

4.6 Der Schifftransport und sein Beitrag zum Klimawandel

MARKUS QUANTE, ARMIN AULINGER & VOLKER MATTHIAS

International shipping and its contribution to climate change: More than 80% of the global trade is conducted via the oceans and seas. Presently, shipping is one of the fastest growing emission sectors. Key compounds emitted are the greenhouse gas (GHG) carbon dioxide, nitrogen oxides, sulphur dioxide, carbon monoxide, black carbon, and particulate matter. International shipping is estimated to have contributed about 2.7% to the global emissions of carbon dioxide in 2007. Emissions of nitrogen oxides lead to the formation of the GHG ozone and reduce the GHG methane. Ship emissions of sulphur dioxide cause cooling by the formation of sulphate aerosols and effects on marine boundary layer clouds. Currently, the global mean radiative forcing from shipping is negative and implies cooling. In the longer term, emissions from shipping will result in a warming response as the long atmospheric life time of carbon dioxide will overwhelm any shorter-term cooling effects.

Im Zusammenhang mit der fortschreitenden Globalisierung hat auch der internationale Warenaustausch in den vergangenen Jahrzehnten rasant zugenommen. Der Handel zwischen Ländern ohne gemeinsame Grenze entwickelte sich mit einer höheren Zuwachsrates als die globale Wirtschaftstätigkeit insgesamt. Bezogen auf Tonnen-Kilometer lag dieses Wachstum zwischen 1986 und 2006 bei 4,1% pro Jahr (BUHAUG et al. 2009). Das Weltbruttosozialprodukt ist im Vergleichszeitraum um 3,4% pro Jahr angestiegen. Ein Vergleich der eingesetzten Transportmittel zeigt, dass über 80% des weltweiten Warenhandels bezogen auf das Volumen derzeit über den Seeweg abgewickelt wird (UNCDAT 2009). Die Bedeutung der Schifffahrt für die Personenbeförderung ist dagegen bis auf den Bereich des Fährverkehrs in den Randmeeren zugunsten des internationalen Flugverkehrs zurückgegangen. Lediglich der Sektor der Kreuzschifffahrt hat in der jüngeren Vergangenheit einen enormen Aufschwung erfahren. Da der globale Handel laut aller verfügbaren Zukunftsszenarien weiter wachsen wird, ist auch mit einer weiteren deutlichen Zunahme des internationalen Schiffsverkehrs zu rechnen, verfügbare Projektionen sprechen von mehr als einer Verdoppelung, bezogen auf Tonnen-Kilometer, bis zum Jahr 2050 (BUHAUG et al. 2009).

Die global eingesetzte Schiffsflotte entlässt einen komplizierten Gas-Partikel-Cocktail in die marine Atmosphäre. Zu den wichtigsten Bestandteilen der Schiffsemissionen gehören das Kohlendioxid (CO_2), Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid (CO), flüchtige organische Verbindungen, Ruß (häufig unter »black carbon« angesprochen) und weitere partikuläre organische und inorganische Substanzen. Die Stickoxide und andere Vorläufersubstanzen führen zur Bildung von troposphärischem Ozon (O_3) und beeinflussen die Konzentration des Hydroxylradikals (OH). Sie verkürzen darüber die atmosphärische Verweilzeit des Treibhausgases Methan (CH_4). Die wichtigste Aerosolkomponente in Verbindung mit Schiffsemissionen ist das Sulfat (SO_4^{2-}), es bildet sich zusätzlich

zur direkten Emission in der Atmosphäre auch aus dem emittierten SO_2 . Zudem ist auch das ebenfalls partikelförmige Nitrat (NO_3) zu nennen, welches auf die primären NO_x Emissionen zurückgeht. Diese Emissionen der Schifffahrt beeinflussen somit die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre, das Klima sowie die regionale Luftqualität mit entsprechendem negativem Einfluss auf die Gesundheit.

Der sich aus den direkten Emissionen der Schiffe sowie den Folgeprodukten und resultierenden Umweltveränderungen ergebende Klimaeinfluss ist sehr komplex und zudem räumlich wie zeitlich heterogen. Während es sich bei dem emittierten CO_2 um das typische langlebige Treibhausgas mit globalen Auswirkungen handelt, ist das abhängig von den photochemischen Bedingungen entstehende O_3 den kurzlebigen und daher regional wirksamen Treibhausgasen zuzuordnen. Beide Gase tragen potentiell zu einer Klimaerwärmung bei. Dahingegen wird durch die Reduktion der Konzentration des CH_4 tendenziell eine Abkühlung bewirkt. Generell tragen auch die auftretenden Aerosole durch die Rückstreuung der einfallenden solaren Strahlung direkt zu einer Abkühlung bei, hier ist insbesondere das Sulfataerosol hervorzuheben. Ein wichtiger, jedoch indirekter Beitrag zur Abkühlung, wird durch den Einfluss der Aerosole auf die Rückstreuungseigenschaften der marinen Bewölkung hervorgerufen. Anders ist das bei dem von den Schiffen ausgestoßenen Ruß, er absorbiert solare Strahlung und erwärmt Luftschichten, in denen er sich befindet. Auch dem Ruß wird über seinen Einfluss auf Wolkenpartikel und Wolkendynamik ein indirekter Klimaeffekt zuerkannt. Dieser zeigt jedoch – anders als das beim Sulfat der Fall ist – auch eine Erwärmungstendenz. Zum einen kann die Bildung kühlender Wolken verhindert werden, zum anderen verdunsten möglicherweise Wolkentröpfchen mit absorbierendem Rußkern schneller. In den eis- und schneebedeckten Gebieten der Erde kann der sich auf den stark reflektierenden Flächen absetzende Ruß zu einer deutlichen Minderung der Oberflächenalbedo führen, dadurch indirekt

zu einer weiteren Erwärmung beitragen und eventuelle Schmelzprozesse fördern. Im Gegensatz zum Klimaeinfluss des CO₂ tritt der durch Aerosole bewirkte Einfluss eher regional auf, das heißt im erweiterten Umfeld der Schifffahrtsrouten, da Aerosole typischerweise nur eine atmosphärische Verweilzeit von einigen Tagen bis zu Wochen aufweisen.

Nachdem in der Vergangenheit die Schifffahrt im Zusammenhang mit der Klimadiskussion weitestgehend ausgeklammert blieb, ist diesem Emissionssektor aufgrund seiner steigenden Bedeutung in den letzten Jahren mehr Aufmerksamkeit gewidmet worden. In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Prozesse und Erkenntnisse zum Einfluss des Schiffsverkehrs auf das Klima zusammenfassend dargelegt.

Schiffsemissionskataster

Ein zuverlässiges Emissionskataster ist unabdingbare Voraussetzung für die Quantifizierung des Klimaeinflusses des Schiffsverkehrs. In den letzten Jahren haben mehrere Forschergruppen an der Entwicklung solcher räumlich und zeitlich aufgelöster Kataster gearbeitet. Hier sollen kurz die allgemeinen Vorgehensweisen skizziert werden, über die beste Methodik wird noch wissenschaftlich debattiert. Grundsätzlich werden zwei prinzipiell unterschiedliche Ansätze verfolgt. Bei den top-down Verfahren werden die Emissionen ohne lokale Zuordnung aus dem gesamten Treibstoffverbrauch und der anschließenden Multiplikation mit spezifischen Emissionsfaktoren ermittelt. Die resultierenden Gesamtemissionen werden dann mit Hilfe von räumlichen Proxies über die Weltmeere verteilt. Bottom-up Verfahren führen zu direkten Schätzungen der räumlich aufgelösten Emissionen basierend auf detaillierten Annahmen zu lokalen Schiffsbewegungen entlang der bekannten oder idealisierten Routen. Hier kommen Schiffsseigenschaften und Fahrprofile sowie motorspezifische Emissionsfaktoren zum Einsatz. Emissionen



Abb. 4.6-1: Containerschiff, wie es im internationalen Handel eingesetzt wird, mit deutlich sichtbarer Abgasfahne.

im Hafenbetrieb werden zusätzlich abgeschätzt. Die unterschiedlichen Vorgehensweisen werden im größeren Detail auch mit Hinweisen auf immanente Unsicherheiten bei BUHAUG et al. (2009), DALSSØREN et al. (2009), WANG et al. (2008), EYRING et al. (2010) und MIOLA & CIUFFO (2011) beschrieben.

Schiffsverkehr

Als ein repräsentatives Beispiel für die räumliche Verteilung von Schiffsbewegungen sind in *Abb. 4.6-2* die »Ship Emission Allocation«-Faktoren (SEAFs) wiedergegeben, die auf dem International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS) nach WANG et al. (2008) beruhen. SEAF ist der fraktionelle Teil der Emissionen in einer Gitterzelle an den Gesamtemissionen.

Ungefähr 80% des heutigen Schiffsverkehrs ist in der Nordhemisphäre angesiedelt, die Verteilung auf die Seegebiete Atlantik, Pazifik, Indischer Ozean und Mittelmeer beträgt respektive 32%, 29%, 14% und 5% (EYRING et al. 2010). Etwa 70% der Emissionen werden in einem Abstand von weniger als 400 km von den Küstenlinien freigesetzt. Auf anderen Primärdaten beruhende Studien kommen hier zu leicht abweichenden Zahlen aber qualitativ zu den gleichen Aussagen.

Emissionen

Die Welthandelsflotte besteht aus über 100.000 Schiffen mit einer Größe von mehr als 100 BRZ, die überwiegend mit Dieselmotoren angetrieben werden. Aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus verwenden die Handelsschiffe, wenn möglich, schweres Heizöl als Treibstoff. Hier handelt es sich vorwiegend um ein aus schwefelreichen Abfallprodukten aus Raffinerieprozessen gewonnenes Produkt, so genanntes »Bunker«-C-Öl. In einigen küstennahen Gebieten wurden in den letzten Jahren Regionen ausgewiesen, in denen schwefelärmerer Treibstoff eingesetzt werden muss (Sulphur Emission Control Areas – SECAs), was in den Regionen zu deutlichen Konzentrationsminderungen schwefelhaltiger Substanzen führt (siehe z.B. MATTHIAS et al. 2010).

Vom Schiffsverkehr freigesetzte Emissionen werden im Wesentlichen als Abgabe der Antriebs- und Hilfsmaschinen in die Umgebung abgegeben. Aber auch Emissionen, die von beförderten Gütern (insbesondere Methan und andere flüchtige Verbindungen beim Rohöltransport) oder Kühlaggregaten und Klimaanlagen stammen, werden von den umfassenderen Studien als nicht vernachlässigbar angesehen und entsprechend berücksichtigt. Der Übersichtsartikel von EYRING et al. (2010) fasst die Emissionsstudien verschiedener Arbeitsgruppen für das Jahr 2000 zusammen und extra-

poliert die Ergebnisse auf das Jahr 2005. Die kürzlich erschienene Treibhausgasstudie der International Maritime Organization, IMO, (BUHAUG et al. 2009) liefert separat erstellte Emissionsdaten und präsentiert für die Jahre 1990 bis 2007 globale Mittelwerte für die wesentlichen Substanzen.

Primär emittierte Gase

Die unterschiedlichen, verfügbaren Studien führen zu Abschätzungen der CO₂-Emissionen aus dem Schiffsverkehr, die zwischen 500 bis 810 Mio. t im Jahr 2000 rangieren (EYRING et al. 2010). Laut der oben genannten IMO-Studie stammten im Jahr 2007 ca. 1.054 Tg CO₂ aus dem Schiffsverkehr, was 3,3% der globalen Emissionen entspricht (BUHAUG et al. 2009). Der Anteil des internationalen Schiffsverkehrs daran betrug im Jahr 2007 ca. 870 Tg oder 2,7% der globalen Emissionen, was in der Größenordnung dem Beitrag einer mittleren Industrienation entspricht.

Entsprechende Abschätzungen für Stickoxide rangieren für das Jahr 2000 zwischen 2,9 und 6,5 Tg(N) mit einem mittleren Wert von 5,4 Tg(N) (EYRING et al. 2010). Die Studie von BUHAUG et al. (2009) kommt für das Jahr 2007 auf ca. 7,6 Tg(N). Damit zeichnet der Schiffsverkehr im Jahr 2000 für ca. 15% der globalen Emissionen verantwortlich, und liegt damit in der Größenordnung der Gesamtemission der USA. Die Schwefeldioxidemissionen werden von EYRING et al (2010) für das Jahr 2000 im Mittel mit 5,5 Tg(S) angegeben (Bereich 3,4 bis 6,0 Tg(S)). Der Anteil des von Schiffen emittierten SO₂ an den globalen Emissionen lag im Jahr 2000 damit bei ca. 8%. Weitere Angaben zu Emissionen anderer Gase (insbesondere CO, N₂O, CH₄, NMVOCs, HFCKWs) sind bei BUHAUG et al. (2009) zu finden.

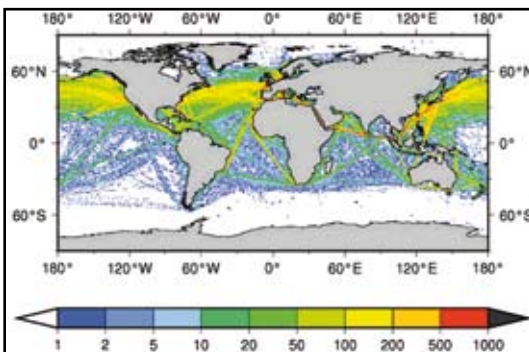


Abb. 4.6-2: »Ship Emission Allocation«-Faktoren (SEAF) basierend auf dem International »Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set« (ICOADS) nach WANG et al (2008). SEAF in einer Gitterzelle (0,1°x0,1°Auflösung) ist hier als millionester Anteil an den globalen Schiffsemissionen ausgedrückt (aus EYRING et al. 2010 – Fig. 3. Copyright Elsevier - mit freundlicher Genehmigung von Veronika Eyring).

Primär emittierte Partikel

Neben den gasförmigen Substanzen emittieren Schiffe auch eine Reihe verschiedenartiger Partikel. Hier sind organische Aerosole (primary organic matter, POM), primär emittiertes Sulfat (SO₄⁻²) und der Ruß zu nennen, die hauptsächlich im Aitken Mode (< 50 nm) freigesetzt werden. Zudem wird Asche emittiert, die an den Treibstoff gebundene Mineralien und Schwermetalle enthält. Derzeit existieren nur sehr wenige globale Abschätzungen der Partikelemissionen aus dem Schiffsverkehr. LAUER et al. (2007) machen zu den genannten Partikelklassen für das Jahr 2000 Angaben, die auf drei unterschiedlichen Emissionskatastern beruhen. Für Ruß liegen die entsprechenden Werte zwischen 0,05 und 0,13 Tg, für POM zwischen 0,06 und 0,71 Tg und für primäres Sulfat zwischen 0,29 und 0,77 Tg.

LACK et al. (2009) haben die Partikelemissionen basierend auf Messungen in der Abgasfahne direkt hinter 200 Schiffen unterschiedlichen Typs und einem Verkehrskataster abgeschätzt. Als Ergebnis wurden 0,90 Tg PM pro Jahr (Summe aus SO₄⁻², POM, BC; ohne Asche) ermittelt, die sich sehr gut mit dem von EYRING et al. (2005) angegebenen Wert von 0,97 Tg pro Jahr für die Summe der entsprechenden Substanzen vergleichen. Allerdings unterscheiden sich die berichteten prozentualen Zusammensetzungen des PMs sehr wohl. Während z.B. LACK et al. (2009) einen Sulfatanteil von 46% ermitteln, gehen EYRING et al. (2005) von einem Anteil von 81% aus. Entsprechende Unterschiede treten dann für POM und BC auf. Die genannten Abweichungen verdeutlichen die noch existierenden Unsicherheiten.

Einfluss auf die Konzentration weiterer klimarelevanter Substanzen

Die von den Schiffen in die Atmosphäre abgegebenen Emissionen werden dort vermischt, transportiert und unterliegen mitunter chemischen Umwandlungen. Die

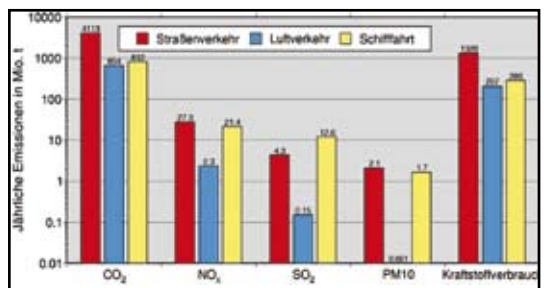


Abb. 4.6-3: Jährliche Emissionen des Straßen-, Luft- und Schiffsverkehrs von Kohlendioxid, Stickoxiden, Schwefeldioxid, Feinstaub und der Kraftstoffverbrauch für das Jahr 2000 in Mio. t (aus EYRING et al. 2005 - Fig. 3. Copyright American Geophysical Union - mit freundlicher Genehmigung von Veronika Eyring).

Chemie in der marinen Grenzschicht ist überwiegend gekennzeichnet durch die Oxidation der primär emittierten Spezies und nachfolgenden Reaktionen. Die entsprechenden Prozesse und chemischen Reaktionen sind mitunter recht komplex, sie werden typischerweise mit Hilfe von Chemietransportmodellen untersucht. Die für das Klima relevanten Reaktionspfade sind die durch NO₂ initiierte Bildung von Ozon, die in der Gas- und Flüssigphase stattfindende Oxidation des SO₂ zum Sulfataerosol und die Erhöhung der Hydroxylradikalkonzentration (OH), die wiederum zum Abbau des Treibhausgases Methan beiträgt (Fuglestad et al. 2008). Der Ozonabbau steht möglicherweise ein Halogen-katalysierter Abbau von O₃ in der marinen Grenzschicht entgegen. Über den durch Schiffsemissionen bewirkten Anstieg der OH-Konzentration kann auch die Oxidation des von Plankton emittierten Dimethylsulfids (DMS) in der marinen Grenzschicht verstärkt werden und somit die Konzentration des Sulfataerosols erhöht werden. Sulfataerosole agieren als sehr effektive Wolkenkondensationskerne (Lauer et al. 2007). Den Stand des Wissens zu den unterschiedlichen chemischen Umwandlungsprozessen gibt die ausführliche Diskussion in Eyring et al. (2010) wieder. Laut einer Chemietransportmodellstudie von Dalsøren et al. (2010) beträgt der derzeit typische Anstieg der jährlichen mittleren troposphärischen Ozonkonzentration in belasteten Regionen 0,5 bis 2,5 ppbv. Die globale, mittlere Methankonzentration wird der Studie folgend über das OH um etwa 2% reduziert.

Vergleich mit den Emissionen anderer Transportsektoren

Ein Vergleich der Emissionen von Schlüsselsubstanzen aus dem Schiffsverkehr mit denen des Straßen- und Flugverkehrs erschließt deren relative Bedeutung im Transportsektor. *Abb. 4.6-3* zeigt diesen Vergleich, wie er von EYRING et al. (2005) für das Jahr 2000 zusammengestellt wurde. Demzufolge gibt der Schiffsverkehr in etwa 24% mehr CO₂ an die Atmosphäre ab als die Luftfahrt, beide Sektoren bleiben bei diesem Gas aber deutlich hinter dem Straßenverkehr zurück. Insbesondere beim NO_x und PM₁₀ übertrifft der Schiffsverkehr die Luftfahrt deutlich. Bei den Schwefeldioxidemissionen sind die Schiffe, wie es aufgrund der geringen Treibstoffqualität auch zu erwarten ist, die größten Emittenten im Verkehrssektor, hier leistet der Flugverkehr einen zu vernachlässigenden Beitrag.

Schiffsemissionen und marine Bewölkung

Wolken haben über unterschiedliche Pfade einen profunden Einfluss auf das Klima. Tiefliegende stratiforme

Bewölkung, wie sie über großen auch vom Schiffsverkehr berührten Regionen der Ozeane vorkommt, hat durch die dominierende, hohe Albedo einen kühlenden Effekt. Die Reflektivität dieser Wolkensysteme kann durch Schiffsabgase regional jedoch noch erhöht werden. Felduntersuchungen zum Eintrag von Partikeln aus dieselangetriebenen Schiffen in stratiformer mariner Bewölkung zeigten, dass ein Anteil von ca. 12% als Kondensationskerne in Grenzschichtwolken fungierten, dieses waren insbesondere die Sulfatpartikel (HOBBS et al. 2000). Eine Reihe von Studien hat gezeigt, dass unter bestimmten Umständen die Anzahl der Wolkentröpfchen unter Schiffsabgaseinfluss zugenommen und der mittlerer Tröpfchenradius abgenommen hat, was bei in etwa konstantem Wolkenwassergehalt zu einer Albedoerhöhung führt. Die geringere Größe der Tröpfchen verlängert auch die Verweilzeit der Wolken in der Atmosphäre. Man spricht in diesem Zusammenhang von indirekten Aerosoleffekten, genauer dem »ersten indirekten Aerosoleffekt« und dem »cloud lifetime effect«.

Ein anschauliches Beispiel von stärker reflektierenden tiefen Wolken entlang von Schifffahrtsrouten ist im Satellitenbild in *Abb. 4.6-4* zu sehen.

Ein weiterer indirekter Wolken-Aerosoleffekt soll hier auch noch kurz erwähnt werden. Der von Schiffen emittierte Ruß ist in der Lage solare Strahlung zu absorbieren. Die damit verbundene Erwärmung von Luftschichten kann in die Grenzschichtdynamik eingreifen und evtl. zur partiellen Auflösung von Wolken führen. Ruß, der in Tröpfchen eingebunden wird, kann zu deren schnellerer Verdunstung beitragen. Die messtechnischen Erhebungen und modellbasierten Studien zu den genannten Effekten sind extrem schwierig durchzuführen und die Ergebnisse entsprechend mit großen Unsicherheiten behaftet. In der Tendenz scheinen die Veränderungen der Wolken durch den Schiffsverkehr einen spürbaren Beitrag zur Abkühlung im Klimasystem bewirken zu können.

Klimawirkung der Schiffsemissionen

Wie in den vorausgegangenen Abschnitten dargelegt, trägt die Schifffahrt zur Veränderung der atmosphärischen Konzentration von wichtigen Treibhausgasen und strahlungsrelevanten Partikeln bei. Einige dieser Konzentrationsänderungen führen potentiell zu einer Erwärmung andere zu einer Abkühlung. Zur Abschätzung des gesamten Effektes der Schiffsemissionen sind die Beiträge der einzelnen Substanzgruppen und indirekten Aerosoleffekte (Wolkeneffekte) zu ermitteln und entsprechend zu bilanzieren. Als ein etabliertes und einfaches Maß für die Wirksamkeit von anthropogenen Störungen der Strahlungsbilanz des Klimasystems hat

sich der Strahlungsantrieb erwiesen. Er beschreibt die durch die jeweilige Störung hervorgerufene Veränderung in der Strahlungsbilanz an der Tropopause oder dem Oberrand der Atmosphäre und wird in der Regel in Watt pro Quadratmeter angegeben. Er kann sowohl positive wie auch negative Werte annehmen. Das durch die Störung hervorgerufene Ungleichgewicht in der Strahlungsbilanz führt Veränderungen von Klimaparametern und damit einen neuen Gleichgewichtszustand des Klimasystems herbei (insbesondere Abkühlung oder Erwärmung). Es ist ferner zu berücksichtigen, dass einige der emittierten Treibhausgase (CO_2) eine lange atmosphärische Verweilzeit (viele Jahre) haben, deren Effekt kann somit auf der globalen Skala betrachtet werden. Andere Substanzen haben kürzere Verweilzeiten in der Troposphäre (Tage bis Wochen), die mit ihnen verbundene Störung der Strahlungsbilanz zeigt daher eine regionale Signatur. Die Größe Strahlungsantrieb berücksichtigt noch nicht die vielfältigen Rückkopplungen im Klimasystem, um z.B. bewirkte Temperaturänderungen abzuschätzen, müssen diese Antriebe in komplexe Klimamodelle eingebracht werden.

EYRING et al. (2010) haben die mit dem Schiffsverkehr verbundenen Strahlungsantriebe aus verschiedenen in der Literatur verfügbaren Studien zusammengetragen und eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Die Resultate sind in *Abb. 4.6-5* in einer Darstellungsform zu finden, wie sie auch im letzten Bericht des Weltklimarates (IPCC 2007) verwendet wurde.

Wie der *Abb. 4.6-5* zu entnehmen ist, liefert der aktuelle Schiffsverkehr sowohl positive wie auch negative Beiträge zum Strahlungsantrieb. Hier sollen nur einige wesentliche Punkte herausgehoben werden, eine umfassende Diskussion kann in der Originalveröffentlichung gefunden werden. Wie zu erwarten war, leisten die Kohlendioxidemissionen des Schiffsverkehrs mit 37mW/m^2 den stärksten positiven Beitrag, bezogen auf

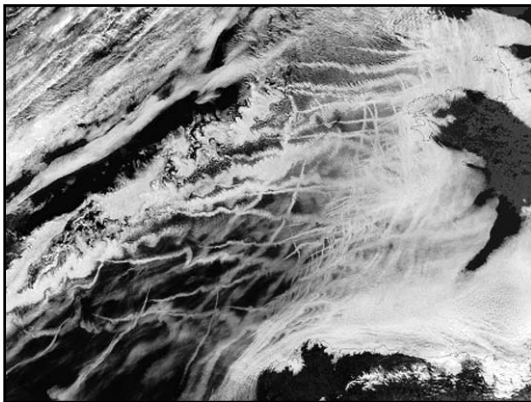


Abb. 4.6-4: »Ship Tracks« über dem Atlantik vor der französischen und spanischen Küste: NASA Aqua/Modis 27.01.2003.

die gesamten CO_2 Emissionen und das Referenzjahr 2005 macht das einen Anteil von 2,2% aus (bezogen auf $1,66\text{ W/m}^2$, IPCC 2007).

Obwohl die Stickoxide nicht zu den Treibhausgasen zählen, haben ihre Emissionen indirekt einen Einfluss auf den Strahlungsantrieb. Einen positiven Beitrag von 26 mW/m^2 bringt die von NO_x initiierte Ozonbildung ein, ein ähnlich großer Beitrag aber mit negativem Vorzeichen von -33 mW/m^2 ist der Verkürzung der atmosphärischen Verweilzeit des Methans zuzuschreiben, der auch auf Stickoxidemissionen zurückgeht. Zahlenmäßig heben sich die Strahlungsantriebebeiträge durch die Stickoxide scheinbar wieder auf, der Einfluss auf das Klima hängt jedoch auch von räumlich-zeitlichen Strukturen ab, die hier sehr unterschiedlich sein können.

Einen weiteren, kühlenden Einfluss auf das Klima hat die Störung der Strahlungsbilanz durch die Schwefelemissionen. Es ist insbesondere das durch Oxidation entstehende Sulfataerosol herauszuheben, das über die Streuung solarer Strahlung einen direkten Klimaeinfluss ausübt, der für das Jahr 2005 mit -31 mW/m^2 beziffert wird. Die Klimaeffekte weiterer Aerosole (Ruß, organisches Aerosol) werden als weniger relevant eingestuft. Der potenziell größte Einzelbeitrag in der Klimarelevanz des Schiffsverkehrs wird mit ca. $-0,4\text{ W/m}^2$ derzeit über die indirekten Wolkeneffekte der Aerosole erbracht. Ein Teil der Partikel agieren als zusätzliche Wolkenkondensationskerne, die einen Einfluss auf die Tröpfchenanzahldichte und Größenverteilung und damit wiederum auf die Albedo und Lebenszeit mariner Grenzschichtbewölkung haben (z.B. LOHMANN 2009). Die Erhöhung des solaren Reflektionsvermögens und der Zeitdauer, über die sie ausgeübt wird, kann zu einer merklichen Abkühlung in größeren Regionen über den Ozeanen führen. Die Bedeutung des Effektes ist über die Tatsache gegeben, dass Schiffe häufig in ansonsten recht sauberen Regionen fahren und die emittierten Aerosole in pristine Wolkenschichten über dunklem Ozean gemischt werden können. Die Unsicherheiten beim negativen Strahlungsantrieb in Verbindung mit den Wolkeneffekten sind allerdings sehr groß. Zum einen sind die involvierten Prozesse nicht genügend genau bekannt, des Weiteren fehlen ausreichende Angaben zu Partikelgrößenverteilungen und zur räumlichen Emissionssituation. Die in der Literatur zu findenden Angaben zum Effekt, sie gehen im Wesentlichen auf die Studie von LAUER et al. (2007) zurück, überstreichen eine Größenordnung und definieren den Unsicherheitsbereich in *Abb. 4.6-5*. Nach den Abschätzungen von LAUER et al. (2007) trägt der derzeitige Schiffsverkehr mit Werten zwischen 17% und 39% signifikant zum heutigen, gesamten anthropogenen indirekten Aerosoleffekt bei.

Die Gesamtbewertung der in der Tendenz über-

einstimmenden Ergebnisse aus verschiedenen Studien kommt zu dem Ergebnis, dass der Strahlungsantrieb des internationalen Schiffsverkehrs mit der mittleren Einstufung von $-0,4 \text{ W/m}^2$ heute negativ ist (LAUER et al. 2007; FUGLESTVEDT et al. 2008, 2009; EYRING et al. 2010). Dies macht in etwa ein Viertel des positiven totalen anthropogenen CO_2 Strahlungsantriebs aus und ist daher (unter dem Vorbehalt der Unsicherheiten) kein unbedeutender Beitrag. Das muss jedoch nicht so bleiben, der Strahlungsantrieb ist eine zeitlich rückwärts gerichtete Metrik, in Zukunft werden die Treibhausgase mit längerer Lebenszeit in der Atmosphäre auch weiterhin einen deutlichen Einfluss ausüben. Dazu kommt, dass gemäß derzeitiger, internationaler Vereinbarungen der Schwefelanteil in den Treibstoffen weiter gesenkt wird und damit auch der direkte und indirekte Einfluss des Sulfataerosols.

Eine Sensitivitätsstudie, die Auswirkungen einer deutlichen Senkung der zukünftigen SO_2 Emissionen (um 90%), bei konstanten Emissionen (Wert für Jahr 2000) aller anderen Substanzen, auf Temperaturänderungen über die nächsten 200 Jahre betrachtet, ist bei FUGLESTVEDT et al. (2009) zu finden. Der Nettotemperatureffekt wechselt hier nach ca. 70 Jahren von einer Abkühlung zur Erwärmung, ohne SO_2 -Minderung wäre das erst nach 350 Jahren der Fall gewesen.

Um eine Aussage zu den vom Schiffsverkehr anteilig bewirkten absoluten Änderungen der globalen Mitteltemperatur in der unteren Atmosphäre (oder der anderer Klimaparameter) zu machen, müssen die Strahlungsantriebe der primären Schiffemissionen räumlich und zeitlich differenziert in komplexe Klimamodelle eingebracht werden. Diese Modelle sollten neben den wesentlichen Rückkopplungsmechanismen auch ansatzweise Aerosol-Wolkenwechselwirkungen

enthalten. Der Komplexität geschuldet existieren in der Literatur hierzu nur sehr wenige Untersuchungen. An dieser Stelle soll nur, um die Größenordnung abzustecken, ein Ergebnis referiert werden. SKEIE et al. (2009) berechneten den kühlenden Einfluss der Schifffahrt über das 20ste Jahrhundert und geben eine Temperaturänderung von $-0,05^\circ\text{C}$ an, die globale Mitteltemperatur ist in diesem Zeitraum um ca. $0,8^\circ\text{C}$ angestiegen.

Der Klimaeinfluss des Schiffsverkehrs weist entsprechend der räumlichen Emissionsverteilung einen regional zu differenzierenden Charakter auf. Auch wenn sich im globalen Mittel die Strahlungsantriebe durch die kurzlebigen Aerosole und die langlebigen Treibhausgase rechnerisch aufheben würden, ist dies auf kleineren Skalen nicht zu erwarten. Das resultierende Muster der Temperaturänderung wird sicher von der Verteilung der Strahlungsantriebsstörungen und den entsprechenden lokalen Rückkopplungsmechanismen im Klimasystem abhängen. Auch über den weitergehenden Einfluss auf andere Klimaparameter kann im Moment nur spekuliert werden. Die durch differenzielle Erwärmung bewirkte Änderung der regionalen Zirkulation mit resultierendem Einfluss auf Niederschläge (z.B. Monsun) ist eine der noch nicht quantifizierten Möglichkeiten, wie der Schiffsverkehr einen weitergehenden regionalen Klimaeinfluss ausüben kann. Auch der Einfluss von Partikelemissionen auf die Struktur und Dynamik von regionalen Wolkensystemen und möglichen Niederschlagsveränderungen ist momentan noch unzureichend untersucht.

Sonderregion Arktis

Die Arktis ist eine Region, die vergleichsweise deutlich Auswirkungen des derzeitigen Klimawandels erfährt. Eine im Vergleich zu anderen Gebieten ausgeprägtere Temperaturerhöhung wird von einem deutlichen Trend

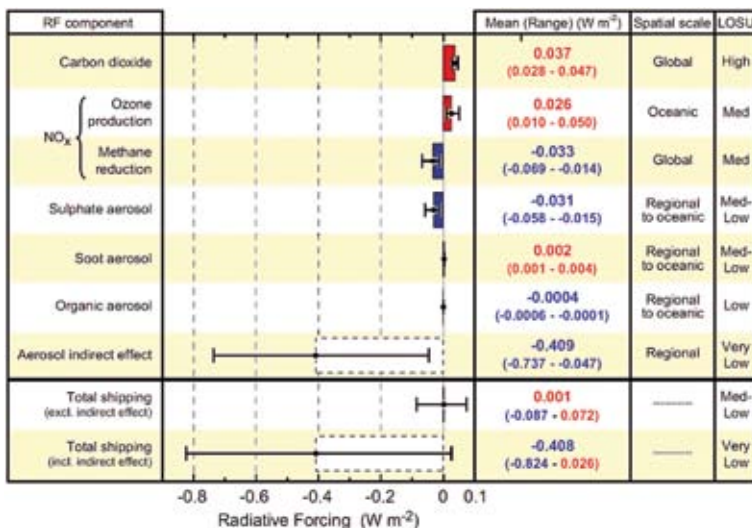


Abb. 4.6-5: Globaler Mittelwert des Strahlungsantriebs, der auf den internationalen Schiffsverkehr zurückgeht. Das Bezugsjahr ist 2005. Der »Fehlerbalken« bezieht sich auf den jeweils niedrigsten bzw. höchsten in der Literatur berichteten Schätzwert. In der rechten Säule ist der Grad des wissenschaftlichen Verständnisses (level of scientific understanding, LOSU) qualitativ angegeben (aus EYRING et al. 2010 - Fig. 14. Copyright Elsevier - mit freundlicher Genehmigung von Veronika Eyring).

zum Rückgang des Sommermeereises begleitet. Satellitenbeobachtungen zeigen eine Verringerung der Eisausdehnung im Sommerminimum (September) von mehr als 20% seit dem Beginn der Messungen im Jahr 1979. Modellprojektionen weisen auf einen weiteren deutlichen Rückgang im Verlauf dieses Jahrhunderts hin. Zudem wird eine geringere Eisdicke prognostiziert. Die vom Eis freigegebenen Meeresflächen, die insbesondere am Rand des arktischen Beckens liegen, würden eine weitergehende Nutzung der Region durch den Menschen erlauben. Hier ist die Schifffahrt und auch die Rohstoffexploration zu nennen, beide Bereiche werden auch schon in den wissenschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Kreisen eingehend und oft auch kontrovers diskutiert (siehe entsprechendes Kapitel in diesem Buch). Bei entsprechenden Eisbedingungen würde der Schifffahrt die »Nordroute« für den globalen Warenaustausch zur Verfügung stehen. Für einige Handelswege könnte das eine Zeitersparnis von bis zu 50% bedeuten. Der zu erwartende Anstieg der Schiffsbewegungen würde auch einen Teil der Emissionen dieses Verkehrssektors in die arktische Region verlagern. Einige Autoren führen eine potenzielle, globale Emissionsminderung durch die verkürzten Wege als positiven Aspekt einer solchen Entwicklung an. Neuere Emissionskataster für die Arktis unter Berücksichtigung zukünftiger Meereisverteilungen wurden von CORBETT et al. (2010) und PAXIAN et al. (2010) veröffentlicht.

Wichtige klimarelevante Veränderungen durch den regional erhöhten Schiffsverkehrs für die Arktis werden insbesondere durch den Eintrag von kürzerlebigen, strahlungswirksamen Substanzen wie Ruß, Methan und Ozon erwartet (GRANIER et al. 2006, CORBETT et al. 2010). GRANIER et al. (2006) verwendeten ein Chemietransportmodell, um die Auswirkungen der zu erwartenden Schiffsemissionen auf die Ozonkonzentration abzuschätzen. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass in Zukunft in der Arktis im Sommer Ozonkonzentrationen zu erwarten sind, die die heutigen Werte um den Faktor 2 bis 3 übersteigen und mit denen belasteter Industrieregionen der Nordhemisphäre vergleichbar sind. Der Ruß stellt in der Atmosphäre einen relativ kurzlebigen aber effektiven Absorber solarer Strahlung mit entsprechendem Erwärmungspotential dar. Wird er, wie es zu erwarten ist, in der Arktis auf den den Schiffsrouten benachbarten Eisflächen deponiert, kann der Ruß Schmelzprozesse beschleunigen (z.B. FLANNER et al. 2009) und somit auch über diesen Pfad zu einer weitergehenden Erwärmung des Ozeans und der unteren Luftschichten beitragen. Eine Beschleunigung des Schmelzens von Landeis würde auch einen Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels bedeuten.

Zusammenfassung und abschließende Bemerkungen

Der internationale Schiffsverkehr liegt im Zentrum des globalen Warenaustausches und ist einer der am schnellsten wachsenden Emissionssektoren. Bezogen auf die Klimawirksamkeit der Emissionen besitzt dieser Sektor einige Besonderheiten, die durch eine zeitliche Komponente im Vorzeichen des Effektes und regionale Eigenheiten einen Einfluss auf dessen Gesamtbewertung haben. Auf der potenziell wärmenden Seite tritt neben dem Kohlendioxid auch noch das sekundär gebildete Ozon in Erscheinung. Dem stehen auf der potenziell kühlenden Seite der Abbau des Treibhausgases Methan, die Rückstreuung solarer Strahlung durch das Sulfataerosol und insbesondere der die Wolkenalbedo erhöhende indirekte Aerosoleffekt gegenüber. Schiffsemissionen sind der einzige Sektor, der in den nächsten Dekaden mit einer hohen Wahrscheinlichkeit das Vorzeichen von einem heute kühlenden zu einem wärmenden Gesamteffekt wechseln wird. Hierbei kommen sowohl die durch die IMO-Regulierungen erforderlichen Minderungsmaßnahmen bei den Schwefelemissionen zum Tragen wie auch die äußerst unterschiedlichen atmosphärischen Verweilzeiten der Hauptakteure Sulfataerosol und Kohlendioxid. Im Gegensatz zum kurzlebigen Sulfataerosol kommt es beim langlebigen Kohlendioxid zu einer Akkumulation in der Atmosphäre, die Treibhauswirkung wird dann über viele Dekaden bis zu Jahrhunderten ausgeübt.

Die genaue Quantifizierung der heutigen Klimawirksamkeit der Schifffahrt ist noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Zum einen existieren noch Unstimmigkeiten zwischen den verschiedenen Emissionskatastern, zum anderen gibt es erhebliche Unsicherheiten bei der Abschätzung des Strahlungseinflusses durch aerosolbewirkte Wolkenmodifikationen, auf die der Hauptanteil des postulierten Kühleffektes entfällt. Es besteht ein großer Forschungsbedarf, um den jeweiligen Anteil der vielen Einzelaspekte des Einflusses des heutigen und des zukünftigen Schiffsverkehrs auf das Klima abzuschätzen bzw. zu prognostizieren.

Aufgrund der schwierigen Erfassung und einer nicht geregelten nationalen Zuordnung sind Schiffsemissionen nicht in das Kyoto-Protokoll (läuft bis 2012) eingegangen. Eine entsprechende Regelung in einem möglichen Nachfolgeprotokoll ist noch nicht ersichtlich. Die Untersuchung der IMO zu den Treibhausgasemissionen des Schiffsverkehrs prognostiziert eine drastische Zunahme der Emissionen in den kommenden 20 Jahren. Damit wird der Strahlungsantrieb durch das Kohlendioxid wohl weiterhin, abhängig vom mit dem Fahrmodus und Schiffsdesign verbundenen Treibstoff-

verbrauch, ansteigen. Die Beiträge anderer emittierter Substanzen zum Gesamtstrahlungsantrieb wird stärker von technischen und regulativen Aspekten abhängen. Wenn der Schwefelgehalt im Treibstoff weiter vermindert wird, wie es jetzt schon in einigen ausgewählten Regionen (SECAs) vorgeschrieben ist, hat das Auswirkungen auf die kühlenden Beiträge durch das Sulfataerosol und die beeinflussten Wolken.

Es sollte abschließend noch erwähnt werden, dass über die Klimaeffekte hinaus der Schiffsverkehr zu den hohen Werten bei PM₁₀/PM_{2,5} in Hafenstädten und Küstenregionen mit starkem Verkehrsaufkommen beiträgt und daher eine erhebliche Belastung der Luftqualität darstellt. Aus diesem Grund wird international schon auf eine deutliche Minderung der Partikelemissionen durch den Schiffsverkehr gedrungen. Damit entfällt weitestgehend die Gewichtigkeit eines Arguments, das öfter vorgetragen wird, der Schiffsverkehr sei »gut« für das Klima, da er dem globalen Treibhauseffekt entgegenwirke.

Literatur

- BERNTSEN T. & FUGLESTVEDT J. S. (2008): Global temperature responses to current emissions from the transport sectors. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 105, 19154–19159.
- BUHAUG Ø., CORBETT J.J., ENDRESEN Ø., EYRING V., FABER J., HANAYAMA S., LEE D.S., LEE D., LINDSTAD H., MARKOWSKA A.Z., MJELDE A., NELISSEN D., NILSEN J., PÅLSSON C., WINEBRAKE J.J., WU W. & YOSHIDA K. (2009): Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization, IMO, London, UK, 220 pp.
- CORBETT J.J., LACK D.A., WINEBRAKE J.J., HARDER S., SILBERMAN J.A. & D.M. GOLD (2010): Arctic shipping emissions inventories and future scenarios. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 9689–9704.
- DALSØREN S.B., M.S. EIDE, Ø ENDRESEN, A. MJELDE, G. GRAVIR & I.S.A. ISAKSEN (2009): Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships. The contribution from major ship types and ports. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2171–2194.
- DALSØREN S.B., MAGNUS, S. EIDE, G. MYHRE, O. ENDRESEN, I.S.A. ISAKSEN & J.S. FUGLESTVEDT (2010): Impacts of the large increase in international ship traffic 2000–2007 on tropospheric ozone and methane. *Environ. Sci. Technol.*, 44, 2482–2489.
- EYRING V., H. W. KÖHLER, J. VAN AARDENNE & A. LAUER (2005): Emissions from international shipping: 1. The last 50 years, *J. Geophys. Res.*, 110, D17305, doi_10.1029/2004JD005619.
- EYRING V., I. S. A. ISAKSEN, T. BERNTSEN, W. J. COLLINS, J. J. CORBETT, O. ENDRESEN, R. G. GRAINGER, J. MOLDANOVA, H. SCHLAGER & D. S. STEVENSON (2010): Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atm. Env.*, 44, 4735–4771.
- FLANNER M. G., ZENDER C.S., HESS P.G., MAHOWALD N.M., PAINTER T.H., RAMANATHAN V. & RASCH P.J. (2009): Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2481–2497.
- FUGLESTVEDT J.S., T.E. BERNTSEN, G.MYHRE, K. RYPDAL & R. BIELTVEDT SKIE (2008): Climate forcing from the Transport Sectors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 454–458.
- FUGLESTVEDT J. S., T. BERNTSEN, V. EYRING, D.S. LEE, R. SAUSEN & I.S.A. ISAKSEN (2009): Shipping emissions: From cooling to warming of climate - and reducing impacts on health. *Environ. Sci. Technol.*, 43, 9057–9062.
- GRANIER C.; NIEMEIER, U.; JUNGCLAUS, J. H.; EMMONS, L.; HESS, P.; LAMARQUE, J.-F.; WALTERS, S. & G.P. BRASSEUR (2006): Ozone pollution from future ship traffic in the Arctic northern passages. *Geophysical Research Letters*, 33, (L13807), 5.
- HOBBS P.V., T.J. GARRETT, R.J. FERREK, S.R. STRADER, D.A. HEGG, G.M. FRICK, W.A. HOPPEL, R.F. GASPAROVIC, L.M. RUSSELL, D.W. JOHNSON, C. DOWD, P.A. DURKEE, K.E. NIELSEN & G. INNIS (2000): Emissions from ships with respect to their effects on clouds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57, 2570–2590.
- LACK D., CORBETT, J., ONASCH, T., LERNER, B., MASOLI, P., QUINN, P., BATES, T., COVERT, D., COFFMAN, D., SIERAU, B., HERNDON, S., ALLAN, J., BAYNARD, T., LOVEJOY, E., RAVISHANKARA, A., & E. WILLIAMS (2009): Particulate emissions from commercial shipping: Chemical, physical, and optical properties. *Journal of Geophysical Research*, 114, DOI: 10.1029/2008JD011300.
- LAUER A., V. EYRING, J. HENDRICKS, P. JÖCKEL, & U. LOHMANN (2007): Global model simulations of the impact of ocean-going ships on aerosols, clouds, and the radiation budget, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1–19.
- LOHMANN U. (2009): Marine Boundary Layer Clouds . In C. Le Queré and E.S. Saltzman, Editors: *Surface Ocean - Lower Atmosphere Processes*, AGU, *Geophysical Research Series* 187, 57–68.
- MATTHIAS V., I. BEWERSDORFF, A. AULINGER & M. QUANTE (2010): The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions. *Environmental Pollution*, 158, 2241–2250.
- MIOLA A. & CIUFFO B. (2011): Estimating air emissions from ships: meta-analysis of modelling approaches and available data sources. *Atmospheric Environment*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.01.046
- PAXIAN A., V. EYRING, W. BEER, R. SAUSEN, AND C. WRIGHT (2010): Present-day and future global bottom-up ship emission inventories including polar routes. *Environ. Sci. Technol.*, 44, 1333–1339.
- SKEIE R. B.; FUGLESTVEDT, J. S.; BERNTSEN, T.; LUND, M. T.; MYHRE, G. & K. RYPDAL (2009): Global temperature change from the transport sectors: Historical development and future scenarios. *Atmos. Environ.*, 43; 6260–6270.
- UNCTAD (2009): Review of Maritime Transport, United Nations Conference on Trade and Development, United Nations Publication, Sales No. E.09.II.D.11.
- WANG C., J. J. CORBETT & J. FIRESTONE (2008): Improving spatial representation of global ship emissions inventories. *Environ. Sci. Technol.*, 42(1), 193–199.

Prof. Dr. Markus Quante

Dr. Armin Auling

Dr. Volker Matthias

Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH

Max-Planck-Straße 1 - 21502 Geesthacht

markus.quante@hzg.de