Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München
Fakultät für Physik
Meteorologisches Institut München

Bachelorarbeit

im Studiengang
Bachelor Physik mit Nebenfach Meteorologie

CO_2–Klimawirkung und Minderungspotential für alternative Treibstoffe in der Schifffahrt

vorgelegt von

Carolin Klinger

Betreuer : Prof. Dr. Robert Sausen
Prof. Dr. Veronika Eyring

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

Juli 2009

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation **1**

2 Grundlagen und Stand des Wissens **5**

2.1 Emissionen und deren Berechnung 5

2.1.1 Grundlegende Ansätze der Emissionsberechnung 5

2.1.2 Biotreibstoffe 7

2.1.3 IMO Treibhausgas Studie 8

3 Methodik und Eingangsdaten **11**

3.1 Berechnung des CO_2–Reduktionspotentials 11

3.1.1 Bestimmung der Emissionsfaktoren für BIOCLEAN 11

3.1.2 Berechnung der globalen CO_2–Emissionen der Schifffahrt 14

3.2 Bestimmung der CO_2–Klimawirkung mit Hilfe eines Klima–Response–Modells 16

3.2.1 Grundlagen des Klima-Response-Modells 16

3.2.2 Szenarien für die Zukunft 18

3.2.3 Aufbereitung des linearen Klima-Response-Modells für BIOCLEAN 20

3.3 Berechnung der nicht–CO_2–Emissionen 22

3.3.1 Berechnung der weiteren Emissionen 22

3.3.2 SeaKLIM Algorithmus 24

4 Ergebnisse **29**

4.1 Diskussion des Reduktionspotentials 29

4.1.1 Emissionen aus Verbrennungsprozessen 29

4.1.2 Emissionen unter Berücksichtigung des Lebenszyklus 31

4.1.3 Nicht–CO_2–Emissionen aus Verbrennungsprozessen 33

4.2 CO_2–Klimawirkung 35

5 Zusammenfassung und Ausblick **43**

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

In den letzten 150 Jahren hat sich das Klima der Erde verändert. Mit großer Wahrscheinlichkeit ist davon auszugehen, dass die Aktivitäten des Menschen einen beachtlichen Anteil zur Klimaerwärmung beigetragen haben. Der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderung (IPCC - **I**ntergovernmental **P**anel on **C**limate **C**hange) veröffentlicht im Abstand von einigen Jahren einen aktualisierten Bericht, der den Klimawandel detailliert beschreibt. Seit Beginn der Industrialisierung vor 250 Jahren ist ein deutlicher Anstieg der Konzentration der Treibhausgase, der Ozonvorläuferstubstanzen und Partikeln zu beobachten. Eine Erhöhung der Treibhausgas– sowie der Aerosolekonzentration hat Auswirkungen auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und auf das Klima. Dies führt zum anthropogenen Klimawandel, welcher sich durch Änderungen in der mittleren Oberflächentemperatur, der Höhe des Meeresspiegels, der Niederschläge sowie in der Reduzierung von Schnee– und Eisbedeckung zu erkennen gibt.

Die von der Erdoberfläche emittierte thermische Strahlung wird in der Atmosphäre von Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4) oder Ozon (O_3) absorbiert. Die solare Einstrahlung kann hingegen fast ungehindert zum Erdboden vordringen. Ein Anstieg der CO_2–Konzentration verursacht eine stärkere thermische Absorption und stört das Strahlungsgleichgewicht des Systems Erde–Atmosphäre indem es Energie im System behält. Die Emission von CO_2 führt daher zu einer Erhöhung der mittleren Oberflächentemperatur der Erde (Treibhauseffekt).

CO_2 ist ein langlebiges Treibhausgas (englisch **G**reen**h**ouse **G**as, GHG) und gilt als das bedeutendste unter den anthropogen–freigesetzten Treibhausgasen. In der Atmosphäre verbreitet sich CO_2 gleichmäßig und wirkt als langlebiges Treibhausgas nicht nur lokal, sondern global. Innerhalb der letzten 250 Jahre hat die Konzentration von CO_2 global um ca. 100 ppm zugenommen. Der vorindustrielle Wert von rund 280 ppm ist bis zum Jahr 2005 auf rund 380 ppm angewachsen (Abbildung 1.1). Dies entspricht einer Zunahme von ca. 70%. Die Wachstumsrate ist dabei ebenfalls gestiegen. Während bis in die 1970er Jahre die ersten 50 ppm Zuwachs an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre zu verzeichnen sind, kam es in den darauf folgenden 30 Jahren zu einer weiteren Steigerung von 50 ppm. Allein in den Jahren 1995 bis 2005 ist die CO_2–Konzentration um 19 ppm gestiegen.

Dies entspricht der höchsten Zunahme in einer Dekade seit Beginn der Messungen (IPCC, 2007).

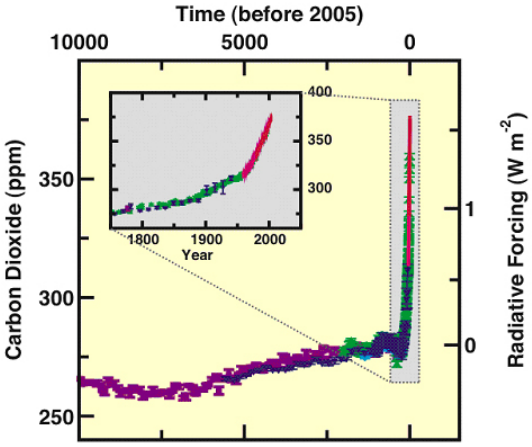

Abbildung 1.1 – Anstieg der CO_2–Konzentration und dem damit verbundenen Strahlungsantrieb (Quelle: IPCC, 2007).

Das Transportwesen ist maßgeblich am weltweiten anthropogenen Ausstoß von Treibhausgasen beteiligt. Der Anteil der CO_2–Emissionen beträgt rund 18%. Chemisch aktive Stoffe wie Stickoxide (NO_x) oder Schwefeldioxid leisteten einen Beitrag von 37% und 11% im Jahr 2000 (Eyring et al., 2005a).

Die internationale Schifffahrt wies in 2000 einen Anteil von 16% am Gesamttreibstoffverbrauch des Transportsektors auf. Belief sich die Freisetzung von CO_2 im Jahr 1950 noch auf 187 Tg, war sie im Jahr 2007 bereits auf 1050 Tg gestiegen (Buhaug et al., 2009). Dies entspricht 3,3% der globalen anthropogenen CO_2–Emissionen. Aktuelle Studien gehen aufgrund der wirtschaftlichen Entwicklung von einem weiteren Anstieg aus. Bis zum Jahr 2050 wird, im Falle eines "business–as–usual"–Szenarios, eine weitere Zunahme auf rund 2000 Tg erwartet. Ein ähnliches Verhalten besitzen andere klimawirksame Gase wie NO_x oder Schwefeloxid (SO_x). Wegen geringer Kontrollmechanismen in der Schifffahrt sind, aufgrund des hohen Schwefelgehalts von 2,7% im Treibstoff, besonders die SO_2 Emissionen aus der Schifffahrt etwa 80 mal größer, wie jene aus dem Flugverkehr (Eyring et al., 2005a).

Die Freisetzung von Schadstoffen hat neben der klimatischen Wirkung auch Einfluss auf die menschliche Gesundheit. Nach einer Studie von Corbett et al. (2007) verursacht Luftverschmutzung durch entstandene Partikel der Seeschifffahrt jährlich weltweit zahlreiche Tote durch Herz-Lungen Erkrankungen und Lungenkrebs. Dies gilt vor allem in den Küstenregionen, entlang der Hauptschifffahrtsrouten, aber auch noch bis zu 400 km ins Landesinnere.

In der Klimaforschung hat sich die physikalische Größe des Strahlungsantriebs (englisch **R**adiative **F**orcing, RF) als ein einfaches Maß für die Klimawirkung einer anthropogenen Störung erwiesen. Er misst die Erwärmungsrate infolge einer vom Menschen verursachten Störung des Erdatmosphärensystems in Watt je Quadratmeter. Er kann mit vergleichsweise einfachen Methoden berechnet werden, berücksichtigt aber nicht die vielfältigen Rückwirkungen im Klimasystem, beispielsweise durch Änderung der Luftfeuchte und Bewölkung bei einer Erwärmung. Wie das Klima auf eine Störung reagiert, muss mit einem komplexen Klimamodell berechnet werden. Auf eine konstante Störung passt sich das Klima nach vielen Jahrzehnten an. In diesem neuen Klima wäre die mittlere globale Temperatur an der Erdoberfläche für einen Strahlungsantrieb von 1 W/m^2 etwa um 0,5

bis 1°C höher (IPCC, 2007).

Für CO_2 betrug der mittlere Wert des Strahlungsantriebs in der Schifffahrt im Jahr 2000 rund 34 mW/m^2 (Abb. 1.2, Eyring et al. (2009)). Einen weitern erwärmenden Effekt weist die Bildung von Ozon (O_3) aufgrund von NO_x–Emissionen mit 21 mW/m^2 auf. Die Reduzierung von Methan (CH_4) durch NO_x wirkt hingegend abkühlend. NO_x entsteht bei der Verbrennung des Kraftstoffs und umfasst vornehmlich NO und NO_2. Stickoxide haben eine Lebensdauer von wenigen Wochen. Des Weiteren entsteht aus den schwefelhaltigen Verbindungen des Kraftstoffs bei der Verbrennung Schwefeldioxid (SO_2). Dies oxidiert in der Atmosphäre zunächst zu Schwefelsäure und bildet anschließend das Aerosol SO_4. SO_2 und Partikelemissionen verändern die optischen und mikrophysikalischen Eigenschaften von Wolken. Die so entstehenden Ship Tracks (langgestreckte tiefe Wolken über dem Meer) vermischen sich mit der Umgebungsluft und beeinflussen die Bewölkung auf einer großen Skala. Dieser Effekt, der sogenannte indirekte Aerosoleffekt, hat einen negativen Strahlungsantrieb zur Folge. Im Jahr 2000 belief sich dieser im Mittel auf -333 mW/m^2. Auch direkt, das heißt durch Streuung, wirkt Schwefeloxid negativ. Unter Berücksichtigung des gesamten Spektrums an Emissionen in der Schifffahrt, ist der heutige Strahlungsantrieb negativ und hat somit einen abkühlenden Effekt. Die meisten ausgestoßenen Schadstoffe haben allerdings nur eine geringe Verweildauer in der Atmosphäre. Somit wird deren negativer Beitrag im Laufe der Zeit von der positiven Wirkung des Kohlenstoffdioxids aufgehoben. Aufgrund der Langlebigkeit (mehrere 100 Jahre) dominiert der postive Effekt von CO_2 den Strahlungsantrieb langfristig (Buhaug et al., 2009).

Einen Ansatz zur Emissionseinsparung bietet der Einsatz von Biotreibstoffen. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt "BIOCLEAN", in dessen Rahmen diese Bachelorarbeit durchgeführt wird, widmet sich dieser Reduktionsmöglichkeit. In diesem Projekt soll das Emissionsverhalten von mittelschnelllaufenden Diesel–Großmotoren unter Einsatz von alternativen Treibstoffen oder Biotreibstoffen untersucht werden. Diese Motoren werden in der internationalen Schifffahrt eingesetzt und sind zudem überwiegend in Entwicklungs- und Schwellenländern stationär als Kraftwerke installiert. Über das Emissionsverhalten klimarelevanter Gase wie CO_2, Bereiche der Stickstoff–Ozon–Kette sowie über den Ausstoß von Partikeln dieser Großmotoren ist allerdings nur wenig bekannt. In BIOCLEAN werden CO_2, NO_x, Kohlenwasserstoffe, SO_2, Partikel und weitere Emissionen parallel betrachtet. Dadurch ist es möglich, die Effekte der CO_2–Einsparung auf andere Emissionen zu beurteilen. Das weltweite Reduktionspotential sowie die klimatische Auswirkung werden in der aktuellen Projektphase in Modellstudien untersucht.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Emissionen der Schifffahrt sowie die CO_2–Klimawirkung von Biotreibstoffen mit den Effekten der herkömmlichen Kraftstoffe Schweröl und MGO (Schiffsdiesel, englisch **M**arine **G**as**o**il) zu vergleichen und eine Aussage über das

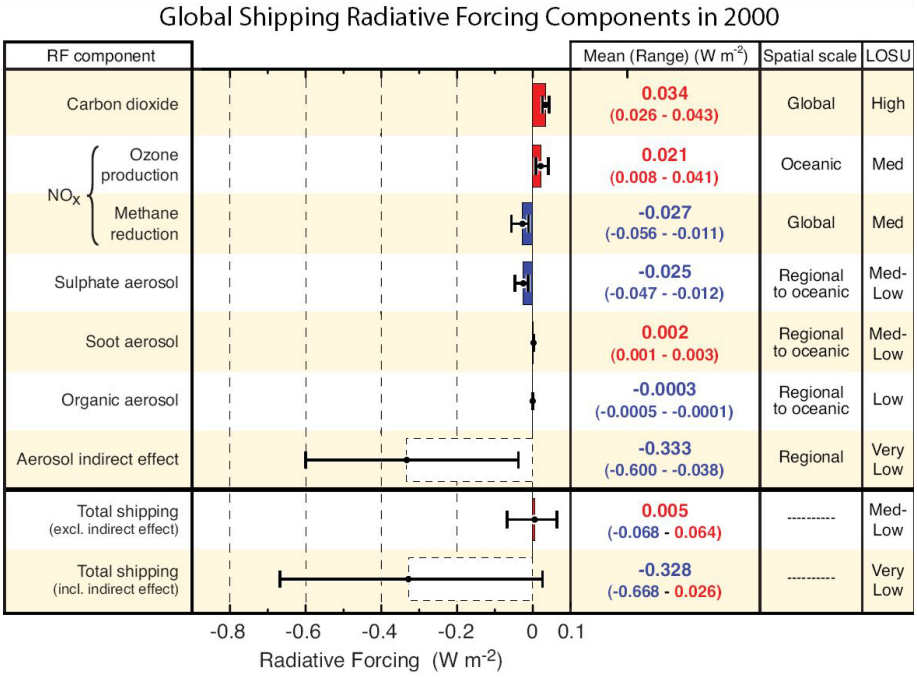

Abbildung 1.2 – Komponenten des Strahlungsantriebs der globalen Schifffahrt für das Jahr 2000 (Quelle: Eyring et al.,2009

Reduktionspotential zu treffen. Darüber hinaus soll bewertet werden, ob oder unter welchen Voraussetzungen der Einsatz von Biotreibstoffen in der Schifffahrt klimatisch sinnvoll ist.

Im anschließenden Kapitel werden die Grundlagen dieser Arbeit aufgeführt. Die Methodik zur Berechnung der Emissionen und des Reduktionspotentials sowie der Klimawirkung werden in Kapitel 3 dargestellt. Kapitel 4 präsentiert die Ergebnisse. Abschließend fasst Kapitel 5 die gewonnenen Erkenntnisse zusammen.

Kapitel 2

Grundlagen und Stand des Wissens

Diese Arbeit befasst sich mit dem Einsatz von alternativen Treibstoffen in der Schifffahrt, den dadurch entstehenden Emissionen, insbesondere CO_2 sowie dessen Klimawirkung. Zudem erfolgt eine Abschätzung, inwieweit durch den Einsatz von Biotreibstoffe in der Schifffahrt CO_2–Emissionen global reduziert werden können. Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen dieser Arbeit genauer erläutert und angewandte Modelle und Studien erklärt.

2.1 Emissionen und deren Berechnung

Verschiedene Ansätze werden zur Berechnung globaler Schiffsemissionskataster verwendet, die im folgenden Abschnitt 2.1.1 dargestellt werden. In Abschnitt 2.2.2 werden Grundlagen zu Biotreibstoffen erklärt und die in dieser Arbeit betrachteten Biotreibstoffe Palmöl und Sojaöl näher erläutert. Die dieser Arbeit zu Grunde liegende Treibhausgasstudie wird in Abschnitt 2.2.3 dargestellt.

2.1.1 Grundlegende Ansätze der Emissionsberechnung

Zur Ermittlung der weltweiten Auswirkung von Schiffsemissionen wird die geographische Verteilung, sowie der globale Gesamtwert der Emissionen benötigt. Für die Bestimmung von räumlich aufgelösten Emissionskatastern gibt es zwei Methoden - den Top-down- und den Bottom-up-Ansatz. Für eine detaillierte Beschreibung dieser Methoden sei auf Eyring et al. (2009) verwiesen.

Top-down
Bei einem Top–down–Ansatz werden zunächst die globalen Emissionen durch Multiplikation des Gesamttreibstoffverbrauchs mit Emissionsfaktoren berechnet. Erst nach ihrer Berechnung wird die räumliche Verteilung zum Beispiel aus Beobachtungsdaten bestimmt. Der Treibstoffverbrauch lässt sich in diesem Ansatz aus nationalen und internationalen Treibstoffverbrauchsstatistiken bestimmen. Alternativ ist eine direkte Berechnung möglich. Letzteres ist weit weniger fehlerbehaftet. Hierzu werden die installierte

Motorenenergie P_i [MW], die Motorauslastung F_i [%], die Motorlaufzeit τ [h] sowie die spezifische Treibstoff–Öl–Verbrauchsrate SFOC $[kg/kWh]$ benötigt. Diese für bestimmte Schiffstypen i gemittelten Eingangswerte erhält man aus globalen Schiffsstatistiken und aus Industriemessungen. Der globale Treibstoffverbrauch (FC) lässt sich hiermit wie folgt berechnen:

$$FC = \sum_i FC_i = \sum_i P_i \; F_i \; \tau_i \; SFOC_i \tag{2.1}$$

Für die Gesamtemission E_x [kg] (x bezeichnet hierbei die Art der Emission, z.B. CO_2) wird das Produkt aus dem spezifischen Emissionsfaktors $EI_{x,i}$ $[kg/t_{Treibstoff}]$ und dem errechneten Treibstoffverbrauch FC_i [t] gebildet. Den Emissionsfaktor erhält man unter anderem aus Motortestmessungen.

$$E_x = \sum_i E_{x,i} = \sum_i FC_i \; EI_{x,i} \tag{2.2}$$

Die globale räumliche Verteilung der Emissionen gewinnt man mit Hilfe der Schiffverkehrsdichte S. Dabei wird angenommen, dass ein Gebiet mit hoher Aktivität auch einen hohen Anteil an Emissionen aufweist. Daher ist das Emissionskataster stark von der Genauigkeit der Schiffverkehrsdichte abhängig (Wang et al., 2007). Schiffverkehrsdichten sind räumliche Verteilungen der globalen Schiffsaktivität. Diese Daten werden aus Beobachtungen globaler Schiffreportssysteme erstellt. Solche Systeme sind beispielsweise ICOADS[1] oder AMVER[2]. Die Schiffsreporte sind neben der Anzahl der Schiffe auch von deren Reportintervallen sowie der Fahrtzeit auf See abhängig. Im Idealfall sind die Berichte der Schiffe repräsentativ für die gesamte Weltflotte. Die räumliche Verteilung errechnet man wie folgt:

$$E_{x,j} = E_x \frac{S_j}{S} \tag{2.3}$$

Dabei ist $E_{x,j}$ der Emissionswert einer bestimmten Emissionsart x und Gitterbox j, S_j die Schiffverkehrsdichte der Gitterbox, während S die globale Schiffverkehrsdichte bezeichnet.

Bottom-up

Im Bottom–up–Ansatz wird die Gesamtemission ebenfalls durch Multiplikation des Treibstoffverbrauchs mit dem Emissionsfaktor gewonnen, die Berechnung erfolgt aber unmittelbar in der geographischen Umgebung. Daher werden zusätzlich zu den Eingangsdaten des Top–down–Ansatzes Informationen über die angelaufenen Häfen pro Schiff sowie die Schiffsroute benötigt (Paxian et al., 2009). Der Routenverlauf wird mittels eines numerischen Algorithmus abgeschätzt. Die Motorlaufzeit wird hierbei aus der Geschwindigkeit

[1] **I**nternational **C**omprehensive **O**cean–**A**tmosphere **D**ata **S**et
[2] **A**utomated **M**utual–assistance **V**essel **R**escue **S**ystem

v_i $[km/h]$ und der Distanz $D_{i,j}$ [km] bestimmt.
Für den Treibstoffverbrauch im Bottom–up–Ansatz gilt:

$$FC_i = \sum_i FC_{i,j} = \sum_i P_i \; F_i \; \frac{D_{i,j}}{v_i} \; SFOC_i \tag{2.4}$$

für jeden Schiffstyp i und jede Gitterbox j. Die weiteren Rechenschritte erfolgen analog zum Top-down-Ansatz und man erhält den Emissionswert E_j eines Gebietes.

Zusammenfassend gilt: Ein Top–down–Ansatz liefert einen globalen Emissionswert, der mittels Beobachtungsdaten auf ein geographisches Raster verteilt wird. Ein Bottom–up–Ansatz berechnet hingegen die räumliche Verteilung der Emissionen. Die Gesamtemission erhält man durch Summation aller Gitterboxen (Paxian et al., 2009).

In dieser Arbeit wird ein aktivitätsbasierender Top–down–Ansatz zur Berechnung der CO_2–Emissionen analog der 2. IMO–GHG–Studie (Buhaug et al., 2009) herangezogen, wohingegen nicht–CO_2–Emissionen mit Hilfe des in Paxian et al. (2009) entwickelten Bottom–up–Ansatz berechnet werden.

2.1.2 Biotreibstoffe

In den letzen Jahren ist das Interesse an Biotreibstoffen (englisch Biofuels) stark gestiegen. Zu den Vorteilen dieser Energieträger zählen die Erneuerbarkeit des Rohstoffs, die Reduzierung der Treibhausgase bei der Verbrennung und die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern. Biotreibstoffe können allerdings ohne Substitution der Produktion preislich nicht mit den herkömmlichen Energieträgern mithalten. Sie stehen häufig in Konflikt mit der Nahrungsmittelproduktion, da Ackerland nun für den Anbau der alternativen Treibstoffe genutzt wird und auch ihre Klimabilanz ist unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus der Herstellung nicht so günstig, wie ursprünglich angenommen. Biotreibstoffe gelten häufig als CO_2–neutral, da bei ihrer Verbrennung nicht mehr CO_2 freigesetzt wird, als während des Wachstums der Pflanzen in der Biomasse gebunden wurde. Auch die Emission anderer Treibhausgase bei der Verbrennung ist reduziert.

Der Lebenszyklus eines Biotreibstoffs umfasst die Aktivität der Herstellung bis zur Nutzung. Besonders die Vorketten, d.h. die der Energienutzung vorangehenden Prozesse sind entscheidend. Diese beinhalten das Einsammeln von Rest– und Abfallstoffen, den Anbau von Biomasse sowie die primäre Aufbereitung, Transporte und einiges mehr. Bei der Landnutzung im Anbaustadium eines Biotreibstoffs können sowohl direkte wie auch indirekte Effekte auftreten. Direkte Landnutzungsänderungen beinhalten beispielsweise die Abholzung des Regenwaldes für Plantagen. Verdrängte Vornutzen werden in indirekten Änderungen berücksichtigt.

Da der Anbau der Rohstoffe vor allem in tropischen Regionen begünstigt ist (sowohl klimatisch, als auch aufgrund der Verfügbarkeit von Ackerland), haben Biotreibstoffe Einfluss auf die Umwelt und Biodiversität.

Es gibt eine große Vielfalt an Biotreibstoffen. So können Alt– und Tierfette aus der Nahrungsmittelproduktion in Biotreibstoffe umgewandelt werden. Die am weitesten verbreitete Methode der Biotreibstoffproduktion der ersten Generation basiert auf ölhaltigen Pflanzen wie der Ölpalme, Raps, Sonnenblumenkernen oder Sojabohnen.

Für diese Arbeit sind insbesondere Sojaöl und Palmöl von Relevanz. Palmöl zeichnet sich durch seine globale Verfügbarkeit und gute Kraftstoffeigenschaften aus. Es wird aus den Früchten der Ölpalme gewonnen, die überwiegend in tropischen Regionen angebaut wird. Dadurch muss Regenwald abgeholzt oder durch Brandrodung Land gewonnen werden, jedoch ist auch der Anbau auf vorhandenen oder bereits gerodeten Flächen möglich. Sojaöl weist eine hohe Energieeffizienz sowie einen hohen Kohlenstoffgehalt auf. Sojabohnen können auch in den gemäßigten Breiten angebaut werden. In der Studie wird Sojaöl für drei Anbaumöglichkeiten differenziert. So kann der Anbau auf Ackerflächen, in Graslandschaften und in der Savanne erfolgen. Je nach Anbauregion tragen die Biotreibstoffe unterschiedlich zur Gesamtbilanz der CO_2–Emissionen bei. Die unterschiedlichen Lebenswege werden in einer Studie des Öko–Institut e.V. analysiert und Ergebnisse zur Verfügung gestellt (Fritsche, 2008).

2.1.3 IMO Treibhausgas Studie

Die erste Studie der ***I**nternational **M**aritime **O**rganisation* wurde 1997 auf Wunsch der *Diplomatic Conference on Air Pollution* in Auftrag gegeben. Diese Konferenz wurde einberufen, um die durch die Schifffahrt verursachte Luftverschmutzung zu begutachten. Veröffentlicht wurde die erste Studie im Jahr 2000. Die IMO Studie über Treibhausgase (engl. **g**reen**h**ouse **g**as GHG) sollte die Menge und den prozentualen Anteil der GHG–Emissionen der Schifffahrt im Bezug auf die weltweiten Treibhausgasemissionen bestimmen. 2006 wurde beschlossen, die Studie zu aktualisieren, um eine bessere Grundlage für zukünftige Entscheidungen zu schaffen. Daraus entstand die zweite Treibhausgas–Studie der IMO (Buhaug et al., 2009). Die Schwerpunkte liegen dabei auf gegenwärtigen (bis zum Jahr 2007) und zukünftigen Emissionen der internationalen Schifffahrt sowie deren Klimawirkung.

Den Richtlinien des (IPCC, 2007) folgend, wird die internationale Schifffahrt durch Seefahrt zwischen Häfen verschiedener Staaten definiert. Ausgeschlossen sind dabei Fischereiverkehr, Militär– sowie innerstaatliche Schifffahrt. Für die zweite IMO–GHG–Studie wurden die Fischerei– und die Binnenschifffahrt allerdings mit in Betracht gezogen. Durchgeführt wurde sie von einem internationalen Expertenteam im Auftrag der IMO.

Die Studie befasst sich mit folgenden Inhalten:

- Jährliche Treibhausgas– und anderen relevanten Emissionen der Schifffahrt von 1990 bis 2007
- Analyse des Fortschritts der Emissionsreduzierung in der Schifffahrt durch Umsetzung von MARPOL Annex VI [3]

[3] Weltweit geltendes Abkommen zum Schutz der Meeresumwelt; hier mit Schwerpunkt auf Reduzierung

- Analyse der technischen und operativen Methoden zur Emissionsreduzierung
- Analyse politischer Möglichkeiten zur Reduzierung der Emissionen
- Zukunftsszenarien der internationalen Schifffahrt bezüglich der Emissionen
- Klimaeinfluss der Emissionen der Schifffahrt
- Vergleich der Energie– und CO_2–Effizienz der Schifffahrt mit jener anderer Transportmöglichkeiten

Emissionen aus der Schifffahrt werden in dieser Studie in Emissionen, Cargo–Emissionen, Emissionen aus Kühlmitteln sowie andere unterteilt. Die Berechnungen erfolgen für Hauptmotoren (Main Engine, ME), Hilfsmotoren (Auxiliary Engine AE) und Boiler, jeweils für Schiffe, die eine Masse von mehr als 100 GT aufweisen. Die Berechnung der Emissionen erfolgt detailliert, während die Werte für Cargo–Emissionen, Emissionen aus Kühlmitteln und andere Emissionen aus vorangegangenen Studien lediglich abgeschätzt werden.

Treibhausgas– und Schadstoffemissionen werden über treibstoffbasierende Emissionsfaktoren und den Gesamttreibstoffverbrauch für jede relevante Komponente der Abgase in einem aktivitätsbasierendem Top–down–Ansatz berechnet. Treibstoffbezogene Emissionsfaktoren sind Werte, die zur Umrechnung einer Menge an verbrauchten Treibstoff in Emissionen hergenommen werden und aus Verbrennungsprozessen stammen. Emissionswerte erhält man letztendlich durch Multiplikation der Emissionsfaktoren mit der Masse an verbrauchtem Treibstoff.

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten werden die vorhandenen Emissionsfaktoren aus dem (IPCC, 2007) sowie UNECE[4] /EMEP[5] CORINAIR[6] hergenommen. Eine Ausnahme bildet hierbei NO_x, für welches eine detaillierte Berechnung des Emissionsfaktors vorgenommen wurde.

Das Referenzjahr zur Berechnung der Emissionen ist 2007. Für 1990 bis 2007 wird angenommen, dass sich die Emissionen der Schifffahrt proportional zum Seehandel (nach Fearnresearch[7]) verhalten (Buhaug et al. (2009)). Das Modell der IMO–GHG–Studie wird in dieser Arbeit zur Berechnung der CO_2–Emissionen unter der Annahme, dass der Schwerölanteil in 2008 mit Biotreibstoffen ersetzt wird, angewandt.

von NOx sowie SOx in der Schifffahrt und ozonschädlicher Emissionen

[4]United Nations Economic Commission for Europe

[5]European Monitoring and Evaluation Programm (Überwachung und Beurteilung weitreichender Verbreitung von Luftschadstoffen in Europa)

[6]**Cor**e **In**ventory of **Air** Emission (Projekt, Sammeln von Informationen zu Emissionen in der Luft mittels eines europäischen Datenbanksystems)

[7]Flotten–, Handles– und Marktentwicklungsreporte, fokusiert auf Tanker, Bulk-Carrier und Gas-Carrier.

Kapitel 3

Methodik und Eingangsdaten

Ziel dieser Arbeit ist es, das Reduktionspotential von CO_2– Emissionen alternativer Treibstoffe in der Schifffahrt und die daraus resultierenden Änderungen im Klima zu bewerten. Im Zuge dessen werden zunächst aus den in der Versuchsphase von BIOCLEAN gemessenen Werten die CO_2–Emissionen nach dem Modell der IMO Treibhausgas Studie berechnet und das Reduktionspotential durch einen Vergleich mit dem momentan eingesetzten Gemisch aus HFO und MGO errechnet (siehe Kapitel 3.1). Als Referenz gilt dabei der in der IMO-GHG-Studie veröffentlichte Referenzwert für 2007. Analog zu CO_2 werden in dieser Arbeit auch nicht–CO_2–Emissionen (NO_x, SO_x, CO, HC, PM, etc.) errechnet. Die Analyse der Klimawirkung beschränkt sich auf CO_2. In Abschnitt 3.2 wird das Klima-Response-Modell, welches zur Bestimmung der Klimawirkung von CO_2 verwendet wird, genauer erklärt.

3.1 Berechnung des CO_2–Reduktionspotentials

Die Berechnung der Emissionswerte erfolgt über mehrere Schritte. Zunächst müssen Emissionsfaktoren für die einzelnen Emissionsarten bestimmt werden. Dies ist in Abschnitt 3.1.1 erläutert. Die Berechnung der Emissionswerte von CO_2 zeigt Abschnitt 3.1.2. Dabei erfolgt die Bestimmung der Werte für die in BIOCLEAN gemessenen Verbrennungsemissionen als auch für die in der Ökostudie ermittelten Lebenszyklus-Emissionen.

3.1.1 Bestimmung der Emissionsfaktoren für BIOCLEAN

Die Berechnung des Treibstoffverbrauchs, nach dem Modell der IMO, basiert auf einem aktivitätsbezogenem Top-Down–Ansatz. Sie wird für einzelne Schiffskategorien durchgeführt (siehe Buhaug et al. (2009) für Details).

Den Treibstoffverbrauch des Hauptmotors einer Kategorie erhält man, indem man im ersten Schritt die Anzahl der Schiffe dieser Kategorie mit der mittleren Hauptmotoren–Leistung multipliziert und somit die Leistung in kW für jede Kategorie erhält. Anschließend ergibt sich die jährliche Leistung [kWh] aus der soeben berechneten Leistung in kW

multipliziert mit den kategoriespezifischen Betriebsstunden und dem mittleren Motorenauslastungsfaktors des Hauptmotors.

Letztlich erhält man den Treibstoffverbrauch als Produkt der jährlichen Leistung und dem spezifischen Treibstoff–Öl–Verbrauch (SFOC) in g/kWh pro Kategorie.
Das gleiche Prinzip wird für den Hilfsmotor angewandt.

Nach Multiplikation des Treibstoffverbrauchs mit dem spezifischen Emissionsfaktor errechnet die IMO-GHG-Studie für die gesamte Schifffahrt für das Jahr 1990 einen Wert von 562 Millionen Tonnen CO_2 und 1053 Millionen Tonnen für 2007. Für die internationale Schifffahrt ergaben sich 468 Millionen Tonnen und 870 Millionen Tonnen.

Als Eingangsdaten für die Rechnungen werden benötigt:

- Anzahl der Schiffe
- Mittlere Leistung [kW] des Haupt– und Hilfsmotors
- Mittleres Alter des Hauptmotors
- Mittlere bauartbedingte Geschwindigkeit
- Mittlere spezifischer Treibstoff-Öl-Verbrauch [g/kWh] von Haupt– und Hilfsmotor
- Mittlere Laufzeit [days] des Haupt– und Hilfsmotors
- Mittlerer Auslastungsfaktor [%] des Haupt– und Hilfsmotors
- Mittlerer Treibstoffverbrauch des Dampf–Boilers
- Mittlerer Treibstoffverbrauch des Boilers
- Mittlerer Kohlenstoffgehalt des Treibstoffs

Die Eingangsdaten in der IMO–GHG–Studie entstammen unter anderem der Lloyd's Register Fairplay Datenbank und deren Erweiterungen oder Energiestatistiken der International Energy Agency. Alternativ wurden benötigte Werte aus dort vorhandenen Daten abgeleitet (Buhaug et al., 2009). Um Emissionen für die in BIOCLEAN verwendeten alternativen Treibstoffe zu erhalten, müssen in den zur Emissionsberechnung verwendeten Modellen die vorhandenen Emissionsfaktoren durch jene ersetzt werden, die aus den Messwerten der Biotreibstoffe hervorgehen.

In BIOCLEAN wurden Palmöl, Tierfett, Sojaöl, Sonnenblumenöl, Marine Gasoil (MGO) sowie Schweröl (als Referenzwert) getestet (siehe Abbildung 3.1). Für den Einsatz in der internationalen Schifffahrt kommen aufgrund von Kosten und der global benötigten Menge an Treibstoff nur Palmöl, Sojaöl und MGO in Frage. Die im Rahmen von BIOCLEAN gemessenen Emissionsfaktoren wurden dieser Arbeit zur Verfügung gestellt und können aus Tabelle 3.1 entnommen werden.

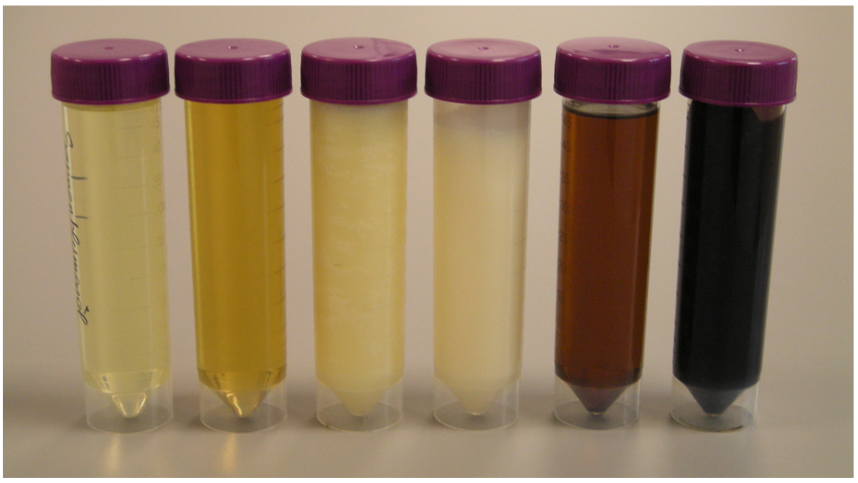

Abbildung 3.1 – Treibstoffproben der in BIOCLEAN getesteten Kraftstoffe Sonnenblumenöl, Sojaöl, Palmöl, Tierfett, Marine Diesel und Schweröl (Quelle: BIOCLEAN (2007)).

Tabelle 3.1 – In BIOCLEAN gemessene Emissionen für Schweröl, Palmöl, Sojaöl und MGO. Zur Umrechnung der Werte dient der Faktor f_{PF}. Die Werte wurden für eine Motorenauslastung von 100%, 75%, 25% sowie 10% ermittelt. Für die Modellrechnungen werden jene bei 75% hergenommen. Für Sojaöl und MGO sind für Ruß (BC) keine Messwerte verfügbar (n.v.).

Treibstoff	Motor-auslas-tung [%]	CO_2 $[\frac{kg}{kWh}]$	NO_x $[\frac{g}{kWh}]$	SO_x $[\frac{g}{kWh}]$	CO $[\frac{g}{kWh}]$	HC $[\frac{g}{kWh}]$	PM $[\frac{mg}{kWh}]$	SO_4 $[\frac{mg}{kWh}]$	OC $[\frac{mg}{kWh}]$	BC $[\frac{mg}{kWh}]$	Energie-dichte $[\frac{kWh}{kg}]$
Schweröl	100	0,675	14,12	9,130	0,200	0,072	1266	613,0	104,0	4,800	4,72
	75	0,679	15,33	9,170	0,190	0,083	1221	581,0	139,0	10,10	4,70
	25	0,898	17,45	11,67	0,700	0,095	612,0	236,0	128,0	22,90	3,55
	10	1,690	26,09	23,30	2,370	0,290	1367	447,0	375,0	126,0	1,89
Palmöl	100	0,651	12,95	0,003	0,190	0,047	123,0	2,000	106,0	1,200	4,35
	75	0,652	14,38	0,003	0,150	0,037	192,0	2,000	178,0	1,600	4,35
	25	0,864	18,68	0,004	0,450	0,090	218,0	3,000	195,0	5,900	3,28
	10	1,563	25,70	0,008	1,570	0,340	797,0	4,000	716,0	33,00	1,81
Sojaöl	100	0,659	14,03	0,460	0,140	0,045	146,0	4,000	118,0	n.v.	4,34
	75	0,662	15,33	0,460	0,140	0,030	128,0	2,000	107,0	n.v.	4,32
	25	0,864	18,63	0,600	0,430	0,060	190,0	3,000	160,0	n.v.	3,21
	10	1,563	27,11	1,090	1,500	0,260	680,0	4,000	581,0	n.v.	1,83
MGO	100	0,632	12,81	0,400	0,170	0,170	96,00	9,000	70,00	n.v.	5,05
	75	0,640	14,65	0,400	0,170	0,300	76,00	5,000	58,00	n.v.	5,00
	25	0,860	17,30	0,540	0,640	0,660	90,00	4,000	68,00	n.v.	3,73
	10	1,550	23,39	0,970	2,670	2,030	308,0	8,000	226,0	n.v.	2,06

Die Emissionsfaktoren für die jeweiligen Treibstoffe wurden anschließend durch Multipli-

kation der Messwerte [kg/kWh] mit dem Umrechenungsfaktor f_{PF} [kWh/kg] errechnet. Hierfür wurden die Ergebnisse der Messung mit einer Motorenbelastung von 75% hergenommen, da 75% eine gute Approximation der mittleren Motorenleistung auf See entspricht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 zu finden.

Für die Berechnung wurden sämtliche Schiffe gemäß ihrer Eigenschaften in neun Kategorien eingeteilt (Container, Tanker, General Cargo, Bulk Carrier, Reefer, RoRo, Passanger, Fischer und Miscellaneous). Für jede diese Klassen ist der Anteil an MGO am momentan verwendeten Schweröl unterschiedlich. Die prozentualen Anteile von MGO und HFO in jeder Schiffskategorie wurden von MAN B&W bereitgestellt. Für BIOCLEAN wurde angenommen, dass Schweröl im Jahr 2008 vollständig durch Biotreibstoffe ersetzt wird. Der Energiegehalt der alternativen Treibstoffe ist geringer als bei herkömmlichen Schweröl. Um dieselbe Leistung pro Kilogramm verbrauchten Treibstoff zu erhalten, muss man mit einem Skalierungsfaktor arbeiten. Diesen erhält man durch Division des Energiegehalts von Schweröl (40,4 MJ/kg) und jener der Biotreibstoffen (37,3 MJ/kg) und er beträgt 1,083 *(BioClean, 2009)*. Vergleichbarkeit wird damit gewährleistet, indem die Emissionen von Soja– und Palmöl mit einem Faktor von 1,083 multipliziert werden, für Schweröl und MGO entspricht dieser Faktor dem Wert 1.

Tabelle 3.2 – Aus den Messungen von Tabelle 3.1 errechnete Emissionsfaktoren [g/kg Fuel] für BIOCLEAN bei einer Motorenaulastung von 75%.

Emissionsfaktor	CO_2	NO_x	SO_x	CO	HC	PM	SO_4	OC	BC
EI_{HFO}^{BioC} [g/kg Fuel]	3191	72,05	43,10	0,893	0,390	5,739	2,731	0,606	0,047
EI_{Palm}^{BioC} [g/kg Fuel]	2836	62,55	0,013	0,653	0,161	0,835	0,009	0,774	0,007
EI_{Soja}^{BioC} [g/kg Fuel]	2860	66,26	1,987	0,605	0,130	0,553	0,009	0,462	n.v.
EI_{MGO}^{BioC} [g/kg Fuel]	3195	73,25	2,000	0,850	1,500	0,380	0,025	0,290	0,000

3.1.2 Berechnung der globalen CO_2–Emissionen der Schifffahrt

Für die Berechnung der Emissionsfaktoren von CO_2 werden nun die Emissionsfaktoren der IMO–GHG– Studie für HFO (Schweröl; engl. **H**eavy **F**uel **O**il) und MGO benötigt. Zusätzlich sind die Anteile an MGO bzw. HFO im Treibstoff für die zugehörige Schiffsklasse sowie die Emissionsfaktoren für BIOCLEAN relevant.

Die jeweiligen Werte werden nun in folgende Gleichung eingesetzt:

$$EI_i = A_{HFO}\, EI_{HFO}^{IMO}\, \frac{EI_i^{BioC}}{EI_{HFO}^{BioC}}\, f_i + A_{MGO}\, EI_{MGO}^{IMO} \tag{3.1}$$

Mit i= Palmöl, Sojaöl, MGO. EI entspricht den Emissionsfaktoren, A_{HFO} bzw. A_{MGO} dem prozentualen Anteil an HFO/MGO im Treibstoff.

Der Referenzwert wird für die jeweiligen Klassen gebildet mit:

$$EI_{Ref} = A_{HFO} EI_{HFO}^{IMO} + A_{MGO} EI_{MGO}^{IMO} \tag{3.2}$$

Die eingesetzten Werte und errechneten Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Tabelle 3.3 – Emissionsfaktoren der IMO–GHG–Studie [g/kg Fuel] und Anteile [%] sowie daraus berechnete Emissionsfaktoren EI_{Ref}, EI_{Soja}, EI_{Palm} und EI_{MGO} [g/kg Fuel] für die neun Schiffsklassen (Container (C), Tanker (T), General Cargo (GC), Bulk Carrier (BC), Reefer (RE), RoRo (RR), Passanger (P), Fishing (F), Miscellaneous (M)).

Schiffsklasse	C	T	GC	BC	RE	RR	P	F	M
A_{HFO} [%]	0,98	0,96	0,94	0,93	0,86	0,87	0,69	0,37	0,37
A_{MGO} [%]	0,02	0,04	0,06	0,07	0,14	0,13	0,31	0,63	0,63
$EI_{IMO,HFO}$ [g/kg Fuel]	3090	3020	3020	3020	3020	3020	3020	3020	3020
$EI_{IMO,MGO}$ [g/kg Fuel]	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090	3090
EI_{Ref} [g/kg Fuel]	3090	3020	3020	3020	3030	3030	3040	3060	3060
EI_{Soja} [g/kg Fuel]	3000	2940	2940	2940	2950	2950	2980	3030	3030
EI_{Palm} [g/kg Fuel]	2980	2910	2920	2920	2930	2930	2960	3020	3020
EI_{MGO} [g/kg Fuel]	3090	3030	3030	3030	3030	3030	3040	3060	3060

In BIOCLEAN soll zudem der Produktionsweg der Treibstoffe und dessen Auswirkung auf die CO_2–Emissionen mitberücksichtigt werden.

Hierfür stehen Ergebnisse einer Studie des Öko–Institut e.V. zur Verfügung. Betrachtet werden hier Schweröl, MGO (entspricht Diesel), sowie verschiedene Anbauwege von Palm– und Sojaöl. Palmöl kann einerseits auf bereits vorhandenen Ackerflächen, andereseits auf neu angelegten Plantagen im tropischen Regenwald angebaut werden. Für Sojaöl wird der Anbau auf Ackerfläche, in Graslandschaften und Savannen unterschieden (siehe Abschnitt 4.1.2.1).

Hieraus ergeben sich die Emissionsfaktoren wie folgt:

$$EI_i^{BioC} = E_{CO_2,i}\ \rho_E \tag{3.3}$$

$$EI_i^{BioC} = E_{CO_{2-Aqu},i}\ \rho_E \tag{3.4}$$

i bezeichnet die Treibstoffart, $E_{CO_2,i}$ den CO_2–Emissionswert, $E_{CO_{2-Aqu},i}$ das CO_2–Äquvalent und ρ_E die Energiedichte der Treibstoffe (37,3 10^{-3} GJ/kg für Palmöl und Sojaöl, 40,4 10^{-3} GJ/kg für Schweröl und MGO).

Die neuen Emissionsfaktoren wurden anstelle der Faktoren, die HFO betreffen, in das IMO–Modell für die Emissionsberechnung eingesetzt. Durch Multiplikation der Emissionsfaktoren mit dem verbrauchten Treibstoff und anschließender Summation über alle Schiffskategorien, erhält man die Gesamtemission für CO_2 im Jahr 2008.

3.2 Bestimmung der CO_2–Klimawirkung mit Hilfe eines Klima–Response–Modells

Globale Klimamodelle werden eingesetzt um mögliche Klimaänderungen vorherzusagen. Sie basieren auf mathematischen Modellen, die in Computercodes übersetzt werden. Die Ausführung erfolgt auf den leistungsstärksten Rechnern der Welt. Im Rahmen von Klimasimulationen werden das Verständnis klimarelevanter Prozesse und Beobachtungen in eine Projektion möglicher zukünftiger Änderungen des Klimas zusammengeführt. Aufgrund der heutigen Rechenleistungen sind mittlerweile räumliche Auflösungen mit einer Maschenbreite um ca. 100 km und die Verarbeitung einer Vielzahl an physikalischen Prozessen sowie ein Vergleich mit Beobachtungen möglich. Heutige Modelle weisen daher eine enorme Stärke auf, sind aber noch immer mit Einschränkungen verbunden (IPCC, 2007).

Die vier Hauptkomponenten eines Klimamodells sind Atmosphäre, Ozean, Land- und Eismasse. Bei der Berechnung können Zeitskalen von einigen Stunden bis zu Jahrtausenden, sowie räumliche Erstreckung von Zentimetern bis tausenden von Kilometern eine Rolle spielen. Atmosphärenmodelle und Ozeanmodelle sind als General Circulation Modells (GCMs) bekannt. Klimamodelle dieser Art sind extrem komplex, rechenintensiv und können Laufzeiten in der Größenordnung von Monaten mit sich bringen.

Das in dieser Arbeit verwendete Klimamodell ist eine vereinfachte, linearisierte Form. Vereinfachte Response-Modelle sind so parametrisiert, dass sie die Hauptcharakteristik der Ergebnisse der GCMs zeigen.

3.2.1 Grundlagen des Klima-Response-Modells

Das in dieser Arbeit verwendete Klima–Response–Modell wurde von der Manchester Metropolitan University (MMU) entwickelt und zu Verfügung gestellt. Das Modell wird in exakt der gleichen Konfiguration und Einstellung eingesetzt wie es in der IMO–GHG–Studie verwendet wurde und für die Berechnungen angepasst. Es wurde ursprünglich für den Flugverkehr entwickelt. Um es für die gesamte Breite an Emissionen in der Schifffahrt nutzen zu können, wurden von der MMU einige Änderungen und Anpassungen vorgenommen (Lee et al., 2007). Für CO_2 erhält man ein vereinfachtes Kohlenstoff–Kreislauf–Modell, das den Beitrag an CO_2–Emissionen zur CO_2–Konzentration und den resultierenden Strahlungsantrieb berechnet. Der Strahlungsantrieb wurde anschließend verwendet, um die mittlere globale Änderung der Temperatur zu bestimmen.

Die folgenden Berechnungen beziehen sich auf CO_2, da sich die Untersuchung der Klimawirkung in dieser Arbeit auf CO_2 beschränken. Darüber hinaus bietet das Klima–Response–Modell die Möglichkeit, Strahlungsantrieb und Temperaturänderungen für alle wichtigen Emissionen der Schifffahrt zu berechnen. Für das Modell benötigt man Angaben über die CO_2–Konzentrationserhöhung durch die Schifffahrt in der Atmosphäre, Informationen über die vorhandene Grundkonzentration an CO_2, sowie die Emissionswerte.

Die Änderung der CO_2–Konzentration C(t) in der Atmosphäre, die sich aufgrund der emittierten Menge an CO_2–Emissionen E(t) ergibt, wurde nach (Hasselmann et al., 1997) berechnet.

$$\Delta C(t) = \int_{t_0}^{t} G_C(t-t')\,E(t')\,dt' \qquad mit \;\; G_C(t) = \sum_{j=o}^{5} \alpha_j \exp\frac{-t}{\tau_j} \tag{3.5}$$

Dabei ist τ_j die mit e abnehmende Zeit der Mode j und $\alpha_j \cdot \tau_j$ die Gleichgewichtsänderung einer Mode j für eine einheitliche Störung. Die Koeffizienten α_j und τ_j zeigt Tabelle 3.4.

Tabelle 3.4 – Koeffizienten der Impulsfunktion G_C für CO_2–Konzentration (nach Buhaug et al. (2009) Tabelle 8.1)

Mode j	1	2	3	4	5
α_j [$ppbv/Tg(C)$]	0,067	0,1135	0,152	0,097	0,041
τ_j [years]	∞	313,8	79,8	18,8	1,7

Der Strahlungsantrieb von CO_2 ist konzentrationsabhängig. Daher ist es entscheidend, den Grundstrahlungsantrieb zu kennen. Um den Strahlungsantrieb für die Schifffahrt zu ermitteln, muss die Grundkonzentration an CO_2, sowie jene ohne den Einfluss der Schifffahrt gegeben sein. Letztere erhält man durch Subtraktion der CO_2–Konzentration aus der Schifffahrt von der CO_2–Grundkonzentration.

Somit lässt sich der Strahlungsantrieb wie folgt berechnen:

$$\Delta RF_{Schifffahrt} = \Delta RF(C_{Grundkonzentration}) - \Delta RF(C_{Grundkonzentration} - C_{Schifffahrt}) \tag{3.6}$$

Die Werte für die Grundkonzentration stammen aus historischen Daten von 1800 bis 1995. Im weiteren Verlauf bis 2100 wurden die Ergebnisse eines IPCC (2000) Szenarios hergenommen. Dem IPCC folgend, kann der Strahlungsantrieb von CO_2 aus dem Logarithmus der Konzentration berechnet werden. Hierfür wurde der Ausdruck nach (Ramaswamy et al., 2001) hergenommen, der einen Koeffizienten α=5,35 vorsieht.

$$RF(t) = \alpha[\frac{ln(C(t))}{C(0)}] \tag{3.7}$$

Die Klima–Response–Funktion ist ein Faltungsintegral, welches kleine Störungen in einem System (Klima) in einer linear–additiven Weise wiedergibt. Die Änderung einer Klimavariable F zu einer Zeit t aufgrund einer Störung F(t) ist:

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^{t} G_\Phi(t-t')\,F(t')\,dt' \tag{3.8}$$

$G_\Phi(t)$ ist die Impuls– oder Greenfunktion, welche die Reaktion des Systems auf eine Störung zur Zeit t=0 beschreibt. Die Antriebe F(t') und $\Phi(t)$ sind Störungen bezüglich eines Gleichgewichtszustandes des Systems.

Die Formulierung von Sausen und Schumann (2000) wurde durch die Wirksamkeit (englisch efficacy) r_i erweitert

$$\Delta T_i(t) = r_i \, \lambda_{CO_2} \int_{t_0}^{t'} G_T(t-t') \, RF_i(t') \, dt' \qquad G_T(t) = \frac{1}{\tau} \exp(\frac{-t}{\tau}) \tag{3.9}$$

Mit der Temperaturreaktion [K] Δ T_i auf eine Störung i, der Wirksamkeit r_i, dem Klimasensitivitätsparamter λ_{CO_2}=0,64 K/Wm^2, dem Strahlungsantrieb RF $[K/Wm^2]$ und der Lebenszeit τ=37,4 years (Buhaug et al., 2009).

3.2.2 Szenarien für die Zukunft

Die Klimaänderung durch den Einsatz von Biotreibstoffen wird in dieser Arbeit für das Jahr 2008, 2020 und 2050 beurteilt. Es wird angenommen, dass der Schweröl–Anteil der CO_2–Emissionen in 2008 komplett durch Biotreibstoffe ersetzt wird und die CO_2–Emissionen in der Zukunft prozentual dem Anstieg der CO_2–Szenarien der IMO–GHG–Studie folgen. Die Szenarien der IMO–GHG–Studie basieren hinsichtlich der globalen Entwicklung der GDPs auf den Szenarien des IPCC (2000). Die Szenarien spiegeln wider, wie die Zukunft aussehen könnte und machen keine definitiven Vorhersagen. Die Schifffahrt wird bis zum Jahr 2050 von drei Schlüsselparametern beeinflusst. Diese sind die Wirtschaft, die Transporteffizienz sowie die Energie.

Im IPCC (2000) werden vier Szenarienfamilien verwendet, die mit den Abkürzungen A1, A2, B1 und B2 bedacht sind. Die sich daraus ergebenden CO_2–Szenarien sind in Abbildung 3.2 zu links dargestellt.

Szenario A1 gilt für eine Zukunft, die durch schnelles Wirtschaftswachstum gekennzeichnet ist. Die Weltbevölkerung erreicht ein Maximum in der Mitte des 21. Jahrhunderts und nimmt danach wieder ab. Neue und effiziente Technologien werden schnell eingeführt. Hauptthemen sind der Rückgang regionaler Differenzen des Pro-Kopf-Einkommens, das Zusammenwachsen von Wirtschaft und Kultur sowie Leistungssteigerungen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Menschen nach Wohlstand streben und kaum Rücksicht auf ihre Umwelt nehmen.

Szenario A2 beschreibt eine unheterogene Welt und ist ebenfalls durch ein steigendes Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum gekennzeichnet. Dieses erfolgt jedoch langsamer und ungleichmäßiger als in Szenario A1.

Szenario B1 repräsentiert eine globalisierte Welt. Die Weltbevölkerung entwickelt sich entsprechend Szenario A1, die Wirtschaft hingegen erfährt eine rasche Änderung in eine Service- und Informationswirtschaft. Dies geht mit einem Rückgang an benötigten Produktionsmitteln und Rohstoffen einher. Sauberer und resourcenfreundliche Technologien werden eingeführt.

Szenario B2 zeigt eine Welt, in welcher der Schwerpunkt auf lokalen wirtschaftlichen, sozialen und umwelterhaltenden Lösungen liegt. Sie ist gekennzeichnet durch ein anhaltendes Bevölkerungswachstum, wenn auch langsamer als in A2 und einer mittleren wirtschaftlichen Entwicklung.

Das Szenario A1 wird zusätzlich noch in Unterszenarien unterteilt:
A1FI: Zukünftige Energie – fossillastig
A1T: technologisch fortgeschritten und überwiegende alternative Energieträger
A1B: gleichmäßig verteilte Energiequellen

Die Szenarien sind von verschiedenen Variablen abhängig, die in die Kategorien Wirtschaft, Transporteffizienz und Energie eingeteilt werden. Die Kategorien mit den zugehörigen Variablen sowie deren weitere Abhängigkeiten sind in Tablle 3.5 zusammengefasst.

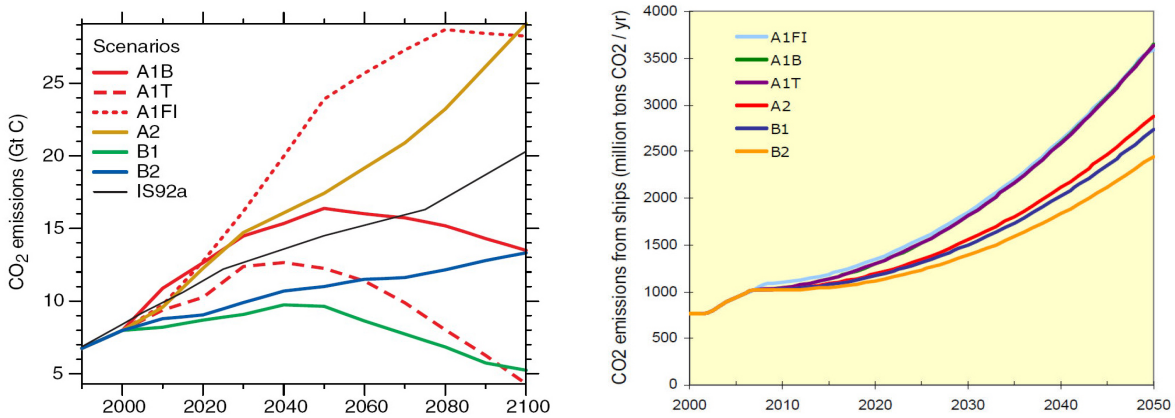

Abbildung 3.2 – Anthropogene CO_2-Emissionen für die verschiedenen Szenarien des IPCC (A1F1, A1T, A1B, A2, B1 und B2) links (Quelle: IPCC, 2001) und CO_2–Emissionsverhalten für die verschiedenen Szenarien des Klima–Response–Modells rechts (Quelle: Buhaug et al., 2009).

Tabelle 3.5 – [Bedeutsame Variablen für die verwendeten Szenarien, sowie weitere Abhängigkeiten]Bedeutsame Variablen für die verwendeten Szenarien, sowie weitere Abhängigkeiten, der jeweiligen Überkategorie zugeordnet (Quelle: Buhaug et al. (2009)).

Kategorie	Variable	weitere Abhängigkeiten
Wirtschaft	Wunsch/Nachfrage nach Schiffahrt als Transportmittel	u.a. Bevölkerung, globales und regionales Wirtschaftswachstum
Transporteffizienz	J/Tonnen–Meile, abhängig von Flottenzusammenstellung, Technologien und Arbeitsablauf	Bauart des Schiffes, Fortschritte in Antrieb, Geschwindigkeit, Maßnahmen bezüglich der Treibhausgasreduzierung
Energie	Kohlenstoffanteil des Treibstoffs (C/MJ pro Treibstoff)	Kosten und Verfügbarkeit des Treibstoffs

Die Änderung dieser Variablen beeinflusst verschiedene Schiffskategorien auf unterschiedliche Art und Weise. Daher wurde die Flotte in drei Kategorien eingeteilt:

Küstenschifffahrt:	Schiffe die regional verkehren (kurze Seewege)
Schiffe, die den Ozean befahren:	Größere Schiffe, für interkontinentalen Handel geeignet
Kontainer-Schiffe:	alle Größen

Auf diesen Kategorien basierend, werden Werte für jede Variable unter Berücksichtigung der IPCC–Szenarien berechnet (siehe Abbildung 3.2 rechts) (Buhaug et al., 2009).

3.2.3 Aufbereitung des linearen Klima-Response-Modells für BIOCLEAN

Das Klima–Response–Modell erhält seine Eingabedaten aus mehreren Tabellen. Die für die CO_2–Emissionen relevante Tabelle in ihrer ursprünglichen Form enthält Emissionswerte für die Jahre 1870 bis 2050 für die bereits aufgeführten Szenarien. Die Herkunft dieser Emissionsdaten wurde zu Beginn des Abschnitts geschildert.

Um das Klimamodell für BIOCLEAN zu nutzen, werden die CO_2–Emissionen von 1850–2007 beibehalten und die vorhandenen Eingabewerte in der Zukunft (2008-2050) prozentual angepasst. Der Referenzwert der BIOCLEAN–Emissionsberechnung beträgt 1019 Tg für CO_2. In dem Klima–Modell der IMO wurden jedoch 1046 Tg für das Jahr 2007 verwendet. Daher wurde der Referenzwert von BIOCLEAN für die folgenden Berechnungen ebenfalls durch 1046 Tg ersetzt. Für die Treibstoffe MGO, Palm– und Sojaöl wurden die Daten entsprechend angepasst. Des Weiteren sind die im Modell verwendeten Daten in TgC und nicht in $TgCO_2$ gegeben. Unter Berücksichtigung aller nötigen Rechenschritte, ergibt sich letzendlich folgende Formel zur Berechnung der CO_2–Emissionen in TgC/a:

$$E_x = \frac{1046}{1019}\, E_{CO_2,x}\, \frac{12}{44} \tag{3.10}$$

x steht hierbei für die Treibstoffe: Referenz, MGO, Palmöl und Sojaöl

Mit der im Modell gegebenen CO_2–Emission für das Jahr 2007 von 285 TgC kann der Prozentsatz bestimmt werden, mit welchem die vorhandenen Daten modifiziert werden.

$$P = \frac{E_x}{285} \tag{3.11}$$

Die erhaltenen Werte aus obigen Berechnungen sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst.

Tabelle 3.6 – Globale CO_2–Emissionen $[TgCO_2/a]$ und $[TgC/a]$ sowie die prozentuale Änderung bezüglich der CO_2–Emissionen von 285 TgC im Jahr 2007 für die Emissionsberechnung des Verbrennungsprozesses.

	globale CO_2–Emissionen $[TgCO_2/a]$	globale CO_2–Emissionen $[TgC/a]$	prozentuale Änderung
Referenz	1019	285	1,000
MGO	1020	285	1,001
Palmöl	997	279	0,978
Sojaöl	1001	280	0,982

Mit Gleichung 3.11 erfolgte die Berechung der Emissionen in TgC der Ökostudie, die in Tabelle 3.7 zu sehen sind.

Tabelle 3.7 – Globale CO_2–Emissionen $[TgCO_2/a]$ und $[TgC/a]$ sowie die prozentuale Änderung bezüglich der CO_2–Emissionen von 285 TgC im Jahr 2007 aus der Studie des Öko–Instituts e.V..

	Treibstoff	globale CO_2–Emissionen $[TgCO_2/a]$	globale CO_2–Emissionen $[TgC/a]$	prozentuale Änderung
CO_2	Schweröl	1244	339	1,189
	MGO	1325	361	1,267
	Palmöl	674	183	0,644
	Palmöl (trop. Wald)	1622	442	1,551
	Sojaöl (Acker)	556	151	0,532
	Sojaöl (Gras)	810	220	0,774
	Sojaöl (Savanne)	1950	531	1,864
CO_2-Äqu.	Schweröl	1261	343	1,206
	MGO	1342	366	1,283
	Palmöl	971	264	0,928
	Palmöl (trop. Wald)	1781	485	1,703
	Sojaöl (Acker)	573	156	0,548
	Sojaöl (Gras)	826	255	0,790
	Sojaöl (Savanne)	1969	537	1,882

Für jedes Szenario und für jeden Treibstoff werden nun die CO_2–Emissionen nach dem oben erhaltenen Prozentsatz angepasst. Das Spreadsheet enthält somit die ursprünglichen IMO–Werte, die Angaben für den BIOCLEAN–Referenzlauf (diese entsprechen den IMO–Werten), sowie die Ausgangsdaten für die Treibstoffe MGO, Palmöl und Sojaöl.

Bevor diese in das Modell übertragen werden können, muss die Eingabe–Tabelle um die neuen Szenarien erweitert werden. Ursprünglich waren sechs Szenarien zu finden. Es werden nun jeweils sechs Szenarien für MGO, Palmöl und Sojaöl ergänzt. Erst jetzt können die im Excel–File ermittelten Daten in die Modell–Eingabe–Tabelle kopiert werden. Ist dies geschehen, ist das Modell für BIOCLEAN einsatzbereit.

Nach Aufruf des Modells erscheint eine Eingabeaufforderung. Hier kann die Art der Störung (hier CO_2), das gewünschte Szenario und die entsprechende Hintergrundkonzentration eingestellt werden. Ebenso kann der für die Berechnung favorisierte Zeitraum (zwischen 1870 und 2050) angegeben werden. Mit den vorgegebenen Klimasensitivitätsparameter λ = 0,64 K/Wm^2 und der Lebenszeit τ =37,4 y startet anschließend die Berechnung.

Man erhält als Ausgabe fünf Spalten, die die Jahreszahl, den Emissionswert, die zugehörige Konzentration des Gases, sowie den Strahlungsantrieb und die Temperaturänderung zeigen. Diese werden in Kapitel 4 diskutiert.

3.3 Berechnung der nicht–CO_2–Emissionen

3.3.1 Berechnung der weiteren Emissionen

Für die weiteren in BIOCLEAN gemessenen Emissionen (NO_x, SO_x, HC, PM, CO, SO_4, OC und BC) erfolgt die Berechnung nahezu analog. Jedoch standen hierfür keine Emissionsfaktoren aus der IMO–Studie zur Verfügung. Daher mussten Referenzemissionsfaktoren neu bestimmt werden.

Für HFO wird der Referenz-Emissionsfaktor EI_{HFO}^{Ref} mit folgender Gleichung berechnet:

$$EI_{HFO}^{Ref} = \frac{EI^{Paxian/Lack}}{A_{HFO} + A_{MGO}\frac{EI_{MGO}^{BioC}}{EI_{HFO}^{BioC}}} \tag{3.12}$$

Für MGO lautet die Gleichung zur Bestimmung von $EI_{Ref,MGO}$:

$$EI_{MGO}^{Ref} = \frac{EI^{Paxian/Lack}}{A_{HFO}\frac{EI_{HFO}^{BioC}}{EI_{MGO}^{BioC}} + A_{MGO}} \tag{3.13}$$

Als Eingangsdaten dienten die aus den Messerwerten und dem Umrechenfaktor von BIOCLEAN ermittelten Emissionsfaktoren (Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3) sowie Emissionsfaktoren aus Paxian et al. (2009). Diese wurden ursprünglich im SeaKLIM Algorithmus zur Emissionsberechnung verwendet (siehe Tabelle 3.8 und Abschnitt 3.3).

Zudem mussten einige Approximationen für bestimmte Emissionsarten gemacht werden. So wurden bei der Bestimmung der Emissionsfaktoren für NO_x, für die Schiffsklassen Fishing, Passenger, RoRo und Miscellaneous, die Faktoren aus Paxian et al. (2009) beibehalten und nicht die aus BIOCLEAN berechneten Referenzfaktoren benutzt. Jene aus Paxian et al. (2009) stimmen mit vorangegangen Studien besser überein und weisen geringere Abweichungen als die aus BIOCLEAN auf. Die Emissionsarten SO_4, OC und BC waren ursprünglich nicht im SeaKLIM Algorithmus vorgesehen. Daher standen auch keine Daten aus Paxian et al. (2009) zur Verfügung. Anstelle dessen wurden die Werte für die Schiffsklassen Tanker, Container, Bulk Carrier und Passanger aus Lack et al.

(2009) entnommen. Für alle anderen Klassen wurden sie, den Änderungen von NO_x entsprechend, genähert. Für BC waren keine Emissionsfaktoren bezüglich MGO und Sojaöl in den BIOCLEAN–Messreihen vorhanden. Um zumindest eine Teilberechnung zu ermöglichen, wurde der HFO–Anteil auch für MGO verwendet. Sojaöl wurde nicht ersetzt und der Emissionswert bleibt daher Null.

Tabelle 3.8 – Ursprüngliche Emissionsfaktoren aus (Paxian et al., 2009) bzw. (Lack et al., 2009), die daraus berechneten Referenzfaktoren EI_{HFO}^{Ref} und EI_{MGO}^{Ref}, sowie die Emissionsfaktoren EI_{Ref}, EI_{Soja}, EI_{Palm} und EI_{MGO} [g/kg Fuel] für die neun Schiffsklassen (Container (C), Tanker (T), General Cargo (GC), Bulk Carrier (BC), Reefer (RE), RoRo (RR), Passanger (P), Fishing (F), Miscellaneous (M))

Klasse		C	T	GC	BC	RE	RR	P	F	M
NO_x	EI^{Paxian} [g/kg Fuel]	74,00	70,00	72,00	83,00	50,00	50,00	72,00	50,00	50,00
	EI_{HFO}^{Ref} [g/kg Fuel]	73,91	69,95	71,93	82,97	49,48	49,74	71,83	49,89	49,48
	EI_{MGO}^{Ref} [g/kg Fuel]	75,14	71,12	73,13	84,35	50,3	50,57	73,03	50,72	50,30
	EI_{Ref} [g/kg Fuel]	74,00	70,00	72,00	83,00	50,00	50,00	72,00	50,00	50,00
	EI_{MGO} [g/kg Fuel]	75,14	71,12	73,13	84,35	50,3	50,57	73,03	50,72	50,30
	EI_{Palm} [g/kg Fuel]	69,89	65,99	67,96	78,14	56,50	62,18	68,13	65,40	56,50
	EI_{Soja} [g/kg Fuel]	73,69	69,69	71,69	82,63	57,95	64,91	71,72	68,86	57,95
SO_x	EI^{Paxian} [g/kg Fuel]	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70
	EI_{HFO}^{Ref} [g/kg Fuel]	47,90	46,47	47,41	45,57	111,95	63,46	51,59	51,02	111,95
	EI_{MGO}^{Ref} [g/kg Fuel]	2,23	2,16	2,20	2,12	5,21	2,95	2,40	2,37	5,21
	EI_{Ref} [g/kg Fuel]	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70	44,70
	EI_{MGO} [g/kg Fuel]	2,23	2,16	2,20	2,12	5,21	2,95	2,40	2,37	5,21
	EI_{Palm} [g/kg Fuel]	0,17	0,1	0,15	0,06	3,29	0,93	0,35	0,32	3,29
	EI_{Soja} [g/kg Fuel]	2,38	2,32	2,36	2,28	5,35	3,11	2,56	2,53	5,35
HC	EI^{Paxian} [g/kg Fuel]	6,6	6,6	6,6	6,6	8,0	8,0	6,6	8,0	8,0
	EI_{HFO}^{Ref} [g/kg Fuel]	5,50	5,93	5,64	6,24	2,86	4,25	4,72	5,84	2,86
	EI_{MGO}^{Ref} [g/kg Fuel]	21,17	22,79	21,68	24,02	11,02	16,35	18,15	22,46	11,02
	EI_{Ref} [g/kg Fuel]	6,60	6,60	6,60	6,60	8,00	8,00	6,60	8,00	8,00
	EI_{MGO} [g/kg Fuel]	21,17	22,79	21,68	24,02	11,02	16,35	18,15	22,46	11,02
	EI_{Palm} [g/kg Fuel]	3,77	3,45	3,67	3,22	7,41	6,38	4,36	5,19	7,41
	EI_{Soja} [g/kg Fuel]	3,32	2,96	3,21	2,68	7,32	6,12	4,00	4,75	7,32
PM	EI^{Paxian} [g/kg Fuel]	6,10	5,90	6,10	5,90	6,60	6,60	6,10	6,60	6,60
	EI_{HFO}^{Ref} [g/kg Fuel]	6,53	6,13	6,46	6,01	16,03	9,29	7,02	7,51	16,03
	EI_{MGO}^{Ref} [g/kg Fuel]	0,43	0,41	0,43	0,40	1,06	0,62	0,46	0,50	1,06
	EI_{Ref} [g/kg Fuel]	6,10	5,90	6,10	5,90	6,60	6,60	6,10	6,60	6,60
	EI_{MGO} [g/kg Fuel]	0,43	0,41	0,43	0,40	1,06	0,62	0,46	0,50	1,06
	EI_{Palm} [g/kg Fuel]	0,99	0,94	0,98	0,94	1,60	1,20	1,02	1,09	1,60
	EI_{Soja} [g/kg Fuel]	0,66	0.63	0,66	0,62	1,29	0,86	0,69	0,75	1,29
SO_4	EI^{Lack} [g/kg Fuel]	0,79	1,42	1,11	3,58	0,53	0,53	1,11	0,53	0,53
	EI_{HFO}^{Ref} [g/kg Fuel]	0,85	1,48	1,17	3,65	1,41	0,76	1,28	0,61	1,41
	EI_{MGO}^{Ref} [g/kg Fuel]	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	EI_{Ref} [g/kg Fuel]	0,79	1,42	1,11	3,58	0,53	0,53	1,11	0,53	0,53
	EI_{MGO} [g/kg Fuel]	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	EI_{Palm} [g/kg Fuel]	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
	EI_{Soja} [g/kg Fuel]	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00

Tabelle 3.8 – Ursprüngliche Emissionsfaktoren aus (Paxian et al., 2009) bzw. (Lack et al., 2009), die daraus berechneten Referenzfaktoren EI_{HFO}^{Ref} und EI_{MGO}^{Ref}, sowie die Emissionsfaktoren EI_{Ref}, EI_{Soja}, EI_{Palm} und EI_{MGO} [g/kg Fuel] für die neun Schiffsklassen (Container (C), Tanker (T), General Cargo (GC), Bulk Carrier (BC), Reefer (RE), RoRo (RR), Passanger (P), Fishing (F), Miscellaneous (M))

Klasse		C	T	GC	BC	RE	RR	P	F	M
OC	EI^{Lack} [g/kg Fuel]	1,90	1,42	1,66	2,10	0,75	0,75	1,66	0,75	0,75
	EI_{HFO}^{Ref} [g/kg Fuel]	1,97	1,45	1,71	2,12	1,12	0,89	1,79	0,80	1,12
	EI_{MGO}^{Ref} [g/kg Fuel]	0,94	0,69	0,82	1,02	0,53	0,43	0,86	0,39	0,53
	EI_{Ref} [g/kg Fuel]	1,90	1,42	1,66	2,10	0,75	0,75	1,66	0,75	0,75
	EI_{MGO} [g/kg Fuel]	0,94	0,69	0,82	1,02	0,53	0,43	0,86	0,39	0,53
	EI_{Palm} [g/kg Fuel]	2,60	1,95	2,28	2,90	0,91	0,99	2,25	1,02	0,91
	EI_{Soja} [g/kg Fuel]	1,58	1,18	1,38	1,74	0,68	0,64	1,39	0,63	0,68
BC	EI^{Lack} [g/kg Fuel]	0,38	0,38	0,40	0,80	0,36	0,36	0,40	0,36	0,36
	EI_{HFO}^{Ref} [g/kg Fuel]	0,38	0,38	0,40	0,80	0,36	0,36	0,40	0,36	0,36
	EI_{MGO}^{Ref} [g/kg Fuel]	0,38	0,38	0,40	0,80	0,36	0,36	0,40	0,36	0,36
	EI_{Ref} [g/kg Fuel]	0,38	0,38	0,40	0,80	0,36	0,36	0,40	0,36	0,36
	EI_{MGO} [g/kg Fuel]	0,38	0,38	0,40	0,80	0,36	0,36	0,40	0,36	0,36
	EI_{Palm} [g/kg Fuel]	1,36	1,36	1,43	2,87	1,28	1,29	1,43	1,29	1,29
	EI_{Soja} [g/kg Fuel]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Mit den gewonnenen Refernz–Emissionsfaktoren, die in Tabelle 3.8 zusammengefasst sind, können nun, analog zu CO_2, die Emissionsfaktoren bestimmt werden. EI^{IMO} wird in Gleichung 3.1 nun durch die Referenz–Emissionsfaktoren ersetzt. Somit lautet die Formel:

$$EI_{i,x} = \frac{A_{HFO}\, EI_{HFO}^{Ref}\, EI_{i,x}^{BioC}}{EI_{HFO}^{BioC}\, EI_{HFO}^{BioC}}\, f_i + A_{MGO}\, EI_{MGO}^{Ref} \tag{3.14}$$

i bezeichnet hier die Art des Treibstoffs, j die Art der Emission.

Diese Emissionsfaktoren sind Eingangsdaten für die Emissionsberechnung, die mit dem SeaKLIM Algorithmus erfolgt, der im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

3.3.2 SeaKLIM Algorithmus

Im Gegensatz zu CO_2 ist für nicht–CO_2–Emissionen mit kürzeren Lebenszeiten die globale Verteilung der Emissionen wichtig. In BIOCLEAN ist geplant, die Klimawirkung von nicht–CO_2–Emissionen mittels komplexer Klima–Chemie–Aerosol–Modelle zu bestimmen. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Berechnung der dafür nötigen Emissionsfaktoren. Die globale Verteilung für nicht–CO_2–Emissionen werden in dieser Arbeit mittels des in Paxian et al. (2009) entwickelten SeaKLIM–Algorithmus berechnet. Für eine ausführliche Beschreibung des Algorithmus wird auf Paxian et al. (2009) verwiesen. Dieser Abschnitt fasst die wichtigsten Merkmale des Algorithmus zusammen.

Die Ermittlung des Treibstoffverbrauchs und der Emissionen erfolgt aus den durch den

Algorithmus berechneten kürzesten Routen für jedes Paar der LMIU Start– und Zielhäfen. Diese Häfen sind in der Lloyd's Maritim Intelligence Unit (LMIU), einer Datenbank welche Schiffsbewegungen und Schiffseigenschaften beinhaltet, zusammengefasst. Der SeaKLIM–Algorithmus ist ein Wellenausbreitungsalgorithmus. Von einem Startpunkt aus bewegt sich eine Welle in alle möglichen Richtungen. Dabei werden in jedem Schritt die Distanzen zwischen den Boxen der Wellenfronten und deren direkten Nachbarn (außerhalb der Welle) mit Hilfe der Methode der großen Kreise bestimmt. Die Distanz D ergibt sich aus den geographischen Koordinaten $\varphi_{1,2}$ und $\lambda_{1,2}$ sowie dem Erdradius r=6378,137 km.

$$D = r\ arccos(sin(\varphi_2)\ +\ cos(\varphi_1)\ cos(\lambda_2\ -\ \lambda_1))$$

Im Folgenden werden sämtliche Entfernungen D vom jeweiligen Startpunkt bis zur Wellenfront aufsummiert. Wird eine Front von mehreren Seiten gleichzeitig erreicht, wird für die weitere Rechnung die kürzeste Strecke ermittelt und verwendet. Das Propagieren der Welle stoppt, wenn der Zielpunkt erreicht ist. Da jede Gitterbox über eine gespeicherte Information bezüglich der ursprünglichen Richtung der Welle verfügt, kann nun der Weg von Endpunkt zum Ausgangspunkt zurückverfolgt werden und man erhält die gesuchte Gesamtdistanz.

Die von einem Schiff zurückgelegte Route D ist die Ausgangsgröße für die Berechnung des Treibstoffverbrauchs und der Emissionen. Treibstoffverbrauch (FC) wird für Haupt– (engl.: **M**ain **E**ngine, ME) und Hilfsmotoren (engl.: **A**uxiliary **E**ngine, AE), sowie die Hafenaktivität (engl.: Harbour Acitivity) berechnet.

Die dafür benötigten Größen sind:

- Motorenleistung P
- Belastungsfaktor F
- Motorenlaufzeit τ (für Haupt- und Hilfsmotor berechnet aus D/v, mit Distanz D und Geschwindigkeit v)
- spezifischer Treibstoffverbrauch SFOC

Der Treibstoffverbrauch einer jeden Gitterbox j, aufsummiert über alle Schiffsbewegungen k und Schiffstypen i ergibt sich dann wie folgt:

Hauptmotor:

$$FC_M = \sum_{i,k} FC_{M,i,j,k} = \sum_{i,k} P_{M,i,k}\ F_{M,i}\ \frac{D_{j,k}}{v_i}\ SFOC_{M,i}$$

Hilfsmotor:

$$FC_A = \sum_{i,k} FC_{A,i,j,k} = \sum_{i,k} P_{A,i,k}\ F_{A,i}\ \frac{D_{j,k}}{v_i}\ SFOC_A$$

Hafenaktivität:

$$FC_{H,j} = \sum_{i,k} FC_{H,i,j,k} = \sum_{i,k} P_{M,i,k}\ F_{H,M}\ +\ P_{A,i,k}\ F_{H,A}\ \tau_{H,i}\ SFOC_{H,i}$$

Für den Gesamttreibstoffverbrauch werden die Werte einer jeden Gitterbox j aufsummiert.

Aus dem Treibstoffverbrauch lassen sich nun die Emissionen berechnen. Der SeaKLIM Algorithmus ermöglicht es, eine Vielzahl an Emissionen zu bestimmten (CO_2, NO_x, SO_x, CO, etc.). Die Berechnung des Emissionswertes $E_{x,i,j,k}$ erfolgt wie üblich durch Multiplikation des Treibstoffverbrauchs und einem spezifischen Emissionsfaktor EI. Emissionswert:

$$E_{x,i,j,k} = E_{M,x,i,j,k}\ +\ E_{H,x,i,j,k}\ +\ E_{A,x,j,k}$$

x bezeichnet die Art der Emission (z.B.: CO_2), i den Schiffstyp, j die Gitterbox und k Schiffsbewegung

Die Emissionswerte des Hauptmotors und der Hafenaktivität sind dabei für jeden Schiffstyp gegeben, jener des Hilfsmotors nur für die neun Schiffsklassen.

Hieraus ergibt sich mit den Emissionsfaktoren $EI_{M,x,i}$, $EI_{H,x,i}$ sowie $EI_{A,x}$ die Gesamtemission pro Gitterbox:

$$E_{x,j} = \sum_{i,k} E_{x,i,j,k} = \sum_{k} \sum_{i} (FC_{M,i,j,k}\, EI_{M,x,i}\ +\ FC_{H,i,j,k}\, EI_{x,i})\ +\ FC_{A,j,k}\, EI_{A,x}$$

Die Gesamtemission E_x lässt sich anschließend noch durch Addition aller Gitterboxen bestimmen. Die Berechnung der Emissionen für BIOCLEAN erfolgt global.

Vor der eigentlichen Berechnung müssen, der IMO–GHG–Studie ähnlich, die Emissionsfaktoren für den Refernzwert (IMO–GHG–Studie), Soja– und Palmöl sowie MGO im ursprünglichen Input–File des Algorithmus durch die für BIOCLEAN relevanten Werte ersetzt werden. Zur Bestimmung der Emissionsfaktoren wird das gleiche Verfahren verwendet, wie für die IMO–GHG–Studie (siehe Abschnitt 3.1).

Die Rechenwege sowie die eingesetzten Werte sind aus Abschnitt 3.1.1, sowie Tabelle 3.3 zu entnehmen. Zusätzlich wurden im Eingabefile für alle Treibstoffarten die folgenden Variablen durch gemittelte Werte aus der IMO–GHG–Studie ausgetauscht:

– Belastungsfaktor F für Haupt– und Hilfsmotor
– spezifischer Treibstoffverbrauch SFOC des Hauptmotors
– Hilfsmotorleistung P

Die diesen Größen zugehörigen Werte sind in Tabelle 3.9 gezeigt.

Somit erhält man für jede Treibstoffart ein Eingabefile. Zuletzt werden in den beiden

Tabelle 3.9 – Belastungsfaktor F für ME und AE, spezifischer Treibstoffverbrauch SFOC ME, und Hilfsmotorleistung P für die jeweiligen Schiffsklassen (Container (C), Tanker (T), General Cargo (GC), Bulk Carrier (BC), Reefer (RE), RoRo (RR), Passanger (P), Fishing (F), Miscellaneous (M))

Schiffsklasse	C	T	GC	BC	RF	RR	P	F	MI
F_{ME} [%]	65	72	69	69	69	65	68	54	41
F_{AE} [%]	60	50	57	62	60	50	68	70	62
$SFOC_{ME}$ [kg/kWh]	185	201	204	193	205	295	197	218	204
P_{AE} [kW]	6449	2572	1036	1633	1708	3109	2767	568	1140

Programmteilen des SeaKLIM-Algorithmus die Ein– und Ausgabepfade geändert. Anschließend werden vier Läufe gestartet. Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abschnitt 4.1.3 zusammengefasst.

Kapitel 4

Ergebnisse

In den Kapiteln 2 und 3 wurden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen und die Methodik erläutert. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und gewonnene Erkenntnisse dargestellt und analysiert. Die berechneten Emissionen werden präsentiert und für CO_2 hinsichtlich des Einsparpotentials und der Klimawirkung betrachtet (Abschnitt 4.1). In Abschnitt 4.2 werden die Ergebnisse des Klima–Response–Modells vorgestellt. Auf die Ergebnisse der nicht–CO_2–Emissionen wird in Abschnitt 4.1.3 eingegangen.

4.1 Diskussion des Reduktionspotentials

Die in diesem Kapitel errechneten Emissionsfaktoren und globalen Emissionen beziehen sich in Abschnitt 4.1.1 ausschließlich auf die Verbrennungsprozesse, ohne Berücksichtigung des Lebensweges der Treibstoffe. Die Methoden zur Bestimmung der Emissionsfaktoren für die unterschiedlichen Schiffsklassen anhand der BIOCLEAN–Messungen wurden in Abschnitt 3.1.1 beschrieben. Der Lebenszyklus des Herstellens von Biotreibstoffen, Schweröl und Schiffsdiesel (MGO) wird in Abschnitt 4.1.2 genauer betrachtet und stellt den realitätsnahen Fall dar.

4.1.1 Emissionen aus Verbrennungsprozessen

Für die in BIOCLEAN gemessenen Emissionsfaktoren aus Verbrennungsprozessen wurden die CO_2-Emissionsfaktoren für die verschiedenen Schiffsklassen, wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, berechnet. Um die Emissionsfaktoren zu erhalten, wurden die aus den Messungen stammenden Werte mit Hilfe der prozentualen Anteile von HFO und MGO im Treibstoff für die verschiedenen Schiffsklassen berechnet (siehe Tabelle 4.1). Mit dem Modell der IMO–GHG–Studie werden die globalen Emissionswerte bestimmt (siehe Abschnitt 3.1.2). Es ergeben sich damit für den Referenztreibstoff Schweröl, MGO sowie die Biotreibstoffe Palm– und Sojaöl die in Tabelle 4.1 gezeigten Werte der Emissionsfaktoren für die einzelnen Schiffstypen.
Bei einer reinen Betrachtung der Emissionsfaktoren durch den Verbrennungsprozess ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen dem Referenzwert und den alternativen Treibstof-

Tabelle 4.1 – Emissionsfaktoren von CO_2 EI_{CO_2} $[gCO_2/kgFuel]$ aus dem Verbrennungsprozess für die jeweiligen Schiffsklassen (Container (C), Tanker (T), General Cargo (GC), Bulk Carrier (C), Reefer (RE), RoRo (RR), Passanger (P), Fishing (F), Miscellaneous (M)), für den Referenzwert HFO und die alternativen Energieträger sowie der prozentuale Anteil von HFO bzw. MGO im Referenztreibstoff für die jeweilige Schiffsklasse.

	C	T	GC	BC	RE	RR	P	F	M
A_{HFO}	0,98	0,96	0,94	0,93	0,86	0,87	0,69	0,37	0,37
A_{MGO}	0,02	0,04	0,06	0,07	0,14	0,13	0,31	0,63	0,63
Referenz $[gCO_2/kgFuel]$	3090	3020	3020	3020	3030	3030	3040	3060	3060
MGO $[gCO_2/kgFuel]$	3090	3030	3030	3030	3030	3030	3040	3060	3060
Sojaöl $[gCO_2/kgFuel]$	3000	2940	2940	2940	2950	2950	2980	3030	3030
Palmöl $[gCO_2/kgFuel]$	2980	2910	2920	2920	2930	2930	2960	3020	3020

fen nur sehr gering ausfällt. Die Differenz in den Emissionsfaktoren zwischen Palmöl und Schweröl ist mit Werten zwischen 40 und 110 $gCO_2/kgFuel$ am größten. Die Faktoren für MGO zeigen nahezu keine Abweichung zu HFO. Nur für die Schiffsklassen Tanker, General Cargo und Bulk Carrier ist hier ein Unterschied von jeweils 10 $gCO_2/kgFuel$ festzustellen. Der Emissionsfaktor von Sojaöl befindet sich mit Unterschieden von 30 bis 90 $gCO_2/kgFuel$ gegenüber Schweröl im Mittelfeld. Dies lässt darauf schließen, dass sich die reinen CO_2–Emissionswerte aus Verbrennungsprozessen zwischen HFO, MGO und den Biotreibstoffen nicht grundlegend unterscheiden, was aufgrund der Messungen (Tabelle 3.1) zu erwarten ist.

Die errechneten globalen Emissionswerte für die Schifffahrt zeigt Tabelle 4.2. Die Berechnung erfolgte mit Hilfe des IMO-Modells, indem die Emissionsfaktoren des HFO–Anteils durch die neu ermittelten Faktoren aus Tabelle 4.1 ersetzt wurden (siehe Abschnitt 3.1.2).

Tabelle 4.2 – Globale CO_2–Emissionen $[TgCO_2/a]$ aus der Schifffahrt für die Referenz, MGO sowie die alternativen Energieträger und den CO_2-neutralen Fall für das Jahr 2007. In dieser Tabelle sind nur die Verbrennungsprozesse berücksichtigt.

	Referenz $[TgCO_2/a]$	MGO $[TgCO_2/a]$	Palmöl $[TgCO_2/a]$	Sojaöl $[TgCO_2/a]$	CO_2-neutral $[TgCO_2/a]$
CO_2	1019	1020	997	1001	355

Diese Ergebnisse berücksichtigen allerdings nur den reinen Verbrennungsprozess. Bei Biotreibstoffen muss die Entstehungsgeschichte mitberücksichtigt werden (siehe Abschnitt 2.1.2). Das bei der Verbrennung der Biotreibstoffe freigesetzte CO_2 entspricht unter Vernachlässigung des Lebenszyklus, der Menge, die beim Pflanzenwachstum gebunden wurde (CO_2–neutral). Demnach belaufen sich die Netto-Emissionen von Biotreibstoffen in erster Näherung auf Null. In dieser Arbeit wird die Annahme der CO_2–Neutralität von Biotreibstoffen als obere Abschätzung von möglichen CO_2–Reduktionen verwendet. In Tabelle 4.2 und den folgenden Abbildungen ist dies als CO_2–neutraler Fall dargestellt. Da

in BIOCLEAN der gesamte HFO–Anteil des Schweröls durch die alternativen Treibstoffe ersetzt wird, sind die verbliebenen Emissionen von 355 $TgCO_2/a$ auf den MGO–Anteil des Treibstoffs zurückzuführen. Somit wäre eine deutliche Reduzierung des Ausstoßes von CO_2 um 664 $TgCO_2/a$ möglich. Biotreibstoffe sind wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben nicht CO_2–neutral, sondern verursachen zum Beispiel durch Landnutzungsänderungen oder den Einsatz von Düngemitteln CO_2–Emissionen. Dies wird im nächsten Abschnitt bewertet.

4.1.2 Emissionen unter Berücksichtigung des Lebenszyklus

4.1.2.1 Verwendung der Daten der Studie des Öko–Instituts

Um eine realitätsnahe Analyse für den Einsatz von Biotreibstoffen in der Schifffahrt machen zu können, muss der Lebenszyklus der Treibstoffe und die dadurch Erhöhten CO_2-Emissionen berücksichtigt werden (Abschnitt 2.1.2). Im Rahmen von BIOCLEAN wird vom Öko–Institut hierfür eine gesonderte Studie angefertigt. Erste Ergebnisse dieser Studie wurden für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.

Abbildung 4.1 sowie Tabelle 4.3 (Quelle: Öko-Institut (2009)) zeigt das Emissionsverhalten der Treibstoffe unter Berücksichtigung des Lebensweges. Dargestellt sind Treibhausgas–Emissionen in kg/GJ für CO_2 und CO_2–Äquivalent. CO_2–Äquivalente geben an, wie viel eine festgelegte Menge eines Treibhausgases zum Treibhauseffekt beiträgt. Als Vergleichswert dient CO_2. Die CO_2–äquivalenten Emissionen in der Studie des Öko–Instituts beinhalten Treibhausgase, die bei Anbau und Produktion der Treibstoffe entstanden sind, nicht aber andere Emissionen wie NO_x, SO_x oder Partikel aus der Verbrennung.

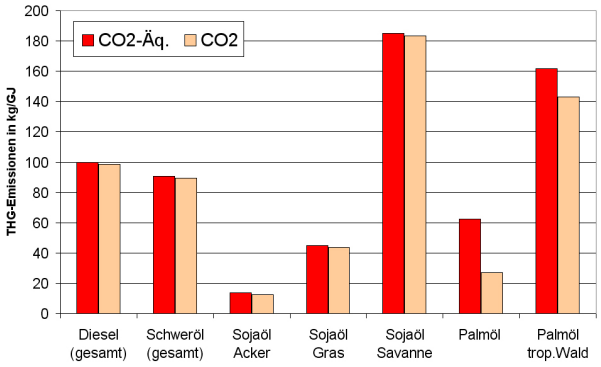

Abbildung 4.1 – CO_2-Emissionsverhalten der Treibstoffe unter Berücksichtigung des Lebensweges in kg/GJ (Quelle: Öko–Institut, 2009.)

Für die CO_2–Emissionen sowie die CO_2–Äquivalente von Diesel (Diesel_{gesamt}) und Schweröl (Schweröl_{gesamt}) ist der Produktionsweg mitberücksichtigt. Für Palm– und Sojaöl wird der gesamte Lebensweg (Anbau, Transport, Produktion, etc.) betrachtet. Daher werden die Treibstoffe gemäß ihrer Anbauart unterschieden. Für Palmöl erfolgt die Differenzierung durch Anbau auf bereits gerodeten Flächen (Palm) und durch Anbau im tropischen Regenwald ($\text{Palmöl}_{trop.Wald}$), welcher Abholzung oder Brandrodung des tropischen Regenwalds erfordert. Letzteres verursacht höhere CO_2–Emissionen als Schweröl oder Diesel. Sojaöl wird in drei Anbauarten unterschieden. Die CO_2–sparsamste Variante ist der Anbau auf bereits vorhandenen Ackerflächen (Sojaöl_{Acker}), der jedoch in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion steht. Auch der Anbau in Graslandschaften (Sojaöl_{Gras}) bietet CO_2–Reduktionsmöglichkeiten. Im

Gegensatz dazu fallen die CO_2–Emissionen für den Anbau in der Savanne (Sojaöl$_{Savanne}$) sogar höher aus als jene des Schweröls unter Berücksichtigung des Produktionsweges.

Tabelle 4.3 – Emissionswerte unter Berücksichtigung des Lebensweges für Schweröl, Diesel, Sojaöl und Palmöl, in reinen CO_2–Emissionen bzw. CO_2-Äquivalenten in kg/GJ (Quelle: Ökoinstitut, 2009).

	CO2-Äq.	CO2
Diesel (gesamt) $[kg/GJ]$	99,8	98,6
Schweröl (gesamt) $[kg/GJ]$	90,6	89,3
Sojaöl Acker $[kg/GJ]$	13,8	12,3
Sojaöl Gras $[kg/GJ]$	45,0	43,5
Sojaöl Savanne $[kg/GJ]$	184,9	183,4
Palmöl $[kg/GJ]$	62,5	26,9
Palmöl trop.Wald $[kg/GJ]$	161,8	143,2

4.1.2.2 Berechnungen der globalen Emissionen unter Berücksichtung des Lebenszyklus

Mit den Angaben bezüglich des Lebensweges wurden die Emissionsfaktoren für die Emissionsberechnung aus den Informationen der Studie des Öko-Instituts neu bestimmt (Abschnitt 3.1.2, Tabelle 4.4). Anschließend wurden die Emissionsfaktoren des HFO–Anteils des Referenztreibstoffes mit den den Lebenszyklus enthaltenden Emissionsfaktoren für Schweröl, Diesel (MGO) und Biotreibstoffe ersetzt. Da auch für Diesel der Produktionsweg mitberücksichtigt werden kann, müssen die Emissionsfaktoren der MGO–Anteile des Referenztreibstoffs durch den Emissionsfaktor von MGO, der den Produktiosnweg berücksichtigt, ebenfalls ersetzt werden.

Tabelle 4.4 – Emissionsfaktoren der reinen CO_2-Emissionen und der CO_2-Äquivalente in $g/kgFuel$

	$EI^{BioC}_{Schwerl}$ $[g/kgFuel]$	EI^{BioC}_{MGO} $[g/kgFuel]$	EI^{BioC}_{Palm} $[g/kgFuel]$	$EI^{BioC}_{Palm_{Trop}}$ $[g/kgFuel]$	$EI^{BioC}_{Soja_{Acker}}$ $[g/kgFuel]$	$EI^{BioC}_{Soja_{Gras}}$ $[g/kgFuel]$	$EI^{BioC}_{Soja_{Savanne}}$ $[g/kgFuel]$
CO_2	3610	3980	1000	5340	0460	1620	6840
CO_2-Äqu.	3660	4030	2330	6040	0510	1680	6900

Die Beschaffung bzw. den Anbau der Rohstoffe, sowie Weiterverarbeitung und Transport berücksichtigt, werden globalen CO_2–Emissionen und CO_2–Äquivalente–Emissionen der Schifffahrt ermittelt. Diese sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.
Bei den gängigen fossilen Treibstoffen Schweröl und Diesel (entspricht MGO) wird nun der Produktionsweg mitberücksichtigt (IMO$_{Life}$). Daher ergibt sich ein Anstieg der Emissionen im Vergleich zu den reinen Verbrennungsprozessen von 244 $TgCO_2/a$ für Schweröl und 105 $TgCO_2/a$ für MGO (Tabelle 4.5, Tabelle 4.2).

Des Weiteren betrachtet man die Biotreibstoffe Sojaöl und Palmöl. Je nach Anbaugebiet

Tabelle 4.5 – Globale CO_2–Emissionen der Schifffahrt unter Berücksichtigung des Lebensweges für Schweröl, Diesel, Sojaöl und Palmöl, in CO_2 bzw. CO_2-Äquivalenten in $TgCO_2/a$.

	IMO_{Life} $[TgCO_2/a]$	$Diesel_{Life}$ $[TgCO_2/a]$	$Palm_{nachh}$ $[TgCO_2/a]$	$Palm_{Trop,Wald}$ $[TgCO_2/a]$	$Soja_{Acker}$ $[TgCO_2/a]$	$Soja_{Gras}$ $[TgCO_2/a]$	$Soja_{Savanne}$ $[TgCO_2/a]$
CO_2	1244	1325	674	1622	556	810	1950
CO_2-Äqu.	1261	1342	971	1781	573	826	1969

ergeben sich unterschiedliche Emissionswerte. Für den Anbau von Sojaöl in der Savanne sowie für Palmöl im tropischen Regenwald ergeben sich nach dem Öko–Institut hohe Emissionswerte, die den fossilen Energieträger weit überschreiten (siehe Tabelle 4.3). Dies bedeutet, dass global ein Anstieg der CO_2–Emissionen bis zu 378 $TgCO_2/a$ (ca. 30%) für Palmöl und bis zu 706 $TgCO_2/a$ (ca. 56%) für Sojaöl gegenüber dem Referenzwert (IMO_{Life}) beobachtet wird. Für den Anbau von Palmöl auf bereits gerodeten Flächen (Palm) sowie den Anbau von Sojaöl auf Ackerland ($Soja_{Acker}$) bzw. in Graslandschaften ($Soja_{Gras}$) ist ein Rückgang von 570 $TgCO_2/a$ (ca. 45%), 688 $TgCO_2/a$ (ca. 55%) sowie 434 $TgCO_2/a$ (ca. 34%) erkennbar.

4.1.3 Nicht–CO_2–Emissionen aus Verbrennungsprozessen

Für die nicht–CO_2–Emissionen wurden wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben die Emissionsfaktoren aus den in BIOCLEAN gemessenen Emissionen analog bestimmt. Mit dem SeaKLIM Algorithmus wurden anschließend die globalen Emissionen ermittelt (siehe Abschnitt 3.3.2). Die berechneten nicht–CO_2–Emissionen sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Tabelle 4.6 – Globale Emissionswerte $[TgCO_2/a]$ für den Referenztreibstoff sowie die alternativen Energieträger und den CO_2–neutralen Fall.

		Referenz $[TgCO_2/a]$	MGO $[TgCO_2/a]$	Palmöl $[TgCO_2/a]$	Sojaöl $[TgCO_2/a]$
NO_x	Gas	13,82	14,04	13,93	14,61
SO_x	Gas	9,16	1,10	0,72	1,11
HC	Gas	1,43	3,92	0,87	0,79
CO	Gas	0,92	0,88	0,75	0,71
PM	Partikel	1,21	0,14	0,25	0,20
SO_4	Partikel	0,29	2,54	9,75	9,75
OC	Partikel	0,25	0,13	0,35	0,21
BC	Partikel	7,88	7,88	0,28	n.v.

Tabelle 4.6 zeigt, dass sich alle nicht–CO_2–Emissionen im Vergleich zu Schweröl reduzieren lassen, mit Ausnahme von SO_4. Durch den Einsatz von Biotreibstoffen, insbesondere Palmöl, ist eine starke Reduktion der globalen SO_x und BC Emissionen zu erwarten.

Angemerkt werden muss, dass bei diesen Berechnungen der Lebenszyklus nicht berücksichtigt ist. Dies spielt allerdings bei nicht–CO_2–Emissionen eine untergeordnete Rolle.

Abbildung 4.2 zeigt die globale Emissionsverteilung am Beispiel von SO_x für den Referenztreibstoff HFO und den Biotreibstoff Palmöl für das Jahr 2008. Im Referenzfall sind Emissionen entlang der Hauptschifffahrtsrouten erkennbar. Durch den weiteren Einsatz von MGO und die Ersetzung von HFO durch Palmöl kann eine starke Reduktion bewirkt werden (Abb. 4.2 rechts).

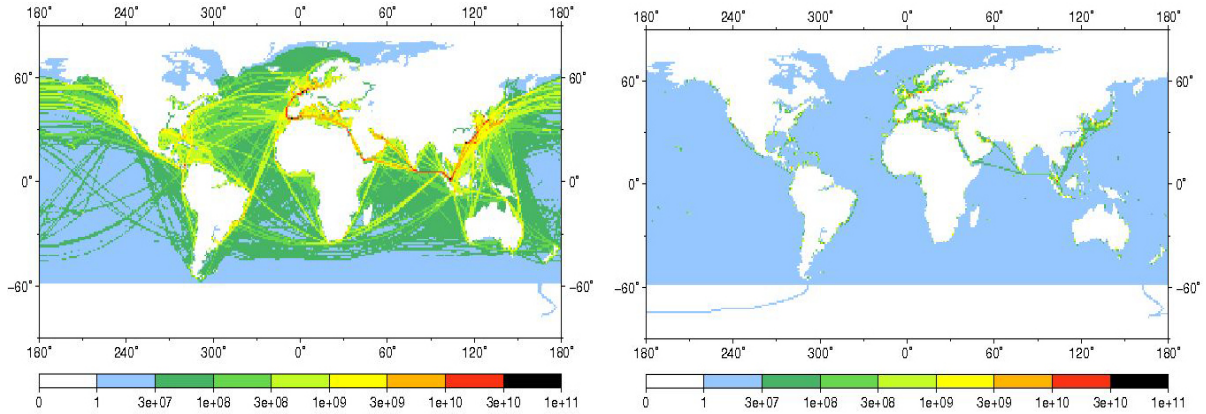

Abbildung 4.2 – Weltweite Verteilung der globalen Emissionen von SO_x für den Einsatz von Schweröl und MGO (links) und Palmöl und MGO (rechts) für das Jahr 2008.

Die Klimawirkung der im Rahmen dieser Arbeit berechneten nicht-CO_2–Emissionen werden in anderen Studien bewertet. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Klimawirkung von CO_2.

4.2 CO_2–Klimawirkung

Da die Berechnung der CO_2–Emissionen auf den Modellen der IMO–GHG–Studie basiert Buhaug et al. (2009), werden im folgenden die Szenarien A1T und B2 betrachtet, da diese die maximale und minimale Entwicklung der CO_2–Emissionen in der IMO-GHG-Studie repräsentieren. Die Berechnungen werden mit dem von der MMU entwickelten und für diese Arbeit bereitgestellten Klima–Response–Modell (Lee et al., 2007) durchgeführt.

In diesem Abschnitt wird die Klimawirkung von Biotreibstoffen im Vergleich zum Einsatz von HFO und MGO im Referenzjahr 2007 aus der IMO–GHG–Studie berechnet. Hierzu wird die Annahme gemacht, dass im Jahr 2008 der gesamte Schwerölanteil durch Biotreibstoff bzw. MGO ersetzt wird. Die Referenzwerte der CO_2–Emissionen werden in 2008 im Klimamodell durch die CO_2–Emissionen der Biotreibstoffe ersetzt. Für die folgenden Jahre (2009-2050) wurden die Referenzwerte der CO_2–Emissionen prozentual angepasst (Abschnitt 3.2.3). Es werden sowohl reine CO_2–Emissionen, wie auch CO_2–Äquivalente betrachtet zur Berechnung der Klimawirkung betrachtet. Die folgende Analyse bezieht sich auf die alternativen Treibstoffe Palmöl und Sojaöl. Die Differenzierung eines Treibstoffes erfolgt nach den Aktivitäten bei dessen Entstehung. Hierzu gehört der Lebensweg (Anbau, Transporte, etc), die direkte Landnutzung beim Anbau so wie indirekte Landnutzungsänderungen durch verdrängte Vornutzung. Die Graphen zeigen den zeitlichen Verlauf der CO_2–Emissionen, der CO_2–Konzentration in der Atmosphäre, des Strahlungsantriebs sowie der durch CO_2–Emissionen zu erwartenden Temperaturänderung von 1870–2050, wie sie mit Hilfe des Klima-Response-Modells (siehe Abschnitt 3.2) berechnet wurden.

Abbildung 4.3 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO_2–Äquivalenten Emissionen, der CO_2–äquivalente Konzentration, des Strahlungsantriebs sowie der Temperaturänderung unter der Annahme, dass im Jahr 2008 der gesamte HFO–Anteil durch Palmöl ersetzt wurde. Die nicht–CO_2–Effekte der Schiffsemissionen (z.B. Ozonprodukion, Abbau von Methan durch NO_x, Wolkeneffekt, etc.) sind in den CO_2–Äquivalenten nicht berücksichtigt. Bis zum Jahr 2007, zeigt die Kurve den Verlauf ohne Mitberücksichtigung der Lebenswege der Treibstoffe aus der IMO–GHG–Studie Buhaug et al. (2009). Daher ist für alle anderen Graphen ein Sprung im Jahr 2008 zu sehen. Im Ersetzungsjahr 2008 erfolgt auch für die Kurve des IMO–Lifecycle–Falls (grün) dieser Anstieg, da hier der Produktionsprozess der Treibstoffe HFO und MGO mitberücksichtigt ist.

Es ist zu erkennen, dass die Emissionen von IMO–Lifecycle (grün) (Referenzwert unter Berücksichtigung des Lebenszyklus) höher ausfallen, als jene der reinen Verbrennungsprozesse des Referenzwertes (rot). Da die Kurven für Palmöl den Lebensweg dieses Biotreibstoffs beinhalten, ist nur die grüne Kurve des IMO–Lifecycle–Falls mit jenen von Palmöl (dunkelblau und türkis) vergleichbar. Die lilafarbene Kurve des CO_2–neutralen Falls, zeigt die Abschätzung der maximalen CO_2–Einsparung unter der idealisierten Annahme, dass Biotreibstoffe CO_2–neutral sind und den HFO–Anteil komplett ersetzten. Der MGO–Anteil bleibt erhalten und verursacht somit die unterschiedliche zukünftige Entwicklung im Szenario A1T und B2.

Palmöl - CO_2–Äquivalente

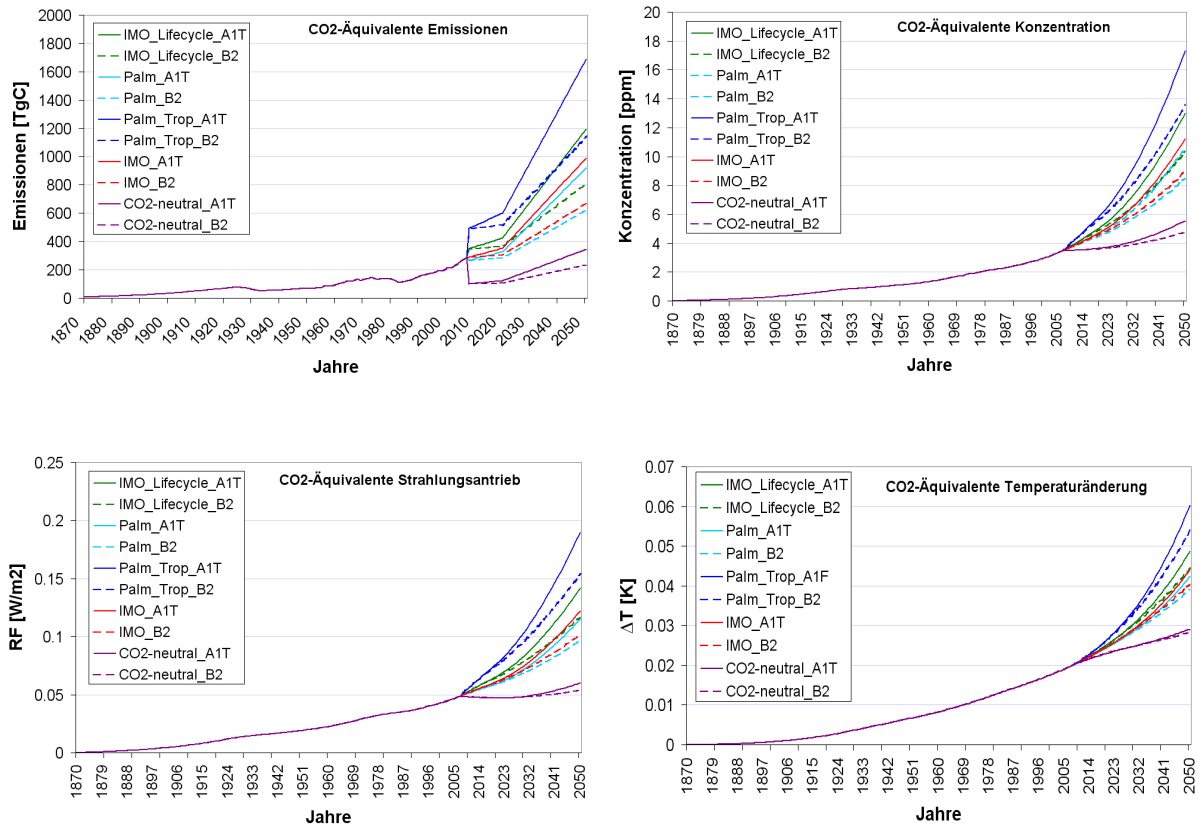

Abbildung 4.3 – CO_2–Äquivalente–Emissionen, Konzentrationen, Strahlungsantrieb und Temperaturänderung von 1870-2050 von Palmöl (blau), IMO (rot), HFO mit Lebenszyklus (grün) sowie der CO_2–neutralen Fall (lila).

Wird Palmöl auf bereits gerodeten Flächen angebaut (türkis), ist eine Reduktion der CO_2–Äquivalenten Emissionen möglich. Erfolgt der Anbau jedoch im tropischen Regenwald, ist der Anstieg der CO_2–Emissionen enorm und übertrifft die CO_2–Äquivalenten Emissionen des Referenzfalls ($IMO_{Lifecycle}$).

Die Entwicklung der CO_2–Konzentration, des Strahlungsantriebs und der Temperaturänderung verlaufen analog. Hierbei zeigt sich, dass die Kurven glatter sind. Im Ersetzungsjahr 2008 ist kein rapider Anstieg, verglichen mit den Emissionen, zu sehen. Für die CO_2–Konzentration ist dies durch die vorhandene Grundkonzentration in der Atmosphäre erklärbar. Strahlungsantrieb und Temperaturänderung ergeben sich aus der Konzentration. Sie sind integrale Größen und berücksichtigen die Historie der CO_2–Äquivalenten Emissionen (Abschnitt 3.2.1). Der Graph der Temperaturentwicklung verläuft am langsamsten und weniger steil, da der Einfluss der Erdoberfläche, insbesondere des Ozeans wirksam wird (Buhaug et al., 2009). Ozeane reagieren nur sehr träge auf Störungen und erwärmen sich zeitlich verzögert. Dies wiederum hat Einfluss auf die mittlere Temperatur der Erde.

Palmöl

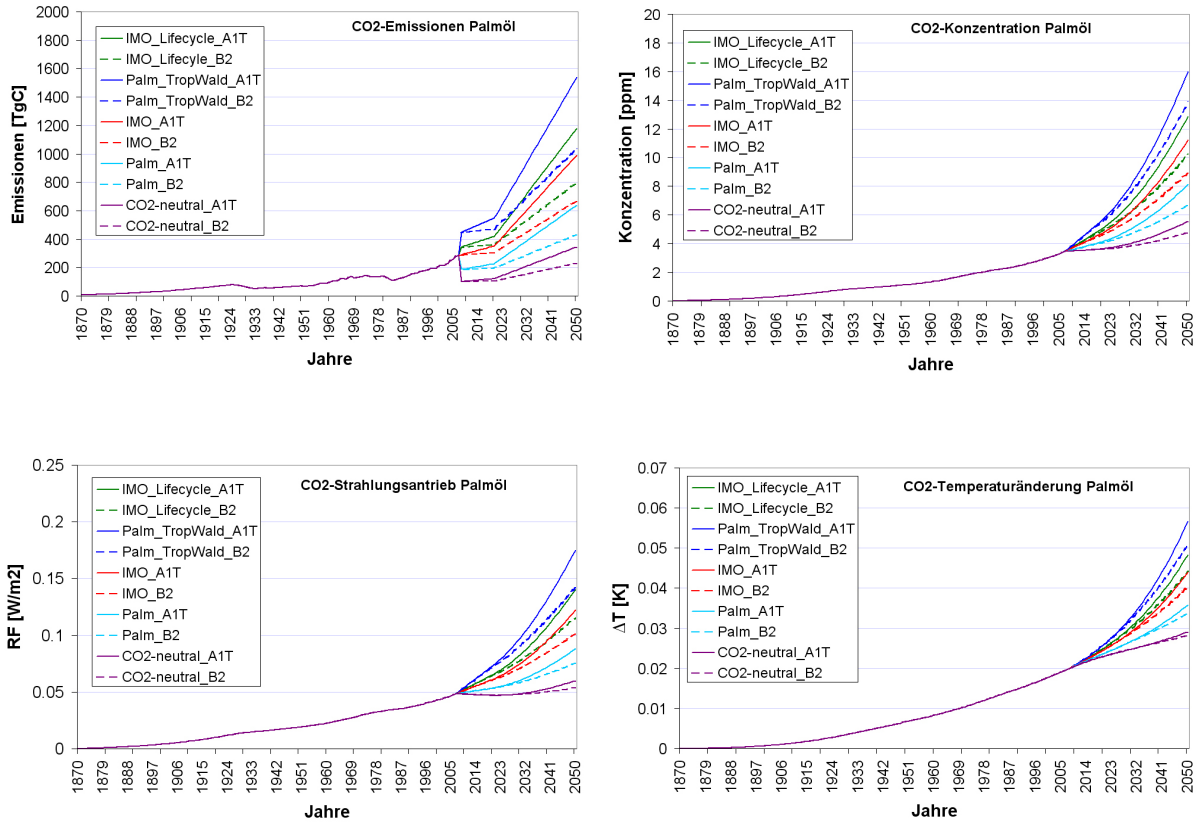

Abbildung 4.4 – Wie Abb. 4.3, jedoch nur CO_2.

Die zeitliche Entwicklung von CO_2 ist ähnlich zu jener der CO_2–Äquivalente (Abb. 4.4). Es fällt jedoch auf, dass sämtliche Effekte schwächer auftreten. Die CO_2–Emissionen berücksichtigen den Beitrag aus dem Anbau- und Produktionsweg durch N_2O, CH_4 oder Düngemittel nicht.

Abbildung 4.5 und 4.6 zeigen analoge Resultate für Sojaöl. Der Emissionsbeitrag und die daraus folgenden Größen sind abhängig von der Herstellung des Treibstoffs. Für den Anbau von Sojabohnen in der Savanne (royalblau) überschreiten die CO_2–Äquivalenten Emissionen jene des IMO–Lifecycle, und zwar stärker, als die CO_2–Äquivalenten Emissionen von Palmöl und dessen Anbau im tropischen Regenwald. Eine deutliche Reduzierung ist beim Anbau auf bereits vorhandenen Ackerfächen (dunkelblau) möglich. Jedoch muss hierbei beachtet werden, dass dadurch Flächen für die Nahrungsmittelproduktion verloren gehen. Der Anbau im Grasland (türkis) bietet ein mittleres Reduktionspotential. Erneut gilt, dass Sojaöl nur mit den Schweröl–Emissionen (grün) unter Berücksichtigung des Lebenszyklus verglichen werden kann. Die lilafarbene Kurve stellt zum Vergleich die idealisierte Annahme der CO_2–Neutraliltät dar.

Für die reinen CO_2–Emissionen von Sojaöl (Abb. 4.6) gilt dasselbe wie bei Palmöl. Auch

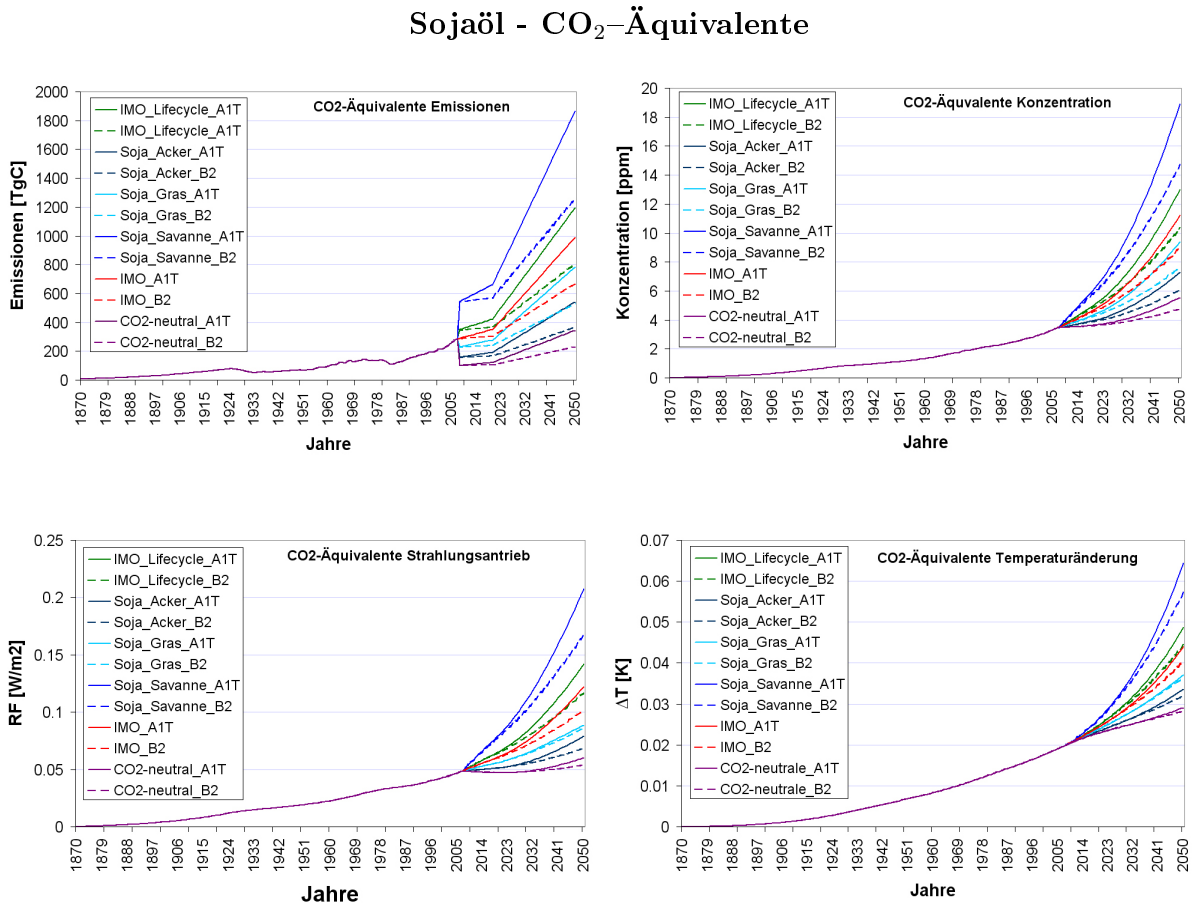

Abbildung 4.5 – CO_2–Äquivalente–Emissionen, Konzentrationen, Strahlungsantrieb und Temperaturänderung von 1870-2050 von Palmöl (blau),IMO (rot), HFO mit Lebenszyklus (grün) sowie der CO_2–neutralen Fall (lila).

sie fallen niedriger aus als die CO_2–Äquivalenten Emissionen, doch die Verläufe der Kurven sind ähnlich denen des CO_2–Äquivalenten Falls.

Abbildung 4.7 zeigt zusammenfassend die absolute Änderung des Strahlungsantriebs und der Temperatur der CO_2–Äquivalente in den Jahren 2008, 2020 und 2050 bezüglich des Referenzwertes ($IMO_{Lifecycle}$). In den im Folgenden angegebenen Werten in eckigen Klammern bezieht sich der erste auf das Szenario A1T, der zweite auf B2. Die linken Abbildungen zeigen die absolute Änderung des Strahlungsantriebs, die Rechten die Änderung in der Temperatur.

In 2008 sind die absolute Änderung (Abb. 4.7) und die relative Änderung (Abb. 4.8) mit maximal [2,6%; 2,6%] des Strahlungsantriebs und [0,1%; 0,1%] in der Temperatur für den Einsatz von Sojaöl angebaut in der Savanne klein. Die geringen Änderungen im Strahlungsantrieb und der Temperatur in 2008 sind darauf zurückzuführen, dass die Ersetzung erst in diesem Jahr erfolgt und die Ergebnisse von den historischen Emissionen (1850-2007) die in allen Szenarien gleich sind, dominiert werden.

Der Ersatz von HFO mit Biotreibstoffen in den Szenarien führt zu großen Änderungen im

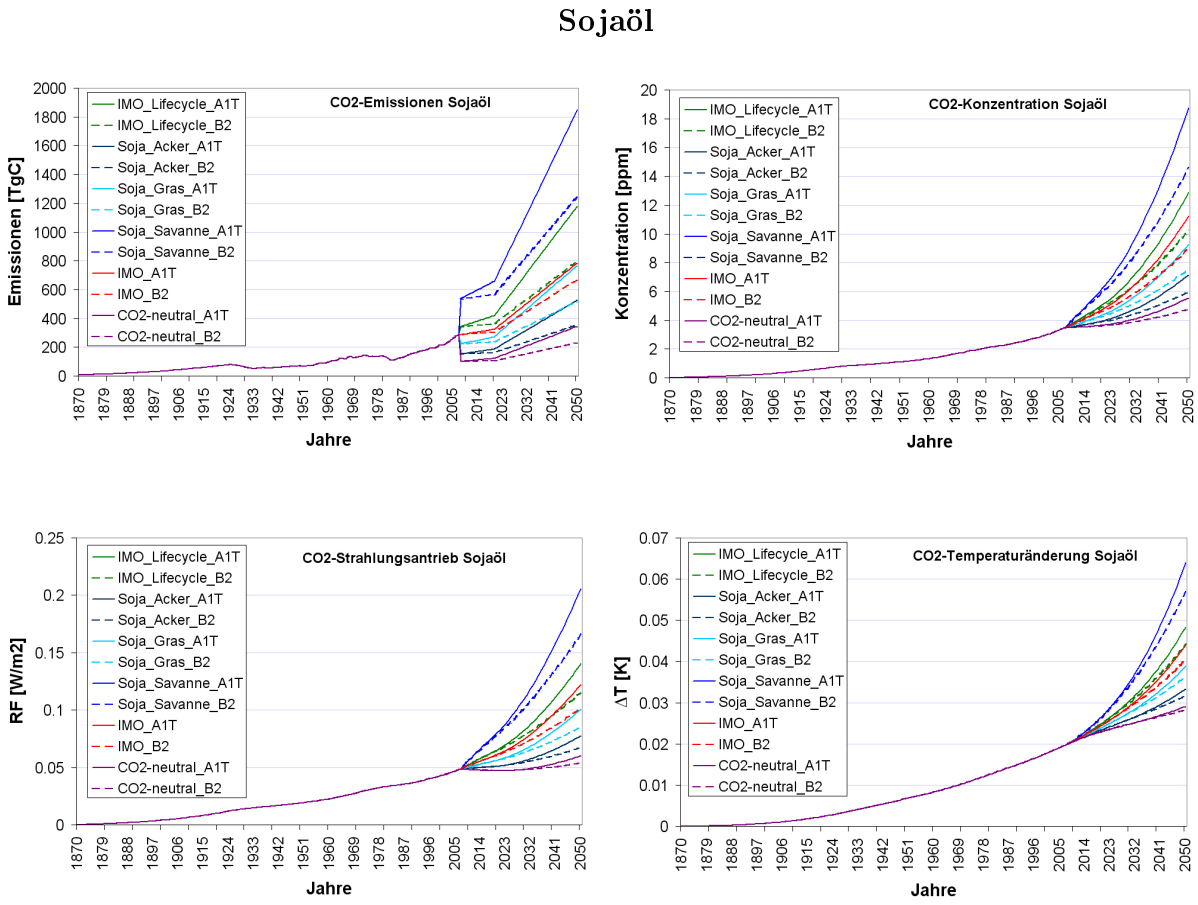

Abbildung 4.6 – Wie Abb. 4.5, jedoch nur CO_2.

Vergleich zum Referenzfall im Strahlungsantrieb und der Temperatur in 2020 und zu einer noch größeren Änderung in 2050. Das größte Reduktionspotential von rund [62 mW/m^2; 48 mW/m^2] des Strahlungsantriebs und ca. [15 mK; 13 mK] der Temperatur im Jahr 2050 ist durch das Ersetzen des Schwerölanteils im Referenztreibstoff duch Sojaöl mit Anbau auf Ackerflächen erreichbar. Der Einfluss auf das Klima ist durch den Einsatz von Palmöl aus dem tropischen Regenwald sowie Sojaöl aus der Savanne deutlich schlechter als der Referenztreibstoff. Im Jahr 2050 beträgt die Zunahme der Temperatur gegenüber der Referenz [11mK; 9mK] für Palmöl und [16 mK; 13 mK] für Sojaöl.

Beim Vergleich der relativen Änderungen des Strahlungsantriebs und der Temperatur der CO_2–Äquivalente bezogen auf den Referenzwert zeigt sich, dass der Anstieg der Temperatur schwächer ist, als der des Strahlungsantriebs (Abbildung 4.8). Der Einfluss des Ozeans auf die Temperaturänderung spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Die Entwicklungen der realtiven Änderungen verlaufen analog zu den Absoluten (Abbildung 4.7). Diese Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Biotreibstoffen in der Schifffahrt sinnvoll ist, wenn der Anbau von Sojöl nicht in der Savanne und von Palmöl nicht im tropischen Regenwald erfolgt.

Absolute Änderung CO_2–Äquivalente

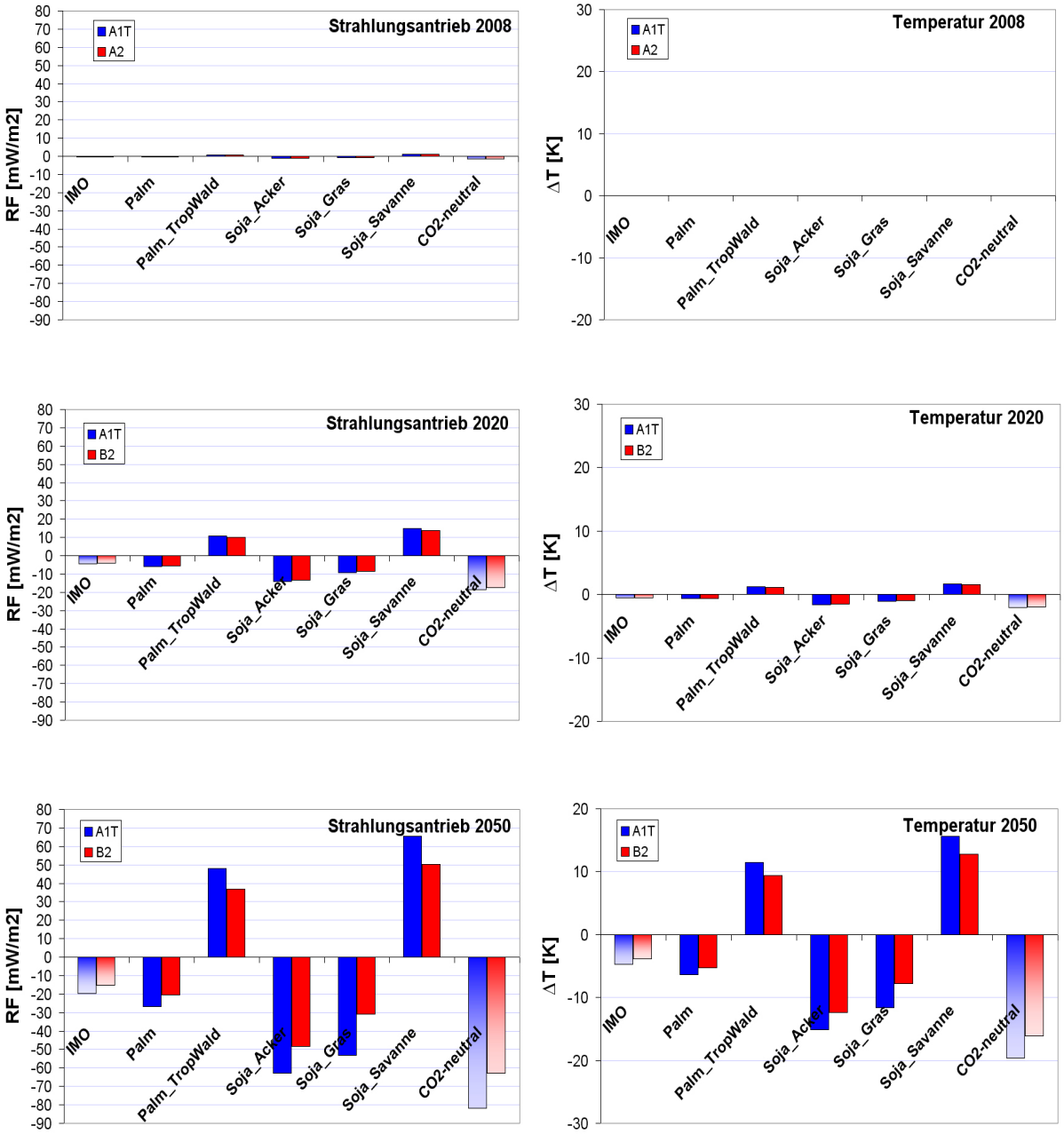

Abbildung 4.7 – Absolute Änderung zu $\mathrm{IMO}_{Lifecycle}$ für die Szenarien A1T und B2 für die Jahre 2008, 2020 und 2050 des Strahlungsantriebs $[mW/m^2]$ und der Temperatur [mK]

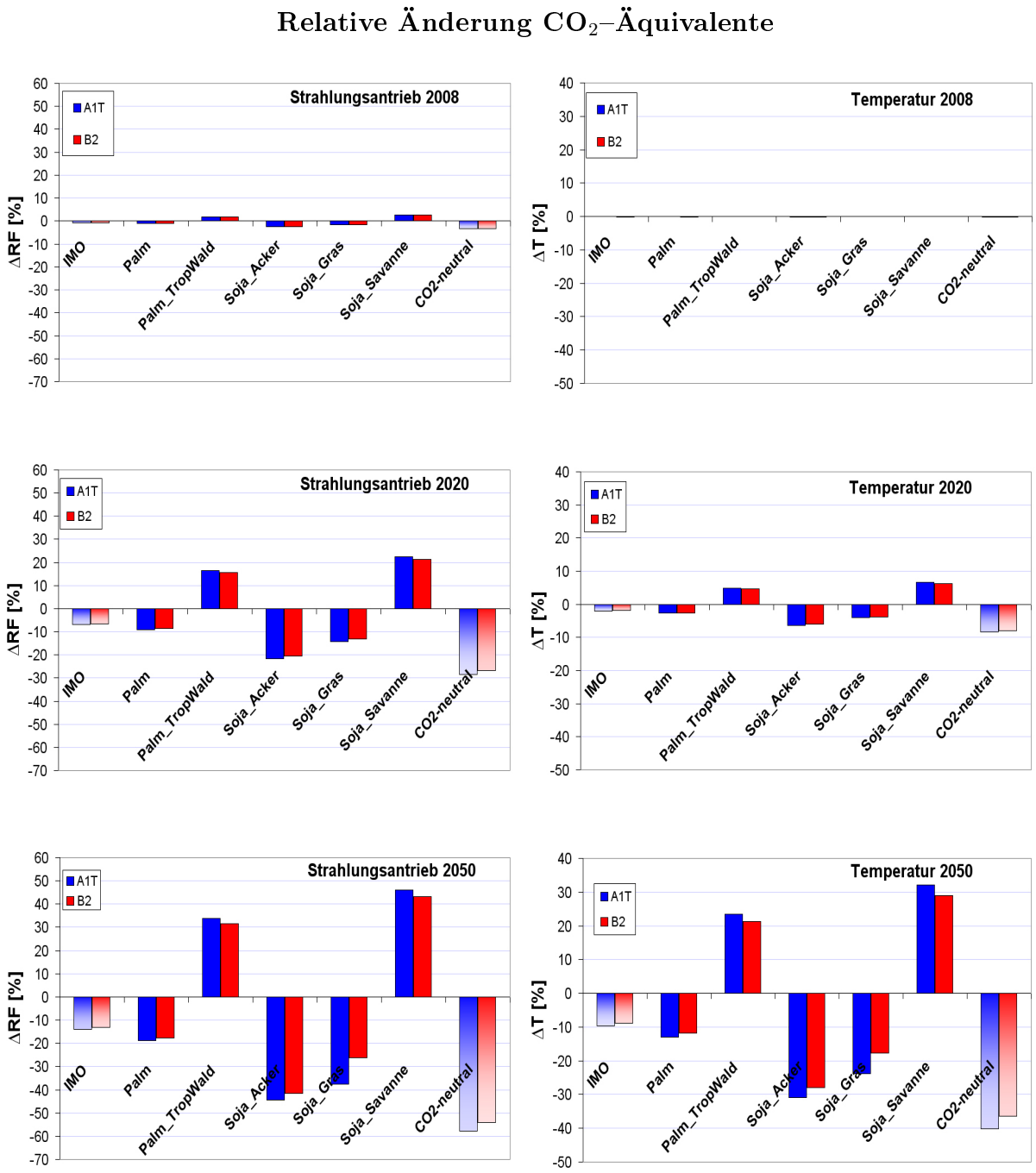

Abbildung 4.8 – Relative Änderung zu $\text{IMO}_{Lifecycle}$ für die Szenarien A1T und B2 für die Jahre 2008, 2020 und 2050 des Strahlungsantriebs $[mW/m^2]$ und der Temperatur [mK]

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden der Einsatz von Biotreibstoffen in der Schifffahrt untersucht. Ziel der Arbeit war es, die Klimawirkung der Biotreibstoffe im Vergleich zum herkömmlich eingesetzten Treibstoff in der Schifffahrt (einem Gemisch aus Schweröl und Schiffsdiesel) zu untersuchen und das CO_2–Reduktionspotential zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass das CO_2–Reduktionspotential der Biotreibstoffe hoch ist, wenn die zur Herstellung der Biotreibstoffe benötigten Pflanzen nachhaltig angebaut werden. Bei Anbau von Sojaöl in der Savanne und von Palmöl im tropischen Regenwald wird jedoch ein deutlicher Anstieg der globalen CO_2–Emissionen berechnet. Die Arbeit wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertem Projekts BIOCLEAN durchgeführt.

Die Berechnung der Schiffsemissionen erfolgte für den Referenztreibstoff, Schiffsdiesel und die Biotreibstoffe Palmöl und Sojaöl. Es wurden zunächst die Emissionsfaktoren der CO_2 und nicht–CO_2 Emissionen aus den reinen Verbrennungsprozessen im Schiffsmotor, basierend auf Ergebnissen der 2. IMO–GHG–Studie (Treibhausgas, englisch: **G**reen**H**ouse **G**as, GHG) (Buhaug et al., 2009) und auf BIOCLEAN Messungen am Prüfstandsmotor (BIOCLEAN, 2008), berechnet. Unter Berücksichtigung des Lebenszyklus der Biotreibstoffe werden weitere Emissionsfaktoren für CO_2–Emissionen und CO_2–Äquivalente Emissionen aus den Ergebnissen einer Studie des Öko–Instituts e.V. (Öko-Institut, 2009) berechnet. Der Lebenszyklus umfasst den gesamten Lebensweg eines Biotreibstoffs vom Anbau über Weiterverarbeitung, Transport und Endverbrauch. Globale CO_2–Emissionen werden mit dem berechneten CO_2–Emissionsfaktor des jeweiligen Treibstoffs für die reinen Verbrennungsprozesse, den CO_2–neutralen Fall sowie unter Berücksichtigung des Lebensweges mit Hilfe des Modells der 2. IMO–GHG–Studie ermittelt. Die Emissionsfaktoren des Schweröl–Anteils des Referenztreibstoffs wurden dabei durch die berechneten Emissionsfaktoren der Biotreibstoffe ersetzt. Für nicht–CO_2–Emissionen der Biotreibstoffe erfolgt die Berechnung der globalen Emissionen mit dem SeaKLIM–Algorithmus, einem globalen Bottom–up–Ansatz zur Emissionsberechnung (Paxian et al., 2009). Globale CO_2–Emissionen der verschiedenen Treibstoffe werden mit einem Klima–Response–Modell der MMU (Manchester Metropolitan University) auf ihre Klimawirkung untersucht (Lee et al., 2007).

Die Referenzwerte der CO_2–Emissionen im Klima–Response–Modell aus der 2. IMO–GHG–Studie wurden bis zum Jahr 2007 übernommen. Im Jahr 2008 wurden die CO_2–Referenzemissionen durch die neu berechneten Emissionen der Biotreibstoffe ersetzt und für die folgenden Jahre, basierend auf den CO_2–Emissionsszenarien der 2. IMO–GHG–Studie prozentual angepasst. Die Klimawirkung wird für verschiedene Zukunftsszenarien für die Jahre 2008, 2020 und 2050 bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die globalen CO_2–Emissionen aus Verbrennungsprozessen kaum von denen der herkömmlichen Treibstoffe unterscheiden. Da die Pflanzen, die zur Herstellung der Biotreibstoffe benötigt werden, beim Wachstum die gleiche Menge an CO_2 binden, wie bei der Verbrennung wieder freigesetzt wird, gelten sie als CO_2–neutral. Der Lebenszyklus der Biotreibstoffe muss zudem berücksichtigt werden. Unter Berücksichtigung des Lebenszyklus der Biotreibstoffe ist eine Reduktion der CO_2–Emissionen und der damit verbundenen klimatischen Auswirkung möglich. Dabei sind vorallem die Anbauregionen entscheident. Die Emissionen und Klimawirkung von Palmöl wird in den Anbau auf bereits gerodeten Flächen und den Anbau im tropischen Regenwald differenziert. Der Anbau von Sojaöl wird für die Nutzung bereits vorhandener Ackerflächen, den Anbau in Graslandschaften und in Savannen unterschieden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass eine Reduktionsmöglichkeit der globalen CO_2–Emissionen sowie der CO_2–Äquivalente und somit der atmosphärischen CO_2–Konzentration, dem CO_2-bedingten Strahlungsantriebs und der Temperaturänderung, für den Einsatz von Palmöl auf bereits gerodeten Flächen, sowie für Sojaöl auf vorhandenen Ackerflächen oder in Graslandschaften, gegeben ist. Gegenüber dem herkömmlichen Treibstoff, unter Berücksichtigung des Produktionsweges, ist für die Ersetzung des Schweröl–Anteils durch Sojaöl aus dem Ackerbau die maximale Einsparung der CO_2–Emissionen im Jahr 2050 von rund 55% (688 $TgCO_2/a$) möglich. Die maximale Reduktion des Strahlungsantriebs beläuft sich auf rund 44% (62 mW/m^2), das der Temperaturänderung auf rund 30% (15 mK), ebenfalls für den Einsatz von Sojaöl mit Anbau auf Ackerland. Weiteres CO_2–Reduktionspotential bietet Palmöl das auf bereits gerodeten Flächen angebaut wird, sowie Sojaöl aus dem Anbau im Grasland, jeweils im Vergleich zum Referenztreibstoff. Eine gegensätzliche Entwicklung zeigt der Einsatz von Sojaöl aus der Savanne, der die CO_2–Emissionen um rund 56% (706 $TgCO_2/a$) bezüglich des heute gängigen Treibstoffs im Jahr 2050 erhöht. Der Strahlungsantrieb fällt folglich um rund 46% (65 mW/m^2) höher aus, die Temperaturänderung steigt um ca. 32% (15 mK). Die Auswirkung von Palmöl mit Anbau im tropischen Regenwald, fällt geringer aus als der Einsatz von Sojaöl aus der Savanne, übersteigt aber auch deutlich die globalen CO_2–Emissionen bei Einsatz des herkömmlichen Treibstoffs im Jahre 2050 mit 30% und führt zu einem Zuwachs des Strahlungantriebs und der Temperaturänderung.

Das CO_2–Minderungspotential für den Einsatz von alternativen Treibstoffen in der Schifffahrt wurde in dieser Arbeit ermittelt. Nicht–CO_2–Emissionen der Schifffahrt wie Stickoxide (NO_x), Schwefeloxide (SO_x), Partikel (PM) und weitere Emissionen wurden eben-

falls berechnet. Die Ergebnisse dieser Emissionen zeigen einen deutlichen Rückgang der SO_x– und PM–Emissionen gegenüber dem Referenzfall, die in den Emissionen des heutigen Treibstoffs hauptverantwortlich für den negativen Strahlungsantrieb durch veränderte Wolkeneigenschaften sind. Um eine Gesamtbilanz der Reduktionsmöglichkeiten der Biotreibstoffe in der Schifffahrt hinsichtlich des Klimas zu erhalten, müssen die nicht–CO_2–Emissionen ebenfalls auf ihre Klimawirkung untersucht werden. Dies ist in den auf dieser Arbeit aufbauenden Studien im Rahmen von BIOCLEAN geplant. Bei dieser Betrachtung spielt die unterschiedliche Lebenszeit von nicht–CO_2–Emissionen wie z.B. Schwefeldioxid im Vergleich zu CO_2 eine wichtige Rolle. CO_2 hat eine lange Aufenthaltsdauer in der Atmosphäre und trägt daher im Gegensatz zu Schwefelemissionen noch lange nach der Emission zur Erwärmung bei. Während die Verminderung von NO_x, SO_2 und Partikelemissionen aus der Schifffahrt einen positiven Einfluss auf die Luftqualität haben werden, werden Reduktionen von CO_2 aus allen anthropogenen Quellen, inklusive der Schifffahrt, dringend benötigt, wenn man die globale Erwärmung reduzieren will.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Anstieg der CO_2–Konzentration und dem damit verbundenen Strahlungsantrieb (Quelle: IPCC, 2007). 2
1.2 Komponenten des Strahlungsantriebs der globalen Schifffahrt für das Jahr 2000 (Quelle: Eyring et al.,2009 4

3.1 Treibstoffproben der in BIOCLEAN getesteten Kraftstoffe Sonnenblumenöl, Sojaöl, Palmöl, Tierfett, Marine Diesel und Schweröl (Quelle: BIOCLEAN (2007)). 13
3.2 Anthropogene CO_2-Emissionen für die verschiedenen Szenarien des IPCC (A1F1, A1T, A1B, A2, B1 und B2) links (Quelle: IPCC, 2001) und CO_2–Emissionsverhalten für die verschiedenen Szenarien des Klima–Response–Modells rechts (Quelle: Buhaug et al., 2009). 19

4.1 CO_2-Emissionsverhalten der Treibstoffe unter Berücksichtigung des Lebensweges in kg/GJ (Quelle: Öko–Institut, 2009.) 31
4.2 Weltweite Verteilung der globalen Emissionen von SO_x für den Einsatz von Schweröl und MGO (links) und Palmöl und MGO (rechts) für das Jahr 2008. 34
4.3 CO_2–Äquivalente–Emissionen, Konzentrationen, Strahlungsantrieb und Temperaturänderung von 1870-2050 von Palmöl (blau), IMO (rot), HFO mit Lebenszyklus (grün) sowie der CO_2–neutralen Fall (lila). 36
4.4 Wie Abb. 4.3, jedoch nur CO_2. 37
4.5 CO_2–Äquivalente–Emissionen, Konzentrationen, Strahlungsantrieb und Temperaturänderung von 1870-2050 von Palmöl (blau),IMO (rot), HFO mit Lebenszyklus (grün) sowie der CO_2–neutralen Fall (lila). 38
4.6 Wie Abb. 4.5, jedoch nur CO_2. 39
4.7 Absolute Änderung zu $IMO_{Lifecycle}$ für die Szenarien A1T und B2 für die Jahre 2008, 2020 und 2050 des Strahlungsantriebs $[mW/m^2]$ und der Temperatur [mK] 40
4.8 Relative Änderung zu $IMO_{Lifecycle}$ für die Szenarien A1T und B2 für die Jahre 2008, 2020 und 2050 des Strahlungsantriebs $[mW/m^2]$ und der Temperatur [mK] 41

Tabellenverzeichnis

3.1 In BIOCLEAN gemessene Emissionen für Schweröl, Palmöl, Sojaöl und MGO. 13

3.2 Aus den Messungen von Tabelle 3.1 errechnete Emissionsfaktoren [g/kg Fuel] für BIOCLEAN bei einer Motorenaulastung von 75%. 14

3.3 Emissionsfaktoren der IMO–GHG–Studie und Anteile sowie daraus berechnete Emissionsfaktoren für die neun Schiffsklassen 15

3.4 Koeffizienten der Impulsfunktion 17

3.5 [Bedeutsame Variablen für die verwendeten Szenarien, sowie weitere Abhängigkeiten]Bedeutsame Variablen für die verwendeten Szenarien, sowie weitere Abhängigkeiten, der jeweiligen Überkategorie zugeordnet (Quelle: Buhaug et al. (2009)). 19

3.6 Globale CO_2–Emissionen sowie die prozentuale Änderung bezüglich der CO_2–Emissionen von 285 TgC im Jahr 2007 aus Verbrennungsprozessen . . 21

3.7 Globale CO_2–Emissionen sowie die prozentuale Änderung bezüglich der CO_2–Emissionen von 285 TgC im Jahr 2007 der Studie des Öko–Instituts . 21

3.8 Ursprüngliche Emissionsfaktoren aus Paxian et al. (2009) bzw. Lack et al. (2009), die daraus berechneten Referenzfaktoren und errechnete Emissionsfaktoren 23

3.8 Ursprüngliche Emissionsfaktoren aus Paxian et al. (2009) bzw. Lack et al. (2009), die daraus berechneten Referenzfaktoren und errechnete Emissionsfaktoren 24

3.9 Belastungsfaktor F für ME und AE, spezifischer Treibstoffverbrauch SFOC ME, und Hilfsmotorleistung P für die jeweiligen Schiffsklassen 27

4.1 Emissionsfaktoren von CO_2 EI_{CO_2} aus dem Verbrennungsprozess für die jeweiligen Schiffsklassen für den Referenzwert HFO und die alternativen Energieträger sowie der prozentuale Anteil von HFO bzw. MGO im Referenztreibstoff für die jeweilige Schiffsklasse. 30

4.2 Emissionswerte für den Referenztreibstoff sowie die alternativen Energieträger 30

4.3 Emissionswerte unter Berücksichtigung des Lebensweges für Schweröl, Diesel, Sojaöl und Palmöl, in reinen CO_2–Emissionen bzw. CO_2-Äquivalenten 32

4.4 Emissionsfaktoren der reinen CO_2-Emissionen und der CO_2-Äquivalente . . 32

4.5 Globale CO_2–Emissionen der Schifffahrt unter Berücksichtigung des Lebensweges für Schweröl, Diesel, Sojaöl und Palmöl, in CO_2 bzw. CO_2-Äquivalenten 33
4.6 Globale Emissionswerte für den Referenztreibstoff sowie die alternativen Energieträger und den CO_2–neutralen Fall. 33

Literaturverzeichnis

BIOCLEAN. Reduktion der Emissionen klimarelevanter Gase und Partikeln aus Diesel-Großmotoren für die Schifffahrt und für den stationären Einsatz durch den Einsatz regenerativer Treibstoffe. VERBUNDBERICHT 2, Zwischenbericht zu Nr.8.1,. 2007.

BIOCLEAN. Reduktion der Emissionen klimarelevanter Gase und Partikeln aus Diesel-Großmotoren für die Schifffahrt und für den stationären Einsatz durch den Einsatz regenerativer Treibstoffe. VERBUNDBERICHT 3, Zwischenbericht zu Nr.8.1. 2008.

Ø. Buhaug, J. J. Corbett, Ø. Endresen, V. Eyring, J. F. amd S. Hanayama, D. S. Lee, D. Lee, H. Lindstad, A. Markowska, A. Mjelde, D. Nelissen, J. Nilsen, C. Pålsson, J. J. Winebrake, W. Wu, , and K. Yoshida. Second IMO GHG Study. *International Maritime Organization (IMO) London, UK*, 2009.

J. Corbett, J. Winebrake, E. Green, P. Kasibhatla, V. Eyring, and A. Lauer. Mortality from ship emissions: A global assessment. *Environ. Sci. Technol.*, 41:24, 8512–8518, doi:10.1021/es071686z, 2007.

V. Eyring, H. Köhler, J. van Aardenne, and A. Lauer. Emissions from international shipping: The last 50 years. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 110: D17306, doi:10.1029/2004JD005620, 2005a.

V. Eyring, I. S. A. Isaksen, T. Berntsen, W. J. Collins, J. J. Corbett, O. Endresen, R. G. Grainger, J. Moldanova, H. Schlager, and D. S. Stevenson. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atm. Env.*, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.04.059, 2009.

U. R. Fritsche. Treibhausgasemissionen biogener Energieträger im Vergleich zu fossilem Diesel und Schweröl. 2008.

K. Hasselmann, S. Hasselmann, R. Giering, V. Ocana, and H. von Storch. Sensitivity study of optimal CO2 emission paths using a Simplified Structural Integrated Assessment Model (SIAM). *Climatic Change*, 37, 1997.

IPCC. *Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 2000.

IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 2007.

Öko-Institut. Treibhausgasemissionen biogener Energieträger im Vergleich zu fossilem Diesel und Schweröl. BIOCLEAN VERBUNDBERICHT 4, Zwischenbericht zu Nr.8.1, in preperation,. 2009.

D. Lack, J. Corbett, T. Onasch, B. Lerner, P. Massoli, P. Quinn, T. Bates, D. Covert, D. Coffman, B. Sierau, S. Herndon, J. Allan, T. Baynard, E. Lovejoy, A. Ravishankara, and E. Williams. Particulate emissions from commercial shipping: Chemical, physical, and optical properties. *Journal of Geophysical Research*, 114:D00F04, doi:10.1029/2008JD011300, 2009.

D. S. Lee, L. L. Lim, V. Eyring, R. Sausen, Ø. Endresen, and H. L. Behrens. Radiative forcing and temperature response from shipping. *In "Transport, Atmosphere and Climate", R. Sausen, D. S. Lee & C. Fichter (eds) Oxford*, Oxford, UK, June 2006: 208–213, 2007.

A. Paxian, V. Eyring, W. Beer, R. Sausen, and C. Wright. Present-day furutre global bottom-up ship emission inventories including polar routes. *ES&T*, 2009.

V. Ramaswamy, M. Chanin, J. Angell, J. Barnett, D. Gaffen, M. Gelman, P. Keckhut, Y. Koshelkov, K. Labitzke, J. Lin, A. O'Neil, J. Nash, W. Randel, R. Rood, K. Shine, M. Shiotani, and R. Swinbank. Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations. *Reviews of Geophysics*, 39:71–122, 2001.

R. Sausen and U. Schumann. Estimates of the climate response to aircraft CO2 and NOx emissions scenarios. *Climatic Change*, 44:27–58, 2000.

C. Wang, J. Corbett, and J. Firestone. Improving Spatial Representation of Global Ship Emissions Inventories. *Environmental Science & Technology*, DOI: 10.1021/es0700799, 2007.

Abkürzungsverzeichnis

AE	Hilfsmotor (englisch: auxiliary engine)
AMVER	Automated Mutual–assistance Vessel Rescue system
BC	Ruß (englisch: black carbon)
CH_4	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CORINAIR	Core Inventory of Air Emissions
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programm
GCM	General circulation model
GHG	Greenhouse gas
HFO	Heavy fuel oil
IMO	International Maritime Organisation
IPCC	Intergovernmental Panal on Climate Change
LMIU	Lloyd's Marine Intelligence Unit
MARPOL	Weltweits Abkommen zum Schutz der Meeresumwelt
ME	Hauptmotor (englisch: main engine)
MGO	Schiffsdiesel (englisch: marine gasoil)
MMU	Manchester Metropolitan University
NO	Stickstoffmonoxid
NO_2	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickoxid (NO und NO_2
n.v	nicht verfügbar
O_3	Ozon
OC	Organic compound
PM	Particulate matter/material
RF	Strahlungsantrieb (englisch: radiative forcing)
SFOC	spezifischer Treibstoff–Öl–Verbrauch (englisch: specific fuel oil consumption)
SO_2	Schwefeldioxid
SO_4	Sulfatanion (Aerosol)

SO_x	Schwefeloxid
TAR	Dritter Sachstandsbericht des IPCC (englisch: Third Assessment Report)
UBA	Umweltbundesamt
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen von BIOCLEAN, einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Kooperationsprojekt zwischen DLR–IPA, MAN B&W und dem Öko–Institut e.V. zum Einsatz regenerativer Treibstoffe in der Schifffahrt durchgeführt.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern Robert Sausen für hilfreiche Kommentare und ganz besonders bei Veronika Eyring für permanente Unterstützung, Beratung und Anleitung sowie für den positiven Zuspruch und den Glauben an mich, in der letzten Woche dieser Arbeit bedanken. Danke auch für die Möglichkeit, diese Arbeit zu machen und der Abnahme der Bachelorprüfung.

Bedanken möchte ich mich außerdem bei Andreas Petzold (DLR), Fritz Fleischer und Peter Lauer (MAN B&W) für hilfreiche Diskussionen und Anregungen zur Arbeit sowie für die dieser Arbeit bereitgestellten Ergebnisse der Messungen am Prüfstand. Bei Uwe Fritsche (Öko–Institut) bedanke ich mich für die Bereitstellung der Ergebnisse zum Lebenszyklus der Biotreibstoffe.

Dank auch an David Lee (MMU) für die Bereitstellung des in der Arbeit verwendeten Klima-Response-Modells und seine Hilfe bei der Änderung der Modell-Eingangsdaten.

Des Weiteren danke ich meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichen und mich jederzeit unterstützten, sowie meinen Freunden, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite stehen. Besonders Judith, für kritische Kommentare und permanenter Bereitschaft zum Korrekturlesen, trotz anstehender Klausuren.

Zuletzt danke ich Abteilung 1 des IPA für das angenehme Arbeitsklima und besonders Anja und Theresa für Ratschläge und die "kleinen Auszeiten" in Form von Kaffeepausen (auch wenn ich keinen Kaffee getrunken habe).

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Unterschrift: .....

Ort: .....

Datum: .....