



Sachstand

Maßnahmen zur Minderung von Emissionen in der Schifffahrt Alternative Kraftstoffe und Antriebe

Maßnahmen zur Minderung von Emissionen in der Schifffahrt

Alternative Kraftstoffe und Antriebe

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 032/18
Abschluss der Arbeit: 4. Mai 2018
Fachbereich: WD 8: Fachbereich Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung: Emissionsdaten von Luftschadstoffen und CO₂	4
2.	Regelungen zur Begrenzung von Luftschadstoffen aus der Schifffahrt	5
2.1.	Regelungen zur Reduktion von Schwefel- und Partikelemissionen	5
2.2.	Regelungen zu Stickstoffemissionsbegrenzungen	6
3.	Politische Strategien zur Senkung der CO₂-Emissionen aus der Schifffahrt	7
4.	Maßnahmen zur Senkung der gegenwärtigen (Treibhausgas-) Schiffs-Emissionen	9
4.1.	Abgasnachbehandlung: Einsatz von Abgaswäschern und Katalysatoren	10
4.2.	Umstieg auf alternative und erneuerbare Kraftstoffe	10
4.2.1.	Von Schweröl zu Schiffsdiesel sowie Gas und Flüssiggas	10
4.2.2.	Verwendung erneuerbarer Kraftstoffe	12
4.3.	Alternative Schiffsantriebe	13
4.3.1.	Windgetriebene oder windassistierende Antriebe	13
4.3.1.1.	Segelmaster	14
4.3.1.2.	Zugdrachen	15
4.3.1.3.	Flettner-Rotoren	16
4.3.1.4.	Rumpfsegler	17
4.3.2.	Elektrische und Hybrid-elektrische Antriebe	18
4.3.3.	Solar-Antrieb	19
4.3.4.	Atom-Antrieb	20

1. Einleitung: Emissionsdaten von Luftschadstoffen und CO₂

Der Seeverkehr ist in den vergangenen Jahrzehnten weltweit kontinuierlich gestiegen. Etwa 90% des Welthandels erfolgen auf dem Seeweg.¹ **2015** wurden dabei etwa **10 Milliarden Tonnen Seefracht** über rund 50.000 Frachtschiffe weltweit bewegt.²

Rund 90% der gesamten Frachtschiff flotte werden mit Schweröl angetrieben. „Je nach Größe, Baujahr und Reisegeschwindigkeit verbraucht ein Frachter oder Tanker pro Seetag meist zwischen 30 bis 80 Tonnen Schweröl“, es kann aber auch ein Mehrfaches davon sein.³ Schweröl bleibt als Rückstandsöl bei der Erdölverarbeitung in den Raffinerien zurück. Schweröl enthält Schwefel⁴, **aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)** und **Schwermetalle**; bei der Verbrennung von Schweröl entstehen neben **CO₂** auch **Feinstaub, (Ruß-)Partikel, Schwefel- (SO_x)** und **Stickoxide (NO_x)**.

Stickoxide reagieren unter Sonnenlicht mit Kohlenwasserstoffen, bilden Ozon und führen zu Smog; Stickoxide führen zu Reizungen der Atemwege, zur Begünstigung von Herz-Kreislaufkrankungen und über Eutrophierung zur Schädigung der Ökosysteme. Schwefeloxide können Krankheiten der Atemwege verschlimmern und gelten als Mitverursacher des so genannten sauren Regens. Partikelemissionen aus der Verbrennung von Kraftstoffen werden im Allgemeinen als gesundheitsschädlich oder krebserregend eingestuft. Je kleiner die Partikel, desto leichter gelangen sie über die Lunge bis ins Blut, dabei können zusätzlich Stoffe wie Schwermetalle oder die krebserregenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe angelagert sein.⁵

Nach Angaben des Dritten Treibhausgasberichts der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation der Vereinten Nationen (IMO) von 2014 machten die **Stickoxidemissionen der gesamten Schifffahrt** ca. **15% an den globalen NO_x-Emissionen** und die (um ca. 30% gegenüber 2009 verminderten) **Schwefeloxid-Emissionen** der gesamten Schifffahrt ca. **13% an den globalen SO_x-Emissionen**

1 Vgl. BMU (2017). Seeverkehr. Artikel vom 16.6.2017: <http://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/seeverkehr/>

2 Vgl. Schröder, Tim (2015). Ideen für eine klimafreundliche Seefahrt. Neue Züricher Zeitung vom 29.4.2015 : <https://www.nzz.ch/wissenschaft/technik/ideen-fuer-eine-klimafreundliche-seefahrt-1.18531911>

3 Kräußlich, Wolfgang (2011). Schiffsantriebe. Neuentwicklungen für effizientere Schiffsantriebe. IN: KeNEXT vom 6.11.2011: <https://www.ke-next.de/industrie-forschung/branchen/neuentwicklungen-fuer-effizientere-schiffsantriebe-azipod-und-gleichstromnetze-130.html>

4 Dabei entspricht der gegenwärtig noch geltende Grenzwert des zulässigen Schwefelgehalts im Schweröl laut Umweltbundesamt dem 3.500fachen des im europäischen Straßenverkehr (0,001%) zulässigen Schwefelgehalts für die Kraftstoffe. Vgl. Umweltbundesamt (UBA) (2016). Seeschifffahrt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/schifffahrt#textpart-6>

5 Vgl. dazu u.a. UBA (2016). Seeschiffe – Luftschadstoffe und Energieeffizienz: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/seeschiffe-luftschadstoffe-energieeffizienz#textpart-1>

aus. Auf die internationale Seeschifffahrt bezogen waren es 13%-Anteil Verursachung an den globalen NOx- und 12%-Anteil an den globalen SOx-Emissionen.⁶

Im Durchschnitt der Jahre 2007-2012 wurden laut Drittem IMO-Treibhausgasbericht jährlich ca. 1.000 Millionen Tonnen CO₂ durch die **Schifffahrt insgesamt** emittiert (das entspricht **3,1% Anteil an den globalen CO₂-Emissionen**; 846 Millionen Tonnen waren es bezogen auf die **internationale Seeschifffahrt = 2,6% Anteil an den globalen CO₂-Emissionen**).⁷ Dieser Emissionsanteil entspricht ungefähr den gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands. Der IMO-Bericht prognostiziert, dass die CO₂-Schiffsemissionen **bis 2050 zwischen 50% bis 250%** (je nach künftigen wirtschaftlichen und energiebedingten Entwicklungen) ansteigen könnten.⁸ Der Seeverkehr könnte dann für vier bis 15% der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich sein.⁹

2. Regelungen zur Begrenzung von Luftschadstoffen aus der Schifffahrt¹⁰

2.1. Regelungen zur Reduktion von Schwefel- und Partikelemissionen

In Bezug auf Regelungen zu den Schwefel- und Partikelemissionen aus der Schifffahrt hat das Internationale Übereinkommen von 1973 zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships, inklusive der folgenden MARPOL-Protokolle und -Anlagen) die Grundlage gelegt. Danach gilt gegenwärtig eine **stufenweise Reduzierung des Schwefelgehalts von Schiffskraftstoffen (oder analog im Abgas)**:

- 4,5% m/m (Massenhundertteile im Schiffskraftstoff) vor dem 1.1.2012,
- 3,5% ab dem 1.1.2012

6 Vgl. International Maritime Organization (IMO) (2015). Third IMO GHG Study 2014: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Greenhouse-Gas-Studies-2014.aspx>

7 Vgl. IMO (2015).

Bezogen auf **CO₂-Äquivalente** entsprechen die Emissionen der Schifffahrt jährlich durchschnittlich insgesamt **2,8%** an den globalen CO₂-Emissionen und (**2,4%** Anteil sind es bezogen auf die internationale Seeschifffahrt). CO₂-Äquivalente sind CO₂, Methan- und Stickoxid-Emissionen.

(Die Methan-Emissionen von Schiffen nahmen auf Grund einer höheren Aktivität beim Transport von Flüssigerdgas, LNG, von 2007-2012 zu“, mit einem weiteren Anstieg der Methanemissionen wird gerechnet. Vgl. Maritime LNG-Plattform (o.J.). Die internationale Schifffahrt verringert den Anteil an den Treibhausgasemissionen: <http://www.lng-info.de/de/lng/emission/>).

8 Vgl. European Commission (2017). Reducing emissions from the shipping sector: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/shipping_en

9 Vgl. BMU (2017).

10 Vgl. IMO (o.J.). International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL): [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx); vgl. Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie (o.J.). MARPOL Übereinkommen: http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Umweltschutz/MARPOL_Uebereinkommen/index.jsp

- und **0,5% ab dem 1.1.2020.**

Zudem sind so genannte **Schwefelemissions-Überwachungsgebiete** (SOx emission control areas, **SECA**) eingeführt worden, in denen **strengere Grenzwerte** gelten und die auch nach 2020 weiterhin gelten werden, wenn erstmalig weltweit der 0,5%-Schwefelgrenzwert greifen wird. Danach galt/gilt für die Nord- und Ostsee sowie entlang der Nordamerikanischen Küste und der US-Karibik ein Grenzwert von

- 1,5% bis 2010,
- 1,0% ab 1.7.2010
- **und 0,1% ab 1.1.2015.**

Normales Schweröl enthält im Schnitt 2,7% Schwefel. Da die Schwefelgrenzen für alle Schiffe gelten (nicht nur Schiffneubauten), haben sie (künftig) dementsprechend größeren Einfluss auf die Schifffahrt als die Regelungen zu den Stickstoffemissionen.

Für Partikelemissionen sind in MARPOL Anlage VI bisher keine direkten Grenzwerte enthalten, sondern nur indirekt über die Vorgaben zum Schwefelgehalt im Kraftstoff, da diese bislang einen Großteil der Partikel darstellen.¹¹

2.2. Regelungen zu Stickstoffemissionsbegrenzungen

Die IMO hat daneben eine stufenweise Reduktion der Stickoxidemissionen (NOx) vorgesehen (MARPOL Anlage VI). Danach gilt für **Schiffsmotoren, die ab 2011 konstruiert werden**, dass diese **Emissionsminderungen um 20%** im Vergleich zur so genannten Tier I-Norm¹² erreichen müssen.

Außerdem besteht die Möglichkeit zur **Ausweisung von Stickstoffemissions-Überwachungsgebieten** (NOx emission control areas, auch **NECA**), in denen **für Schiffneubauten** besonders strenge Abgaswerte nach dem sogenannten **Tier III-Standard** gelten, was einer Emissionsminderung von 80% im Vergleich zu Tier I entsprechen soll.

NECA bestehen gegenwärtig nur vor der Küste Nordamerikas und der US-Karibik. In diesem Gebiet sind die Grenzwerte für Neubauten ab 2016 verpflichtend. Die zusätzliche Ausweisung der Schutzgebiete für die Nord- und Ostsee ist bereits beschlossen. Die strengeren Tier III-Grenzwerte für Schiffneubauten gelten dort ab 2021.

11 Vgl. UBA (2016). Seeschiffe.

12 IMO (o.J.). Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pollution-Prevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pollution-Prevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx); S. zu den Tier I-III Standards auch: <https://www.dieselnet.com/standards/inter/imo.php>

3. Politische Strategien zur Senkung der CO₂-Emissionen aus der Schifffahrt

Laut der „Verordnung zur Überwachung von Kohlendioxidemissionen aus dem Seeverkehr“ der EU (**MRV-Seeverkehrsverordnung**) ist **ab 1.1.2018** die Erfassung, die Berichterstattung und die Verifizierung von CO₂-Emissionen von Schiffen größer 5.000 Bruttotonnen (BRZ) auf Fahrten von und zu EU-Häfen sicherzustellen.¹³ So werden für alle EU-Mitgliedsstaaten erstmals **Pflichten zur Erfassung und Berichterstattung der jährlichen Treibhausgasemissionen** geregelt; eine Pflicht zur Reduktion der Treibhausgase im Seeverkehr ist dabei (noch) nicht enthalten.¹⁴ Daneben besteht auf IMO-Seite ein **Energie-Effizienz Design Index** (EEDI), der im Jahr 2011 beschlossen wurde und auf die Effizienzsteigerung von neugebauten Schiffen bis 2025 (bisher 30% Effizienzsteigerung) zielt.¹⁵

Neben Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und Erfassung der CO₂-Emissionen bestimmen auf der Grundlage des Pariser Klimaschutzübereinkommens von Ende 2015¹⁶ aber auch vor allem Maßnahmen zur Reduktion von CO₂-Emissionen aus dem Seeverkehr in Verbindung mit einem **Minderungsziel für den Sektor** die **aktuelle Diskussion**.

Zwar ist der internationale Seeverkehr nicht spezifisch im Klimaübereinkommen von Paris erwähnt, „jedoch handelt es sich bei den CO₂-Emissionen dieses Sektors um anthropogene Emissionen“, so dass politisch anerkannt ist, dass „auch der Seeverkehr seine CO₂-Emissionen möglichst rasch mindern und einen angemessenen Beitrag zur Erreichung der Treibhausgasneutralität

13 Vgl. European Maritime Safety Agency (EMSA) (2018). Information System to Support Regulation (EU) 2015/57 –THETIS MRV: <http://www.emsa.europa.eu/ship-inspection-support/thetis-mrv/item/2953-information-system-to-support-regulation-eu-2015-57-thetis-mrv.html>; https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/seeverkehr/seeverkehrsverordnung-MRV.pdf;jsessionid=3EA4503C77B43FFD2C05F518C3AC94AB.2_cid292?_blob=publicationFile&v=2

Die Deutsche Emissionshandelsstelle im UBA (DEHSt) ist für die Überwachung in Deutschland zuständig. Vgl. UBA (2017). Seeschifffahrt muss über Treibhausgasemissionen berichten. Artikel vom 2.10.2017: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/seeschifffahrt-muss-ueber-treibhausgasemissionen>

Als Reaktion darauf hat die IMO ein "Data Collection System" zur Erfassung der CO₂-Emissionen aus dem Seeverkehr verabschiedet. Dies sieht vor, dass die CO₂-Emissionen von Schiffen ebenfalls größer 5.000 BRZ ab dem Jahr 2019 zu erheben und an den jeweiligen Flaggenstaat zu melden sind.

14 Vgl. European Commission (2017).

15 Vgl. IMO (2018). Energy Efficiency Measures: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>

16 Mit dem Pariser Klimaschutzübereinkommen von Ende 2015 hatten sich 196 Staaten allgemein darauf verständigt, "so bald wie möglich den weltweiten Scheitelpunkt der Emissionen von Treibhausgasen zu erreichen ... und danach rasche Reduktionen im Einklang mit den besten verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnissen herbeizuführen, um in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ein Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken ... herzustellen" (Art. 4 Abs. 1; Deutscher Bundestag (2016). Entwurf eines Gesetzes zu dem Übereinkommen von Paris vom 12. Dezember 2015. BT-Drs. 18/9650 : <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>).

in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts leisten“¹⁷ muss. Täte er dies nicht, nähme laut Bundesumweltministerium der Druck auf andere Sektoren entsprechend zu, um die Ziele von Paris zu erreichen.

Im Rahmen des Beschlusses aus dem Oktober 2016 für eine „Road Map“ hat die IMO für die Jahre 2018-2023 festgelegt, 2018 eine zunächst vorläufige Treibhausgasreduzierungs-Strategie mit möglichen Maßnahmen und Zeithorizonten zu erarbeiten und diese weiterzuentwickeln, wenn zusätzliche Informationen insbesondere aus der CO₂-Datenerhebung vorliegen. Bis zum Frühjahr 2023 solle dann eine endgültige CO₂-Minderungsstrategie der IMO beschlossen werden.

Im Rahmen der Ausgestaltung der vierten Handelsperiode des Europäischen Emissionshandels-systems (EU-ETS) mit CO₂-Zertifikaten hat sich das **Europäische Parlament (EP) 2017** explizit **für die Einbeziehung des Schiffsverkehrs in den EU-ETS ab 2023 ausgesprochen**, wenn die IMO bis 2021 ein dem ETS nicht vergleichbar effizientes System auf den Weg gebracht haben sollte.¹⁸ Übernommen wurde der Vorschlag im finalen Text nach dem Trilog vom **Februar 2018** nicht, da man zunächst die Bemühungen der IMO um die Begrenzung der Emissionen aus der internationalen Seeschifffahrt fördern wolle. Die Europäische Kommission wolle dies „regelmäßig überprüfen und mindestens einmal jährlich dem Europäischen Parlament und dem Rat einen Bericht über die im Rahmen der IMO erzielten Fortschritte im Hinblick auf ein ehrgeiziges Emissionsreduktionsziel und über Begleitmaßnahmen vorlegen“¹⁹. Maßnahmen seitens der IMO oder der Union sollten erst ab 2023 einsetzen. Auch das **Bundesumweltministerium** sieht, „sollten die Verhandlungen in der IMO nicht die notwendigen Erfolge erzielen“, eine **Einbeziehung der Seeverkehrsemissionen ab 2023 in den EU-ETS als folgerichtig an**.²⁰

Mitte **April 2018** hat die IMO auf der 72. Sitzung ihres Ausschusses für den Schutz der Meeresumwelt die Resolution für die **erste Treibhausgasreduzierungs-Strategie für die internationale Schifffahrt angenommen**: Danach sollen die Treibhausgasemissionen aus der internationalen Schifffahrt so schnell wie möglich ihren Höchststand erreicht haben und **bis 2050 gegenüber 2008 mindestens 50% niedriger** sein. Die CO₂-Emissionen je Verkehrsleistung („CO₂ Emissions per Transport Work“) sollen im Durchschnitt bis 2030 um mindestens 40% und bis 2050 auf

17 BMU (2017).

18 Vgl. P8_TA-PROV(2017)0035. Kosteneffizienz von Emissionsminderungsmaßnahmen und Investitionen in CO₂-effiziente Technologien. Abänderungen des Europäischen Parlaments vom 15.2.2017 zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung der Kosteneffizienz von Emissionsminderungsmaßnahmen und zur Förderung von Investitionen in CO₂-effiziente Technologien (COM(2015)0337 – C8-0190/2015 – 2015/0148(COD))1: S. 27, Änderungsantrag 36.

19 Vgl. Erwägungsgrund 4 und die Kommentierung der EU-Kommission zu „Emissionen im Seeverkehr“: EP (2018). P8_TA-PROV(2018)0024. Kosteneffizienz von Emissionsminderungsmaßnahmen und Investitionen in CO₂-effiziente Technologien. Legislative Entschließung des Europäischen Parlaments vom 6. Februar 2018 zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung der Kosteneffizienz von Emissionsminderungsmaßnahmen und zur Förderung von Investitionen in CO₂-effiziente Technologien (COM(2015)0337 – C8-0190/2015 – 2015/0148(COD)): <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P8-TA-2018-0024+0+DOC+XML+V0//DE>

20 BMU (2017).

70% gegenüber 2008 gesenkt werden. Zudem soll es weitere Phasen des Energieeffizienz-Design-Index (EEDI) für neue Schiffe (ggf. für Schiffstypen bestimmt) geben. Weitere Arbeitsgruppensitzungen, auch in diesem Jahr noch, sollen sich für Konkretisierungen zu daraus folgenden Maßnahmenpaketen anschließen.²¹

4. Maßnahmen zur Senkung der gegenwärtigen (Treibhausgas-) Schiffs-Emissionen

Für die Schiffsindustrie gilt, dass um die Schwefelgrenzwerte einzuhalten, neben der möglichen Verwendung hochwertigerer Kraftstoffe als dem Schweröl (in der Praxis vor allem der Umstieg auf Marinediesel oder Erdgas) vor allem Abgasnachbehandlungssysteme und somit technisch umgerüstete Motoren eingesetzt werden. Zur Einhaltung der so genannten Trier III-Grenzen bei den Stickoxidemissionen kommen gegenwärtig, wenn bei Neubauten nötig, vor allem Katalysatoren und Gasmotoren zum Einsatz.

In Bezug auf die Minderung von CO₂-Emissionen hat sich bisher noch kein größerer Handlungsdruck entfaltet²². Grundsätzlich kommen zur Minderung technische und betriebliche Maßnahmen²³ in Betracht, die z.T. auch schon heute angewendet werden. Hinzu käme der Einsatz von alternativen Kraftstoffen und Antrieben. Dabei wird gegenwärtig vor allem das Potenzial des Flüssiggases LNG thematisiert und in geringem Maße bereits realisiert; synthetische und biogene Gase aus erneuerbarer Energie werden eher mittel- bis langfristig im Einsatz gesehen, dann aber als die Zukunft CO₂-neutraler-Schifffahrt. Die emissionsmindernden Potenziale von alternativen Strom-, Wind- oder Solarantrieben in der Schifffahrt werden gegenwärtig eher als ergänzende Antriebe betrachtet. Reedereien steigen derzeit noch nicht in großem Stil auf alternative Technologien um. Wenn, dann gelten laut Fachleuten in der näheren bis mittelfristigen Zukunft aber eher Hybrid-Motoren als das Mittel der Wahl.

21 Vgl. IMO (2018). UN body adopts climate change strategy for shipping. Press Release 13.4.2018: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx>

22 Beispielsweise bestehen keine einzuhaltenden CO₂-Grenzwerte, keine Verbote der Verwendung von Schweröl z.B. in europäischen Gewässern (vgl. dazu Interview mit Guido Försterling in der Beilage der FAZ vom 26.4.2018: 16) oder ein CO₂-Emissionsfolgen eingepreister Preis für Schweröl oder andere fossile Energieträger (s. dazu z.B. die Diskussion zu einer CO₂-Besteuerung) bei einem derzeit insgesamt eher niedrigen Ölpreis. Vgl. zur Forderung „Schifffahrt als Eisbrecher bei einer international harmonisierten CO₂-Bepreisung“ des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: VDMA (o. J.). Kurs „Maritime Energiewende“ – ein Dialogpapier. Frankfurt am Main: <https://mus.vdma.org/documents/266753/16327983/Dialogpapier+Maritime+Energiewende.pdf/6fa5541c-25f2-4f5f-944e-49c500f21419>

23 Zu den betrieblichen Maßnahmen gehört vor allem die **Spriteinsparung durch langsames Fahren**, wobei z.T. eine Treibstoffersparnis von bis mehr als 50% erreichbar sein soll, oder das so genannte **Wetter-Routing**, damit so wenig wie möglich der Energie gegen Wind und Wellen verbraucht wird. Zu den technischen Maßnahmen zur Optimierung des Strömungsflusses, die jeweils mehrere Prozent Treibstoffeinsparung erbringen, gehören z.B. **optimierte Schiffsrümpfe** und spezielle **Flossen vor den Antriebschrauben**, hinzu kommt der Einsatz **unterschiedlicher Propellerantriebe** oder die **Einsparung von Komponenten**. Vgl. Mirbach, Johan (2015). Sechs umweltfreundliche Schiffsantriebe. In: Deutsche Welle vom 7.9.2015; vgl. Royal Academy of Engineering 2013: 55ff.

4.1. Abgasnachbehandlung: Einsatz von Abgaswäschern und Katalysatoren

Die durch die IMO und EU gestattete **Entschwefelung** der Abgase zur Einhaltung der Grenzwerte kann über Abgasreinigungssysteme, die auch **Scrubber** genannt werden, erfolgen. Dabei müssen die gleichen Schwefeldioxid-Konzentrationen wie im Betrieb mit schwefelreduziertem Kraftstoff erreicht werden. Laut Umweltbundesamt sind dabei folgende technische Varianten auf dem Markt:

- „Offene Systeme (Open-Loop-Scrubber) nutzen die Pufferkapazität des Meerwassers, um das Schwefeldioxid aus dem Abgas zu entfernen. Das Wasser wird dabei wieder direkt ins Meer eingeleitet.
- Geschlossene Nasswäscher nutzen Frischwasser und Natronlauge, um die gewünschte Reinigungsleistung zu erzielen. Hier wird ein Großteil des Wassers im Kreis geführt, nur geringere Mengen werden ins Meer gegeben oder können für eine gewisse Zeit in Tanks gespeichert werden. Die anfallenden Reststoffe (Sludge) aus der Wasseraufbereitung müssen im Hafen abgegeben werden.
- Trockene Scrubbersysteme arbeiten mit Kalkgranulat, das komplett im Hafen entsorgt werden muss.“²⁴

Beispiele für eingesetzte **Katalysatoren zur Minderung der Stickoxid-Emissionen** sind u.a. das L' Onox-System für eine Vielzahl von unterschiedlichen Motoren, bei dem eine Harnstoff-Wasser-Lösung mit einem Druck von ca. 10 bar durch mehrere Dosiereinheiten in den Abgastrakt eingespritzt und so die effiziente Reduktion von Stickoxiden im Katalysator zu Stickstoff und Wasser unterstützt wird oder auch das SCR-System (selektive katalytische Reduktion), bei dem das Abgas mit Urea gereinigt wird und zur Minderung der Stickoxid-Emissionen um 90% führen soll.²⁵

Bisher sind Maßnahmen oder Anlagen zur Ruß- und Partikelreduktion für große Schiffsmotoren nur in geringem Umfang erprobt bzw. eingesetzt. „Grundsätzlich können auch innermotorische Maßnahmen und die Verwendung hochwertiger und schwefelarmer Kraftstoffe, die Verwendung eines Landstromanschlusses während der Liegezeit im Hafen sowie der Einsatz eines Partikelfilters solche Emissionen mindern. Da jedoch keine Grenzwerte für Partikel oder Ruß (black carbon) existieren, mangelt es auch an der Umsetzung von Maßnahmen in der Praxis.“²⁶

4.2. Umstieg auf alternative und erneuerbare Kraftstoffe

4.2.1. Von Schweröl zu Schiffsdiesel sowie Gas und Flüssiggas

Um Stickoxid- und Schwefelemissionen wirksam zu reduzieren, können grundsätzlich auch **Kraftstoffe wie Schiffsdiesel**, der auch in herkömmlichen Schiffsmotoren nutzbar ist, **oder Gas** eingesetzt werden, da beide durch ihre **geringeren Schwefelanteile** als beim Schweröl `sauberer`

24 UBA (2016). Seeschiffe.

25 Vgl. Heimann, Feliciatas (2017). Alternative Antriebstechnik in der Schifffahrt. In: KeNEXT vom 13.7.2017: <https://www.ke-next.de/specials/schiffbau/alternative-antriebstechnik-in-der-schifffahrt-111.html>

26 UBA (2016). Seeschiffe – Luftschadstoffe und Energieeffizienz.

verbrennen. Allerdings ist Diesel deutlich teurer als Schweröl und für einen Umstieg auf (Flüssig-) Gasantrieb müssen Schiffe erst umgerüstet und, insbesondere für das Flüssiggas, erst noch die notwendige Tankinfrastruktur in den Häfen aufgebaut werden.

Wegen der geringen Umrüstungsvoraussetzungen wird bei Bedarf (z.B. jetzt schon bei Einfahrten in Emissionsschutzgebiete) derzeit vorrangig Diesel eingesetzt.

Große Teile der Schiffsindustrie sehen aber eine „glänzende Zukunft für Gasmotoren in der Schifffahrt voraus“, weil der Brennstoff ebenfalls für die gegenwärtig aktuellen Emissionsminderungsthemen Schwefel, Stickoxid (und bedingt Partikel), wenn auch noch (s. dazu aber Power-to-Gas) nicht für die CO₂-Emissionen, eine Lösung bietet.²⁷

Gegenwärtig vollzieht sich eine Einführung von Gas in den Schiffsverkehr noch eher verhalten²⁸. **Gasmotoren** werden derzeit **hauptsächlich in der Kombination mit anderen Motoren** verwandt, z.B. Dieselmotoren. Die Gasturbinen werden dann vor allem bei höheren Geschwindigkeiten eingesetzt. Auf Fahrgastschiffen kommen Gasturbinen zur Reduzierung von Emissionen in den genannten Emissionsschutzgebieten oder in Häfen schon heute häufiger zum Einsatz.

Als bedeutende Alternative wird (nicht nur zum Schweröl, sondern auch zum Schiffsdiesel) die Verwendung von **Flüssiggas Liquefied Natural Gas (LNG)** gesehen. Dabei handelt es sich um Erdgas, das auf ca. minus 160 Grad abgekühlt und dabei verflüssigt und komprimiert wird. 2015 gab es weltweit knapp 500 LNG-Tanker, die den Treibstoff transportierten und ihn dabei auch für den eigenen Antrieb nutzten, weitere knapp 60 Schiffe (zumeist Fähren, Versorgungsschiffe für Bohrinseln oder Schlepper) nutzten das Flüssiggas als Treibstoff.²⁹ Aktuell werben vor allem Kreuzfahrtschiffe, die insgesamt 0,6% der zivilen Schifffahrt ausmachen, damit, dieses bzw. kommendes Jahr bei ersten Schiffen auf LNG umzustellen.³⁰ Der Einsatz von Flüssigerdgas als Treibstoff reduziert Schwefel- (schwefelfrei), Stickoxid-(-85%) und Feinstaubemissionen (-95%) signifikant und führt zu einem etwa 20% geringeren Kohlendioxidausstoß im Vergleich zur Verbrennung von Diesel oder Schweröl. Allerdings kann es unter bestimmten Umständen durch geöffnete Ventile bei Viertakt-Motoren und bei einer unvollständigen Verbrennung des Gas-Luft-Gemisches zum sogenannten Methanschlupf (Entweichen von Methan) kommen. Zwischen 1% und 2% unverbrannten Methans könnten beim Viertakter im LNG-Abgas enthalten sein; da Methan etwa 30-mal klimaschädlicher als Kohlendioxid ist, würden damit die CO₂-Vorteile des Gasantriebes in dem Fall hinfällig.³¹

27 Vgl. Heimann, Felicitas (2017).

28 Allerdings verweist der Verband Deutscher Ingenieure darauf, dass 2016 von den 30 Schiffsmotorenherstellern neun Gasmotoren herstellten. Vgl. VDI-Nachrichten vom 12.2.2016.

29 Vgl. Schröder, Tim (2015).

30 Vgl. Grüne Welle für Kreuzfahrtschiffe. In: Beilage zur FAZ vom 26.4.2018: 16.

31 Vgl. Heumer, Wolfgang (2017). Schiffstechnik. Zweitaktschiffsmotor vermeidet Methanschlupf. VDI Nachrichten vom 27.11.2017: <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik/Zweitaktschiffsmotor-vermeidet-Methanschlupf>

Der Naturschutzbund Deutschland (NABU) verweist neben dem Problem des möglichen Methanschlupfes (auch beim Bunkering selbst) zudem darauf, dass bei einer Einbeziehung der Betrachtung von Produktionsprozessen und Lieferketten von LNG der LNG-Brennstoffeinsatz auch nur unter bestimmten Bedingungen zu einer Minderung von CO₂-Emissionen beiträgt und künftig beitragen wird.³²

Einer mittelfristigen Verwendung der Technologie in der Breite stünde infrastrukturell bisher vor allem entgegen, dass nur wenige Häfen über LNG-Tankstellen verfügen - wobei ein Ausbau stattfindet und auch in Deutschland intensiv darüber diskutiert wird³³ -, und finanziell, dass eine zusätzlich benötigte Isolierschicht für den LNG-Antrieb die Kosten für ein Schiff um bis zu 30% verteuern kann sowie sich die Staufläche durch benötigte voluminösere Tanks reduziert.³⁴

4.2.2. Verwendung erneuerbarer Kraftstoffe

Grundsätzlich würde eine (beginnende und ansteigende) Nutzung synthetisch oder biologisch erzeugter erneuerbarer, weitgehend CO₂-neutraler Kraftstoffe in der Schifffahrt noch deutlicher zu den angestrebten Treibhausgas-Emissionsminderungen beitragen können.

Bisher kommt es eher vereinzelt zur Verwendung von **Methanol, Ethan oder Wasserstoff** als alternativem Treibstoff in der Schifffahrt („Stena Line launched the world’s first methanol powered ferry“, „Kawasaki Heavy industry is designing liquid hydrogen carriers“). Für den normalen Frachtverkehr bleiben erneuerbare Kraftstoffe weiterhin eine Ausnahme (zumah ihre **Produktionskosten** – noch - deutlich höher sind). Zwar bieten einige Motorenhersteller schon so genannte Dual-Fuel-Technologie an³⁵, bei der sowohl herkömmliche als auch alternative erneuerbare Kraftstoffe verwendet werden können. Doch besteht für die konkrete Verwendung dieser alternativen Kraftstoffe vor allem das **Problem der Verfügbarkeit** über Bunker und dem **Mangel an Verteilernetzen**. Dabei scheint es für Experten der Schifffahrtforschung gegenwärtig eher unwahrscheinlich, nachdem Häfen und Gaskonzerne zurzeit höhere Summen in den Aufbau einer Infrastruktur

32 Der NABU verweist dabei auf eine Studie des International Council of Clean Transportation, die in der Analyse von acht untersuchten Produktions- und Lieferketten von LNG eine maximal mögliche 18%ige-Einsparung von CO₂-Äquivalenten gegenüber anderen untersuchten konventionellen erdölbasierten Brennstoffen in der Schifffahrt ausweist, wobei für einen „pathway“ aber sogar 5% Mehremissionen ausgemacht wurden. Vgl. International Council of Clean Transportation (Ed.); Lowell, Dana; Wang, Haifeng; Lutsey, Nic (2013). Assessment of the fuel cycle impact of liquefied natural gas as used in international shipping. White Paper: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTwhitepaper_MarineLNG_130513.pdf; 2. Vgl. auch NABU (2016). LNG als Schiffstreibstoff: <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/161125-nabu-position-lng.pdf>

33 Vgl. dazu Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017). Fachworkshop im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Runder Tisch „LNG in der Binnen- und Seeschifffahrt“ am 5. Mai 2017: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/runder-tisch-lng-schifffahrt-dokumentation.pdf?blob=publicationFile>

34 Vgl. Schröder, Tim (2015).

35 Wobei dabei gegenwärtig zumeist (noch) der wechselnde Betrieb von Diesel/Schweröl und Erdgas/LNG umgesetzt wird.

für eine künftige umfassendere LNG-Versorgung investieren, dass weitere Investitionen in großem Umfang in zusätzliche (erneuerbare) Kraftstoffarten getätigt werden³⁶. – Eine weitere Möglichkeit kurzfristigen Einstiegs erneuerbarer Kraftstoffe in die Schifffahrt wäre aber auch die Verwendung gemischten Dieselöls.

In der Betrachtung eines mittelfristigen Zeithorizonts wird in diesem Zusammenhang die mögliche ansteigende Nutzung von **LNG als** Treibstoff durchaus auch positiv gewertet, wenn diese als **Brückentechnologie**³⁷ dient, um den **Einstieg in Power-to-Gas /Power-to-Liquid-Prozesse** vorzubereiten, bei denen aus Strom aus erneuerbarer Energie gasförmige oder flüssige synthetische Kraftstoffe CO₂-`neutral` hergestellt werden.³⁸ Möglich wäre (gesprochen wird beispielsweise von einem Anteil von Wind- und Sonnenenergie von 60-80% am gesamten Energiemix), dass künftig dann aus überschüssigem erneuerbarem Strom über die Elektrolyse aus Wasser speicherbarer Wasserstoff hergestellt oder über die Methanisierung synthetisches Erdgas (Biomethan) als Treibstoff für die Schiffe erzeugt würde.³⁹ Dabei blieben die bisherigen dann modernen Diesel- und Gasmotoren mit Umrüstungen die prägende Antriebstechnologie in der Schifffahrt.

4.3. Alternative Schiffsantriebe

4.3.1. Windgetriebene oder windassistierende Antriebe

Der flächendeckende Einsatz von Windkraft/Windenergie für die Schifffahrtsindustrie wird mehrheitlich nicht als universelle Lösung zur Deckung eines CO₂ geminderten Antriebsbedarfs gesehen. Schwierigkeiten werden vor allem darin ausgemacht, dass die Windenergie nicht allein in der Lage ist, die "Leistungsdichte" zu bieten, die notwendig ist, um einen 50-MW-großen Zweitakt-Schiffsdieselmotor zu ersetzen und die Windkraft auch auf einigen Handelsrouten keine Zuverlässigkeit und Berechenbarkeit bietet. Allerdings werden durchaus **größere Potenziale für bis zu zweistelligen Kraftstoffeinsparungen** gesehen, wenn **Windantriebe assistierend eingesetzt** werden. Daher gelten die windassistierenden Antriebe als die **erneuerbaren Antriebstechnologien mit den größten Realisierungsoptionen**. Unterschiedliche Technologievarianten im Bereich der Nutzung der Windenergie sind vorhanden – die wichtigsten werden nachfolgend kurz dargestellt. Die Herausforderung wird darin gesehen, diese Technologien sowohl teilweise noch konkret umzusetzen, sie aber vor allem so weiterzuentwickeln, um sie an die kommerziellen, technischen und regulatorischen Herausforderungen der Schifffahrt anzupassen.⁴⁰

36 Vgl. Pospiech, Peter (2016). Auf der Suche nach alternativen Schiffsantrieben. In: VEUS Shipping vom 30.4.2016.

37 So bezeichnet auch Ralf Brauner, Professor für Seefahrt und Logistik an der Jade-Hochschule, Flüssiggas als Brücke in den Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen in der Schifffahrt. Vgl. dazu Deutschlandfunk (2017). Hybridmotoren auf hoher See. Beitrag vom 11.12.2017.

38 Vgl. VDMA (o. J.). Kurs Maritime Energiewende: Punkt 3+4.

39 Vgl. VDI-Nachrichten vom 26.11.2017.

40 Vgl. The Royal Institution of Naval Architects (RINA) (2017). Power & Propulsion Alternatives for Ships. Conference 8th November 2017 in Rotterdam: <https://www.rina.org.uk/Alternative-ship-power>

4.3.1.1. Segelmaster

Reine Segelschiffe als Handelsfrachtschiffe gibt es bis auf eines weltweit nicht. Dabei handelt es sich um das Segel-Frachtschiff "Tres hombres" der niederländischen Firma Fairtransport, die sich explizit dem Ziel verpflichtet hat, klimaneutral Waren nach Europa zu transportieren, und dafür das Segelschiff einsetzt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden dabei aber zusätzlich Passagiere (ca. 3.000 Euro pro P/Törn) befördert.

Für einen wirtschaftlichen Segelmaster-Fracht-Transport ist die Zusatzantriebstechnologie mit **blattartigen Segelmasten (Dyna Rigg masts)** konzipiert worden. Das Dyna-Rigg ist dabei eine Weiterentwicklung der alten Windjammertechnik mit jedoch einem automatischen Segelsystem, das bereits in den 1960er Jahren entwickelt wurde, so dass die Segel nicht mehr wie bei den Frachtern der Vergangenheit von einer großen Mannschaft bedient werden müssen. Erstmals haben Konstrukteure das vollautomatische Rigg Mitte der zweitausender Jahre bei einer großen Yacht eingebaut.

In den Medien wurden einzelne größere Bauvorhaben vorgestellt, wobei zum jetzigen Zeitpunkt nicht eruierbar ist, ob sie auch abgeschlossen sind:

Vorgesehen waren in den letzten Jahren der Bau eines 8.000-Tonnen-Frachtseglers „**Ecoliners**“ mit dem Dyna-Rigg-System (u.a. unter Beteiligung von Mitarbeitern des Helmholtz-Forschungszentrums Geesthacht bei Hamburg), bei dem sich vier große, blattartige Segel, welche den Treibstoffverbrauch beim Betrieb (des Hybrid-Motors) um 30% senken sollen, erheben.⁴¹



42

41 Vgl. Schröder, Tim (2015); vgl. auch <http://www.ecoliners.eu/>; <http://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/sendung/frachtsegler-100.html>

42 Dykstra Naval Architects (2014). Ecoliner Project: <http://www.dykstra-na.nl/designs/wasp-ecoliner/>

Auch in England wurde 2014 mit der Konstruktion eines 3.000-Tonnen Frachtschiffs „**B9-Ship**“ als Dreimaster mit Dyna Rigg masts begonnen.⁴³

Die Hamburger Reederei Sailing Cargo setzt mit mehreren Partnern derzeit mit dem Prinzip der DynaRigs masts das „**Quadriga Projekt**“ zum „Bau des größten Segelfrachters der Neuzeit“ (170m Länge) um.⁴⁴

4.3.1.2. Zugdrachen

Der Einsatz von riesigen, dem Schiff vorgespannten Lenkdrachen entspricht einer modernen Variante des Segels. Bei relativ geringerem finanziellem Zurüstungsaufwand erreichen sie eine Höhe von bis zu 500 Metern und können dort die starken Winde nutzen.

Drachen, die auch vereinzelt kleinere Containerschiffe ziehen, gibt es schon im Testbetrieb. Die Hamburger Firma SkySails hat sie erstmals umgesetzt. Auf dem Containerschiff „**BCC Skysails**“ kommt seit 2007 ein 160 Quadratmeter großer, computergesteuerter Flugdrachen zum Einsatz, der in 100 bis 300 Metern Höhe fliegt und das Schiff mit einer maximalen Zugkraft von drei Tonnen zieht. Die Geschwindigkeit des Schiffs liegt bei 3,5 Knoten. Die Treibstoffkostenersparnis wird von Skysails mit 10-35% angegeben. Auch der 3.700-Tonnen-Frachter „**MS Theseus**“ hat einen Zugdrachen. Ende 2011 hat Skysails einen Zugdrachen mit der doppelten Fläche auf einem weiteren Handelsschiff installiert.⁴⁵

Durchgesetzt hat sich das System bisher (noch) nicht. Als schwierig gilt, dass das System ideale Bedingungen für eine angegebene Treibstoffersparnis benötigt. Diese sind aber nur bei direktem starkem Rückenwind gegeben; eine Ausrichtung der Route allein am Wind erscheint schwierig; nur bestimmte Routen gelten als einsparträchtig. Für Reeder mit kleineren Einheiten wie Küstenmotorschiffen könnten laut Schiffsexperten die Zugdrachen künftig eventuell interessant sein.

43 Vgl. Manager-Magazin (2014). Hybridvarianten mit Wind: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/handel/logistik-5-innovationen-die-den-gueterverkehr-revolutionieren-koennen-a-1000758-5.html>; vgl. auch <http://www.b9energy.co.uk/B9Shipping/tabid/4036/language/en-US/Default.aspx>

44 Siehe dazu: <http://nauteo.de/maritime-news/schiffbau/item/708-lloyds-register-beteiligt-sich-am-bau-des-groessten-segelfrachters-der-neuzeit>; https://www.marinelog.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=26893:project-plans-to-build-worlds-largest-sailing-cargo-ship&Itemid=257; <http://gcap-tain.com/construction-worlds-largest-cargo-sailing-ship-moves-step-closer-reality/>; Quadriga-Projekt (2018): <http://nextgeneration-cargo.com/>

45 Siehe dazu: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/handel/logistik-5-innovationen-die-den-gueterverkehr-revolutionieren-koennen-a-1000758-5.html>; <https://www.welt.de/regionales/hamburg/article1567725/Drachen-zieht-erstmal-modernen-Frachter.html>



46

4.3.1.3. Flettner-Rotoren

Anfang der 1920er Jahre wurde von Anton Flettner ein Dreimastschoner erstmals zu einem **Rotorschiff mit Walzensegeln** umgebaut. Jede der beiden Walzen hatte 2,8 m Durchmesser, eine Höhe von 18,3 m über Deck und wurde durch einen 7,5 kW starken Elektro-Hilfsmotor angetrieben.



47

Durch die der Windströmung ausgesetzten **rotierenden Zylinder** wird durch den Magnus-Effekt eine Kraft quer zur Anströmung erzeugt. Der Rotor wird mit einer an die herrschende Windgeschwindigkeit angepassten Geschwindigkeit gedreht.

Im Einsatz mit Flettner-Rotoren befindet sich seit 2010 nur das „**E-Ship 1**“, ein 130 Meter langes Hybrid-Frachtschiff (mit zwei 3,5 MW Dieselmotoren) mit vier Flettner-Rotoren. Als nachteilig

46 Skysails GmbH Hamburg (2018): <http://www.skysails.info/skysails-marine/skysails-antrieb-fuer-frachtschiffe/>

47 Royal Academy of Engineering (2013): 47

wirken für kommerzielle Handelsschiffe die erforderlichen großen Aufbauten an Deck und Die Notwendigkeit des Vorhandenseins von Wind.⁴⁸

4.3.1.4. Rumpfsegler

Als gänzlich neues Design gilt der Rumpfsegler für den Frachter „**Vindskip**“, der von dem norwegischen Ingenieur Terje Lade (z.T. auch mit Hilfe staatlicher Fördermittel) entwickelt, bisher aber noch nicht umgesetzt wurde. Dabei hat der Rumpf die **Form eines hochkant gestellten Flugzeugflügels**. Streicht Wind am Rumpf entlang, entsteht eine Kraft, die das Schiff voranschleibt – dies allerdings nur, wenn der Wind aus dem richtigen Winkel optimal anströmt und möglichst viel Vortrieb erzeugt. Durch den strömungsoptimierten Längsschnitt entstehe so laut Ingenieur ein Effekt wie bei einem Segelschiff, das hart am Wind segelt. Zusätzlich soll ein Motor für Flüssiggas zur Verfügung stehen. Daneben sollen über Board-Computer Verfeinerungen des (Wetter-) Routings eingesetzt werden, die mit dem Fraunhofer Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen in Hamburg gemeinsam erarbeitet wurden. Laut Lade ließen sich damit für bestimmte Strecken bis zu 60 % des Brennstoffs und bis zu 80 % der Schadstoffemissionen einsparen. Vor zwei Jahren war die Hoffnung formuliert worden, dass die erste Umsetzung des Rumpfseglers 2019 erfolgen könne. Derzeit finden sich keine weiteren Angaben dazu auf der Projektseite.⁴⁹



50

48 Vgl. Royal Academy of Engineering (2013). FUTURE SHIP POWERING OPTIONS. Exploring alternative methods of ship propulsion. July 2013. <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/future-ship-powering-options> : 47f.

49 Vgl. dazu Schröder, Tim (2015), aber auch <http://www.bbc.com/news/business-27257957> ; <https://www.welt.de/wirtschaft/article130072700/Segelnder-Frachter-soll-Schiffahrt-revolutionieren.html> 4.2014 ; <http://www.ladeas.no/about.html>

50 LadeAs (2018). Project Vindskip: <http://www.ladeas.no/media.html>

4.3.2. Elektrische und Hybrid-elektrische Antriebe

Der reine Elektroantrieb scheint gegenwärtig mit der heutigen Batterietechnik für große Tanker und Containerschiffe (noch) unrealistisch. Bleibatterien sind zu groß und zu schwer, Lithium-Ionen-Batterien zu teuer; auch insgesamt schliesse sich ein vernünftiger Einsatz allein auf Grund der Größe des benötigten Batterieparcs aus (ein Schiffstransfer eines großen Containerschiffes von Hamburg nach Shanghai benötigt ca. 30 GWh).⁵¹ Aber an Elektroantrieben für Containerschiffe wird durchaus in Testverfahren gearbeitet.⁵²

Elektrisch betriebene Freizeitboote sind z.T. schon gängig (netzbetriebener Batteriebetrieb, oder über Sonnenkollektoren oder Windturbinen geladene Batterien), vereinzelt gibt es auch schon erste batteriebetriebene elektrische Fähren. Auch bei den Kurzstrecken-Schiffen, Behördenschiffen oder Schleppern wird von Fachseite Wachstumspotenzial für die mittelfristige Zukunft ausgemacht.⁵³

Hybrid-elektrische Antriebe sind bereits auch bei größeren Schiffen im Einsatz. So wird ein diesel-elektrischer Antrieb schon bei verschiedenen Arten von Schiffen verwendet, wie z. B. Kriegsschiffen, Schleppern, Baggern, Eisbrechern, Kreuzfahrtschiffen und auch Fähren. Die Antriebe haben zwar höhere Investitionskosten, böten aber Vorteile einer höheren Effizienz, Flexibilität beim Lauf im bestimmten Drehzahlbereich, geringerer Geräuschintensität und Vibrationen und Freiheiten in der Design-Umsetzung. Dabei können die Motoren optimal eingesetzt und viele der Lastschwankungen durch die Batterien absorbiert werden.⁵⁴

„**Bei Containerschiffen** könnte man sich zum Beispiel im Kurzstreckenverkehr solche Anwendungen [hybrid-elektrischer Antriebe] vorstellen, etwa bei den sogenannten Feederschiffen, die kurz hintereinander viele Häfen anlaufen. Aber auch in sehr umweltempfindlichen Bereichen wie etwa in Skandinavien werden Hybridsysteme als erstes in Containerschiffen zum Einsatz kommen. Ein anderes Einsatzgebiet ist das Einlaufen und Manövrieren in Häfen. Dass die Schiffe auf elektrische Antriebe umschalten, um das Schiff umweltschonend und maschinenschonend in den Hafen zu bringen.“⁵⁵

Insgesamt stehen gerade **im Bereich der Batterietechnologie** derzeit und in den kommenden Jahren umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an, die auch zu weiteren Optionen in

51 Vgl. Schröder, Tim (2015).

52 Siehe dazu den maritimen Dienstleister DNV GL zum Modell eines Containerschiffs „Revolt“:
<https://www.dnvgl.de/>

53 Vgl. Hauke Schlegel (VDMA) zit. nach Heimann, Felicitas (2017). Interview mit Hauke Schlegel zu Grünen Schiffsantrieben. Elektrische Antriebe für Schiffe sind noch ferne Zukunft. In: KeNEXT vom 13.7.2017:
<https://www.ke-next.de/specials/schiffbau/elektrische-antriebe-fuer-schiffe-sind-noch-ferne-zukunft-119.html>

54 Vgl. The Royal Institution of Naval Architects (2017). All electric and hybrid electric:
<https://www.rina.org.uk/Alternative-ship-power>

55 Schlegel, Hauke (2017).

der Schifffahrt führen können. Als nicht unproblematisch im Sinne der CO₂-Bilanz sind dabei aber auch die Erzeugung der Batterien und ihre Lebensdauer zu betrachten.⁵⁶

Solar-Antrieb

Im Hinblick auf die Entwicklung von effektiveren **Leichtbau-Solarmodulen**, die für den Einsatz auf hoher See geeignet sind, gab es in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte. Kombinierte Solarenergie **plus Batterien** wurden erfolgreich für eine Reihe kleiner kommerzieller Schiffe eingesetzt. Gegenwärtig können Sonnenkollektoren allein jedoch nicht die Energie bereitstellen, die für den Antrieb eines großen Schiffes benötigt wird. Der Einsatz von Solarmodulen gilt derzeit daher vor allem als eine **wichtige alternative Energiequelle für Bordelektroniksysteme** und als **Hybrid-Variante zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs des Schiffes** insgesamt.⁵⁷

Als künftige Einschränkungen für einen solaren Hauptantrieb für große Schiffe werden gegenwärtig vor allem die Volatilität der Energiequelle durch die Wetterbedingungen, die unterschiedliche Wolkenbedeckung und abhängige Winkelstellung der Solarmodule, aber auch die Notwendigkeit einer relativ großen Verfügbarkeit von Raum für die Photovoltaik-Module bei begrenzter Deckfläche angeführt.

Als mögliche Technologie, um die verfügbare Fläche für Sonnenkollektoren zu erhöhen, wird die Platzierung von **mastartigen Segelstrukturen** auf dem Deck gesehen (z.B. in der Kombination mit der Windnutzung über die Segel). Die Wirksamkeit eines Panels hinge dabei aber auch von dessen Beweglichkeit und Ausrichtungsfähigkeit ab. Aber auch diese Konzeptualisierungen werden derzeit noch eher als zusätzliche Energiebereitstellung im Rahmen eines Hybrid-Systems für größere Schiffe verortet.⁵⁸ Der erwähnte schon stattfindende Einsatz von Solarmodulen bei kleineren Schiffen erfolgt zum Teil auch über mastartige Strukturen.

56 Vgl. The Royal Academy of Engineering (2013): 41f.

57 Vgl. The Royal Institution of Naval Architects (2017). Solar: <https://www.rina.org.uk/Alternative-ship-power>

58 Vgl. Royal Academy of Engineering (2013): 49.



Figure 3.16 An image of a combination of solar and wind energy from Solar Sailor
© Solar Sailor 2013

59

4.3.3. Atom-Antrieb

In mit Kernkraft angetriebenen Schiffen erhitzt ein Kernreaktor Wasser, um Dampf zum Antrieb der Turbinen zu erzeugen. Der nukleare Schiffsantrieb ist nicht neu, er wurde zuerst in das U-Boot-Umfeld (mit dem Vorteil, lange Zeit mit relativ hoher Geschwindigkeit und ruhig fahren zu können) eingeführt, zusammen mit einer strengen Auswahl, Ausbildung und Schulung der Besatzung⁶⁰. Der Atomantrieb stellt aber eher eine Ausnahme für Militär- und Spezialschiffe wie Eisbrecher (z.B. die Arktika) dar. Nur wenige Kreuzer haben auch Atomkraft eingesetzt (z.B. die russische Kirov-Klasse). Kommerzielle Experimente wie NS Savannah als „first nuclear-powered cargo ship“ haben sich im Nachhinein als nicht wirtschaftlich erwiesen; so muss der Reaktor wegen der Strahlung im Schiff aufwendig abgeschirmt werden.

Da der Atomantrieb bei Lieferung eines hohen Energiegehalts als CO₂-`neutral` gilt, wird sehr vereinzelt auch über seinen möglichen Einsatz im kommerziellen Bereich diskutiert. Mehrheitlich gelten solche **Überlegungen** aber **wegen der Risiken bei einer Havarie** (neben den ungeklärten Fragen des Umgangs der Lagerung des Atommülls) als **nicht umsetzbar**.⁶¹

59 Vgl. Royal Academy of Engineering (2013): 49.

60 Vgl. The Royal Academy of Engineering (2013): 33f, 40.

61 Vgl. Mirbach, Johan (2015).