Verringerung der Emissionen von Kreuzfahrtschiffen am Kreuzfahrtterminal in der Hafencity

Vorläufiger Komplettentwurf 02

Bericht Nr. ERD 2008.060 Version 01/2008-03-03

Abteilung ERD

Berichtskontrollblatt

Auftraggeber: Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Wirtschaft und Arbeit 20421 Hamburg	Bestell-Nr. / Auftragseingang: Anschreiben der FHH BWA vom 21.01.2008: Annahme des Angebotes vom 17.01.2008
Titel: "Verringerung der Emissionen von Kreuzfahrtschiffen"	
Kurzbeschreibung: Im Auftrag der Behörde für Wirtschaft und Arbeit der Freien und Hansestadt Hamburg hat der Germanische Lloyd ein Gutachten zu Möglichkeiten der Verringerung der Emissionen von Kreuzfahrtschiffen im Hamburger Hafen erarbeitet. Das Gutachten soll als Grundlage für eine politische Bewertung eines Landstromanschlusses am Kreuzfahrtterminal in der Hafencity dienen. Es konzentriert sich auf die Emissionen von Kreuzfahrtschiffen im Hinblick auf Fragen der Luftreinhaltung. Gesichtspunkte des Umweltschutzes werden nicht explizit angesprochen. Soweit sinnvoll und notwendig werden unterschiedliche Aussagen zu existierenden Schiffen und zu Neubauten gemacht.	
Abteilung: ERD	

Bearbeiter	freigegeben
Dipl.-Ing. René Cengiz Dipl.-Ing. Thomas Hartmann Dr.-Ing. Gerd Würsig Dipl.-Ing. Ralf Plump	Dr.-Ing. Reinhard Krapp (Leitung der Abteilung Strategische Forschung)
Ausgabe Nr.: 02	Datum der letzten Ausgabe: 2007-03-17

Schlüsselwörter	Seitenzahl	Status
	im Hauptteil : im Tabellenteil : im Bildteil : in Anhängen :	☒ Entwurf ☐ abgeschlossen ☐ GL intern
	Bericht Nr.: ERD 2008.060 GL Auftrags-Nr.: 7970 08 10653 194 GL Reg. Nr.: --------	

INHALT

1 Aufgabenstellung 7
2 Einleitung 8
3 Beschreibung der Kreuzfahrtterminals 10
4 Untersuchung der Emissionen der Kreuzfahrtschiffe 12
4.1 Anläufe von Kreuzfahrtschiffen in 2008 und Prognose 2010 12
4.1.1 Anläufe von Kreuzfahrtschiffen in 2008 12
4.1.2 Struktur der anlaufenden Schiffe 2008 und Prognoseansatz für 2010 13
4.2 Emissionsquellen im Schiffbetrieb am Liegeplatz („Hotelbetrieb“) 16
4.2.1 Abgasemissionen und Brennstoffverbräuche von Diesel-Generatoren 16
4.2.2 Abgaszusammensetzung der Dieselmotoren 16
4.2.3 Hilfskesselbetrieb und –emissionen 19
4.3 Ermittlung von Leistungsbedarfen für das Ein- und Auslaufen und den „Hotelbetrieb“ (Liegezeiten an der Pier) 20
4.3.1 Berechnung der erforderlichen elektrischen Energie- und Leistungbedarfe für das Ein- und Auslaufen 20
4.3.2 Berechnung der erforderlichen Leistungs- und Energiebedarfe/Liegezeit am Terminal („Hotelbetrieb“) 21
4.3.3 Berechung der erforderlichen Leistungs- und Energiebedarfe für den Hilfskesselbetrieb (Dampf- bzw. Wärmeerzeugung) 21
4.3.4 Exemplarisches Beispiel für Leistungsbedarfe im „Hotelbetrieb“ 22
4.4 Analyse der voraussichtlichen Emissionen im Jahre 2008 24
4.4.1 Exemplarischer Vergleich der Emissionsanteile beim Ein- und Auslaufen Hamburg 24
4.4.2 Emissionsermittlung für 2008 während der Liegezeiten 29
4.4.3 Emission aus dem Hilfskesselbetrieb in 2008 während der Liegezeiten 31
4.4.4 Veränderungen bei den Grenzwerten für Schiffsemissionen 33
5 Möglichkeiten zur Verringerung der Emissionen während der Liegezeit 35
5.1 Gase als Brennstoff für Schiffe 35
5.1.1 Rechtliche und sicherheitstechnische Rahmenbedingungen 35
5.1.2 Notwendige Installationen an Bord 36
5.1.3 Gasversorgung und Gaslagerung an Bord 37
5.1.4 Zusammenfassung 38
5.2 Verbrennung von Gasen in Motoren und Kesseln 38
5.2.1 Stand der Technik und Ausblick 38
5.2.2 Notwendige Installationen an Bord 44
5.2.3 Zusammenfassung 45
5.3 Brennstoffzellen zur Energieerzeugung 47
5.3.1 Stand der Technik und Ausblick 48
5.3.2 Brennstoffzellen an Bord und an Land 50
5.3.3 Installationen an Bord 53
5.3.4 Zusammenfassung 53

5.4 Abgasaufbereitung 54
5.4.1 Stand der Technik und Ausblick 54
5.4.2 Abgasaufbereitung und notwendige Installationen an Bord 63
5.4.3 Abgasaufbereitung an Land 64
5.4.4 Zusammenfassung 66
5.5 Landstromversorgung 67
5.5.1 Beispiel-Installation für ein Kreuzfahrtterminal 67
5.5.2 Problematik 68
5.5.3 Leistungsbedarf Hotelbetrieb 74
5.5.4 Standardisierung und Normung 75
5.5.5 Zusammenfassung 76
6 Prognosen für das Jahr 2010 77
6.1 Anzahl der Schiffsanläufe und erwartete Schiffsgrößen 77
6.2 Prognose der Emissionen in 2010 77
6.2.1 Emissionen aus Generatorbetrieb an Bord der Schiffe 77
6.2.2 Emissionen aus Hilfskesselbetrieb 80
6.2.3 Emissionen aus Generator- und Hilfskesselbetrieb an Bord der Schiffe 81
7 Analyse der möglichen Verringerung der Emissionen 82
7.1 Vergleichende Beurteilung der Möglichkeiten 82
7.2 Zusammenfassung und Vorschlag 82
8 Quellenangaben 1

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1: Lageplan des Kreuzfahrtterminals in der HafenCity/ 7
Abb. 3-1: Lage der Kreuzfahrtterminals in der HafenCity, Fluss-Km 621 10
Abb. 3-2: Lage des geplanten Kreuzfahrtterminals in HH-Altona, Fluss-km 625 11
Abb. 4-1: Übersicht der Kreuzfahrtschiffe mit den geplanten Anläufen in HH in 2008 12
Abb. 4-2: Schiffslängen über Baujahr 13
Abb. 4-3: Passagierkapazitäten über Baujahr 14
Abb. 4-4: Zusammensetzung des Abgases eines 4-Takt Dieselmotors (Propellerkurve, 75% Last, Brennstoff mit 2,2% Schwefelgehalt) 18
Abb. 4-5: Aufteilung der Leistungsbedarfe in % eines modernen Kreuzfahrtschiffes mit 2000 Passagieren im Sommerbetrieb am Liegeplatz (100% = 8,0 MW) 22
Abb. 4-6: Aufteilung der Leistungsbedarfe in % eines modernen Kreuzfahrtschiffes mit 2000 Passagieren im Winterbetrieb am Liegeplatz (100% = 6,4 MW) 22
Abb. 4-7: Anteile der Gesamtemissionen von/bis Wedel/Schulau eines 2000-Passagierschiffes mit diesel-elektrischen Antrieb 25
Abb. 4-8: Anteile der Gesamtemissionen von/bis Wedel/Schulau eines 600-Passagierschiffes mit konventionellem Antrieb 25
Abb. 4-9: Emissionen zweier Schiffe nur Ein- und Auslaufen Hamburg Schiff A: 600-Passagierschiff mit konventionellem Antrieb Schiff B: 2000-Passagierschiff mit diesel-elektrischem Antrieb 26
Abb. 4-10: Emissionen zweier Schiffe nur Liegezeit in Hamburg / „Hotelbetrieb“ Schiff A: 600-Passagierschiff mit konventionellem Antrieb Schiff B: 2000-Passagierschiff mit diesel-elektrischem Antrieb 27
Abb. 4-11: Vergleich der Emissionen Liegezeit / Ein- und Auslaufen, 600-Passagierschiff mit konventionellem Antrieb 27
Abb. 4-12: Vergleich der Emissionen Liegezeit / Ein- und Auslaufen, 2000-Passagierschiff mit diesel-elektrischem Antrieb 28
Abb. 4-13: Voraussichtlicher Energieumsatz der Schiffe pro Monat 2008 in [MWh] 29
Abb. 4-14: Voraussichtlicher Energieumsatz im Mai 2008 30
Abb. 4-15: Voraussichtlicher Energieumsatz im Oktober 2008 30
Abb. 4-16/1: Gegenüberstellung Motoren- und Hilfskesselemissionen 2008 (logarithmische Auftragung) 32
Abb. 4-16/2: Gegenüberstellung Motoren- und Hilfskesselemissionen 2008 (anteilige Auftragung) 32
Abb. 4-17: MARPOL Annex VI, Regulation 13, Tier I, Tier II and Tier III (NOx limit curves) 33
Abb. 5-1: Volumenbedarf unterschiedlicher Brennstoffe bei gleichem Energieinhalt 37
Abb. 5-2: Schematische Darstellung der Gemischbildung bei einem Gasmotor mit Gemischaufladung 39
Abb. 5-3: Schematische Darstellung der Gemischbildung bei einem Gasmotor mit Gaseindüsung vor dem Brennraum (Gas-Drucksystem) 39
Abb. 5-4: Schematische Darstellung der Gemischbildung bei einem Gasmotor mit direkter Gaseindüsung in den Brennraum (Gas-Hochdrucksystem) 40
Abb. 5-5: Unterteilung von Brennstoffzellen nach ihrem Elektrolyten 47
Abb. 5-6: Entwicklungsstand BZ-Technologie im Jahr 2007 49
Abb. 5-7: Wirkungsgrade und Leistungen unterschiedlicher Energiewandler, ... 50
Abb. 5-8: Anwendungsfelder von Brennstoffzellen für Schiffe 51
Abb. 5-9: Einsatzmöglichkeiten für BZ Systeme auf Schiffen nach FCSHIP 52
Abb. 5-10: Lastdauerkurve einer Fähre über einer Woche, FC: Brennstoffzellen, GT: Gasturbine 52
Abb. 5-11: Schematische Darstellung einer Abgaswäscheranlage 56
Abb. 5-12: Schematische Darstellung des Scrubbers, ... 57
Abb. 5-13: Scrubber für die „Pride of Kent“ 57
Abb.: 5-14: Partikelzusammensetzung in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt des Brennstoffes (ISO 8178 Methode) 59
Abb. 5-15: Zusammenhang zwischen Partikelmasse und Schwefelgehalt des Brennstoffes 60
Abb. 5-16 Schematische Darstellung eines Partikelfilters 61

Abb. 5-17: Darstellung eines Partikelfiltersystems 62
Abb. 5-18: Abgasabsaugung am Schornsteinaustritt, realisierte Lösung an der Westküste USA, ... 65
Abb. 5-19: Beispiel-Installation für ein 60 Hz – Landnetz 67
Abb. 5-20: Landnetz-Frequenzen, weltweit 69
Abb. 5-21: Motor-Generator Satz 70
Abb. 5-22: Statischer Konverter 70
Abb. 5-23: Landstromversorgung aus einem 50 Hz- Landnetz 71
Abb. 5-24: Niederspannungslandanschluss (Barge Based AMP Design) 72
Abb. 5-25: Mittelspannungsanschluss 6,6 kV (Barge Based AMP Design) 73
Abb. 5-26: Beispiele für Leistungsbedarfe im „Hotelbetrieb“, “GT“: Gross Tonnage (= BRZ / Bruttoraumzahl) ... 74
Abb. 6-1: 3 Szenarien: Emissionen aus Generatorbetrieb 2010 79
Abb. 6-2: 2 Szenarien: Emissionen aus Kesselbetrieb 2010 80

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4-1: Liste der Kreuzfahrtschiffe 2008 in Hamburg 15
Tabelle 4-2: Gesamtemissionen ohne Hilfskesselbetrieb aus Generatorbetrieb 2008 am Liegeplatz in [kg] 31
Tabelle 4-3: Gesamtemissionen 2008 aus Hilfskesselbetrieb am Liegeplatz in Kilogramm [kg] 31
Tabelle 6-1: Emissionen aus Generatorbetrieb 2010 am Liegeplatz in [kg] 78
Tabelle 6-2: Emissionen aus Kesselbetrieb 2010 am Liegeplatz in Kilogramm [kg] 80
Tabelle 6-3: Gesamtemissionen aus Generator- und Hilfskesselbetrieb 2010 am Liegeplatz in [kg] 81
Tabelle 7-1: Gesamtübersicht der technischen Ansätze zur Verringerung von Emissionen 2

1 Aufgabenstellung

Die Behörde für Wirtschaft und Arbeit der Freien und Hansestadt Hamburg hat den Germanischen Lloyd mit der Erstellung eines Gutachtens zu Möglichkeiten der Verringerung der Emissionen von Kreuzfahrtschiffen im Hamburger Hafen beauftragt.

Das Gutachten soll die Grundlage für die Bewertung von Landstromanschlüssen am Kreuzfahrtterminal in der Hafencity und auch in Altona sein.

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die Emissionen von Kreuzfahrtschiffen im Hinblick auf die Luftreinhaltung.

Abb. 1-1: Lageplan des Kreuzfahrtterminals in der HafenCity/
Quelle: www.hafencity.de

2 Einleitung

In der weltweiten Diskussion um die Reduktion der Schadstoffemissionen von Schiffen im Allgemeinen sind insbesondere die Emissionen in küstennahen Bereichen und besonders während der Revierfahrten und der Liegezeiten im Hafen im Fokus kritischer Betrachtungen. Gerade der Ausstoß von Luftschadstoffe in stadtnahen Gebieten ist besonders kritisch. Bezogen auf die Situation in Hamburger Hafen, sind hier die Liegeplätze von Kreuzfahrtschiffen in der HafenCity zu nennen. Eine Reduktion von Emissionen in die Luft wird für diesen Ort angestrebt, da sich dieser Pierbereich in direkter Nachbarschaft von attraktiven neuen Wohngebieten befindet.

Das Gutachten schafft eine Grundlage für die Bewertung von Landstromanschlüssen am Kreuzfahrt-terminal in der Hafencity und auch in Altona im Hinblick auf die Luftreinhaltung. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die Emissionen von Kreuzfahrtschiffen.

Während der Liegezeit von Kreuzfahrtschiffen an der Pier läuft der Schiffsbetrieb mit entsprechend hohem Bedarf an elektrischer Leistung kontinuierlich weiter. Die elektrische Leistung wird grundsätzlich an Bord der Schiffe selbst erzeugt. Das geschieht auf allen Schiffen mit entsprechend großen Dieselmotoren, die elektrische Generatoren antreiben. Erforderliche Wärmebedarfe für alle Arten von Heizungen werden an Bord von sogenannten Hilfskesseln erzeugt. Hilfskessel erzeugen Dampf mit Hilfe von Ölbrennern. Der erzeugte Dampf wird an alle benötigten Stellen an Bord weitergeleitet. Die genannten Dieselgeneratoren und die Hilfskessel werden mit entsprechenden Brennstoffen, wie Schweröl, Dieselöl etc. betrieben.

Es wird angestrebt, jene Emissionen, die während der Liegezeiten der Schiffe entstehen, signifikant zu senken. Neben der Ermittlung der Emissionen für das Jahr 2008 und einer Prognose für 2010, werden die wichtigsten, zurzeit denkbaren technischen Möglichkeiten diskutiert, die die Senkung des Schadstoffausstoßes erwarten lassen. Der Einsatz von schwefelärmeren Brennstoffen wird ebenfalls untersucht.
Unter anderem wird auf den Einsatz von sogenanntem „Landstrom“ eingegangen. Dabei wird die benötigte elektrische Leistung vom landseitigen Stromnetz in das Schiffsnetz eingespeist, so dass die an Bord befindlichen Dieselgeneratoren komplett abgestellt werden können. Diese Möglichkeit der alternativen Stromversorgung ist die bekannteste, birgt aber noch viele technische und logistische Stolpersteine.
Mit dem Einsatz von Landstrom werden die Emissionen aus dem Hilfskesselbetrieb grundsätzlich nicht vermindert.

In der vorliegenden Studie werden einleitend die für 2008 zu erwartenden Anläufe von Kreuzfahrtschiffen analysiert, siehe Tabelle 4-1 und darauf basierend, eine Prognoseansatz für die zu erwartenden Anläufe und Schiffsgrößen in 2010 aufgebaut (Kapitel 4.1).

Anschließend werden die Emissionsquellen im Schiffsbetrieb im Einzelnen erläutert (Kapitel 4.2). Weiter werden die Leistungs- und Wärmebedarfe von Kreuzfahrtschiffen beim Liegen an der Pier („Hotelbetrieb“) und beim Ein- und Auslaufen in den Hamburger Hafenbereich ermittelt. Zur Veranschaulichung der Leistungs- und Wärmebedarfe von Kreuzfahrern wird ein exemplarisches Beispiel (Kapitel 4.3.4) vorgestellt und erläutert.

In Kapitel 4.4 wird die Ermittlung der zu erwartenden Emissionen dieser Schiffe in 2008 beschrieben. Da ein Großteil dieser Flotte unter der Klasse des Germanischen Lloyd fährt, liegen für diese Schiffe detaillierte technische Daten vor. Über die Daten der Motoren- und Hilfskesselanlagen, der berechneten elektrischen Leistungsbedarfe, den geplanten Liegezeiten der einzelnen Schiffe und den sogenannten Emissionsfaktoren werden die zu erwartenden Gesamtemissionen der Kreuzfahrtschiffe in Hamburg 2008 ermittelt und dargestellt. Emissionsfaktoren werden pro Luftschadstoff ermittelt, z. B. für Schwefeldioxid (SO_2) und geben die zu erwartenden Menge an diesem Schadstoff an, die pro erzeugte Kilowattstunde Energie abgegeben wird. Die Emissionsfaktoren wurden der Motorendatenbank des Germanischen Lloyd entnommen.

Im Kapitel 5 werden die vorstellbaren Möglichkeiten der Emissionsreduktion vorgestellt und im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit erörtert. Es werden der Einsatz von Gasen als alternativer Brennstoff, der Einsatz von Brennstoffzellen, die Abgasaufbereitung und, nicht zuletzt, die Versorgung mit Landstrom beschrieben.

In den Prognosen für 2010 werden die zu erwartenden Emissionen für dieses Jahr beschrieben. Um den Energiebedarf und damit über die Emissionsfaktoren die Luftschadstoffmengen zu ermitteln, wurde eine Prognose der zu erwartenden mittleren Schiffsgröße mit einer mittleren Passagieranzahl berechnet. Mit der Anzahl der zu erwartenden Anläufe von Kreuzfahrtschiffen in diesem Jahr konnten die zu erwartenden Jahresemissionen errechnet werden. Der geplante Liegeplatz in Altona wurde in den Betrachtungen ebenfalls berücksichtigt.
Es wurden hier 3 Szenarien entwickelt und die Emissionsergebnisse dargestellt. Ein Szenario zeigt die zu erwartenden Emissionen unter Einsatz von Landstrom. Unter Einsatz von Landstrom für möglichst alle anlaufenden Kreuzfahrer lassen sich grundsätzlich die größten Einsparpotenziale für die Emissionen vor Ort realisieren.

In einer abschließenden Betrachtung werden kurz die aufgezeigten Möglichkeiten in ihrem Umsetzungspotenzial verglichen und bewertet.

3 Beschreibung der Kreuzfahrtterminals

Terminal Hafencity

Seit April 2004 besteht an der südlichen Wasserseite des Grasbrooks ein bisher noch temporäres Kreuzfahrtterminal. In Rahmen des weiteren Ausbaus der Hamburger Hafencity soll dieser Standort mit Realisierung des Überseequartiers zum endgültigen Cruise Center ausgebaut werden. Dann werden pro Jahr voraussichtlich 40 verschiedene Kreuzfahrtschiffe das Hamburg Cruise Center bis zu 100-mal ansteuern.

Das Terminal in der Hafencity bietet bis zu zwei Kreuzfahrern Platz. Es sind folgende Maximalkombinationen der Schiffslängen für die beiden Liegeplätze möglich: 2 x 250m Länge oder 1 x 350m und 1 x 150m. Das Terminal liegt bei Flusskilometer 621 der Elbe, siehe Abb. 3-1.

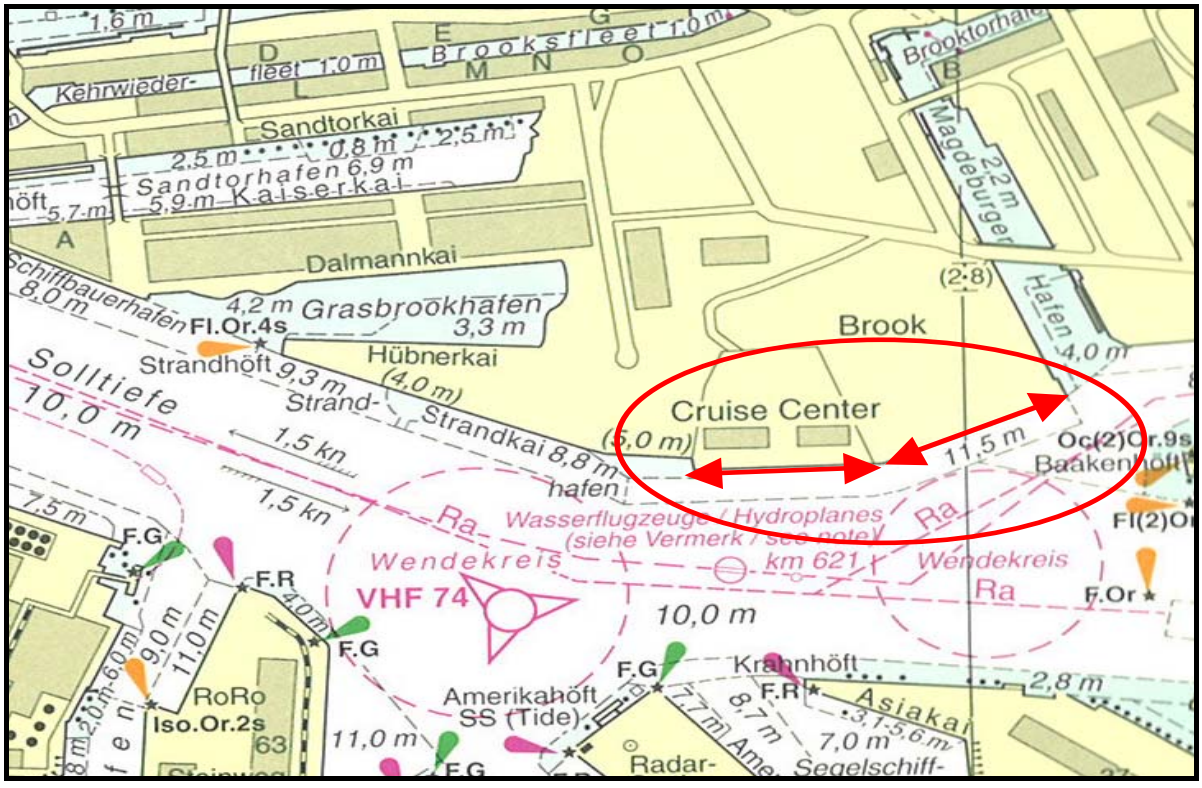

Abb. 3-1: Lage der Kreuzfahrtterminals in der HafenCity, Fluss-Km 621
Quelle: Ausschnitt aus Seekarte D48 des BSH

Geplantes Kreuzfahrtterminal Altona

Ab 2009 wird ein weiterer Liegeplatz für bis zu 300m lange Kreuzfahrtschiffe in Altona entstehen. Dafür wird die bereits bestehende Pier entsprechend umgebaut und der RoRo-Anleger entfernt. Die Wassertiefe wird entsprechend vergrößert, siehe Abb. 3-2.

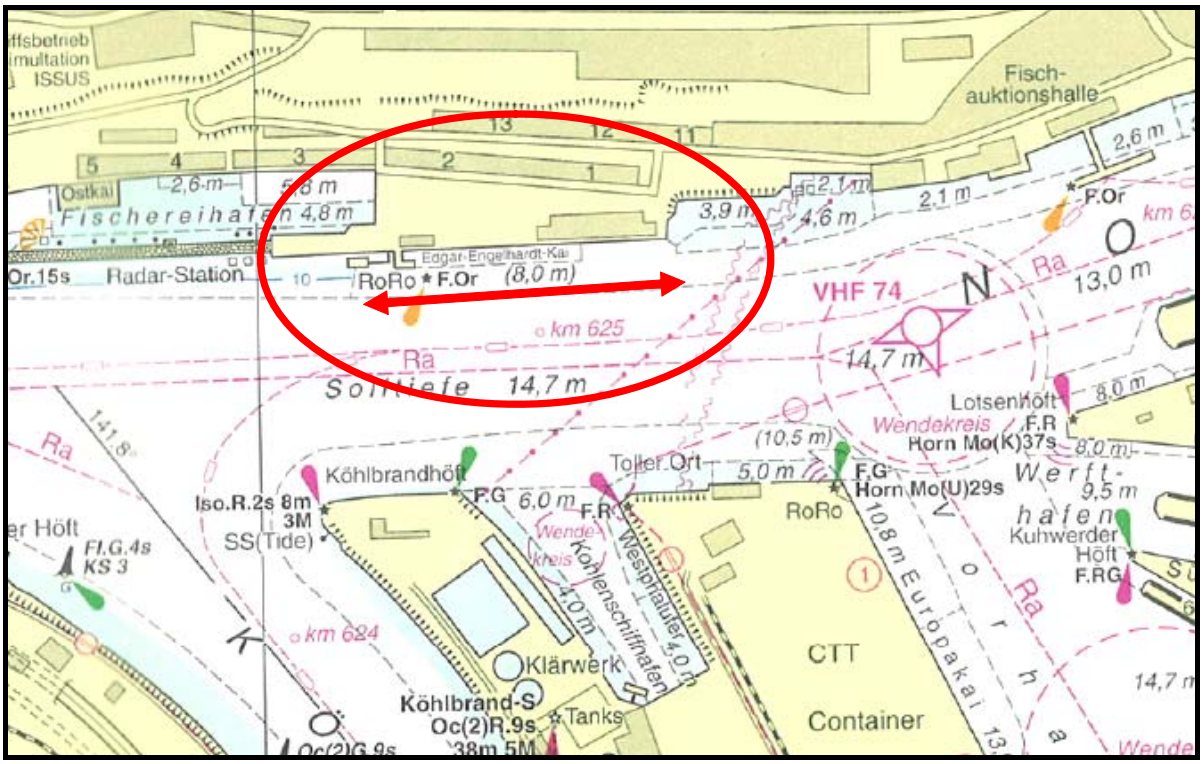

Abb. 3-2: Lage des geplanten Kreuzfahrtterminals in HH-Altona, Fluss-km 625
Quelle: Ausschnitt aus Seekarte D48 des BSH

4 Untersuchung der Emissionen der Kreuzfahrtschiffe

4.1 Anläufe von Kreuzfahrtschiffen in 2008 und Prognose 2010

Grundlage der Analyse in 2008 sind die für dieses Jahr geplanten Anläufe von Kreuzfahrtschiffen nach Hamburg, die soweit als einzelne Schiffe bekannt sind. Hier werden die einzelnen bekannten Schiffe betrachtet.

Für das Jahr 2010 liegen allerdings bisher nur Schätzungen/Annahmen der voraussichtlichen Anläufe von Kreuzfahrtschiffen vor. Hier können die Schiffe im Einzelnen noch nicht benannt werden. Daher wird aus den in 2008 bekannten anlaufenden Schiffen und deren Daten eine Prognose für 2010 erstellt. Für die Prognose wird angenommen, dass die Größenstruktur der Schiffe sich in 2010 grundsätzlich nicht ändert.

4.1.1 Anläufe von Kreuzfahrtschiffen in 2008

Basis für die Ermittlung der Emissionen sind die voraussichtlichen Passagierschiffsanläufe zum Kreuzfahrtterminal der Hamburger Hafencity und deren geplante Liegezeiten und damit Liegedauern. Diese Daten sind der Homepage der Hafencity, Stand vom 15.Januar 2008, entnommen worden („Anmeldungen Kreuzfahrtschiffe“). Diese Anmeldedaten sind von der Firma UNIKAI GmbH als Betreiber der Kreuzfahrtterminals bestätigt worden, bis auf die „Celebrity Solstice“, die voraussichtlich Hamburg nicht in diesem Jahr anlaufen wird, da das Schiff später abgeliefert wird. Das Schiff wird aber in der Datenbasis belassen, da damit zu rechen ist, dass noch kurzfristige Anmeldungen im laufenden Jahr möglich sind.

Demnach sollen 24 Kreuzfahrtschiffe insgesamt 61-mal das Terminal in der Hafencity anlaufen, wobei einzelne Schiffe die Liegeplätze bis zu 11-mal (“AIDAaura“) in diesem Jahr nutzen wollen, siehe Abb. 3-1.
In der Größenklasse über 300m Schiffslänge über alles sind 3 Aufenthalte von Kreuzfahrern geplant. Das Gros liegt in der Größenklasse 150 bis 200m Schiffslänge mit 30, bei 200 bis 250m mit 18 Aufenthalten im Terminal.

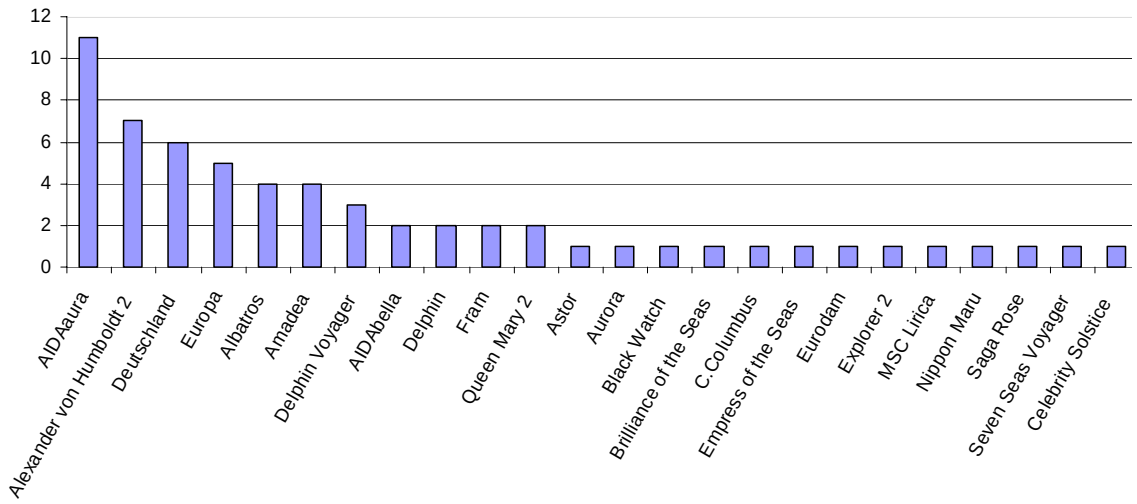

Abb. 4-1: Übersicht der Kreuzfahrtschiffe mit den geplanten Anläufen in HH in 2008
Daten-Quellen: www.hafencity.de und UNIKAI GmbH

4.1.2 Struktur der anlaufenden Schiffe 2008 und Prognoseansatz für 2010

Einen Überblick der Entwicklung der Schiffslängen und Passagierkapazitäten bei den Kreuzfahrtschiffen, die 2008 Hamburg anlaufen sollen, geben die Abb. 4-2 und 4-3. Hier sind die Längen bzw. die Gästekapazitäten über das Baujahr aufgetragen. Auffallend ist die größer werdende Streuung der Längen und der Passagierkapazitäten ab dem Baujahr 2000. Es scheinen sich hier zwei Tendenzen zu zeigen: Größere Schiffe mit möglichst hoher Passagierkapazität und eher kleinere „exklusive" Kreuzfahrer mit eher kleiner Passagierkapazität bei hohem Komfort (MS „Europa" mit knapp 200m Länge / 408 Passagiere).

Ferner sind in die Diagramme die zurzeit größten Kreuzfahrtschiffsklassen (▲: Freedom-, Genesis- und Voyager-Class) zur Information mit aufgenommen worden, ohne dass diese Werte einen Eingang in die Berechung der Regressionsgeraden fanden.

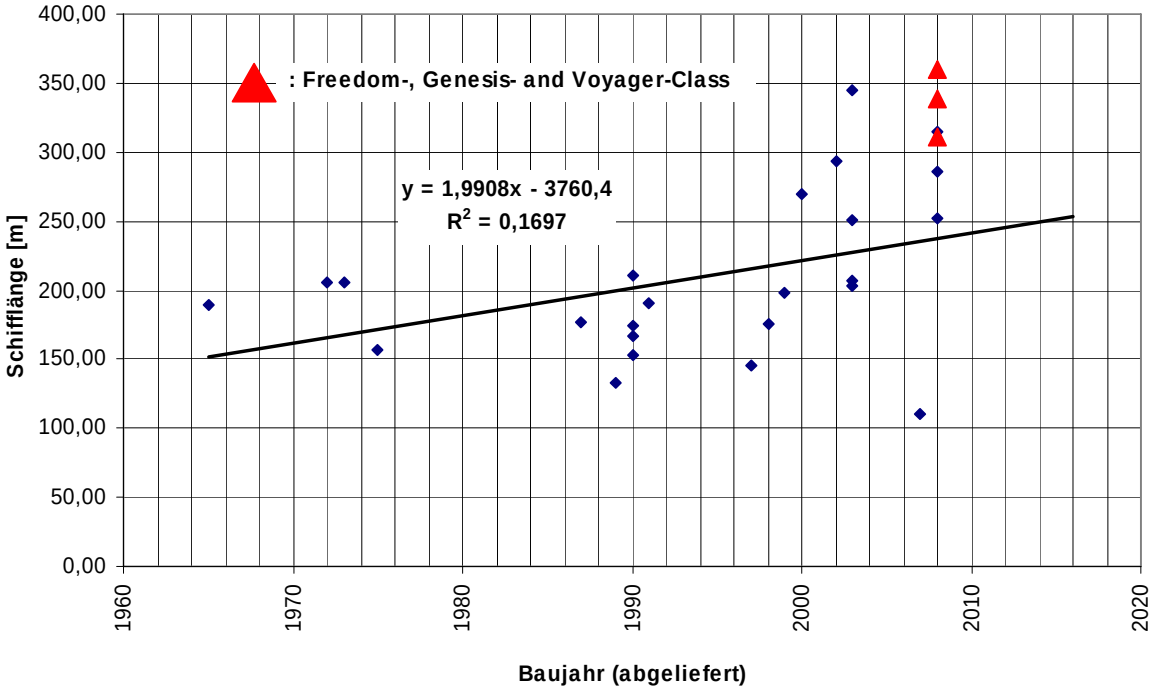

Abb. 4-2: Schiffslängen über Baujahr

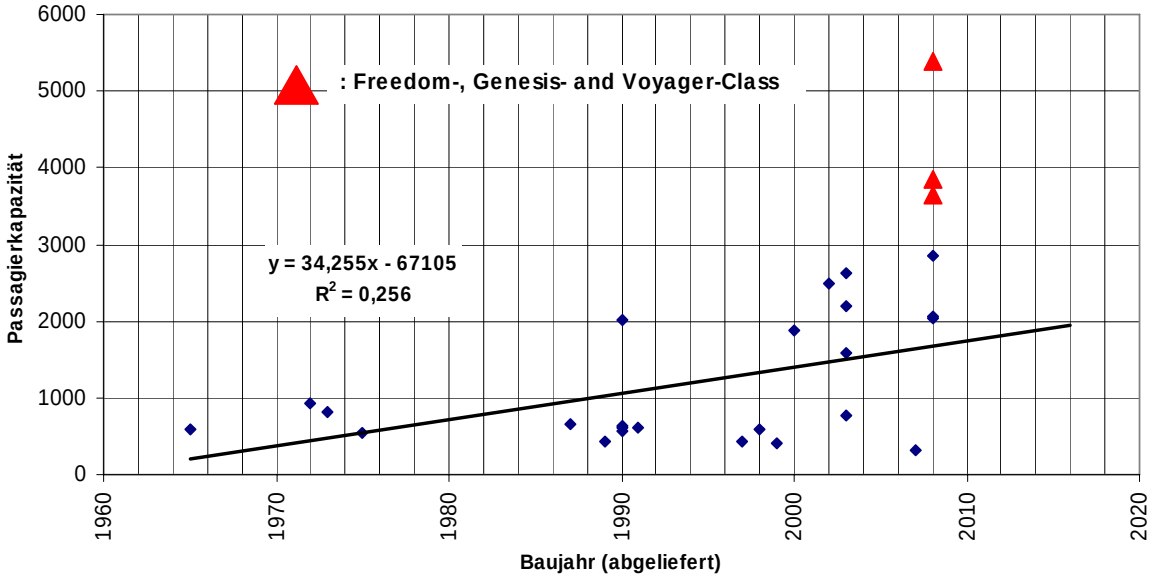

Abb. 4-3: Passagierkapazitäten über Baujahr

Prognoseansatz für 2010

Aus den Schiffsanläufen in 2008 für Hamburg ergibt sich eine mittlere Passagierkapazität pro Schiff von 1.040 Passagieren mit einer mittleren Liegedauer von 15,46 Stunden.

Unter Berücksichtigung einer mittleren Steigerung der Passagierkapazität pro Jahr von 34 Passagieren, siehe Geradengleichung in Abb. 4-3, kann mit einer mittleren Passagierkapazität von 1.108 Passagieren pro Schiff in 2010 gerechnet werden. Ferner wird in dieser Betrachtung davon ausgegangen, dass in 2010 einige neuere, noch nicht in Dienst gestellte Schiffe Hamburg anlaufen werden und einige ältere Schiffe außer Dienst gestellt werden, da sich das Schiffsaltersprofil zu neueren Baujahren verschiebt.

Die für 2008 ermittelte mittlere Liegedauer der Kreuzfahrtschiffe von 15,46 Stunden wird unverändert für die Prognose 2010 angesetzt. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass sich die Reiseplanungen der Kreuzfahrtreedereien grundsätzlich nicht ändern und reedereiübergreifend näherungsweise identisch bleiben.

Mit diesem Ansatz für 2010 kann mit den Annahmen für die Anzahl der Kreuzfahrtschiffe, die in dem Jahr Hamburg anlaufen sollen, eine Energieumsatzprognose vorgenommen werden.

Schiffsname	IMO Nummer	Nominelle Passagier-zahl	Anläufe Hamburg 2008	Passagier-umsatz	Baujahr	Länge [m]	Breite [m]	Tiefgang [m]	Anläufe nach Größenklasse	Grössen-klassen
Queen Mary 2	9241061	2620	2	5240	2003	345,03	48,70	10,30	**3**	über 300m
Celebrity Solstice	9362530	2850	1	2850	2008	315,00	36,00	8,30		
Brilliance of the Seas	9195200	2500	1	2500	2002	293,95	32,20	8,15	**6**	250 bis 300
Eurodam	9378448	2044	1	2044	2008	285,30	32,00	7,80		
Aurora	9169524	1878	1	1878	2000	270,00	33,60	8,40		
AIDAbella	9362542	2050	2	4100	2008	252,00	35,00	7,20		
MSC Lirica	9246102	2200	1	2200	2003	251,00	28,80	6,56		
Empress of the Seas	8716899	2020	1	2020	1990	210,81	34,40	7,10	**18**	200 bis 250
Seven Seas Voyager	9247144	769	1	769	2003	206,50	28,80	7,05		
Black Watch	7108930	930	1	930	1972	205,47	25,20	7,55		
Albatros	7304314	812	4	3248	1973	205,46	27,00	7,55		
AIDAaura	9221566	1582	11	17402	2003	202,85	28,10	6,20		
Europa	9183855	408	5	2040	1999	198,52	24,00	6,10	**30**	150 bis 200m
Amadea	8913162	604	4	2416	1991	190,00	24,70	6,62		
Saga Rose	6416043	587	1	587	1965	188,88	24,49	8,26		
Astor	8506373	650	1	650	1987	176,25	22,61	6,10		
Deutschland	9141807	600	6	3600	1998	175,49	23,00	5,78		
Delphin Voyager	8902333	626	3	1878	1990	174,00	24,00	6,52		
Nippon Maru	8817631	607	1	607	1990	166,65	28,00	6,56		
Delphin	7347536	554	2	1108	1975	157,00	22,05	6,20		
Alexander von Humboldt 2	8709573	556	7	3892	1990	152,5	20,60	5,82		
C.Columbus	9138329	423	1	423	1997	145,00	21,50	5,10	**4**	unter 150
Explorer 2	9144196	428	1	428	1989	133,00	20,00	5,83		
Fram	9370018	318	2	636	2007	110,00	22,20	5,10		

24 Schiffe laufen 2008 Hamburg an **61 Anläufe in 2008**

Tabelle 4-1: Liste der Kreuzfahrtschiffe 2008 in Hamburg

4.2 Emissionsquellen im Schiffbetrieb am Liegeplatz („Hotelbetrieb")

Die wesentlichen Abgas-Emissionsquellen auf Kreuzfahrtschiffen sind

- Dieselmotoren, Hauptantriebe und/oder Diesel-Generatoren für Vortrieb und Stromerzeugung
- Hilfskessel für Wärmeerzeugung (Klimaanlagen, Tankheizungen, etc.).

Die Emissionsberechnungen in diesem Bericht umfassen die genannten Emissionen aus Motoren und Hilfskesselbetrieb. Die Emissionen von Müllverbrennungsanlagen werden nicht betrachtet, da deren Betrieb im Hamburger Hafen grundsätzlich nicht gestattet ist.

Um die Emissionen der Schiffsmotorenanlagen berechnen zu können, sind für alle Schiffe, die 2008 das Hamburger Kreuzfahrtterminal anlaufen sollen, die Daten der Motorenanlagen ermittelt und zusammen getragen worden. Insbesondere die neueren Schiffe sind mit einer diesel-elektrischen Antriebsanlage ausgestattet, d.h. die gesamte an Bord benötigte Energie für den Vortrieb/das Manövrieren und für den sog. „Hotelbetrieb" werden von dieselgetriebenen Generatoren erzeugt. Der Vortrieb erfolgt über elektrische Propellermotoren.
Die weiteren Schiffe werden „konventionell" angetrieben, d.h. die Propeller werden über Untersetzungsgetriebe von Dieselmotoren angetrieben. Die weitere benötigte elektrische Energie wird wiederum von dieselgetriebenen Generatorsätzen zur Verfügung gestellt. Bei allen Motoren der betrachteten Schiffe handelt es sich um 4-Takt-Dieselmotoren.
Die Hilfskessel werden auch während der Liegezeiten grundsätzlich weiter betrieben. Auch mit Landstromversorgung der Schiffe muss die Wärmeversorgung des Schiffes aufrechterhalten werden.

4.2.1 Abgasemissionen und Brennstoffverbräuche von Diesel-Generatoren

Mit den Motorendaten sind, so weit es sich um vom GL unter Klasse laufende Schiffe handelt, die Zusammensetzung der Abgasemissionen und die spezifischen Brennstoffverbräuche aus der GL-Motorendatenbank ermittelt worden. Diese Datenbank enthält vertrauliche Messwerte, die aus Prüfstandsversuchen zur NOx-Zertifizierung der Motoren nach MARPOL-Regulation Annex VI, Reg. 13 gewonnen wurden.
Da in vielen Fällen von nicht unter GL-Klasse fahrenden Schiffen die Motorendaten bekannt sind und diese Motoren ebenfalls in der GL-Datenbank vorhanden sind, konnten auch hier die Emissions- und Verbrauchsdaten festgestellt werden.

4.2.2 Abgaszusammensetzung der Dieselmotoren

In Abb. 3-4 wird beispielhaft die bei der Erzeugung von einer „Kilowattstunde" (= 3,6 * 10^6 Joule) entstehende Abgasmenge (6712 Gramm) gezeigt. Die Ergebnisse stammen aus Messungen des Abgaslabors des Germanischen Lloyd. Der Motor wurde hier mit einem Brennstoff betrieben, der einen Schwefelgehalt von 2,2% aufwies. Ähnlich detaillierte Messungen von vergleichbaren Gesamtabgaszusammensetzungen mit

Schwefelgehalten im Brennstoff von 1,5%, wie sie für Schiffe, die Hamburg anlaufen, jetzt vorgeschrieben sind, liegen nicht vor. Durch die Senkung des Schwefelgehaltes werden in erster Ordnung die Schwefeldioxid- und Partikelemissionen entsprechend gesenkt.

Diese Abgaszusammensetzung entsteht bei der Energieerzeugung mit einem an Bord von Kreuzfahrtschiffen üblicherweise eingesetzten 4-Takt Dieselmotor unter Verwendung von üblichen Diesel-Brennstoffen.
Eine detaillierte Beschreibung der Einzelanteile des Abgases ist in Kapitel 4 zu finden.

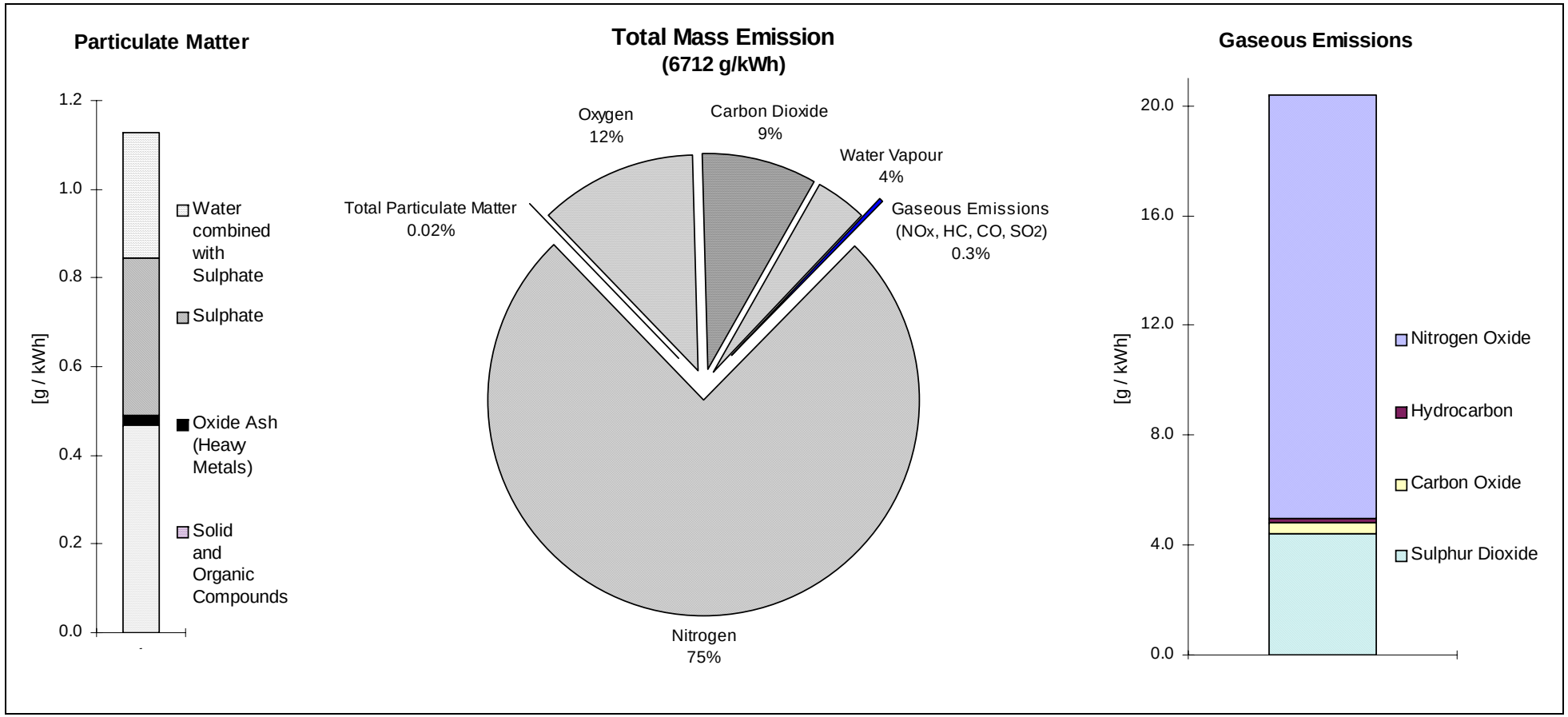

Abb. 4-4: Zusammensetzung des Abgases eines 4-Takt Dieselmotors (Propellerkurve, 75% Last, Brennstoff mit 2,2% Schwefelgehalt)
Quelle: Germanischer Lloyd

4.2.3 Hilfskesselbetrieb und –emissionen

Für weitere Wärmebedarfe im Schiffsbetrieb werden an Bord der Schiffe sogenannte Hilfskessel zur Dampferzeugung betrieben. Mit diesem Dampf werden u. a. erforderliche Heizleistungen des Klimabetriebs und der Tankheizungen abgedeckt.

Grundsätzlich wird der erforderliche Dampfbedarf während des normalen Seebetriebes weitestgehend über Abgaskessel gedeckt. D.h. hier wird bei ausreichend hoher Leistung der Hauptmotoren die im Abgasstrom befindliche Wärmeenergie zur Erzeugung von Heizdampf genutzt. Da bei Revierfahrt und während der Hafenliegezeiten kein ausreichender Abgaswärmestrom vorhanden ist, werden dort die Dampfbedarfe ausschließlich über mit Heizöl befeuerte Dampfkessel erzeugt. Die hieraus entstehende Emission wurde ebenfalls ermittelt, werden aber getrennt von den Emissionen aus der elektrischen Energieerzeugung durch Dieselgeneratoren ausgewiesen.

4.3 Ermittlung von Leistungsbedarfen für das Ein- und Auslaufen und den „Hotelbetrieb“ (Liegezeiten an der Pier)

Grundlage der Ermittlung von Emissionen sind die zu erwartenden mittleren elektrischen Leistungsbedarfe pro Schiff im „Hotelbetrieb“ über die Liegedauer an der Pier. Während des Ein- und Auslaufens kommt hier die Leistung für den Schiffsantrieb hinzu. Ferner werden für die Ermittlung der Emissionen des Hilfskesselbetriebes die entsprechenden Wärme- bzw. Dampfleistungen benötigt. Mit diesen Daten kann über die Liegedauern bzw. die Fahrtzeiten die jeweils erforderliche Energiemenge (in „Kilowattstunden“ [kWh] oder „Megawattstunden“ [MWh]) und über die entsprechenden Emissionsfaktoren die Emissionen ermittelt werden.

4.3.1 Berechnung der erforderlichen elektrischen Energie- und Leistungbedarfe für das Ein- und Auslaufen

Neben der Ermittlung der Emissionen während der Liegezeiten der Schiffe am Terminal im reinen Hotelbetrieb, wurden exemplarisch für zwei Beispielschiffe die zu erwartenden Emissionen während der Anfahrt zum Terminal betrachtet. Hier wurde die Strecke einlaufend von Schulau / Willkommenshöft bis zum Terminal am Grasbrook betrachtet. Zusätzlich zum „Hotelbetrieb“ kommen hier die Emissionen der Fahrleistungen hinzu. Die Strecke von Wedel/Schulau bis zur Hafencity beträgt ca. 10 nautische Meilen/Seemeilen (1 Seemeile = 1,852 Kilometer). Es wird davon ausgegangen, dass diese Strecke in ca. 1 Stunde zurückgelegt wird, d. h. die Schiffe fahren mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 10 Knoten (Seemeilen pro Stunde).

Der erforderliche Leistungsbedarf für die einzelnen Schiffe wurde aus der Proportionalität von Schiffsgeschwindigkeit und erforderlicher Antriebsleistung ermittelt:

$$P_{Antrieb} \sim (V_{Schiff})^3$$

Da die Antriebsleistungen des einzelnen Schiffes zur Erreichung der Maximalgeschwindigkeit bekannt sind, kann hieraus die erforderliche Antriebsleistung für 10 Knoten Fahrt ermittelt werden.

Weitere Leistungsbedarfe, die sich beim Anlegemanöver ergeben (Bug- und/oder Heckstrahlerbetrieb), sind pauschal abgeschätzt worden.

4.3.2 Berechnung der erforderlichen Leistungs- und Energiebedarfe/Liegezeit am Terminal („Hotelbetrieb“)

Da dem GL für einige der Schiffe die elektrischen Leistungsbedarfe während der Hafenliegezeiten in unserer Klimazone mit Passagierbetrieb bekannt sind, wurde aus diesen Daten ein mittlerer elektrischer Leistungsbedarf pro Passagier, bezogen auf die nominelle maximale Passagieranzahl, ermittelt. Dieser Wert liegt für alle Schiffe bei:

Elektrische Leistungsziffer = 3,2 kW/Passagier

Dieser Wert kann unter Umständen, je nach klimatischen Rahmenbedingungen, niedriger liegen. Es liegen für einzelne Schiffe Informationen vor, wonach die elektrische Leistungsziffer bei Schiffen mit auf die Größe bezogener hoher Passagierkapazität, bei 2,7 kW/Passagier liegt. An sehr warmen Tagen kann die Leistungsziffer auch auf Werte bis über 4 kW/Passagier liegen. Für unser gemäßigtes Klima wird der oben genannte Wert eine recht zuverlässige Größe sein. Er ist als eher konservativ anzusehen.

Mit dieser Leistungsangabe und der Liegedauer der Schiffe wurde die erforderliche Energie für die geplanten Liegezeiten pro Schiff ermittelt. Unter Berücksichtigung der bekannten Wirkungsgrade bei der Wandlung von elektrischer zu mechanischer Leistung und dem dazugehörigen spezifischen Brennstoffbedarf der jeweiligen Motoren wird die während der Liegezeit erforderliche Brennstoffmenge berechnet. Weiter können daraus die Emissionen ermittelt werden.

4.3.3 Berechung der erforderlichen Leistungs- und Energiebedarfe für den Hilfskesselbetrieb (Dampf- bzw. Wärmeerzeugung)

Um die Emissionen aus dem Kesselbetrieb ermitteln zu können wurde, in Anlehnung an die Vorgehensweise für die elektrischen Leistungbedarfe, ein mittlerer Wärmeleistungsbedarf pro Passagier ermittelt. Dieser Wert liegt für alle Schiffe bei:

Dampf-Wärme-Ziffer: 2,2 kW/Passagier

Zur Festlegung dieser mittleren Dampf-Wärme-Ziffer sind für einige repräsentative Schiffe die Dampfkapazitäten der installierten Kesselanlagen mit Hilfe der GL-Schiffsdatenbank ermittelt und auf die nominelle Passagieranzahl bezogen worden. Da grundsätzlich alle Kreuzfahrtschiffe mit 2 ölbefeuerten Kesselanlagen ausgerüstete sind, wird angenommen, dass aus Redundanzgründen die maximal erforderliche Dampfmenge mit nur einem Kessel erzeugt werden kann. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Wärmebedarf eines Kreuzfahrtschiffes in unseren gemäßigten Breiten im Mittel zwischen Sommer und Winter bei den o. g. 2,2 kW/Passagier liegen wird.

4.3.4 Exemplarisches Beispiel für Leistungsbedarfe im „Hotelbetrieb“

Für einen anschaulichen Überblick, welche Betriebsbereiche auf einem Kreuzfahrtschiff anteilig am Gesamtleistungsbedarf während der Hafenliegezeiten einen entsprechenden Anteil benötigen, sind die Einzelverbraucher aus der elektrischen Leistungsbilanz eines modernen 2000-Passagierschiffes in entsprechende Gruppen zusammengefasst worden, siehe Abb. 4-5 und 4-6, jeweils im Winter- bzw. Sommerbetrieb.

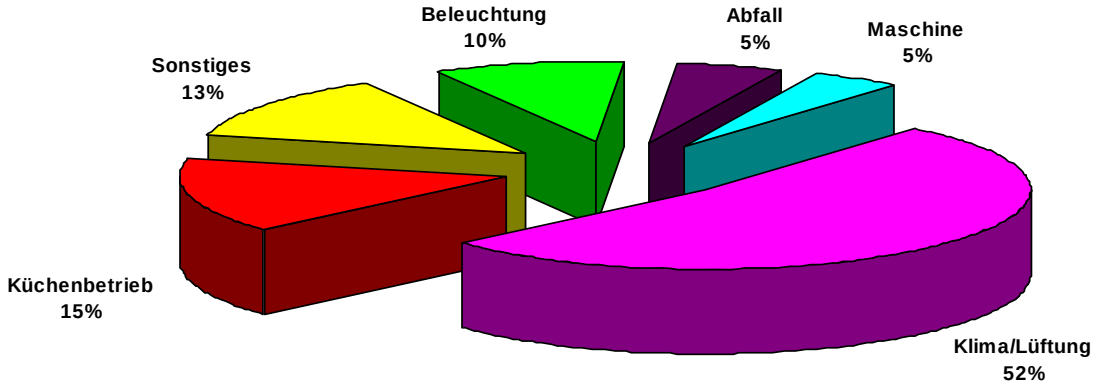

Abb. 4-5: Aufteilung der Leistungsbedarfe in % eines modernen Kreuzfahrtschiffes mit 2000 Passagieren im Sommerbetrieb am Liegeplatz (100% = 8,0 MW)
Quelle: Germanischer Lloyd

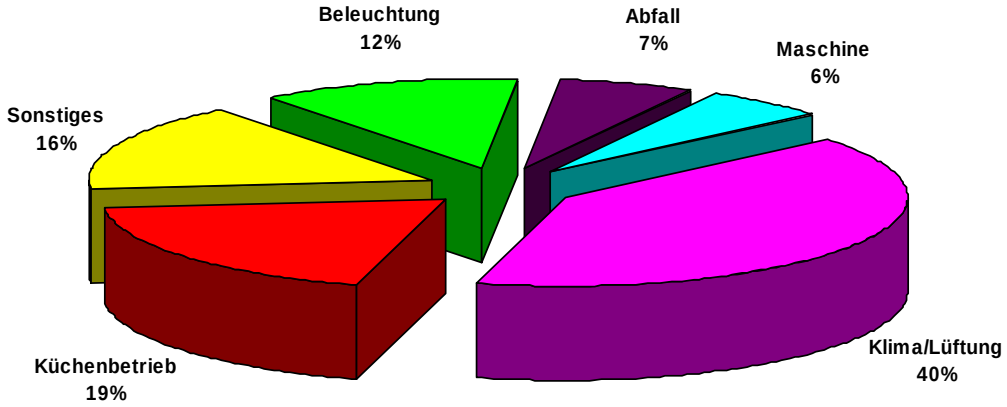

Abb. 4-6: Aufteilung der Leistungsbedarfe in % eines modernen Kreuzfahrtschiffes mit 2000 Passagieren im Winterbetrieb am Liegeplatz (100% = 6,4 MW)
Quelle: Germanischer Lloyd

Ein wesentlicher Anteil des Leistungsbedarfs wird von den Verbrauchern im Bereich Klima/Lüftung belegt. Dass dieser Bereich im Sommerbetrieb noch um über 10% höher ausfällt als im Winter, liegt am Betrieb der für die Kühlung erforderlichen Kompressoren. Die Wärmebedarfe im Winter werden dagegen über den Kesselbetrieb gedeckt. Ferner erfordert die Beleuchtung des Schiffes den zweitgrößten Anteil der elektrischen Hafenleistung.

Es sei erwähnt, dass diese Anteile größtenteils unanhängig von der effektiv an Bord befindlichen Passagieranzahl sind, das gilt auch für die Bereiche „Maschine“ und „Abfall“.

4.4 Analyse der voraussichtlichen Emissionen im Jahre 2008

Es wurden die zu erwartenden Emissionen aller angemeldeten Kreuzfahrtschiffe in 2008 während der Liegezeiten an der Pier im Kreuzfahrtterminal HafenCity ermittelt. Die zu erwartenden Emissionen während des Ein- und Auslaufen von/bis Wedel/Schulau wurden exemplarisch für zwei Schiffe ermittelt und dargestellt. Die zu erwartenden Emissionen aus dem Kesselbetrieb während der Liegezeiten wurden ebenfalls ermittelt, aber getrennt ausgewiesen.

Für alle Emissionsberechnungen in 2008 wird von einem Brennstoff mit maximal 1,5% Schwefel ausgegangen, da Hamburg ausschließlich über sogenannte „SECA-Gebiete“ in der Nord- und Ostsee angelaufen werden kann. In diesen Gebieten dürfen Motoren und Hilfskessel nur noch mit Brennstoffen betrieben werden, deren Schwefelgehalt 1,5% nicht übersteigt.

4.4.1 Exemplarischer Vergleich der Emissionsanteile beim Ein- und Auslaufen Hamburg

Bei den für 2008 errechneten Emissionen sind grundsätzlich nur die Liegezeiten an der Pier berücksichtigt worden. Um einen Überblick Gesamtemissionen im Hamburger Raum einschließlich des Ein- und Auslaufens ab bzw. bis Wedel/Schulau zu geben, sind in den Abbildungen 4-7 und 4-8 die Emissionsanteile dieser Zeiten je für ein modernes Schiff mit diesel-elektrischem Antrieb und für eine älteres Schiff mit konventionellem Antrieb dargestellt.
Die anteilig höheren Emissionen bei dem Schiff mit konventionellen Antrieb, Abb. 4-8, ergeben sich daher, dass hier die Antriebsdiesel bei entsprechend kleiner Leistungsstufe (10 Knoten Fahrt mit ca. 10% der maximalen Antriebsleistung) in einem ungünstigen Betriebszustand laufen und daher verhältnismäßig mehr Emissionen verursachen. Die Emissionen aus dem Hilfskesselbetrieb sind in diesem Vergleichen nicht berücksichtigt worden, da diese grundsätzlich beim Ein- und Auslaufen, wie auch während der Liegezeiten kontinuierlich weiter laufen.

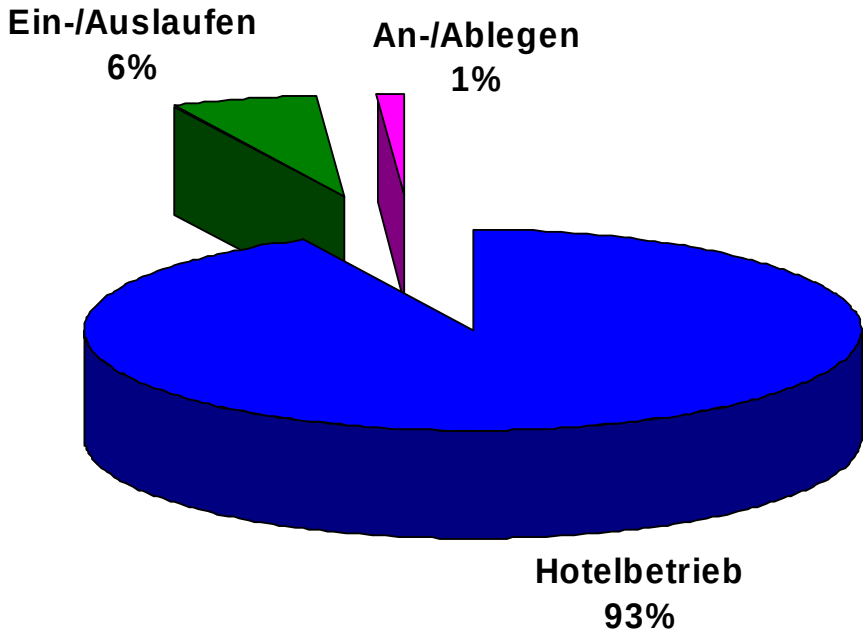

Abb. 4-7: Anteile der Gesamtemissionen von/bis Wedel/Schulau eines 2000-Passagierschiffes mit diesel-elektrischen Antrieb
Quelle: Germanischer Lloyd

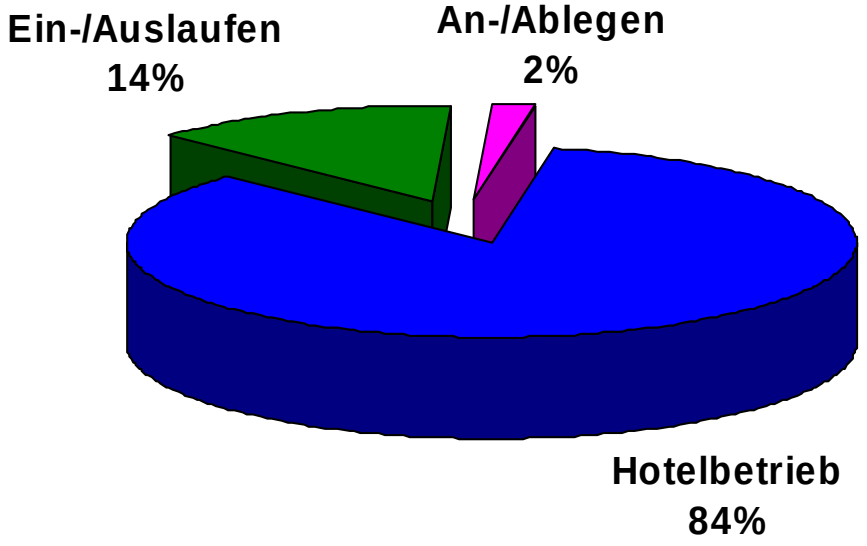

Abb. 4-8: Anteile der Gesamtemissionen von/bis Wedel/Schulau eines 600-Passagierschiffes mit konventionellem Antrieb
Quelle: Germanischer Lloyd

Die folgenden Abbildungen 4-9 und 4-10 zeigen die absoluten errechneten Emissionswerte der beiden Beispielschiffe, zum einen nur das Ein- und Auslaufen einschließlich des Manövrierens, zum anderen die Emissionen während der Liegezeit (reiner „Hotelbetrieb“). Die Hilfskesselemissionen wurden hier nicht berücksichtigt. Zur besseren Übersicht sind die Emissionswerte hier logarithmisch skaliert.

Wegen der in kleiner Teillast laufenden Antriebsmotoren beim kleineren Schiff A, fallen hier die CO-Emissionen höher aus als bei Schiff B mit diesel-elektrischem Antrieb, Abb. 4-9.

Zum direkten Vergleich sind in Abb. 4-10 die absoluten zu erwartenden Emissionen während der Liegezeiten an der Pier dargestellt.

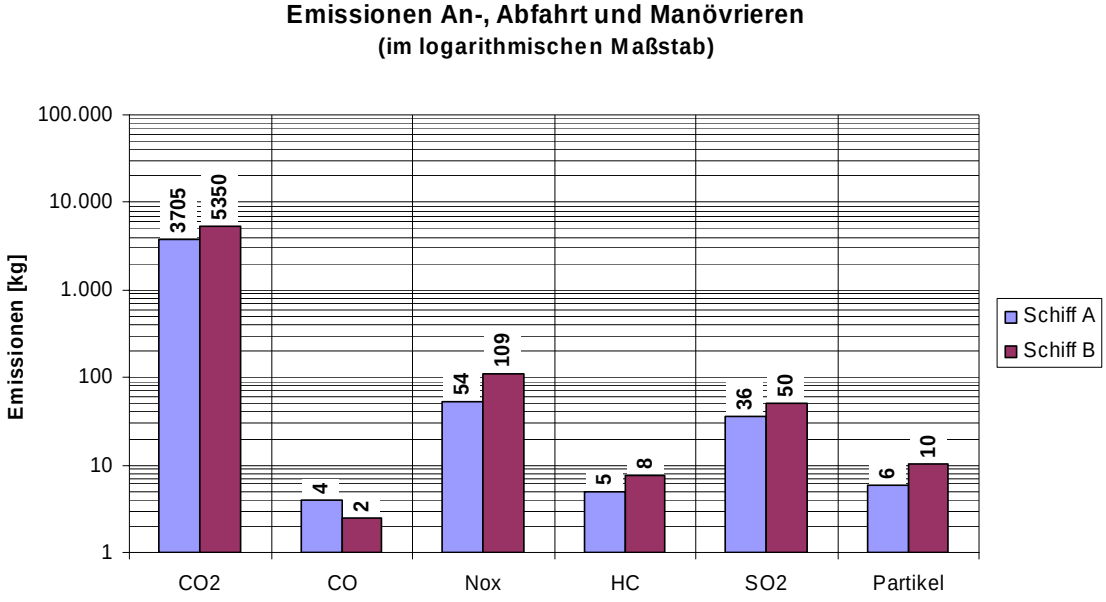

Abb. 4-9: Emissionen zweier Schiffe nur Ein- und Auslaufen Hamburg
Schiff A: 600-Passagierschiff mit konventionellem Antrieb
Schiff B: 2000-Passagierschiff mit diesel-elektrischem Antrieb

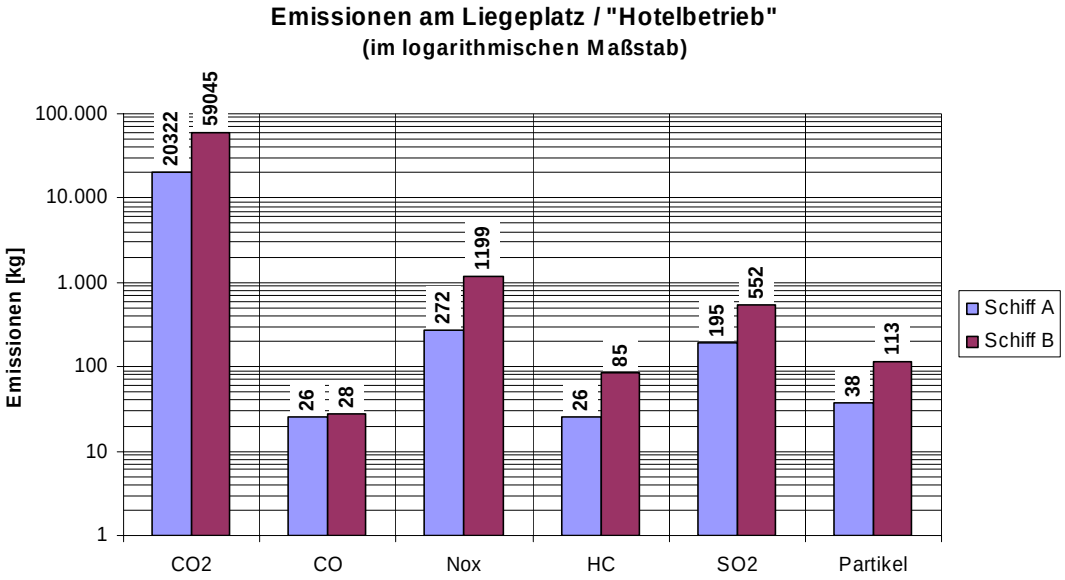

Abb. 4-10: Emissionen zweier Schiffe nur Liegezeit in Hamburg / „Hotelbetrieb“
Schiff A: 600-Passagierschiff mit konventionellem Antrieb
Schiff B: 2000-Passagierschiff mit diesel-elektrischem Antrieb

In den Abbildungen 4-11 und 4-12 werden die absoluten Emissionswerte für das Ein- und Auslaufen und dem reinen Hotelbetrieb in Hamburg an der Pier für jedes der beiden Schiffe direkt gegenübergestellt.

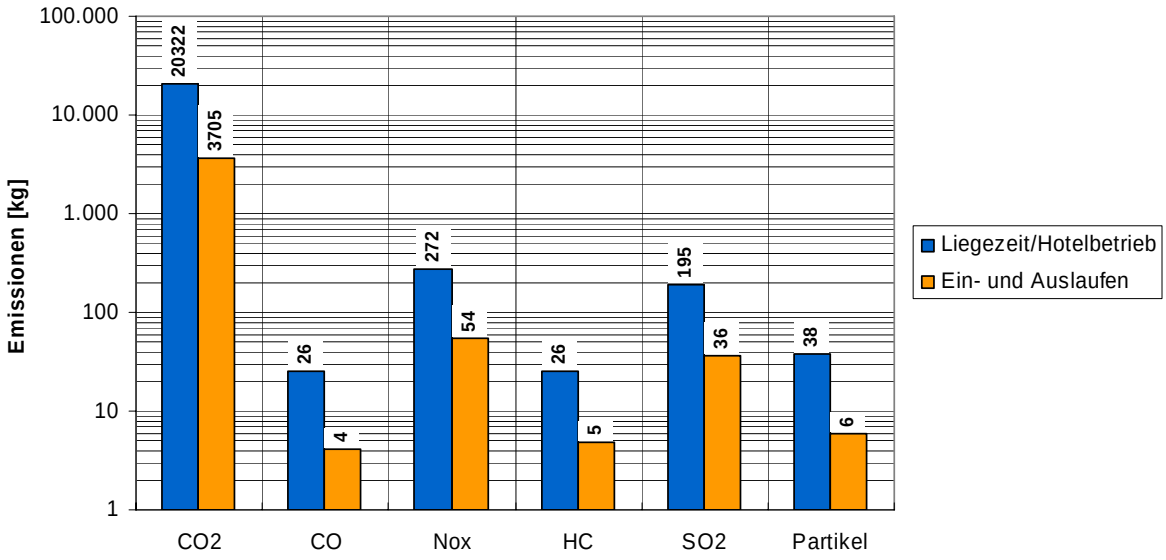

Abb. 4-11: Vergleich der Emissionen Liegezeit / Ein- und Auslaufen, 600-Passagierschiff mit konventionellem Antrieb

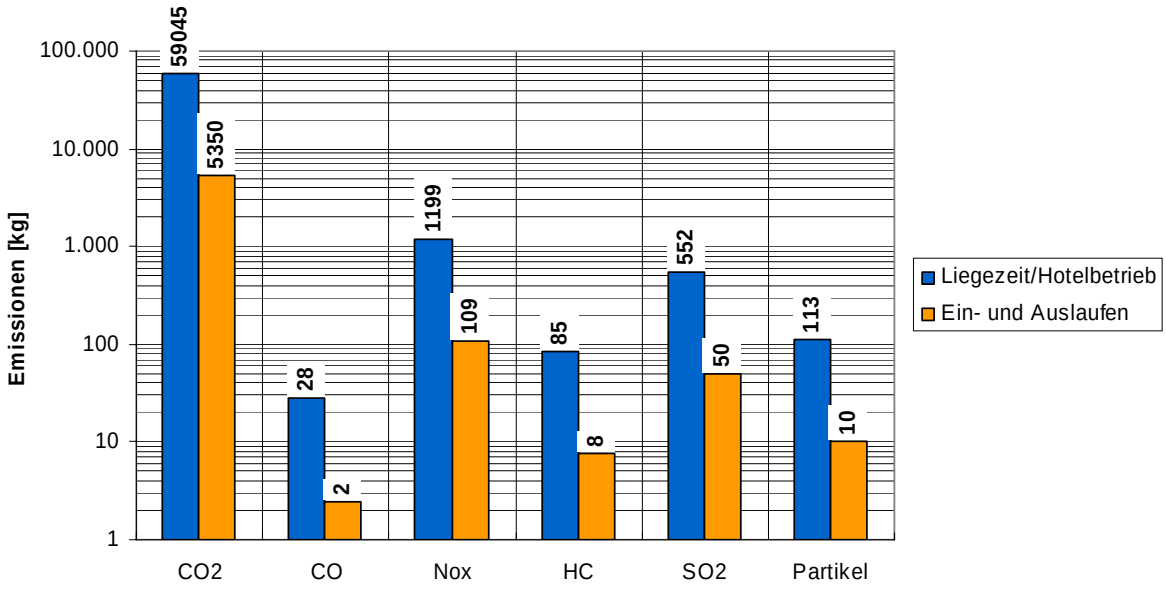

Abb. 4-12: Vergleich der Emissionen Liegezeit / Ein- und Auslaufen, 2000-Passagierschiff mit diesel-elektrischem Antrieb

Die Emissionsanteile des Ein- und Auslaufens und des Manövrierens, bezogen auf die Gesamtemissionen von/bis Wedel/Schulau, liegen zwischen 9% bis maximal 20%. Dies gilt grundsätzlich für alle Emissionsarten. Es bleibt festzuhalten, dass die überwiegenden Emissionen während der Liegezeiten an der Pier anfallen.

4.4.2 Emissionsermittlung für 2008 während der Liegezeiten

Mit den Berechnungsansätzen aus Kapitel 4.3.2 für die benötigte mittlere elektrische Leistung, den für die einzelnen Schiffe ermittelten Liegezeiten und den ermittelten Emissionsfaktoren wurden die Emissionsanteile pro Tag und aufsummiert pro Monat in 2008 errechnet. Diese errechneten Emissionen sind in Tabelle 4-2 für jeden Monat und in der Jahressumme aufgelistet.

Um einen Überblick der an den Liegeplätzen umgesetzten Energie zu geben, wurden die Energieumsätze pro Monat aufgetragen, siehe Abb.4 -13. Der gesamte für 2008 aufsummierte Energiebedarf beträgt 3330 MWh. In Abb. 4-12 wird der verbrauchsstärkste Monat Mai detailliert mit den Energieumsätzen pro Tag gezeigt. Hier zeigt sich eine hohe Liegedichte über den Monat.

Der verbrauchsstärkste Tag ist am 25. Oktober, mit 255 MWh zu erwarten. Für diesen Tag wird ein Kreuzfahrer mit einer Passagierkapazität von über 2800 Passagieren erwartet.

Es sei bemerkt, dass der über einen gesamten Tag aufsummierte Energieumsatz nichts über zu erwartende maximale Leistungsanforderungen aussagt. Mit der größten mittleren Leistungsstärke ist am 8. Mai über 3 Stunden mit ca. 13 MW zu rechnen, da in diesem Zeitraum zwei große Kreuzfahrer zeitgleich in Hamburg liegen sollen.

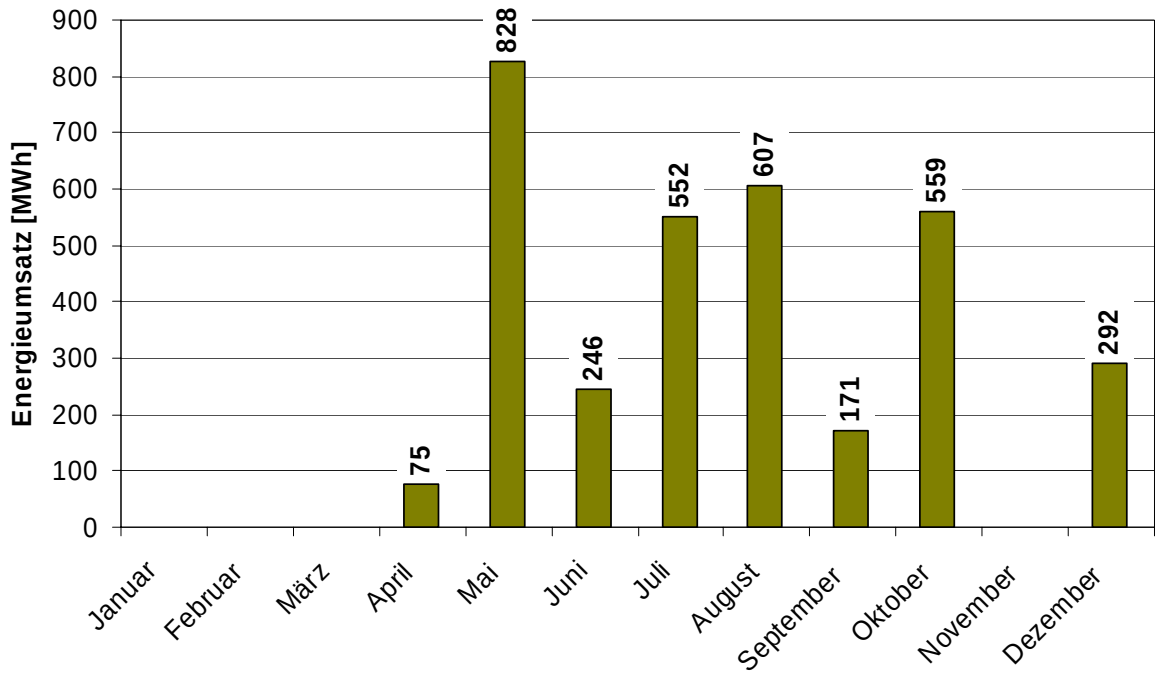

Abb. 4-13: Voraussichtlicher Energieumsatz der Schiffe pro Monat 2008 in [MWh]

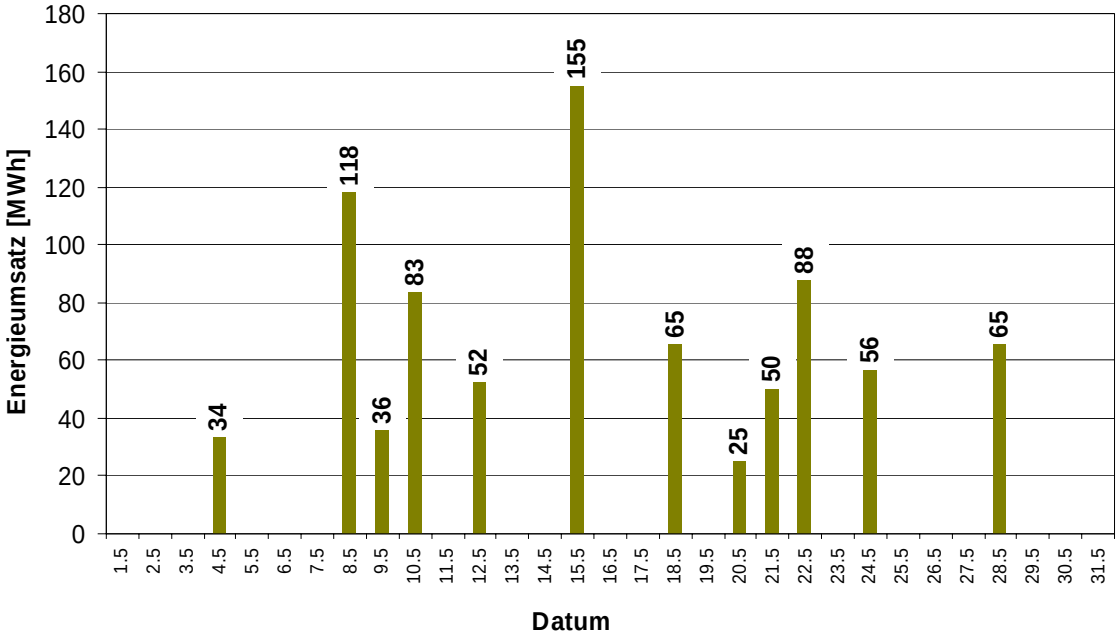

Abb. 4-14: Voraussichtlicher Energieumsatz im Mai 2008

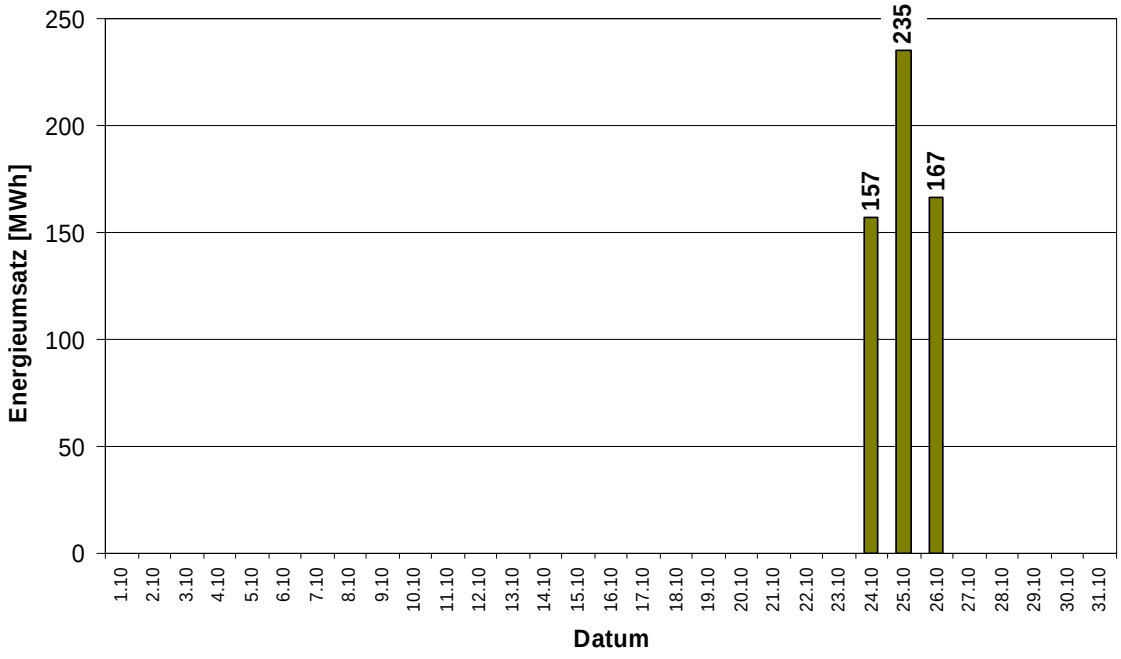

Abb. 4-15: Voraussichtlicher Energieumsatz im Oktober 2008

Nachfolgend die Emissionen an den Liegeplätzen der HafenCity durch die erwarteten Kreuzfahrtschiffe dargestellt, Tabelle 4-2.

	CO2	CO	NOX	HC	SO2	Partikel
Januar	0	0	0	0	0	0
Februar	0	0	0	0	0	0
März	0	0	0	0	0	0
April	44.218	22	874	59	417	84
Mai	496.291	276	9.189	541	4.780	931
Juni	147.308	87	2.717	179	1.421	277
Juli	328.573	197	6.087	269	3.155	622
August	361.064	199	6.787	325	3.463	683
September	101.401	75	1.819	136	966	193
Oktober	329.232	140	6.557	73	3.136	629
November	0	0	0	0	0	0
Dezember	175.481	97	3.439	140	1.689	328
Summe	**1.983.568**	**1.093**	**37.468**	**1.721**	**19.026**	**3.746**

Tabelle 4-2: Gesamtemissionen ohne Hilfskesselbetrieb aus Generatorbetrieb 2008 am Liegeplatz in [kg]

4.4.3 Emission aus dem Hilfskesselbetrieb in 2008 während der Liegezeiten

Mit den in Kapitel 4.3.3 erläuterten Ansätzen wurde die zu erwartenden Emissionen aus dem Kesselbetrieb aller Schiffe in 2008 ermittelt:

	Brennstoff-verbrauch	NO_X	CO_2	HC	SO_2	Partikel
Brennstoff mit 1,5%S	191.640	1.825	596.843	365	5.749	324

Tabelle 4-3: Gesamtemissionen 2008 aus Hilfskesselbetrieb am Liegeplatz in Kilogramm [kg]

Bezogen auf die Motorenemissionen in 2008 (100%), siehe Tabelle 4-2, haben die einzelnen relevanten Abgasbestandteile der Hilfskessel folgende Anteile: bei SO_2 und CO_2 30%, bei NOx 5% bei den HCs 21% und bei den Partikeln 9%.

Im Gegensatz zu den Motorenemissionen tritt wegen der kontinuierlichen Verbrennung CO im Kesselbetrieb kaum auf. CO (Kohlenmonoxid) tritt bei unvollständiger Verbrennung auf, die sich im gewissen Grade bei einer ständig neuen Zündung eines Verbrennungsvorganges, wie bei einem Dieselmotor, nicht komplett vermeiden lässt.

In Abb. 4-16/1 und 4-16/2 werden die in 2008 zu erwartenden Emissionen aus dem Motoren- und Hilfskesselbetrieb gegenübergestellt.

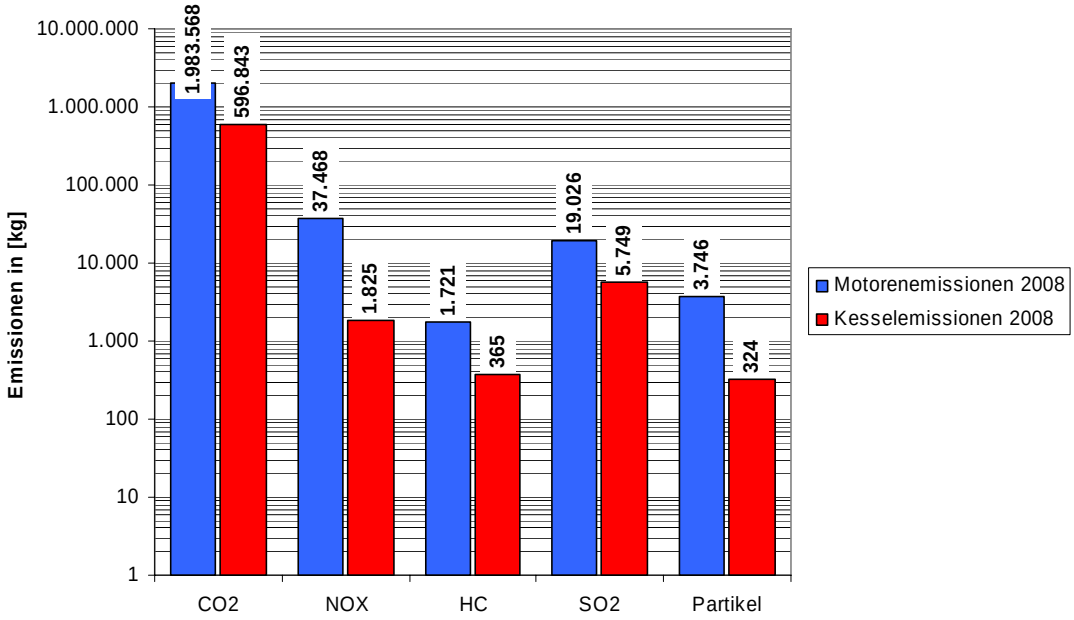

Abb. 4-16/1: Gegenüberstellung Motoren- und Hilfskesselemissionen 2008 (logarithmische Auftragung)

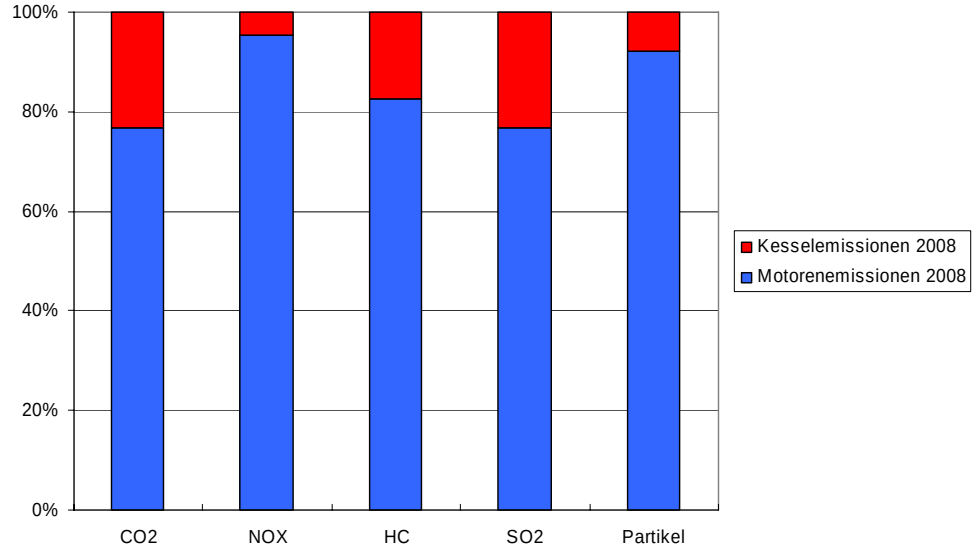

Abb. 4-16/2: Gegenüberstellung Motoren- und Hilfskesselemissionen 2008 (anteilige Auftragung)

4.4.4 Veränderungen bei den Grenzwerten für Schiffsemissionen

Zurzeit sind bei der IMO Änderungen des Annex VI zu MARPOL in der Diskussion.

Von Interesse sind in diesem Zusammenhang Verschärfungen der Grenzwerte für die NOx-Emissionen der Dieselmotoren und zukünftige Grenzwerte für den zulässigen Schwefelgehalt in Schiffsbrennstoffen.

Zuständig für die Entwicklung und die Entscheidung ist das Marine Environment Protection Committee (MEPC), das die technische Ausarbeitung der Vorschläge an das Sub-Committee „Bulk, Liquids And Gases“ (BLG) delegiert hat. In beiden Komitees sind alle Schifffahrtsnationen vertreten. Der von BLG im Februar erarbeitete Vorschlag wird von MEPC im April dieses Jahres diskutiert und ggf. akzeptiert. Wenn dieser Vorschlag auf der nächsten MEPC-Sitzung im Oktober 2008 verabschiedet wird, treten die neuen Regularien üblicherweise 18 Monate später in Kraft. Bei der IMO gelten das Mehrheitsprinzip und die Vereinbarung, dass in Kraft gesetzte Regeln für alle Schiffe unabhängig von der Zustimmung des jeweiligen Flaggenstaates gelten.

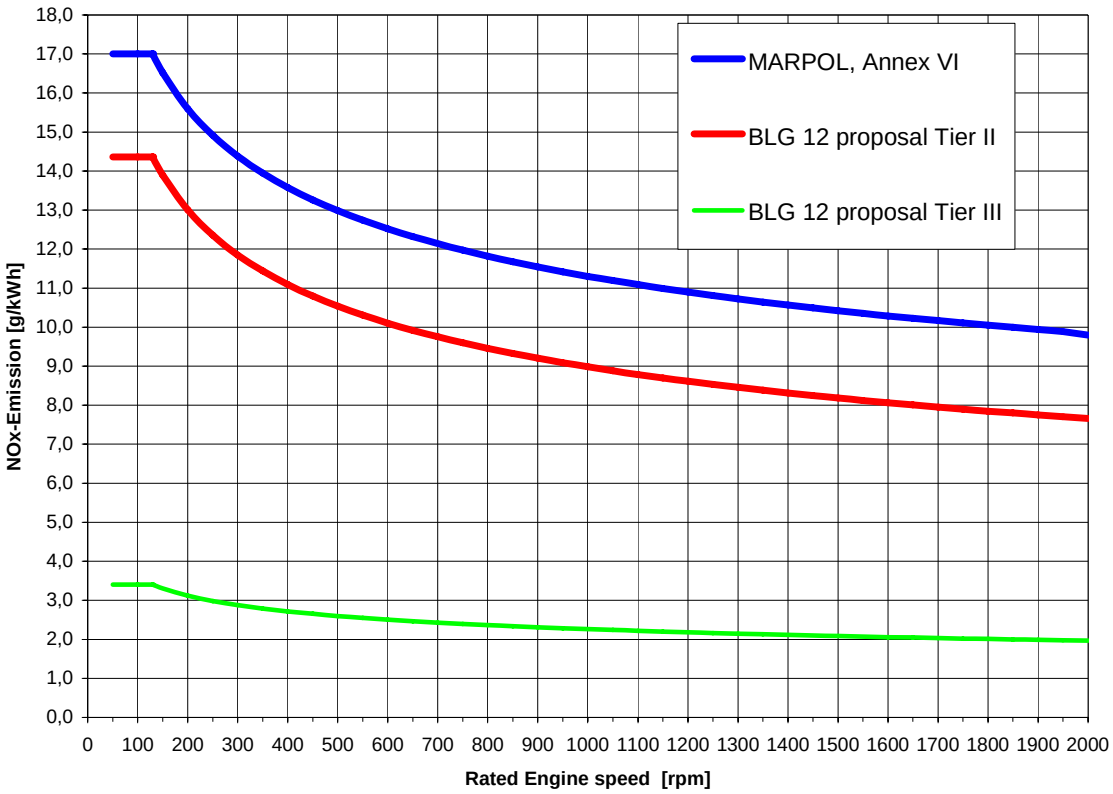

Abb. 4-17: MARPOL Annex VI, Regulation 13, Tier I, Tier II and Tier III (NOx limit curves)

Um die Schwefeldioxidanteil (SO2) im Abgas der weltweiten Schifffahrt zu senken wird in der IMO darüber diskutiert, den Schwefelanteil im Brennstoff zu begrenzen. Das MEPC-Subcommitee BLG hat hierzu, einer

vorliegenden neuen Studie folgend, drei mögliche Regelungen erarbeitet, die Anfang April 2008 in der MEPC diskutiert werden sollen. Über die genannten Jahreszahlen [in eckigen Klammern] der Inkraftsetzung ist ebenfalls zu entscheiden.

Option 1 Global

Ab [2012] Begrenzung der Schwefelgehalte von Brennstoffen weltweit auf 1,00%, ab [2015] auf 0,50%.

Option 2 Global / Regional

Begrenzung der Schwefelgehalte von Brennstoffen bleibt weltweit bei 4,50% und in den küstennahen „Schwefel-Kontrollbereichen" (SECAs) wird der Schwefelgehalt ab [2012] generell auf 0,10% gesenkt.

Option 3 Global / Regional with Micro-Areas

Begrenzung der Schwefelgehalte von Brennstoffen auf weltweit 3,00% ab [2012] und in den küstennahen „Schwefel-Emissions-Kontrollgebieten" (SECAs) wird der Schwefelgehalt ab [2010] generell auf 1,00% und ab [2015] in den SECAs auf 0,50% gesenkt.
Es können hier, beginnend ab 24 Seemeilen Abstand von der Küstenlinie, weitere Bereiche definiert werden, sogenannte „Micro-Emission Control Areas", in denen der S-Gehalt des Brennstoffs auf 0,10% begrenzt werden kann. Die Einführung dieser Bereiche muss bei der IMO zur Überprüfung eingereicht werden.

Weiter ist eine zweistufige Reduzierung der bisherigen NOx-Grenzwerte in der Diskussion, deren zweite Stufe (Tier III) den Einbau von SCR-Katalysatoren fordert, um die NOx-Emission auf 20% des jetzigen Grenzwertes zu senken.

5 Möglichkeiten zur Verringerung der Emissionen während der Liegezeit

5.1 Gase als Brennstoff für Schiffe

In der internationalen Seeschifffahrt sind Gase als Brennstoff z. Zt. nicht zulässig (siehe 5.1.1). Lediglich Tanker für den Transport von verflüssigtem Erdgas (LNG = Liquefied Natural Gas) dürfen LNG als Brennstoff verwenden. Diese Situation ändert sich zurzeit, so dass ab etwa 2010 auch LNG als Brennstoff zulässig sein wird. Andere Gase, wie z.B. Propan oder Butan (LPG = Liquefied Petroleum Gas), werden erst zu einem späteren Zeitpunkt (ca. 2013 bis 2015) als Schiffsbrennstoff im internationalen Verkehr zugelassen werden (siehe 5.1.2).

5.1.1 Rechtliche und sicherheitstechnische Rahmenbedingungen

Das UN SOLAS Übereinkommen lässt als Schiffsbrennstoffe nur Brennstoffe mit einem Flammpunkt von mehr als 60°C zu. Da alle Gase einen sehr viel niedrigeren Flammpunkt besitzen sind sie generell als Schiffsbrennstoffe nicht zulässig. Da auch Benzin mit einem Flammpunkt von ca. 40°C einen niedrigeren Flammpunkt besitzt, begrenzt diese Regelung den zulässigen Brennstoff praktisch auf Dieselkraftstoffe.

Für den internationalen Betrieb eines Schiffes ist es erforderlich, dass seine technische Sicherheit von allen Staaten akzeptiert wird, da sonst einzelne Staaten bestimmten Schiffen den Zugang zu ihren Hoheitsgewässern und Häfen verweigern können. Die UN Unterorganisation International Maritime Organisation (IMO) legt die mindestens einzuhaltenden sicherheitstechnischen Standards für Schiffe fest. Die von der IMO erarbeiteten internationalen Vereinbarungen wie z.B. das SOLAS Übereinkommen gewährleisten den freien Schiffsverkehr und garantieren weltweite sicherheitstechnische Mindeststandards sowie die weltweite Verwendbarkeit von Seeschiffen.

Seit dem Ende der 90er Jahre werden in Norwegen kleine Fährschiffe und Offshore-Versorger mit LNG als Brennstoff ausgerüstet, die allerdings lediglich in den norwegischen Hoheitsgewässern und in internationalen Gewässern betrieben werden.

Im Jahr 2005 hat Norwegen der IMO die Erarbeitung eines Codes für Gas als Schiffsbrennstoff vorgeschlagen, der auf den norwegischen Erfahrungen beruht. (DE 48/19; Norway: “Preliminary draft provisions for gas-fuelled engine installations in ships”). Vom zuständigen Gremium „Bulk Gases and Liquids“ (BLG) wurde beschlossen, eine Übergangsrichtlinie („Interim Guideline“) zu erarbeiten, um dem aktuellen Bedarf nach Sicherheits-anforderungen für Erdgas als Schiffsbrennstoff gerecht zu werden (Dokument BLG-10/6). Diese IGF-Interim Guideline (IGF=Internal Gas as Ship Fuel) soll durch einen allgemeinen Code (IGF-Code) abgelöst werden, der auch andere Gase, wie z.B. LPG, abdeckt. Die Interim Guidelines werden z.Z. erarbeitet und sollen für Erdgas und Verbrennungsmotoren gelten. Voraussichtlich wird die IGF-Interim Guideline in 2009 von BLG an das Marine

Safety Committee (MSC) zur Beschlussfassung gegeben. Stimmt MSC dem Entwurf zu, so besteht ab dann eine rechtliche Grundlage, Erdags als Schiffsbrennstoff in Kombination mit Verbrennungsmotoren im internationalen Seeverkehr einzusetzen. Der IGF-Code wird neben den Verbrennungsmotoren auch andere Energiewandler erfassen.

Es ist festzuhalten, dass das Mitführen von Erdgas als Schiffsbrennstoff für international eingesetzte Kreuzfahrtschiffe ab ca. 2010 mit Festlegung der technischen Anforderungen durch die IMO möglich sein wird. Andere Gase werden voraussichtlich ab 2015 als Schiffsbrennstoff an Bord mitgeführt werden dürfen.

5.1.2 Notwendige Installationen an Bord

Die notwendigen sicherheitsrelevanten Vorgaben werden in den IGF-Interim Guideline bzw. dem IGF-Code festgelegt. Für Erdgas als Schiffsbrennstoff sind diese Vorgaben im Entwurf verfügbar (BLG-12/7/1; Anhang zum Bericht der Correspondence Group). Weiterhin entwickeln die Klassifikationgesellschaften entsprechende Vorschriften.

Für ein Gassystem an Bord, das auch auf See betrieben werden soll, sind folgende wesentliche System-komponenten erforderlich

1. Flüssiggasspeicher für LNG,
2. Verdampfungseinrichtungen zur Phasenumwandlung des Flüssiggases,
3. ggf Gaskompressoren zur Druckerhöhung und
4. für Schiffe geeignete und zugelassene Gasmotoren (Motoren aus dem Landbereich sind nicht ohne weiteres geeignet)

Wie Abb. 5-1 zeigt, wird für die Speicherung von LNG an Bord, im Vergleich zum Dieselkraftstoff, ein ca. 3,5-faches Volumen benötigt. Dies ist auf den niedrigeren volumetrischen Energieinhalt des LNG und auf das zusätzliche Volumen der Drucktanks zurück zu führen. Ohne Berücksichtigung der Totvolumen der Tanks ergibt sich ein ca. 1,7-facher Raumbedarf.

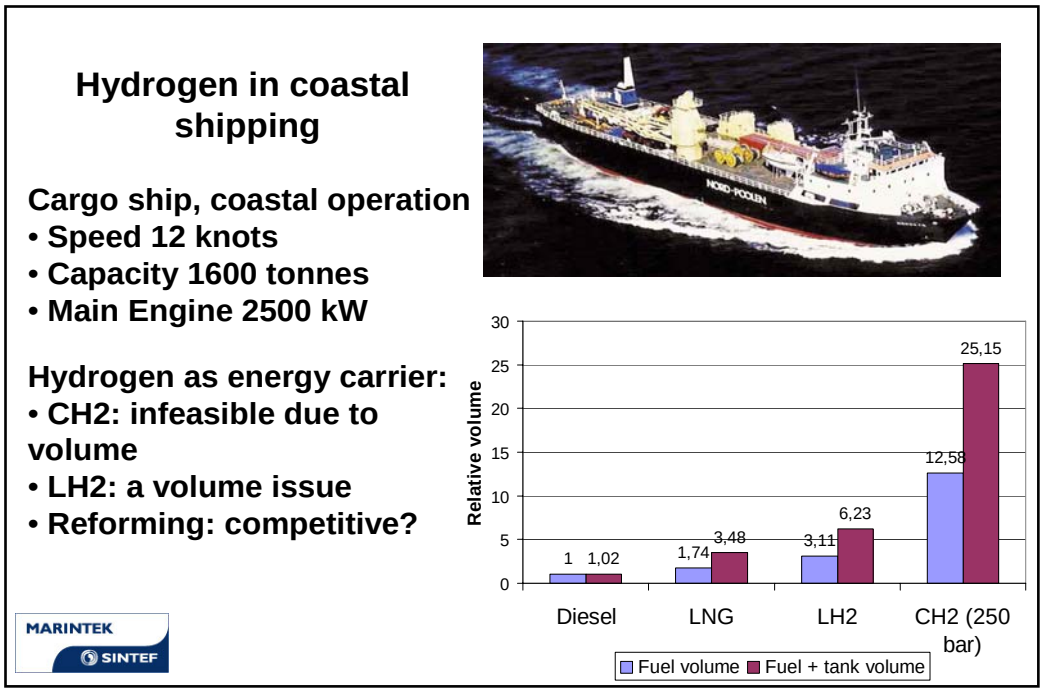

Abb. 5-1: Volumenbedarf unterschiedlicher Brennstoffe bei gleichem Energieinhalt
LNG: „Liquid Natural Gas“ = verflüssigtes Erdgas
LH2: „Liquid Hydrogen Gas“ = verflüssigter Wasserstoff
CH2: „Compressed Hydrogen Gas“ = druckverflüssigter Wasserstoff

5.1.3 Gasversorgung und Gaslagerung an Bord

Eine Lagerung des Gases an Bord ist in isolierten Tanks möglich, die gewährleisten müssen, dass die niedrige Temperatur des LNG von ca. -162°C, gehalten werden kann. LNG ist z. Zt. nur an relativ wenigen Stellen verfügbar. Daher eignet sich ein solches System z. Zt. im Wesentlichen für Schiffe, die immer dieselbe Strecke fahren. Beispielwiese könnte eine Fähre relativ einfach mit LNG versorgt werden. Ein weltweit eingesetztes Kreuzfahrtschiff aber eher nicht. Hier wäre LPG als weltweit verfügbarer Brennstoff eine Alternative.

Wird nur im Hafen Gas als Brennstoff eingesetzt, so ist eine Versorgung von Land möglich. Damit kann auch gasförmiges Erdgas eingesetzt werden, das aufgrund des niedrigen volumetrischen Energiegehaltes und der benötigten großen Energiemengen nicht als Brennstoff im Seebetrieb geeignet ist.

Die Versorgung von Land bietet den Vorteil, dass die eingesetzten Dual-Fuel Motoren (vgl. Abschnitt 5.2) im Seebetrieb mit Dieselkraftstoff betrieben werden könnten. Weiterhin ist das Schiff „gasfrei“ wenn es den Hafen verlässt. Die Notwendigkeit, weltweit akzeptierten Vorschriften genügen zu müssen (siehe oben), entfällt damit, da kein Gas an Bord ist.

5.1.4 Zusammenfassung

Gas als Schiffsbrennstoff ist zurzeit im internationalen Seeverkehr nicht einsetzbar, da die rechtlichen Voraussetzungen fehlen, an denen allerdings bei der IMO gearbeitet wird. Ab ca. 2010 wird Erdgas als Brennstoff für Verbrennungsmotoren einsetzbar sein. Mit Inkrafttreten eines noch zu erarbeitenden internationalen Codes für Gas als Schiffsbrennstoff wird auch der Einsatz von anderen Gasen wie z.B. LPG ab ca. 2013 bis 2015 sowie die Verwendung anderer Energiewandler, wie Gasturbinen oder auch Brennstoffzellen, möglich werden.

Eine Hafenversorgung mit Erdgas wäre bereits heute durchführbar. Hierzu könnten an Bord Dual-Fuel Motoren installiert werden, die im Seebetrieb mit Dieselkraftstoff betrieben werden können. Da es sich im Dieselbetrieb um übliche Motorenanlagen handelt und kein Gas an Bord ist, sind international abgestimmte Vorschriften nicht erforderlich. Die Schifffahrtsverwaltungen der Hafensaaten können den Gasbetrieb im Hafen eigenständig zulassen.

5.2 Verbrennung von Gasen in Motoren und Kesseln

5.2.1 Stand der Technik und Ausblick

Gasmotoren werden bei der dezentralen Energieversorgung in Europa flächendeckend eingesetzt. Zuverlässigkeit und Effizienz sowohl im Erdgasbetrieb, als auch bei Betrieb mit Biogasen, Klärgasen und anderen Sondergasen gilt als Stand der Technik. Gasmotoren werden in unterschiedlichsten Größen eingesetzt, von kleinen Blockheizkraftwerken (BHKW) in privaten Haushalten mit Leistungen von unter 100kW, bis zu großen industriellen BHKWs mit Leistungen von bis zu 4 MW pro Motor. Größere Gasmotoren mit einer Leistung von bis zu 40 MW sind nur in Einzelfällen realisiert worden.

Generell dienen Gasmotoren zur Grundlastversorgung mit elektrischer Energie und Wärme. Die Verwendung als Notstromaggregat ist selten, da Gasmotoren nur durch aufwändige Turboladertechniken die dynamischen Lastsprünge im Notstrombetrieb bewältigen können. Notstromaggregate und Motoren, die starke Leistungsänderungen bewältigen müssen, werden daher als Dieselmotoren ausgeführt.

Bei kleineren Gasmotoren bis ca. 4 MW wird im Allgemeinen das Gas vor dem Verdichter des Abgasturboladers zugeführt. Das Gemisch wird verdichtet, im Gemischkühler, der dem Ladeluftkühler der Dieselmotoren entspricht, gekühlt und letztlich im Brennraum durch eine Zündkerze gezündet. Bei diesen Motoren mit Gemischaufladung wird das Gas druckfrei vor dem Turbolader des Gas-Motors zugeführt. Der Gasmotor saugt durch den Unterdruck zwischen Luftfilter und Verdichter das Gas an. Durch die so genannte Gemischaufladung befindet sich im

gesamten Ladeluftsystem zündfähiges Gasgemisch. Daher ist diese Technologie nur bei verhältnismäßig kleinen Motoren mit geringen Volumina im Ladeluftsystem anwendbar. Die Gefahr einer Zündung des Gemisches und den resultierenden Folgen ist bei größeren Motoren, wie sie bei Schiffsantrieben verwendet werden, zu groß.

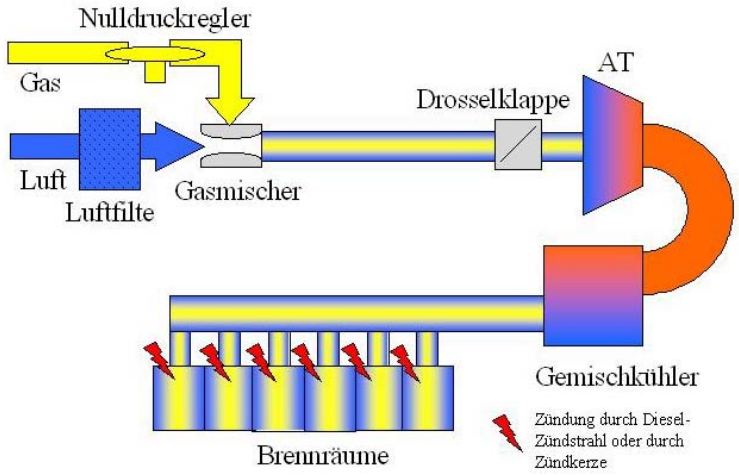

Abb. 5-2: Schematische Darstellung der Gemischbildung bei einem Gasmotor mit Gemischaufladung

Bei größeren Motoren in einem Leistungsbereich von etwa 4-15 MW wird das Gas direkt vor dem Zylinderkopf in die Ladeluft eingedüst. Bei dieser Technik muss der Gasdruck höher sein als der Ladedruck der Luft von ca. 4 bar. Die Gassysteme werden bis maximal 10 bar ausgelegt. Die Überwachung der Gasmotoren stellt bei der Eindüsung direkt vor dem Brennraum sicher, dass sich kein Gas in der Ladeluftleitung oder im Abgassystem sammelt. Bei diesen Motoren wird das Gasgemisch im Brennraum im Allgemeinen durch einen Diesel-Zündstrahl gezündet.

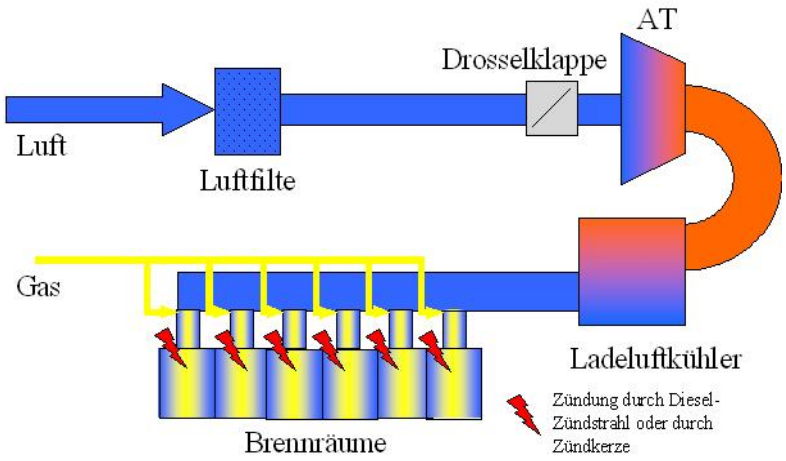

Abb. 5-3: Schematische Darstellung der Gemischbildung bei einem Gasmotor mit Gaseindüsung vor dem Brennraum (Gas-Drucksystem)

Sowohl bei Gasmotoren mit Gemischaufladung, als auch bei Gasmotoren mit Gaseindüsung direkt vor dem Brennraum, wird im Brennraum ein zündfähiges Gas-Luft-Gemisch komprimiert. Daher ist das als Blow-by bezeichnete, während des Kompressionshubes an den Kolbenringen vorbei strömende Gas, ein zündfähiges Gemisch. Dies kann auch zu einer zündfähigen Atmosphäre im Kurbelgehäuse des Gas-Motors führen.

Großmotoren ab einer Leistung von ca. 15 MW verfügen über ein Gas-Hochdrucksystem (> 300 bar). Bei diesen Motoren wird das Gas direkt in den Brennraum eingedüst und dann durch einen Diesel-Zündstrahl gezündet.

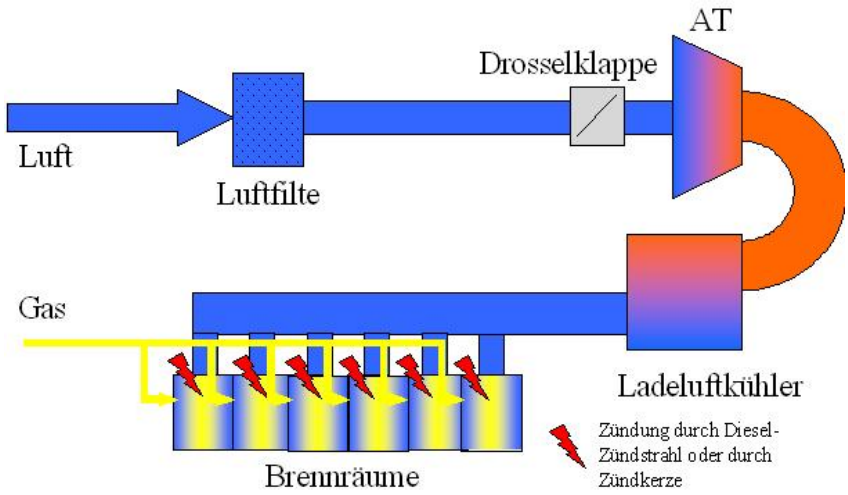

Abb. 5-4: Schematische Darstellung der Gemischbildung bei einem Gasmotor mit direkter Gaseindüsung in den Brennraum (Gas-Hochdrucksystem)

Die verschiedenen erläuterten Gasmotoren Technologien zeigen, dass je nach Motorentyp innerhalb des Motors unterschiedliche explosionsgefährdete Bereiche existieren.

Gasmotoren sind mit komplexer Sicherheits- und Regelungstechnik ausgestattet. Bei Gasmotoren wird das Gas-Luft-Gemisch in jedem Arbeitstakt auf einen eingestellten Wert geregelt. Der Zündzeitpunkt jedes einzelnen Brennraumes wird bei der Erkennung von klopfender Verbrennung, d.h. unkontrollierter Zündung, vor jedem Arbeitstakt automatisch verstellt, bis keine weiteren Klopfsignale detektiert werden. Damit Gasleckagen frühzeitig erkannt werden, wird die Brennraum- oder Abgastemperatur jeder einzelnen Zylindereinheit überwacht und der Motor, bei Abweichung der Temperaturen untereinander bzw. bei Abweichung des Temperatur-Mittelwertes von einem voreingestellten Wert, abgestellt.

Die stetige Weiterentwicklung von Gasmotoren führt zu steigender Effizienz und Zuverlässigkeit der Motoren. Die Motorenhersteller geben bereits heute elektrische Wirkungsgrade der Generatorsätze von bis zu 43 % an. Die zunehmende Verwendung von unreinen Sondergasen fördert die Entwicklung von robusten Motoren mit langen Standzeiten. Die Weiterentwicklung der Turbolader ermöglicht auch für Gasmotoren größere Lastsprünge und –abwürfe. In Kombination mit geregelten Turbolader-Bypässen wird ein flexibleres Lastverhalten der Motoren

ereicht. Dennoch wird bei Gasmotoren eine systembedingte Trägheit des Lastverhaltens im Vergleich zu Dieselmotoren bleiben.

Kessel, die mit Gas gefeuert werden, sind Stand der Technik. Gas gefeuerte Kessel werden in unterschiedlichsten Leistungsgrößen, sowohl in der Haustechnik, als auch bei industriellen Anlagen eingesetzt. Die Überwachungs- und Sicherheitseinrichtungen ermöglichen einen sicheren Betrieb von gasgefeuerten Kesseln. So wird z.B. durch einen Flammenwächter sichergestellt, dass ein Ausströmen von Gas nur bei brennender Flamme möglich ist. Vor- und Nachlüftung der Brennkammer verhindern die Akkumulation von Gas im Kessel und im Abgassystem.

Die CO2, NOx und PM Emissionen von Gasmotoren und Gaskesseln sind bei Erdgasbetrieb geringer als bei Dieselmotoren.

Zur Abschätzung der CO2 Emissionen unterschiedlicher Kraftstoffe hat die International Maritime Organisation (IMO) in dem Dokument MEPC/Circ.471 verschiedene CO2-Faktoren veröffentlicht. Die Faktoren sind in Gramm CO2 pro Tonne Kraftstoff angegeben. Der Wert für Dieselöl ist 3.2 Tonnen CO2 pro Tonne Kraftstoff und für Ergas 2.9 Tonnen CO2 pro Tonne Kraftstoff. Der massenbezogene Heizwert von Erdgas ist 1,3 bis 1,5-fach höher als der von Dieselölen. Die CO2-Emissionen pro kWh Strom sind bei Nutzung von Dieselölen daher mindestens um den Faktor 1,4 größer als bei Verwendung von Erdgas.

Die NOx Emissionen von Dieselmotoren sind höher als bei Gasmotoren, weil Dieselmotoren bei höheren mittleren Brennraumtemperaturen betrieben werden. Die Brennraumtemperatur bei Dieselmotoren ist inhomogener als bei Gasmotoren, so dass es mehr Temperaturspitzen bei der Verbrennung gibt. Bei höheren Temperaturen entsteht thermisches NOx.

Die Messungen der Emissionen eines Dual-Fuel Motors ergaben im 100% Lastpunkt bei Dieselbetrieb einen NOx Wert in der Größenordnung von 12 g/kWh und im Gasbetrieb einen NOx Wert von unter 2 g/kWh.

Die Höhe der SOx Emissionen hängt vom Schwefelanteil im Kraftstoff ab. Der zurzeit geltende Kurzzeitwert für den Schwefelgehalt von Gasen im Gasnetz liegt bei 150 mg/m^3. Basierend auf der Richtlinie 1999/32/EG wird der Schwefelgehalt von Dieselölen ab 1. Januar 2010 an Liegeplätzen auf 0,1% begrenzt. Zur Abschätzung der Schwefelemissionen von Gas- und Diesel-Motoren wird vereinfachend angenommen, dass 1m^3 Erdgas dem Energiegehalt von 1kg Dieselöl entspricht. Dies bedeutet, dass unter Berücksichtigung der oben genannten Werte, bei gleicher geleisteter Arbeit im Betrieb mit Gas 150mg Schwefel und im Betrieb mit Diesel 1000mg Schwefel emittiert werden, also ungefähr die 6-fache Menge an Schwefelemissionen bei Dieselbetrieb. Dabei ist nicht berücksichtigt, dass bei Dual-Fuel Motoren die Schwefelemissionen durch den Diesel-Zündstrahl um den im

Diesel enthaltenen Anteil ansteigen. Es ist auch nicht berücksichtigt, dass die Grenzwerte für Schwefelanteile in Gasen in den kommenden Jahren höchstwahrscheinlich sinken werden.

5.2.1.1 Gasmotoren an Land

Im stationären Bereich werden Magergemischmotoren mit Gemischaufladung betrieben, die durch ihr mageres Gasgemisch geringe NOx Emissionen bei hohen elektrischen Wirkungsgraden bis zu über 40% haben.

Die Emissionen bei stationären Landanlagen werden durch die Grenzwerte der TA-Luft begrenzt. Die Angaben in der TA-Luft sind in ppm bzw. mg/m^{3}N.

Für Bau, Betrieb und Instandhaltung gasgefeuerter Energieanlagen sind nach Definition des Energiewirtschaftsgesetzes die allgemein anerkannten Regeln der Technik einzuhalten. Diese Forderung gilt als erfüllt, wenn das technische Regelwerk des DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches) angewandt wird.

5.2.1.2 Gasmotoren und gasgefeuerte Kessel an Bord

Heutzutage werden Gasmotoren nur in Ausnahmefällen auf Schiffen eingesetzt. In der internationalen Seeschifffahrt gilt die in SOLAS festgelegte Forderung eines Flammpunktes der verwendeten Kraftstoffe von mindestens 60°C. Gase, die generell einen niedrigeren Flammpunkt haben, sind daher zur Verwendung als Kraftstoff auf Schiffen ausgeschlossen. Ausgenommen sind Gastanker, die unter den Auflagen des IMO „International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk“ (IGC-Code), das Boil-off-Gas (BOG) der Ladung als Kraftstoff verwenden können. Die Anforderungen an Gasmotoren auf Gastankern sind auch im IMO IGC-Code nicht erläutert. Daher müssen Schiffe mit Gas als Kraftstoff heutzutage von der zuständigen Administration einzeln zugelassen werden.

Die IMO entwirft zurzeit einen Code, der die Verwendung von Gas als Kraftstoff in der internationalen Seeschifffahrt regelt. In diesem Code werden neben den allgemeinen Anorderungen an die Lagerung und die Verteilung des Gases auf Schiffen auch die Anforderungen an Gasmotoren auf Schiffen definiert. Eine vorläufige Richtlinie, die nur für Methan als Kraftstoff gilt, wird in 2009 erwartet. Der endgültige Code, der für alle Gasarten gelten soll, wird frühestens in 2013 fertig gestellt.

In der europäischen Binnenschifffahrt wird die Verwendung von Gas als Kraftstoff durch die Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO) untersagt. Die RheinSchUO fordert einen Flammpunkt von mindestens 55°C für alle Kraftstoffe.

Verschiedene Motorenhersteller entwickeln zurzeit Gasmotoren, die als Antriebsmotoren auf Gastankern eingesetzt werden können. Mehrere Gastanker mit Gasmotorenantrieb sind bereits in Betrieb. Bei den verwendeten Gasmotoren handelt es sich nicht um reine Gasmotoren die nach dem Otto-Prinzip arbeiten, sondern um Dual-Fuel-Motoren, die das Gas mit einem Dieselzündstrahl nach dem Diesel-Prinzip zünden. Das Umschalten zwischen Diesel- und Gasbetrieb ist in definierten Betriebsbereichen (z.B. ab einer Leistung von mindestens 10-15% der Nennleistung) in beiden Richtungen jederzeit möglich. Die volle angeforderte Leistung kann in allen Lastbereichen jederzeit von dem Dieselsystem erbracht werden, wenn dynamische Lastsprünge im Gasbetrieb nicht abgedeckt werden können, oder wenn aufgrund von Sicherheitsschaltungen das Gassystem deaktiviert ist. Diese Motoren stellen den Standard für Schiffsdieselmotoren dar. Das bedeutet, dass bei allen Lastbereichen ca. 1-3% der Nennleistung durch den Diesel-Zündstrahl erbracht wird. Das heißt, dass der Anteil der Leistung und der Emissionen infolge der Verbrennung von Diesel mit abnehmender Leistung größer wird.

Die Weiterentwicklung der Diesel-Motoren zu Dual-Fuel-Motoren erfordert neben konstruktiven Maßnahmen umfangreiche sicherheits- und regelungstechnische Modifikationen.

An dem Motor muss ein Gassystem installiert werden, das das Gas sicher zu den Eindüsungsventilen leitet. Die Gasleitungen im Maschinenraum müssen doppelwandig mit überwachtem Zwischenraum sein, sofern der Maschinenraum als gassichere Zone definiert ist. Bei der Installation von einwandigen Gasleitungen gilt der Maschinenraum als gasgefährdet, und es werden dann strenge Sicherheitsanforderungen an den Maschinenraum gestellt. Für die Gasleitungen ist ein Inertgassystem notwendig, so dass bei einem Zwischenfall die Gasleitungen innerhalb des Maschinenraumes gasfrei gespült werden können. Zur Zündung des Gases im Brennraum ist ein Zündölsystem erforderlich. Das vorhandene Einspritzsystem eines Dieselmotors ist im Allgemeinen nicht als Zündölsystem geeignet, da die Einspritzmenge von 1-3 % der Nenn-Einspritzmenge den Betriebsbereich des konventionellen Einspritzsystems generell unterschreitet. Der Einspritzzeitpunkt ist idealer Weise variabel, damit auf klopfende Verbrennung reagiert werden kann. Ein Common-Rail-System kann diese Anforderungen erfüllen. Die Steuerung des variablen Einspritzzeitpunktes erfolgt über eine Klopferkennung, die den Zündzeitpunkt bzw. den Einspritzzeitpunkt entsprechend anpasst. Neben der komplexen Regelungstechnik einer Klopferkennung sind weitere Regel- und Steuermodule notwendig, die das Umschalten zwischen den verschiedenen Kraftstoffen regeln und überwachen.

Bei einer Gasversorgung von Land kann es durch Beimischung von Propan zu schnellen Absenkungen der Methanzahl kommen. Die Methanzahl kennzeichnet die Klopffestigkeit eines Gases. Propan senkt die Methanzahl erheblich, so dass Gasmotoren bei Zumischung von Propan zu dem Brenngas zu klopfen beginnen. Bei größeren Methanzahlschwankungen kann die Klopfregelung einen weiteren, sicheren Betrieb des Gasmotors nicht mehr gewährleisten, so dass der Motor abgeschaltet wird, oder bei Dual-Fuel Motoren in den Dieselbetrieb umschaltet.

Für Gas- und Dual-Fuel-Motoren muss ein Sicherheitskonzept entwickelt werden. Anhand von Failure Mode and Effect Anlaylsen (FMEA) ist die Wirksamkeit eines Sicherheitskonzeptes nachzuweisen. Zur Funktionalität des Sicherheitskonzeptes gehört entsprechende Sensorik, die definierte Zustände überwacht. Dies können unter anderem die Abgas-, Brennraum-, Laufbuchsen- und die Lagertemperaturen sein.

Die beschriebenen notwendigen Modifikationen an Dieselmotoren zeigen, dass die Weiterentwicklung von konventionellen Dieselmotoren zu Dual-Fuel-Motoren nicht einfach ist. Eine nachträgliche Umrüstung bereits installierter Dieselaggregate erscheint als zu komplex.

In der Schifffahrt werden gasbefeuerte Kessel auf LNG-Tankern eingesetzt. Bei diesen speziellen Schiffen wird das BOG in Dampfkesseln zur Erzeugung von Dampf für die Hauptturbinen und Hilfsaggregate verfeuert. Die Dampfkessel sind für den Betrieb mit Gas und/oder Schweröl konstruiert.

Die Umrüstung von Ölbrennern auf Gasbetrieb ist möglich. Hierbei müssen Anpassungen am Gasversorgungssystem vorgenommen werden, die den bei Gasmotoren geschilderten Anforderungen entsprechen. Innerhalb des Kessels selber ist der Brenner umzurüsten, so dass gasförmige Brennstoffe verfeuert werden können. Eine Vorlüftung und eine Flammenüberwachung sind auch im Ölbetrieb erforderlich, so dass an dieser Stelle die Modifikationen ggf. auf die Steuerungstechnik beschränkt sind.

Bei Kesseln wird ein wesentlicher Anteil der Wärme über Wärmestrahlung übertragen. Da die Strahlungsanteile einer Gasflamme wesentlich geringer sind als die einer Ölflamme, kann es sein, dass bei einer Umrüstung eines Ölkessels zu einem gasbefeuerten Kessel die thermische Auslegung des Kessels überprüft werden muss. Die nachträgliche Umrüstung von ölgefeuerten Kesseln zu gasgefeuerten Kesseln erfordert daher eine umfassende Betrachtung des Kessels.

Bei der Verwendung von Gas als Kraftstoff auf Schiffen sind neben den Sicherheitsanforderungen an den Seebetrieb auch immer mögliche Implikationen mit den geltenden Hafen- oder Werftrichtlinien zu bedenken. So gilt Gas auf Werften generell als unzulässiger Gefahrenstoff.

5.2.2 Notwendige Installationen an Bord

Für die Versorgung von Gasmotoren und gasgefeuerten Kesseln mit Gas an Bord von Schiffen sind zusätzliche Installationen an Bord notwendig. In diesem Abschnitt werden die Installationen beschrieben, die ab einer definierten Übergabestelle vor dem Maschinenraum notwendig sind. An dieser Übergabestelle soll das Gas in der geforderten Menge unter dem geforderten Druck vorliegen.

Für den Betrieb von Gasmotoren muss das Gas entsprechend der verwendeten Motorentechnologie auf den erforderlichen Druck geregelt werden. Bei den Gasmotoren mit Druck- oder Hochdruckeindüsung wird das Gas

verdichtet. Hierzu sind Gasverdichter erforderlich, die im Allgemeinen durch Elektromotoren angetrieben werden. Bei Motoren mit Gemischaufladung, bei denen die Motoren das Gas ansaugen, wird der Gasdruck in einer Gasregelstrecke auf den herrschenden Umgebungsdruck geregelt.

Die Gaszufuhr zum Maschinenraum muss bei einem Zwischenfall außerhalb des Maschineraumes automatisch und von Hand abzusperren sein. Die Gasventile zur automatischen Absperrung der Gaszufuhr sind in einem Raum unterzubringen, der im Allgemeinen als gasgefährdete Zone einzustufen ist. Die Gasleitungen sind nach einer Absperrung zu inertisieren. Hierzu werden ein Inertgassystem und Entlüftungsleitungen benötigt.

In gasgefährdeten Zonen bestehen erhöhte Anforderungen an elektrische Installationen. Permanent messende Gassensoren sind zu installieren. Bei Überschreiten gewisser Gaskonzentrationen unterhalb der unteren Explosionsgrenze (UEG) wird Gasalarm für diesen Bereich ausgelöst und alle elektrischen Installationen, die nicht für den Betrieb in zündfähiger Atmosphäre geeignet sind, werden sofort abgeschaltet. Alle elektrischen Installationen, die auch im Notfall betrieben werden müssen, sind in geeigneter Ex-Schutz Klasse auszuführen.

Ein Sicherheitskonzept für den Betrieb von gasgefeuerten Motoren und Kesseln legt fest, welche Bereiche des Schiffes als gasgefährdete Bereiche und welche als gassichere Bereiche ausgeführt werden müssen. Unter bestimmten Voraussetzungen kann der Maschinenraum als gasgefährdeter Bereich ausgeführt werden. In einem solchen Fall sind alle elektrischen Installationen entsprechend dieser Zone anzupassen. Bei der Ausführung des Maschinenraums als gassichere Zone gelten keine gesonderten Anforderungen an den Maschinenraum. Um dies zu erreichen, sind alle Gas führenden Leitungen innerhalb des Maschinenraumes doppelwandig mit Überwachung des Zwischenraumes auszuführen.

5.2.3 Zusammenfassung

Der Betrieb von gasgefeuerten Motoren und Kesseln ist Stand der Technik. Die Emissionen bei der Verwendung von Gas als Brennstoff sind wesentlich geringer als bei der Verwendung von Dieselkraftstoffen. Der Betrieb mit Gas oder Dual-Fuel als Brennstoff ist bei frühzeitiger Planung von Neuanlagen möglich. Eine Nach- oder Umrüstung bestehender Motoren und Kessel zu Gasbetrieb birgt jedoch erhebliche Probleme. Es ist die thermische Auslegung der Anlagen und sicherheitstechnische Überwachung zu berücksichtigen. Es sind in der Schifffahrt derzeit keine erprobten und zugelassenen Umrüstungen bekannt. Daher wird nach heutigem Stand der Technik eine Umrüstung von Dieselmotoren und Ölkesseln als realistische Alternative ausgeschlossen.

Dual-Fuel Motoren, die mit Gas und Diesel betrieben werden, haben den Vorteil, dass das flexible Lastverhalten von Dieselmotoren erhalten bleibt. Es wäre denkbar, dass die Motoren während der Reise auf hoher See mit Diesel betrieben werden und bei Liegezeiten im Hafen auf Gasbetrieb umgeschaltet werden. Durch die Verwendung von Diesel als Zündstrahl bleibt jedoch ein Teil der Diesel-Emissionen erhalten. Vor allem bei

Lastsprüngen, die durch eine erhöhte Diesel-Einspritzung abgefangen werden, sind die Emissionen des Dual-Fuel Motors in gleicher Größenordnung wie bei Dieselmotoren.

Die Installation von Gasmotoren und gasgefeuerten Kesseln erfordert komplexe Sicherheitstechnik. Gasleitungen sind doppelwandig, mit überwachtem Zwischenraum, auszuführen. Es müssen Gassensoren und andere Sensorik zur Betriebsüberwachung installiert werden, so dass das unerwünschte Austreten von Gas frühzeitig erkannt wird. Die Verhinderung zündfähiger Gas-Luft-Gemische außerhalb der Brennräume hat höchste Priorität.

5.3 Brennstoffzellen zur Energieerzeugung

Brennstoffzellen (BZ) wandeln die chemische Energie von Wasserstoff direkt und ohne Verbrennungsprozesse in Elektrizität um. Als Reaktionsprodukt entsteht Wasser. Hochtemperaturbrennstoffzellen (siehe unten) können auch Kohlenmonoxid (CO) als Brennstoff verwenden. Die Haupttypen von Brennstoffzellen (BZ) und ihre Betriebstemperaturen sind in Abb. 5-5 dargestellt.

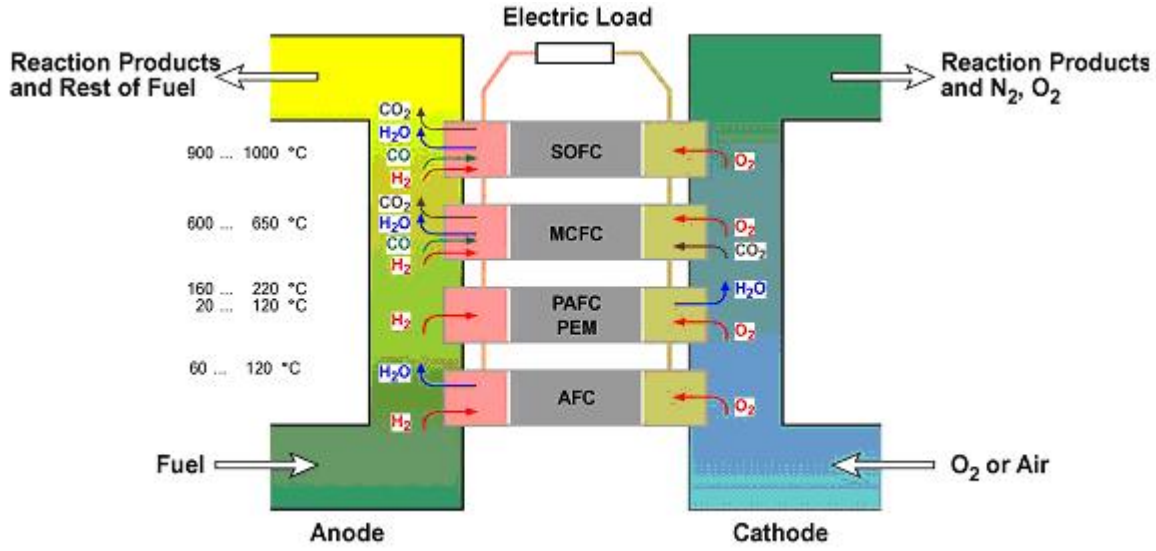

Abb. 5-5: Unterteilung von Brennstoffzellen nach ihrem Elektrolyten

Als Brennstoff wird Wasserstoff (ggf. mit CO Anteilen) und als Reaktionspartner Sauerstoff bzw. Luft der BZ zugeführt. Beide Gasräume sind durch die sog MEA (Membrane Electrolyte Assembly) getrennt, die aus Zellmembran, Elektrolyt und Katalysator besteht. Als Reaktionsprodukte entstehen auf der Anodenseite Wasser und ggf. CO2. Auf der Kathodenseite wird der Restsauerstoff und bei mit Luft betriebenen BZs der Luftstickstoff als N2 abgeführt. Im Unterschied zu offenen Verbrennungsprozessen, bei denen der Luftsauerstoff mit Stickstoff reagiert entsteht in BZs kein NOx.

Diese BZ Haupttypen lassen sich in Hoch- und Niedertemperatur Brennstoffzellen unterteilen. Die Abwärme von Niedertemperatur BZ kann zu Heizzwecken verwendet werden, während die Abwärme von Hochtemperatur BZ auch zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Hochtemperatur BZ sind die „Solid Oxide Fuel Cells“ (SOFC) und „Molten Carbonate Fuel Cells“ (MCFC). Niedertemperatur BZ sind „Alkaline Fuel Cells“ (AFC), “Phosporic Acid Fuel Cells” (PAFC) und “Poly Electrolyte Membrane Fuel Cells” (PEM-FC.)

5.3.1 Stand der Technik und Ausblick

Die ersten in der Raumfahrt eingesetzten Brennstoffzellen waren AFCs. Diese Technologie spielt auch aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber den CO2 Anteilen der Luft heute keine Rolle mehr. PA-FCs sind bereits in großer Stückzahl auch als BHKWs betrieben worden. Von der HEW und den Hamburger Gaswerken wurden z.B. in der Lyserstraße in Hamburg Ende der 90er Jahre zwei PAFCs im Rahmen eines Pilotprojektes betrieben (Holger Grubel, Gerald Newi: „Praktische Erfahrungen mit der Phosphorsauren Brennstoffzelle“, Forschungsverbund Sonnenenergie „Themen 1999/2000“, S.65 ff). Allerdings wird die PAFC z.Z. nicht weiterentwickelt, da der Hersteller keine ausreichenden wirtschaftlichen Perspektiven für die Technologie sieht (M. Blesl, M. Ohl u.A.: „Marktentwicklungen bei stationären Brennstoffzellen“, eBWK Bd 59(2007) Nr.12).

Der in der Öffentlichkeit bekannteste Typ von Brennstoffzelle (BZ) ist die PEM (Poly-Elektrolyt-Membran) BZ, die im Kraftfahrzeugbereich und in den meisten Hausheizungssystemen zur Anwendung kommt. Praktisch alle Weiterentwicklungen bei Niedertemperatur BZs verwenden die PEM Technologie. Mit PEM BZs sind auch die von der Hochbahn betriebenen Busse ausgerüstet.

Die Bekanntesten Entwickler von Hochtemperatur Brennstoffzellen in Europa sind CFC-Solutions und Ansaldo (MCFC) sowie Siemens Westinghouse und Rolls Royce Fuel Cell Systems (SOFC).

Einen Überblick über Entwicklungsstand und derzeitige Kosten enthält die folgende Abb. 5-6:

			PEM		PAFC		MCFC		SOFC	
Anwendungsbereich und Parameter			Stand	Ziel	Stand	Ziel	Stand	Ziel	Stand	Ziel
Hausenergie-versorgung	Stacklebensdauer	[1 000 h]	> 5	40					12	40
	Wirkungsgrad [1])	[%]	27 bis 31	> 35					25 bis 30	> 30
	Investitionskosten [2])	[€/kW]		1 250						1 250
Industrie und Gewerbe	Stacklebensdauer	[1 000 h]	20		40		30	40	20	40
	Wirkungsgrad [1])	[%]	35		40		47	50	46	50
	Investitionskosten [2])	[€/kW]	2 500		4 000		6 670	1 250	11 000	1 250

[1]) elektrisch [2]) auf die elektrische Leistung bezogen, geschätzt

Abb. 5-6: Entwicklungsstand BZ-Technologie im Jahr 2007
Quelle: eBWK Bd 59(2007) Nr.12

Insbesondere wird deutlich, dass die derzeitigen Kosten von BZ Systemen erheblich über denen konventioneller Energiewandler liegen. So kann bei Großkraftwerken von Kosten von ca. 1000 bis 1500 €/kW und bei Dieselgeneratorsätzen von ca. 500 €/kW ausgegangen werden. Gemäß Abb. 5-6 liegen BZ Systeme heute bei ca. 2500 €/kW für PEM und 6700 €/kW für MCFC Systeme.

Die Brennstoffzellentechnologie besitzt ein sehr großes Wirkungsgradpotenzial bereits im niedrigen Leistungsbereich. Abb. 5-7 zeigt die Einschätzung dieses Potenzials gemäß den Ergebnissen eigener Untersuchungen /10/.

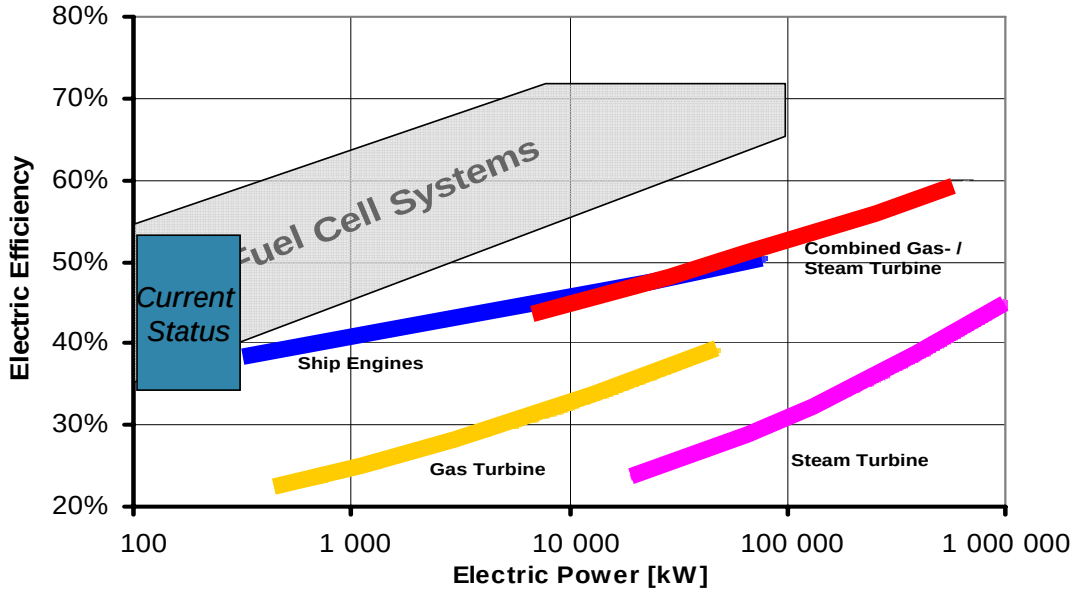

Abb. 5-7: Wirkungsgrade und Leistungen unterschiedlicher Energiewandler,
Quelle: Germanischer Lloyd

Es wird deutlich, dass z. Zt. und in naher Zukunft die möglichen Leistungen auf einige hundert kW begrenzt sein werden. Allerdings können mehrere Einheiten in einer Anlage gemeinsam betrieben werden, um so Anlagen im unteren MW Bereich zu realisieren. Z. Zt. sind Systeme mit ca. 300 kW Leistung als Prototypen verfügbar (MCFC von CFC-Solutions). Mittelfristig (nach 2010) ist mit Modulen von ca. 500 kW Leistung zu rechnen.

5.3.2 Brennstoffzellen an Bord und an Land

Für BZ Systeme ist die Unterscheidung in Land- und Schiffsysteme nicht sinnvoll, da die sich in der Entwicklung befindlichen Schiffssysteme aus Landanlagen abgeleitet werden bzw. auch als Landanlagen eingesetzt werden sollen. Bei Landanlagen entfällt ggf. die Aufbereitung und Lagerung des Brennstoffes, da diese direkt mit Erdgas bzw. Wasserstoff betrieben werden können.

Für Schiffe ist zwischen der Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff und der Verwendung von verflüssigtem Erdgas (LNG), LPG oder flüssigen Brennstoffen wie Methanol, Ethanol oder auch Diesel bzw. synthetischen Kraftstoffen zu unterscheiden. Wasserstoff kommt immer dann zum tragen, wenn es sich, wie z.B. bei dem auf der Alster einzusetzenden Ausflugsschiff des ZEMSHIP Projektes, um Fahrzeuge mit relativ kleiner Leistung und begrenztem Aktionsradius handelt. Hier findet die PEM BZ ihren idealen Anwendungsbereich. Für große Reichweiten und hohe Leistungen kommen nur flüssige Brennstoffe oder LPG bzw. LNG in betracht. MCFC und SOFC BZs sind hier die aussichtsreichsten BZ-Typen. Abb. 5-8 illustriert diesen Zusammenhang.

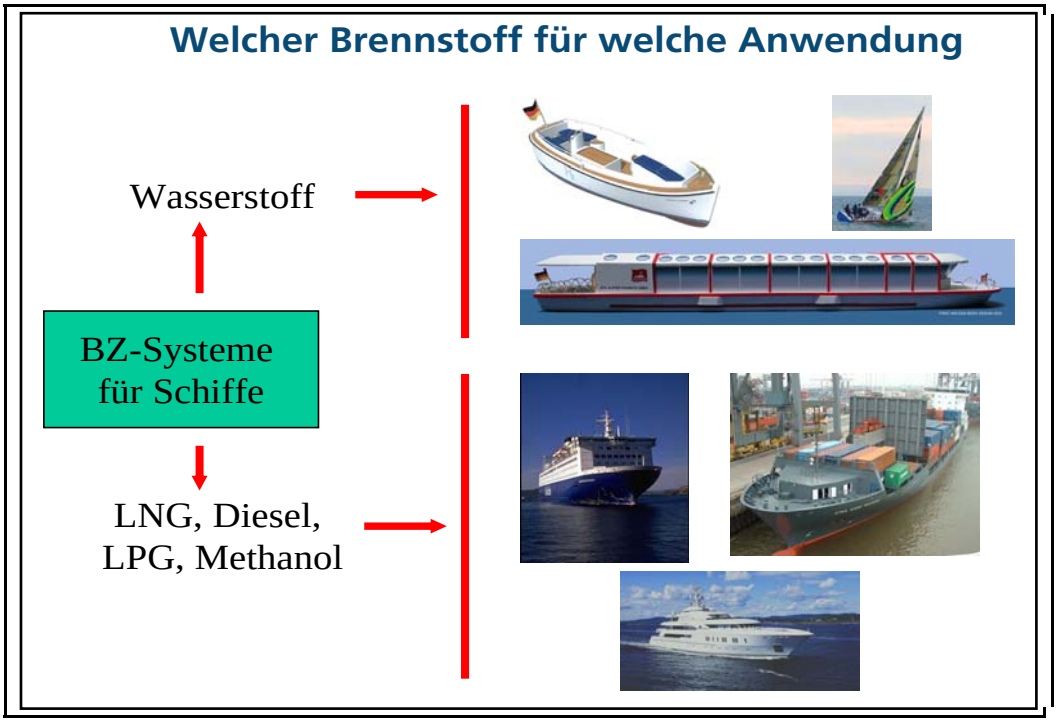

Abb. 5-8: Anwendungsfelder von Brennstoffzellen für Schiffe.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie „FCSHIP“ („Fuel Cells For Ships, FCSHIP“, Machbarkeitsuntersuchung, 2002/2004, 21 Partner aus 6 Ländern) wurden die Möglichkeiten für den Einsatz von BZ Systemen auf Schiffen untersucht. Im Ergebnis stellte sich heraus, dass für große Seeschiffe BZ-Systeme zur Hilfsenergieversorgung in Betracht kommen. In jedem Fall sind Module mit Leistungsgrößen von ca. 500 kW notwendig, die sich heute auch in der Entwicklung befinden. Damit sind diese Anlagen größer als die bislang in Modellprojekten erprobten BZ-Systeme, die i. A. kleiner 300 kW sind. Abb. 5-9 zeigt die möglichen Einsatzgebiete von BZ-Systemen auf Schiffen.

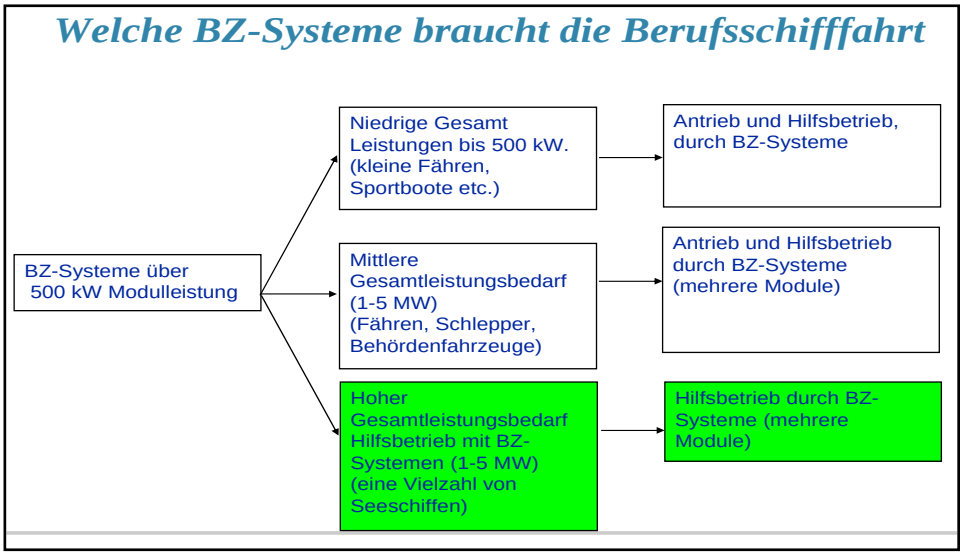

Abb. 5-9: Einsatzmöglichkeiten für BZ Systeme auf Schiffen nach FCSHIP

Wie Langzeitmessungen auf der Fähre „Kronprinz Harald“ (Kiel/Oslo) ergeben haben, reichen häufig Leistungen weit unterhalb der installierten Nennleistung aus, um den weit überwiegenden Teil der im Hilfsbetrieb benötigten Energie zur Verfügung zu stellen.

Wie Abb. 5-10 zeigt, können z.B. rund 90% der benötigten Hilfsenergie auf der Kronprinz Harald mit einer Leistung von maximal 2 MW abgedeckt werden obwohl die installierte Leistung etwa 6 MW beträgt. Schon 900 kW Leistung reichen für die Abdeckung von ca. 45% der benötigten Energie (die Fläche unter der Kurve in Abb. 5-10 stellt die benötigte Energie dar).

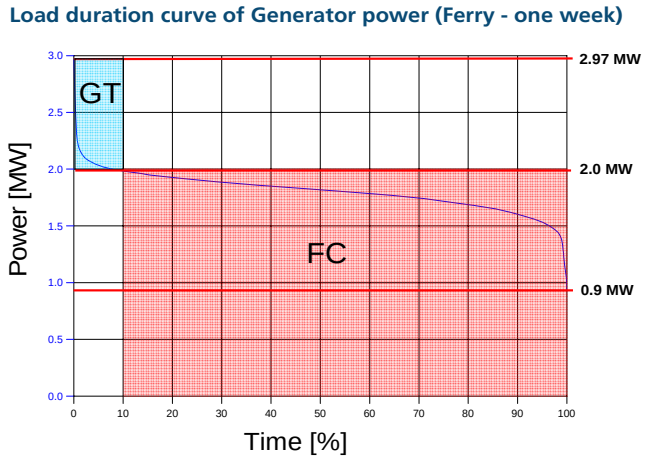

Abb. 5-10: Lastdauerkurve einer Fähre über einer Woche,
FC: Brennstoffzellen, GT: Gasturbine
Quelle: Germanischer Lloyd

In Europa werden mit Fellow Ship, MCWAP und METHAPU drei Projekte zur Entwicklung von BZ-Systemen für Seeschiffe durchgeführt. Im skandinavischen Fellow Ship Projekt soll als erste Stufe Ende 2008 eine 300 kW MCFC mit Erdgas auf einem Offshore Versorger betrieben werden Hersteller der MCFC ist CFC-Solutions aus Deutschland. Im MCWAP Projekt arbeiten unterschiedliche Partner ebenfalls an der Realisierung einer MCFC von mehreren Hundert kW als Landtestanlage. MCFC Hersteller ist die italienische Firma Ansaldo. Im METHAPU /cite{www.METHAPU.org}/ Projekt soll eine SOFC von 250 kW entwickelt und mit einem 20 kW Versuchssystem auf einem Schiff der Funktionsnachweis erbracht werden. Das 20 kW Versuchssystem der Firma Wärtsilä wurde Ende 2007 auf einem Schiff von Wallenius Marine installiert. Als weiteres Entwicklungsvorhaben ist die Studie FELICITAS zu nennen, in der über Anwendungen im Land- und Schiffsbereich gearbeitet wird. Der SOFC Entwickler Rolls Royce Fuel Cell Systms ist hier als BZ Hersteller engagiert.

Auch im Rahmen des NIP in Wasserstoff und Brennstoffzellen in Deutschland (NIP=Nationales Innovations-Programm) werden Projekte zur Entwicklung von BZ-Systemn auf Seeschiffen diskutiert, ohne das bislang ein Vorhaben beantragt wurde. Mit Leistungsstarken BZ-Systemen von ca. 500 kW Modul-Leistung ist im Zeitraum 2015 bis 2020 zu rechnen.

5.3.3 Installationen an Bord

Die noch sehr großvolumigen Brennstoffzellenanlagen müssen in die Maschinenanlage integriert werden, wegen des Lastwechselverhaltens ist auch eine Einbindung in das Lastregelsystem mit einer Verbindung zu den Dieselgeneratoren vorzusehen. Alle sicherheitstechnischen Anforderungen an die Brennstoffversorgung mit Gasen sind ebenfalls zu erfüllen. Unklar ist, ob die Wärmeversorgung der Hilfskessel ebenfalls durch die Brennstoffzellenanlage (ggf. abhängig vom Brennstoffzellentyp) mit übernommen werden kann.

5.3.4 Zusammenfassung

Mittel- bis Langfristig sind BZ-Systeme für Schiffe eine sehr umweltfreundliche Option für die Abdeckung des Energiebedarfes kleiner Einheiten bis hin in den unteren MW Bereich sowie für die Hilfsenergieversorgung bis in diesen Leistungsbereich. Verfügbar sind z. Zt. Einheiten mit Leistungen von ca.200 kW und zukünftig 300 kW. Für Installationen an Bord könnten ab ca. 2015 bis 2020 serienreife Systeme von 500 kW Modul-Leistung zur Verfügung stehen. Auch wenn davon auszugehen ist, dass im realen Betrieb eines Kreuzfahrtschiffes nicht die gesamte installierte Hilfsenergieleistung benötigt wird, sind die z. Zt. und bis ca. 2020 zu erwartenden verfügbaren Leistungen von BZ-Systemen zu gering, um den benötigten Bedarf abzudecken.

5.4 Abgasaufbereitung

In Kapitel 4 und 6 dieses Berichtes sind die vom Schiffsbetrieb ausgehenden Emissionen analysiert worden. Folgend werden die vorhandenen bzw. in Entwicklung befindlichen technischen Lösungen beschrieben, die eine Reinigung des Abgases ermöglichen. Grundsätzlich können die Abgase von Stickoxiden, Schwefeloxiden und Partikelemissionen gereinigt werden.

5.4.1 Stand der Technik und Ausblick

5.4.1.1 Stickoxide

Zur Entfernung von Stickoxiden aus dem Abgas von Schiffsdieselmotoren werden üblicherweise SCR – Katalysatoren verwendet. SCR steht dabei für „Selective Catalytic Reaction". Dabei wird in das Abgas eine wässrige Lösung von Urea (Harnstoff) eingespritzt, die in Ammoniak umgewandelt wird und im Beisein des Katalysators NOX in N2 umwandelt. Voraussetzung ist eine Abgastemperatur zwischen 270 °C und 500 °C, üblicherweise etwa 320 °C. Die Ureazufuhr muss dabei an die jeweilige Motorleistung angepasst werden. Der Katalysator besteht aus Titanoxid und Vanadiumoxid in modularer Bauweise der keramischen Bauteile.

SCR Katalysatoren kommen seit 1989 bei mehr als 300 Schiffsmotoren zum Einsatz. Technisch können abhängig vom Urea-Einsatz Stickoxidreduzierungen von 95% oder mehr erreicht werden. Für eine Reduzierung von 90% werden ca. 15g Urea pro kWh des Motors benötigt.

Die Lebensdauer des Katalysatormaterials hängt von der Brennstoffqualität ab, insbesondere dem Schwefelgehalt. Bei Brennstoffen mit 1,5% Schwefelgehalt muss das Katalysatormaterial etwa alle 5 Jahre ersetzt werden. Zur Säuberung des Katalysators von Ablagerungen sollte ein Rußbläser installiert werden.

Nach einem Kaltstart benötigt der Katalysator etwa 20-30 Minuten, bis die Betriebstemperatur erreicht ist.

40 %-ige Urealösung wird per LKW angeliefert und in Tanks an Bord gelagert. Um die Auskristallisation des Ureas zu verhindern, müssen die Tanks so angeordnet werden, dass die Innentemperatur nicht unter 0°C sinkt. Gegebenenfalls müssen sie beheizt werden können. Die Urea Lösung kann aber auch erst an Bord erzeugt werden.

Katalysator und Urea Tank benötigen ein Volumen von 50 – 100 m^3. Dabei kann ein Katalysator den erforderlichen Abgas-Schalldämpfer ersetzen. Das ermöglicht in den meisten Fällen eine Nachrüstung auf existierenden Schiffen. Dabei muss unter Umständen auftretenden Stabilitätsproblemen infolge der zusätzlichen Massen hoch im Schiff die entsprechende Beachtung geschenkt werden. Ein nachträglicher Einbau auf einer Werft benötigt etwa 1-3 Wochen.

Wenn der SCR zusammen mit einem Oxidationskatalysator verwendet wird, können VOC Emissionen um 75 - 90% und CO Emissionen um 50-90 % vermindert werden. Von großer Bedeutung ist die Regelung der Urea-zufuhr, um den Ammoniakschlupf unter 0.1 g/kWh zu halten.

5.4.1.2 Schwefeloxide

Um die Abgase zu waschen, wird dem Seekühlwasser ein Teilstrom entnommen und den Abgaswäschern (Scrubbern) zugeführt. Aus Gründen der Betriebs- und Anlagensicherheit muss für jeden Motor und, falls vorhanden auch für Kessel, je ein separater Scrubber installiert werden (Abb. 5-11). Durch das Waschen mit Seewasser werden die Schwefeldioxide entfernt (Abb. 5-12). Die Reaktion mit dem Seewasser ergibt einen sehr saurer Abwasserstrom der in Hydrozyclonen gefiltert wird, um die ebenfalls ausgewaschenen Partikel zu entfernen, die an Bord gesammelt und später an Land entsorgt werden müssen. Das von den Hydrozyclonen kommende säurehaltige Wasser wird mit dem von der Maschinenanlage kommenden Kühlwasser vermischt, um die Anforderungen an den maximal zulässigen Säuregehalt bei der Einleitung in das Umgebungswasser zu erfüllen. Es bleibt festzustellen, dass ein schwefligsaures Waschwasser in die Umgebung eingeleitet wird.

In Küstenregionen und Häfen sollte die Abgabe von Srubber-Abwasser an die Umgebung nicht erlaubt werden. Mit den „IMO Wash Water Guidelines" werden in Kürze Hinweise für die Hafenstaaten veröffentlicht werden. Die EU Direktive (2005/33/EC) über Schwefel in Schiffsbrennstoffen enthält auch Vorgaben für den Test und den Einbau von Abgasreinigungsanlagen, die mit den IMO-Anforderungen in IMO Resolution MEPC.130(53) harmonisiert werden sollten.

Es wird abgeschätzt, dass durch Scrubbing die SO2 Emissionen um bis zu 95% und die Partikel (Schwermetalle aus Brennstoff und Schmieröl, Ruß sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAK) bis zu 80% aus dem Abgas entfernt werden können. Bezogen auf den Schwefeloxidgehalt werden Reinigungswirkungen von mehr als 90% erreicht.

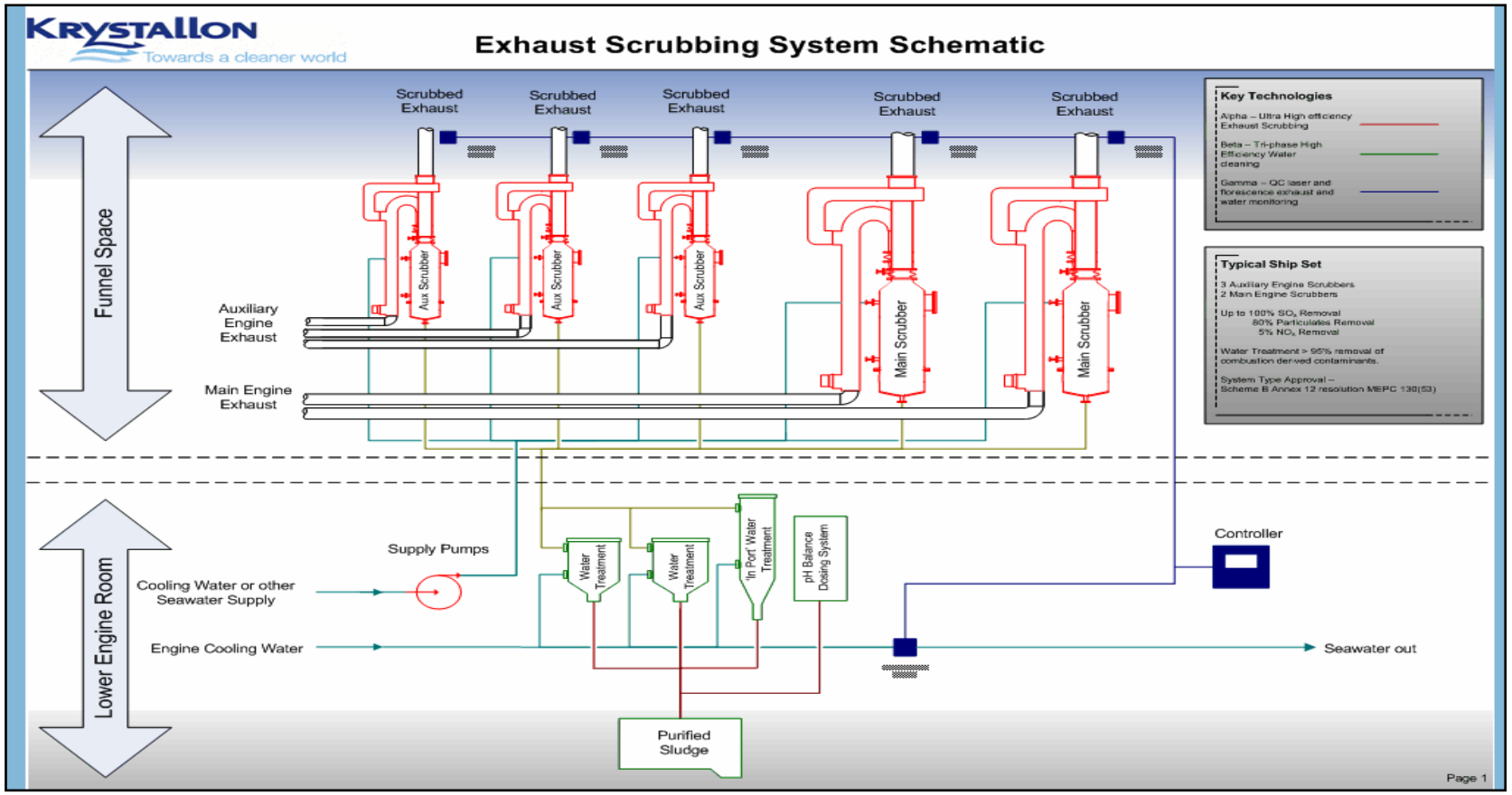

Abb. 5-11: Schematische Darstellung einer Abgaswäscheranlage
Quelle: Krystallon

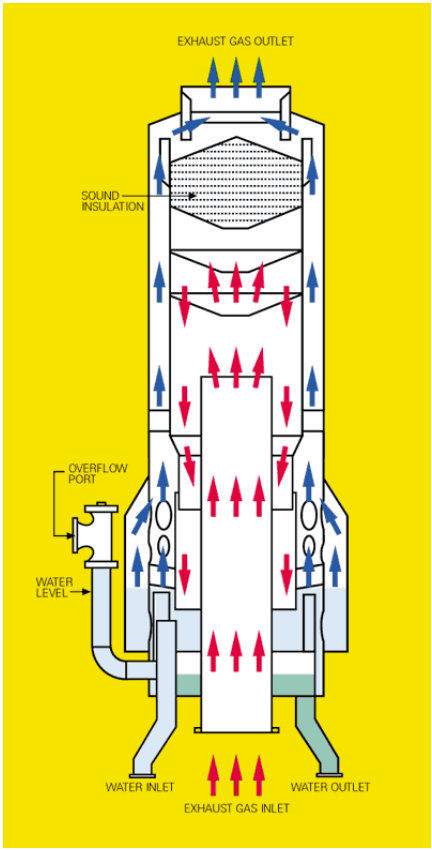

Abb. 5-12: Schematische Darstellung des Scrubbers,
Quelle: Krystallon

Abb. 5-13: Scrubber für die „Pride of Kent“
Quelle: Krystallon

Die bisher behandelten Seewasserscrubber benötigen 1 bis 1,5% der Motorleistung, um den notwendigen

Wasserdurchsatz von 45 bis 50 t / h per MW Motorleistung zu erreichen. Bei geringerer Alkalität des (See-)Wassers steigt der benötigte Wasserdurchsatz an. Abhängig von der Brennstoffqualität entstehen dabei etwa 20kg trockener Sludge für je 100 t Brennstoff, die gespeichert und ordnungsgemäß entsorgt werden müssen. Bei der „Pride of Kent“ wurden mit den “Ecosilencern” 0,2 kg/MWh bzw. 4,8 kg/MW/d Sludge festgestellt.

Die im Abwasser enthaltene Säure wird durch die Alkalität des Seewassers neutralisiert. Dies kann in Bereichen mit geringen Wasseraustausch und / oder niedriger Alkalität (wie an den Kreuzfahrtterminals zu erwarten) zu Umweltproblemen führen. Bei der Neutralisation findet die folgende Reaktion statt:

$$SO_2 + 2HCO_{3-} + ½O_2 \text{ -->} SO_4^{2-} + 2CO_2 + H_2O$$

Das bedeutet, dass bei vollständiger Umsetzung von 1kg Schwefel im Brennstoff 2,75 kg CO2 freigesetzt werden.

Es wurden auch so genannte Frischwasser Scrubber entwickelt, bei denen das Frischwasser im geschlossenen Kreislauf zirkuliert und zur Neutralisierung Natronlauge (NaOH) zugeführt wird. Bei der Reinigung des Abwassers verbrauchte Natronlauge muss gezielt ersetzt und der entstehende Schlamm gespeichert und entsorgt werden. Die Temperatur des Abgases aus Seewasser Scrubbern beträgt ca. 50°C. Sollte dem Scrubber ein SCR Katalysator nachgeschaltet werden, müsste die Temperatur durch geeignete Maßnahmen auf etwa 300 °C erhöht werden.
Das im Abgas nach der Reinigung verbleibende SO2 (1%) bildet mit dem Wasser im Abgas Säure, die in der Atmosphäre kondensiert und je nach Wetter – und Windbedingungen sich niederschlägt.
Bisher liegen noch keine belastbaren Angaben über das Verhalten von Scrubbern bei dynamischen Vorgängen wie Anlassen des Motors und schnellen Laständerungen vor.
Die vorliegenden Angaben hinsichtlich Kosten und Baugrößen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Kosten	250,-	$/kW
Grundfläche Scrubber+Tank		
Motoren ca. 800kW	0,00322	m²/kW
Motoren ca. 10.000kW	0,00222	m²/kW
Bauvolumen Scrubber+Tank		
Motoren ca. 800kW	0,0115	m³/kW
Motoren ca. 10.000kW	0,00343	m³/kW

5.4.1.3 Partikel

Das Beispiel einer Abgaszusammensetzung wurde in Abb. 4-4 in Kapitel 4.2.2 gezeigt. In der Mitte war die gesamte Abgaszusammensetzung eines 8.zylinder 4-Takt Hauptmotors aufgetragen, der auf der Propellerkurve mit 75% Last betrieben wurde. Der verwendete Brennstoff hatte einen Schwefelgehalt von 2,2%.

Aufgetragen sind die spezifischen Emissionen dieses Motors in g/kWh. Wie erwartet, dominieren Stickstoff (mit Argon), der überschüssige Sauerstoff der nicht zur Verbrennung benötigt wurde sowie die Verbrennungsprodukte CO2 und Wasser. Bezogen auf die Masse haben Verunreinigungen keinen großen Anteil. Links ist die Zusammensetzung der Partikel aufgetragen, die mit 1,13 g/kWh nur 0,02% der Gesamtemissionen ausmachen. Die Partikel bestehen hauptsächlich aus Ruß, unverbrannten Kohlenwasserstoffen sowie Sulphaten mit angelagertem Wasser. Außerdem sind noch Oxidaschen enthalten die aus den Brennstoffbeimengungen Vanadium, Nickel, Zink und anderen Schwermetallen herrühren. Rechts sind die gasförmigen Emissionen von NOx, HC, CO and SO2 aufgetragen. Die Gesamtemission beträgt hier 20.3 g/kWh (0.3 %) und besteht hauptsächlich aus NOx and SO2. SO2 und Sulphate hängen direkt vom Schwefelgehalt des Brennstoffs ab.

Der Einfluss des Schwefelgehaltes im Brennstoff wurde an einem 2-Takt-Dieselmotor (3 Zylinder, 110 kW, 500 Upm,) bei Nennlast auf dem Prüfstand untersucht. Variiert wurde der Schwefelgehalt. Alle anderen, die Verbrennung beeinflussenden Parameter, wurden soweit wie möglich konstant gehalten. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Abb. 5-14 wiedergegeben.

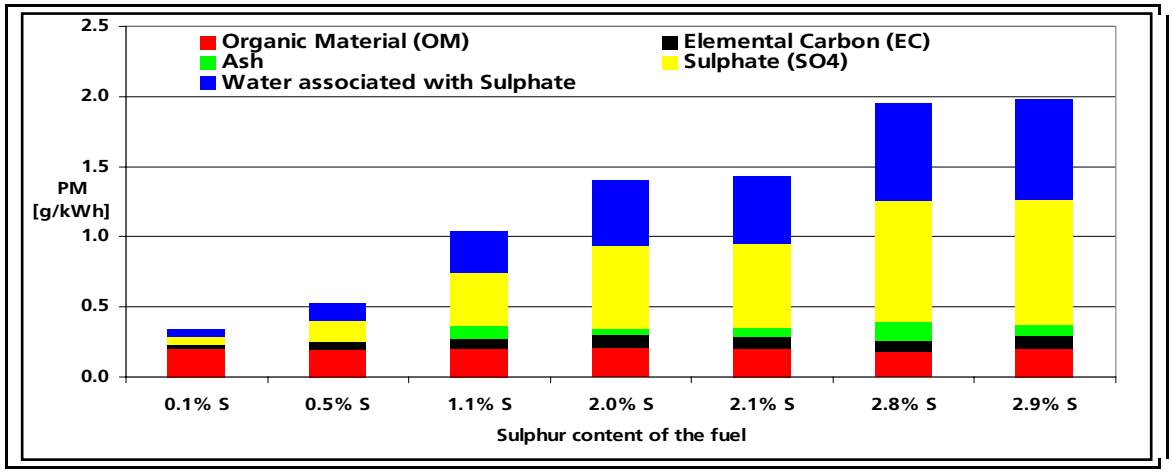

Abb.: 5-14: Partikelzusammensetzung in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt des Brennstoffes (ISO 8178 Methode)
Quelle: Germanischer Lloyd

Der rote Teil der Balken gibt den organischen Anteil der Partikel wieder, schwarz steht für elementaren Kohlenstoff und grün für den Aschegehalt aus dem Brennstoff. Für diese Anteile ist kein wesentlicher Einfluss des

Schwefelgehaltes zu erkennen. Dann folgen der Sulphatanteil (gelb) und das an die Sulphate angelagerte Wasser (blau). Beim höchsten Schwefelgehalt machen diese beiden Anteile 80 % der Partikelmasse aus. Mit abnehmendem Schwefelgehalt sinken diese Anteile, und die Partikelmasse nimmt entsprechend ab.

Im nächsten Diagramm ist dieser Zusammenhang als Kurve dargestellt (Abb.: 5-15). Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Partikelmasse und Schwefelgehalt. Bei 0% Schwefel enthalten die Partikel nur noch Aschen aus Brennstoff und Schmieröl sowie unverbrannte Brennstoffbestandteile (Ruß, etc.).

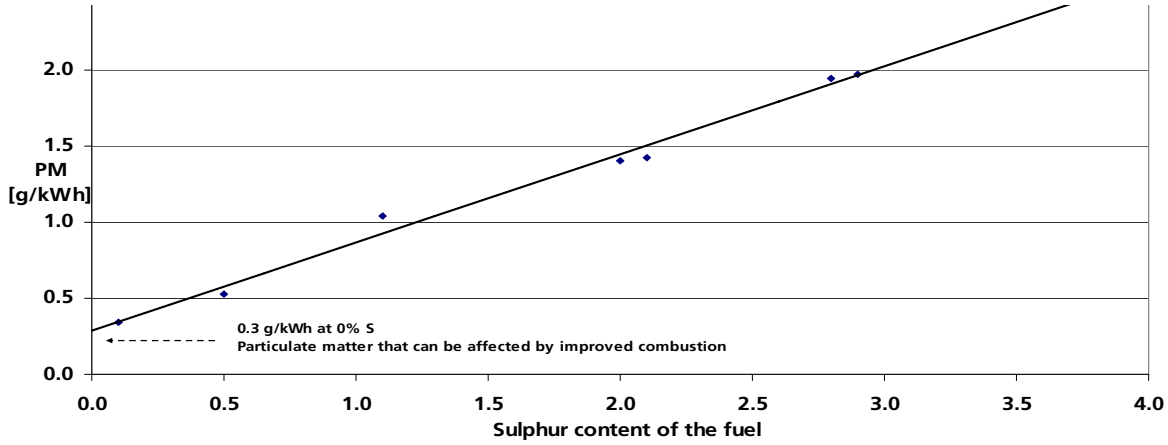

Abb. 5-15: Zusammenhang zwischen Partikelmasse und Schwefelgehalt des Brennstoffes
Quelle: Germanischer Lloyd

Das Funktionsprinzip eines Partikelfilters ist in Abb. 5-16 am Beispiel eines Keramik-Monolithen mit wechselseitig verschlossenen Kanälen dargestellt. Das einströmende Rohabgas wird gezwungen, durch die porösen Wände des Eingangskanals hindurch in einen benachbarten Kanal (Ausgangskanal) zu strömen, der in den Abgasstrang mündet. Die Partikel selbst lagern sich an der Oberfläche der Kanäle und innerhalb der porösen Wände ab. Während des Motorbetriebes bildet sich im Filter eine Partikelschicht aus, die allmählich anwächst. Dadurch kommt es zu einer Behinderung der Abgasströmung und damit zu einer Erhöhung des Abgasgegendrucks. Aus diesem Grund ist eine Regeneration des Filters, d.h. ein Abbrand der Partikel erforderlich.

Die Problematik der Partikelfilterregeneration ist sehr vielschichtig. Für eine sichere Regeneration müssen gleichzeitig viele Prozessparameter (Abgastemperatur, Abgasgegendruck, Restsauerstoffgehalt im Abgas, Filtrationsgeschwindigkeit, Raumgeschwindigkeit u. a.) eingehalten werden, wobei die Abgastemperatur dominierend ist. Die thermische Regeneration, die das Abbrennen der im Filter angesammelten Partikel beinhaltet, hat sich als sehr vorteilhaft erwiesen. Auf Grund der notwendigen hohen Abgastemperaturen sind jedoch für die Gewährleistung akzeptabler Regenerationszeiten und eines störungsfreien Filterbetriebes Zusatzmaßnahmen erforderlich. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Schwefelgehalt des Brennstoffes, da im

Filter abgelagerte Sulphate nicht thermisch aus dem Filter entfernt werden können und so zu einem zunehmenden Strömungswiderstand führen.

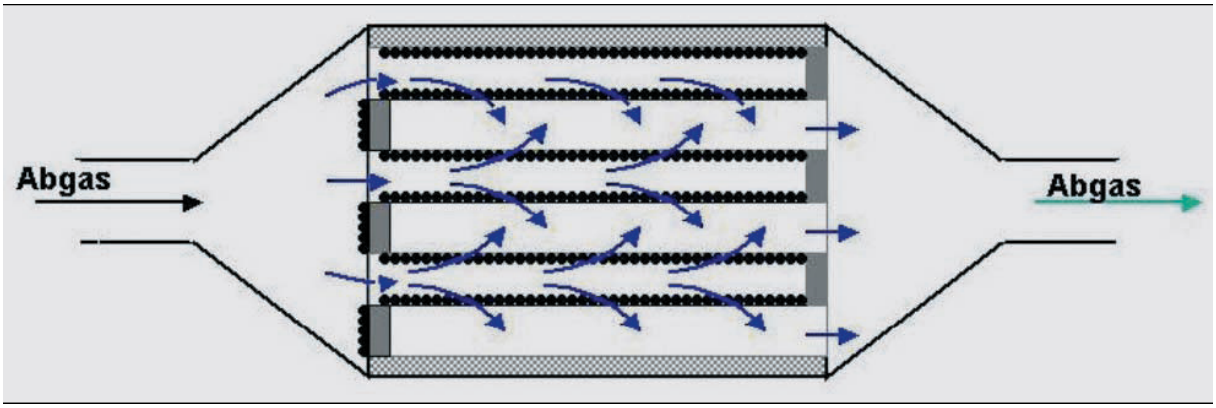

Abb. 5-16 Schematische Darstellung eines Partikelfilters

In einem Forschungsvorhaben des BMVBS sollen Partikelfilter für Binnenschiffe verschiedener Hersteller im praktischen Langzeit-Betrieb erprobt werden. Mit der Installation der Filter auf den Schiffen wurde begonnen. Die größte Motornennleistung im Projekt beträgt ca. 1 MW. Der Brennstoffmehrverbrauch wird von den verschiedenen Herstellern zwischen 1-5% angegeben, die Kosten für einen Partikelfilter betragen ca. 100-160 €/kW. Für Seeschiffe reichen die vorhandenen Baugrößen bei weitem noch nicht aus. Außerdem erfordert ein möglichst vollständige Regeneration der Filter ein nahezu schwefelfreien Brennstoff, da die Sulphate im Filter verbleiben und den Motorgegendruck auf Dauer unzulässig erhöhen würden.

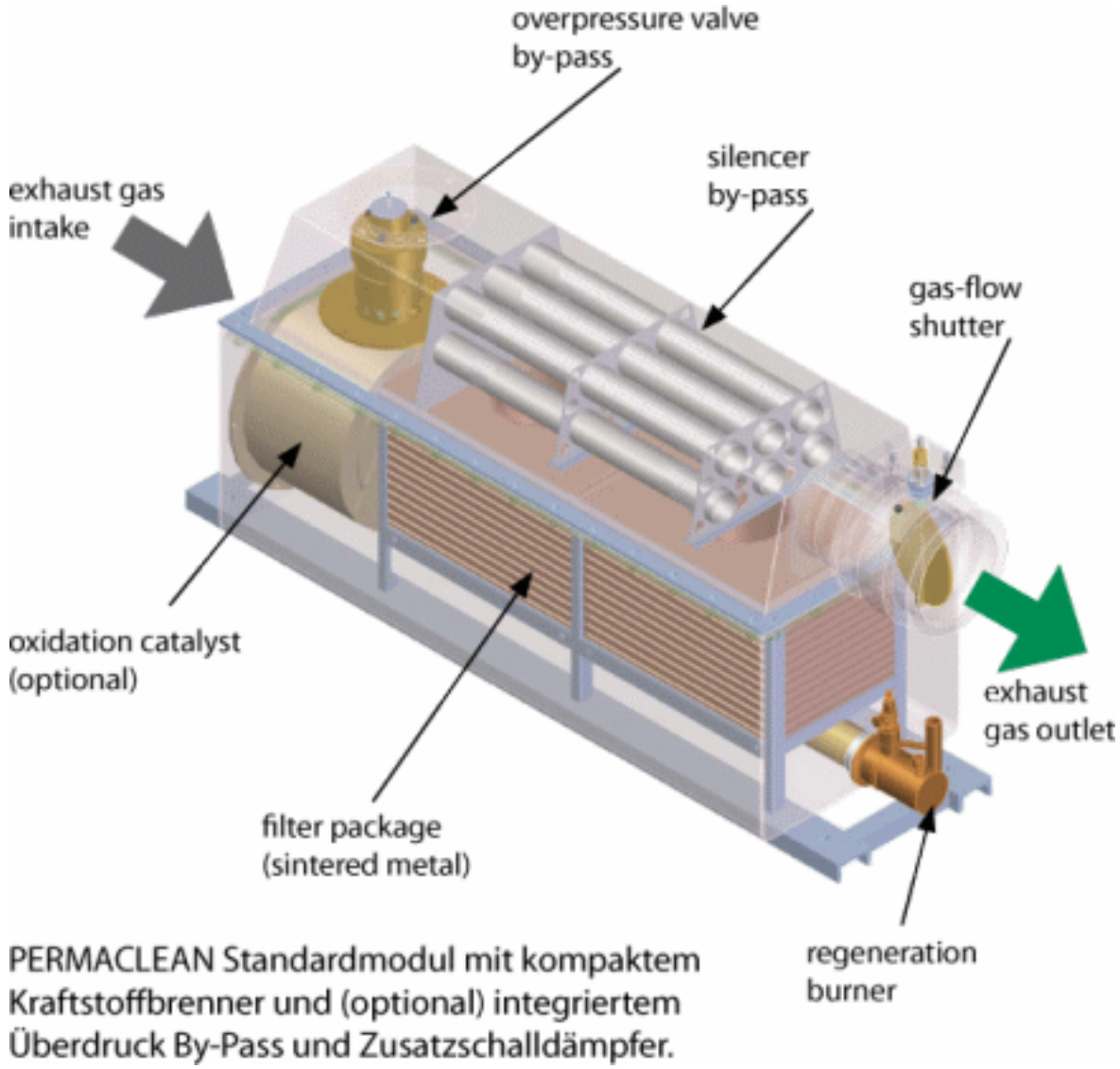

Abb. 5-17: Darstellung eines Partikelfiltersystems
(Quelle: Greentop)

Abb. 5-17 zeigt den Aufbau eines Partikelfiltersystems. Der Partikelfilter wirkt auch als Schalldämpfer. Für den Fall, dass der Motorgegendruck unzulässig ansteigt, ist zum Schutz des Motors ein Bypass mit Schalldämpfer integriert.

5.4.2 Abgasaufbereitung und notwendige Installationen an Bord

Da ein SCR-Katalysator über schalldämpfende Eigenschaften verfügt und etwa das gleiche Bauvolumen hat wie ein entsprechender Abgasschalldämpfer, kann er in existierende Schiffe integriert werden. Voraussetzung ist allerdings, dass Brennstoffe mit niedrigem Schwefelgehalt verwendet werden. Außerdem ist die Versorgung der Katalysatoren mit Urea sicherzustellen und deren Regelung in Abhängigkeit von der jeweiligen Motorenleistung so vorzunehmen, dass nur die notwendige Ureamenge in das heiße Abgas eingespritzt wird, damit ein Entweichen von überschüssigem Ammoniak sicher vermieden werden kann.

Die Nachrüstung von Schiffen mit Abgaswäschern ist wegen der Raum-, Gewichts- und Stabilitäts-anforderungen nicht in jedem Fall möglich. Selbstverständlich muss die Scrubber-Anlage die Anforderungen der Motorenanlage für einen sicheren Betrieb ohne Einschränkungen erfüllen.

Für den Ein- und Umbau werden mindestens 2 bis 3 Wochen veranschlagt. U. U. kann der Einbau während einer normalen Werftzeit der Schiffe ausgeführt werden. Dann würden zumindest keine weiteren Kosten für eine zusätzliche Aufliegezeit anfallen. Der Einbau verlangt in jedem Fall eine entsprechende Einzelfalluntersuchung und Vorplanung.

Die Bauteile der Scrubber-Anlage müssen säurefest ausgeführt werden. Da ein Scrubber auch schalldämpfende Eigenschaften aufweist, kann der Scrubber den Schalldämpfer ersetzen. Problematisch wird es, wenn diese Scrubber für Hilfsdiesel nur im Hafen betrieben werden sollen, da dann beide Systeme benötigt werden.

Es dürfte nicht möglich sein, eine Kombination von Scrubber und SCR-Katalysator in vorhandene Schiffe nachzurüsten, da das erforderliche Volumen nicht zur Verfügung steht. Dies könnte bei Neubauten entsprechend eingeplant werden. Grundsätzlich ist jedoch zu beachten, dass das Motorabgas nach Verlassen des Scrubbers durch Energiezufuhr wieder auf die notwendige Betriebstemperatur des Katalysators gebracht werden muss. Das bedeutet weiteren zusätzlichen apparativen Aufwand. Es muss jedoch bezweifelt werden, dass bei den unvermeidlichen Druckverlusten eines solchen Abgasreinigungssystems ein sicherer Motorbetrieb ohne unzulässigen Brennstoffmehrverbrauch realisiert werden kann.

Bei dem derzeitigen Entwicklungsstand der Partikelfilter erscheint eine Anwendung an Bord von Kreuzfahrtschiffen derzeit noch nicht möglich. Für einen zuverlässigen Betrieb ist nach bisherigem Kenntnisstand die Verwendung von Brennstoffen mit sehr niedrigem Schwefelgehalt notwendig.

5.4.3 Abgasaufbereitung an Land

Eine Abgasaufbereitung an Land kann den Vorteil haben, dass keine Ein- und Umbauten an Bord der Schiffe notwendig sind und es dann keine Restriktionen hinsichtlich des Anlaufens des Kreuzfahrtterminals gibt. Dazu müssten jedoch die Abgasströme der Motoren aufgefangen und den an Land befindlichen Aufbereitungsanlagen zugeführt werden.

Eine Möglichkeit wäre, die Motorabgase am Schornsteinaustritt abzusaugen. Das erfordert eine aufwändige Konstruktion, die auf unterschiedliche Anordnungen der Schornsteine und ihre Höhen über der Wasserlinie (bis zu mehr als 60 m) sowie die Einflüsse des Tidenhubs variabel einstellbar ist. Bei der „Queen Mary 2“ gibt es sogar zusätzlich zum Hauptschornstein zwei zusätzliche Abgasaustritte an beiden Seiten des Hinterschiffes. Die Konstruktion müsste so ausgeführt werden, dass sie auch bei extremen Windgeschwindigkeiten sicher betrieben werden kann. Diese Lösung erscheint demzufolge aus ästhetischen und praktikablen Gründen wenig aussichtsreich.

Eine realisierte Abgasabsaugung zeigt die folgende Abb. 5-18. Auch wenn es sich hier um ein Frachtschiff handelt, zeigt es zumindest die Abmessungen und die erforderliche Hebeeinrichtung, die für den Absaugschirm notwendig ist. Weitere Beispiele für eine realisierte Lösung sind nicht bekannt.

Abb. 5-18: Abgasabsaugung am Schornsteinaustritt, realisierte Lösung an der Westküste USA,
Quelle: Dennis McLerran/ Puget Sound Clean Air Agency

Eine andere Lösung wäre es, die Abgaskanäle der Motoren getrennt und isoliert so an die Schiffsseiten zu führen, dass eine Verbindung zum landseitigen Aufbereitungssystem hergestellt werden kann. Hier sind aufwändige Umbauten an Bord der Schiffe erforderlich, die den Vorteil der landseitigen Aufbereitung erheblich einschränken. Auch hier muss für die notwendige Flexibilität der Verbindungstechnik hinsichtlich Anordnung der Abgaskanäle auf den Schiffen, Tidenhub etc. gesorgt werden.

Für beide Lösungsansätze ist es erforderlich, das Abgas so abzusaugen, dass der in der Aufbereitungsanlage notwendigerweise entstehende Druckverlust durch ein Sauggebläse so aufgefangen wird, dass der Motorbetrieb durch Schwankungen des Motorgegendrucks nicht gestört wird. Das erfordert eine entsprechende Regelung der Landanlagen, die von den jeweiligen Motorbetriebsparametern abhängig ist und entsprechende Verbindungen beider Regelungssysteme erfordert.

5.4.4 Zusammenfassung

Abgasreinigungsanlagen für Schiffe befinden sich in unterschiedlichen Stadien der Entwicklung. Während SCR-Katalysatoren hinreichend Betriebserfahrungen nachweisen können, ist dies für Scrubber nur bedingt und für Partikelfilter gar nicht der Fall. Katalysatoren und Partikelfilter benötigen Brennstoffe mit niedrigen Schwefelgehalten für einen optimalen Betrieb. Mit Scrubbern können zwar die Schwefeloxidgehalte im Abgas gesenkt werden, ihre Gasaustrittstemperatur ist jedoch für eine einfache Kombination mit SCR-Katalysatoren zu niedrig. Außerdem muss davon ausgegangen werden, dass die Feuchtigkeit des Scrubberabgases säurehaltig ist.

Allen Lösungen ist gemeinsam, dass dafür aufwändige Umbauten der Schiffe notwendig werden, die zu Restriktionen hinsichtlich der Hamburg anlaufenden Kreuzfahrtschiffe führen dürften.

Eine Abgasreinigung an Land wirft erhebliche Probleme bei der sicheren Verbindung der Abgaskanäle der Schiffe mit den Landanlagen und ihrer Regelung auf, so dass eine solche Lösung nicht praktikabel erscheint. Die ästhetischen Aspekte einer solchen Anlage an einem Kreuzfahrtschiff seien ebenfalls erwähnt.

5.5 Landstromversorgung

Unter einer Landstromversorgung von Schiffen versteht man im weitesten Sinne, dass die benötigte elektrische Energie für den Schiffsbetrieb aus dem landseitigen Stromversorgungsnetz eingespeist wird. Dabei müssten, für einen Anschluss des Schiffes an ein landseitiges Netz, diese kompatibel sein. D.h. es müssen Spannung und Frequenz an Land und an Bord übereinstimmen.

Die Einspeisung wird über eine entsprechend ausgelegte Kabelverbindung und land- und schiffsseitige elektrische Einrichtungen vorgenommen.

Um die Anzahl der Anschlusskabel auf ein handhabbares Maß zu begrenzen, kommen bei der landseitigen Stromversorgung von Seeschiffen während der Hafenliegezeit grundsätzlich nur Mittelspannungssysteme in Frage. Die sich ergebenden technischen und rechtlichen Fragen werden im Folgenden erläutert.

5.5.1 Beispiel-Installation für ein Kreuzfahrtterminal

Die folgende Abb. 5-19 zeigt in einer vereinfachten schematischen Darstellung die Realisierung einer Anlage zur Landstromversorgung für Kreuzfahrtschiffe in Nordamerika.

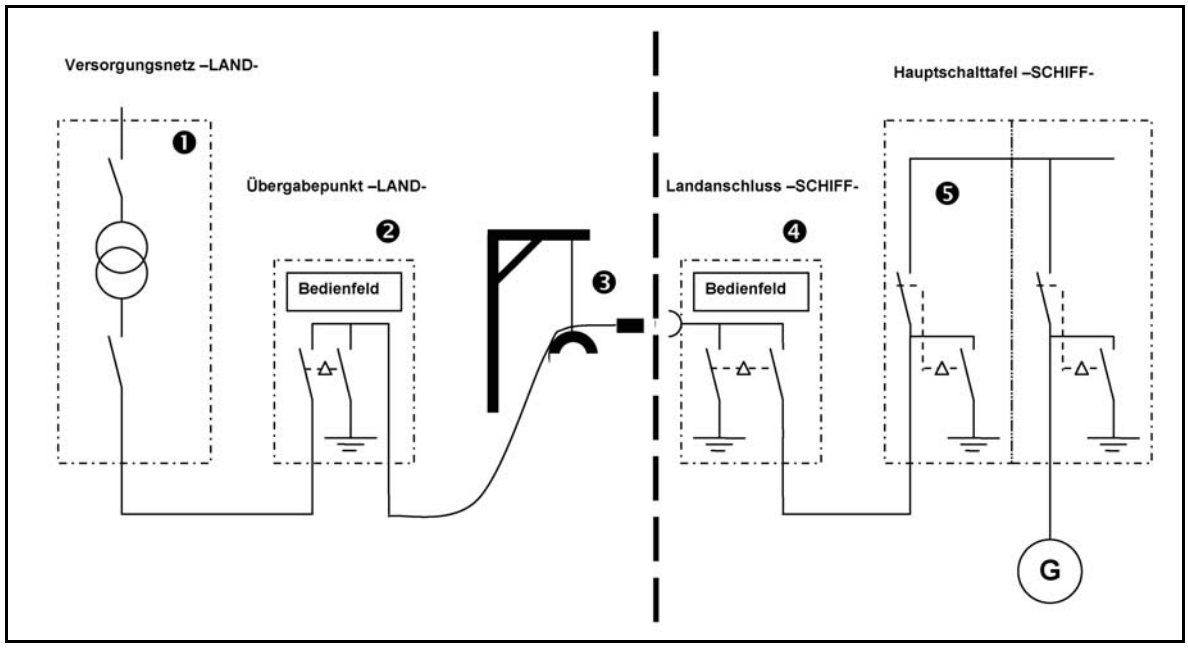

Abb. 5-19: Beispiel-Installation für ein 60 Hz – Landnetz
Quelle: Germanischer Lloyd

Das System besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

❶ *Landseitige Schaltanlage mit Speisetransformator, Schaltanlage und Verkabelung zum Bedienfeld*
Diese Schaltanlage stellt den Anschluss zum Verteilungsnetz her. Sie beinhaltet die primär- und sekundärseitige Schutztechnik für den Transformator. Außerdem befindet sich in diesem Anlagenteil neben weiterer Steuerungstechnik die Tarifmessung.

❷*Bedienfeld*
Neben Bedienelementen befindet sich in diesem Schaltfeld ein Trenn- und Erdungsschalter. Diese Kombination ist notwendig, um zusammen mit der schiffsseitigen Schaltanlage die Betriebssicherheit beim Herstellen, Betreiben und Trennen der Verbindung zu gewährleisten. Zur Steuerung des Systems ist außerdem eine Kommunikationsverbindung zwischen Land und Schiff notwendig (nicht dargestellt).

❸*Kabelzuführungssystem*
Das Kabelzuführungssystem stellt die Verbindung zum Schiff her. Dabei muss das System den Tidenhub ausgleichen können. Bei Überschreitung festgelegter Grenzwerte muss die Trennung der Landstromversorgung erfolgen. Zur technischen Ausführungen einer solchen Anlage gibt es zurzeit keine Festlegungen.

❹*Schiffsseitiger Anschlusspunkt*
Der Anschlusspunkt befindet sich im Schiff. Alle schiffsseitigen Komponenten sind entsprechend den Bauvorschriften der zuständigen Klassifikationsgesellschaft auszuführen. Dazu gehören zum Beispiel die Anforderungen an zusätzliche Außenpforten zur Aufnahme der Mittelspannungskabel, die Aufstellung von Mittelspannungsschaltanlagen sowie schiffseitige Sicherheitsverriegelungen und die Schutzkoordination.

❺*Hauptschalttafel*
Schließlich wird ein Speisefeld vom Landanschluss in der Hauptschalttafel benötigt. Von hier wird die Energie an die einzelnen Verbraucher im Schiff weitergeleitet.

Dabei können die Installationen der Kreuzfahrtgesellschaften in Nordamerika nicht als Vorlage dienen, da der Betrieb der schiffs- und landseitigen Installationen von der jeweiligen Kreuzfahrtgesellschaft durchgeführt wird und die Auslegung der Anlage entsprechend amerikanischer Standards erfolgte.

5.5.2 Problematik

Grundsätzlich werden Schiffsnetze als Individuallösungen konzipiert. Sie werden zur Versorgung eines speziellen Schiffs maßgeschneidert. Eine Anforderung auf Kompatibilität mit anderen Systemen gab es bislang nicht. Um eine für die Hamburger Liegeplätze für alle anlaufenden Kreuzfahrer kompatible Anlage zu gestalten, wären folgende Probleme zu lösen:

Problem: Frequenzanpassung

Im Verlauf der industriellen Entwicklung und Elektrifizierung haben sich zwei unterschiedliche Netzfrequenzen zur Energieerzeugung etabliert. Wobei die 60 Hz-Netze (mit Ausnahmen) auf den amerikanischen Raum begrenzt sind. Die Mehrzahl der Verbundnetze hat eine Netzfrequenz von 50 Hz. Im Gegensatz zu den landseitigen Verbundnetzen ist die Bordnetzfrequenz auf den meisten Passagierschiffen 60 Hz. Wobei es auch hier selbstverständlich Ausnahmen gibt.

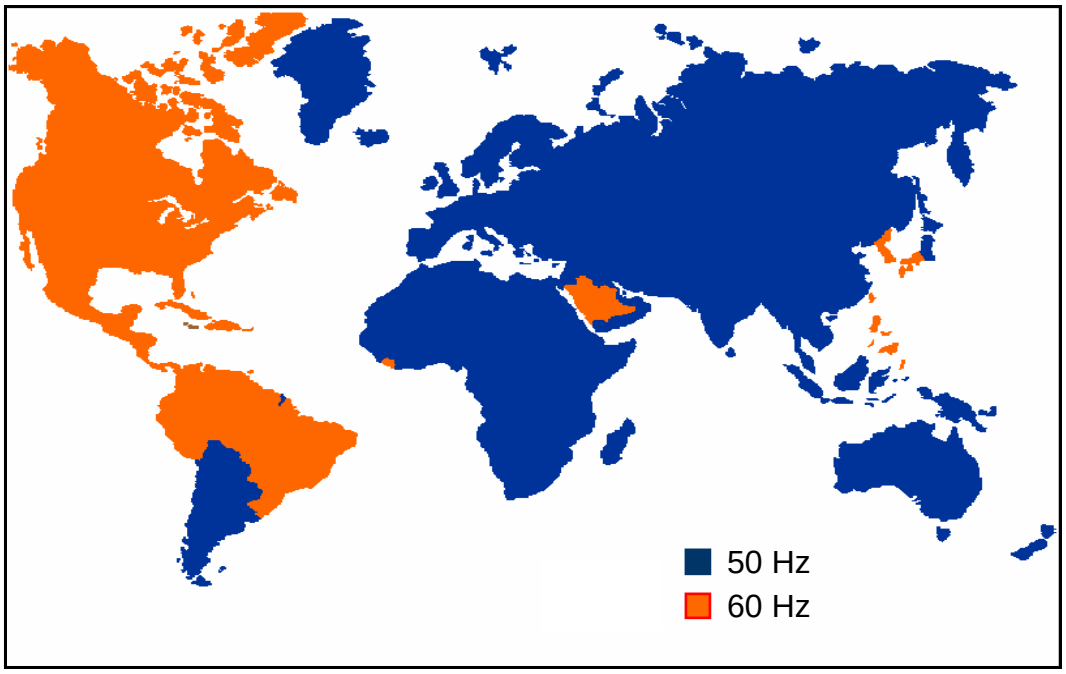

Abb. 5-20: Landnetz-Frequenzen, weltweit

Die Versorgung des 60Hz-Schiffsnetzes durch ein 50Hz-Landnetz ist nicht direkt möglich. Die Frequenzen müssen angepasst werden. Zur Frequenzanpassung können rotierende oder statische Umformer zum Einsatz kommen. Abb. 5-20 zeigt die weltweite Aufteilung der Landnetze nach der Frequenz. Bis auf den amerikanischen Kontinent, mit Ausnahme der südlichen Staaten Chile und Argentinien, und einige Staaten in Südostasien, sind die Landnetze mit einer Netzfrequenz von 50Hz ausgelegt. Hier muss in den meisten Fällen eine Frequenzumformung für das Bordnetz vorgenommen werden.
Unabhängig vom Umformer gilt jedoch, dass die Ausgangsspannung und –frequenz, also die Versorgungsspannung für das Schiff, den Anforderungen bezüglich Netzqualität, Überlast- und Kurzschlussverhalten etc. den Vorschriften der jeweiligen Klassifikationsgesellschaft entsprechen muss.

Hieraus ergibt sich in Abb. 5-23 eine modifizierte Prinzipdarstellung eines Landanschlusses. Hinzu gekommen ist eine weitere Systemkomponente zur Frequenzumwandlung.

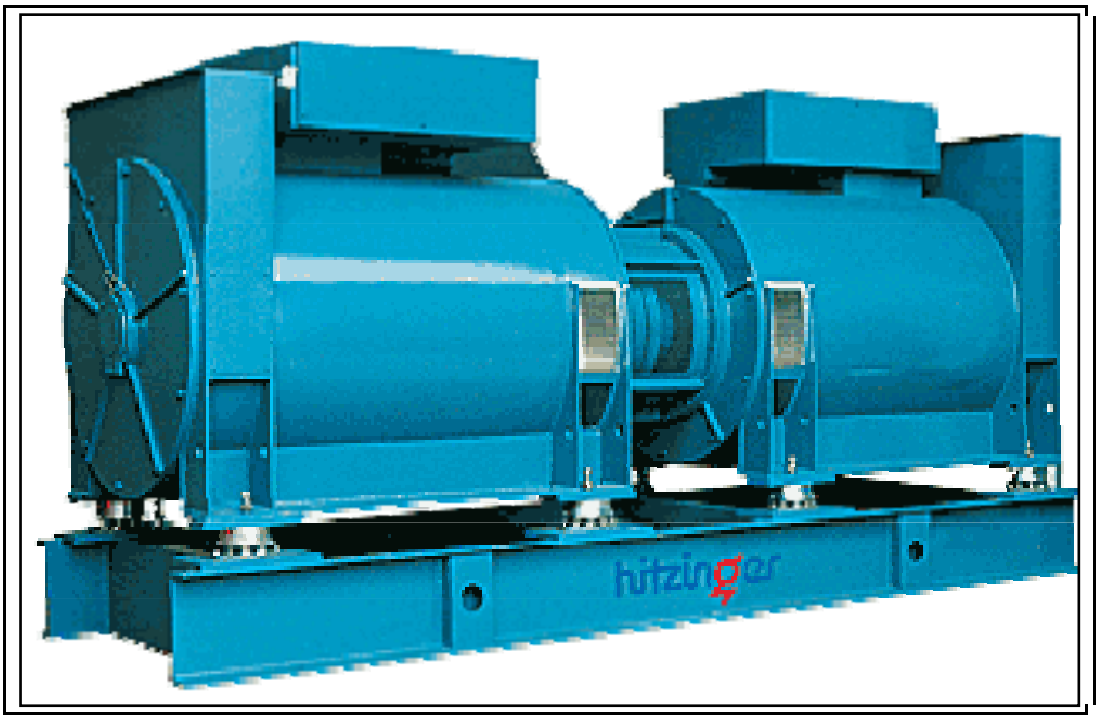

Abb. 5-21: Motor-Generator Satz
Quelle: Firma Hitzinger

Abb. 5-22: Statischer Konverter
Quelle: Firma Siemens

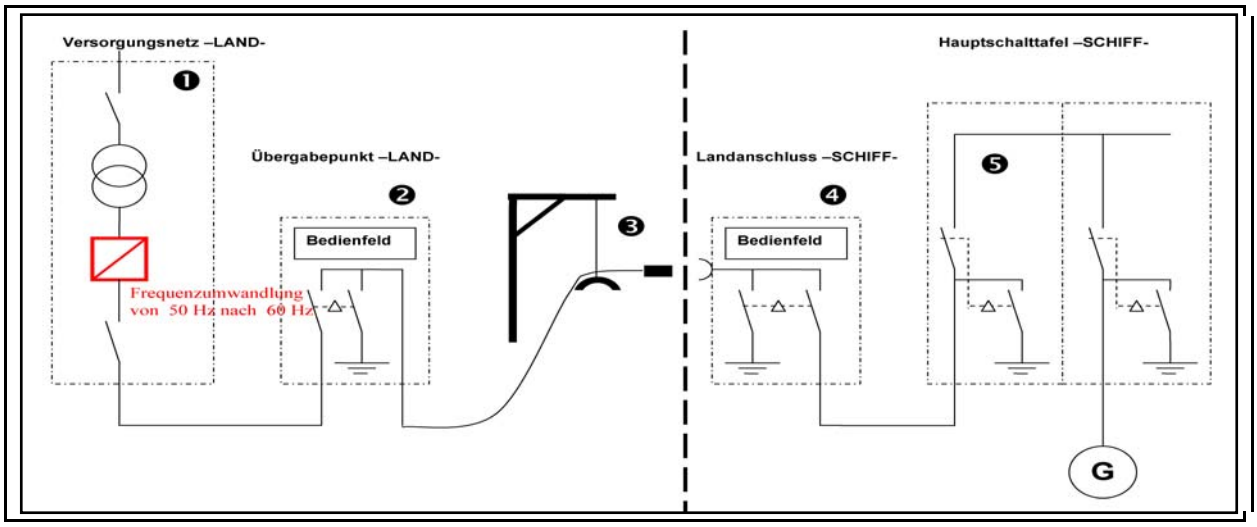

Abb. 5-23: Landstromversorgung aus einem 50 Hz- Landnetz
Quelle: Germanischer Lloyd

Problem: Spannungsanpassung

Die Höhe der Bordnetzspannung wird im Wesentlichen vom Leistungsbedarf des Schiffs bestimmt. Große Passagierschiffe setzen daher aufgrund ihres hohen Energiebedarfs Mittelspannungsnetze ein. Daher muss eine zukunftsorientierte Landanlage grundsätzlich für Mittelspannung ausgelegt sein.

Eine grobe Abschätzung der Schiffsanläufe 2008 für die HAFEN CITY zeigt aber, dass cirka 60% der Passagierschiffe Niederspannungsbordnetze haben. Um diese Schiffe ebenfalls mit Landstrom versorgen zu können, müssten diese Schiffe einen entsprechenden Bordnetztransformator nachrüsten.

Um die Anzahl der Anschlusskabel auf ein handhabbares Maß zu begrenzen und damit auch den Zeitaufwand zur Herstellung und Lösung der Landverbindung, kommen bei der landseitigen Stromversorgung von Seeschiffen während der Hafenliegezeit grundsätzlich nur Mittelspannungssysteme in Frage. Zur Veranschaulichung dieser Problematik zeigt Abb. 5-24 den Anschluss einer Niederspannungsversorgung. Hierzu sind 12 parallele Speisekabel notwendig, um diese Niederspannung mit entsprechender Leistung an Bord zu bringen. Der Transformator, der Mittel- in Niederspannung umformt, ist hier auf einem neben dem Schiff platzierten Ponton untergebracht. Die landseitige Einspeisung in diesen Transformator erfolgt auf Mittelspannungsniveau durch nur ein Kabel, siehe Abb. 5-25. Hier werden bis zu ca. 3,5 MVA elektrische Leistung übertragen.

Abb. 5-24: Niederspannungslandanschluss (Barge Based AMP Design)
Quelle: AMP Conference –April 25, 2006, V. Haddadian Port of Los Angeles

Abb. 5-25: Mittelspannungsanschluss 6,6 kV (Barge Based AMP Design)
Quelle: AMP Conference –April 25, 2006, V. Haddadian Port of Los Angeles

5.5.3 Leistungsbedarf Hotelbetrieb

Der Leistungsbedarf eines Passagierschiffes wird im Wesentlichen durch die Hotellast bestimmt.

Die Landstromversorgung muss Leistungsreserven bereithalten, um das Starten großer Bordverbraucher (Klimakompressoren etc.) zu ermöglichen. Diese Anforderung impliziert eine entsprechende Auslegung des notwendigen Frequenzumwandlers. Das Einbeziehen von Leistungsreserven hat unter Umständen direkten Einfluss auf die Baugröße und somit auf den notwendigen Platzbedarf der Anlage.

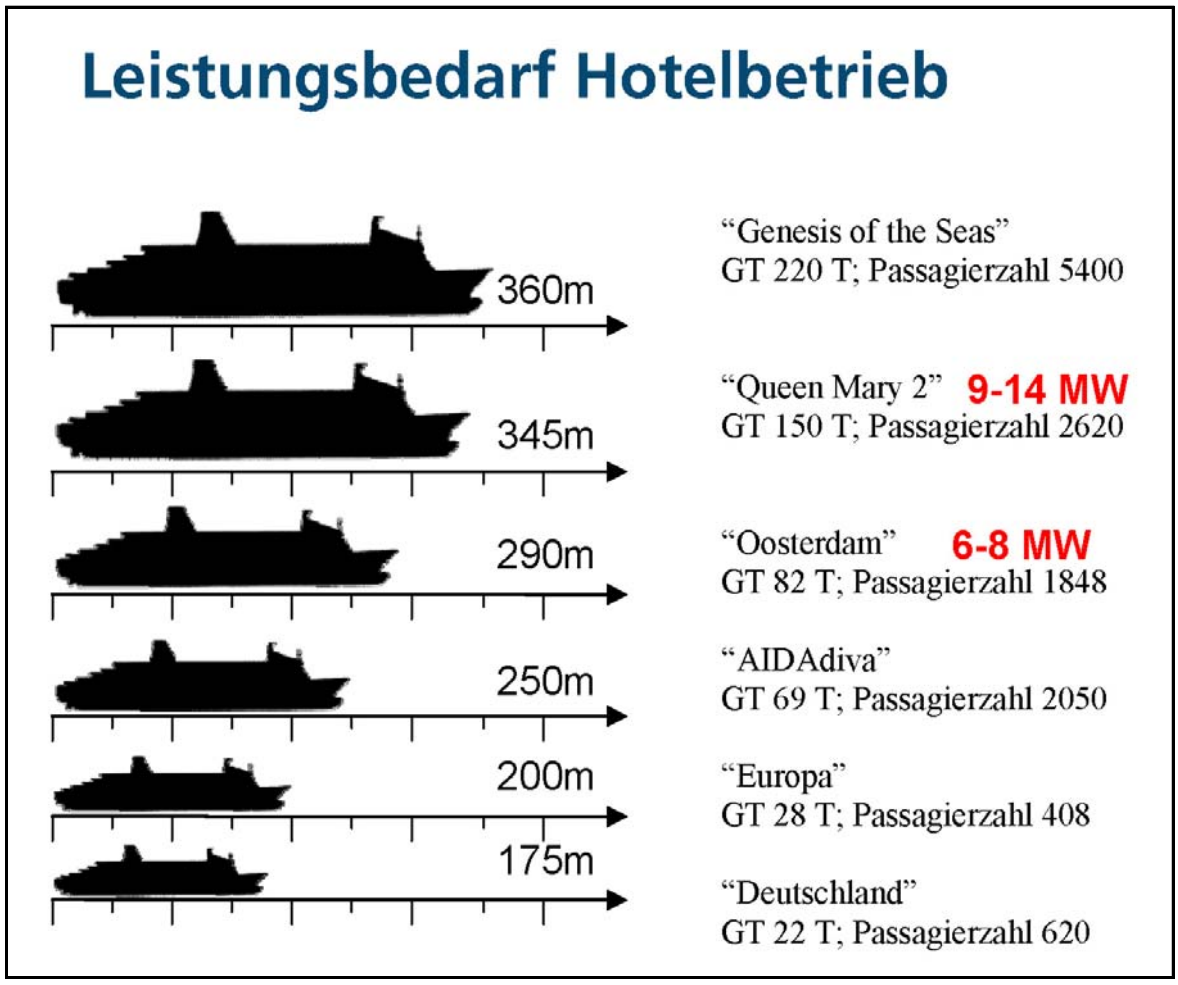

Abb. 5-26: Beispiele für Leistungsbedarfe im „Hotelbetrieb“,
“GT“: Gross Tonnage (= BRZ / Bruttoraumzahl)
Quelle Germanischer Lloyd

Bei der Anlagenauslegung muss berücksichtigt werden, dass das kleinste und größte Schiff, das den Terminal anlaufen soll, versorgt werden kann.

Bei der landseitigen Anlagenauslegung und Kapazitätsplanung müssen jahreszeitliche Schwankungen im Energieverbrauch der Passagierschiffe berücksichtigt werden. Die meisten Angaben zum Leistungsbedarf im Hafen sind Schätzungen oder basieren auf Daten von Passagierschiffen in Nordamerika (Juneau, Alaska und Seattle, Washington). Eine Anpassung an die örtlichen Verhältnisse ist notwendig und müsste in Absprache mit den Reedern durchgeführt werden.

Das Versorgungsnetz muss in der Lage sein, den zusätzlichen Energiebedarf eines Kreuzfahrtterminals abzudecken. Dabei sind Kraftwerkskapazitäten in unseren Verbundnetzen von sekundärer Bedeutung. Vielmehr muss im Vorfeld geklärt werden, ob das bestehende Versorgungsnetz diese zusätzliche Leistung vor Ort bereitstellen kann, oder entsprechend erweitert werden muss. Für die Kapazitätsplanung des Energieversorgers ist es daher wichtig, den Energiebedarf und die Auslastung des Kreuzfahrtterminals zu kennen.

5.5.4 Standardisierung und Normung

Derzeit gibt es noch keinen international gültigen Standard für Mittelspannungslandanschlüsse. An deren Erstellung wird jedoch in der IEC (International Electro-technical Commission) und in der ISO (International Organization for Standardization) gearbeitet.
Dabei soll ein zukünftiger Standard grundsätzlich folgende Anforderungen erfüllen:

- Der Personenschutz muss beim Herstellen, Betreiben und Lösen der Landstromverbindung garantiert sein.

- Der sichere und störungsfreie Bordbetrieb muss gewährleistet sein. Es darf zu keinen Störungen oder Beschädigungen der elektrischen Anlagen durch den Landanschluss kommen.

- Der Standard soll sicherstellen, dass jedes Schiff in jedem beliebigen Hafen mit Landstrom versorgt werden kann.

Derzeit arbeiten beide Organisationen, ISO und IEC an der Entwicklung eines PAS (Public Available Specification). Ein PAS ist noch kein international gültiger Standard, erlaubt jedoch auf Grund seiner Struktur, als Kompromisslösung, eine schnellere Reaktion auf die Forderung der Industrie nach Standardisierung. Wann letztendlich der o.g. PAS fertig gestellt sein wird, ist zurzeit noch nicht abzusehen.

Eine Hamburger Landstromanlage wird daher (noch) nicht nach gültigen internationalen Normen gestaltet werden können. Anpassungen der Anlagen an Land müssten nach noch nicht abzusehenden Beschlussfassungen entsprechender Normen und nachfolgender Ausrüstung von Schiffen danach entsprechend modifiziert werden.

5.5.5 Zusammenfassung

Bei der Anlagenauslegung sollte berücksichtigt werden, dass das kleinste und größte Schiff, das den Terminal anläuft, versorgt werden kann. Der Landanschluss muss in der Lage sein, Schiffe mit extrem unterschiedlichem Leistungsbedarf und unterschiedlichen Bordnetzspannungen zu versorgen.

Die unterschiedlichen Abmessungen der Schiffe und die unterschiedliche Lage der Anschlusspunkte der Landstromversorgung am Schiff sind bei der Auslegung/Planung des pierseitigen Kabelzuführungssystems einzuplanen. Ferner muss der Tidenhub bei der Auslegung/Konzeption der Anlagen berücksichtigt werden.

Neben der Errichtung der notwendigen Versorgungsanlagen an Land sind auch auf den Schiffen Umbaumaßnahmen erforderlich. Es seien hier die zusätzlichen Außenpforten für die Anschlüsse, die weitere (Mittelspannungs-)Schaltanlage und die weitere Verkabelung einschließlich eines weiteren Schalttafelfeldes in der Hauptschalttafel genannt.

Land- und Schiffsinstallationen werden nach unterschiedlichen Standards entworfen. Die schiffseitigen Anforderungen bezüglich der elektrischen Installation werden von den Klassifikationsgesellschaften bestimmt. Die landseitigen Anforderungen bezüglich Netzqualität, Aufstellung, Schutztechnik und Anlagensicherheit werden durch DIN, VDE, Energieversorger, Hafenbehörden usw. festgelegt.
Zuständigkeiten und Schnittstellen müssen vertraglich geregelt werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass es derzeit noch keinen internationalen Standard gibt.

Verantwortlichkeiten müssen für den Personenschutz und das Haftungsrecht beim Herstellen, Betreiben und Lösen dieser Verbindung geklärt werden. Dazu gehören Betrachtungen zur Haftung bei Personenschäden des Bordpersonals oder des Personals des Hafenbetreibers durch die jeweils andere Partei.

Verträge sollten regeln wie Schäden im Versorgungsnetz des Stromversorgers, verursacht durch das Schiffsnetz sowie Schäden im Schiffsnetz, verursacht durch die landseitige Installation, abzuwickeln sind.

Aus den US-Staaten gibt es erste öffentliche Zahlen über geschätzte Kosten für den Einsatz von Landstrom im Rahmen eines Projekts in Long Beach für ein Tankerterminal. Danach werden für eine Landstromanlage ca. 1,5 Mio. US-Dollar (970.000€) pro Liegeplatz veranschlagt. Für die schiffsseitigen Anlagen werden ca. 1,0 Mio. US-Dollar (650.000€) pro Schiff berechnet. Weitere 2,0 Mio. Dollar werden für Verwaltung, Ingenieurleistungen und Weiteres veranschlagt. Es wird erwähnt, dass die Beträge auch deutlich höher ausfallen können.

6 Prognosen für das Jahr 2010

Ergänzend zu den Emissionsberechungen für das Jahr 2008 auf Grundlage der geplanten Schiffsanläufe, ist eine Emissionsprognose für das Jahr 2010 erstellt worden. Wesentliche Grundlage hierfür ist die Prognose der Schiffsanläufe und –größen (hier: nominelle Passagierzahl der Schiffe).

6.1 Anzahl der Schiffsanläufe und erwartete Schiffsgrößen

Wie in Kapitel 4.1.2 dargestellt, wird in 2010 von einer mittleren Passagierkapazität von 1.108 Passagieren pro Kreuzfahrtschiff ausgegangen. Die für 2008 berechnete mittlere Liegezeit von 15,46 Stunden wird für die Prognose 2010 unverändert übernommen.

Im Jahr 2010 werden nach Auskunft der die Liegeplätze betreuenden Firma UNIKAI in der HafenCity ca. 100 Kreuzfahrtschiffe erwartet. Am bis dahin zur Verfügung stehenden Liegeplatz in Altona werden 50 Schiffe erwartet. D.h., es ist in 2010 mit einer Passagierkapazität von 166.200 Passagieren zu rechnen, die, auf 150 Schiffe verteilt, je 15,46 Stunden an einer Kreuzfahrtpier festliegt.

6.2 Prognose der Emissionen in 2010

6.2.1 Emissionen aus Generatorbetrieb an Bord der Schiffe

Mit dem in Kapitel 4.3.2 eingeführten mittleren elektrischen Leistungsbedarf pro Passagier von 3,2 kW/Passagier (*Elektrische Leistungsziffer*) und den o. g. Zahlen ergibt sich ein Energieumsatz von 8.222 MWh für 2010 für alle Kreuzfahrtschiffe während der Liegezeiten. Mit den mittleren Emissionsfaktoren wurden für 4 Szenarien die Emissionen prognostiziert:

Szenario 1: Hier wurde, wie in der Emissionsermittlung 2008, der Schwefelgehalt im Brennstoff bei 1,5% S belassen. Dieser Brennstoff wird zwar ab 2010 am Liegeplatz nicht mehr erlaubt sein, dieses Szenario wurde aber zum Vergleich mit der Ist-Situation in 2008 aufgenommen.

Szenario 2: Es wurde der ab 2010 geforderte Brennstoff mit 0,1% Schwefel während der Liegezeiten an der Pier angenommen. Diese Emissionen ergeben sich, wenn sich die angenommenen Schiffsanläufe für 2010 in Praxis so realisieren. Es wurde angenommen, dass der Brennstoff mit Festliegen an der Pier auf 0,1% S ohne Verzögerungen gewechselt wird. Bis zum Liegeplatz kann weiterhin Brennstoff mit einem S-Gehalt von 1,5% gefahren werden. Es wird hierbei vorausgesetzt, dass bei Ankunft an der Pier ein Generatorsatz gestartet wird bzw. weiter läuft, der nur mit 0,1%S-Brennstoff betrieben wird. Dann wird es möglich sein, direkt nach Festliegen der Schiffe die Emissionen entsprechend dieses niedrig-schwefligen Brennstoffes zu gewährleisten. Es muss hier erwähnt werden, dass diese „ideale“ Umstellung gesetzlich nicht so gefordert wird. Bei den Umstellungszeiten

sind zeitliche Spielräume gestattet. Nach bisherigen Auskünften von Kreuzfahrtreedereien soll das o. g., angenommene Procedere für die meisten Kreuzfahrtschiffe zutreffend sein.

Szenario 3.1: Es wurden die „Restemissionen" berechnet unter Einsatz von Landstrom. Diese resultieren aus einer angenommenen Umschaltdauer von je 0,5 Stunden nach Festmachen an bzw. vor Ablegen von der Pier. Dieses Szenario wurde mit 1,5% Schwefelgehalt im Brennstoff gerechnet, da dieser Brennstoff bis zur Pier auch ab 2010 gefahren werden kann. Der Energieumsatz für Landstrom liegt hier bei ca. 7.690 MWh mit Berücksichtigung der o. g. Umschaltdauern zwischen Generatorbetrieb an Bord zur landseitigen Stromversorgung.

Szenario 3.2: Hier sind zu den Emissionen aus Szenario 3.1 die Kraftwerksemissionen hinzu addiert worden, die sich aus der Erzeugung der erforderlichen Energiemenge (7.690 MWh) für den Landstrom ergeben. Die angesetzten Emissionsfaktoren stammen aus einer Veröffentlichung mit Angaben für den gesamtdeutschen Kraftwerkspark für Mittelspannungsstrom. Leitungsverluste, Wirkungsgrade oder weitere Verluste bei der Umspannung des Stroms vom landseitigen Kraftwerk bis zum Einspeiseort im Schiff sind hierbei nicht berücksichtigt worden.

Ergänzend sind in der unteren Zeile der Tabelle 6-1 die für die Kraftwerksemissionen ermittelten Zahlen mit aufgeführt. Für HC konnten keine sicheren Werte für die Kraftwerksemissionen ermittelt werden.

	Brennstoff-verbrauch	**CO2**	**CO**	**NOx**	**HC**	**SO2**	**Partikel**
Szenario 1 **(1,5% Schwefel)**	1.584.279	4.934.431	2.935	89.603	4.875	47.528	9.250
Szenario 2 **(0,1% Schwefel)**	1.584.279	4.934.431	2.935	89.603	4.875	3.169	2.878
Szenario 3.1 **(1,5% Schwefel+Landstrom)**	102.476	319.174	190	5.796	315	3.074	598
Szenario 3.2 **(mit KW-Emissionen Landstrom)**	----	5.171.820	1.866	10.218	---	8.281	1.175
Anteilige Kraftwerks-Emissionen für Landstrom	----	4.852.646	1.677	4.422	---	5.206	577

Tabelle 6-1: Emissionen aus Generatorbetrieb 2010 am Liegeplatz in [kg]

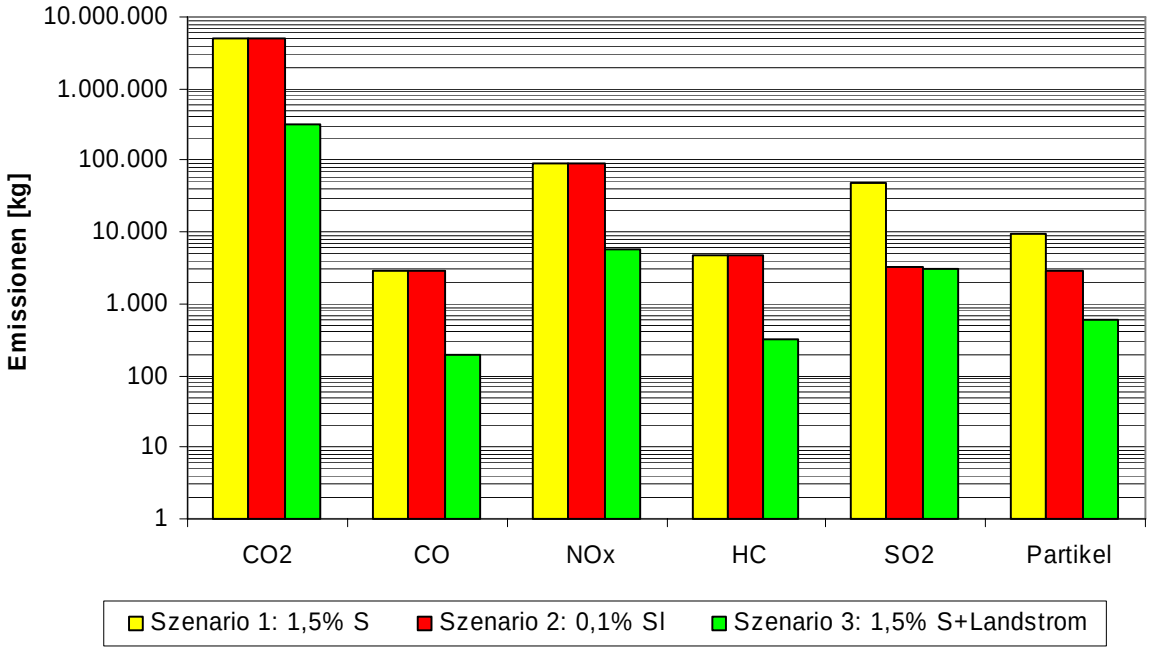

Abb. 6-1: 3 Szenarien: Emissionen aus Generatorbetrieb 2010

6.2.2 Emissionen aus Hilfskesselbetrieb

Ergänzend zu den Emissionsberechungen des Generatorbetriebes, wurden weiterhin die Emissionen aus dem Hilfskesselbetrieb ermittelt. Die Annahmen aus Kapitel 3.3.3 wurden hier ebenfalls angewendet. Zwei Szenarien mit je einem Brennstoff mit 1,5% Schwefelgehalt und mit 0,1%S-Gehalt, wobei Ersterer, wie im Generatorbetrieb, zum Vergleich mit berechnet wurde. Auch für den Kesselbetrieb an der Pier sind ab 2010 nur noch Brennstoffe erlaubt, deren Schwefelgehalt 0,1% nicht übersteigt.

	Brennstoff-verbrauch	CO2	NOx	HC	SO2	Partikel
Brennst. mit 1,5% Schwefel	502.057	1.563.608	4.781	956	15.062	848
Brennst. mit 0,1% Schwefel	502.057	1.563.608	4.781	956	1.004	848

Tabelle 6-2: Emissionen aus Kesselbetrieb 2010 am Liegeplatz in Kilogramm [kg]

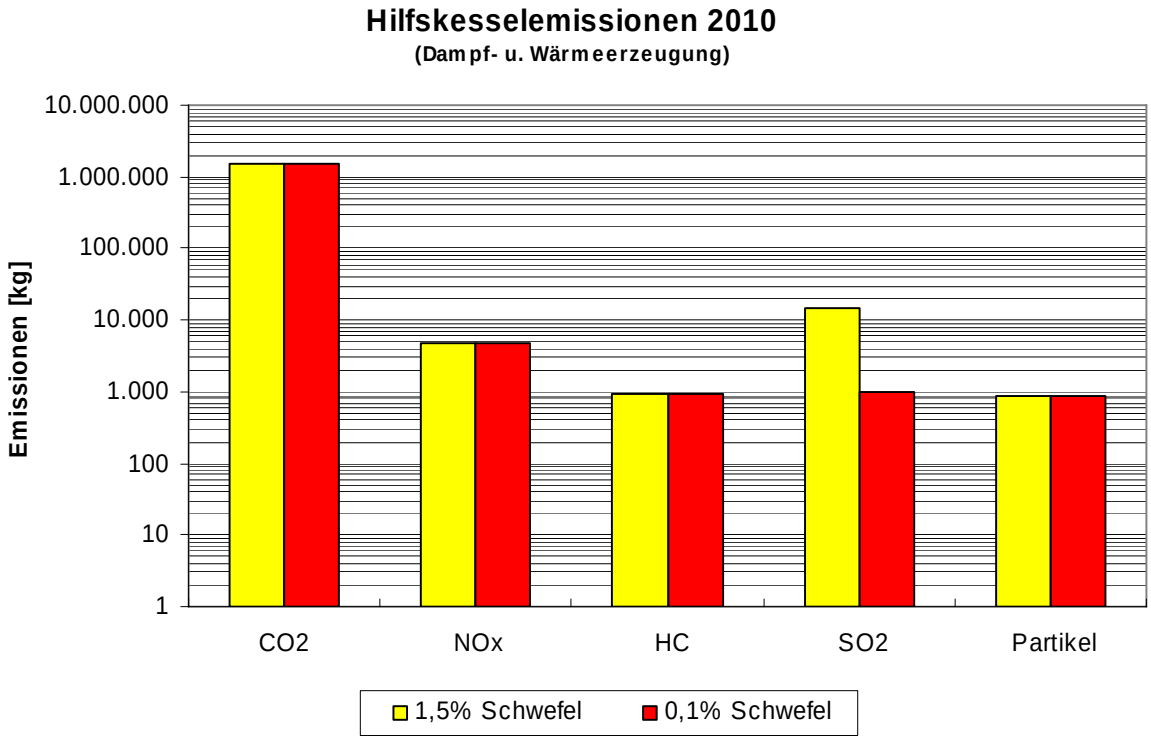

Abb. 6-2: 2 Szenarien: Emissionen aus Kesselbetrieb 2010

6.2.3 Emissionen aus Generator- und Hilfskesselbetrieb an Bord der Schiffe

Abschließend werden in Tabelle 6-3 die zu erwartenden Gesamtemissionen für 2010 aus Motoren- und Hilfskessel-Betrieb zusammen gezeigt. Das Szenario 2 zeigt die Werte, die sich ab der dann gültigen Forderung nur noch Brennstoffe mit Schwefelgehalten von maximal 0,1%S am Liegeplatz verwenden zu dürfen, ab 2010 voraussichtlich ergeben werden.

Bis auf das Schwefeldioxid, zeigen sich deutlich die Vorteile einer Landstromversorgung.

	Brennstoff-verbrauch	**CO2**	**CO**	**NOx**	**HC**	**SO2**	**Partikel**
Szenario 1 **(1,5% Schwefel)**	2.086.337	6.498.038	2.935	94.384	5.831	62.590	10.098
Szenario 2 **(0,1% Schwefel)**	2.086.337	6.498.038	2.935	94.384	5.831	4.173	3.726
Szenario 3.1 **(1,5% Schwefel+Landstrom)**	604.533	1.882.782	190	10.577	1.272	4.078	1.446

Tabelle 6-3: Gesamtemissionen aus Generator- und Hilfskesselbetrieb 2010 am Liegeplatz in [kg]

7 Analyse der möglichen Verringerung der Emissionen

Grundsätzlich ist bei allen Möglichkeiten zur Verringerung der Emissionen von Schiffen am Liegeplatz zu prüfen, ob die notwendigen Installationen und Investitionen an Bord der Schiffe und an Land technisch und rechtlich durchsetzbar sind. Dabei sind wirtschaftliche Gesichtspunkte mit einzubeziehen. Bisher sind nur einzelvertraglich geregelte Lösungen verwirklicht worden.
Besondere Aufmerksamkeit ist dabei der Klärung von Verantwortlichkeiten bei der Verbindung von schiff- und landseitigen Installationen und deren Betrieb zu widmen.
Ferner sind in allen Überlegungen für landseitige Anlagen die notwendigen Zeiten für Planung, Genehmigung und Installation mit in Betracht zu ziehen.

7.1 Vergleichende Beurteilung der Möglichkeiten

Die beschriebenen Möglichkeiten zur Abgasreinigung (land- und schiffseitig) erscheinen für existierende Schiffe zurzeit nicht realisierbar. Für Neubauten werden in Zukunft die schrittweise verschärften IMO-Anforderungen zum Tragen kommen.

Beim Einsatz von Gasen an Bord von Schiffen sind weitreichende Modifikationen in der Brennstoff- und Motorenanlage notwendig. Ferner ist eine entsprechende Versorgungsinfrastruktur an Land vorzuhalten.
Denkbar ist in diesem Zusammenhang die Aufstellung eines oder mehrerer landseitigen Gasmotoren zur elektrischen Energieversorgung des Schiffes. Für das Schiff und die Verbindung zur Landanlage gelten dann ebenfalls die erwähnten Anforderungen.

Für den Einsatz von Brennstoffzellen gelten im Grundsatz die gleichen Bedingungen wie für Gasmotoren. Denkbar wäre der Betrieb einer Brennstoffzelle an Land im Rahmen einer Pilotanwendung.

Die Versorgung der Schiffe mit Landstrom erscheint im Vergleich die derzeit beste Möglichkeit zum Ersatz von dieselgetriebenen Schiffsgeneratoren. Trotz aller noch bestehenden Unsicherheiten im Hinblick auf eine noch nicht vorhandene weltweit gültige Standardisierung könnte zumindest eine Vereinbarung mit Reedereien getroffen werden, die mit ihren Schiffen Hamburg sehr oft anlaufen (wollen).

7.2 Zusammenfassung und Vorschlag

Im Hinblick auf die bordseitig erforderlichen Investitionen, die voraussichtlich nur beim mehrfachen Anlaufen pro Jahr begründbar sind, ist zu erwarten, dass nicht alle Schiffe diese Investitionen tätigen werden. Die oben

ermittelten Minderungen der Emissionen werden sich daher nicht in der genannten Größenordnung erreichen lassen.

Im Jahre 2010 wird die Nutzungsdauer der landseitigen Einrichtungen, selbst bei vollständiger Beteiligung aller Schiffe nur bei ca. 2.200 Stunden, entsprechend 25 Prozent der maximal möglichen Nutzungsdauer liegen. Verbunden mit den hohen technischen Anforderungen erscheint ein Betrieb unter rein wirtschaftlicher Betrachtung nicht vertretbar.

Mit Wirkung vom 1. Januar 2010 darf während der Liegezeit nur noch Brennstoff mit einem maximalen Schwefelgehalt von 0,1% verwendet werden. Dadurch ergibt sich wegen der geringeren Schwefel- und Partikelemission eine wesentliche Verbesserung auf die lokale Luftreinhaltung. Es wäre denkbar, diese Anforderung für die Liegeplätze in der Hafencity und in Altona vorzuziehen. Dies hätte den Vorteil, dass schnell eine positive Auswirkung auf die Luftqualität erreicht werden kann. Für die betroffenen Reeder ergäbe sich zwar die Notwendigkeit, die Investition zur Anpassung der Motoren und Kessel and den neuen Brennstoff früher als gefordert vorzunehmen. Dem steht gegenüber, dass die Reeder mit dem erhöhten Umweltstandard ihrer Schiffe werben könnten.

Lösungsansatz	Abschnitt	Basistechnologie		Installationen an Land		Verbindungs- und Regelungs-technologie (Bord-Land)	Genehmigungs-verfahren		Bauaufwand		Entwicklungsaufwand		Zeithorizont bis zur Einführung	Kosten		Realisier-barkeit
		an Land	an Bord	an Land	an Bord		an Land	an Bord	an Land	an Bord	an Land	an Bord		An Land	An Bord	
1a Gase als Brennstoff	5.1	vorhanden	In Entwicklung	Gasversorgung	Gasübernahme und -verteilungssysteme, Gaslagerung	Gasbetankung von Schiffen für kleinere Einheiten erprobt	Erprobt	In Entwicklung	Eher gering	Aufwendiger Umbau der Brennstoffver-sorgung sowie Installation der Brennstoffzellen	Gering	Hoch wegen Anpassung der Brennstoffüber -nahme und -verteilung	Unklar, eher Jahre	Gering	Hoch, wesentliche Umbauten, Kosten für Komponenten	Mittel
1b Gasmotoren und -Kessel	5.2	vorhanden	In Entwicklung	Gasversorgung	Gasspeicherung und -verteilung, Umrüstung von Motoren und Kesseln	Gasbetankung von Schiffen für kleinere Einheiten erprobt	Vorhanden	In Entwicklung	Gering	Aufwendiger Umbau der Brennstoffver-sorgung	Gering	Hoch, wenn existierende Motoren umgerüstet werden sollen	Unklar, eher Jahre	Gering	Hoch, wesentliche Umbauten, Kosten für Komponenten	Gering
2 Brennstoff-zellen	5.3	vorhanden	In Entwicklung	Gasversorgung	Auch Reformierung von Dieselöl möglich, sonst Gasspeicherung und -verteilung, Brennstoffzellen	Gasbetankung von Schiffen für kleinere Einheiten erprobt	Vorhanden	In Entwicklung	Gering	Aufwendiger Umbau der Brennstoffver-sorgung sowie Installation der Brennstoffzellen	Eher Gering	Mittel, Integration in E-System	Eher Jahre, da Leistungen noch zu gering	Gering bis mittel	Hoch	Gering
3a Abgasreinigung an Bord, SCR-Catalysator	5.4	vorhanden	vorhanden	Keine (ggf. Versorgung mit Urea	Kataysator, Ureaspeicherung und - versorgung	Nicht notwendig	Nicht notwendig	Klassifikation		Aufwendiger Umbau der Abgasanlage	Nicht notwendig	Gering, Technologie vorhanden. Teillastbetrieb der Motoren problematisch	Schiffsspezifisch, abhängig von geplantem Werftaufenthalt	Gering	Hoch, wesentliche Umbauten, Kosten für Komponenten	Mittel bis gering wg. Kosten
3b Abgasreinigung an Bord, Scrubber	5.4	vorhanden	vorhanden	Annahme-facilities	Scrubbersystem	Nicht notwendig	Nicht notwendig	Bekannt	Gering	Sehr hoch, längerer Werftaufenthalt	Nicht notwendig	Gering, Hersteller vorhanden	Schiffsspezifisch, abhängig von geplantem Werftaufenthalt	Gering, Auffang- und Entsorgungsko sten	Hoch, wesentliche Umbauten, Kosten für Komponenten	Gering
3c Abgasreinigung an Land, Absaugung am Schornstein	5.4	Reinigungs-systeme vorhanden, Verbindungst echnik Neuland	Nicht notwendig	Reinigungs-. Steuerungs- und Verbindungssys teme	keine	Vollständige Neuentwicklung	Unklar	Unklar, Sicherheits-bedenken	Hoch, ästhetisch problema-tisch	Gering	Hoch, Hersteller der Verbindungstechnik unklar	Gering	Jahre	Hoch	Gering	Unwahr-scheinlich
3d Abgasreinigung an Land, Abgasaustritt an beiden Schiffsseiten	5.4	Reinigungs-systeme vorhanden, Verbindungst echnik Neuland	vorhanden	Reinigungs-. Steuerungs- und Verbindungssys teme	Neue Abgasführung, Verbindungstechnik	Vollständige Neuentwicklung	Unklar	Unklar, Sicherheits-bedenken	Hoch, ästhetisch problema-tisch	Hoch, ggf. Verlust an Kabinenkapazität	Hoch, Hersteller der Verbindungstechnik unklar	Hoch wegen Anpassung der Motoren-steuerung	Schiffsspezifisch, abhängig von geplantem Werftaufenthalt	Hoch	Hoch, wesentliche Umbauten, Verlust an Kabinen-kapazität wahrscheinlic h	Unwahr-scheinlich

4 Landstrom-versorgung	5.5	Vorhanden	vorhanden	Energieversorgung, Spannungs- und Frequenzanpassung	Anschluss an Bordsystem, sicherheits-technische Anpassungen	Noch nicht genormt, Einzellösung erforderlich	Vorhanden, Standard-genehmi-gungsver-fahren	Klassifikation	Hoch, abhängig von vorhandener Infrastruktur	Mittel	Vorhanden	Vorhanden	Abhängig von landseitigen Genehmigungsverfahren, Bauzeit	Hoch	Mittel	Gut,

Tabelle 7-1: Gesamtübersicht der technischen Ansätze zur Verringerung von Emissionen

Im Hinblick auf den Hilfskesselbetrieb muss erwähnt werden, dass die in den Gruppen 1 und 3 genannten Lösungsansätze grundsätzlich auch die Emissionen aus deren unvermeidlichen Betrieb signifikant senken können. Für den Einsatz von Brennstoffzellen, Gruppe 2, können zumindest potenziell deren relative heiße Abwärmeströme zur Erzeugung von Heizdampf genutzt werden. Beim Einsatz von Landstrom, Gruppe4, sind bisher keine Lösungsansätze für eine ebenso drastische Verminderung dieser Emissionen absehbar wie bei den Dieselgeneratoren, die damit an der Pier abgestellt werden.

8 Quellenangaben

1) Amt für Umweltschutz, Mülheim an der Ruhr: Heizspiegel Mülheim an der Ruhr 2003; Emissionsfaktoren gesamtdeutscher Kraftwerkspark

2) Lövblad, Gun, Erik Fridell: Experiences from use of some techniques to reduce emissions from ships, Göteborg 2006-05-08

3) IMO, Note by the Secretariat:: Report on the outcome of the Informal Cross Government/Industry Scientific Group of Experts established to evaluate the effects of the different fuel options proposed under the revision of MARPOL Annex VI, Submission BLG 12/6/1,

4) EUROPEAN COMMISSION, Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants, July 2006, p.76

5) Götze, H.-J., C. Kurok: Emission of Particulate Matter from Marine Diesel Engines, OPRF Expert Meeting for Emission Control, 2008-01-24

6) G. Zikoridse, G.: Stand der Technik bei Partikelfiltern für Dieselmotoren im Einsatz unter Tage, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik

7) D. McLerran: US West Coast Ports: plans and technology introduction to improve air quality, 5th Green Ship Technology Conference, March 2008, Rotterdam

8) Holger Grubel, Gerald Newi: Praktische Erfahrungen mit der Phosphorsauren Brennstoffzelle, Forschungsverbund Sonnenenergie „Themen 1999/2000“, S.65 ff.

9) M. Blesl, M. Ohl u.A.: Marktentwicklungen bei stationären Brennstoffzellen, eBWK Bd 59(2007) Nr.12

10) G. Würsig: Brennstoffzellensystem für Seeschiffe – ein Überblick-, STG Sprechtag, Möglichkeiten der Energieeinsparung im Schiffsbetrieb, Hamburg 2007-03-22

11) Fuel Cells For Ships FCSHIP, Machbarkeitsuntersuchung, 2002/2004, 21 Partner aus 6 Ländern