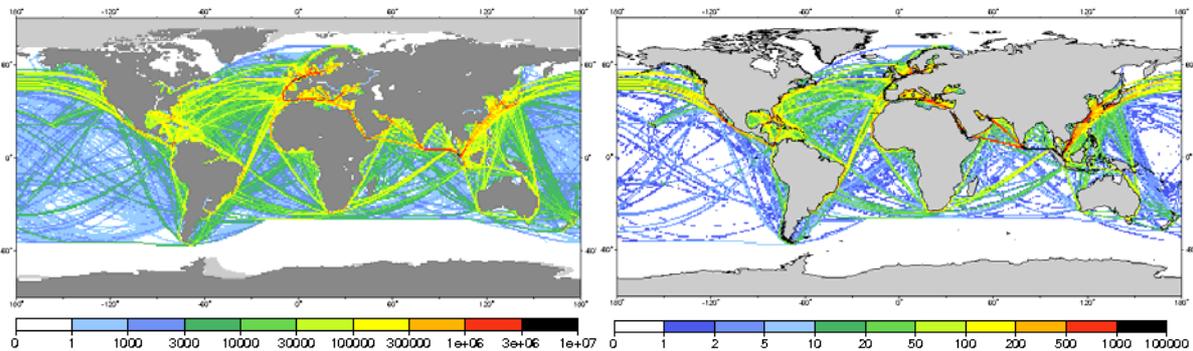


Abb. 4.2: Globales Distanzfeld der gefahrenen Strecken [km] (links) und normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichte mit SEAF-Werten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] pro Gitterbox (rechts) für die reduzierte Schiffsstatistik des Gegenwartsszenarios (sechs Monate von 2006) zur Validierung mit AMVER.

Im Folgenden werden die normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten des Gegenwartsszenarios (siehe Abb. 4.1) mit den Beobachtungsdaten von ICOADS (siehe Abb. 4.3, oben links) und das Ergebnis der reduzierten gegenwärtigen Lloyds-Schiffsstatistik (siehe Abb. 4.2) mit den AMVER-Schiffsreporten (siehe Abb. 4.3, oben rechts) verglichen. Zur Verdeutlichung sind auch die Differenzen der SEAF-Werte dieser Schiffsverkehrsdichten in Abb. 4.3 (unten) abgebildet.

Generell kann festgestellt werden, dass die Schiffsverkehrsdichten dieser Studie gut mit der globalen Verteilung der Schiffsaktivität der beiden Beobachtungsdatensätze übereinstimmen. Im Gegensatz zu den punktuellen Schiffsreporten, für die vor allem in Gebieten geringer Schiffsaktivität wie im Südpazifik keine klaren Routenverbindungen erkennbar sind, sind die Ergebnisse dieser Studie aufgrund der Routenfindungs-Methodik stets aus linearen Schiffsrouten aufgebaut.

Da sich die Schiffsaktivität auf schmale, stark frequentierte Hauptschifffahrtrouten konzentriert, weisen diese im Vergleich zu Schiffsreporten deutlich höhere SEAF-Werte auf. Die berechneten Hauptschifffahrtrouten im Südatlantik, Indischen Ozean und Mittelmeer stimmen gut mit den Beobachtungen überein. Aber die deutlichen Schiffsrouten von AMVER bzw. ICOADS in der Karibik bzw. im Zentralpazifik und der Philippinen-See werden in dieser Studie nicht reproduziert, ebenso wenig die in ICOADS beobachteten, schwachen Nordpolarrouten westlich von Grönland und in der Barentssee. Denn letztere sind durch die gegenwärtige Meereis-Ausbreitung des Modellgitters versperrt, weiterhin enthält die verwendete Lloyds-Schiffsstatistik generell keine Schiffsaktivität an der Westküste Grönlands (persönliche Korrespondenz David Long, LMIU).

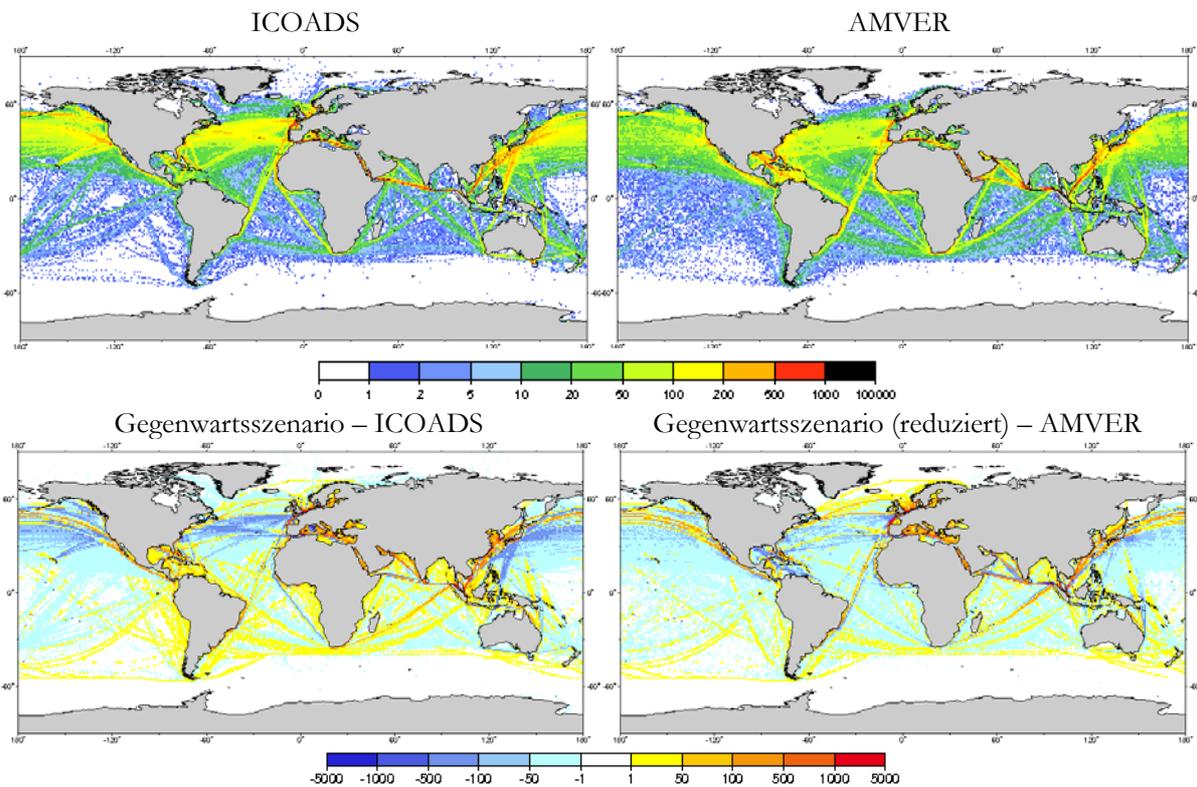


Abb. 4.3: SEAF-Werte der normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] von ICOADS (oben links) und AMVER (oben rechts) und Differenz der normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] zwischen dem Gegenwartsszenario dieser Studie (sechs Monate von 2006) und ICOADS (unten links) und zwischen der reduzierten gegenwärtigen Lloyds-Schiffsstatistik (sechs Monate von 2006) und AMVER (unten rechts), Quelle: Verändert nach WANG et al. (2007b).

Aufgrund der Routengebundenheit der Schiffsverkehrsdichte dieser Studie zeigt sich weiterhin auf allen Weltmeeren, vor allem im Nordatlantik und -pazifik, eine geringere Streuung der Schiffsaktivität als in den Beobachtungsdaten. Dieser Unterschied tritt besonders im Vergleich mit den ICOADS-Schiffsreporten hervor, weil sie in dieser Region eine höhere Aktivität aufweisen als AMVER. Im Nordpazifik wird die Schiffsaktivität im Jahresverlauf aufgrund eines saisonal variierenden Seegangs über ein größeres Gebiet verteilt. Der Wellenausbreitungs-Algorithmus dieser Studie wählt jedoch lediglich die kürzeste Großkreis-Route nahe den Aleuten, weil der entsprechende Seegang nicht berücksichtigt wird. Ähnliche Großkreis-Routen erstellte der Rou-

tenfindungs-Algorithmus auch in Antarktis-Nähe für Routen von Südamerika nach Ostasien, welche jedoch durch den Einsatz der antarktischen Seegangs-Schwelle unterbunden werden konnten. Für den Nordpazifik ist eine solche totale Absperrung dagegen nicht sinnvoll. Eine Streuung der Aktivität der Hauptschifffahrtrouten auf Nachbar-Gitterboxen erweist sich ebenfalls als ungeeignet, weil sich die Streu-Intensität global stark unterscheidet. Die Hauptroute von Sri Lanka nach Singapur weist beispielsweise überhaupt keine Streuung auf. Schließlich zeigt diese Studie eine höhere Schiffsaktivität als die Beobachtungsdaten in den Küstengebieten von Europa und Ostasien, vor allem im AMVER-Vergleich, weil aufgrund der Aufnahmebedingungen besonders küstennahe Schifffahrt schlecht erfasst wird. In Kapitel 2.1.2 wurde bereits dargelegt, dass die Küstenschifffahrt in beiden Schiffsreportsystemen stark unterschätzt wird. Daher kann diese Studie die Beobachtungsdatensätze insbesondere in Küstennähe verbessern.

Die größten Abweichungen in einer Gitterbox ergeben sich im ICOADS-Vergleich zu +3.311 und -2.625 Millionstel der globalen Gesamtsumme, bei AMVER zu +2.394 und -1.504. Die betragsmäßige Summe der Abweichungen aller Gitterboxen ergibt 1.043.536 bzw. 897.413 Millionstel der globalen Gesamtsumme bei der Validierung mit ICOADS bzw. AMVER. Demgegenüber zeigt ein Vergleich zwischen ICOADS und AMVER die größte Abweichungen einer Gitterbox von +3.149 und -3.921 und eine betragsmäßige Gesamt-Abweichung aller Gitterboxen von 700.377 Millionstel der globalen Gesamtsumme. Folglich kann festgestellt werden, dass die Unterschiede der gegenwärtigen Schiffsverkehrsdichte dieser Studie zu beiden Schiffsreportsystemen etwa den Abweichungen der Schiffsreporte zueinander entsprechen. Generell weist das Ergebnis dieser Diplomarbeit dabei eine größere Übereinstimmung zu AMVER als zu ICOADS.

Vergleich mit STEEM-Modell

Für den Vergleich des gegenwärtigen Emissionskatasters mit dem regionalen Bottom-up-Ansatz des STEEM-Modells in Kapitel 4.1.2 wurde eine weitere Reduktion der Lloyds-Schiffsstatistik von 2006 auf diejenigen 102.261 Schiffsbewegungen vorgenommen, die in Nordamerika ablegen oder ankommen (siehe Kapitel 3.3.2). In der Routenfindung wurde dabei für 617 von 36.033 sortierten Routen keine Verbindung gefunden. Das resultierende Distanzfeld und die normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichte zeigt Abb. 4.4.

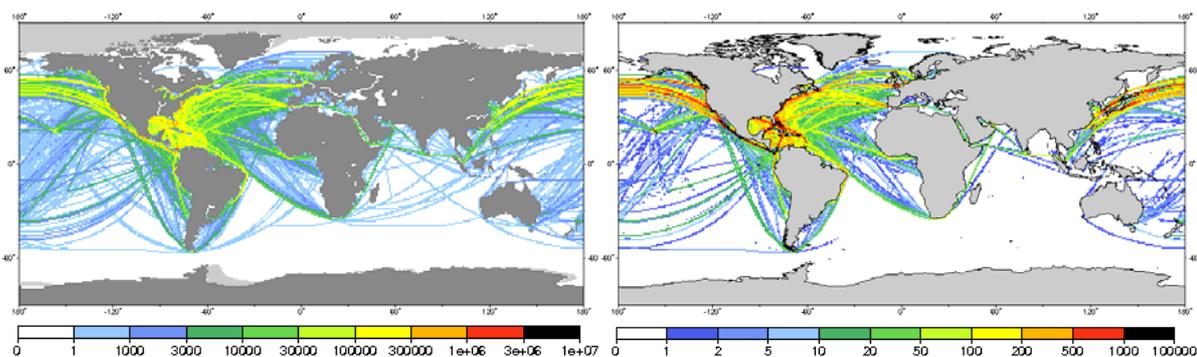


Abb. 4.4: Globales Distanzfeld der gefahrenen Strecken [km] (links) und normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichte mit SEAF-Werten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] pro Gitterbox (rechts) für die reduzierte Schiffsstatistik des Gegenwartsszenarios (sechs Monate von 2006) zum Vergleich mit dem STEEM-Modell.

4.1.2 Gegenwärtige Emissionskataster

Das folgende Kapitel beschreibt das in dieser Studie erstellte globale Emissionskataster des Gegenwartsszenarios und vergleicht es mit unterschiedlichen bisherigen globalen Top-down-Berechnungen und dem regionalen Bottom-up-Ansatz des STEEM-Modells.

Emissionskataster des gegenwärtigen Szenarios

Während der Durchführung des Wellenausbreitungs-Algorithmus wurde der Bottom-up-Ansatz aus Kapitel 3.4 zur Berechnung des globalen Treibstoffverbrauches und der weltweiten Emissionen für alle Gitterboxen jeder sortierten Route des Eingangsdatensatzes ausgeführt. Aus der Addition der Werte für Haupt- und Hilfsmotoren aller Gitterboxen des Modellgitters und der Hafenwerte der Zielhafen-Gitterboxen ergaben sich der gesamte Treibstoffverbrauch und die Gesamtemissionen aller Routen, wobei aufgrund fehlender Hafen-Emissionsfaktoren für CO-Emissionen kein Hafen-Anteil berechnet wurde. Die resultierenden Werte repräsentieren 858.465 zur Routenfindung geeignete Schiffsbewegungen der Lloyds-Schiffsstatistik von sechs Monaten des Jahres 2006 (siehe Kapitel 3.3.2), wobei für 10.836 von diesen keine Verbindungsrouten im Wellenausbreitungs-Algorithmus gefunden wurde. Um den berechneten Treibstoffverbrauch der zur Routenfindung geeigneten Schiffsbewegungen der vorliegenden sechs Monate an alle 2.029.532 Bewegungen des Gesamtjahres 2006 inklusive derjenigen anzupassen, welche erst zu Beginn von 2007 enden (persönliche Korrespondenz David Long, LMIU), wird ein entsprechender Skalierungsfaktor SF nach Gleichung (4.1) ermittelt. Dabei wird angenommen, dass alle nicht vorliegenden oder fehlerhaften Schiffsbewegungen des Jahres 2006 dieselbe Dynamik der Schiffsaktivität aufweisen wie diejenigen, die in der Berechnung berücksichtigt wurden:

$$SF = \frac{2.029.532}{858.465 - 10.836} \approx 2,39 \quad (4.1)$$

Nach der Skalierung ergibt sich der gesamte gegenwärtige Treibstoffverbrauch der internationalen Handelsflotte einer Schiffsgröße von mindestens 100 Bruttoregistertonnen des Jahres 2006 zu 268 Mt, wobei die Anteile für Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten 6% bzw. 17% des Hauptmotorverbrauches darstellen. Die resultierenden, gegenwärtigen Gesamtemissionen für NO_x , CO_2 , SO_x , CO , Hydrocarbone und Partikel werden analog skaliert und sind in Tab. 4.1 ersichtlich. Abb. 4.5 präsentiert beispielhaft die globalen Emissionskataster für CO_2 , NO_x und SO_x , welche generell die gleiche Verteilung wie das gegenwärtige Distanzfeld und die Schiffsverkehrsdichte aufweisen. Der Anteil der arktischen Regionen Nordwest-Passage, Grönland-See und Nordost-Passage wurde aus den Werten aller Gitterboxen innerhalb von drei geographischen Sektoren nördlich von 66°N berechnet (siehe Kapitel 3.4.1). In Summe ergeben diese drei arktischen Regionen einen Treibstoffverbrauch von 0,46 Mt. Fast der gesamte Anteil ist dabei auf der Grönlandsee zu verzeichnen, wohingegen die gegenwärtige Schiffsaktivität auf der Nordost- und Nordwest-Passage vernachlässigbar klein ist. In Kapitel 4.2 wird detailliert auf die zukünftige Entwicklung dieser Schiffsaktivität im Nordpolarraum eingegangen.

Tab. 4.1: Gesamter Treibstoffverbrauch und Gesamtemissionen der Hauptmotoren, Hilfsmotoren und Hafentaktivitäten für das Gegenwartsszenario (skaliert auf das Gesamtjahr 2006) mit den Anteilen von Nordwest-Passage, Grönland-See und Nordost-Passage und Vergleich mit bisherigen gegenwärtigen Emissionskatastern (ENDRESEN et al. 2003, CORBETT und KÖHLER 2003, EYRING et al. 2005a), deren Ergebnisse vom jeweiligen Bezugsjahr 2000 bzw. 2001 auf das Jahr 2006 dieser Studie extrapoliert wurden. PM₁₀ stellt 10 µm-Partikel dar.

	Ggw.- Szenario	NW- Passage	Grönl.- See	NO- Passage	END 2003	CK 2003	EYR 2005a
Treibstoff [Mt]	268	$0,42 \cdot 10^{-3}$	0,46	$0,22 \cdot 10^{-3}$	215	372	360
NO _x [Tg NO ₂]	18,8	$0,03 \cdot 10^{-3}$	0,029	$0,01 \cdot 10^{-3}$	15,5	29,0	27,5
CO ₂ [Tg]	844	$1,4 \cdot 10^{-3}$	1,5	$0,71 \cdot 10^{-3}$	720	1170	1050
SO _x [Tg SO ₂]	12,1	$0,02 \cdot 10^{-3}$	0,021	$0,01 \cdot 10^{-3}$	8,8	16,7	15,5
CO [Tg]	1,1	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$0,83 \cdot 10^{-6}$	1,5	---	1,7
Partikel [Tg PM ₁₀]	1,5	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	1,2	2,1	2,1
Hydrocarbone [Tg]	1,7	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,5	1,0	2,5

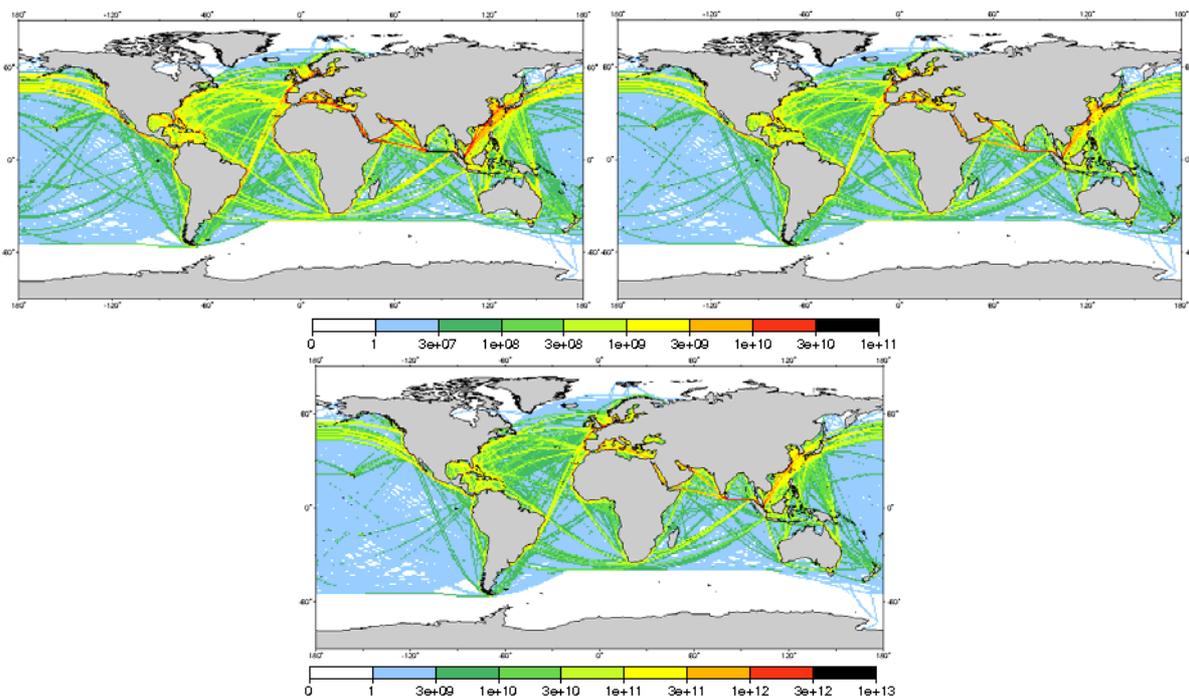


Abb. 4.5: Globale Emissionskataster des Gegenwartsszenarios (skaliert auf das Gesamtjahr 2006) für NO_x [g NO₂] (oben links), SO_x [g SO₂] (oben rechts) und CO₂ [g CO₂] (unten).

Vergleich mit existierenden globalen Top-down-Emissionskatastern

Zur Validierung der auf das Gesamtjahr 2006 skalierten Ergebnisse des gegenwärtigen Szenarios wird im Folgenden ein Vergleich mit den globalen Top-down-Emissionskatastern von ENDRESEN et al. (2003), CORBETT und KÖHLER (2003) und EYRING et al. (2005a) (siehe Kapitel 2.1.3) durchgeführt. Da sich diese jedoch auf die Schiffsbewegungen von 2000 und 2001 beziehen, werden sie zuerst auf das Jahr 2006 dieser Studie extrapoliert. Aufgrund einer Korrelation des gesamten Treibstoffverbrauches der Weltflotte zum globalen Seehandel (ENDRESEN

et al. 2007) werden dazu Seehandels-Wachstumsraten aus FEARNLEYS (2007) herangezogen, welche in den Jahren 2001-2006 jährliche Anstiege von 0,8-7,0% verzeichneten. Das resultierende Wachstum von 29,6% und 28,6% von 2000 bzw. 2001 bis 2006 wird schließlich auf die Ergebnisse der drei globalen Top-down-Emissionskataster (siehe Tab. 2.1) angewendet. Die Resultate der Extrapolation sind in Tab. 4.1 dargestellt. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Ergebnisse dieser Diplomarbeit im Streubereich der drei globalen Top-down-Emissionskataster liegen. Der ermittelte gesamte Treibstoffverbrauch und die Gesamtemissionen weisen 20-40% höhere Werte als ENDRESEN et al. (2003) und 20-30% niedrigere Werte als CORBETT und KÖHLER (2003) und EYRING et al. (2005a) auf. Lediglich die CO-Emissionen unterbieten alle anderen Studien. Das kann teilweise dadurch erklärt werden, dass aufgrund mangelnder Hafen-Emissionsfaktoren kein entsprechender Hafen-Anteil berechnet werden konnte (siehe Kapitel 3.4.2). Im Folgenden werden nun die einzelnen Argumente dargelegt, welche diese Unterschiede zu bisherigen globalen Top-down-Emissionskatastern erklären.

Zunächst bestehen große Unterschiede der einzelnen Emissionskataster bezüglich der eingehenden Schiffszahlen. Bei CORBETT und KÖHLER (2003) und EYRING et al. (2005a) liegt die Anzahl der aktiven Schiffe bei über 90.000 inklusive Militärschiffe, bei ENDRESEN et al. (2003) dagegen bei ungefähr 45.000 Passagier- und Frachtschiffen. In der Lloyds-Schiffsstatistik dieser Studie wurden nur für 38.212 bzw. 44.351 Schiffe Bewegungen in den vorliegenden sechs Monaten bzw. im gesamten Jahr 2006 erfasst, obwohl 90.840 Schiffe für das gesamte Jahr registriert sind (persönliche Korrespondenz David Long, LMIU). So stellt sich die generelle Frage, ob es realistisch ist, dass nur 44% aller registrierten Schiffe im Gesamtjahr aktiv sind, bei Passagierschiffen und Fischern sogar nur 22% und 16%. Falls dies zutrifft, sind die Schätzungen von CORBETT und KÖHLER (2003) und EYRING et al. (2005a) zu hoch, die von einer maximalen Aktivität aller existierenden Schiffe ausgehen. Falls dies nicht zutrifft, wurden in der Lloyds-Bewegungsdatenbank nicht alle Bewegungen der registrierten Schiffe erfasst und die Berechnungen dieser Diplomarbeit sind zu gering. Grundsätzlich ist unklar, welcher Anteil der globalen Flotte überhaupt in Lloyds registriert ist. Bisher wurden nur Schiffe einer Größe von mindestens 100 Bruttoregistertonnen erfasst, also keine kleinen Fischer oder Jachten. Falls nun davon ausgegangen wird, dass die registrierten Schiffe in Lloyds hauptsächlich aus Frachtschiffen bestehen, nach Tab. 3.6 fast 75% aller aktiven Schiffe mit 83% aller Schiffsbewegungen, kann ein Vergleich mit der Abschätzung von 203 Mt für die reine Frachtflotte im Jahr 2001 aus CORBETT und KÖHLER (2003) vollzogen werden. Extrapoliert auf 2006 entspricht dieser Wert 263 Mt und stimmt somit sehr genau mit den Ergebnissen dieser Studie überein.

Weiterhin kann im Wellenausbreitungs-Algorithmus die Motorlaufzeit für alle Routen eines Schiffes ermittelt und somit die durchschnittliche Motorlaufzeit pro Jahr und Schiff eines bestimmten Schiffstyps mit den geschätzten Werten anderer Emissionskataster verglichen werden. So fällt die mittlere Motorlaufzeit dieser Studie mit Werten von 1.000-4.000 h pro Jahr um den Faktor 1,5-3 geringer aus als diejenige aller anderen Emissionskataster. Dies kann einerseits in der geringen Anzahl erfasster Schiffsbewegungen begründet sein, vor allem bei Passagierschiffen und

Fischern. Andererseits kann dies auch auf Fehler in den geschätzten Motorlaufzeiten bisheriger Emissionskataster hinweisen. CORBETT und KÖHLER (2003) zeigen in einer Sensitivitätsanalyse, dass gerade die Motorlaufzeit mit sehr großen Unsicherheiten behaftet ist.

Schließlich werden die Anteile der Hafenemissionen und Hilfsmotoren mit anderen Emissionskatastern verglichen. Dabei stellt sich heraus, dass der in dieser Studie berechnete Hafen-Anteil von 17% bisherige Schätzungen von 2-6% in WANG et al. (2007a) und 10% in EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED (2005) übertrifft. Dagegen fällt der Anteil der Hilfsmotoren mit 6% niedriger aus als 10% in ENDRESEN et al. (2003) und 12% in EYRING et al. (2005a). Diese Fehler könnten sich bei der Ermittlung des gesamten Treibstoffverbrauches und der Gesamtemissionen ausgleichen, bleiben in der geographischen Verteilung aber erhalten.

Insgesamt liegen die Ergebnisse dieser Studie im Streubereich der bisherigen globalen Top-down-Emissionskataster und bestätigen somit deren Unsicherheitsbereich. Die Hauptprobleme im Vergleich der verschiedenen Ergebnisse stellen die erfasste Schiffsanzahl und die geschätzte Motorlaufzeit dar. Daher ist es schwierig festzustellen, welches von diesen das beste Ergebnis darstellt. Unsicherheiten der Treibstoff- und Emissionsberechnung dieser Studie zeigen sich besonders in den nach Schiffstypen gemittelten Schiffseigenschaften, aber auch im Wellenausbreitungs-Algorithmus aufgrund des gerundeten $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ -Modellgitters und der mangelnden Berücksichtigung des Seegangs oder anderer Parameter, welche die Routenfindung beeinflussen. Generell findet der Wellenausbreitungs-Algorithmus die kürzeste Verbindung und damit auch den geringsten Treibstoffverbrauch für eine bestimmte Hafenkombination. Eine Berücksichtigung des globalen Seegangs im Modellgitter würde die Schiffsrouten verlängern und damit auch den Treibstoffverbrauch erhöhen. Weitere Fehlerquellen beinhaltet die Extrapolation der für sechs Monate berechneten Routen auf alle Bewegungen des gesamten Jahres, inklusive der Skalierung von 142.658 nicht zur Routenfindung geeigneten Routen, welche 14% des vorliegenden Datensatzes darstellen. Beispielsweise könnten die Routen mit identischem Start- und Zielhafen lediglich Tagesfahrten darstellen und damit durch die Skalierung anhand der mittleren jährlichen Schiffsaktivität überschätzt werden. Der Vergleich der räumlichen Verteilungen der verschiedenen Emissionskataster wird nicht näher vollzogen, weil die absoluten Gesamtunterschiede der unterschiedlichen Arbeiten schon diskutiert wurden, ebenso die relativen Unterschiede zwischen den in Top-down-Ansätzen zur Emissionsverteilung verwendeten Schiffsverkehrsdichten aus Schiffsreporten und der resultierenden Schiffsverteilung dieser Diplomarbeit (siehe Kapitel 4.1.1).

Vergleich mit dem regionalen Bottom-up-Ansatz des STEEM-Modells

Eine weitere Möglichkeit, den erstellten gegenwärtigen Emissionskataster zu validieren, bietet ein Vergleich mit dem ebenfalls nach dem Bottom-up-Ansatz entwickelten STEEM-Modell aus WANG et al. (2007a). Dieses stellt ein detailliertes Routennetzwerk mit vordefinierten Schiffsrouten-Segmenten für Nordamerika dar, strebt aber eine globale Abdeckung an. Die kürzeste Verbindung zweier Häfen wird über GIS-Technologie im Vektor-Netzwerk gefunden. Da die Ergebnisse des STEEM-Modells jedoch auf 172.000 Schiffsbewegungen des Jahres 2002 beru-

hen, muss zunächst eine Extrapolation auf das Jahr 2006 dieser Diplomarbeit erfolgen. Das Wachstum von 2002 bis 2006 wird den Seehandels-Wachstumsraten aus FEARNLEYS (2007) folgend zu 27,0% bestimmt und auf die Ergebnisse des STEEM-Modells angewendet. Der resultierende Treibstoffverbrauch des Jahres 2006 entspricht somit etwa 60 Mt. Zum Vergleich wird das Emissionskataster der auf 102.261 nordamerikanische Schiffsbewegungen reduzierten Lloyds-Schiffsstatistik von 2006 herangezogen (siehe Kapitel 3.3.2, Abb. 4.4). Die Skalierung erfolgt analog zu Gleichung (4.1), aber nicht auf alle Schiffsbewegungen des Jahres 2006, sondern lediglich auf alle nordamerikanischen des Gesamtjahres. Der Skalierungsfaktor ergibt 2,39, so dass für den gesamten Treibstoffverbrauch aller nordamerikanischen Schiffsbewegungen ein Wert von 72 Mt resultiert. Das Ergebnis dieser Studie übertrifft das STEEM-Modell somit um 20%, welches in Unterschieden der räumlichen Auflösungen und der Anzahl der berechneten Schiffsbewegungen begründet sein könnte, aber dennoch eine gute Übereinstimmung darstellt.

Weiterhin können die resultierenden SO₂-Emissionskataster miteinander verglichen werden. Die SO₂-Gesamtemissionen aller nordamerikanischen Schiffsbewegungen dieser Studie zeigen mit 3,24 Tg eine gute Übereinstimmung mit den SO₂-Emissionen des STEEM-Modells von 3,05 Tg. Beim Vergleich der Emissionsverteilung wird jedoch festgestellt, dass die SO₂-Emissionen des STEEM-Modells in der Einheit [kg/16 km² · Jahr], diejenigen dieser Studie hingegen in [g/Gitterbox-Fläche · Jahr] gegeben sind. Zum Vergleich der SO₂-Verteilungen im vorliegenden nordamerikanischen Kartenausschnitt wird für das Ergebnis dieser Diplomarbeit eine mittlere Gitterbox-Fläche von 8.712 km² angenommen, die sich aus dem Produkt der Gitterbox-Länge in Richtung der geographischen Länge von 111 km und derjenigen in Richtung der geographischen Breite von $\cos(45^\circ) \cdot 111$ km für eine mittlere Breite von 45° ergibt. Für den Vergleich mit dem STEEM-Modell wird die Farbskala dieser Studie somit um den Faktor $8.712 \cdot 1000 / 16 \sim 545.000$ aufgrund der Umrechnung von kg in g gestreckt (siehe Abb. 4.6).

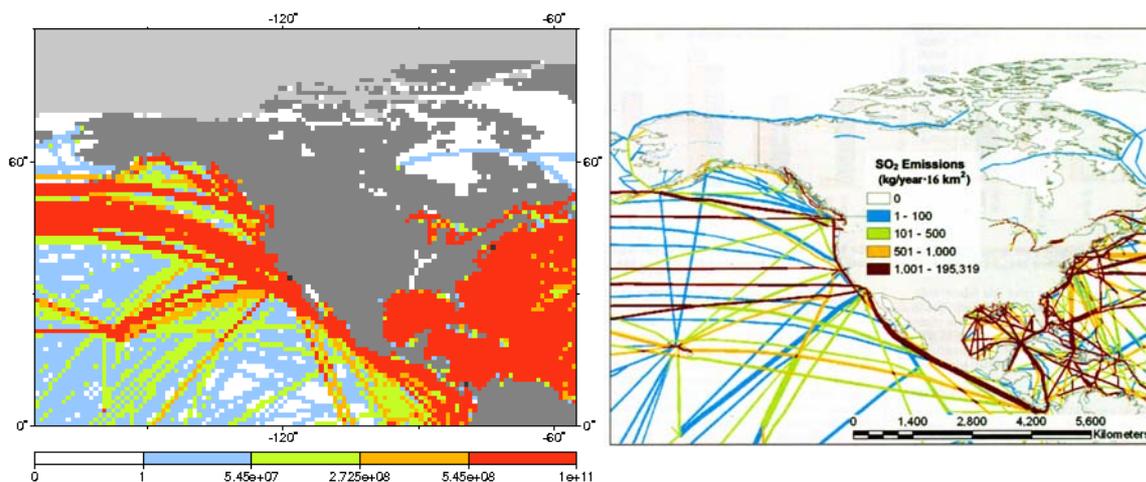


Abb. 4.6: Globales SO₂-Emissionskataster [g] für die reduzierte Schiffsstatistik des Gegenwartsszenarios (skaliert auf das Gesamtjahr 2006) zum Vergleich mit dem STEEM-Modell (links) und SO₂-Emissionskataster des STEEM-Modells (rechts), Quelle: WANG et al. (2007a, Abb. 2).

Generell zeigt die Verteilung der SO₂-Emissionen des STEEM-Modells eine detailliertere Auflösung, allerdings auch eine viel stärkere Routengebundenheit und geringere Streuung als das SO₂-Emissionskataster dieser Diplomarbeit, vor allem im Golf von Mexiko, der Karibik und im Nordwestatlantik. Denn das STEEM-Modell nutzt zur Routenfindung zwischen zwei Häfen ein detailliertes, aber auch fest definiertes Routennetz und ist daher viel stärker an einzelne Routen gebunden als der Wellenausbreitungs-Algorithmus dieser Studie. Dieser funktioniert für jede beliebige Kombination aus Start- und Zielhäfen individuell auf dem vorliegenden 1°x1°-Modellgitter ohne vordefinierte Routen. Die wesentlichen Muster der beiden Verteilungen wie die hohe Schiffsaktivität über dem Nordatlantik, Nordpazifik und Golf von Mexiko sowie in Küstennähe stimmen jedoch überein. Allerdings zeigen sich die Hauptschiffsrouten im Nordpazifik auch im STEEM-Modell weiter südlich, weil das verwendete Routennetz aus der Schiffsverkehrsichte von ICOADS hervorgeht. Weiterhin wird die Schiffsroute mittlerer Intensität vom Panama-Kanal nach Hawaii und die beiden Schiffsrouten im kanadischen Archipel im Wellenausbreitungs-Algorithmus nicht nachgebildet. Für letztere Routen verhindert die Meereis-Ausbreitung des Gegenwartsszenarios eine entsprechende Routenfindung. Die Schiffsroute in die Hudson Bay wird jedoch gut reproduziert. Insgesamt kann eine generelle Übereinstimmung der beiden Bottom-up-Emissionskataster trotz der unterschiedlichen Methodiken festgestellt werden.

4.2 Ergebnisse der zukünftigen Szenarien

Die beiden Zukunftsszenarien des Jahres 2050 unterscheiden sich vom Gegenwartsszenario von 2006 durch eine reduzierte arktische Meereis-Ausdehnung und veränderte Schiffsgrößen-Beschränkungen der Schifffahrtskanäle des 1°x1°-Modellgitters (siehe Kapitel 3.3.1), durch erhöhte Schiffszahlen und Hauptmotorkraft-Werte pro Schiff (siehe Kapitel 3.3.2) sowie eventuelle Reduktionen von Treibstoffverbrauch und Emissionen (siehe Kapitel 3.4). Dabei weist das BAU-Szenario (Business-As-Usual) ein stärkeres Wachstum und geringeren Einsatz von Reduktionstechnologien als das CLE-Szenario (Clean) auf. Die beiden Szenarien entsprechen den extremsten Zukunftsprognosen aus EYRING et al. (2005b) und zeigen somit eine Abschätzung der gesamten Spannweite zukünftiger Entwicklungen (siehe Kapitel 2.1.4). Das folgende Kapitel zeigt die Ergebnisse der beiden Zukunftsszenarien dieser Studie mit besonderer Betrachtung zukünftiger Entwicklungen im Nordpolarraum. Kapitel 4.2.1 stellt die zukünftigen Schiffsverkehrsichten vor und vergleicht sie mit dem Gegenwartsszenario dieser Studie. Kapitel 4.2.2 präsentiert die globalen Emissionskataster beider Zukunftsszenarien im Vergleich mit einem bisherigen zukünftigen Top-down-Emissionskataster und zwei Ansätzen zur Erfassung polarer Schiffsrouten.

4.2.1 Zukünftige Schiffsverkehrsichte

Das folgende Kapitel beschreibt die in dieser Studie entwickelten globalen Schiffsverkehrsichten der CLE- und BAU-Zukunftsszenarien und führt einen Vergleich mit dem Ergebnis des Gegenwartsszenarios durch, insbesondere im Hinblick auf zukünftige Nordpolarrouten.

Schiffsverkehrsdichten der zukünftigen Szenarien

In beiden Zukunftsszenarien wurden wie im Gegenwartsszenario 858.465 Schiffsbewegungen der Lloyds-Schiffsstatistik von sechs Monaten des Jahres 2006 für die Routenfindung ausgewählt und zu 186.612 sortierten Routen zusammengefasst (siehe Kapitel 3.3.2). Anschließend wurde der Wellenausbreitungs-Algorithmus angewendet, um die zukünftigen Schiffsverteilungen auf dem $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter des Jahres 2050 zu entwickeln (siehe Kapitel 3.3.3). Dabei wurde für 2.319 sortierte Routen bzw. 9.920 Schiffsbewegungen keine Verbindungsrouten gefunden. Somit konnten aufgrund der reduzierten Meereis-Ausdehnung fast 1.000 Schiffsrouten mehr entwickelt werden als im Gegenwartsszenario. Die resultierenden globalen Distanzfelder und die normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten pro Gitterbox zeigt Abb. 4.7 für beide Zukunftsszenarien.

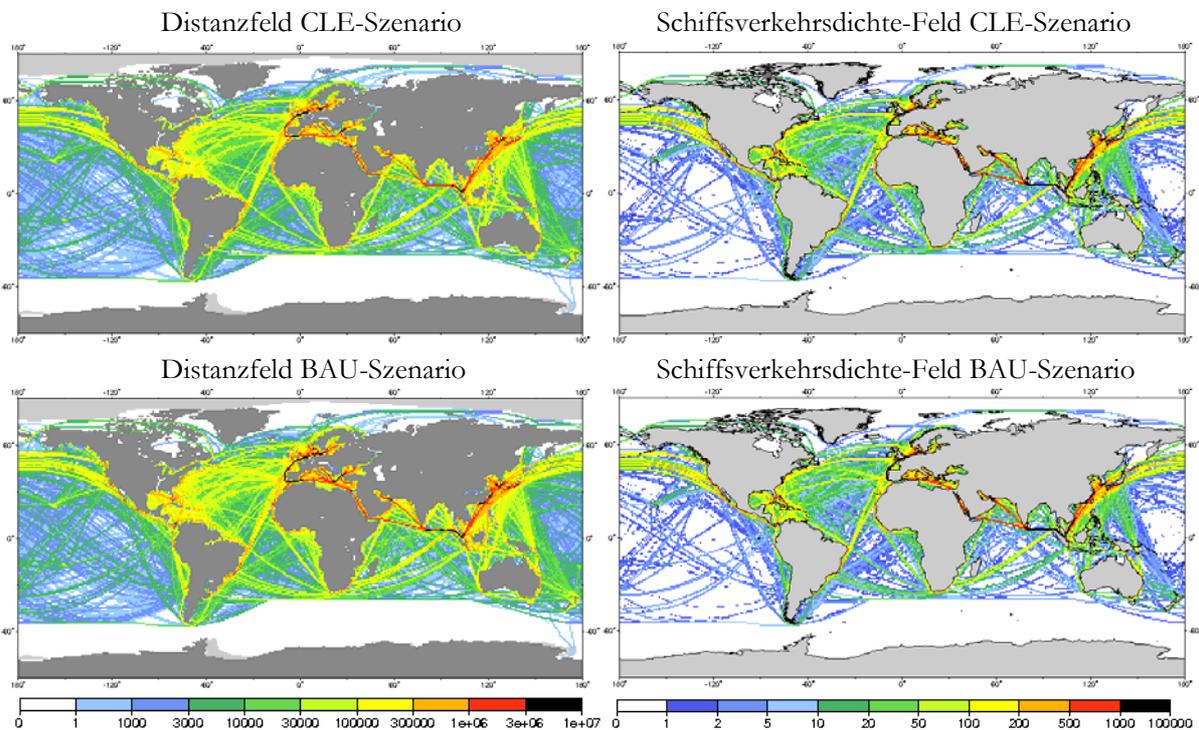


Abb. 4.7: Globale Distanzfelder der gefahrenen Strecken [km] (links) und normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichten mit SEAF-Werten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] pro Gitterbox (rechts) für das CLE- (oben) und BAU-Zukunftsszenario (sechs Monate von 2050) (unten).

Generell weisen die Distanzfelder der beiden Zukunftsszenarien die gleiche Schiffsverteilung auf, weil sie auf demselben $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter mit gleicher Meereis-Ausbreitung und gleichen Schifffahrtskanälen entwickelt wurden. Sie unterscheiden sich allerdings in der Intensität der gefahrenen Strecken, weil die Schiffszahlen im CLE-Zukunftsszenario um 36,2%, im BAU-Szenario jedoch um 81,5% anwachsen. Diese Intensitäts-Unterschiede zeigen sich besonders auf den Haupttrouten westlich von Mexiko, in der Karibik, in Europa, im Indischen Ozean und in Ostasien. Der Ärmelkanal (+1/+51) weist als Gitterbox der höchsten Schiffsaktivität im CLE- bzw. BAU-Zukunftsszenario eine befahrene Gesamtdistanz von 7.467.039 km bzw. 9.950.570 km und eine Schiffszahl von 93.961 bzw. 125.213 für sechs Monate des Jahres 2050 auf. Die normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichte-Felder der beiden Zukunftsszenarien zeigen wie im Gegen-

wartsszenario eine Verstärkung der Hauptschifffahrtrouten und ein Verschwinden des Hintergrundrauschens. Diese normierten Schiffsverkehrsdichten der Zukunftsszenarien sind hier exakt identisch, weil die relativen Intensitäts-Unterschiede für alle Gitterboxen gleich sind und damit in der Normierung wegfallen.

Vergleich mit dem Gegenwartsszenario dieser Studie

Wesentlich ist nun der Vergleich mit den Ergebnissen des Gegenwartsszenarios dieser Studie (siehe Abb. 4.1). Zur besseren Übersicht zeigt Abb. 4.8 (oben) polar-stereographische Abbildungen der Distanzfelder aller drei Szenarien. In hellgrauer Farbe wird die reduzierte Meereis-Ausdehnung deutlich, weiterhin auch die Wegeinsparung der Nordpolarrouten im Vergleich zu den konventionellen Hauptschifffahrtrouten. Abb. 4.8 (unten) stellt die Differenz der normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten zwischen CLE-Zukunfts- und Gegenwartsszenario in zylindrischer und polar-stereographischer Abbildung dar. Da beide Zukunftsszenarien dieselbe normierte Schiffsverkehrsdichte aufweisen, ist ein weiterer BAU-Vergleich nicht nötig.

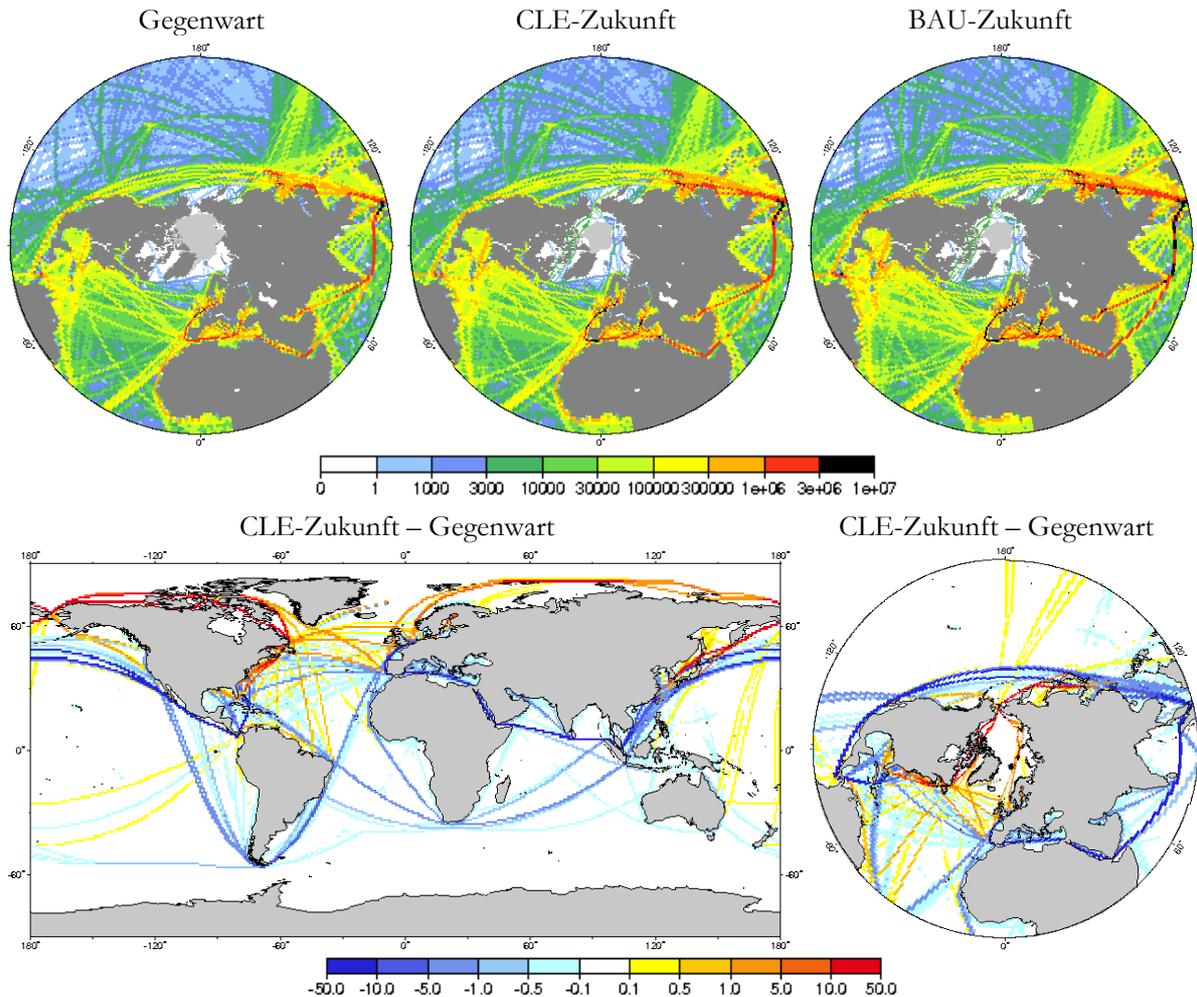


Abb. 4.8: Globale Distanzfelder der gefahrenen Strecken [km] des Gegenwarts- (oben links), CLE- (oben Mitte) und BAU-Zukunftsszenarios (sechs Monate von 2006 bzw. 2050) (oben rechts) in polar-stereographischer Abbildung und Differenz der normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] zwischen CLE-Zukunfts- und Gegenwartsszenario in zylindrischer (unten links) und polar-stereographischer Abbildung (unten rechts).

Grundsätzlich können in den Distanzfeldern beider Zukunftsszenarien Nordpolarrouten erkannt werden. Die Nordwest-Passage erscheint dabei konzentriert auf zwei Hauptschifffahrtsrouten nördlich und südlich von Baffin und Victoria Island für unterschiedliche Meereis-Ausbreitungen im kanadischen Archipel. Ebenso weist die Labrador-See erhöhte Schiffsaktivität auf, wohingegen die Hudson Bay keine Veränderung zeigt, weil die Lloyds-Schiffsstatistik keine Schiffsbewegungen in dieser Region aufweist (persönliche Korrespondenz David Long, LMIU). Für die Gitterbox mit der höchsten Schiffsaktivität in dieser Region ergeben sich im CLE- bzw. BAU-Zukunftsszenario Schiffszahlen von 538 bzw. 717 im Vergleich zu 8 im Gegenwartsszenario für sechs Monate der Jahre 2050 bzw. 2006. Dagegen weist die Nordost-Passage eine breite Streuung zahlreicher, aber weniger intensiver Schiffsrouten im Nordpolarmeer für unterschiedliche Meereis-Ausbreitungen und Hafen-Kombinationen auf, weil diese nicht, wie im kanadischen Archipel, auf bestimmte Seewege beschränkt sind. Die nordrussischen Inseln werden dabei sowohl nördlich als auch südlich umfahren. Für diejenigen Schiffe, die direkt von Europa nach Ostasien fahren, resultiert eine deutliche Hauptschifffahrtsroute, die im Beringmeer Richtung Japan abknickt. In dieser Region zeigt die Gitterbox der höchsten Schiffsaktivität ausgehend von 11 gegenwärtigen Schiffen eine Zunahme auf 203 bzw. 270 in den beiden zukünftigen Szenarien. Auf der Grönlandsee sind zwei verstärkte Schiffsrouten Richtung Spitzbergen als Eintritt zur Nordost-Passage und weiterhin auch erhöhte Schiffsaktivität westlich von Island zu erkennen. Die Gitterbox der höchsten Schiffsaktivität dieser Region zeigt Schiffszahlen von 2.511 und 3.436 bzw. 4.579 im gegenwärtigen und den beiden zukünftigen Szenarien. Abgesehen von den offensichtlichen Nordpolarrouten weisen die zukünftigen Distanzfelder aufgrund des Schiffswachstums generell eine erhöhte Intensität aus, welche beispielsweise im Pazifik, in der Karibik oder auf den Hauptschifffahrtsrouten in Europa und Ostasien ersichtlich wird. Dagegen ist der zukünftige Ausbau der Schifffahrtskanäle nicht in einer Umverteilung der Schiffsaktivität zu erkennen, ebenso wenig wie eine Entlastung der gegenwärtigen Hauptschifffahrtsrouten aufgrund der zukünftigen Nordpolarrouten, weil diese relativ kleinen Unterschiede bei den hohen, absoluten Zahlen der Schiffsaktivität nicht deutlich werden.

Die normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichte-Felder reduzieren die breit gestreuten Schiffsrouten der Nordost-Passage auf eine intensive Hauptschifffahrtsroute, welche sich erst auf Höhe der Neusibirischen Inseln aufgrund wechselnder Meereis-Ausbreitung in zwei Routen aufspaltet. Die beiden Hauptschifffahrtsrouten der Nordwest-Passage bleiben dagegen erhalten und die beiden Schiffsrouten Richtung Spitzbergen sowie diejenige westlich von Island in der Grönlandsee werden weiter verstärkt. In den Differenzen wird schließlich eine Entlastung der konventionellen südlichen Hauptschiffsrouten auf allen Ozeanen deutlich, vor allem im Nordpazifik und auf der Schiffsroute von Europa nach Ostasien. Im Nordatlantik ergeben sich dagegen sowohl verstärkte als auch entlastete Schiffsrouten. Weiterhin zeigt sich eine Umverteilung der Schiffsaktivität aufgrund des ausgebauten Panama-Kanals, weil Abnahmen der Schiffsrouten um das Kap Hoorn und Zunahmen der Schiffsrouten vom Panama-Kanal nach Australien deutlich werden. Durch die Normierung verschwinden in den Schiffsverkehrsdichten der drei Szenarien auch die Intensi-

täts-Unterschiede aufgrund des prognostizierten Schiffswachstums. Die größten Unterschiede einer Gitterbox zeigen sich in der Bering-Straße (-171/+65) mit +45 und westlich von Niederkalifornien (-119/+28) beim Eintritt auf die Schiffsrouten des Nordpazifik mit -26 Millionstel der globalen Gesamtsumme. Die betragsmäßige Summe der Abweichungen aller Gitterboxen des Modellgitters ergibt 26.405 Millionstel der globalen Gesamtsumme. Folglich zeigt sich die zukünftige Umverteilung mit 2,6% der globalen Gesamt-Schiffsaktivität als relativ gering.

Zur Ermittlung der mittleren Schiffszahl auf einer Gitterbox des Nordpolarraumes kann die aufsummierte Schiffszahl aller Gitterboxen eines der in Kapitel 3.4.1 definierten arktischen Gebiete Nordwest-Passage, Grönland-See und Nordost-Passage durch die Gesamtzahl der Gitterboxen dieser Region (24 · 120, 24 · 100 und 24 · 140) dividiert werden. Dieses Vorgehen ergibt eine durchschnittliche Schiffsaktivität pro Gitterbox von 0,014, 22 und 29 Schiffen auf der Nordwest-Passage, 29, 45 und 59 Schiffen in der Grönland-See und 0,020, 9 und 12 Schiffen auf der Nordost-Passage im Gegenwarts-, CLE- und BAU-Zukunftsszenario für sechs Monate des Jahres 2006 bzw. 2050. Dabei wird die bereits gegenwärtig hohe Aktivität in der Grönland-See bestätigt, welche zukünftig lediglich um die Faktoren 1,6-2,0 anwächst. Die Nordost-Passage weist weitaus höhere Wachstumsfaktoren von 450 bzw. 600 auf, ebenso die Nordwest-Passage mit 1.600 bzw. 2.100, weil beide gegenwärtig nur sehr wenig befahren werden. Die Wachstumsfaktoren des gesamten Nordpolarraumes ergeben sich dabei zu 2,9 bzw. 3,8 in den beiden Zukunftsszenarien.

Insgesamt zeigt diese Studie somit einen im Vergleich zur globalen Schiffsaktivität geringen zukünftigen Anstieg auf den Nordpolarrouten, jedoch ein bedeutendes Wachstum im Vergleich zur regionalen Schiffsaktivität dieser arktischen Gebiete. Die statistische Auswertung der Schiffsrouten zwischen unterschiedlichen Regionen der vorliegenden Lloyds-Schiffsstatistik aus Kapitel 3.3.2 ermittelt generell lediglich 116 von 1.001.123 Schiffsbewegungen, welche direkt von Europa oder Nordamerika nach Ostasien fahren und somit aufgrund der Wegeinsparung ohne Überspringen von Zwischenhäfen auf Nordpolarrouten umlegbar sind. Dabei werden von diesen nur die Schiffsbewegungen der drei Sommermonate August, September und Oktober auf den Nordpolarraum umverteilt. Das Hauptproblem bei dieser Abschätzung liegt somit in der geringen Anzahl umlegbarer Schiffsbewegungen in der vorliegenden Lloyds-Schiffsstatistik von 2006, welches in der gegenwärtigen Schifffahrts-Logistik begründet ist. Wenn ein Schiff im gegenwärtigen Szenario von Rotterdam über Gibraltar und Suez nach Tokio fährt, können diese Zwischenhäfen wie bereits im Kapitel 3.3.2 beschrieben übersprungen werden, um eine Umlegung auf Nordpolarrouten zu ermöglichen. Sollten allerdings noch weitere Zwischenhäfen auftreten wie Piräus, Bombay oder Singapur werden diese nicht übersprungen und eine Umlegung kann nicht stattfinden. In einem zukünftigen Szenario würde die Fracht eventuell aufgeteilt werden, so dass alle Schiffe von Rotterdam nach Tokio direkt über eine Nordpolarroute fahren, während diejenigen nach Piräus, Bombay oder Singapur weiterhin die konventionelle Südroute nutzen. Aus den vorliegenden gegenwärtigen Hafenkombinationen kann nur schwer eine zukünftige Neustrukturierung der Schifffahrts-Logistik entwickelt werden. Dazu könnte aber eine Abschätzung der gegenwärtigen Handelströme zwischen verschiedenen Kontinenten dienen.

4.2.2 Zukünftige Emissionskataster

Im folgenden Kapitel werden schließlich die globalen Emissionskataster der CLE- und BAU-Zukunftsszenarien vorgestellt und Vergleiche mit einem existierenden zukünftigen Top-down-Emissionskataster und zwei Ansätzen zur Erfassung polarer Schiffsrouten vollzogen.

Emissionskataster der zukünftigen Szenarien

Auch in den beiden Zukunftsszenarien wurde der Bottom-up-Ansatz aus Kapitel 3.4 zur Berechnung des globalen Treibstoffverbrauches und der weltweiten Emissionen im Zuge der Routenfindung des Wellenausbreitungs-Algorithmus herangezogen. Der gesamte Treibstoffverbrauch und die Gesamtemissionen wurden aus der Addition der Werte für Hauptmotoren, Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten für die Gitterboxen aller Schiffsrouten bestimmt. Für 9.920 der 858.465 zur Routenfindung geeigneten Schiffsbewegungen konnte keine passende Verbindung gefunden werden, so dass sich analog zu Gleichung (4.1) aus 9.920 Fehlrouuten ein Skalierungsfaktor von 2,39 ergibt. Somit wird der gesamte Treibstoffverbrauch der internationalen Handelsflotte einer Schiffsgröße von mindestens 100 Bruttoregistertonnen für das CLE- und BAU-Zukunftsszenario des gesamten Jahres 2050 zu 352 Mt bzw. 626 Mt bestimmt. Die Anteile für Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten stellen dabei nur noch 5% bzw. 15% des Hauptmotorverbrauches dar, weil die zukünftige Hilfsmotorkraft in beiden Anteilen im Vergleich zur Hauptmotorkraft nicht anwächst. Der Anteil der Nordpolarrouten am gesamten Treibstoffverbrauch liegt bei 1,41-2,52 Mt. Tab. 4.2 zeigt die Ergebnisse der zukünftigen Gesamtemissionen von NO_x , CO_2 , SO_x , CO, Hydrocarbonen und Partikeln, wohingegen Abb. 4.9 beispielhaft die globalen Emissionskataster für CO_2 , NO_x und SO_x darstellt.

Tab. 4.2: Gesamter Treibstoffverbrauch und Gesamtemissionen der Hauptmotoren, Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten für das CLE- und BAU-Zukunftsszenario (skaliert auf das Gesamtjahr 2050) mit den Anteilen von Nordwest-Passage, Grönland-See und Nordost-Passage und Vergleich mit dem bisherigen zukünftigen Emissionskataster aus EYRING et al. (2005b) für das Jahr 2050. PM_{10} stellt $10 \mu\text{m}$ -Partikel dar.

	CLE/ BAU	NW-Passage	Grönland-See	NO-Passage	EYR 2005b
Treibstoff [Mt]	352 - 626	0,55 – 0,98	0,67 – 1,2	0,19 – 0,34	402 – 725
NO_x [Tg NO_2]	2,5 - 31,1	$4,1 - 50 \cdot 10^{-3}$	$4,3 - 54 \cdot 10^{-3}$	$1,3 - 17 \cdot 10^{-3}$	3,1 – 38,8
CO_2 [Tg]	1060 – 1880	1,6 – 2,9	2,0 – 3,6	0,57 – 1,0	1109 – 2001
SO_x [Tg SO_2]	3,3 – 23,5	$5,1 - 36 \cdot 10^{-3}$	$6,4 - 45 \cdot 10^{-3}$	$1,7 - 12 \cdot 10^{-3}$	3,6 – 25,9
CO [Tg]	1,2 – 2,6	$2,1 - 4,6 \cdot 10^{-3}$	$2,0 - 4,5 \cdot 10^{-3}$	$0,71 - 1,6 \cdot 10^{-3}$	1,5 – 3,4
PM [Tg PM_{10}]	1,2 – 3,3	$2,0 - 5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,3 - 6,1 \cdot 10^{-3}$	$0,69 - 1,8 \cdot 10^{-3}$	1,5 – 3,9
Hyd.carb. [Tg]	1,3 – 3,5	$2,3 - 6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,5 - 6,6 \cdot 10^{-3}$	$0,78 - 2,1 \cdot 10^{-3}$	3,7 – 6,5

Im Vergleich der beiden Zukunftsszenarien kann generell der Einfluss der unterschiedlichen Wachstumsraten erkannt werden (siehe Kapitel 3.3.2). Der gesamte Treibstoffverbrauch und die Gesamtemissionen zeigen im BAU-Zukunftsszenario mit angenommenem Wachstum der

Schiffszahlen von 81,5% von 2006-2050 eindeutig höhere Werte als das CLE-Szenario bei entsprechendem Anstieg von 36,2%. Der Unterschied wird durch die Annahme im CLE-Szenario verstärkt, dass 25% des Treibstoffverbrauches durch alternative Energiequellen eingespart werden. Bei den globalen Emissionen werden weiterhin die unterschiedlichen Emissionsfaktoren deutlich (siehe Kapitel 3.4). Aufgrund der aggressiven NO_x - und SO_x -Reduktion fallen die NO_x - und SO_x -Emissionen des CLE-Zukunftsszenarios um die Faktoren 7-12 geringer aus als im BAU-Szenario, während sich die anderen Emissionen lediglich um die Faktoren 1,8-2,8 unterscheiden.

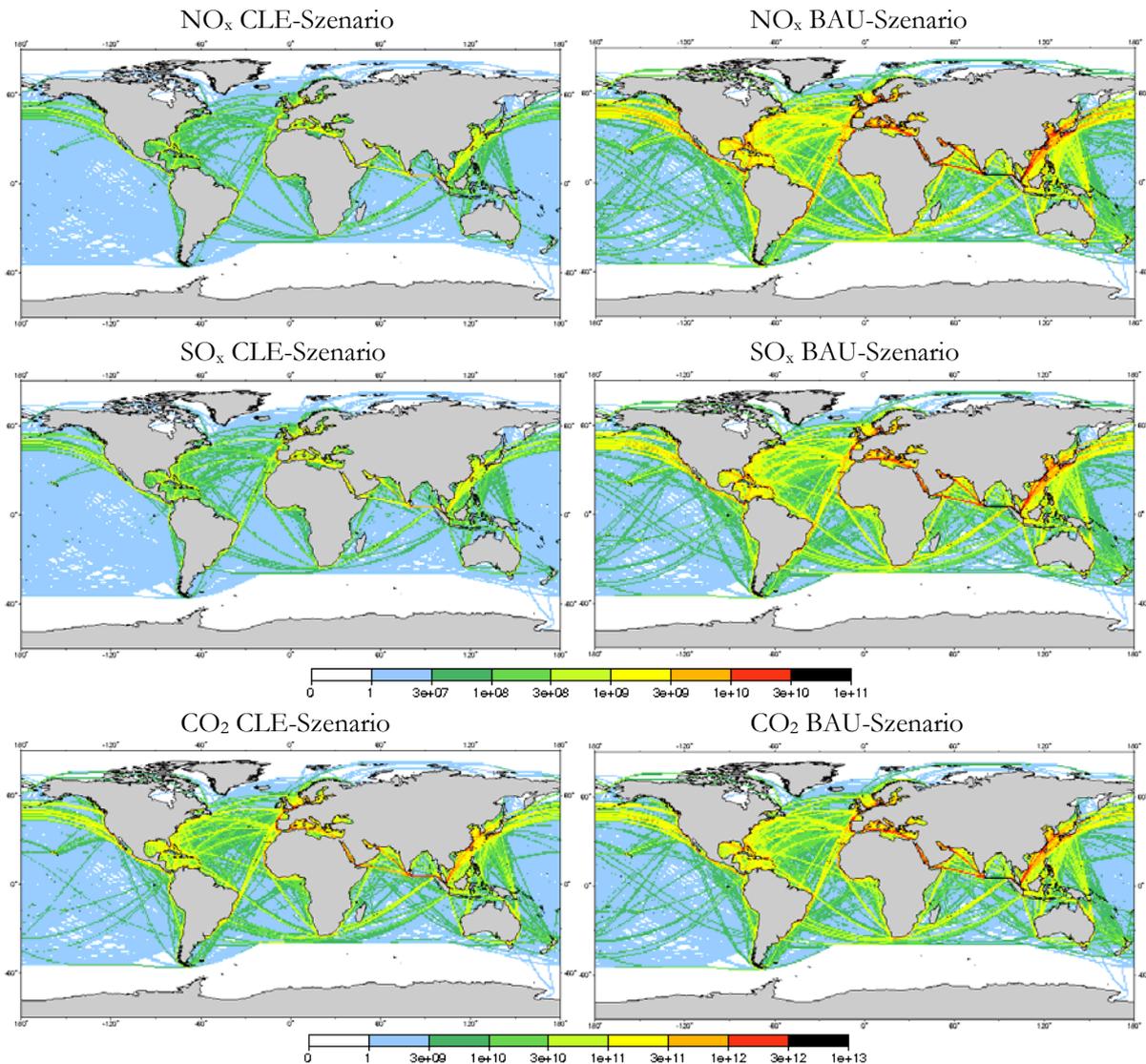


Abb. 4.9: Globale Emissionskataster für NO_x [g NO_2] (oben), SO_x [g SO_2] (Mitte) und CO_2 [g CO_2] (unten) der CLE- (links) und BAU-Zukunftsszenarios (skaliert auf das Gesamtjahr 2050) (rechts).

Vergleich mit dem Gegenwartsszenario dieser Studie

Der Vergleich des Emissionskatasters des CLE- bzw. BAU-Zukunftsszenarios des Gesamtjahres 2050 mit den Ergebnissen des Gegenwartsszenarios von 2006 zeigt einen Anstieg von 26-31% bzw. 123-134% beim Treibstoffverbrauch und den CO_2 -Emissionen aufgrund der unterschiedli-

chen Wachstumsprognosen. Die restlichen Gesamtemissionen werden im BAU-Szenario etwa verdoppelt, wohingegen die aggressive Emissionsreduktion des CLE-Szenarios die Emissionen von Partikeln und Hydrocarbonen leicht und diejenigen von SO_x und NO_x sogar um 73% bzw. 87% verringern kann. Somit kann das zukünftige Wachstum von Schiffszahlen und Hauptmotorleistung erfolgreich kompensiert werden durch alternative Energiequellen und effiziente Emissionsreduktion. Durch die Öffnung der Nordpolarrouten wird der Treibstoffverbrauch im gesamten Nordpolarraum um die Faktoren 3,1 bzw. 5,5 im CLE- und BAU-Szenario verstärkt. Auf der Nordwest-Passage ergeben sich Wachstumsfaktoren von 1.300 bzw. 2.300, in der Grönland-See von 1,5 bzw. 2,6 und auf der Nordost-Passage von 900 bzw. 1.500. Auch hier zeigt sich das bedeutende Wachstum von Nordwest- und Nordost-Passage, das darin begründet ist, dass gegenwärtig nur sehr wenig Schiffsaktivität vorliegt. Aufgrund des starken Wachstums übertreffen alle Emissionen der Nordwest- und Nordost-Passage die gegenwärtigen Werte. Lediglich bei den NO_x -, SO_x -, Hydrocarbon- und Partikel-Emissionen der Grönland-See können Emissionsreduktionen des CLE-Szenarios das zukünftige Wachstum kompensieren. Generell muss jedoch beachtet werden, dass durch zukünftige Nordpolarrouten die Schiffsemissionen in anderen Regionen und aufgrund der kürzeren Routendistanz auch die globalen Gesamtemissionen sinken.

Vergleich mit anderen Studien

Die zukünftigen Ergebnisse dieser Studie zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Spannweite des zukünftigen globalen Top-down-Emissionskatasters aus EYRING et al. (2005b) für das Jahr 2050, aus der die Annahmen der CLE- und BAU-Zukunftsszenarien entnommen wurden (siehe Kapitel 2.1.4). Die Tatsache, dass der gesamte Treibstoffverbrauch und die Gesamtemissionen dieser Diplomarbeit um etwa 5-20% niedriger als die Vergleichsstudie ausfallen und lediglich die Schätzungen für Hydrocarbone stärker abweichen, ist konsistent mit den Unterschieden im Gegenwartsszenario (siehe Kapitel 4.1.2).

Weiterhin können die zukünftigen Ergebnisse dieser Studie mit DALSSØREN et al. (2007) verglichen werden, die den gesamten Treibstoffverbrauch von Öltransportrouten von Nordskandinavien nach Europa und Nordamerika zu 1,24 Mt und der Nordost-Passage zu 0,1 Mt im Jahr 2015 berechnen (siehe Kapitel 2.2.2). Da die Öltransportrouten bis Rotterdam und New York verlaufen, können diese nicht mit den Ergebnissen des Nordpolarraumes dieser Diplomarbeit verglichen werden. Das Ergebnis für die Nordost-Passage im Jahr 2015 kann jedoch auf das Jahr 2050 extrapoliert werden, indem das Wachstum des Treibstoffverbrauches der Nordost-Passage dieser Studie von 2006 auf 2050 um den Faktor 20-35 der CLE- bzw. BAU-Zukunftsszenarien auf den Zeitraum 2015 bis 2050 skaliert wird. Der resultierende Faktor 16-28 ergibt einen Treibstoffverbrauch der Nordost-Passage im Jahr 2050 nach DALSSØREN et al. (2007) von 1,6-2,8 Mt. Die Ergebnisse dieser Studie von 0,19-0,34 Mt liegen weit unter dieser Spannweite. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Berechnung aus DALSSØREN et al. (2007) auf einem Schätzwert des zukünftig transportierten Frachtvolumens beruht ohne Berücksichtigung der polaren Meereis-Ausbreitung, wohingegen diese Diplomarbeit nur in drei Sommermonaten eine Befahrbarkeit des Nordpolarmeeres erlaubt. Weiterhin beginnt die Nordost-Passage in

DALSØREN et al. (2007) schon in Nordskandinavien (siehe Abb. 2.3), einer Region, die bereits gegenwärtig eine hohe Schiffsaktivität aufweist, und nicht wie in dieser Studie erst westlich von Nowaja Semlja.

Ein weiterer Vergleich kann mit GRANIER et al. (2006) vollzogen werden (siehe Kapitel 2.2.2), die zur Ermittlung der Auswirkungen polarer Schiffsemissionen im Jahr 2050 von der unbegründeten Abschätzung ausgehen, dass auf den beiden Nordpolarrouten jährlich 11% der globalen Gesamtemissionen von NO_x und 6% von CO, also 1,3 Tg N und 0,14 Tg CO, freigesetzt werden. Die Emissionen auf der Nordwest- und Nordost-Passage fallen in dieser Diplomarbeit mit 0,005-0,067 Tg NO_x und 0,003-0,006 Tg CO in der Spannweite der beiden Zukunftsszenarien deutlich geringer aus. Auch wenn die Anteile der Nordpolarrouten in dieser Studie aufgrund der mangelnden Abschätzung zukünftiger Schifffahrts-Logistik eher gering ausfallen, sind die einfachen Annahmen aus GRANIER et al. (2006) deutlich zu hoch.

Insgesamt zeigt diese Studie einen im globalen Vergleich geringen zukünftigen Anstieg der Schiffsaktivität auf den Nordpolarrouten, jedoch ein bedeutendes Wachstum im Vergleich zur gegenwärtigen regionalen Schiffsaktivität der Arktis. Auch wenn Probleme der Übertragbarkeit der gegenwärtigen Schifffahrts-Logistik auf zukünftige Bedingungen einen zu niedrigen Anteil umlegbarer Schiffsrouten und damit zu geringe Ergebnisse für den Nordpolarraum ergeben, können die Ergebnisse dieser Studie aufgrund der Genauigkeit der Methodik als exakter angesehen werden als die Abschätzungen anderer Studien.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Diplomarbeit wurden globale Bottom-up-Emissionskataster der internationalen Schifffahrt für ein Gegenwarts- und zwei Zukunftsszenarien aufgebaut, inklusive einer dazu verwendeten, automatischen Routenfindung zwischen beliebigen Start- und Zielhäfen des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters. Die Ergebnisse bieten einen besseren, räumlichen Bezug als globale Top-down-Ansätze und im Gegensatz zu bisherigen regionalen Bottom-up-Ansätzen erstmals eine globale Abdeckung. Damit stellen sie geeignete Eingangsdaten für Atmosphärenmodelle zur Berechnung der Auswirkungen von Schiffsemissionen auf Atmosphäre, Umwelt und Klima dar.

Zur Ermittlung der Verteilung der globalen Schiffsaktivität verwendet die Studie eine Lloyds-Schiffsstatistik von 2006 mit individuellen Schiffsinformationen und Angaben über angelaufene Häfen. Für Start- und Zielhäfen jeder Route findet der Dijkstra-Algorithmus analog zu einer Wellenausbreitung den kürzesten Verbindungspfad auf der Erdkugel unter Berücksichtigung vorliegender Landmassen. Der in dieser Studie erarbeitete verbesserte Dijkstra-Algorithmus ermöglicht durch Einbeziehung einer größeren Gitterbox-Nachbarschaft in die Routenfindung eine bessere Großkreis-Annäherung auf offenem Ozean. Zur realistischen Routenfindung wurde das $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter weiterhin um gegenwärtige und zukünftige monatliche Meereis-Ausbreitungen, schiffsgrößen-abhängige Schifffahrtskanäle und antarktischen Seegang erweitert. Der in IPCC-Modellsimulationen prognostizierte Rückgang der zukünftigen arktischen Meereis-Ausbreitung ermöglicht Schiffsrouten im Nordpolarraum, weil für viele Schiffsbewegungen von Europa bzw. Nordamerika nach Ostasien die neu entstandenen Nordpolarrouten eine Wegeinsparung im Vergleich zu konventionellen Schiffsrouten bieten. Daher werden neben einem Gegenwartsszenario von 2006 ohne Berücksichtigung von Nordpolarrouten zwei Zukunftsszenarien mit unterschiedlichen Annahmen zu Wachstum der Schiffsaktivität sowie zu Einsatz von Emissionsreduktionen und alternativen Treibstoffen zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen im Jahr 2050 entwickelt, welche beide eine Öffnung der Nordpolarrouten beinhalten. Nach Einsatz des verbesserten Dijkstra-Algorithmus auf alle Schiffsbewegungen der Lloyds-Schiffsstatistik ergeben sich für jedes der drei Szenarien ein globales Distanzfeld der gefahrenen Strecken und eine weltweite Schiffsverkehrsdichte der Schiffsanzahl pro Gitterbox des Modellgitters. Zur Erstellung eines globalen Bottom-up-Emissionskatasters für das Gegenwarts- und die zwei Zukunftsszenarien werden schließlich auf allen Gitterboxen jeder Schiffsroute anhand der berechneten Distanz und nach Schiffstypen gemittelten Motorangaben der Treibstoffverbrauch und die Emissionen von NO_x , CO_2 , SO_x , CO , Hydrocarbonen und Partikeln berechnet.

Die resultierende gegenwärtige Schiffsverkehrsdichte reproduziert die Hauptmerkmale der globalen Schiffsaktivität aus Beobachtungsdaten von Schiffsreportsystemen. Der für das Jahr 2006 berechnete globale Treibstoffverbrauch der internationalen Handelsflotte einer Größe von mindestens 100 Bruttoregistertonnen liegt mit 268 Mt im Bereich bisheriger Abschätzungen globaler Top-down-Ansätze. Im nordamerikanischen Raum zeigen die Ergebnisse eine gute Übereinstimmung mit dem regionalen Bottom-up-Ansatz des STEEM-Modells. Die zukünftige Schiffsverkehrsdichte des Jahres 2050 zeigt aufgrund zurückweichenden Meereises Schiffsaktivität auf den Nordpolarrouten. Aufgrund der Problematik von Zwischenhäfen auf langen Schiffsreisen der vorliegenden Lloyds-Schiffsstatistik, die in der gegenwärtigen Schifffahrts-Logistik begründet sind, ergeben sich nur wenig umlegbare Schiffsrouten und damit eine geringere Intensität der Nordpolarrouten als in bisherigen Studien. Dennoch wird die regionale Schiffsaktivität bzw. der Treibstoffverbrauch auf der Nordost-Passage um die Faktoren 450-600 bzw. 900-1.500 in den beiden Zukunftsszenarien erhöht. Die Nordwest-Passage zeigt mit 1.600-2.100 bzw. 1.300-2.300 sogar noch höhere Wachstumsfaktoren. Der starke Anstieg ist darin begründet, dass auf beiden Routen gegenwärtig sehr wenig Schiffsaktivität vorliegt. Der globale Treibstoffverbrauch von 352-626 Mt der beiden Zukunftsszenarien liegt knapp unter den Ergebnissen des globalen Top-down-Ansatzes aus EYRING et al. (2005b). Dabei wird bestätigt, dass Emissionsreduktionen ein zukünftiges Weltwirtschaftswachstum gut kompensieren können.

Eine Verbesserung der Unsicherheiten dieser Studie kann durch Nutzung von individuellen Motorangaben pro Schiff und Schiffsbewegungen eines gesamten Jahres anstelle der hier verwendeten sechs Monate zur Vermeidung von Extrapolations-Fehlern erreicht werden. Für Routen mit identischem Start- und Zielhafen könnte eine genauere Berechnung der Gesamtemissionen über die aktuelle Fahrtzeit einer Schiffsbewegung aus der Lloyds-Schiffsstatistik erfolgen. Eine geographische Verteilung im Modellgitter ergibt sich aus einer solchen Abschätzung allerdings nicht. Weiterhin wären Angaben von Lloyds nützlich, welcher Anteil der Weltflotte tatsächlich in den Schiffsbewegungen der vorliegenden Schiffsstatistik erfasst wird. Die Routenfindung kann durch ein höher aufgelöstes Modellgitter, eine Berücksichtigung des globalen monatlichen Seegangs, z.B. durch Radar-Satellitendaten, oder generell durch eine Optimierung nach den Kosten einer Schiffsbewegung anstatt nach deren Distanz verbessert werden. Neben der Öffnung von Nordpolarrouten können in den Zukunftsszenarien auch veränderte Fischbestände und Ölvorkommen sowie unterschiedliche Wachstumsraten von Schiffstypen und Hauptschifffahrtsrouten berücksichtigt werden, welche sich auf die Verteilung der globalen Schiffsaktivität auswirken. Zur besseren Erfassung der Aktivität zukünftiger Nordpolarrouten sollte in jedem Fall eine Anpassung der gegenwärtigen Schifffahrts-Logistik mit zahlreichen Zwischenhäfen an zukünftige Bedingungen vollzogen werden, eventuell anhand von Handelsströmen zwischen verschiedenen Kontinenten. Die in dieser Diplomarbeit entwickelte Methodik bietet die Möglichkeit, die zuvor genannten Erweiterungen und Verbesserungen in zukünftige Studien zu integrieren.

Literaturverzeichnis

- BROCKHAUS (1991):** Brockhaus Enzyklopädie in vierundzwanzig Bänden. Neunzehnte Auflage, Band 15, F.A. Brockhaus GmbH, Mannheim, 720 S.
- CALONEGO, B. (2007):** Mit dem Eisbrecher durch Schmelzwasser. In: Süddeutsche Zeitung, München, Nr. 215 (18.09.2007), S. 18
- CHANG, K.-Y., JAN, G. E., PARBERRY, I. (2003):** A Method for Searching Optimal Routes with Collision Avoidance on Raster Charts. In: The Journal of Navigation, Vol. 56, S.371-384, doi: 10.1017/S0373463303002418
- CORBETT, J. J., KÖHLER, H. W. (2003):** Updated emissions from ocean shipping. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 108, D20, 4650, S.1-16, doi: 10.1029/2003JD003751
- CORBETT, J. J., WINEBRAKE, J. J., GREEN, E. H., KASIBHATLA, P., EYRING, V., LAUER, A. (2007):** Mortalities from Ship Emissions: A Global Assessment. In: Environmental Science & Technology, Vol. 41, No. 24, S. 8512-8518, doi: 10.1021/es071686z
- CORMEN, T. H., LEISERSON, C. E., RIVEST, R. L., STEIN, C. (2001):** Introduction to Algorithms. Second Edition. MIT Press, Cambridge (Massachusetts), London, 1180 S.
- DALSØREN, S. B., ENDRESEN, Ø., ISAKSEN, I. S. A., GRAVIER, G., SØRGARD, E. (2007):** Environmental impacts of the expected increase in sea transportation, with a particular focus on oil and gas scenarios for Norway and northwest Russia. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 112, D02310, S.1-30, doi: 10.1029/2005JD006927
- ENDRESEN, Ø., SØRGARD, E., SUNDET, J. K., DALSØREN, S. B., ISAKSEN, I. S. A., BERGLEN, T. F., GRAVIR, G. (2003):** Emission from international sea transportation and environmental impact. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 108, D17, 4560, S.1-22, doi: 10.1029/2002JD002898
- ENDRESEN, Ø., SØRGARD, E., BAKKE, J., ISAKSEN, I. S. A. (2004):** Substantiation of a lower estimate for the bunker inventory: Comment on “Updated ship emissions from ocean shipping” by J. J. CORBETT and H. W. KÖHLER. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 109, D23302, doi: 10.1029/2004JD004853
- ENDRESEN, Ø., SØRGARD, E., BEHRENS, H. L., BRETT, P. O., ISAKSEN, I. S. A. (2007):** A historical reconstruction of ships fuel consumption and emissions. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 112, D12301, doi: 10.1029/2006JD007630
- EUROPEAN COMMISSION AND ENTEC UK LIMITED (2005):** Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. Task 1 – Preliminary Assignment of Ship Emissions to European Countries. London, 147 S.
- EYRING, V., KÖHLER, H. W., VAN AARDENNE, J., LAUER, A., (2005a):** Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 110, D17305, S.1-12, doi: 10.1029/2004JD005619
- EYRING, V., KÖHLER, H. W., LAUER, A., LEMPER, B. (2005b):** Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 110, D17306, S.1-18, doi: 10.1029/2004JD005620

- 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., NOIJE, T. P. C., WILD, O. (2007a):** Multi-model simulations of the impact of international shipping on atmospheric chemistry and climate in 2000 and 2030. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, Nr. 7, S. 757-780
- EYRING, V. (2007b):** Modelling of Coupled Chemistry-Climate System: Projections of Stratospheric Ozone in the 21st Century and Impacts of Shipping on Atmospheric Composition and Climate. Forschungsbericht 2007-12. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, 56 S.
- FEARNLEYS (2007):** FEARNLEYS Review 2007. The Tanker and Bulk Markets and Fleets, Oslo
- FLANNER, M. G., ZENDER, C. S., RANDERSON, J. T., RASCH, P. J. (2007):** Present day climate forcing and response from black carbon in snow. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, D11202, doi: 10.1029/2006JD008003
- GRANIER, C., NIEMEIER, U., JUNGCLAUS, J. H., EMMONS, L., HESS, P., LAMARQUE, J.-F., WALTERS, S., BRASSEUR, G. P. (2006):** Ozone pollution from future ship traffic in the Arctic northern passages. In: *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L13807, S.1-5, doi: 10.1029/2006GL026180
- HERMANN, G. (2006):** Gereiztes Klima nach dem Tauwetter. In: *Süddeutsche Zeitung*, München, Nr. 230 (06.10.2006), S.10
- HOLLAND, M. M., BITZ, C. M., TREMBLAY, B. (2006):** Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice. In: *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L23503, S.1-5, doi: 10.1029/2006GL028024
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2003):** International Bunker Statistics Year 1996/2000, Paris
- IMO – INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (1998):** Regulation for the prevention of air pollution from ships and NO_x technical code. ANNEX VI of MARPOL 73/78, London
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007):** Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M., MILLER, H., L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge und New York, 996 S.
- LAUER, A., EYRING, V., HENDRICKS, J., JÖCKEL, P., LOHMAN, U. (2007):** Global model simulations of the impact of ocean-going ships on aerosols, clouds, and the radiation budget. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, Nr. 7, S.5061-5079
- OLIVIER, J. G. J., BLOOS, J. P. J., BERDOWSKI, J. J. M., VISSCHEDIJK, A. J. H., BOUWMAN, A. F. (1999):** A 1990 global emission inventory of anthropogenic sources of carbon monoxide on 1x1 degree developed in the framework of EDGAR/GEIA. In: *Chemosphere: Global Change Science*, Nr. 1, S.1-17
- SCHREIER, M., KOKHANOVSKY, A. A., EYRING, V., BUGLIARO, L., MANNSTEIN, H., MAYER, B., BOVENSMANN, H., BURROWS, J. P. (2006):** Impact of ship emissions on microphysical, optical and radiative properties of marine stratus: a case study. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, Nr. 6, S.4925-4942

SCHREIER, M., MANNSTEIN, H., EYRING, V., BOVENSMANN, H., P. (2007): Global ship track distribution and radiative forcing from 1 year of AATSR data. In: Geophysical Research Letters, Vol. 34, L17814, doi: 10.1029/2007GL030664

STEINBERGER, P. (2007): Das Öl des Nordens. In: Süddeutsche Zeitung, München, Nr.169 (27.07.2007), S.15

STROEVE, J., HOLLAND, M. M., MEIER, W., SCAMBOS, T., SERREZE, M. (2007): Arctic sea ice decline: Faster than forecast. In: Geophysical Research Letters, Vol. 34, L09501, S.1-5, doi: 10.1029/2007GL029703

WANG, C., CORBETT, J., FIRESTONE, J. (2007a): Modeling Energy Use and Emissions from North American Shipping: Application of the Ship Traffic, Energy and Environment Model. In: Environmental Science & Technology, Vol. 41, No. 9, S. 3226-3232, doi: 10.1021/es060752e

WANG, C., CORBETT, J., FIRESTONE, J. (2007b): Improving Spatial Representation of Global Ship Emissions Inventories. In: Environmental Science & Technology, Vol. 42, No. 1, S.193-199, doi: 10.1021/es0700799

Internetquellen:

ACP - PANAMA CANAL AUTHORITY (2006): Proposal for the Expansion of the Panama Canal. Third Set of Locks Project, URL: www.pancanal.com/eng/plan/documentos/propuesta/acp-expansion-proposal.pdf, 70 S.

ACP - PANAMA CANAL AUTHORITY (2008a): Frequently Asked Questions. Physical Characteristics, URL: www.pancanal.com/eng/general/canal-faqs/physical.html

ACP - PANAMA CANAL AUTHORITY (2008b): OP Notice to Shipping N-1-2008 Vessel Requirements, URL: www.pancanal.com/eng/maritime/notices/2008/n1-2008.pdf, 67 S.

AMOS, J. (2007): Arctic summers ice-free by 2013. BBC News, URL: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7139797.stm>

HOCHSCHULE NIEDERRHEIN (2008): Kurven und Kugeln im Raum, URL: <http://hestia.hs-niederrhein.de/~gkorsch/mserv/mservheiss/m1304/rkurven/kurven.htm>

LETHSUEZ (2001): Draft restrictions, URL: www.letsueez.com/tg_draft.htm

LETHSUEZ (2002): Special restrictions, URL: www.letsueez.com/tg_north.htm

LLOYD'S LIST (2008): About Lloyd's List, URL: <http://www.lloydslist.com/ll/home/about.htm>

LMIU – LLOYDS MARITIME INTELLIGENCE UNIT (2008): Welcome to Lloydsmiu.com, URL: <http://www.lloydsmiu.com/lmiu>, **a** /aboutus.art, **b** /places/index.htm, **c** /ais/index.htm

LOTHER, G. (2007): Grundlagen der ebenen und sphärischen Trigonometrie. Fakultät für Geoinformation, Hochschule München, URL: http://www.hm.edu/fk08/fk/profs/lother/TR_1G_B07.pdf

PCMDI – PROGRAM FOR CLIMATE MODEL DIAGNOSIS AND INTERCOMPARISON (2008): Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison. URL: www.pcmdi.llnl.gov

ROACH, J. (2005): As Arctic Ice Melts, Rush Is on for Shipping Lanes. National Geographic News, URL: http://new.nationalgeographic.com/news/2005/02/0225_050225_arctic_landrush.html

SIS - EGYPT STATE INFORMATION SERVICE (2005a): Suez Canal, URL: www.sis.gov.eg/En/Land&people/50th/031700000000000002.htm

SIS - EGYPT STATE INFORMATION SERVICE (2005b): Present Day, URL: www.sis.gov.eg/En/Land&people/50th/031700000000000003.htm

WSD NORD – WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION NORD (2001): Regeln für die NOK-Schifffahrt, URL: www.kiel-canal.org/pages/vorschriften/Verkehrsvorschriften-KIEL-CANAL.pdf, 78 S.

WSD NORD – WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION NORD (2008): KIEL-CANAL-Info. Technische Daten, URL: www.kiel-canal.org/pages/kanal-info/technik/technik.htm

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 2.1: SEAF-Werte der verbesserten ICOADS-Schiffsverkehrsdichte von 2000-2002 und der nach Motorenergie gewichteten AMVER-Schiffsverkehrsdichte von 2005 [Millionstel der globalen Gesamtsumme].	8
Abb. 2.2: Sommerliche, arktische Meereis-Bedeckung [%], berechnet von ECHAM5/MPI-OM aus Beobachtungsdaten und dem SRES-A1B-Szenario für 2001-2005 und 2050-2060 mit Kennzeichnung der Nordwest- und Nordost-Passage.	18
Abb. 2.3: Darstellung der in DALSSØREN et al. 2007 verwendeten Nordost-Passage und arktischen Öl- und Gastransportrouten.	19
Abb. 3.1: Probleme bei der Routenfindung auf Großkreis und Küstenroutennetz der Großkreis-Methodik: Routenknick beim Übergang zum Küstenroutennetz, Hängenbleiben in Buchten, Umrunden von Landmassen auf dem falschen, längeren Weg.	27
Abb. 3.2: Einfaches EDGAR-Routennetz mit ergänzten Nordpolarrouten und farblicher Darstellung einzelner Routensegmente.	28
Abb. 3.3: Großkreis-Routennetz für den Südatlantik und den Golf von Mexiko/ Karibik durch Verbindung wichtiger Lloyds-Häfen über Großkreise.	29
Abb. 3.4: Beispiel einer Routenfindung auf gleichförmigem Modellgitter anhand des Dijkstra-Algorithmus: Abgebildet ist das Distanz-Feld, wobei Hindernisse grau eingefärbt und Start- und Zielpunkte anfangs blau umrandet sind. Ausgehend vom Startpunkt breitet sich die Welle aus. Die aktuell ausgewählte Gitterbox wird rot umrandet und alle bereits erreichten Gitterboxen gelb eingefärbt. Die grünen Pfeile symbolisieren das Vorgänger-Feld. Bei Erreichen des Zielpunktes zeigen die roten Pfeile den gefundenen, kürzesten Pfad zum Startpunkt.	33
Abb. 3.5: Dijkstra-Algorithmus mit Problematik des Routenknicks und Markierung der Wellenausbreitung.	33
Abb. 3.6: Mögliche Richtungswinkel der 8-Gitterbox-Nachbarschaft, Auszug der möglichen Richtungswinkel der 120-Gitterbox-Nachbarschaft mit Markierung von identischen Richtungswinkeln als graue Felder/ gestrichelte Pfeile.	34
Abb. 3.7: Schema der oktandenweisen Abtastung der 120-Gitterbox-Nachbarschaft.	34
Abb. 3.8: Verbesserter Dijkstra-Algorithmus mit un stetigem Routenverlauf, aber guter Annäherung an die Großkreis-Methodik und Markierung der Wellenausbreitung.	35
Abb. 3.9: Schema der Ermittlung der Schnittpunkte der Verbindungsgerade der beiden Routen-Gitterboxen mit den Meridianen und Breitenkreisen des $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitters.	36
Abb. 3.10: Beispiel-Ergebnis des verbesserten Dijkstra-Algorithmus auf geographischem Rastergitter mit Angabe der tatsächlich gefahrenen Strecke [km] pro Gitterbox und stetiger Großkreis-Annäherung.	37
Abb. 3.11: $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter mit manuell korrigierten Landmassen, geöffneten Flusssysteme und gemittelter Meereis-Ausbreitung einer Meereis-Konzentration von mindestens 50% des Monats Oktober für das gegenwärtige Szenario und für die beiden zukünftigen Szenarien mit Öffnung der Nordost- und Nordwest-Passagen.	40

Abb. 3.12: Antarktische Seegangs-Schwelle als permanentes Meereis zur Vermeidung von Schiffsrouten in den südlichen Ozeanen.	43
Abb. 3.13: Lage und Schiffsbewegungen der Lloyds-Häfen: Seehäfen auf Wasser-Gitterbox, Seehäfen auf Land-Gitterbox und Binnenhäfen ohne Meereskontakt im 1°x1°-Modellgitter und Anzahl der Lloyds-Schiffsbewegungen pro Hafen-Gitterbox.	46
Abb. 4.1: Globales Distanzfeld der gefahrenen Strecken [km] und normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichte mit SEAF-Werten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] pro Gitterbox für das Gegenwartsszenario (sechs Monate von 2006).	59
Abb. 4.2: Globales Distanzfeld der gefahrenen Strecken [km] und normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichte mit SEAF-Werten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] pro Gitterbox für die reduzierte Schiffsstatistik des Gegenwartsszenarios (sechs Monate von 2006) zur AMVER-Validierung.	60
Abb. 4.3: SEAF-Werte der normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] von ICOADS und AMVER und Differenz der normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] zwischen dem Gegenwartsszenario dieser Studie (sechs Monate von 2006) und ICOADS und zwischen der reduzierten gegenwärtigen Lloyds-Schiffsstatistik (sechs Monate von 2006) und AMVER.	61
Abb. 4.4: Globales Distanzfeld der gefahrenen Strecken [km] und normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichte mit SEAF-Werten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] pro Gitterbox für die reduzierte Schiffsstatistik des Gegenwartsszenarios (sechs Monate von 2006) zum Vergleich mit dem STEEM-Modell.	62
Abb. 4.5: Globale Emissionskataster des Gegenwartsszenarios (skaliert auf das Gesamtjahr 2006) für NO _x [g NO ₂], SO _x [g SO ₂] und CO ₂ [g CO ₂].	64
Abb. 4.6: Globales SO ₂ -Emissionskataster [g] für die reduzierte Schiffsstatistik des Gegenwartsszenarios (skaliert auf das Gesamtjahr 2006) zum Vergleich mit dem STEEM-Modell und SO ₂ -Emissionskataster des STEEM-Modells.	67
Abb. 4.7: Globale Distanzfelder der gefahrenen Strecken [km] und normierte, gewichtete Schiffsverkehrsdichten mit SEAF-Werten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] pro Gitterbox für das CLE- und BAU-Zukunftsszenario (sechs Monate von 2050).	69
Abb. 4.8: Globale Distanzfelder der gefahrenen Strecken [km] des Gegenwarts-, CLE- und BAU-Zukunftsszenarios (sechs Monate von 2006/ 2050) in polar-stereographischer Abbildung und Differenz der normierten, gewichteten Schiffsverkehrsdichten [Millionstel der globalen Gesamtsumme] zwischen CLE-Zukunfts- und Gegenwartsszenario in zylindrischer und polar-stereographischer Abbildung.	70
Abb. 4.9: Globale Emissionskataster für NO _x [g NO ₂], SO _x [g SO ₂] und CO ₂ [g CO ₂] der CLE- und BAU-Zukunftsszenarien (skaliert auf das Gesamtjahr 2050).	74

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 2.1: Vergleich des gesamten Treibstoffverbrauches und der Gesamtemissionen der vorgestellten Top-down-Emissionskataster.	10
Tab. 3.1: Unterschiedliche Attribute der LMIU-Bewegungs-, Schiffs- und Hafendatenbanken und deren Verlinkung in Farbe.	23
Tab. 3.2: Gegenwärtige Eigenschaften und Beschränkungen der Schifffahrtskanäle im $1^\circ \times 1^\circ$ -Modellgitter und geplante zukünftige Ausbauten.	41
Tab. 3.3: Stark frequentierte Häfen des kombinierten Lloyds-Bewegungsdatensatzes mit Gesamtanzahl der Schiffsbewegungen in den vorliegenden sechs Monaten des Jahres 2006.	44
Tab. 3.4: Lloyds-Regionen, sortiert nach der Gesamtanzahl der Schiffsbewegungen des kombinierten Lloyds-Bewegungsdatensatzes in den vorliegenden sechs Monaten des Jahres 2006.	44
Tab. 3.5: Häufigste Schiffsbewegungen des kombinierten Lloyds-Bewegungsdatensatzes in den vorliegenden sechs Monaten des Jahres 2006 zwischen zwei Lloyds-Regionen.	45
Tab. 3.6: Anzahl der aktiven Schiffe und Schiffsbewegungen der kombinierten Bewegungsdatenbank und Korrelation zwischen Bruttoreumgehalt GT [t] und Hauptmotorleistung P [kW] eines Schiffes mit Angabe des Bestimmtheitsmaßes, sortiert nach neun Schiffstypen.	48
Tab. 3.7: Die zum Übersprung der fünf Zwischenhäfen geforderten, unterschiedlichen Lloyds-Regionen für die jeweiligen Start- und Zielhäfen einer Schiffsbewegung.	49
Tab. 3.8: Eingangsdaten für die Treibstoff- und Emissions-Berechnung der Hauptmotoren, Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten nach dem Bottom-up-Ansatz, sortiert nach neun Schiffstypen.	55
Tab. 4.1: Gesamter Treibstoffverbrauch und Gesamtemissionen der Hauptmotoren, Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten für das Gegenwartsszenario (skaliert auf das Gesamtjahr 2006) mit den Anteilen von Nordwest-Passage, Grönland-See und Nordost-Passage und Vergleich mit bisherigen gegenwärtigen Emissionskatastern.	64
Tab. 4.2: Gesamter Treibstoffverbrauch und Gesamtemissionen der Hauptmotoren, Hilfsmotoren und Hafenaktivitäten für das CLE- und BAU-Zukunftsszenario (skaliert auf das Gesamtjahr 2050) mit den Anteilen von Nordwest-Passage, Grönland-See und Nordost-Passage und Vergleich mit einem bisherigen zukünftigen Emissionskataster für das Jahr 2050.	73

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen der Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppe SeaKLIM (Einfluss von Schiffsemissionen auf Atmosphäre und Klima) am Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen durchgeführt. An dieser Stelle möchte ich mich bedanken bei meinen Betreuern Prof. Dr. Wolfram Mauser am Department für Geographie der Ludwigs-Maximilians-Universität (LMU) München und besonders bei Dr. Veronika Eyring am DLR für fortwährende, intensive Beratung, Unterstützung und Anleitung. Dabei möchte ich ihr den speziellen Dank aussprechen, dass sie es mir ermöglichte, an der 2-wöchigen QUANTIFY-Summer School on Transport, Ozone and Climate Change in Athen teilzunehmen, welche mich mit den wesentlichen Aspekten des Themenbereiches vertraut machte. Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr. Robert Sausen für viele Anregungen und die Ermöglichung dieser Diplomarbeit bedanken und der gesamten Abteilung Dynamik der Atmosphäre für eine freundliche Arbeitsatmosphäre und allzeitige Hilfe, insbesondere bei Dr. Axel Lauer für Unterstützung und Rat aus Nähe und Ferne, Winfried Beer für umfangreiche Hilfe bei der Entwicklung des Dijkstra-Algorithmus, Andreas Falb für zahlreiche Anregungen und Hella Garny für Rettung in letzter Minute. Der größte Dank gilt schließlich meiner Freundin Anne-Kathrin Maier und meinen Eltern für Begleitung, Beistand, Motivation und Unterstützung auf dem gesamten Weg, besonders im Endspurt.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Diese Versicherung bezieht sich auch auf die bildlichen Darstellungen. Die Diplomarbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Andreas Paxian